



关于钛锆钼合金（TZM）最流行的 Q&A

前言

随着半导体、新能源、航空航天、核聚变、真空热处理及高端装备制造产业的快速发展，钛锆钼合金（TZM）作为全球应用最成熟的钼基高温合金之一，受到越来越多工程师、科研人员、采购人员及设备制造企业的关注。

作为长期专注于高性能难熔金属材料研发与生产的专业企业，中钨智造结合多年工程实践和行业经验，策划编写了本系列钛锆钼合金（TZM）热门 Q&A，希望以通俗易懂的问答形式，为读者提供更加专业、系统、实用的技术参考。本系列问题来源于全球搜索引擎、行业论坛、客户咨询、技术交流以及中钨在线多年的数据积累和市场调研，内容涵盖 TZM 基础知识、性能特点、制造工艺、产品规格、质量检测、机械加工、焊接技术、典型应用、行业发展及未来趋势等多个方面，力求全面解答用户最关注的问题。

本系列问答不仅介绍材料参数，更结合工程应用，对材料选型、制造难点、质量评价及产业发展进行分析，帮助读者深入理解 TZM 的技术特点和应用价值。中钨智造结合全球产业发展和最新技术进展，努力打造了关于钛锆钼合金（TZM）系统、专业、具有工程实践价值的知识库，为高性能钼基材料的发展与应用贡献力量。

中钨智造科技有限公司

2026 年 7 月 16 日

Q: 定制 TZM、TZC、MHC 钼合金，需要向生产商中钨智造提供哪些资料？

中钨智造总结几十年的经验认为，为了提高报价准确率、缩短沟通时间，并确保产品满足使用要求，建议您在向中钨智造询价或定制金属钼及其合金制品，如 TZM（钛锆钼合金）、TZC（钛铈钼合金）、MHC（钼铪碳合金）时，请一次性提供以下资料。

1、产品图纸

请提供 PDF 图纸，最好同时提供 STEP、STP 等三维模型。如无正式图纸，也可提供样品、照片或草图。

2、材料要求

注明所需材料牌号（TZM、TZC、MHC）或执行标准、指定材料牌号。

3、产品规格

请注明产品类型（棒材、板材、管材、丝材、坩埚、靶材、异形件等）、尺寸、公差及采购数量。

4、使用工况

请说明工作温度、工作环境（真空、保护气氛或空气）、主要用途及特殊要求，以便推荐最合适的材料和工艺。

5、表面及检测要求

如有要求，请注明表面状态（车光、磨光、抛光等）及检测项目（化学成分、密度、硬度、显微组织、机械性能等）。

6、交货要求

请说明交货时间、收货地点及包装要求。

资料越完整，报价越准确，交货周期也越容易确认。如果您不确定应选择 TZM、TZC 还是 MHC，也可直接提供产品用途和使用条件，由中钨智造工程师协助进行材料选型和工艺建议。

中钨在线联系信息

中钨智造科技有限公司（CTIA GROUP LTD）

地址：中国福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼，邮编 361008

电话：+86 592 512 9696、+86 592 512 9595 电子邮箱：sales@chinatungsten.com

官方网站：<http://ctia.group> www.ctia.com.cn

欢迎将产品图纸、技术要求或样品资料发送至上述邮箱，中钨智造将尽快为您提供专业的材料选型建议、制造方案及准确报价。



Q1 什么是钛锆钼合金（TZM）？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是一种以钼（Mo）为基体，通过添加少量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）形成弥散强化相的高性能钼基合金。它是目前全球应用最广泛、产业化最成熟的高温钼合金之一，广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、核工业、医疗设备及高端科研装备等领域。TZM 最早由美国在 20 世纪 60 年代开发，其设计目标是在保持钼高熔点、高导热率和低热膨胀系数等优良特性的基础上，进一步提高材料的高温强度、抗蠕变性能和长期组织稳定性。经过几十年的发展，TZM 已经成为国际公认的工业标准高温钼合金。

TZM 的典型化学成分以钼为主体，通常含有约 0.4%~0.55%的钛、0.06%~0.12%的锆以及 0.01%~0.04%的碳，其余为钼及少量不可避免的杂质元素。在烧结和热加工过程中，钛、锆与碳形成细小、均匀分布的 TiC 和 ZrC 碳化物颗粒，这些弥散强化相能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，从而显著提高材料的再结晶温度、高温强度及抗蠕变能力。与纯钼相比，TZM 最大的特点是综合性能更加均衡。它不仅保留了钼约 2623 °C的高熔点、优异的导热性能、较低的热膨胀系数和低蒸气压，还具有更高的高温强度、更好的尺寸稳定性以及更长的高温使用寿命。因此，在 1000~1400 °C长期工作的环境中，TZM 通常能够表现出明显优于纯钼的性能。

目前，TZM 主要采用粉末冶金工艺制造，包括高纯钼粉混料、压制成形、真空烧结、热加工、

热处理和精密机械加工等工序。成熟的制造工艺使 TzM 能够加工成棒材、板材、薄板、管材、坩埚、靶材、热场部件以及各种复杂异形件，满足不同工业领域的需求。由于兼具优异的高温性能、成熟的制造工艺和较高的性价比，TzM 已成为单晶硅生长炉、碳化硅（SiC）晶体生长设备、氮化镓（GaN）外延设备、真空烧结炉、X 射线 CT 旋转阳极、高温模具以及航空航天热端部件的重要材料。

中钨智造认为，TzM 是一种通过 TiC 和 ZrC 弥散强化实现性能提升的高温钼基合金，它在保持钼优异物理性能的基础上，大幅提高了高温力学性能和长期服役稳定性。目前，TzM 仍然是全球高温钼合金应用最广泛、工程经验最丰富、综合性能最均衡的工业标准材料。

Q2 钛锆钼合金（TzM）与纯钼有什么区别？

TzM 和纯钼都属于钼基材料，但两者并不是同一种材料。纯钼属于高纯金属，而 TzM 是在纯钼基础上加入少量钛、锆和碳，通过形成弥散强化相而开发出的高性能钼合金。虽然两者都具有高熔点、优良导热性能和良好的真空适应性，但在组织结构、力学性能、高温性能以及应用领域方面存在明显差异。

最根本的区别在于材料组成。纯钼几乎全部由钼元素组成，通常钼含量达到 99.95%以上；而 TzM 则在钼基体中加入约 0.5%的钛、约 0.08%的锆以及少量碳。这些元素在烧结和热加工过程中形成细小均匀的 TiC 和 ZrC 颗粒，对基体产生弥散强化作用。由于强化机制不同，两者的高温性能差异尤为明显。纯钼虽然具有较高熔点，但随着温度升高，其强度下降较快，再结晶温度相对较低，长期高温工作时容易发生晶粒长大和蠕变变形。而 TzM 通过 TiC 和 ZrC 颗粒有效抑制晶界迁移，提高了再结晶温度，使材料在 1000~1400 °C范围内仍能保持较高强度和较好的尺寸稳定性。在抗蠕变性能方面，TzM 同样明显优于纯钼。纯钼长期承受高温载荷时容易发生缓慢塑性变形，而 TzM 由于强化相能够阻碍位错运动，其蠕变速率明显降低，更适合长期连续工作的高温设备。

两种材料在导热性能方面都保持较高水平。虽然加入少量合金元素后，TzM 导热率略低于纯钼，但仍然远高于多数耐热合金，完全能够满足半导体热场、高温真空设备等应用对于快速散热的要求。加工性能方面，两者均可采用车削、铣削、磨削、电火花加工等工艺，但由于 TzM 强度更高、硬度更大，其切削难度略高于纯钼。不过，TzM 经过多年工业应用，已经形成成熟的加工工艺，能够稳定制造各种高精度零件。

从应用角度来看，纯钼主要用于一般高温结构件、电极、加热元件、溅射靶材及部分化工设备。而 TzM 更多用于要求更高的高温装备，例如单晶硅生长炉热场部件、SiC 和 GaN 晶体生长设备、真空烧结炉、高温模具、航空航天热端结构件以及医疗 CT 旋转阳极等。

钛锆钼合金（TzM）与纯钼两种材料的主要区别

对比项目	TzM	纯钼
材料类型	钼基合金	高纯金属钼
主要成分	Mo、Ti、Zr、C	Mo
强化机制	TiC、ZrC 弥散强化	无强化相
高温强度	明显更高	较低
再结晶温度	更高	较低

对比项目	TZM	纯钼
抗蠕变性能	优异	一般
导热性能	很高	略高于 TZM
加工难度	略高	相对容易
典型应用	半导体、航空航天、真空炉	电极、加热件、普通高温结构件

中钨智造认为，纯钼和 TZM 并不存在简单的优劣关系，而是适用于不同的应用场景。如果工况温度较低、受力较小且更注重经济性，纯钼通常能够满足要求；如果设备需要长期在高温、高载荷或高真空环境下稳定运行，则 TZM 凭借更高的高温强度、更优异的抗蠕变性能和更好的尺寸稳定性，通常是更加可靠的选择。

Q3 钛锆钼合金（TZM）为什么比纯钼强？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是在纯钼基础上开发的高性能钼基合金。虽然 TZM 中钛、锆等合金元素的添加量不足 1%，但材料的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性却比纯钼有了显著提升。这种性能提升并不是因为合金元素本身具有更高的强度，而是由于它们在材料内部形成了稳定、高效的强化组织。

TZM 比纯钼强的根本原因，在于弥散强化机制。在粉末冶金烧结及后续热加工过程中，加入的钛、锆和碳会反应生成大量细小且均匀分布的 TiC 和 ZrC 碳化物颗粒。这些碳化物牢固分散在钼基体中，能够有效阻碍位错运动。当材料受到外力时，位错是金属发生塑性变形的主要方式，而 TiC 和 ZrC 颗粒会像一道道障碍物，使位错难以移动，因此材料需要承受更大的应力才会发生变形，高温强度也随之提高。除了提高强度之外，TiC 和 ZrC 颗粒还能显著抑制晶界迁移。纯钼在高温下容易发生再结晶，原有细晶组织逐渐长大，导致材料强度迅速下降。而 TZM 中的强化颗粒能够有效固定晶界位置，延缓甚至阻止晶粒长大，从而显著提高再结晶温度，使材料在长期高温工作条件下仍能保持较高的强度和稳定的组织结构。

抗蠕变性能的改善，也是 TZM 优于纯钼的重要原因。蠕变是材料在高温和长期载荷作用下缓慢发生塑性变形的现象。由于 TiC 和 ZrC 颗粒能够阻碍位错攀移和晶界滑移，TZM 在 1000～1400 °C 环境中的蠕变速率明显低于纯钼，因此更加适用于长期连续工作的高温设备。

此外，热加工过程对 TZM 性能也有重要影响。锻造、轧制等工艺能够进一步细化晶粒，并使强化颗粒更加均匀地分布于基体中。这种细晶强化与弥散强化共同作用，使 TZM 获得了优异的综合力学性能。TZM 虽然加入了少量合金元素，但并没有明显牺牲钼原有的优良物理性能。它仍然保持了高熔点、较高导热率、低热膨胀系数和低蒸气压等特点，因此能够在提升高温力学性能的同时，继续满足半导体、航空航天及真空设备对热学性能的要求。

从应用角度来看，正是由于这些强化机制的共同作用，TZM 能够长期用于单晶硅生长炉、SiC 晶体生长设备、高温真空炉、航空航天热端部件及 X 射线 CT 旋转阳极等高温装备，而纯钼在这些工况下往往难以满足长期稳定工作的要求。

中钨智造认为，TZM 比纯钼更强，并不是因为加入了更多合金元素，而是因为少量 Ti、Zr 和

C 形成了细小、稳定、均匀分布的 TiC 和 ZrC 弥散强化相。这些强化颗粒能够有效阻碍位错运动、抑制晶粒长大并降低高温蠕变速率，从而使 TZM 在保持钼优异物理性能的同时，大幅提升了高温力学性能和长期服役可靠性。



Q4 钛锆钼合金（TZM）有哪些主要性能优势？

钛锆钼合金（TZM）是目前全球应用最成熟的高温钼基合金之一，其最大的特点是能够在保持纯钼优异物理性能的基础上，显著提升高温力学性能和长期组织稳定性。因此，TZM 广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理、医疗设备、核工业及高端科研装备等领域。

TZM 最突出的优势，是优异的高温强度。在 1000~1400 °C 范围内，TZM 仍能够保持较高的承载能力，而纯钼在相同温度下强度下降更加明显。因此，对于长期承受高温载荷的设备，TZM 能够提供更高的安全裕度和更长的使用寿命。

优异的抗蠕变性能也是 TZM 的重要特点。在长期高温工作过程中，材料不可避免会发生缓慢塑性变形，而 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的存在，能够有效降低蠕变速率，保持结构尺寸稳定，非常适合高温连续运行设备。

TZM 还具有较高的再结晶温度。由于强化颗粒能够抑制晶界迁移，材料在长期高温环境中不容易发生晶粒粗化，因此能够较长时间保持细晶组织和较高强度。这也是 TZM 能够长期应用于半导体热场和真空炉的重要原因之一。

导热性能优异同样是 TZM 的重要优势。虽然导热率略低于纯钼，但仍远高于多数耐热合金，能够快速传导热量，减少局部过热现象，提高设备温度均匀性。这一特点对于单晶硅、SiC 及 GaN 晶体生长设备尤为重要。

由于钼本身具有较低的热膨胀系数，TZM 同样保持了优异的尺寸稳定性。在频繁加热和冷却过程中，材料热变形较小，有助于保证高精度设备长期稳定运行。

TZM 还具有很低的蒸气压，即使在高温真空环境下，也不易挥发污染工作环境。因此，它广泛应用于半导体制造、真空热处理及高真空科研设备等洁净度要求极高的领域。

加工性能方面，TZM 优于许多其他高温难熔材料。虽然其硬度高于纯钼，但经过成熟工艺仍可进行锻造、轧制、车削、铣削、磨削、电火花加工及电子束焊接等多种加工方式，便于制造各种复杂结构零件。

此外，TZM 还具有较好的抗热震性能。由于导热率高、热膨胀系数低，在快速冷热循环过程中能够有效降低热应力，因此比许多陶瓷材料具有更好的抗热冲击能力。

钛锆钼合金（TZM）的主要性能优势

性能特点	优势表现
高温强度	长期高温下仍保持较高承载能力
抗蠕变性能	高温长期工作变形小
再结晶温度高	晶粒稳定，不易粗化
导热率高	有利于快速散热和温度均匀
热膨胀系数低	尺寸稳定性优异
蒸气压低	真空环境下洁净、不易挥发
抗热震性能好	耐冷热循环能力强
加工性能成熟	可制造各种复杂高精度零件

中钨智造认为，正是由于这些性能优势，TZM 已经成为高温钼合金领域应用最广、工程经验最丰富的工业标准材料。TZM 最大的优势并非某一项性能特别突出，而是在高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性、真空适应性和加工性能之间实现了优异的综合平衡。这种综合优势，使 TZM 能够长期满足半导体、航空航天、真空热处理及高端科研装备等行业对于高温材料的严格要求，并持续保持其在高温钼合金领域的主导地位。

Q5 钛锆钼合金（TZM）的最高工作温度是多少？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是一种专门面向高温环境开发的钼基合金，其最高工作温度并不是一个固定数值，而是取决于工作气氛、受力状态、连续工作时间以及对使用寿命的要求。

一般来说，在真空或惰性气氛条件下，TZM 长期推荐工作温度为 1200~1400 °C，短时间工作温度可达到 1600 °C 左右。在部分特殊工况下，瞬时使用温度甚至可以接近 1800 °C，但此时通常属于短时暴露，并不适合作为长期连续运行温度。

TZM 之所以能够在如此高的温度下长期工作，主要得益于其优异的高温组织稳定性。材料中的 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒能够有效抑制晶粒长大，提高再结晶温度，并降低高温蠕变速率，因此即使在 1000 °C 以上长期服役，仍能够保持较高的强度和尺寸稳定性。TZM 的最高工作温度必须结合工作环境来判断。在高真空环境中，TZM 表现最佳。由于钼具有极低的蒸气

压，即使在 1400 °C 以上，也不会产生明显挥发，因此广泛应用于半导体晶体生长设备、真空热处理炉和高真空科研装置。在氩气、氮气等惰性保护气氛下，TZM 同样能够保持优异性能，可长期用于高温烧结、粉末冶金及高温实验设备。如果处于空气环境，则情况完全不同。钼及 TZM 在约 400~500 °C 开始发生氧化，随着温度升高，氧化速度迅速增加，在 600 °C 以上会形成挥发性的三氧化钼（MoO₃），导致材料快速损耗。因此，TZM 并不适合长期在空气中高温使用，除非采取有效的防护涂层或保护气氛。

除了工作气氛，机械载荷也是决定最高工作温度的重要因素。如果材料长期承受较大的载荷，则需要适当降低工作温度，以减少蠕变变形；如果仅作为隔热件、支撑件或非承载结构，则可以适当提高使用温度。不同应用领域对于工作温度的要求也有所不同。例如，半导体热场部件通常长期工作在 1200~1450 °C；SiC 晶体生长设备部分热场区域可达到 1600 °C 左右；真空烧结炉支撑件一般长期工作于 1100~1400 °C；航空航天热端部件则根据具体工况采用短时高温工作模式。

钛锆钼合金（TZM）典型使用温度参考表

工作环境	推荐工作温度
空气环境	不建议超过 500 °C 长期使用
惰性气氛	1200~1400 °C 长期工作
高真空环境	1200~1400 °C 长期工作
短时间高温	可达 1600 °C 左右
瞬时极限工况	可接近 1800 °C（短时）

虽然 TZM 具有约 2623 °C 的熔点，但熔点并不等于可长期使用温度。工程设计通常以材料能够长期保持强度、抗蠕变性能和组织稳定性的温度作为最高工作温度，而不是以熔化温度作为使用依据。中钨智造认为，TZM 最适宜长期工作于 1200~1400 °C 的真空或惰性气氛环境。在这一温度范围内，材料能够充分发挥高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性的优势，因此成为半导体热场、真空热处理设备及高端科研装备中最成熟、应用最广泛的高温钼合金之一。



Q6 钛锆钼合金（TZM）适用于哪些行业？

钛锆钼合金（TZM）兼具高温强度、高导热率、低热膨胀系数、低蒸气压和优异的真空适应性，因此已经成为全球高温装备制造领域的重要工程材料。经过几十年的产业化应用，TZM 已经广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、核工业、玻璃制造、医疗设备及科研装备等多个行业。

目前，半导体产业是 TZM 最大的应用领域。在单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备中，TZM 广泛用于热场支撑件、加热系统连接件、导流部件及各种高温结构件。由于能够长期保持尺寸稳定并具备优异的导热性能，TZM 对于提高晶体生长质量和设备寿命具有重要作用。

真空热处理行业也是 TZM 的重要市场。各种真空烧结炉、真空退火炉、钎焊炉和粉末冶金烧结设备内部，大量采用 TZM 制造加热元件支撑件、承载平台、连接件和隔热结构件，以满足长期高温真空工作的要求。

在航空航天领域，TZM 主要用于火箭发动机热端部件、高温喷管、燃烧室结构件、高超声速飞行器热防护系统以及各种高温实验设备。其优异的高温力学性能和低热膨胀特性，使其能够适应严苛的热环境。

核工业及聚变研究同样离不开 TZM。在聚变实验装置、高热流实验平台、真空系统、等离子体设备及中子辐照实验中，TZM 常作为高温支撑件、真空结构件及热管理部件使用，为高温科研装备提供稳定可靠的材料保障。

玻璃工业中，TZM 主要应用于高温玻璃熔炉、玻璃成形设备及玻璃纤维生产设备。由于其高温强度高、耐热变形能力强，能够有效提高设备使用寿命和生产稳定性。

金属加工行业同样广泛采用 TZM。例如压铸模芯、热冲压模具、等温锻造模具及各种高温工装，都能够利用 TZM 优异的耐高温性能，提高模具寿命并改善加工质量。

医疗设备领域，TZM 主要用于 X 射线 CT 旋转阳极、高能电子束设备及部分放射诊断设备。高导热率和良好的高温稳定性，有助于快速散热，提高设备运行可靠性。

此外，在科研装备领域，TZM 还广泛应用于电子束设备、离子注入系统、高温实验炉、高真空实验装置、同步辐射设备及各种材料科学研究平台，是众多高端实验设备的重要基础材料。随着人工智能、高性能计算、新能源汽车和第三代半导体产业的发展，TZM 的应用范围还在不断扩大。尤其是在先进半导体制造、高端真空装备及未来聚变能源领域，市场需求预计将持续增长。

钛锆钼合金（TZM）主要应用行业

行业	典型应用
半导体	单晶硅、SiC、GaN 热场部件、晶体生长设备
真空热处理	真空炉、烧结炉、退火炉、钎焊炉
航空航天	火箭发动机、喷管、高超声速飞行器

行业	典型应用
核工业与聚变	聚变实验装置、等离子体设备、高热流部件
玻璃工业	玻璃熔炉、高温成形设备
金属加工	压铸模芯、热冲压模具、等温锻造模具
医疗设备	CT 旋转阳极、电子束设备
科研装备	高温实验炉、电子束系统、离子注入设备

中钨智造认为，TZM 是一种典型的高端装备基础材料，其应用几乎覆盖所有需要长期高温、真空或高热流密度环境的工业领域。其中，半导体产业已经成为 TZM 最大的市场，未来随着第三代半导体、人工智能芯片、聚变能源及航空航天技术的发展，TZM 将在更多高端装备中发挥更加重要的作用。

Q7 为什么半导体设备大量采用钛锆钼合金（TZM）？

半导体制造是目前对材料性能要求最高的工业领域之一。从单晶硅生长到碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）晶体制备，再到外延、生长退火、离子注入和高温真空热处理，整个制造过程都需要设备长期运行在高温、高真空、高洁净度环境中。钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）凭借优异的综合性能，已经成为半导体设备中应用最广泛的高温结构材料之一。

首先，TZM 具有优异的高温强度。半导体热场设备通常需要长期工作在 1200~1600 °C 甚至更高的温度范围内，普通金属材料容易发生软化和变形，而 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的作用，在高温下仍能够保持较高的机械强度，确保热场结构长期稳定运行。

其次，TZM 具有出色的尺寸稳定性。晶体生长过程中，对温度场均匀性要求极高，如果热场部件发生变形，将直接影响晶体质量、位错密度和良率。TZM 热膨胀系数较低，高温蠕变速率小，能够长期保持尺寸精度，有助于稳定晶体生长环境。

导热性能优异也是 TZM 的重要优势。相比多数耐热合金，TZM 具有更高的导热率，可以快速传导热量，降低局部过热现象，使热场温度更加均匀。这对于单晶硅、SiC 及 GaN 晶体生长尤为重要，因为均匀稳定的温度分布直接决定晶体质量。

半导体设备通常工作于高真空环境，因此材料必须具有极低的蒸气压和良好的真空兼容性。TZM 在高温下蒸发极少，不易释放挥发性物质，也不会对晶体和真空系统造成污染，因此能够满足半导体制造对于洁净度的严格要求。

此外，TZM 还具有良好的抗热疲劳性能。半导体设备需要频繁经历升温、保温和冷却循环，材料必须能够承受反复热循环而不产生裂纹或永久变形。TZM 较高的导热率和较低的热膨胀系数，使其能够有效降低热应力，提高设备使用寿命。

从制造角度来看，TZM 已经形成成熟的产业体系。无论是棒材、板材、管材还是各种复杂异形件，都能够通过成熟的粉末冶金和精密加工工艺稳定制造，保证设备制造商获得尺寸精确、性能稳定的一致性产品。

随着人工智能芯片、高性能计算、新能源汽车和第三代半导体快速发展，全球晶圆厂不断扩建，对高端晶体生长设备和热处理设备的需求持续增加，这也进一步推动了 TzM 在半导体产业中的广泛应用。

中钨智造认为，半导体设备大量采用 TzM，并不是因为其单项性能最好，而是因为它在高温强度、导热性能、尺寸稳定性、真空洁净性、抗热疲劳能力和加工制造成熟度之间实现了最佳平衡。这种综合优势，使 TzM 成为当前半导体热场系统最成熟、最可靠的高温工程材料。

Q8 钛锆钼合金（TzM）在单晶硅生长炉中有哪些应用？

单晶硅是集成电路、功率器件、传感器及光伏产业的重要基础材料，而单晶硅生长炉则是整个晶圆制造产业链中的核心装备。在直拉法（CZ）和区熔法（FZ）单晶硅生长过程中，热场系统需要长期工作于高温真空环境，并保持极高的温度稳定性和结构精度。由于钛锆钼合金（TzM）具有优异的高温性能，因此成为单晶硅生长炉中最重要的高温结构材料之一。

TzM 最主要的应用，是制造热场支撑结构件。热场系统由加热器、隔热屏、导流部件、支撑框架及连接结构组成，这些部件长期承受 1200~1500 °C 高温，并需要保持稳定的几何尺寸。TzM 能够有效抵抗高温蠕变和热变形，保证热场结构长期保持设计精度。

在加热器支撑系统中，TzM 广泛用于支撑杆、连接件、固定架及安装构件。这些零件不仅需要承受高温，还需要承受热场重量和热应力。由于 TzM 高温强度高、尺寸稳定性好，因此能够显著提高整套热场系统的可靠性。

TzM 还用于各种导流部件和热场调节结构。通过合理设计导流板和支撑件，可以优化炉内热流分布，提高温度均匀性，从而改善晶体生长条件，降低位错和缺陷，提高晶圆品质。

对于大尺寸晶圆生产，TzM 的重要性更加突出。随着 300 mm 晶圆成为主流，更大尺寸晶体的发展趋势不断推进，热场系统尺寸越来越大，对材料抗变形能力提出了更高要求。TzM 优异的抗蠕变性能和较低的热膨胀系数，使其能够满足大型热场长期稳定工作的需求。

在单晶硅生长过程中，材料洁净性同样十分重要。TzM 具有极低的蒸气压，在高温真空环境下不会明显挥发，也不会释放大量杂质，因此能够有效避免晶体污染，保证硅单晶纯度。

此外，TzM 优异的导热性能有助于快速传导热量，使热场温度分布更加均匀。这对于控制晶体生长速度、稳定固液界面以及提高晶体完整性具有重要意义。

目前，TzM 在单晶硅生长炉中的典型应用包括热场支撑框架、加热器支撑件、导流板及热流调节件、固定夹具和连接件、高温螺栓及紧固结构、隔热系统支撑件、热场安装底座及其他长期高温结构件。这些部件虽然不是直接接触熔融硅液，但却决定着整个热场系统的稳定性，因此对材料性能要求极高。随着人工智能芯片、高性能计算和先进制造持续推动晶圆需求增长，全球单晶硅设备不断扩建，对高品质 TzM 热场部件的需求也持续增加。未来，大尺寸晶圆、更高效热场设计以及更长设备寿命，将继续推动 TzM 在单晶硅生长炉中的应用升级。

中钨智造认为，TZM 已经成为现代单晶硅生长炉热场系统不可缺少的关键材料。凭借优异的高温强度、尺寸稳定性、导热性能和真空洁净性，TZM 能够有效提高热场稳定性、改善晶体生长环境并延长设备使用寿命，是高品质单晶硅制造的重要材料基础。



Q9 钛锆钼合金（TZM）为什么适用于 SiC 和 GaN 晶体生长？

碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）属于第三代半导体材料，是新能源汽车、光伏逆变器、轨道交通、5G 通信、人工智能服务器和高功率电子器件的重要基础材料。与传统硅晶体相比，SiC 和 GaN 晶体的生长温度更高、工艺更复杂，对设备材料的要求也更加严格。钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）正是目前第三代半导体晶体生长设备中应用最广泛的高温结构材料之一。

首先，SiC 晶体生长属于超高温工艺。物理气相传输法（PVT）生长 SiC 时，炉内温度通常达到 2000~2400 °C，热场外围结构件长期处于 1200~1700 °C 甚至更高的环境中。虽然 TZM 并不直接接触 SiC 升华源，但其作为热场支撑件、连接件和高温结构件，必须在长期高温条件下保持足够的机械强度和尺寸稳定性。

TZM 最大的优势之一，是优异的高温强度和抗蠕变性能。材料中的 TiC 和 ZrC 弥散强化相能够有效抑制晶粒长大和高温变形，使热场系统长期保持稳定几何尺寸，从而维持炉内温度场的稳定性。对于 SiC 晶体而言，温度场哪怕发生微小变化，都可能影响晶体生长速度、缺陷密度和最终良率。

其次，TZM 具有较高的导热率。SiC 和 GaN 晶体生长需要精确控制热流分布，高导热材料能够更均匀地传递热量，减少局部热点，改善晶体内部温度梯度，提高晶体质量。

低热膨胀系数也是 TZM 的重要优势。在晶体生长过程中，设备需要经历多次升温 and 降温循环。如果热场部件因热膨胀产生较大变形，将导致温度场变化甚至装配精度下降。TZM 热膨胀较小，有助于保持整个热场系统的长期稳定。

此外，TZM 具有极低的蒸气压和良好的真空洁净性。SiC 和 GaN 晶体生长通常在高真空或惰性气氛下进行，材料不能释放挥发性杂质，否则容易污染晶体。TZM 在高温真空环境中蒸发极少，不易污染晶体，因此非常适合作为高纯热场材料。

在 GaN 产业中，虽然外延生长温度低于 SiC，但 GaN 衬底制备、高温退火以及部分晶体生长设备同样需要长期稳定的高温结构材料。TZM 凭借成熟的制造工艺和可靠的高温性能，同样广泛应用于相关设备。

目前，TZM 在 SiC 和 GaN 设备中的典型应用包括热场支撑件、导流板、连接件、固定夹具、高温框架、加热系统支撑结构及各种异形高温部件。这些零件虽然不直接参与晶体形成，但对于维持稳定温度场和提高设备寿命具有决定性作用。

随着新能源汽车、电力电子、人工智能数据中心和高速通信快速发展，第三代半导体产业保持高速增长，SiC 和 GaN 晶体生长设备持续扩产，也将进一步推动高品质 TZM 材料需求不断增加。

中钨智造认为，TZM 适用于 SiC 和 GaN 晶体生长，并不仅仅因为其耐高温，而是因为它能够同时提供优异的高温强度、尺寸稳定性、高导热率、低蒸气压和真空洁净性。这种综合性能能够保证热场系统长期稳定运行，提高晶体质量和设备可靠性，因此成为第三代半导体热场系统的重要基础材料。

Q10 钛锆钼合金（TZM）的高温强度是多少？

高温强度是衡量钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）性能最重要的指标之一，也是 TZM 能够广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理和高端科研装备的重要原因。

TZM 的高温强度并不是一个固定数值，而是随着温度、材料状态、加工工艺、试样尺寸以及测试标准的不同而变化。因此，工程应用通常采用典型范围，而不是单一数值。室温下，TZM 的抗拉强度一般可达到 700~900 MPa，经过优化热加工和热处理后，部分产品甚至可以超过 900 MPa，明显高于纯钼。随着温度升高，所有金属材料的强度都会逐渐下降，但 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的作用，其下降速度明显慢于纯钼。

典型高温条件下 TZM 抗拉强度

温度	典型抗拉强度
室温	700~900 MPa
800 °C	550~700 MPa

温度	典型抗拉强度
1000 °C	450～600 MPa
1200 °C	300～450 MPa
1400 °C	180～300 MPa

以上数据为典型工程参考值，不同制造工艺、材料纯度及产品规格可能存在一定差异。相比之下，纯钼在 1000 °C 以上强度下降更加明显，而 TZM 仍能够保持较高承载能力，因此更适合长期高温工作。

TZM 高温强度优异，主要来自 TiC 和 ZrC 弥散强化相。这些细小碳化物能够有效阻碍位错运动，并抑制晶界迁移，提高再结晶温度，使材料即使在 1200 °C 以上长期工作，也能够保持稳定组织和较高强度。除了抗拉强度之外，高温屈服强度和抗蠕变能力同样重要。在高温长期服役过程中，材料往往不会立即断裂，而是发生缓慢塑性变形。TZM 较低的蠕变速率，使其在高温载荷条件下能够长期保持结构稳定，因此广泛用于热场支撑件、模具和航空航天热端结构。

高温强度还受到加工状态影响。经过充分锻造、轧制和合理热处理后，TZM 晶粒更加细小，强化颗粒分布更加均匀，因此高温强度通常高于普通烧结态材料。对于工程设计而言，通常不会直接按照材料极限强度进行设计，而是结合长期蠕变性能、安全系数和使用寿命综合确定允许工作应力。因此，高温强度不仅体现材料性能，也决定了设备的长期可靠性。

中钨智造认为，TZM 最大的优势不是室温强度特别高，而是在 1000～1400 °C 长期工作时，仍能够保持较高的承载能力和优异的抗蠕变性能。正是这种长期稳定的高温力学性能，使 TZM 成为半导体热场、高温真空设备、航空航天热端部件及其他高温装备中应用最成熟、最可靠的钼基高温合金之一。

Q11 钛锆钼合金（TZM）的导热率是多少？

导热率是衡量材料传递热量能力的重要指标，也是评价高温结构材料性能的关键参数之一。对于半导体晶体生长设备、真空热处理炉、航空航天热端部件以及 X 射线旋转阳极等应用而言，优异的导热性能不仅能够提高热效率，还能够改善温度均匀性，降低热应力，因此导热率是选择材料的重要依据。

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）继承了钼优异的导热特性。虽然由于加入了少量钛、锆和碳形成强化相，其导热率略低于纯钼，但仍远高于大多数耐热合金和高温结构材料。室温下，TZM 的导热率通常为 115～140 W/(m·K)，工业产品多数集中在 120～135 W/(m·K) 之间，具体数值会受到材料纯度、制造工艺、晶粒尺寸及测试方法的影响。随着温度升高，TZM 导热率会逐渐降低，但整体变化较为平缓。在 1000 °C 左右，导热率通常仍保持在 90～110 W/(m·K) 范围内，能够满足高温热场设备对于快速导热的要求。

TZM 典型导热率参考表

温度	典型导热率
室温	115～140 W/(m·K)
400 °C	110～130 W/(m·K)
800 °C	100～120 W/(m·K)

温度	典型导热率
1000 °C	90~110 W/(m·K)
1200 °C	80~100 W/(m·K)

相比其他常见高温材料，TZM 导热性能具有明显优势。例如，镍基高温合金导热率通常只有 10-25 W/(m·K)，不锈钢约为 15~25 W/(m·K)，钛合金约为 7-20 W/(m·K)，而 TZM 能够达到上述材料的数倍。因此，在需要快速导热和精确控温的设备中，TZM 具有不可替代的优势。

高导热率带来的直接收益主要体现在几个方面。首先，能够快速传导热量，使设备温度分布更加均匀，减少局部热点。其次，可以降低热应力，提高热场系统的稳定性，减少热疲劳损伤。再次，有利于缩短加热和冷却时间，提高设备工作效率。对于单晶硅、碳化硅（SiC）及氮化镓（GaN）晶体生长设备而言，均匀稳定的热场对于晶体质量具有决定性影响，因此 TZM 成为热场系统的重要材料。虽然加入 Ti、Zr 和 C 后导热率略有下降，但这种轻微损失换来了高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性的显著提升，因此综合性能远优于纯钼。

中钨智造认为，TZM 兼具高导热率和优异的高温力学性能，是少数能够同时满足快速传热和长期高温稳定工作的工程材料之一。正是这种性能平衡，使 TZM 成为半导体热场、真空炉、高温模具及航空航天热端部件的重要基础材料。



Q12 钛锆钼合金（TZM）容易加工吗？如何进行机械加工？

钛锆钼合金（TZM）属于高强度难熔金属材料，其机械加工难度高于普通钢材、铝合金及纯钼，但远低于许多人想象中的难加工材料。经过合理选择刀具、切削参数及冷却方式，TZM 完全可以实现高精度机械加工，并已经形成成熟的工业加工工艺。TZM 属于可以加工、但需要采用专用工艺的材料。

TZM 加工难度主要来自三个方面。首先，其硬度和高温强度明显高于纯钼，因此切削阻力更大，刀具磨损速度较快。其次，TZM 导热率较高，虽然有利于工件散热，但切削过程中热量容易传递到刀具，增加刀具热负荷。第三，TZM 室温塑性低于普通金属，加工过程中需要避免产生过大的机械冲击，否则可能导致局部崩边或裂纹。在实际生产中，TZM 通常采用传统机械加工方式，包括车削、铣削、钻孔、镗孔、磨削、攻丝及数控加工等。对于复杂结构，

还可配合电火花加工（EDM）、激光加工及电子束加工等特殊工艺。机械加工过程中，应优先采用高刚性数控设备，保持稳定切削，避免振动。刀具通常选择细晶粒硬质合金、涂层硬质合金或聚晶金刚石（PCD）刀具，以提高耐磨性和加工寿命。

切削速度一般不宜过高，应采用中低速切削和较稳定的进给量，以降低刀具磨损和工件表面损伤。加工过程中尽量避免断续切削和剧烈冲击，因为连续稳定切削更有利于获得较好的表面质量。冷却方式同样十分重要。多数粗加工可以采用充足的乳化液或专用切削液进行冷却润滑，以降低切削温度。对于部分高纯 TzM 零件或特殊真空部件，为避免污染，也可采用干式加工或微量润滑加工，并结合后续清洗工艺。

对于高精度零件，通常采用粗加工、半精加工和精加工相结合的工艺路线。粗加工快速去除余量，半精加工释放应力，精加工最终达到尺寸和表面质量要求。如果零件尺寸较大或加工余量较多，还可能安排中间去应力热处理，以减少变形。TzM 加工完成后，常进行去毛刺、超声波清洗、真空脱脂及表面检验，确保满足半导体、真空设备及航空航天等高端应用对于洁净度和尺寸精度的要求。

钛锆钼合金（TzM）的加工特点

加工特点	说明
可车削	可以，高刚性设备效果最佳
可铣削	可以，宜采用硬质合金刀具
可钻孔	可以，需控制切削热
可磨削	可以，适合高精度加工
可攻丝	可以，小尺寸需控制扭矩
可 EDM 加工	可以，适合复杂结构
可激光加工	可以，适合精密轮廓

需要强调的是，TzM 加工经验已经十分成熟。全球大量半导体热场部件、航空航天零件和真空炉结构件，都采用常规数控设备完成加工，只是在刀具、参数和工艺控制方面要求更加严格。中钨智造认为，TzM 并非不能加工，而是属于需要专业工艺支持的高性能材料。通过合理选择刀具材料、优化切削参数、控制加工应力并配合适当冷却方式，可以稳定获得高精度、高质量 TzM 零件。目前，TzM 机械加工技术已经高度成熟，完全能够满足半导体、航空航天及高端真空装备对于复杂精密部件的制造要求。

Q13 钛锆钼合金（TzM）可以焊接吗？有哪些焊接方法？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TzM）可以焊接，但与普通钢材、不锈钢或钛合金相比，其焊接难度更高，对工艺控制要求也更加严格。由于 TzM 属于难熔金属材料，具有较高的再结晶温度和较低的室温塑性，如果焊接工艺控制不当，容易产生热裂纹、焊接应力集中及晶粒粗化等问题。因此，TzM 焊接通常用于高端装备制造，并优先选择热输入小、保护效果好、焊缝质量高的焊接工艺。

TzM 焊接最大的特点，是必须尽可能避免氧、氮、氢等杂质污染。钼在高温下对氧极为敏感，焊接过程中一旦发生氧化，不仅会降低焊缝塑性，还可能导致焊缝脆化。因此，无论采用何种焊接方法，都应在高真空或高纯惰性气氛保护下进行。目前，TzM 主要采用以下几种焊接工艺。

电子束焊（Electron Beam Welding, EBW） 是应用最广泛、焊接质量最高的方法。电子束焊通常在高真空环境下完成，能够获得较深的熔深和极小的热影响区，焊缝纯净、变形小，非常适合半导体热场部件、航空航天零件及高精真空设备。**激光焊（Laser Beam Welding, LBW）** 同样适用于 TzM。激光焊热输入小、焊接速度快、变形较小，适用于薄壁零件和精密结构件。但由于 TzM 导热率较高，焊接过程中需要合理控制激光功率和焊接速度，以保证稳定熔池。**钨极氩弧焊（GTAW/TIG）** 理论上可以用于 TzM，但应用较少。这是因为电弧焊热输入较大，容易引起晶粒粗化和焊接裂纹，通常只适用于要求不高或尺寸较大的结构件，并需要采用高纯氩气保护和严格的预热、缓冷措施。**等离子焊和微束等离子焊** 在部分特殊零件中也有应用，其特点介于 TIG 焊和激光焊之间，可获得较好的焊缝成形质量。对于部分大型结构件或复杂组件，还可采用扩散焊和真空钎焊等固相连接技术。这类工艺虽然不属于熔焊，但能够避免熔池形成，大幅降低焊接残余应力，因此在高端半导体设备和真空装备中应用越来越广。

不同钛锆钼合金（TzM）焊接工艺特点

焊接方法	适用性	特点
电子束焊（EBW）	★★★★★	真空焊接、焊缝质量最高、热影响区最小
激光焊（LBW）	★★★★☆	精密焊接、变形小、效率高
TIG 焊	★★★☆☆	可焊接，但热输入较大
等离子焊	★★★★☆	适合部分中厚板结构
扩散焊	★★★★★	固相连接、接头性能优异
真空钎焊	★★★★☆	适合复杂组件装配

为了保证焊接质量，TzM 焊接前通常需要进行精细加工和彻底清洗，去除油污、氧化膜及其他污染物。焊后还可根据需要进行真空退火，以释放残余应力，提高焊缝稳定性。目前，在半导体晶体生长设备、航空航天高温部件、真空炉结构件及医疗设备中，电子束焊和扩散焊已经成为 TzM 连接的主流工艺。

中钨智造认为，TzM 并非不能焊接，而是需要采用适合难熔金属特点的高品质焊接工艺。其中，电子束焊、激光焊、扩散焊和真空钎焊是目前最成熟、应用最广泛的方法。对于高端半导体和航空航天产品而言，优先采用真空环境下的焊接或固相连接工艺，能够获得最佳的接头质量和长期服役可靠性。

Q14 钛锆钼合金（TzM）可以进行 3D 打印（增材制造）吗？

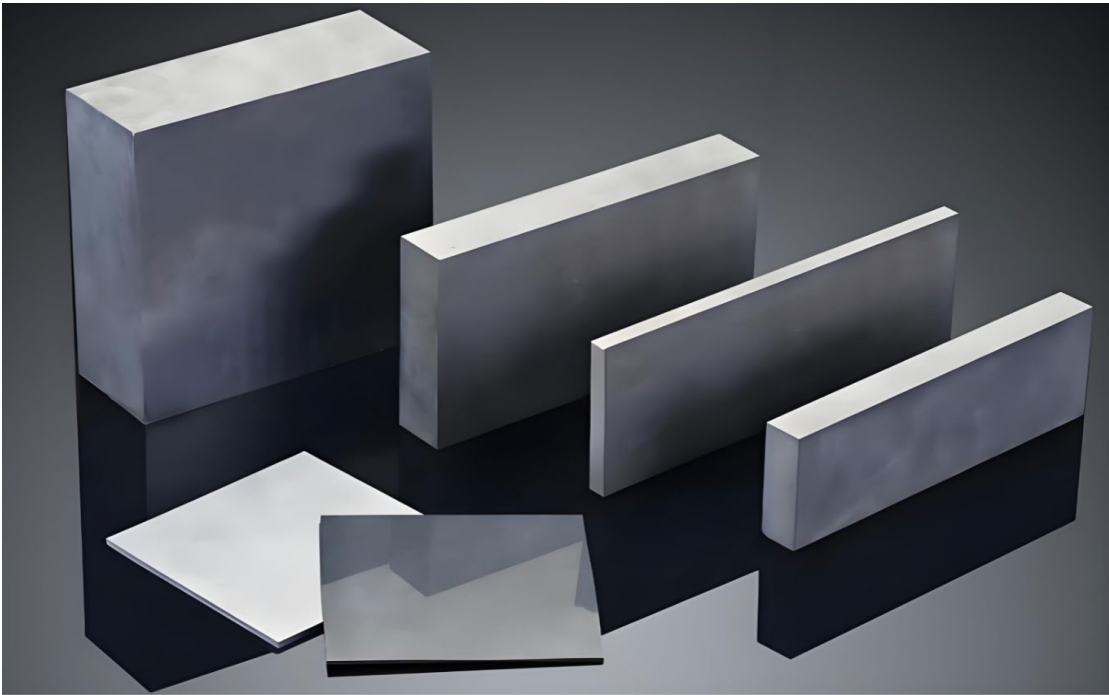
钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TzM）可以进行 3D 打印，但目前仍主要处于科研开发和小批量试制阶段，尚未像钛合金、不锈钢或镍基高温合金那样实现广泛工业化应用。随着增材制造技术不断发展，TzM 作为一种高性能钼基合金，已经成为航空航天、聚变能源、半导体和高端科研装备领域的重要研究对象。其主要优势在于能够制造传统加工方法难以完成的复杂内部流道、轻量化结构和一体化零件。目前，TzM 主要采用以下几种增材制造技术。

激光粉末床熔融（Laser Powder Bed Fusion, LPBF） 是研究最广泛的方法。通过高能激光逐层熔化 TzM 粉末，可以制造复杂三维结构零件。但由于 TzM 熔点高、导热率大、热应力高，打印过程中容易产生裂纹，因此需要精确控制激光功率、扫描策略和基板预热温度。**电子束粉末床熔融（Electron Beam Powder Bed Fusion, EB-PBF）** 同样适用于 TzM。由于电子束加

工通常在真空环境下进行，并具有更高的预热能力，因此相比激光打印更有利于降低热应力和裂纹风险，也是未来 TzM 增材制造的重要发展方向。此外，定向能量沉积（DED）等工艺也被用于大型 TzM 结构件制造和修复，但目前应用仍然较少。

虽然 TzM 可以实现增材制造，但仍面临几个关键技术挑战。首先是热裂纹问题。TzM 导热率高、熔点高，凝固速度快，打印过程中容易形成较大的温度梯度，从而产生热裂纹。这是目前限制 TzM 大规模打印应用的主要难题之一。其次是粉末质量要求极高。TzM 打印粉末通常需要具有高球形度、窄粒径分布、高纯度和低氧含量，否则容易影响成形质量和最终性能。第三是打印后的热处理工艺。为了消除残余应力、改善组织结构并恢复材料性能，TzM 打印件通常需要进行真空热处理或热等静压（HIP）处理。此外，TzM 增材制造工艺窗口较窄，对设备控制精度要求很高。目前，全球只有少数科研机构 and 高端制造企业能够稳定实现高质量 TzM 打印。尽管如此，增材制造仍具有传统加工无法替代的优势。例如，对于复杂热场结构、内部冷却通道、高集成度零件和小批量定制产品，3D 打印能够显著缩短制造周期、减少材料浪费并提高设计自由度。

未来，随着专用 TzM 打印粉末开发、打印工艺优化以及后处理技术不断成熟，TzM 增材制造有望在聚变能源、航空航天、高端半导体设备和科研装备等领域获得更加广泛的应用。中钨智造认为，TzM 已经具备增材制造能力，但目前仍属于高端制造技术，距离全面产业化还有一定距离。未来的发展重点将集中在高品质打印粉末开发、裂纹控制、组织优化及热处理工艺完善等方面。随着 3D 打印技术不断成熟，TzM 将在复杂高温结构件、一体化热场部件和轻量化设计领域展现越来越大的应用潜力。



Q15 钛锆钼合金（TZM）与 MHC（钼铪碳合金）有什么区别？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）和钼铪碳合金（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy, 简称 MHC）都是高性能钼基高温合金，两者均是在纯钼基础上通过弥散强化提高高温性能。然而，它们采用不同的强化体系，因此在高温强度、加工性能、成

本、应用领域及产业成熟度等方面存在明显差异。

两种材料最大的区别在于强化元素不同。TZM 采用钛、锆和碳形成 TiC、ZrC 弥散强化相，而 MHC 则采用铪和碳形成更加稳定的 HfC 强化颗粒。由于 HfC 熔点高达约 3890 °C，热稳定性明显高于 TiC 和 ZrC，因此 MHC 在超高温环境下具有更好的组织稳定性。

从高温性能来看，MHC 通常优于 TZM。在 1400 °C 以上长期工作条件下，MHC 具有更高的抗蠕变能力、更好的晶粒稳定性以及更高的再结晶温度，因此在极端高温环境下能够保持更长的使用寿命。但在 1200~1400 °C 这一工业最常见的工作温度范围内，TZM 已经能够满足绝大多数应用需求，其综合性能非常成熟，因此并不会因为 MHC 性能更高而被全面替代。

加工性能方面，TZM 具有明显优势。由于 TiC 和 ZrC 强化体系更加成熟，TZM 锻造性能、轧制性能及机械加工性能都优于 MHC。MHC 硬度更高，加工难度更大，对刀具磨损更加明显，加工成本也相应增加。

制造工艺成熟度也是两者的重要区别。TZM 经过几十年的工业应用，已经建立了完整稳定的粉末冶金、锻造、轧制及精密加工体系，可稳定生产各种棒材、板材、管材及复杂异形件。而 MHC 产业化时间较短，全球能够稳定批量生产高品质 MHC 的企业数量相对有限。

成本方面，MHC 明显高于 TZM。铪属于稀有金属，价格远高于钛和锆，因此 MHC 原材料成本及制造成本均高于 TZM。这也是目前 TZM 仍然占据主流市场的重要原因之一。

在应用领域方面，两者既有重叠，也有分工。TZM 广泛用于半导体热场、真空热处理设备、航空航天、医疗设备及科研装备，是目前工业应用最成熟的高温钼合金。MHC 则更多用于要求更高温度、更长寿命或极端服役环境的高端装备，例如超高温热场、高热流密度部件及部分航空航天特殊结构件。

钛锆钼合金（TZM）与 MHC（钼铪碳合金）两种材料主要区别

对比项目	TZM	MHC
强化体系	TiC、ZrC	HfC
高温强度	优异	更高
抗蠕变性能	优异	更优
再结晶温度	高	更高
加工性能	较好	较难
制造成熟度	非常成熟	较成熟
成本	较低	较高
应用范围	最广泛	高端特殊领域

因此，MHC 并不是 TZM 的简单升级版，而是针对更高温、更苛刻工况开发的专用钼基合金。中钨智造认为，TZM 和 MHC 并不是竞争关系，而是互补关系。TZM 凭借成熟工艺、良好加工性能和较高性价比，仍然是全球高温钼合金的工业标准；MHC 则依靠更稳定的 HfC 强化体系，在极端高温和超长寿命应用中具有明显优势。未来，两种材料将在不同工况下长期并存，共同满足高端装备制造的发展需求。

Q16 钛锆钼合金（TZM）与钨合金相比有哪些优势？

钛锆钼合金（TZM）和钨合金都属于难熔金属材料，具有高熔点、高温稳定性和优异的真空性能，因此广泛应用于航空航天、半导体、核工业及高端科研装备。不过，两种材料的性能特点并不完全相同，实际工程应用中通常根据具体工况进行选择。钨最大的优势是熔点极高，约 3420 °C，明显高于 TZM 所采用的钼基材料，因此在直接承受超高温火焰、高能粒子轰击及等离子体侵蚀等极端工况下，钨具有不可替代的优势。而 TZM 最大的优势，则体现在综合性能更加均衡。

首先，TZM 加工性能明显优于钨合金。钨硬度高、塑性低，加工过程中容易崩边和开裂，加工效率较低。而 TZM 具有更好的塑性和可加工性，可进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接，更容易制造高精度复杂结构件。

其次，TZM 密度更低。TZM 密度约为 10.1 g/cm³，而纯钨约为 19.3 g/cm³，钨重合金通常也在 17~18.5 g/cm³ 之间。因此，在尺寸相同情况下，TZM 重量仅约为钨的一半，对于航空航天及大型半导体设备而言，有利于减轻整体重量。

TZM 导热性能同样具有优势。虽然钨导热率也较高，但 TZM 能够在保持高导热率的同时，提供更好的高温尺寸稳定性和加工制造能力，因此在热场系统中更容易实现复杂结构设计。从热膨胀角度来看，两者都属于低热膨胀材料，但 TZM 较好的高温塑性能够更有效地缓解热应力，因此在频繁冷热循环条件下，更容易保持结构完整性。

焊接性能方面，TZM 同样优于钨。钨焊接难度较大，而 TZM 可采用电子束焊、激光焊、扩散焊及真空钎焊等成熟工艺，实现高质量连接。

成本方面，TZM 通常低于高性能钨合金。特别是在大型复杂零件制造时，由于 TZM 加工效率更高、材料利用率更好，因此整体制造成本具有一定优势。

在应用领域上，两种材料各有所长。TZM 主要用于半导体热场、单晶硅和 SiC 设备、真空炉、高温模具及航空航天结构件；钨则更多用于聚变偏滤器、X 射线靶材、高能粒子设备、电极及直接承受极端热流密度的部件。

钛锆钼合金（TZM）与钨合金两种材料主要区别

对比项目	TZM	钨合金
熔点	约 2623 °C	约 3420 °C
密度	约 10.1 g/cm³	17~19.3 g/cm³
加工性能	较好	较难
导热性能	很高	很高
焊接性能	较成熟	难度较高
高温塑性	较好	较低
制造成本	较低	较高

对比项目	TZM	钨合金
典型应用	半导体、真空炉、航空航天	聚变、等离子体、高热流部件

在很多高端装备中，TZM 和钨并不是相互替代，而是共同使用。例如聚变装置中，直接面对等离子体的一侧通常采用钨，而后方支撑结构则可能采用 TZM，从而兼顾耐极端高温能力和结构可靠性。

中钨智造认为，钨拥有更高的熔点和更强的耐极端高温能力，而 TZM 则在加工性能、重量、制造成本、焊接性能及综合工程应用方面具有明显优势。对于大多数 1200~1600 °C 高温设备而言，TZM 已经能够满足使用要求，并能够以更低成本实现复杂结构制造，因此成为半导体、真空热处理及航空航天领域应用最广泛的高温钼基合金。真正需要直接承受超高热流密度或等离子体轰击时，钨仍然是首选材料。



Q17 钛锆钼合金（TZM）为什么价格比纯钼高？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）的市场价格通常高于纯钼，这不仅是因为添加了钛、锆等合金元素，更重要的是其制造工艺更加复杂、质量控制要求更高、加工成本更高，因此综合制造成本明显高于纯钼。

首先，TZM 的原材料成本高于纯钼。虽然 TZM 中钛和锆的添加量通常不足 1%，但这些高纯合金元素价格明显高于普通钼粉。同时，为保证高温性能，TZM 对碳含量、氧含量、氮含量等杂质控制要求更加严格，高纯原材料采购成本也随之提高。

其次，TZM 制造工艺更加复杂。纯钼通常采用粉末冶金烧结后即可满足部分应用，而 TZM 不仅需要精确控制 Ti、Zr 和 C 的配比，还需要通过高均匀性混粉、真空烧结、锻造、轧制及热处理等多个关键工序，使 TiC 和 ZrC 弥散强化相均匀分布于钼基体中。任何一个工艺环节控制不当，都可能导致性能下降。

其中，强化相控制是 TzM 生产最核心的技术之一。TiC 和 ZrC 颗粒既不能过粗，也不能过细，更不能发生团聚，否则会影响高温强度和抗蠕变性能。因此，TzM 生产不仅需要先进设备，还依赖丰富的工艺经验。

热加工成本也是 TzM 价格较高的重要原因。为了获得细小均匀的晶粒组织，TzM 通常需要进行多道锻造、轧制和中间退火，每一道工序都需要精确控制温度、变形量和加工速度，以保证最终组织和性能的一致性。

此外，TzM 加工成本明显高于纯钼。由于 TzM 硬度更高、高温强度更大，刀具磨损更快，加工时间更长，加工设备和刀具成本也相应提高。对于半导体热场部件等复杂异形件，加工成本甚至可能占产品总成本的重要比例。

检测成本同样不可忽视。高品质 TzM 通常需要进行化学成分分析、氧氮杂质检测、密度检测、晶粒尺寸分析、显微组织观察、TiC 颗粒评价、力学性能测试及无损检测等多项质量检验，以确保满足高端装备制造要求。

市场规模也是影响价格的重要因素。纯钼属于成熟的大宗工业材料，而 TzM 主要应用于半导体、航空航天、核工业和科研装备等高端领域，整体市场规模较小，批量生产效应有限，因此单位制造成本相对较高。

虽然 TzM 价格高于纯钼，但从全生命周期成本来看，TzM 往往更加经济。由于其高温寿命更长、设备维护次数更少、停机时间更短，因此在长期使用过程中，综合使用成本反而可能低于纯钼。

影响钛锆钼合金（TzM）价格的主要因素

影响因素	对价格的影响
高纯原材料	成本增加
Ti、Zr、C 合金化	成本增加
粉末冶金工艺	制造成本增加
热加工与热处理	工艺成本增加
精密机械加工	加工成本增加
严格质量检测	检测成本增加
市场规模较小	单位成本较高

中钨智造认为，TzM 价格高于纯钼，并非因为加入了少量钛和锆，而是因为其背后包含了更加复杂的粉末冶金工艺、强化相控制技术、热加工工艺、精密加工能力和严格质量检测体系。对于高端装备而言，TzM 更高的初始采购成本，通常能够通过更长的使用寿命、更稳定的性能和更低的维护成本得到充分回报。

Q18 如何检测钛锆钼合金（TzM）的质量？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TzM）主要应用于半导体、航空航天、真空热处理、核工业及科研装备等高端领域，因此质量控制要求远高于普通工程材料。

评价 TzM 质量，并不能仅凭化学成分或硬度，而需要从化学成分、组织结构、物理性能、力学性能及加工质量等多个方面进行综合检测。

首先，应检测化学成分是否符合标准。通常采用 ICP-OES、ICP-MS、XRF 等分析方法检测钼、钛、锆等主要元素含量，并确认 Ti、Zr 和 C 的配比是否满足产品规范。同时，还需控制铁、镍、铜等杂质元素含量，避免影响高温性能。

氧、氮等间隙元素是影响 TzM 性能的重要因素。由于钼在高温下容易受到氧污染，因此通常采用惰性气体熔融分析仪检测氧、氮含量。氧含量过高会降低塑性和韧性，也会影响焊接性能和长期服役寿命。

显微组织检测是评价 TzM 质量的重要环节。通过金相显微镜和扫描电子显微镜（SEM）观察晶粒组织，确认是否存在粗晶、组织不均匀或异常再结晶现象。同时，可结合 EDS 分析强化相组成及分布情况。

TiC 和 ZrC 强化颗粒直接决定 TzM 的高温性能，因此通常需要重点检测其尺寸、数量和分布均匀性。强化颗粒过粗、过细或发生团聚，都会影响抗蠕变性能和高温强度。晶粒尺寸检测同样十分重要。一般采用金相法或 EBSD 电子背散射衍射技术测定晶粒尺寸。细小均匀的晶粒组织通常意味着更好的高温力学性能和组织稳定性。

密度检测可以反映材料致密化程度。高品质 TzM 通常采用阿基米德排水法测定密度，致密度越高，说明烧结质量越好，内部孔隙越少。力学性能检测包括室温和高温拉伸试验、屈服强度测试、延伸率测试及硬度测试。对于高端产品，还需进行高温蠕变试验，以评价长期高温服役能力。对于半导体及航空航天产品，还经常进行无损检测，包括超声检测、X 射线检测和工业 CT 检测，用于发现内部裂纹、夹杂、孔隙及其他缺陷。

加工尺寸和表面质量同样属于质量评价内容。高精度热场部件通常需要检测尺寸公差、形位公差及表面粗糙度，以确保装配精度和长期稳定运行。

钛锆钼合金（TzM）质量检测内容	
检测项目	检测目的
化学成分分析	确认 Ti、Zr、C 及杂质含量
氧氮检测	控制间隙元素含量
密度检测	判断烧结致密度
显微组织观察	检查晶粒及组织均匀性
TiC、ZrC 颗粒分析	评价强化效果
晶粒尺寸检测	判断组织稳定性
硬度测试	评价加工状态
拉伸性能测试	测定强度和塑性
高温蠕变试验	评价长期服役能力
无损检测	检查内部缺陷
尺寸与表面检测	保证加工质量

对于不同应用领域，检测重点也有所不同。半导体行业更加关注洁净度、组织均匀性和尺寸精度；航空航天更加重视高温强度和抗蠕变性能；真空热处理行业则更加关注高温稳定性和长期寿命。

中钨智造认为，TZM 质量评价应坚持综合检测原则，既要关注化学成分是否符合标准，更要重点评价强化颗粒分布、晶粒组织、高温力学性能和加工质量。真正高品质的 TZM，不仅检测数据符合标准，更能够在长期高温服役过程中保持稳定性能和可靠寿命，这也是高端半导体和航空航天装备选择 TZM 的重要原因。



Q19 全球哪些企业能够生产高品质钛锆钼合金（TZM）？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）属于典型的高端钼基高温合金，制造工艺涉及高纯粉末制备、粉末冶金、真空烧结、热加工、组织控制及精密加工等多个关键环节，因此全球能够稳定批量生产高品质 TZM 的企业数量并不多。目前，产业主要集中在中国、美国、德国、日本等国家。

欧美企业起步较早，在 TZM 研发和产业化方面具有较长历史，尤其是在航空航天、半导体及科研装备领域积累了丰富经验。美国的 Plansee USA 依托奥地利普兰西集团的技术体系，在高端钼及钨材料领域具有较强竞争力，能够提供 TZM 棒材、板材、异形件及半导体热场零件。奥地利 Plansee Group 是全球难熔金属行业的重要企业之一，也是 TZM 产业的重要代表，其产品广泛应用于半导体、航空航天、医疗设备及真空工业。美国 H.C. Starck Solutions 长期从事高性能难熔金属材料开发，在 TZM、高纯钼及钼基合金领域具有较高技术水平，其产品主要面向半导体和高端工业市场。日本多家企业也具备 TZM 生产能力，主要服务于本国半导体、电子及精密制造产业，对产品洁净度和加工精度要求较高。

近年来，中国已经成为全球最大的钼材料生产国，也是 TZM 产业发展最快的国家。随着半导体、新能源、航空航天及真空装备产业快速发展，中国企业在 TZM 粉末制备、热加工及精密制造方面取得了明显进步，部分产品已达到国际先进水平，并逐步进入全球高端供应链。

国内部分企业已经能够生产 TZM 棒材、板材、管材、坩埚、热场部件、异形件及半导体专用零件，并可根据客户需求提供定制化加工服务。

全球 TZM 主要生产企业

国家	代表企业	主要特点
奥地利	Plansee Group	全球难熔金属龙头，高端 TZM 产品成熟
美国	Plansee USA	半导体及航空航天应用丰富
美国	H.C. Starck Solutions	高纯 TZM 及钼基材料供应商
日本	多家精密材料企业	服务电子与半导体产业
中国	中钨智造等专业企业	产品体系完善、民用 TZM 合金制造能力快速提升

需要指出的是，高品质 TZM 不仅取决于是否能够生产材料，更取决于是否能够稳定控制以下关键技术：高纯钼粉制备技术、Ti 和 Zr 微量元素精确控制技术、TiC 和 ZrC 强化相均匀分布技术、低氧低氮控制技术、粉末冶金烧结工艺、高温锻造与轧制工艺、晶粒尺寸控制技术、精密机械加工能力及完整质量检测体系。真正具备上述全流程能力的企业，全球数量仍然有限。随着第三代半导体、人工智能芯片、聚变能源及航空航天产业持续发展，全球 TZM 市场正在由传统欧美企业主导逐步向多元化竞争格局演变，中国企业在高端 TZM 领域的国际竞争力也正在不断提升。

中钨智造认为，全球真正能够稳定生产高品质 TZM 的企业并不多，核心竞争力不仅体现在材料配方，更体现在粉末冶金、强化相控制、热加工及精密制造等完整产业链能力。未来，随着中国高端制造水平持续提升，中国企业将在全球 TZM 产业中占据越来越重要的位置。

Q20 钛锆钼合金（TZM）未来的发展趋势是什么？

作为目前全球应用最成熟的钼基高温合金之一，钛锆钼合金(TZM)已经广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理、核工业、医疗设备及科研装备等多个高端领域。未来，TZM 的发展方向并不是简单提高某一项性能，而是围绕高性能、高可靠性、智能制造及新兴产业需求不断升级。

首先，半导体产业将继续成为 TZM 最大的增长动力。随着人工智能、高性能计算、新能源汽车和先进制造的发展，全球晶圆产能持续扩张，单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备需求不断增加。作为热场系统的重要结构材料，TZM 将在高纯化、长寿命和大型化方向持续发展，以满足更高质量晶体制造需求。

其次，更高温服役能力将成为重要研发方向。未来 TZM 将进一步优化 TiC 和 ZrC 强化相分布，改善晶粒组织，提高抗蠕变性能和组织稳定性，使材料能够在更高温度和更长服役周期下保持优异性能。

第三，制造工艺将持续升级。未来粉末制备技术将进一步提高粉末纯度和一致性，粉末冶金工艺将更加精细化，热加工和热处理工艺将更加数字化、智能化，从而提高产品稳定性和批次一致性。

第四，增材制造（3D 打印）将成为重要发展方向。虽然目前 TZM 增材制造仍处于发展阶段，

但未来随着高品质粉末、打印工艺和后处理技术不断成熟，复杂热场结构、一体化零件及轻量化设计将成为 TZM 新的增长领域。

第五，高端应用领域将不断拓展。未来聚变能源、高超声速飞行器、先进核能、高能束流设备及极端环境科研装备，都需要长期耐高温、高可靠性的难熔金属材料。TZM 凭借成熟的产业基础，有望继续保持重要地位。

与此同时，材料本身也将不断改进。例如，通过优化强化相种类、调整微量元素配比及控制晶粒组织，进一步提高综合性能；通过表面改性、抗氧化涂层等技术，提高空气环境中的耐高温能力；通过精密加工和智能制造，提高复杂零件制造效率。

TZM 未来也将面临新的竞争。钼钨碳合金（MHC）在超高温性能方面具有一定优势，高熵难熔合金正在快速发展，部分钨基复合材料和陶瓷基复合材料也不断取得突破。但这些新材料目前普遍存在制造成本高、加工困难或产业化程度不足等问题，因此短期内难以全面替代 TZM。未来相当长一段时间内，TZM 仍将凭借成熟制造工艺、稳定性能和完善产业链，保持全球高温钼合金主导地位。

未来钛锆钼合金（TZM）的发展重点

发展方向	主要内容
半导体升级	服务 300 mm 以上晶圆、SiC 及 GaN 产业
更高温性能	提高抗蠕变能力和组织稳定性
高纯化	满足先进半导体洁净要求
智能制造	提高产品一致性和加工效率
增材制造	实现复杂结构一体化制造
新能源应用	聚变能源及先进核工业
航空航天	高超声速飞行器及新一代发动机
长寿命设计	提高设备可靠性和使用寿命

中钨智造认为，未来 TZM 的发展不会停留在传统高温材料定位，而是向高纯化、高性能、智能制造和复杂结构制造全面升级。随着半导体、人工智能、聚变能源和航空航天等战略产业快速发展，TZM 不仅不会退出历史舞台，反而将在更多高端装备中发挥关键作用，并继续保持全球高温钼基合金的重要地位。

Q21 AI 芯片为什么会增加钛锆钼合金（TZM）需求？

近年来，人工智能（AI）芯片、高性能 GPU、AI 服务器及高性能计算（HPC）产业快速发展，推动了全球半导体制造能力持续扩张。从表面来看，AI 芯片与钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）并没有直接关系，但实际上，AI 芯片制造能力的提升离不开先进半导体设备，而 TZM 正是这些高端设备中的关键基础材料。因此，AI 产业的发展将间接且持续推动 TZM 需求增长。

首先，AI 芯片制造需要更多高品质硅晶圆。

目前，无论是 GPU、AI 加速器还是 CPU，大部分仍以高纯单晶硅晶圆作为基础材料。随着全球 AI 算力需求持续增长，300 mm 单晶硅晶圆产能不断扩大，而单晶硅生产设备中的热

场系统大量采用 TZM 制造支撑件、连接件及高温结构件。因此，晶圆产能增加意味着 TZM 需求同步增长。

其次，第三代半导体的发展进一步扩大了 TZM 市场。

AI 服务器不仅需要先进逻辑芯片，还需要高效率电源管理系统。碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)功率器件因具有更高效率、更低损耗和更高开关频率，正在 AI 数据中心和服务器电源中快速普及。而 SiC 和 GaN 晶体生长设备同样大量采用 TZM 热场部件，因此第三代半导体产业的发展进一步提升了 TZM 需求。

AI 芯片制造工艺不断升级，也推动了高端设备投资。

先进制程芯片需要更多单晶炉、外延设备、真空热处理设备、离子注入设备和高温退火设备。这些设备普遍工作于高温、高真空环境，对高温结构材料要求极高，而 TZM 正是其中的重要组成部分。

AI 产业带来的晶圆厂建设热潮，也将持续拉动 TZM 消费。

近年来，全球主要晶圆制造企业持续扩建先进晶圆厂，新建工厂意味着需要大量新增晶体生长设备、真空设备及热处理设备，每套设备内部都包含数量不等的 TZM 零件，因此整个产业链对 TZM 形成持续需求。此外，AI 芯片更新速度不断加快，推动设备升级周期缩短。随着先进制程不断迭代，设备制造商对于热场稳定性、设备寿命和加工精度提出更高要求，这进一步促进了高品质 TZM 材料的发展。

从产业链角度来看，AI 芯片并不会直接消耗 TZM，而是通过以下路径形成需求增长：AI 芯片需求增加 → 晶圆需求增加 → 单晶硅及 SiC、GaN 产能扩张 → 半导体设备投资增加 → 热场系统需求增长 → TZM 材料需求增加。因此，TZM 属于 AI 产业链中的典型基础材料。

未来，随着人工智能、大模型训练、自动驾驶、高性能计算及云计算持续发展，全球先进半导体设备市场预计仍将保持较快增长，而 TZM 也将长期受益于这一产业趋势。中钨智造认为，AI 芯片不会直接使用 TZM，但 AI 产业的发展将持续推动晶圆制造和半导体设备投资，从而带动 TZM 需求稳定增长。未来，AI 算力竞争、先进制程升级以及第三代半导体快速发展，将成为 TZM 市场增长的重要驱动力之一。

Q22 聚变能源会带来钛锆钼合金（TZM）新的市场机会吗？

聚变能源被认为是未来最具潜力的清洁能源之一。随着国际热核聚变实验堆（ITER）、中国聚变工程实验堆（CFETR）以及欧美多家商业聚变企业不断推进聚变技术研发，高温难熔金属材料迎来了新的发展机遇。作为成熟的钼基高温合金，钛锆钼合金（TZM）有望在聚变产业链中获得新的市场空间。聚变装置最大的特点，是长期处于高温、高真空、高热流密度及强电磁环境中，设备内部大量结构件需要承受极端工况。因此，对于材料的高温强度、尺寸稳定性、导热性能及真空适应性提出了极高要求，而这些正是 TZM 的优势所在。

首先，TZM 适用于聚变装置中的高温真空结构件。

聚变实验设备内部拥有大量真空腔体、支撑框架、连接件、热屏及实验平台，这些部件通常需要长期工作于高温真空环境。TZM 具有低蒸气压、高温强度高和抗蠕变性能优异等特点，非常适合作为这些结构件材料。

其次，TZM 适用于高热流实验平台。

在聚变材料研究过程中，需要模拟等离子体对材料的热冲击，因此大量高热流测试设备采用 TZM 作为支撑结构或热管理部件，以保证实验稳定性。

TZM 可应用于等离子体诊断设备。

聚变装置内部存在大量高温探测器支撑结构、真空窗口固定件及高温测试平台，这些部件通常要求尺寸稳定、导热良好且不污染真空环境，TZM 能够很好地满足这些要求。

聚变材料研发本身也需要大量 TZM。

在新型第一壁材料、偏滤器材料及耐辐照材料开发过程中，TZM 经常作为对比材料、实验基材或高温工装使用，因此科研需求也将持续增长。

当然，需要客观看待 TZM 在聚变领域的定位。对于直接面对等离子体轰击的第一壁和偏滤器，目前国际主流方案仍然以钨材料为主，因为钨熔点更高、抗等离子体侵蚀能力更强。而 TZM 更多用于后方支撑结构、高温连接件、真空部件及实验系统，并不是第一壁材料的直接替代者。

未来商业聚变电站建设，将带来大量高温真空设备需求。即使 TZM 并不直接用于第一壁，其在整个聚变系统中的应用数量仍有望显著增加，包括：高温支撑结构、真空腔体内部构件、热流实验平台、等离子体诊断设备、高温连接件、材料测试装置及科研实验系统等。随着全球聚变产业逐步从实验阶段迈向工程化阶段，TZM 市场有望迎来新的增长点。中钨智造认为，聚变能源不会完全改变 TZM 的应用方向，但将为其带来新的高端市场机会。未来，TZM 不会取代钨成为聚变第一壁材料，而将在高温真空结构、高热流实验设备、等离子体诊断系统及聚变科研装备中发挥越来越重要的作用。随着聚变产业逐步商业化，TZM 有望成为聚变装备产业链的重要高温工程材料之一。

Q23 钛锆钼合金（TZM）未来会被 MHC 替代吗？

钛锆钼合金(Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 简称 TZM)和钼钨碳合金(Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy, 简称 MHC)都是高性能钼基高温合金。近年来，随着 MHC 研究不断深入，很多人认为 MHC 将全面取代 TZM。然而，从目前全球产业发展情况来看，这种判断并不符合实际。未来相当长一段时间内，MHC 不会完全替代 TZM，更有可能与 TZM 长期并存，并分别服务于不同的应用领域。

两种材料的设计目标并不相同。

TZM 强调综合性能平衡，在保证优异高温性能的同时，兼顾加工性能、制造成本、产品一致性和工程可靠性，因此成为目前全球应用最广泛的钼基高温合金。MHC 则更侧重于极端高温性能。由于采用 HfC 强化体系，其高温组织稳定性、抗蠕变性能和再结晶温度通常优于 TZM，更适合 1400 °C 以上甚至更高温度的特殊工况。因此，两者并不是简单的新旧替代关系，而是面向不同应用需求开发的材料体系。

TZM 拥有非常成熟的产业基础。

经过数十年的工业应用，TZM 已经建立了完整的粉末冶金、热加工、精密加工及质量控制体

系，全球大量半导体设备、真空热处理设备、航空航天部件和科研装备均采用 TZM，拥有丰富的工程经验和长期可靠性数据。相比之下，MHC 虽然性能优异，但产业化规模仍然较小，全球能够稳定批量生产高品质 MHC 的企业数量有限，在制造经验、产品规格及应用案例方面仍不及 TZM 成熟。

加工性能是影响材料替代的重要因素。

TZM 具有较好的锻造性能、轧制性能和机械加工性能，可制造各种复杂热场部件和高精度零件。而 MHC 由于强化颗粒更加稳定，材料硬度更高，加工难度更大，加工成本也明显高于 TZM。

成本因素同样十分关键。

钨属于稀有金属，其价格远高于钛和锆，因此 MHC 材料成本及制造成本明显高于 TZM。对于大多数工业设备而言，如果 TZM 已经能够满足性能要求，通常没有必要采用成本更高的 MHC。

目前，半导体产业是真正决定 TZM 市场规模的核心行业。绝大多数单晶硅、SiC 和 GaN 设备长期工作温度仍处于 TZM 性能优势区间，因此 TZM 能够充分满足实际需求。只有在部分超高温设备或特殊科研装备中，MHC 才具有更明显的优势。

未来，两种材料更可能形成如下分工：TZM 继续作为工业标准材料，服务于半导体、真空热处理、航空航天及医疗设备等主流市场；MHC 则主要面向极端高温、高热流密度及超长寿命要求更高的高端装备。因此，未来的发展趋势不是 MHC 全面替代 TZM，而是根据不同工况合理选择不同材料。中钨智造研究认为，MHC 未来不会全面取代 TZM。TZM 凭借成熟制造工艺、稳定产品质量、优异加工性能及较高性价比，仍将长期保持全球高温钨基合金的主导地位。未来，两种材料将在不同温度区间和不同应用场景中形成互补，共同推动高端装备制造的发展。

Q24 钛锆钼合金（TZM）未来会被高熵合金替代吗？

近年来，高熵合金（High Entropy Alloys, HEAs）成为材料科学研究热点。特别是以钼、钨、钽、铌、钒等难熔元素组成的难熔高熵合金，由于具有优异的高温强度和潜在的耐极端环境能力，被认为是下一代高温结构材料的重要发展方向。因此，很多人提出，高熵合金是否会取代 TZM。从目前全球研究和产业发展情况来看，高熵合金具有巨大潜力，但在可预见的未来，仍难以全面替代 TZM。

高熵合金目前仍主要处于科研和实验阶段。

虽然许多实验室已经开发出具有优异高温性能的难熔高熵合金，但大多数研究仍集中于小尺寸试样和基础性能验证，距离大规模工业应用还有较长距离。相比之下，TZM 已经拥有数十年的产业化经验，在粉末制备、热加工、机械加工、焊接、质量检测及工程应用方面形成了完整成熟的技术体系。

高熵合金制造难度明显更高。

难熔高熵合金通常由五种甚至更多高熔点元素组成，不仅熔炼困难，而且容易出现元素偏析、组织不均匀和成分波动等问题。目前，高品质、大尺寸难熔高熵合金稳定制造仍然具有较大

挑战。而 TzM 制造工艺已经高度成熟，可以稳定批量生产棒材、板材、管材、坩埚及各种复杂热场零件。

加工性能仍是高熵合金的重要难题。

许多难熔高熵合金具有较高硬度和较低塑性，加工难度甚至高于 TzM。目前，其车削、铣削、焊接及大型零件制造技术仍不够成熟，而 TzM 已经形成完善的加工体系。

成本是限制高熵合金产业化的重要因素。

难熔高熵合金通常含有钨、钼、铌、钽等多种昂贵元素，原材料成本远高于 TzM，同时制造工艺复杂、成品率较低，因此整体制造成本明显高于 TzM。

高熵合金也具有自身明显优势。

部分难熔高熵合金在 1600 °C 以上仍具有优异的高温强度和组织稳定性，在未来聚变能源、高超声速飞行器及极端环境装备中具有较大发展潜力。因此，未来高熵合金更可能首先进入以下领域：超高温航空航天结构件、聚变能源核心部件、极端环境科研装备及部分战略装备。而对于目前占据 TzM 主要市场的半导体热场、真空炉、高温模具及医疗设备等行业，由于 TzM 已经能够满足性能要求，同时具有成熟制造体系和较低成本，因此短期内不会被高熵合金取代。

未来更有可能形成材料协同发展的格局：TzM 继续作为工业主流高温钼基合金，高熵合金则主要用于性能要求更高、成本敏感性较低的新兴领域。中钨智造认为，高熵合金代表着未来高温材料的重要研究方向，但目前距离全面产业化仍有较长距离。未来二三十年内，TzM 仍将凭借成熟的产业体系、稳定可靠的性能和完善的制造工艺，占据半导体、真空装备及高端工业设备的主导地位。高熵合金更可能作为 TzM 的补充材料，而不是全面替代者。

Q25 下一代钼基高温合金的发展方向是什么？

钼基高温合金因具有高熔点、高导热率、低热膨胀系数和优异的高温力学性能，长期以来一直是半导体、航空航天、核工业及高端真空装备的重要基础材料。从纯钼到钨钼合金(TzM)，再到钼钨碳合金(MHC)，钼基高温材料不断发展。未来，随着半导体、聚变能源、高超声速飞行器及先进制造技术的发展，下一代钼基高温合金将朝着更高性能、更高可靠性和更智能制造的方向持续演进。

未来发展的第一方向，是进一步提升高温服役能力。

当前 TzM 已经能够满足 1200~1400 °C 长期工作的需求，而下一代钼基高温合金将进一步提高再结晶温度、抗蠕变性能和组织稳定性，使材料能够在 1400~1600 °C 甚至更高温度下长期保持稳定性能。

第二，是开发更加稳定的强化体系。

目前 TzM 主要依靠 TiC 和 ZrC 强化，MHC 采用 HfC 强化。未来研究将进一步优化碳化物、硼化物、氧化物等弥散强化相，通过纳米级强化颗粒控制，提高强化效率，同时改善组织均匀性和长期稳定性。

第三个方向，是发展多元微合金化技术。

未来不仅局限于 Ti、Zr 和 Hf，还可能加入少量铌（Nb）、钽（Ta）、钒（V）、铼（Re）等元素，在保证加工性能的基础上，进一步优化高温强度、抗氧化性能及热稳定性，实现更加均衡的综合性能。

第四个方向，是提高抗氧化能力。

目前钼基材料最大的短板之一，是空气中高温氧化性能较差。未来将更多采用抗氧化合金化设计和高性能表面涂层技术，例如硅化物涂层、复合陶瓷涂层及多层防护涂层，提高材料在空气环境中的使用能力。

第五个方向，是适应增材制造。

未来钼基高温合金将更加注重 3D 打印适应性，通过优化粉末粒度分布、改善凝固组织、降低热裂纹敏感性，使复杂热场结构和轻量化设计能够更加高效地实现。

第六个方向，是智能制造与数字化工艺控制。

未来粉末制备、烧结、锻造、轧制、热处理及检测将更加数字化，通过全过程工艺监控和人工智能优化制造参数，提高产品一致性和稳定性。此外，高熵钼基合金和复合材料也将成为重要研究方向。未来可能出现以钼为主体，结合高熵设计理念的新型高温材料，以及钼基复合材料、纳米强化材料等，为聚变能源、航空航天及极端环境装备提供新的解决方案。

钼基高温合金主要发展方向

发展方向	目标
更高工作温度	提高长期高温服役能力
新型强化体系	提高抗蠕变和组织稳定性
多元微合金化	优化综合性能
抗氧化技术	扩大空气环境应用范围
增材制造适配	实现复杂结构制造
智能制造	提高一致性和质量稳定性
高熵与复合材料	面向下一代极端环境装备

未来，高性能钼基材料的发展不会依赖单一技术，而是材料设计、制造工艺、表面工程和数字化制造共同发展的结果。中钨智造长期从事认为，下一代钼基高温合金的发展重点不是简单追求更高强度，而是在高温性能、加工性能、抗氧化能力、制造成本及工程可靠性之间实现新的平衡。未来，TZM、MHC、新型钼基复合材料及难熔高熵合金将共同构成钼基高温材料的发展体系，为半导体、聚变能源和航空航天等战略产业提供更加完善的材料解决方案。

Q26 为什么钛锆钼合金（TZM）仍然是工业标准材料？

自 20 世纪中期成功开发以来，钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）已经成为全球应用最广泛的钼基高温合金。尽管近年来 MHC、高熵合金以及各种新型高温材料不断出现，但 TZM 仍然保持着工业标准材料的地位，其原因不仅在于性能优异，更在于其综合工程价值长期得到全球制造业验证。

（1）TZM 具有极其均衡的综合性能。

它不仅拥有优异的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，还保持了较高导热率、较低热膨胀

系数、低蒸气压和良好的真空适应性。这种性能组合能够满足绝大多数高温装备的实际需求，而不仅仅是在某一项性能上表现突出。

（2）TZM 已经拥有几十年的工程应用经验。

全球半导体设备、单晶硅生长炉、碳化硅热场、真空热处理设备、航空航天部件、医疗设备 & 科研装备长期采用 TZM，其长期可靠性已经得到大量实际工程验证。这种成熟的应用经验，是任何新材料短时间内难以替代的优势。制造工艺成熟，也是 TZM 保持标准地位的重要原因。从高纯粉末制备、粉末冶金烧结到锻造、轧制、热处理、精密加工及质量检测，TZM 已经形成完整成熟的工业制造体系，能够稳定批量生产各种规格和复杂零件。相比之下，许多新材料虽然实验性能优异，但制造难度大、产品一致性不足，距离大规模工业应用仍有一定距离。

（3）加工性能是 TZM 的重要优势。

相比 MHC、钨合金及部分难熔高熵合金，TZM 更容易进行机械加工、焊接、扩散焊及真空钎焊，可制造复杂热场结构和高精度零件，大幅降低制造成本。

（4）TZM 具有良好的经济性。

虽然价格高于纯钼，但相比性能更高的新型钼基材料，TZM 成本更低，加工效率更高，全生命周期成本更具优势，因此更容易被工业用户接受。产业链完善，同样决定了 TZM 的长期竞争力。目前全球已经形成成熟的 TZM 原材料供应体系、标准体系、加工体系和应用体系，从材料生产到最终设备制造，各环节均具有丰富经验和稳定供应能力。更重要的是，大多数工业设备并不需要极限性能，而需要长期稳定运行。TZM 能够满足 1200~1400 °C 长期工作需求，而这一温度范围已经覆盖绝大多数半导体、真空热处理及高端装备应用。因此，对于绝大多数用户而言，没有必要采用成本更高、制造更复杂的新材料。

TZM 保持工业标准材料地位的主要原因

核心优势	说明
综合性能均衡	高温强度、导热率和稳定性兼顾
工程验证充分	数十年工业应用经验
制造工艺成熟	产品一致性高
加工性能较好	易于制造复杂零件
成本合理	全生命周期经济性突出
产业链完善	全球供应稳定
应用范围广	半导体、航空航天、真空设备等多个行业

未来，即使 MHC、高熵合金和新型复合材料不断发展，TZM 仍将凭借成熟可靠、性能均衡和制造完善等优势，继续作为全球钼基高温合金的重要工业标准。中钨智造认为，TZM 能够长期保持工业标准材料地位，并不是因为没有竞争者，而是因为它在性能、制造、加工、成本和工程经验之间实现了最佳平衡。真正的工业标准，不仅需要实验室中的优异性能，更需要长期稳定、可批量制造、可重复应用和可持续供应，而这正是 TZM 几十年来始终保持领先地位的根本原因。

Q27 钛锆钼合金（TZM）最大的技术优势是什么？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）自 20 世纪开发以来，已经成为全球应用最广泛的钼基高温合金。几十年来，无论是在半导体热场、航空航天、真空热处理、核工业还是科研装备领域，TZM 始终保持着重要地位。其最大的技术优势，并不是某一项性能达到极限，而是在高温环境下实现了性能、制造和工程应用之间的最佳平衡。

（1）TZM 最核心的技术优势是优异稳定的高温综合性能。

纯钼虽然熔点高，但在 1000 °C 以上容易发生再结晶，强度迅速下降，长期工作时容易产生蠕变变形。而 TZM 通过加入少量钛、锆和碳，在材料内部形成细小均匀的 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒，这些强化相能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，大幅提高再结晶温度和抗蠕变能力，使材料在 1200~1400 °C 长期工作时仍保持较高强度和尺寸稳定性。

（2）第二个优势，是高温尺寸稳定性极佳。

对于单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备而言，热场结构的微小变形都会影响温度场均匀性，进而影响晶体质量。TZM 较低的热膨胀系数和优异的抗蠕变性能，使其能够长期保持几何尺寸稳定，这是其成为半导体热场标准材料的重要原因。

（3）第三个优势，钛锆钼合金（TZM）优异的导热性能。

TZM 室温导热率通常达到 115~140 W/(m·K)，远高于镍基高温合金、不锈钢及钛合金。较高的导热率有助于均匀传递热量，降低热应力，提高热场稳定性和设备效率。

（4）第四个优势，钛锆钼合金（TZM）良好的真空兼容性。

TZM 具有极低的蒸气压，在高温真空环境下几乎不会挥发，也不会释放大量的杂质，因此广泛应用于半导体、高真空科研设备及真空热处理设备。

（5）第五个优势，是成熟的产业化能力。

相比许多新型高温材料，TZM 不仅性能稳定，而且已经建立了完整的粉末冶金、锻造、轧制、热处理、精密加工及检测体系，可以稳定批量生产各种规格产品，保证长期一致性。

（6）第六个优势，是较好的加工性能。

虽然 TZM 属于难熔金属材料，但相比钨合金、MHC 及部分难熔高熵合金，其锻造性能、机械加工性能及焊接适应性更好，更容易制造复杂结构件，因此能够满足现代高端装备制造需求。

正因为这些优势共同作用，TZM 并不是单项性能最强的材料，却成为综合性能最均衡、工程应用最成熟的钼基高温合金。中钨智造认为，TZM 最大的技术优势，在于通过 TiC 和 ZrC 弥散强化，实现了高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性、加工性能和产业化能力之间的最佳平衡。这种综合优势，而非单项指标领先，才是 TZM 能够长期保持工业标准材料地位的根本原因。

Q28 钛锆钼合金（TZM）最大的技术瓶颈是什么？

尽管钛锆钼合金（TZM）已经成为全球应用最成熟的钼基高温合金，但它并不是完美材料。

随着半导体、聚变能源、高超声速飞行器和先进制造技术不断发展，TZM 也逐渐暴露出一些技术瓶颈。

(1) 最大的瓶颈并不是高温强度，而是空气环境下的抗氧化能力不足。
TZM 属于钼基材料，而钼在空气中约 400~500℃开始明显氧化。当温度继续升高时，会形成挥发性的三氧化钼（MoO₃），导致材料快速失重和性能下降。因此，TZM 虽然能够在真空或惰性气氛下长期工作于 1200~1400℃，却不能直接在空气中高温长期使用。这一特点限制了 TZM 在部分高温燃烧环境和开放式高温设备中的应用，也使其在某些领域需要依赖抗氧化涂层或保护气氛。

(2) 第二个技术瓶颈，是超高温性能仍有提升空间。
虽然 TZM 已经具备优异的高温性能，但在 1400℃以上长期工作时，其抗蠕变性能和组织稳定性开始逐渐下降。相比采用 HfC 强化体系的 MHC 或部分难熔高熵合金，TZM 在超高温领域仍存在一定差距。

(3) 第三个瓶颈，是强化相控制难度较高。
TZM 性能高度依赖 TiC 和 ZrC 强化颗粒。如果颗粒尺寸过大，会降低强化效果；如果颗粒过细，则可能影响组织稳定性；如果发生团聚，则会造成局部性能下降。因此，强化相尺寸、数量和分布均匀性的精确控制，是 TZM 制造过程中最关键的技术难点之一。

(4) 第四个瓶颈，是增材制造适应性仍有待提高。
TZM 导热率高、熔点高，在激光增材制造过程中容易形成较大的温度梯度和热应力，从而产生裂纹。目前，TZM 增材制造已经取得一定进展，但距离成熟产业化还有较长距离。

(5) 第五个是大型复杂零件制造成本较高的瓶颈。
由于 TZM 属于粉末冶金材料，大尺寸坯料制备、多道热加工和高精度机械加工都会增加制造成本。对于超大型复杂结构件而言，加工效率和材料利用率仍有进一步提升空间。此外，随着半导体设备不断向更高洁净度、更高精度发展，对 TZM 内部组织一致性、氧氮杂质控制及批次稳定性也提出了更高要求，这对制造工艺提出了持续挑战。

未来 TZM 技术突破的重点

技术方向	主要目标
抗氧化能力	提高空气环境使用温度
超高温性能	提高 1400℃以上长期稳定性
强化相控制	优化 TiC、ZrC 尺寸和分布
增材制造	降低热裂纹、提升成形质量
制造成本	提高大型复杂零件生产效率
高纯化	满足先进半导体洁净要求

TZM 当前面临的瓶颈更多属于制造技术和应用拓展问题，而不是材料本身已经失去竞争力。中钨智造认为，TZM 最大的技术瓶颈，是在空气中的高温抗氧化能力不足，以及超高温环境下性能仍有进一步提升空间。未来，通过新型强化体系、抗氧化涂层、微合金化设计、增材制造技术和智能制造工艺的发展，TZM 仍有较大的性能提升潜力，并将在未来高端装备制造中继续保持重要地位。

Q29 中国钛锆钼合金（TZM）与国际先进水平还有哪些差距？

近年来，随着中国半导体、航空航天、新能源及高端装备制造产业快速发展，国内钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）产业取得了显著进步。从原材料制备、粉末冶金、热加工到精密加工，整体技术水平不断提升，部分产品已经能够满足高端半导体设备和真空装备的使用要求。不过，从全球高端 TZM 产业来看，中国与国际先进水平相比仍然存在一些差距。这些差距并不主要体现在基础性能指标，而更多体现在制造一致性、长期可靠性和高端制造能力方面。

（1）产品一致性仍有提升空间。

国际领先企业经过几十年的产业积累，已经建立了完善的全过程质量控制体系，不同批次产品在化学成分、晶粒组织、高温性能及加工性能方面具有极高的一致性。国内部分企业虽然能够生产性能达到国际水平的 TZM 产品，但在长期稳定批量生产方面，与国际先进企业相比仍有进一步提升空间。

（2）强化相控制技术仍需优化。

TZM 性能主要取决于 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒的尺寸、数量和分布均匀性。国际先进企业对于强化相形成机理、颗粒尺寸控制及热加工组织演化具有长期经验积累，在组织均匀性方面仍具有一定优势。

（3）高纯化水平仍需持续提高。

随着先进半导体设备不断升级，对材料洁净度要求越来越高，特别是氧、氮及其他痕量杂质控制越来越严格。国内企业近年来已取得明显进步，但在极高纯度产品的稳定控制能力方面，仍有继续提升的空间。

（4）大尺寸、高精度产品制造能力仍需加强。

随着 300 mm 以上晶圆设备、大型 SiC 热场及聚变装备的发展，市场对于大型 TZM 板材、厚板、复杂异形件及整体热场结构提出了更高要求。国际领先企业在大型复杂结构件制造经验方面积累更加丰富。

（5）长期服役数据积累不足。

欧美企业部分 TZM 产品已经拥有几十年的工程应用历史，其寿命预测模型、失效分析数据库及长期可靠性评价体系较为完善。而国内高端 TZM 产业起步相对较晚，在长期工程数据库建设方面仍需持续积累。

（6）高端应用认证周期较长。

航空航天、半导体及国际大型科研项目通常需要较长认证周期。虽然部分国产 TZM 产品性能已经达到国际先进水平，但进入国际高端供应链仍需要时间完成客户验证和应用积累。不过，也必须看到，中国 TZM 产业近年来的发展速度非常快。国内已经形成完整的钼资源供应体系、粉末冶金制造体系及机械加工能力，在材料成本、交付能力及定制化服务方面具有明显优势。部分企业在半导体热场部件、高纯 TZM 材料及复杂异形件制造方面，已经具备较强国际竞争力。

总之，中国 TZM 产业与国际先进水平之间的差距正在不断缩小，未来随着半导体和航空航

天产业持续发展，国产 TZM 有望进一步提升全球市场竞争力。中钨智造认为，中国 TZM 已经具备较强的产业基础，部分产品性能达到国际先进水平。未来真正需要突破的，不再是单项性能，而是高端产品的一致性、长期可靠性、超高纯制造能力和国际市场认可度。随着技术持续进步，中国 TZM 产业有望在全球高端难熔金属市场占据更加重要的位置。

Q30 如何选择钛锆钼合金（TZM）或 MHC？

钛锆钼合金（TZM）和钼铪碳合金（MHC）都是目前应用最广泛的钼基高温合金。两种材料都具有优异的高温性能，但强化体系不同，因此在适用工况、制造成本及工程应用方面各有优势。实际选材时，应根据工作温度、服役时间、载荷条件、加工要求和预算综合考虑，而不能简单认为性能越高越好。

首先，应根据工作温度进行选择。

如果设备长期工作温度在 1200~1400 °C 以内，TZM 通常已经能够满足要求。其高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性经过长期工程验证，是目前半导体、真空热处理及航空航天领域应用最成熟的材料。如果长期工作温度接近或超过 1400 °C，尤其要求长期保持极低蠕变变形时，MHC 通常具有更好的高温稳定性，更适合作为超高温结构材料。

其次，应考虑服役寿命。

对于要求长期连续运行、维修成本极高的设备，如果工作环境极端，MHC 能够提供更长的使用寿命。而对于大多数工业设备，TZM 已经能够实现较长服役周期，其综合经济性更好。

第三，应考虑加工制造难度。

TZM 加工性能较好，可进行锻造、轧制、车削、铣削、钻孔、焊接及复杂异形件加工，更适制造结构复杂、尺寸精度要求高的零件。MHC 硬度更高，加工难度更大，加工成本也更高，因此通常用于结构相对简单但性能要求极高的零件。

第四，应考虑成本因素。

TZM 采用 Ti、Zr 强化体系，材料成本和制造成本均低于 MHC。MHC 由于含有昂贵的铪元素，整体成本明显更高。因此，如果 TZM 已经能够满足性能要求，一般优先选择 TZM，以获得更好的性价比。

第五，应结合应用行业进行判断。

半导体热场、单晶硅设备、SiC 和 GaN 晶体生长设备、真空炉及高温模具等领域，目前仍以 TZM 为主流材料。聚变能源、超高温科研设备及部分极端航空航天工况，则可能更适合采用 MHC。

钛锆钼合金（TZM）和钼铪碳合金（MHC）两种材料选用原则表

工况	推荐材料	主要原因
1200~1400 °C长期工作	TZM	综合性能成熟、成本合理
超过 1400 °C长期工作	MHC	高温稳定性更好
半导体热场	TZM	工程应用成熟
真空热处理设备	TZM	综合性能优异
极端高温科研设备	MHC	抗蠕变性能更强

工况	推荐材料	主要原因
复杂精密零件	TZM	加工性能更好
对成本敏感	TZM	性价比更高
极端寿命要求	MHC	更适合长期超高温服役

在许多大型设备中，两种材料往往不是二选一，而是组合使用。例如，高温最严重区域采用 MHC，其余结构采用 TZM，通过合理材料配置，在保证性能的同时控制整体成本。中钨智造认为，TZM 和 MHC 没有绝对优劣，关键在于是否适合具体工况。对于绝大多数工业设备而言，TZM 仍然是最佳选择，因为其综合性能成熟、加工方便、成本合理且工程经验丰富；只有在超高温、超长寿命或极端工况下，MHC 的优势才会更加明显。因此，科学选材的原则不是选择性能最高的材料，而是选择综合效益最优的材料。



中钨智造科技有限公司

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）的 Q&A

第一篇 基础知识（Q1-Q10）

- Q1 什么是钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）？
- Q2 TZM 名称是什么意思？
- Q3 TZM 属于哪一类高温材料？
- Q4 TZM 为什么属于难熔金属合金？
- Q5 TZM 是谁发明的？
- Q6 TZM 的发展历史是怎样的？
- Q7 TZM 为什么成为最成功的钼基高温合金？
- Q8 TZM 有哪些主要特点？
- Q9 TZM 有哪些局限性？
- Q10 TZM 为什么至今仍是工业主流钼基高温材料？

第二篇 化学组成（Q11-Q20）

- Q11 TZM 标准化学成分是多少？
- Q12 Ti、Zr、C 分别起什么作用？
- Q13 Ti 含量为什么控制在 0.40~0.55%？
- Q14 Zr 含量为什么只有约 0.06~0.12%？
- Q15 为什么碳含量极低？
- Q16 Ti/C 比例为什么十分重要？
- Q17 TZM 有哪些国际牌号？
- Q18 TZM 有哪些 ASTM 标准？
- Q19 TZM 有哪些 ISO 标准？
- Q20 各厂家 TZM 成分是否一致？

第三篇 微观组织（Q21-Q30）

- Q21 TZM 强化机理是什么？
- Q22 TiC、ZrC 强化机制是什么？
- Q23 固溶强化是什么？
- Q24 第二相颗粒如何形成？
- Q25 TiC 颗粒尺寸一般是多少？
- Q26 为什么第二相颗粒决定寿命？
- Q27 TZM 再结晶温度是多少？
- Q28 晶界强化机制是什么？
- Q29 第二相如何抑制晶界迁移？
- Q30 晶粒尺寸为何影响高温性能？

第四篇 制造工艺 (Q31-Q40)

- Q31 TZM 如何生产?
- Q32 为什么采用粉末冶金?
- Q33 原料纯度要求是多少?
- Q34 如何混粉?
- Q35 如何压制?
- Q36 如何烧结?
- Q37 如何进行 HIP?
- Q38 如何锻造?
- Q39 如何轧制?
- Q40 如何消除残余应力?

第五篇 热处理 (Q41-Q50)

- Q41 TZM 如何退火?
- Q42 应力消除退火温度是多少?
- Q43 再结晶退火如何控制?
- Q44 为什么不能过烧?
- Q45 晶粒粗化如何发生?
- Q46 热处理如何影响性能?
- Q47 如何获得最佳组织?
- Q48 如何检测再结晶程度?
- Q49 热处理后为何仍需加工?
- Q50 如何制定热处理制度?

第六篇 力学性能 (Q51-Q60)

- Q51 TZM 抗拉强度是多少?
- Q52 屈服强度是多少?
- Q53 延伸率是多少?
- Q54 硬度是多少?
- Q55 杨氏模量是多少?
- Q56 蠕变性能如何?
- Q57 疲劳性能如何?
- Q58 高温强度保持率是多少?
- Q59 长期工作温度是多少?
- Q60 为什么 TZM 比纯钼强?

第七篇 热物理性能 (Q61-Q70)

- Q61 导热率是多少?
- Q62 热膨胀系数是多少?
- Q63 热扩散率是多少?
- Q64 比热容是多少?
- Q65 电阻率是多少?
- Q66 蒸气压为什么很低?
- Q67 热震性能如何?

- Q68 高温尺寸稳定性如何？
- Q69 发射率是多少？
- Q70 为什么适用于真空环境？

第八篇 加工性能（Q71-Q82）

- Q71 TZM 容易加工吗？
- Q72 如何车削？
- Q73 如何铣削？
- Q74 如何钻孔？
- Q75 如何磨削？
- Q76 能否进行 EDM 加工？
- Q77 能否激光加工？
- Q78 如何焊接？
- Q79 如何扩散焊？
- Q80 如何真空钎焊？
- Q81 能否进行电子束焊？
- Q82 能否用于增材制造（3D 打印）？

第九篇 材料对比（Q83-Q95）

- Q83 TZM 与纯钼有什么区别？
- Q84 TZM 与 MHC 有什么区别？
- Q85 TZM 与 TZC 有什么区别？
- Q86 TZM 与 ZHM 有什么区别？
- Q87 TZM 与钨合金相比如何？
- Q88 TZM 与石墨相比有哪些优势？
- Q89 TZM 与陶瓷相比有哪些优势？
- Q90 TZM 为什么价格高于纯钼？
- Q91 为什么加工性能优于 MHC？
- Q92 为什么成为工业标准材料？
- Q93 为什么 MHC 没有取代 TZM？
- Q94 TZM 未来会被哪些材料替代？
- Q95 如何根据工况选择 TZM 或 MHC？

第十篇 产品类型（Q96-Q105）

- Q96 TZM 有哪些产品形态？
- Q97 TZM 棒材有哪些规格？
- Q98 TZM 板材有哪些规格？
- Q99 TZM 薄板有哪些规格？
- Q100 TZM 管材如何制造？
- Q101 TZM 坩埚如何制造？
- Q102 TZM 靶材有哪些要求？
- Q103 TZM 旋转阳极如何加工？
- Q104 TZM 异形件如何制造？
- Q105 TZM 表面状态有哪些？

第十一篇 应用领域 (Q106–Q135)

半导体产业

- Q106 为什么 TZM 广泛用于半导体设备？
- Q107 TZM 如何应用于单晶硅生长炉？
- Q108 TZM 为什么适用于蓝宝石长晶设备？
- Q109 TZM 在 SiC 晶体生长中有哪些应用？
- Q110 TZM 为什么适用于 GaN 设备？
- Q111 TZM 热场部件包括哪些？
- Q112 TZM 如何提高晶体生长稳定性？

真空热处理行业

- Q113 TZM 什么是真空炉核心材料？
- Q114 TZM 适用于哪些真空炉部件？
- Q115 TZM 为什么适合作加热元件支撑件？
- Q116 TZM 在烧结炉中的作用是什么？
- Q117 TZM 为什么适合高真空烧结？

航空航天

- Q118 TZM 为什么用于航空航天？
- Q119 TZM 如何应用于火箭发动机？
- Q120 TZM 喷管有哪些优势？
- Q121 TZM 如何应用于高超声速飞行器？
- Q122 TZM 为什么适用于再入飞行器？

核工业与聚变

- Q123 TZM 为什么用于核工业？
- Q124 TZM 如何应用于聚变装置？
- Q125 TZM 适合作中子辐照部件吗？
- Q126 TZM 如何应用于等离子体装置？

玻璃工业

- Q127 TZM 为什么用于玻璃制造？
- Q128 TZM 如何应用于玻璃熔炉？

金属加工

- Q129 TZM 为什么适合作压铸模芯？
- Q130 TZM 为什么用于热冲压模具？
- Q131 TZM 如何应用于等温锻造？

医疗与电子

- Q132 TZM 为什么用于 X 射线旋转阳极？
- Q133 TZM 为什么用于电子束设备？
- Q134 TZM 为什么用于离子注入设备？

Q135 TZM 还能应用于哪些科研装备？

第十二篇 全球产业（Q136–Q145）

Q136 全球 TZM 主要生产国家有哪些？

Q137 全球主要 TZM 制造企业有哪些？

Q138 欧洲 TZM 产业有哪些特点？

Q139 美国 TZM 产业有哪些优势？

Q140 日本 TZM 产业现状如何？

Q141 中国 TZM 产业发展如何？

Q142 全球 TZM 市场规模有多大？

Q143 TZM 价格由哪些因素决定？

Q144 TZM 未来市场需求如何？

Q145 哪些行业将推动 TZM 增长？

第十三篇 检测与质量控制（Q146–Q155）

Q146 如何检测 TZM 化学成分？

Q147 如何检测氧氮杂质？

Q148 如何检测显微组织？

Q149 如何检测晶粒尺寸？

Q150 如何检测 TiC 颗粒？

Q151 如何检测密度？

Q152 如何检测硬度？

Q153 如何检测高温拉伸性能？

Q154 如何检测蠕变性能？

Q155 如何评价 TZM 质量等级？

第十四篇 专家问答（Q156–Q170）

Q156 为什么 TZM 能够长期保持市场主导地位？

Q157 TZM 最大的技术优势是什么？

Q158 TZM 最大的技术瓶颈是什么？

Q159 TZM 生产最难控制的工艺参数是什么？

Q160 TiC 颗粒越细越好吗？

Q161 如何进一步提高 TZM 高温性能？

Q162 中国 TZM 与国际先进水平还有哪些差距？

Q163 TZM 未来是否会完全被 MHC 替代？

Q164 TZM 未来是否会被高熵合金替代？

Q165 TZM 是否适合增材制造时代？

Q166 TZM 未来最大的市场在哪里？

Q167 半导体产业为何持续推动 TZM 需求增长？

Q168 核聚变会带来 TZM 新的发展机遇吗？

Q169 AI 芯片制造是否会增加 TZM 需求？

Q170 下一代钼基高温合金的发展方向是什么？



第一篇 基础知识

Q1 什么是钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 简称 TZM）是一种以钼（Mo）为基体，通过添加微量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）形成弥散强化相的高性能钼基难熔合金（Molybdenum-Based Refractory Alloy）。它是在纯钼基础上发展起来的最成熟、应用最广泛的高温结构材料之一，具有高熔点、高强度、高硬度、高导热率、低热膨胀系数、优异的高温抗蠕变性能以及良好的真空稳定性，被广泛应用于航空航天、半导体、真空热处理、玻璃制造、压铸模具、核工业及电子工业等高端装备领域。TZM 并不是一种简单的钼合金，而是一种典型的微合金化强化材料。通过在钼基体中加入约 0.5% 的钛、0.08% 的锆以及少量碳，在烧结和热加工过程中形成细小、稳定的 TiC 和 ZrC 弥散碳化物。这些碳化物能够有效抑制位错运动和晶界迁移，从而显著提高材料的高温强度、再结晶温度及长期服役稳定性。因此，TZM 成为目前工业应用最成熟、商业化程度最高的钼基高温合金。

（一）钛锆钼合金（TZM）的基本定义

从材料分类来看，TZM 属于难熔金属合金（Refractory Metal Alloy），同时也是钼基高温合金（Molybdenum High-Temperature Alloy）的代表材料。其名称来源于主要强化元素：T（Titanium）：钛，Z（Zirconium）：锆，M（Molybdenum）：钼。虽然名称中未包含碳（C），但碳实际上是 TZM 不可缺少的重要组成元素。没有碳，Ti 和 Zr 难以形成稳定的碳化物强化相，材料的高温性能将明显下降。工业上，TZM 通常采用以下典型化学成分（质量分数）：

元素	含量（wt.%）	作用
Mo	余量（Balance）	基体材料，提供高熔点、高导热性及高温强度
Ti	0.40~0.55	与碳形成 TiC，提高高温强度
Zr	0.06~0.12	与碳形成 ZrC，细化晶粒，提高抗蠕变性能
C	0.01~0.04	形成 TiC、ZrC 强化相，提高组织稳定性

其中，不同国家标准和制造企业允许的成分范围略有差异，但总体组成基本一致。

（二）TZM 的发展背景

20 世纪 40 年代以前

工业高温结构材料主要采用纯钼。纯钼虽然具有 2623℃的高熔点、较高的导热率和较低的蒸气压，但在 1200℃以上容易发生再结晶和晶粒粗化，高温强度迅速下降，限制了其工程应用。

20 世纪 50 年代

美国率先开展钼基微合金化研究，尝试加入 Ti、Zr、Hf 及碳等元素改善纯钼性能。研究发现，Ti 和 Zr 能够与碳形成稳定的细小碳化物，并在高温下保持较好的组织稳定性。

20 世纪 60 年

经过大量实验，美国成功开发出 TZM 合金，并于 20 世纪 60 年代实现工业化生产。此后，TZM 迅速应用于航天发动机、真空炉、高温模具及电子工业，并逐渐成为全球应用最广泛的钼基高温合金。目前，TZM 仍然是国际高温钼合金的重要标准材料，也是许多新型钼基合金（如 MHC、ZHM 等）的性能比较基准。

（三）TZM 的强化机理

TZM 的优异性能来源于多种强化机制的协同作用，而不是依赖单一强化方式。其中，TiC 和 ZrC 弥散碳化物是 TZM 强化效果最重要的来源。。

强化机制	作用原理	对性能的影响
弥散强化	TiC、ZrC 颗粒均匀分布于钼基体	提高高温强度和抗蠕变性能
晶界强化	第二相粒子钉扎晶界	提高再结晶温度，抑制晶粒长大
固溶强化	少量 Ti、Zr 固溶于钼基体	提高室温及中温强度
加工强化	锻造、轧制形成纤维组织	提高综合力学性能

（四）TZM 的主要性能特点

与纯钼相比，TZM 综合性能显著提高。正是这些综合性能，使 TZM 成为众多高温装备的重要材料。

性能项目	TZM 特点
熔点	接近纯钼，约 2620 °C以上
密度	约 10.1~10.2 g/cm³
高温强度	明显高于纯钼
再结晶温度	比纯钼提高约 200~300 °C
抗蠕变性能	显著提高
导热率	保持较高水平
热膨胀系数	较低，尺寸稳定性好
蒸气压	极低，适用于高真空环境
加工性能	优于多数其他钼基高温合金
焊接性能	可采用电子束焊、激光焊等特殊工艺

（五）TZM 为什么能够长期用于高温环境？

高温下，材料失效通常来自三个方面：晶粒粗化、蠕变变形和组织软化。TZM 中的 TiC 和 ZrC 颗粒能够长期稳定存在于钼基体中，对位错和晶界形成有效阻碍，降低晶界迁移速度，延缓再结晶和晶粒长大，同时降低高温蠕变速率。因此，TZM 能够在 1200~1400 °C长期工作，在短时间条件下甚至可承受 1600 °C以上的工作环境，而不会像纯钼那样快速软化。

（六）TZM 的主要制造工艺

由于钼熔点极高，传统熔炼工艺难以保证成分均匀性，因此 TZM 几乎全部采用粉末冶金路线制造。典型工艺流程包括：高纯钼粉、钛粉、锆粉及石墨粉配料 → 精密混粉 → 冷等静压或模压成形 → 高温烧结 → 热等静压(部分产品) → 锻造 → 轧制或旋锻 → 退火 → 机械加工 → 检测 → 成品。粉末冶金工艺能够保证 Ti、Zr 及碳均匀分布，并形成稳定的细小强化相，是获得高性能 TZM 的关键。

（七）TZM 的主要应用领域

凭借优异的综合性能，TZM 广泛应用于高温、高真空和高热负荷环境，其中，真空炉和半导体装备是目前 TZM 最主要的应用市场。

应用领域	典型用途
半导体工业	热场构件、加热元件、支撑件
真空热处理	真空炉加热器、隔热屏、支撑件
压铸工业	铝、镁压铸模芯
航空航天	火箭喷嘴、高温结构件
玻璃工业	玻璃熔融电极、耐高温零件
核工业	高温结构部件
电子工业	X 射线阳极、电子束设备零件
科研设备	高温实验装置、真空设备

（八）TZM 在钼基合金中的地位

目前，TZM 仍是国际应用最成熟、市场规模最大的钼基高温合金，也是评价其他钼基合金性能的重要参照材料。近年来，虽然 MHC（Mo-Hf-C）、ZHM（Zr-Hf-Mo）等新型钼基高温合金在 1500 °C 以上长期服役性能方面表现更加优异，但由于 TZM 具有工艺成熟、成本较低、加工性能较好、供应体系完善及工程应用经验丰富等优势，其在全球高温装备制造领域仍占据主导地位。

中钨智造认为，TZM 是现代钼基高温合金发展的里程碑材料，也是目前商业化最成功的钼基难熔合金。其通过 Ti、Zr 和 C 的微合金化设计，在保持钼高熔点、高导热率和低蒸气压优势的同时，大幅提高了高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，实现了纯钼难以达到的综合性能。经过六十余年的工程应用验证，TZM 已形成完善材料体系、制造工艺和国际标准，至今仍是半导体热场、真空炉、高温模具、航空航天及先进制造装备的重要结构材料，也是衡量新一代钼基高温合金性能与工程应用价值的重要基准。

Q2 TZM 名称是什么意思？

TZM 是国际通用的钼基高温合金牌号，也是目前应用最广泛的钼基难熔合金之一。TZM 并不是某一家企业的商品名称，而是根据其主强化元素命名形成的材料简称。其中，T 代表钛（Titanium），Z 代表锆（Zirconium），M 代表钼（Molybdenum），因此 TZM 的完整含义为 Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，即钛-锆-钼合金。严格来说，TZM 是一种以钼（Mo）为基体，通过微量添加钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）形成 TiC、ZrC 弥散强化相的钼基高温合金。虽然碳（Carbon）也是关键强化元素，但由于其加入量极低，通常仅为 0.01%~0.04%，国际命名中并未将碳包含在缩写内，因此牌号仍采用 TZM 表示，而不是 TZCM 或其他形式。

（一）TZM 名称的来源

字母	英文名称	中文名称	在合金中的作用
T	Titanium	钛	与碳形成 TiC，提高高温强度和再结晶温度
Z	Zirconium	锆	与碳形成 ZrC，提高晶界稳定性和抗蠕变性能
M	Molybdenum	钼	合金基体，提供高熔点、高导热率及高温强度

因此，TZM 实际上可以理解作为一种以钼为基体、以钛和锆为主要强化元素的高性能钼基合金。

（二）为什么 TZM 名称中没有 C（碳）？

很多初学者都会提出这个问题：既然碳是重要强化元素，为什么 TZM 名称中没有 C？原因在于，国际材料命名通常优先采用主要合金化元素进行命名，而碳属于微量强化元素，其作用主要是与钛和锆反应生成稳定的碳化物，而不是以固溶状态大量存在于钼基体中。因此，国际上沿用了 TZM 这一历史命名方式。实际上，如果没有碳的参与，仅加入钛和锆并不能形成 TZM 所具有的高温性能。碳能够分别与钛和锆形成 TiC 和 ZrC 细小弥散颗粒，这些第二相粒子能够有效钉扎晶界，抑制晶粒长大，提高再结晶温度和抗蠕变性能。因此，从材料强化机理来看，碳虽然未出现在名称中，却是 TZM 不可缺少的重要组成部分。

（三）TZM 属于什么类型的材料？

按照国际材料分类，TZM 属于钼基难熔合金（Molybdenum-Based Refractory Alloy），也是粉末冶金钼合金（Powder Metallurgy Molybdenum Alloy）的典型代表。从强化机制来看，TZM 属于典型的微合金化弥散强化材料，其性能提升主要来源于以下几个方面：Ti 和 Zr 形成稳定碳化物，提高高温强度；TiC 和 ZrC 颗粒抑制晶界迁移，提高再结晶温度；热机械加工形成纤维状组织，提高高温塑性和韧性；粉末冶金工艺获得高致密度和均匀组织。因此，TZM 并不是纯钼，而是一种经过系统合金化设计和热加工强化的高性能工程材料。

（四）TZM 典型化学成分

国际主流 TZM 材料的化学成分大致如下（不同标准及制造商略有差异）：

元素	典型含量（wt.%）	作用
Mo	余量（Balance）	基体材料
Ti	0.40～0.55	形成 TiC，提高高温强度
Zr	0.06～0.12	形成 ZrC，提高晶界稳定性
C	0.01～0.04	与 Ti、Zr 形成碳化物强化相
O、N、Fe、Ni 等杂质	极低	控制杂质，提高高温性能
说明	Ti、Zr 与 C 之间的比例通常经过严格控制，以保证形成细小、均匀且热稳定的 TiC 和 ZrC 颗粒。	

（五）TZM 名称在国际上是否统一？

TZM 已经成为全球通用名称，在国际文献、航空航天、半导体、核工业及粉末冶金领域均广泛使用。不同国家和企业通常不会改变 TZM 这一名称，而是在其后增加标准号或企业牌号。例如：

表示方式	含义
TZM Alloy	通用国际名称
TZM Moly Alloy	钼基 TZM 合金
Mo-Ti-Zr Alloy	按元素组成描述
ASTM TZM	符合 ASTM 标准的 TZM 材料
DIN TZM	德国标准 TZM 材料
JIS TZM	日本标准 TZM 材料（部分企业使用）

虽然不同厂家可能采用内部商业编号，但技术资料和国际贸易中通常仍以 TZM 作为统一名称。

（六）为什么 TZM 能够成为钼基合金的代表材料？

自 20 世纪 60 年代实现工业化以来，TZM 凭借优异的综合性能逐渐取代纯钼，成为钼基高温材料中应用最广泛的合金之一。与纯钼相比，TZM 具有更高的室温强度、更高的再结晶温度、更好的高温抗蠕变性能、更优异的抗热疲劳能力以及更长的高温使用寿命。同时，相较于后续开发的 MHC（Mo-Hf-C）等高性能钼基合金，TZM 制造工艺更加成熟、加工性能更好、成本相对较低，因此长期占据全球钼基高温合金的主导地位，在真空炉、热场系统、半导体装备、压铸模具、电子工业及航空航天等领域得到广泛应用。

Q3 钛锆钼合金（TZM）属于哪一类高温材料？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）属于钼基难熔合金（Molybdenum-Based Refractory Alloy），也是目前国际工业应用最成熟、规模最大的钼基高温结构材料之一。从材料分类来看，TZM 既属于难熔金属材料（Refractory Metals），又属于弥散强化型钼基高温合金（Dispersion-Strengthened Molybdenum Alloy），广泛应用于长期工作温度 1000~1700 °C 的高温、高真空、高热流密度环境。与镍基高温合金、钨基合金及钽基合金相比，TZM 具有较高的熔点、优异的高温强度、良好的导热性能、较低的热膨胀系数以及较好的加工性能，因此长期被认为是纯钼材料向高性能钼基高温合金发展的代表性材料，也是 MHC、ZHM 等新型钼基高温合金的重要技术基础。

（一）TZM 在材料体系中的分类

从现代高温材料体系来看，TZM 不是普通钼材料，而是经过微合金化强化后的高性能钼基高温结构材料。TZM 可按照不同分类方法归属于以下几类。

分类方式	TZM 所属类别	说明
按基体材料分类	钼基合金（Molybdenum Alloy）	以 Mo 为主要基体元素
按熔点分类	难熔金属材料（Refractory Metal）	熔点约 2623 °C，属于高熔点金属
按强化方式分类	碳化物弥散强化合金	TiC、ZrC 第二相强化
按用途分类	高温结构材料	用于承载高温载荷
按制造工艺分类	粉末冶金材料	几乎全部采用粉末冶金生产
按服役环境分类	真空高温材料	适用于真空、惰性气氛及还原性气氛
按产业分类	高性能难熔金属功能结构材料	高端装备制造的重要基础材料

（二）TZM 属于难熔金属（Refractory Metals）

国际上通常将熔点高于约 2000 °C 的金属称为难熔金属（Refractory Metals）。主要包括：

材料	熔点（°C）	材料	熔点（°C）	材料	熔点（°C）
钨（W）	3422	钽（Ta）	3017	铌（Nb）	2477
铼（Re）	3186	铱（Ir）	2446	钼（Mo）	2623

由于 TZM 以钼为基体，因此天然属于难熔金属材料体系。与普通钢铁材料相比，TZM 能够在 1000 °C 以上长期保持较高的力学性能，这是传统耐热钢无法达到的。

（三）、TZM 属于钼基高温合金（Molybdenum High-Temperature Alloy）

国际文献通常将 TZM 归类为：Molybdenum High Temperature Alloy 或 Molybdenum Structural Alloy。其典型特点包括：高熔点、高再结晶温度、优异的高温强度、良好的抗蠕变性能、较低热膨胀系数、高导热率、真空环境尺寸稳定。此，TZM 是一种典型的高温承力结构材料，而不是耐腐蚀材料或功能材料。

（四）、TZM 属于第二相强化型合金

纯钼虽然具有较高熔点，但在高温下容易发生再结晶和晶粒粗化。TZM 通过加入 Ti 约 0.40~0.55%、Zr 约 0.06~0.12%、C 约 0.01~0.04%。在烧结及热加工过程中形成大量细小 TiC、ZrC 碳化物颗粒。这些碳化物均匀分布于晶粒内部和晶界附近，对位错运动和晶界迁移形成有效阻碍，因此 TZM 属于典型的弥散强化（Dispersion Strengthened）钼基高温合金。这种

强化机制使 TZM 相比纯钼具有更高的高温强度、更好的抗蠕变性能以及更高的再结晶温度。

（五）、TZM 属于粉末冶金高温材料

目前工业生产的 TZM 几乎全部采用粉末冶金工艺制造。其主要工艺包括：钼粉制备→混粉→压制→高温烧结→热等静压（部分产品）→锻造→轧制→热处理→机械加工。采用粉末冶金的原因主要有：Ti、Zr 含量极低，传统熔炼难以保证均匀分布； 难熔金属熔点极高，熔炼成本巨大； 粉末冶金能够获得更加均匀的组织； 有利于形成稳定细小的 TiC、ZrC 强化颗粒； 可获得接近理论密度的高性能材料。 因此，TZM 也是国际粉末冶金高温材料的重要代表之一。

（六）、TZM 属于高温结构材料，而非耐热钢

很多工程人员容易将 TZM 与耐热钢混淆。实际上，两者属于完全不同的材料体系。

对比项目	TZM	耐热钢
基体	Mo	Fe
熔点	2623 °C	1400~1530 °C
长期工作温度	1000~1700 °C	600~800 °C
强化方式	TiC、ZrC 强化	碳化物析出强化
工作环境	真空、惰性气氛	空气、燃烧环境
高温强度	极高	中等

因此，在 1200 °C 以上长期服役时，TZM 远优于传统耐热钢。

（七）、TZM 属于先进制造领域的重要基础材料

由于综合性能优异，TZM 已成为国际高端装备制造的重要基础材料。目前主要应用包括半导体单晶炉热场构件、真空热处理设备、 蓝宝石晶体生长设备、 热等静压设备、 压铸模芯、热冲压模具、 X 射线旋转阳极、 火箭喷管及航天热结构件、 核工业高温部件、 高温实验装置。 这些应用均属于高附加值、小批量、高可靠性的高端制造领域。

（八）、TZM 在全球高温材料中的定位

TZM 处于耐热钢与超高温钨基材料之间，是中高温真空环境中应用最广泛的钼基高温结构材料。国际高温材料大致可分为以下几个层级：

材料类别	代表材料	典型工作温度（°C）	主要特点
耐热钢	310S、253MA 等	600~800	成本低、抗氧化
镍基高温合金	Inconel、Hastelloy 等	700~1100	抗氧化、综合性能优异
钼基高温合金	TZM、MHC、ZHM	1000~1800	真空高温强度高、导热性优异
钨基难熔合金	W、W-Re 等	1600~2500 以上	熔点最高、超高温性能突出

中钨智造认为，TZM 是一种典型的粉末冶金钼基难熔高温结构材料，也是目前全球应用最成熟、产业化程度最高的钼基高温合金。其本质属于以 TiC 和 ZrC 第二相弥散强化为核心的钼基高温结构合金，在 1000~1700 °C 真空及惰性气氛环境下兼具优异的高温强度、抗蠕变性能、尺寸稳定性及导热性能。凭借成熟的制造工艺、较好的加工性能和相对合理的成本，TZM 已成为半导体、航空航天、真空装备、核工业、高温模具等领域应用最广泛的高性能难熔金属材料之一，也是 MHC、ZHM 等新一代钼基高温合金发展的重要技术基础和性能参照材料。

Q4：TZM 为什么属于难熔金属合金？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）属于典型的难熔金属合金（Refractory Metal Alloy），因为其基体金属为钼（Mo），而钼是国际公认的五大难熔金属之一。TZM 不仅继承了纯钼高熔点、高弹性模量、高导热率、低蒸气压等难熔金属的基本特性，还通过微量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）形成稳定的 TiC、ZrC 强化相，使其高温强度、抗蠕变性能及组织稳定性远优于纯钼。因此，TZM 被广泛应用于长期服役温度达 1000~1600 °C 的高温结构件，是目前工业应用最成熟、最重要的钼基难熔合金之一。

（一）什么是难熔金属？

难熔金属（Refractory Metals）通常是指熔点高于约 2000 °C，且能够在高温环境下长期保持优良力学性能和化学稳定性的金属材料。这类金属具有共同特点，包括熔点极高、蒸气压低、高温强度高、抗蠕变能力强以及较好的热导率。国际材料工程领域通常将以下五种金属称为五大难熔金属：

金属	元素符号	熔点（°C）	密度（g/cm³）	主要特点
钨	W	3422	19.25	熔点最高，高温强度最佳
铼	Re	3186	21.02	塑性优异，耐高温性能突出
钽	Ta	3017	16.69	耐腐蚀性能优异
钼	Mo	2623	10.28	综合性能优异，加工性能较好
铌	Nb	2477	8.57	密度较低，耐高温性能良好

TZM 的主体成分为钼，因此从材料分类上属于钼基难熔金属合金（Molybdenum-Based Refractory Alloy）。

（二）为什么 TZM 属于难熔金属合金，而不是普通钼合金？

TZM 虽然只添加了少量 Ti、Zr 和 C，但这些元素并没有改变材料以钼为主体的本质。TZM 典型化学成分如下：

元素	典型含量（wt.%）	作用
Mo	余量	基体，提供高熔点和高温性能
Ti	0.40~0.55	与 C 形成 TiC，提高高温强度
Zr	0.06~0.12	与 C 形成 ZrC，细化晶粒
C	0.01~0.04	形成强化碳化物

由于钼仍占材料质量的 99%左右，因此 TZM 的物理性能和高温行为主要由钼决定，而微量合金元素主要起强化作用，因此国际标准始终将 TZM 归属于钼基难熔合金，而非一般意义上的低合金材料。

（三）TZM 具备哪些典型难熔金属特征？

TZM 几乎具备难熔金属材料的全部典型特征。

性能特点	TZM 表现	是否属于难熔金属特征
熔点高	接近纯钼（约 2620 °C）	是
高温强度高	明显高于普通钢和镍基合金	是

性能特点	TZM 表现	是否属于难熔金属特征
蒸气压低	真空下挥发极少	是
导热性能好	高于多数高温合金	是
热膨胀系数低	高温尺寸稳定	是
高温抗蠕变	优异	是
高弹性模量	刚性大	是

这些性能共同决定了 TZM 能够长期用于普通金属无法工作的极端高温环境。

（四）为什么 TZM 能够长期工作在高温环境？

普通钢铁材料在 600℃左右强度已明显下降，镍基高温合金通常长期使用温度约 800～1100℃。而 TZM 由于具有高熔点钼基体和稳定碳化物强化相，可在更高温度下保持较好的力学性能。不同材料长期使用温度比较如下：

材料	推荐长期使用温度（℃）
碳钢	<450
不锈钢	600～800
镍基高温合金	800～1100
纯钼	1000～1400
TZM	1200～1600
MHC	1400～1800

因此，在真空或保护气氛下，TZM 能够满足大量超高温结构件的服役要求。

（五）TZM 为什么比纯钼性能更好？

纯钼虽然属于难熔金属，但其在高温下容易发生再结晶和晶粒粗化，导致强度迅速下降。TZM 通过微合金化有效解决了这一问题。强化机理主要包括：（1）Ti 和 Zr 与 C 形成稳定的 TiC、ZrC 弥散强化相。（2）细小碳化物阻碍位错运动，提高高温强度。（3）碳化物钉扎晶界，抑制晶界迁移，提高再结晶温度。（4）细化晶粒，提高组织稳定性。因此，TZM 虽然仍属于钼基难熔金属，但其综合高温性能明显优于纯钼。

（六）为什么 TZM 不是超高温陶瓷？

很多用户容易将 TZM 与碳化物陶瓷混淆。实际上，两者属于完全不同的材料体系，TZM 本质上仍然属于金属材料，而不是陶瓷材料。

对比项目	TZM	超高温陶瓷
材料类型	金属合金	陶瓷
基体	钼	碳化物、硼化物等
塑性	有一定塑性	基本无塑性
可加工性	可锻造、轧制、切削	加工困难
导电性	良好	多数较差
典型应用	热场、模具、真空设备	热防护、耐烧蚀构件

（七）TZM 属于哪些国际材料分类？

根据国际材料科学和工程领域的分类，国际文献通常采用 Refractory Molybdenum Alloy 或 TZM Alloy 来描述该材料。TZM 通常归属于以下类别：

分类体系	TZM 所属类别
材料学	难熔金属合金（Refractory Metal Alloy）
金属材料	钼基合金（Molybdenum Alloy）
高温材料	高温结构材料（High-Temperature Structural Material）
粉末冶金	粉末冶金钼合金（Powder Metallurgy Molybdenum Alloy）
工程应用	真空高温结构材料

（八）TZM 与其他难熔金属合金相比有什么特点？

合金	基体	主要强化方式	综合特点
TZM	Mo	TiC + ZrC	工业化最成熟，综合性能均衡
MHC	Mo	HfC	超高温性能更优，成本较高
Mo-La	Mo	La ₂ O ₃ 弥散强化	再结晶温度高，加工性能好
W-Re	W	固溶强化	极高温性能优异，价格昂贵
Nb 合金	Nb	固溶强化	密度低，氧化敏感

TZM 因兼顾性能、加工性和经济性，至今仍是应用最广泛的钼基难熔合金之一

中钨智造认为，TZM 之所以属于难熔金属合金，并非因为加入了 Ti、Zr 等强化元素，而是由于其主体材料为熔点高达 2623 ℃的钼，并通过 TiC 和 ZrC 弥散强化进一步提升了高温组织稳定性、抗蠕变性能和力学性能。作为典型的钼基难熔合金，TZM 兼具高熔点、低蒸气压、高导热率、高弹性模量、低热膨胀系数及优异的高温强度，在真空热场、半导体装备、航空航天、玻璃工业、压铸模具、电子束设备及核工业等领域具有不可替代的重要地位。经过六十余年的工程实践验证，TZM 仍然是全球工业应用最成熟、应用范围最广、综合性能最均衡的钼基难熔高温结构材料之一。

Q5：TZM 是谁发明的？

TZM（Titanium–Zirconium–Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）并非由某一位科学家单独发明，而是 20 世纪 50 年代末至 60 年代初美国难熔金属研究计划的重要成果，是美国航空航天工业、核工业和粉末冶金技术共同推动下形成的一种工程化钼基高温合金。其核心技术由美国多家研究机构、国家实验室及工业企业联合完成，并最终实现工业化生产。因此，TZM 更准确的定义应作为一种集体创新成果，而不是个人发明。目前国际公开文献普遍认为，美国在 TZM 材料体系的建立、工业化生产和标准化方面居于主导地位，其中美国空军材料实验室（AFML，Air Force Materials Laboratory）、美国国家航空航天局（NASA）、美国原子能委员会（AEC，Atomic Energy Commission）、美国国防相关研究机构以及当时的钼生产企业共同推动了 TZM 的发展。

（一）TZM 诞生的历史背景

第二次世界大战结束后，航空发动机、导弹、火箭发动机喷嘴、核反应堆及高温真空设备迅速发展，对高温结构材料提出了更高要求。当时工业界已经广泛采用纯钼作为高温结构材料，因为钼具有以下优势：熔点高达 2623 ℃；导热性能优异；高温蒸气压低；真空环境稳定；

热膨胀系数较小。然而，工程应用很快发现纯钼存在明显不足。随着温度超过 1000~1200 °C，纯钼容易发生再结晶，晶粒迅速长大，高温强度快速下降，抗蠕变能力不足，在长期载荷下容易发生塑性变形甚至失效。因此，美国开始实施一系列钼基高温合金研究计划，希望开发能够替代纯钼的新型高温材料。

（二）为什么最终选择 Ti、Zr 和 C？

20 世纪 50 年代，美国研究人员系统研究了多种微合金化元素，包括 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、Re、C、B 等。大量实验表明：Ti 能够形成稳定 TiC； Zr 能够形成稳定 ZrC； Ti 与 Zr 共同加入时，可形成复合碳化物； 少量碳能够促进碳化物析出； 三者协同强化效果明显优于单独添加。 最终确定了经典成分是：Ti 约 0.40~0.55 wt% ， Zr 约 0.06~0.12 wt% ， C 约 0.01~0.04 wt% ， Mo 为余量。这就是后来国际上统一认可的 TZM 组成。因此，TZM 名称实际上来源于：T——Titanium（钛） 、Z——Zirconium（锆） 、M——Molybdenum（钼）

（三）TZM 最早由谁实现工业化？

虽然 TZM 不是由某一位科学家发明，但工业化成功主要归功于美国粉末冶金工业。20 世纪 60 年代，美国多家难熔金属企业率先建立了完整生产工艺，包括：高纯钼粉制备； 合金粉均匀混合； 冷等静压成形； 高温烧结； 锻造； 热轧； 再结晶控制； 成品加工。 其中，美国当时最大的钼材料制造企业之一率先实现 TZM 的大规模商业生产，使 TZM 迅速进入航空航天及工业市场。随后欧洲、日本相继掌握 TZM 生产技术。

（四）TZM 发展的重要时间节点

时间	发展阶段	主要事件
1940 年代	纯钼时代	纯钼开始广泛应用于真空及军工领域
1950 年代	微合金研究	美国开展钼基强化机理研究
1958~1962 年	TZM 形成	Ti-Zr-C 体系逐步确定
1960 年代	工业化生产	美国率先实现 TZM 商业化
1970 年代	国际推广	欧洲、日本建立 TZM 生产体系
1980 年代	广泛应用	成为国际主流钼基高温合金
1990 年至今	持续优化	工艺不断改进，但基础成分基本保持不变

（五）为什么 TZM 能够迅速成功？

TZM 取得成功主要有五个原因。首先，强化机理明确。TiC 和 ZrC 能够有效钉扎晶界，提高再结晶温度，改善高温强度和抗蠕变性能。其次，加工性能优异。与后来的 MHC 相比，TZM 具有更好的热加工性能，可锻造、轧制、旋压及机械加工，更适合工业化生产。第三，制造成本较低。Ti 和 Zr 价格远低于 Hf，不会明显增加材料成本。第四，粉末冶金工艺成熟。美国在粉末冶金方面已具备成熟工业基础，能够稳定生产大尺寸 TZM 材料。第五，下游需求旺盛。航空航天、电子工业、玻璃工业、真空炉及压铸模具等行业快速发展，为 TZM 提供了广阔市场。

（六）为什么后来又发展出了 MHC？

虽然 TZM 显著优于纯钼，但随着航空航天、核工业和半导体装备的发展，人们发现 TZM 在 1500 °C 以上长期服役时仍存在一定局限。主要问题包括 TiC 和 ZrC 在超高温下稳定性有限；长期高温服役后晶粒仍会逐渐长大； 抗蠕变性能难以满足更高温应用需求。 因此，20 世

纪 70 年代以后，美国、德国、日本开始研究 Hf 强化体系。研究发现 Hf 形成的 HfC 碳化物热稳定性明显高于 TiC 和 ZrC，因此开发出 Mo-Hf-C 体系，即今天的 MHC（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy）。MHC 实际上是在 TZM 基础上的进一步发展，代表了钼基高温合金向更高服役温度、更高组织稳定性和更长使用寿命的发展方向。

（七）TZM 目前仍是国际主流钼基高温合金吗？

答案是肯定的。尽管近年来 MHC、ZHM 等新型钼基合金不断发展，但 TZM 仍然是全球应用最广泛、生产规模最大、产业链最成熟的钼基高温合金。原因主要包括制造工艺成熟，全球供应体系完善；综合性能优异，能够满足绝大多数工业高温应用；成本相对较低，具有较高的经济性；国际标准体系完善，产品规格齐全；加工性能良好，适合制造复杂零部件。因此，在真空炉、高温模具、压铸设备、半导体装备、玻璃工业及航空航天等领域，TZM 至今仍占据主导地位，而 MHC 则更多应用于对高温组织稳定性和抗蠕变性能要求更高的高端装备。

综上，我们认为，TZM 并非由某一位科学家单独发明，而是美国 20 世纪 50 年代末至 60 年代初难熔金属研究体系集体创新的成果，其诞生标志着钼基高温合金由纯钼时代迈入微合金化强化时代。通过 Ti、Zr 和 C 三种元素的协同强化，TZM 首次实现了高温强度、抗蠕变性能、加工性能和制造成本之间的良好平衡，并迅速成为全球钼基高温合金的工业标准。此后出现的 MHC、ZHM 等先进钼基合金，本质上都是在 TZM 技术基础上的进一步发展和优化，因此 TZM 不仅是现代钼基高温合金产业的起点，也是整个难熔金属工程材料体系发展史上的重要里程碑。

Q6 TZM 的发展历史是怎样的？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）是目前世界上应用最广泛、工业化程度最高的钼基高温合金之一。其发展历程贯穿了现代粉末冶金、航空航天、核工业、电子工业及半导体装备的发展历史。从 20 世纪中叶诞生至今，TZM 已历经基础研究、工业化、规模应用、高端装备配套及持续优化五个主要发展阶段，至今仍是国际高温钼合金领域的重要标准材料。与纯钼相比，TZM 通过微量添加 Ti、Zr 和 C，在钼基体中形成稳定的 TiC 和 ZrC 弥散强化相，大幅提高了材料的高温强度、再结晶温度、抗蠕变性能及热疲劳性能，实现了钼基材料由实验室材料向工程材料的重要跨越。

（一）第一阶段：纯钼工业化时期（20 世纪 40 年代以前）

20 世纪初，工业纯钼开始进入实用阶段。由于钼具有 2623℃的高熔点、较高的导热率、较低的热膨胀系数和较低的高温蒸气压，很快被应用于照明、电真空器件、高温炉及军工产品。第二次世界大战期间，美国、德国和英国大力发展真空冶金技术，高纯钼材料开始用于火箭喷嘴、电子管及军工装备。然而，纯钼很快暴露出明显缺陷：约 900~1000℃开始发生再结晶；长时间高温服役晶粒迅速长大；高温强度下降明显；抗蠕变性能不足；热循环后容易产生晶界脆化。这些问题促使科研人员开始研究钼基合金强化技术。

（二）第二阶段：钼基微合金化研究（20 世纪 40—50 年代）

第二次世界大战结束后，美国率先开展钼基高温材料系统研究。

美国空军、美国海军、美国原子能委员会（AEC）及多家研究机构针对高温发动机、导弹及核工业需求，系统研究了多种微量合金化元素，包括 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、C、B。研究人员发现单纯依靠固溶强化效果有限，而 Ti、Zr 与碳形成稳定碳化物后，可明显提高高温性能。

这一时期提出了后来著名的 Ti + Zr + C 微合金强化理论。研究表明，Ti 形成 TiC； Zr 形成 ZrC； 两种碳化物均可弥散析出； 能够有效钉扎晶界； 延缓再结晶； 提高抗蠕变性能。这一理论成为 TZM 诞生的重要基础。

（三）第三阶段：TZM 正式诞生（20 世纪 50 年代末—60 年代）

20 世纪 50 年代末，美国首先完成 TZM 工业化配方。典型成分逐渐确定为：

元素	含量（wt.%）
Ti	0.40～0.55
Zr	0.06～0.12
C	0.01～0.04
Mo	余量

该配方兼顾了强度、延展性、加工性能、焊接性能、工业生产稳定性，成为后来几十年几乎所有 TZM 标准的基础。与此同时，美国开始采用粉末冶金、真空烧结、锻造、轧制工艺制造工业 TZM 材料。TZM 这一名称即来源于 Titanium + Zirconium + Molybdenum。

（四）第四阶段：工业化快速发展（20 世纪 60—80 年代）

这是 TZM 发展最快的时期。随着阿波罗计划、导弹工业、核工业及电子工业的发展，美国成为全球最大的 TZM 生产国。随后德国、日本、英国、法国、苏联等国家陆续建立 TZM 生产能力。这一时期形成了完整工业体系：粉末制备→真空烧结→热等静压→热锻→热轧→精密加工。国际上逐渐形成多个主要生产企业，包括 Plansee（奥地利）、Wah Chang（美国）、H.C. Starck（德国）、Climax Molybdenum（美国）、Toshiba、日本特殊金属等企业。TZM 开始广泛用于真空炉热场、压铸模具、火箭喷管、高温结构件、电子束设备、X 射线旋转阳极、核工业设备。这一时期 TZM 已成为国际高温钼材料的代表产品。

（五）第五阶段：标准化与全球推广（20 世纪 80—90 年代）

随着产业成熟，各国陆续建立 TZM 标准体系。主要标准包括：

标准体系	内容
ASTM	TZM 材料技术规范
AMS	航空材料规范
DIN	德国工业标准
JIS	日本工业标准
GB/T	中国国家标准及行业标准

与此同时，国际企业不断完善棒材、板材、管材、丝材、靶材、异形件等产品体系。TZM 逐渐成为国际高温钼材料事实上的工业标准。

（六）第六阶段：半导体与高端装备时代（21 世纪以来）

进入 21 世纪后，TZM 最大的增长动力来自半导体产业。随着单晶硅、蓝宝石、SiC、GaN、真空热场快速发展，TZM 再次进入高速增长阶段。目前全球大量应用于 CZ 单晶炉、热场支撑结构、加热器支架、热屏组件、真空烧结炉、HIP 设备、离子注入设备、PVD/CVD 设备。与此同时，航空航天、新能源及医疗装备也持续采用 TZM。

（七）第七阶段：MHC、ZHM 等新型钼合金的发展（2010 年至今）

近年来，由于核聚变、高超声速飞行器、第三代半导体、超高温真空装备的发展，对 1600℃ 以上长期服役提出更高要求。于是国际上开始发展 MHC（Mo-Hf-C）、ZHM（Mo-Zr-Hf）纳米强化 TZM、超细晶 TZM、氧化物弥散强化（ODS）钼合金。这些新材料并非替代 TZM，而是在 TZM 基础上的进一步发展。目前 TZM 仍然是全球应用最广泛的钼基高温合金。

（八）TZM 发展历程时间轴

时间	发展阶段	代表事件	技术意义
20 世纪 40 年代以前	纯钼时代	工业纯钼开始应用	奠定钼材料基础
20 世纪 40—50 年代	微合金化研究	Ti、Zr、C 强化理论提出	建立 TZM 强化机制
20 世纪 50 年代末—60 年代	TZM 诞生	美国完成工业化配方	世界首个成熟钼基高温合金
20 世纪 60—80 年代	工业化推广	航空航天、核工业大量应用	建立完整产业体系
20 世纪 80—90 年代	标准化阶段	ASTM、AMS、DIN 等标准完善	成为国际标准材料
21 世纪以来	高端装备阶段	半导体、真空热场快速发展	成为高端装备关键材料
2010 年至今	新型钼合金发展	MHC、ZHM、ODS 等相继出现	推动钼基高温合金持续升级

（九）TZM 为何能够长期保持主导地位？

尽管近年来 MHC、ZHM 等新型钼基高温合金不断发展，但 TZM 至今仍是全球应用最广泛的钼基高温结构材料，其原因主要包括：材料性能均衡，在室温塑性、高温强度、抗蠕变性能和加工性能之间实现了较好的综合平衡；粉末冶金工艺成熟，批量生产稳定性高；棒材、板材、管材、靶材及异形件等产品体系完善；国际标准体系健全，用户认可度高；产业链成熟，供应渠道稳定，制造成本明显低于 MHC 等新型钼基合金；同时，其长期工程应用积累了大量可靠性数据，广泛应用于航空航天、半导体、真空炉、电子工业和高温模具等领域。

中钨智造认为，TZM 的发展历史代表了现代钼基高温合金从基础研究走向工程应用的典型历程。自 20 世纪 50 年代诞生以来，TZM 凭借 TiC 和 ZrC 弥散强化机制，实现了纯钼材料难以达到的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，并率先完成了规模化工业生产。经过七十余年的技术积累，TZM 已建立起成熟的材料体系、制造工艺和国际标准，成为全球高温钼基合金的重要基准材料。未来，尽管 MHC、ZHM 及其他新型难熔合金将在更高温度和更严苛服役环境中发挥重要作用，但 TZM 凭借成熟的产业基础、优异的综合性能和良好的经济性，仍将在半导体装备、真空热处理、高温模具、航空航天及先进制造等领域长期保持核心地位。

Q6-1 中国 TZM 合金的发展历程

我国 TZM 合金的研究起步较国际先进国家稍晚，但经过数十年的技术积累，已建立起较为完整的研发、生产和应用体系。目前，我国已具备 TZM 粉末制备、粉末冶金成形、热加工、精密加工及大型复杂构件制造能力，并在半导体热场、高温真空设备、航空航天、电子工业和高端装备制造等领域实现了规模化应用。

（一）起步阶段（20 世纪 60—70 年代）

20 世纪 60 年代，在国家国防工业、航空航天及核工业发展的推动下，我国开始系统开展钼及钼基合金研究。早期研究主要由中国科学院、高等院校、有色金属科研院所及军工科研单位承担，重点围绕高纯钼材料制备、粉末冶金工艺及钼基微合金化开展基础研究。这一时期，我国对美国 TZM 材料进行了大量技术调研和性能分析，逐步掌握了 Ti、Zr、C 微合金化强化机制，并开始探索 TZM 实验室制备工艺。但受制于高纯钨钼粉末制备、真空烧结装备及热

加工能力，当时产品主要停留在实验研究阶段，与国际先进水平仍存在一定差距。

（二）起步阶段（20 世纪 60—70 年代）

20 世纪 60 年代，在国家国防工业、航空航天及核工业发展的推动下，我国开始系统开展钼及钼基合金研究。早期研究主要由中国科学院、高等院校、有色金属科研院所及军工科研单位承担，重点围绕高纯钼材料制备、粉末冶金工艺及钼基微合金化开展基础研究。这一时期，我国对美国 TZM 材料进行了大量技术调研和性能分析，逐步掌握了 Ti、Zr、C 微合金化强化机制，并开始探索 TZM 实验室制备工艺。但受制于高纯钼粉制备、真空烧结装备及热加工能力，当时产品主要停留在实验研究阶段，与国际先进水平仍存在一定差距。

（三）技术攻关阶段（20 世纪 80—90 年代）

改革开放后，随着国外先进材料技术逐步进入国内视野，我国 TZM 研究进入快速发展阶段。这一时期，国内多家科研院所、高校及有色金属企业相继开展 TZM 产业化技术研究，重点突破了高纯钼粉制备技术、Ti、Zr、C 均匀混粉工艺、真空烧结及液相烧结工艺、热锻与热轧工艺、旋锻加工技术、再结晶组织控制技术以及大规格棒材、板材制备技术等关键环节。与此同时，我国开始建立较为完整的 TZM 材料性能评价体系，对室温力学性能、高温抗拉强度、高温持久性能、蠕变性能、断裂韧性及热物理性能进行了系统研究，为后续工程化应用奠定了坚实基础。

（四）产业化发展阶段（21 世纪初）

进入 21 世纪后，随着国内半导体、真空热处理、高端装备制造及电子工业快速发展，TZM 材料需求持续增长。国内企业逐步实现 TZM 工业化生产，形成了棒材、板材、圆盘、管材、靶材、电极、丝材、异形零件及热场结构件等较为完整的产品体系。与此同时，国内企业逐步掌握了真空烧结、热等静压（HIP）、大变形锻造、多道次热轧、真空退火、精密机械加工及表面处理等核心制造工艺，产品综合性能已能够满足绝大多数工业领域的应用需求。

（五）高端应用发展阶段（2010 年至今）

近年来，在第三代半导体、光伏单晶炉、蓝宝石晶体生长、核工业、航空航天及先进真空装备快速发展的推动下，我国 TZM 材料进入高质量发展阶段。当前国内研发重点已由传统性能提升逐步转向综合性能优化，包括超高纯 TZM 材料开发、超细晶组织控制、大尺寸整体构件制造、超低氧及超低氮杂质控制、高温组织稳定性提升、自动化粉末冶金生产技术、数字化工艺模拟及全过程质量控制等多个方向。目前，部分国内企业已经能够生产大型 TZM 热场构件、高精度半导体设备零部件、高温模具及复杂异形高温结构件，在多个领域逐步实现进口替代。

（六）我国 TZM 产业的主要特点

目前，我国已成为全球重要的 TZM 生产国之一，并形成了较为完整的产业链体系。我国 TZM 产业主要具有以下特点：钼资源储量丰富、原材料供应稳定，粉末冶金产业体系完善、具备规模化制造能力，产品规格齐全，可覆盖棒材、板材、管材、丝材、靶材及定制异形件，半导体、真空炉、单晶生长及光伏热场成为主要应用市场，产品具有较高的性价比，在国际市场具备较强竞争力。与此同时，与国际领先企业相比，我国在超高纯原料控制、大型复杂构件批次一致性、长期高温服役数据库积累、先进粉末制备工艺及部分高端制造装备方面仍存在进一步提升空间。

（七）我国主要 TZM 研发与生产单位

目前，我国从事 TZM 材料研发、生产及应用的单位主要包括科研院所、高等院校及专业制造企业。科研方面，主要包括北京有色金属研究总院（现有研科技集团相关单位）、中国科学院系统相关研究机构、中南大学、北京科技大学、西北工业大学等单位，长期开展钼基高温合金、粉末冶金、高温结构材料及难熔金属基础研究。产业化方面，国内已形成一批具有较强竞争力的 TZM 生产企业，包括中钨高新所属相关企业、洛阳高科、宝鸡地区难熔金属企业以及中钨智造科技有限公司等专业难熔金属材料制造商，可提供符合国际标准的 TZM 棒材、板材、管材、丝材、靶材、加工件及定制化高温零部件，广泛应用于半导体热场、高温真空设备、航空航天、电子工业、科研装备及高端制造领域。

Q7 TZM 为什么成为最成功的钼基高温合金？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）自 20 世纪 50 年代末问世以来，经过七十余年的发展，已成为全球应用最广泛、产业化程度最高、工程应用最成熟的钼基高温合金。与纯钼相比，TZM 不仅显著提高了高温强度、抗蠕变性能和再结晶温度，而且保持了良好的加工性能和较高的经济性，在航空航天、半导体、电子工业、高温真空设备、核工业及先进制造等领域获得广泛应用。从材料发展历程来看，TZM 之所以能够长期保持国际主流地位，并非依靠某一项性能优势，而是在强化机制、综合性能、加工制造、产业成熟度、标准体系及工程可靠性等多个方面实现了较好的平衡，因此被国际材料界普遍认为是最成功的钼基高温合金之一。

（一）实现了高温性能与加工性能的最佳平衡

高温材料的发展往往面临一个共同难题，即材料强度越高，加工难度通常越大；加工性能越好，高温性能往往有所下降。TZM 通过在钼基体中加入微量 Ti、Zr 和 C，使 Ti 和 Zr 分别形成细小而稳定的 TiC、ZrC 碳化物弥散析出相，有效抑制晶界迁移和晶粒长大，在显著提高高温强度和抗蠕变能力的同时，仍保持较好的塑性和热加工性能。与许多新型高温难熔合金相比，TZM 具有较宽的热加工窗口，可采用锻造、轧制、旋锻、挤压及机械加工等成熟工艺制造复杂零部件，大大降低了制造难度和生产成本。

（二）综合性能均衡，没有明显短板

评价一种工程材料，不能仅看最高强度，而应综合考虑力学性能、热物理性能、加工性能、服役寿命及制造成本。TZM 在多个性能指标之间实现了良好的平衡。例如，与纯钼相比，其再结晶温度通常提高至约 1300~1400℃，高温抗拉强度和抗蠕变性能显著提升；与 MHC 等更高等级钼基合金相比，虽然超高温性能略逊，但具有更好的加工性能、更低的制造成本和更成熟的产业体系。这种均衡的综合性能，使 TZM 能够满足绝大多数高温结构件的使用需求，因此成为工业界优先选择的钼基高温材料。

（三）具有优异的高温组织稳定性

高温结构材料的服役寿命，很大程度上取决于其组织稳定性。TZM 中的 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒能够有效钉扎晶界，抑制晶粒粗化，延缓再结晶过程，使材料在 1000~1400℃长期工作条件下仍能保持较高的组织稳定性和尺寸稳定性。相比纯钼材料，高温下晶粒长大速度明显降低，热疲劳性能和持久寿命得到显著改善，因此广泛应用于需要长期高温工作的热场构件和真空设备。

（四）具备成熟可靠的工业制造体系

一种材料是否能够真正实现产业化，不仅取决于性能，还取决于是否具备稳定的大规模制造能力。经过数十年的发展，TZM 已经建立起完整的工业制造体系，包括高纯钼粉制备、粉末混合、等静压成形、真空烧结、热等静压（HIP）、锻造、轧制、旋锻、热处理、精密加工及质量检测等全流程制造技术。目前，全球主要难熔金属制造企业均具备 TZM 生产能力，产品覆盖棒材、板材、管材、丝材、靶材、异形件及大型热场组件，能够满足不同领域的工程需求。

（五）形成完善的国际标准体系

TZM 能够长期保持主导地位，与其完善的标准体系密切相关。目前，国际上已经建立了涵盖化学成分、尺寸公差、力学性能、检测方法及产品交付要求的标准体系，包括 ASTM、AMS、DIN、JIS 及我国 GB/T 等标准。统一的标准不仅保证了产品质量的一致性，也降低了用户选材风险，使 TZM 成为全球工程设计中最容易被采用的钼基高温材料之一。

（六）拥有丰富的工程应用经验

TZM 最大的优势之一，是经过长期工业实践验证。自 20 世纪 60 年代以来，TZM 已在航空航天、导弹发动机、电子束设备、电子管、高温炉、压铸模具、单晶硅生长炉、蓝宝石炉、真空烧结设备、半导体热场及科研装置中得到广泛应用，积累了大量长期服役数据。相比许多仍处于实验室研究阶段的新型高温材料，TZM 具有成熟的设计数据库、加工规范及失效分析经验，因此用户对其可靠性具有较高信任度。

（七）能够满足半导体及先进制造产业的发展需求

近年来，半导体产业已成为 TZM 最大的应用市场之一。在单晶硅、碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）、蓝宝石等晶体生长设备中，TZM 被广泛用于加热器支撑件、导流筒、托盘、连接件、热屏支架及其他高温热场部件。这些设备通常要求材料具有高温强度高、热导率高、热膨胀系数低、蒸气压低及尺寸稳定性好等特点，而 TZM 能够较好地满足上述要求，因此长期占据重要地位。

（八）具有良好的经济性和供应稳定性

虽然 TZM 属于高性能难熔金属材料，但由于其制造工艺成熟、产业规模较大，综合制造成本明显低于 MHC 等新一代钼基高温合金。同时，全球已经形成较为完善的 TZM 供应体系，原材料、生产设备、加工技术及检测标准均较成熟，可实现稳定供货和批量生产。这种良好的经济性和供应能力，使 TZM 不仅适用于科研装备，也广泛应用于工业化生产。

（九）为新一代钼基高温合金奠定了技术基础

TZM 不仅自身取得了巨大成功，也推动了整个钼基高温合金的发展。目前广泛研究的 MHC（Mo-Hf-C）、ZHM（Zr-Hf-Mo）、ODS 钼合金及纳米强化钼合金等新型材料，其设计思想大多继承并发展了 TZM 提出的微合金化强化、弥散强化和组织稳定化理论。可以说，TZM 不仅是一种成熟的工程材料，更是现代钼基高温合金发展的重要技术平台。

TZM 成为最成功钼基高温合金的主要原因汇总

关键因素	具体优势	对产业发展的意义
强化机制成熟	TiC、ZrC 弥散强化，显著提高高温强度和抗蠕变性能	奠定钼基高温合金工业化基础
综合性能均衡	高温性能、加工性能、塑性及经济性协调统一	满足绝大多数高温结构件需求

关键因素	具体优势	对产业发展的意义
高温组织稳定	再结晶温度高、晶粒长大缓慢、尺寸稳定性好	延长高温服役寿命
制造工艺成熟	粉末冶金、热加工及精密加工技术完善	实现规模化、稳定化生产
国际标准完善	ASTM、AMS、DIN、JIS、GB/T 等标准健全	提高产品一致性和工程通用性
工程经验丰富	长期应用于航空航天、半导体、真空设备等领域	工程可靠性高、设计数据完整
产业链完善	原材料、制造、检测及供应体系成熟	降低采购和制造成本
技术延续性强	为 MHC、ZHM 及 ODS 钼合金提供理论基础	推动新一代钼基高温合金发展

中钨智造综合评价

中钨智造认为，TZM 之所以能够成为全球最成功的钼基高温合金，并非因为其在某一项性能上达到极限，而是因为其在高温强度、抗蠕变性能、组织稳定性、热加工性能、制造成本和工程可靠性之间实现了极为均衡的综合优化。经过七十余年的技术积累和工程验证，TZM 已形成完善的材料标准、制造工艺和应用体系，在全球范围内拥有成熟稳定的产业链和广泛的用户基础。即使近年来 MHC、ZHM 等新型钼基高温合金不断发展，在 1500℃以上极端工况中展现出更高的性能潜力，但从产业成熟度、应用广度和综合经济性来看，TZM 仍然是目前国际高温钼基合金领域最具代表性、最成熟且最具工程价值的经典材料，并将在半导体热场、高温真空装备、航空航天、高端模具及先进制造等领域继续发挥不可替代的重要作用。



Q8 TZM 有哪些主要特点？

TZM(Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 钛钼钨合金)是在纯钼基础上加入微量钛(Ti)、钨(Zr)和碳(C)形成的一种典型钼基高温合金,也是目前国际上应用最广泛、工程化程度最高的难熔金属材料之一。与纯钼相比,TZM并非依靠大量合金元素强化,而是通过TiC和ZrC碳化物弥散强化机制,在保持钼优良热物理性能的基础上,大幅提高了材料的高温力学性能、组织稳定性和使用寿命。经过数十年的工程实践验证,TZM形成了性能均衡、加工成熟、应用广泛、可靠性高等一系列特点,因此长期作为高温真空设备、半导体热场、航空航天及先进制造领域的重要结构材料。

(一) 熔点高,可长期用于高温环境

TZM以钼为基体,其熔点仍保持钼材料的特性,约为2623℃,远高于普通结构钢、镍基合金及钛合金。虽然实际工程应用通常不会接近熔点,但较高的熔点意味着TZM能够在1000~1400℃范围内长期稳定工作,在短时间内甚至可承受更高温度,因此非常适用于高温真空炉、晶体生长设备及航空航天高温结构件。

(二) 高温强度明显高于纯钼

TZM最重要的特点之一就是高温强度显著提高。Ti和Zr与碳形成细小而稳定的TiC、ZrC颗粒,均匀分布于钼基体中,对位错运动形成有效阻碍,提高了材料在高温条件下的承载能力。尤其在1000℃以上,TZM的屈服强度和抗拉强度明显优于纯钼,其高温承载能力可提高30%~100%,具体提升幅度取决于温度、组织状态及加工工艺。

(三) 抗蠕变性能优异

蠕变是高温结构材料长期服役过程中最重要的失效形式之一。TZM中的弥散碳化物能够有效抑制位错攀移和晶界滑移,降低高温塑性变形速率,因此具有较低的蠕变速率和较长的持久寿命。相比纯钼,TZM能够在长期高温载荷作用下保持更好的尺寸稳定性,因此广泛应用于长期连续运行的高温设备。

(四) 再结晶温度高,组织稳定性好

纯钼在约900~1000℃时容易发生再结晶,晶粒迅速长大,导致强度下降和脆性增加。TZM通过TiC和ZrC颗粒钉扎晶界,使再结晶温度通常提高至1300~1400℃左右,显著延缓晶粒粗化,提高组织稳定性。这一特点使TZM在长期高温服役过程中仍能保持较高的机械性能和尺寸精度。

(五) 具有良好的热导率

TZM继承了钼优良的导热性能,其热导率明显高于多数高温合金及陶瓷材料。良好的导热能力能够快速传导局部热量,降低热应力集中,提高热场温度均匀性,因此特别适用于单晶硅炉、蓝宝石炉、真空热处理设备及电子束设备等热场系统。

(六) 热膨胀系数低,尺寸稳定性优异

TZM具有较低的线膨胀系数,在温度变化过程中尺寸变化较小。这一特点能够减少热应力和热变形,提高大型构件及高精度零件的尺寸稳定性,对于半导体设备、精密热场及航空航天结构件尤为重要。

（七）蒸气压低，适用于高真空环境

在高温真空条件下，材料蒸发会污染工艺环境，影响产品质量。TZM 具有较低的高温蒸气压，在真空环境下挥发量较小，不易产生金属蒸汽污染，因此广泛应用于真空炉、电子束蒸发、PVD 镀膜及半导体制造设备。

（八）加工性能优于多数难熔合金

虽然 TZM 属于难熔金属材料，但由于其强化机制合理，仍具有较好的热加工性能。TZM 可采用锻造、轧制、旋锻、挤压、车削、铣削、电火花加工及精密磨削等多种工艺进行加工，并能够制备棒材、板材、管材、丝材及复杂异形零件。相比 MHC 等更高等级钼基合金，TZM 加工难度较低，更适合批量工业化生产。

（九）焊接性能相对较好

TZM 可以采用电子束焊、激光焊、真空扩散连接及钎焊等方法进行连接。虽然焊接过程中仍需控制氧含量、热输入及残余应力，但相比多数高强难熔金属材料，TZM 具有更成熟的焊接工艺和更好的工程适应性。

（十）耐液态金属腐蚀能力较强

TZM 对液态锌、液态铝及部分熔融金属具有较好的耐腐蚀性能，因此广泛用于压铸模芯、热流道、高温坩埚及液态金属接触部件。在部分特殊环境下，其耐蚀性能明显优于普通工具钢和耐热钢。

（十一）综合经济性较高

虽然 TZM 属于高性能难熔金属材料，但由于制造工艺成熟、产业链完善、生产规模较大，其综合成本明显低于 MHC 等新型钼基高温合金。对于工作温度在 1400 °C 以下的大多数高温装备而言，TZM 通常能够在性能与成本之间取得最佳平衡，因此成为工业领域应用最广泛的钼基高温材料。

（十二）工程应用成熟，可靠性高

TZM 经过七十余年的工业应用，已积累大量工程数据和服役经验。目前已广泛应用于半导体热场、航空航天、高温真空炉、压铸模具、电子工业、核工业、医疗设备及科研仪器等领域，并形成了成熟的设计规范、加工标准及质量控制体系，具有较高的工程可靠性和长期服役稳定性。

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，TZM）主要特点综合汇总

特点	具体表现	工程意义
高熔点	熔点约 2623 °C，可长期用于 1000~1400 °C 高温环境	满足高温结构件使用要求
高温强度高	TiC、ZrC 弥散强化，高温承载能力显著提高	提高设备承载能力和安全性
抗蠕变性能优异	长期高温变形小、持久寿命长	延长设备使用寿命
再结晶温度高	通常可达 1300~1400 °C	保持组织稳定，减少晶粒粗化
导热性能良好	热量传递效率高，温度分布均匀	有利于热场设计和温度控制
热膨胀系数低	热变形小，尺寸稳定性好	提高高温精密部件可靠性
高温蒸气压低	真空环境下挥发量小	减少污染，适用于真空工艺
加工性能较好	可锻造、轧制、旋锻及精密机械加工	易于制造复杂零件

特点	具体表现	工程意义
焊接性能成熟	可采用电子束焊、激光焊及扩散连接	满足大型结构件制造需求
耐液态金属腐蚀	对锌、铝等液态金属具有较好耐蚀性	广泛用于压铸及热加工领域
综合经济性高	性能优异，制造成本相对较低	适合规模化工业应用
工程经验丰富	长期应用于航空航天、半导体、真空设备等领域	可靠性高，应用基础成熟

中钨智造评价

中钨智造认为，T_{ZM} 最大的特点并不是某一项性能达到极致，而是在高温强度、抗蠕变性能、组织稳定性、热导率、加工性能、制造成本及工程可靠性之间实现了高度均衡。正因如此，T_{ZM} 既能够满足绝大多数高温结构件对力学性能和尺寸稳定性的要求，又具备成熟的工业制造工艺和完善的国际标准体系。经过七十余年的发展，T_{ZM} 已成为全球应用最广泛的钼基高温合金，也是衡量其他钼基高温材料性能的重要参照材料。未来，随着半导体、高端真空装备、先进能源及航空航天产业的持续发展，T_{ZM} 仍将凭借其综合性能优势，在高温结构材料领域保持重要地位。

Q9 钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，T_{ZM}）有哪些局限性？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，T_{ZM}）虽然是目前全球应用最广泛、工程化最成熟的钼基高温合金，在高温强度、抗蠕变性能、组织稳定性及加工性能等方面表现优异，但它并不是一种没有缺点的理想材料。事实上，T_{ZM} 的许多局限性正是难熔金属材料普遍存在的问题，也是近年来 MHC、Mo-La、ODS 钼合金及其他新型高温材料不断发展的主要原因。从工程应用角度来看，T_{ZM} 的局限性主要体现在抗氧化能力、室温塑性、焊接难度、极端高温性能以及制造成本等方面。在材料选型过程中，应根据具体服役环境综合评估，而不能单纯追求其高温强度优势。

（一）高温抗氧化性能较差

T_{ZM} 最大的局限之一是高温抗氧化能力不足。虽然 T_{ZM} 在真空、氢气、氩气等保护气氛中具有优异的高温稳定性，但在空气中加热时，钼会迅速与氧发生反应，生成 MoO₃。由于 MoO₃ 在约 700℃ 以上具有较高的挥发性，会不断蒸发，使材料持续失重并导致表面快速劣化。因此，T_{ZM} 通常不适用于长期暴露于空气中的高温环境，而必须工作在真空、惰性气体或还原性气氛中，或者采用硅化物、氧化物等高温防护涂层进行保护。

（二）室温塑性有限，存在低温脆性

T_{ZM} 虽然较纯钼具有更高的强度，但仍属于典型的体心立方（BCC）难熔金属材料。在室温及较低温度下，其塑性相对有限，存在明显的韧脆转变温度（DBTT），受到冲击载荷或应力集中时容易发生脆性断裂。因此，在运输、装配和加工过程中，应尽量避免跌落、碰撞及剧烈冲击，对于大型构件通常需要合理设计圆角、过渡区及应力释放结构，以降低断裂风险。

（三）加工难度仍高于普通工程材料

虽然 T_{ZM} 的加工性能优于 MHC 等部分高性能钼基合金，但与普通钢材、不锈钢及镍基合金相比，其加工难度仍然较大。由于材料具有较高的硬度和弹性模量，切削过程中刀具磨损速度较快，对加工设备刚性、刀具材料、切削参数及冷却条件均提出较高要求。此外，T_{ZM} 通常采用粉末冶金工艺生产，制造大型复杂零件时，加工余量控制、尺寸精度及残余应力管理

也较普通金属更加严格。

（四）焊接工艺要求较高

TZM 可以采用电子束焊、激光焊、真空扩散连接及真空钎焊等方法进行连接，但焊接过程对工艺控制要求较高。如果保护气氛不足或焊接热输入控制不当，容易产生晶粒粗化、焊接裂纹、残余应力集中及焊接接头性能下降等问题。因此，在高可靠性装备中，TZM 焊接通常需要真空环境、严格的焊前清洁、合理的热处理工艺及完善的无损检测。

（五）超过 1500 °C长期服役性能受到限制

TZM 虽然能够在 1000~1400 °C范围内长期稳定工作，但当长期工作温度进一步提高至 1500 °C 以上时，其强化相开始逐渐失去优势，高温组织稳定性和抗蠕变能力已难以满足部分极端工况要求。近年来，随着核聚变、高超声速飞行器及第三代半导体等技术的发展，MHC 等采用 HfC 弥散强化的新型钼基合金，在 1500 °C以上长期服役条件下通常表现出更低的蠕变速率、更稳定的显微组织和更长的使用寿命，因此逐步成为部分超高温领域的重要候选材料。

（六）耐热循环性能存在一定限制

TZM 具有较高的热导率和较低的热膨胀系数，但在频繁加热与冷却交替作用下，仍可能因热应力反复累积而产生热疲劳裂纹。对于长期经历快速升温、快速降温或剧烈温度波动的工况，应充分考虑热循环载荷对材料寿命的影响，并优化结构设计及温度控制策略。

（七）材料成本高于普通钼制品

由于 TZM 需要加入高纯 Ti、Zr 及碳，并采用高纯粉末冶金、真空烧结、热加工及严格质量控制等制造工艺，其生产成本明显高于纯钼材料。同时，TZM 零部件通常还需要精密机械加工、真空热处理及严格检测，因此总体制造成本较高。不过，相较于 MHC 等更高性能钼基高温合金，TZM 仍具有较好的经济性，因此在工业领域得到广泛应用。

（八）大型复杂构件制造难度较高

随着半导体装备和大型真空设备的发展，越来越多 TZM 构件向大型化、一体化方向发展。由于 TZM 属于粉末冶金材料，大尺寸产品容易受到烧结均匀性、组织一致性、内部缺陷控制及热加工能力等因素影响，因此制造大型复杂构件的技术难度明显高于普通金属材料。近年来，热等静压（HIP）、近净成形及数字化工艺控制等先进制造技术不断应用，正在逐步改善这一问题。

（九）长期服役后组织可能发生退化

虽然 TZM 具有较高的再结晶温度，但在长期高温环境下，材料内部仍可能发生碳化物粗化、位错密度降低及晶粒缓慢长大等组织演化过程。随着服役时间增加，高温强度和抗蠕变性能会逐渐下降，因此对于关键装备，应根据实际工况制定合理的寿命评估、定期检测及预防性更换计划。

TZM 主要局限性综合汇总

局限性	主要表现	对工程应用的影响
高温抗氧化能力不足	空气中约 600~700 °C以上易氧化，生成挥发性 MoO ₃	仅适用于真空、惰性气氛或保护环境
室温塑性有限	存在韧脆转变，低温冲击韧性较低	装配及运输需避免冲击载荷

局限性	主要表现	对工程应用的影响
加工难度较大	刀具磨损快，加工参数要求高	制造成本高于普通金属材料
焊接要求严格	易产生裂纹、晶粒粗化及残余应力	宜采用真空电子束焊、激光焊等先进工艺
超高温性能有限	1500℃以上长期服役性能不及 MHC 等新型合金	极端高温领域需采用更高等级材料
热循环寿命有限	长期冷热交替可能产生热疲劳裂纹	需优化结构设计和热管理
制造成本较高	粉末冶金及精密加工成本较高	初始投资较大，但寿命较长
大型构件制造复杂	一致性及内部质量控制难度较高	对制造工艺要求较高
长期组织退化	碳化物粗化、晶粒长大、性能缓慢下降	应建立寿命管理和定期检测制度

中钨智造综合评价

中钨智造认为，TZM 并不是一种适用于所有高温环境的万能材料，其优势和局限性同样十分明显。从材料本质来看，TZM 最大的不足在于高温抗氧化能力较弱、室温塑性有限以及 1500℃ 以上长期服役性能已接近其强化机制的能力上限。因此，在空气环境、剧烈热循环或超高温长期服役条件下，通常需要采用防护涂层、优化结构设计，或选择 MHC、Mo-La、ODS 钼合金等性能更高的新型钼基材料。尽管如此，在 1000~1400℃ 真空或保护气氛条件下，TZM 凭借成熟稳定的制造工艺、优异的综合力学性能、完善的国际标准体系以及丰富的工程应用经验，仍然是目前全球综合性能最均衡、产业化最成熟、工程价值最高的钼基高温合金之一，也是绝大多数高温真空装备和半导体热场系统的首选材料。

Q10 TZM 为什么至今仍是工业主流钼基高温材料？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）自 20 世纪 60 年代实现工业化以来，已经历七十余年的工程应用验证。尽管近年来 MHC（Mo-Hf-C）、Mo-La、ODS 钼合金、纳米强化钼合金等新一代高温材料不断发展，但 TZM 仍然是全球应用最广泛、产量最大、产业链最成熟的钼基高温合金，也是国际高温真空设备、半导体热场、航空航天及先进制造领域最常采用的难熔金属结构材料之一。TZM 能够长期保持工业主流地位，并非因为其在所有性能指标上均优于其他钼基合金，而是在综合性能、制造成本、加工能力、工程可靠性及产业成熟度等方面形成了其他材料难以替代的综合优势。

（一）综合性能最为均衡

工程材料的价值不仅取决于最高性能，更重要的是综合性能是否均衡。TZM 兼具较高的高温强度、良好的抗蠕变性能、优异的导热性能、较低的热膨胀系数、较高的尺寸稳定性以及成熟的加工性能，能够满足绝大多数高温结构件的使用要求。虽然 MHC 在 1500℃ 以上长期服役性能通常优于 TZM，但 TZM 在 1000~1400℃ 这一工业应用最广泛的温度区间，已经能够满足绝大多数装备需求，因此具有更高的综合应用价值。

（二）适用温度覆盖绝大多数工业应用

目前，高温真空设备、半导体热场、晶体生长设备、电子工业及航空航天装备的大多数高温结构件，其长期工作温度主要集中在 1000~1400℃ 之间。这一温度范围正是 TZM 性能发挥最稳定、工程应用最成熟的区域。对于这一温度区间，TZM 不仅具有优异的高温力学性能，同时还能保持较好的组织稳定性和尺寸稳定性，因此无需采用成本更高的新型钼基合金。

（三）加工制造技术最成熟

一种材料能否成为工业主流，很大程度上取决于制造技术是否成熟。经过几十年的发展，TZM 已建立起完整的制造体系，包括高纯粉末制备、粉末混合、等静压成形、真空烧结、热等静压（HIP）、锻造、轧制、旋锻、热处理、精密机械加工及质量检测等完整工艺流程。目前全球主要难熔金属制造企业均能够稳定生产 TZM 材料，并形成覆盖棒材、板材、管材、丝材、靶材、异形件及大型热场组件的完整产品体系。相比之下，MHC 等新型钼基合金由于制造工艺更加复杂，目前仍主要用于高端定制产品，产业规模相对较小。

（四）制造成本更加合理

TZM 虽然属于高性能难熔金属材料，但由于生产工艺成熟、制造经验丰富、产业规模较大，其综合制造成本明显低于 MHC 等高性能钼基合金。对于大多数工业用户而言，在满足性能要求的前提下，TZM 能够以较低的材料成本和制造成本实现较高的使用寿命，因此具有良好的经济性。这种性能与成本之间的最佳平衡，也是 TZM 能够长期保持市场主导地位的重要原因。

（五）国际标准体系完善

经过长期发展，TZM 已经建立起完善的国际标准体系。目前，美国 ASTM、AMS，日本 JIS，德国 DIN 以及中国 GB/T 等标准均对 TZM 材料的化学成分、尺寸公差、力学性能、检测方法 & 交付要求进行了规范。完善的标准体系保证了产品质量的一致性，也使设备制造商能够直接依据标准进行设计、采购和质量验收，大大降低了工程应用风险。

（六）工程应用经验丰富

TZM 最大的优势之一，是拥有极其丰富的工程应用经验。经过几十年的工业实践，TZM 已广泛应用于半导体热场、高温真空炉、电子束设备、单晶硅炉、蓝宝石炉、压铸模具、航空航天结构件、电子工业及科研装备等领域，积累了大量服役数据和失效分析经验。相比仍处于持续开发阶段的新型高温材料，TZM 具有成熟的设计数据库、寿命预测模型及加工规范，因此更容易获得设备制造商和终端用户的认可。

（七）供应链成熟，产品规格齐全

目前全球已经形成较为完善的 TZM 产业链。从高纯钼粉、合金粉末、烧结坯料到棒材、板材、管材、丝材、靶材及精密加工件，均能够实现稳定批量生产。同时，全球多个国家均建立了较成熟的 TZM 供应体系，产品规格丰富、交货周期稳定，可满足科研、小批量定制及大规模工业制造等不同需求。相比之下，部分新型钼基合金仍存在生产厂家较少、规格有限及供货周期较长等问题。

（八）能够满足半导体产业发展的需求

近年来，半导体产业成为 TZM 最重要的应用市场之一。在单晶硅、碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）、蓝宝石及其他先进晶体生长设备中，TZM 被广泛用于加热器支撑件、导流筒、热屏支架、连接件、托盘及其他热场结构件。随着全球半导体、新能源及人工智能产业持续发展，高端热场装备需求不断增长，也进一步巩固了 TZM 作为主流钼基高温材料的市场地位。

（九）新材料尚未完全取代 TZM

近年来，MHC、ODS 钼合金及纳米强化钼合金等材料在部分性能方面已超过 TZM。例如，MHC 在 1500 °C 以上长期抗蠕变性能更加优异；ODS 钼合金具有更好的组织稳定性；Mo-La 则具有更好的再结晶性能。但是，这些材料普遍存在制造成本较高、加工难度较大、产品规

格有限、工程应用经验不足及标准体系尚未完全成熟等问题，因此目前主要应用于极端高温领域，而尚未全面替代 TZM。可以预见，在未来较长时期内，TZM 仍将与这些新型材料长期共存，根据不同工况形成分工明确的应用格局。

（十）具有长期稳定的发展前景

未来，高温材料的发展方向将更加注重综合性能，而不是单项性能。随着半导体、高端真空装备、先进能源、航空航天、核聚变及先进制造产业持续发展，对 TZM 材料提出了更高要求，包括超高纯 TZM、超细晶 TZM、大尺寸整体构件、高一致性组织控制及数字化制造等方向。这些新技术将在保持 TZM 成熟优势的基础上，进一步提升其综合性能和市场竞争力，使 TZM 在未来相当长时期内仍保持重要地位。

TZM 长期保持工业主流地位的主要原因汇总

主要原因	具体优势	对产业发展的意义
综合性能均衡	高温强度、抗蠕变性能、导热性能及加工性能协调统一	满足大多数工业高温装备需求
适用温度范围广	1000~1400 °C长期服役性能优异	覆盖主要工业应用温度区间
制造工艺成熟	粉末冶金、热加工、精密加工技术完善	易于规模化、稳定化生产
成本优势明显	制造成本低于 MHC 等高性能钼基合金	综合经济性突出
国际标准完善	ASTM、AMS、DIN、JIS、GB/T 等标准体系成熟	产品质量稳定，采购便利
工程经验丰富	数十年工业应用验证，数据库完善	工程可靠性高，风险较低
产业链成熟	原材料、加工、检测及供应体系完整	产品规格丰富，供货稳定
半导体需求旺盛	广泛应用于晶体生长及热场系统	持续推动市场需求增长
新材料未全替代	MHC 等性能更高，但成本和产业成熟度较低	TZM 仍是工业首选材料
技术持续升级	超高纯、超细晶及数字化制造不断发展	保持长期市场竞争力

中钨智造认为，TZM 能够在全球高温材料领域长期保持工业主流地位，其根本原因并非拥有最高的高温性能，而是在性能、制造、成本、可靠性和产业成熟度之间实现了最佳平衡。对于绝大多数工作温度处于 1000~1400 °C的高温装备而言，TZM 不仅能够提供稳定可靠的服役性能，还具有成熟的制造工艺、完善的国际标准、丰富的工程应用经验和完整的全球供应体系，这些优势共同构成了 TZM 难以替代的产业基础。未来，随着超高纯材料制备、粉末冶金工艺优化、数字化制造及大型复杂构件制造技术的不断进步，TZM 仍将是半导体热场、高温真空设备、航空航天及先进制造领域最具工程价值和市场竞争力的钼基高温材料之一，而 MHC 等新型钼基合金则将在更高温、更极端服役环境中与 TZM 形成优势互补、协同发展的产业格局。



第二篇 钛锆钼合金（TZM）化学组成

Q11 钛锆钼该合金（TZM）标准化学成分是多少？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，）是一种典型的微合金化钼基高温合金，其主要通过在高纯钼（Mo）基体中加入少量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C），利用 TiC 和 ZrC 弥散强化相提高材料的高温强度、抗蠕变性能及再结晶温度。经过数十年的工程实践，TZM 的化学成分已基本标准化，目前国际主流标准包括 ASTM B386、ASTM B387、ASTM B388、ASTM B777、AMS 7848、AMS-T-21014 以及我国 GB/T 相关标准等，其成分范围基本一致，不同制造商仅会根据产品用途对杂质控制指标进行进一步优化。

（一）TZM 标准化学成分

目前国际上广泛采用的 TZM 典型化学成分如下。下表中的配比经过长期工业验证，被认为是综合性能最优的 TZM 成分体系。

元素	含量（质量分数，wt.%）	作用
Mo（钼）	余量（Balance）	基体材料，提供高熔点、高导热率和高温强度
Ti（钛）	0.40～0.55	与碳形成 TiC，提高高温强度和再结晶温度
Zr（锆）	0.06～0.12	与碳形成 ZrC，提高组织稳定性和抗蠕变性能
C（碳）	0.01～0.04	与 Ti、Zr 形成稳定碳化物强化相

（二）主要元素的作用

(1) 钼 (Mo)。钼是 TZM 的主体元素，占材料总质量约 99%以上。钼具有 2623 °C的高熔点、优异的导热性能、较低的热膨胀系数和极低的高温蒸气压，为 TZM 提供了优异的高温服役能力和真空环境稳定性。

(2) 钛 (Ti)。钛是 TZM 最重要的强化元素之一。在烧结及热处理过程中，钛与碳形成细小 TiC 颗粒，均匀弥散分布于钼基体中，可有效阻碍位错运动，提高材料的高温强度和抗蠕变能力。Ti 含量过低，强化作用不足；含量过高，则容易形成粗大析出相，降低塑性和加工性能，因此通常控制在 0.40~0.55%。

(3) 锆 (Zr)。锆与碳形成稳定的 ZrC 颗粒。由于 ZrC 具有较高的热稳定性，可进一步抑制晶界迁移和晶粒长大，提高再结晶温度及长期高温组织稳定性。锆的加入量通常仅为 0.06~0.12%，但对 TZM 长期高温性能具有重要贡献。

(4) 碳 (C)。碳虽然含量极低，却是 TZM 不可缺少的强化元素。碳分别与 Ti、Zr 结合形成 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒，是 TZM 获得优异高温性能的核心来源。若碳含量不足，强化相生成不完全；若碳含量过高，则可能形成粗大碳化物，降低塑性和加工性能，因此通常控制在 0.01~0.04%。

(三) 杂质元素控制要求

除了主要合金元素外，TZM 对杂质元素控制要求十分严格。氧 (O)、氮 (N)、氢 (H) 及铁 (Fe)、镍 (Ni) 等金属杂质均会降低材料塑性和高温性能。对于半导体热场、高端真空装备等领域，往往采用更严格的超低氧、超低氮控制工艺，以进一步提高高温性能和使用寿命。典型工业产品通常控制如下（不同标准及厂家略有差异）。

杂质元素	典型控制水平 (wt.%)	对性能影响
O (氧)	≤0.01~0.03	提高脆性，降低塑性
N (氮)	≤0.01	降低韧性，促进脆化
H (氢)	极低	易导致氢脆
Fe、Ni 等金属杂质	微量	影响高温组织稳定性

(四) 为什么 Ti、Zr 含量都很低，却能显著提高性能？

许多人会疑惑，TZM 中 Ti 和 Zr 总含量不足 1%，为何性能却远优于纯钼？这是因为 TZM 属于典型的微合金化材料，其强化作用并非来自大量合金元素，而是来自 TiC 和 ZrC 纳米级弥散强化颗粒。这些颗粒能够均匀分布于晶粒内部和晶界附近，对位错运动、晶界迁移和晶粒长大形成有效阻碍，因此仅需极少量元素即可显著提高材料性能。这种强化机制也是 TZM 成功的重要原因之一。

(五) 不同用途 TZM 成分是否完全相同？

总体而言，国际主流 TZM 产品均采用上述标准化学成分。但对于不同用途，制造商通常会在标准范围内进行适当优化。例如，半导体热场用 TZM 更加注重氧、氮等杂质控制，高温模具用 TZM 更加注重组织均匀性和热加工性能，大规格结构件则更加关注批次一致性和内部致密度。因此，不同厂家虽然都称为 TZM，但在纯度、组织控制、热处理制度及最终性能方面仍可能存在一定差异。

TZM 标准化学成分及作用综合汇总

元素	标准含量 (wt.%)	主要作用	对性能贡献
Mo	余量 (Balance)	基体材料	提供高熔点、高导热率、低蒸气压

元素	标准含量 (wt.%)	主要作用	对性能贡献
Ti	0.40~0.55	形成 TiC 强化相	提高高温强度和再结晶温度
Zr	0.06~0.12	形成 ZrC 强化相	提高组织稳定性和抗蠕变性能
C	0.01~0.04	与 Ti、Zr 形成碳化物	实现弥散强化，提高综合性能
O、N、H 等杂质	严格控制	减少脆化	保证塑性、高温性能及服役寿命

中钨智造认为，TZM 标准化学成分最大的特点是少量合金元素、显著强化效果。Ti、Zr 和 C 三种元素总含量不足 1%，却通过形成细小且稳定的 TiC、ZrC 弥散强化相，使 TZM 在高温强度、抗蠕变性能、再结晶温度及组织稳定性等方面远优于纯钼。这一经典成分体系经过七十余年的工业实践验证，已成为全球钼基高温合金的标准配方，并被 ASTM、AMS 及我国相关标准广泛采用。对于高端半导体热场、航空航天及先进真空装备而言，在符合标准成分的基础上，进一步降低氧、氮等杂质含量、优化组织均匀性和烧结工艺，往往比单纯调整 Ti、Zr 含量更能提升 TZM 材料的综合性能和长期服役可靠性。



Q12 钛锆钼该合金（TZM）中 Ti、Zr、C 分别起什么作用？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）之所以能够在保持钼优异高温特性的基础上，大幅提高高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，关键就在于加入了微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）。从含量来看，这三种元素合计通常不足 1%，但它们并不是简单地溶解于钼基体，而是在烧结和热加工过程中形成细小且稳定的 TiC、ZrC 弥散强化颗粒。这些碳化物均匀分布于晶粒内部和晶界附近，通过阻碍位错运动、抑制晶界迁移和延缓晶粒长大，使 TZM 获得远优于纯钼的综合性能。因此，Ti、Zr 和 C 三者缺一不可，只有协同作用才能充分发挥 TZM 的强化效果。

（一）钛（Ti）的作用——主要强化元素

钛是 TZM 中含量最高的合金元素，也是最主要的强化元素，其标准含量通常为 0.40~0.55%。在烧结过程中，钛与碳优先结合生成高熔点 TiC 颗粒。TiC 具有较高的硬度、良好的热稳定

性和较低的扩散速率，能够有效阻碍位错运动，从而显著提高材料的屈服强度和高温强度。同时，TiC 还能抑制晶粒长大，提高再结晶温度，使 TZM 在长期高温条件下仍能保持细小稳定的组织结构。如果 Ti 含量不足，TiC 形成数量减少，强化效果明显下降；如果 Ti 含量过高，则容易形成粗大的碳化物颗粒，不仅降低塑性，还会影响加工性能和组织均匀性，因此国际标准通常将其控制在较窄范围内。

（二）锆（Zr）的作用——提高组织稳定性

锆的标准含量仅为 0.06~0.12%，远低于钛，但其作用同样十分重要。锆与碳形成的 ZrC 具有比 TiC 更高的热稳定性，在长期高温环境下不易粗化，因此能够持续钉扎晶界，抑制晶粒迁移，提高组织稳定性。尤其是在长期高温服役过程中，ZrC 能够有效降低晶界滑移速率，提高抗蠕变能力，使 TZM 保持较低的高温变形速率。此外，锆还能改善材料的热加工性能，使组织更加均匀，提高整体可靠性。正因如此，虽然锆含量很低，但对 TZM 长期高温服役性能具有不可替代的重要作用。

（三）碳（C）的作用——形成强化相的关键元素

碳在 TZM 中的标准含量通常仅为 0.01~0.04%，却是整个强化体系的核心。碳本身并不直接提高材料性能，而是分别与 Ti、Zr 结合生成 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒。如果没有碳，即使加入 Ti 和 Zr，也只能产生有限的固溶强化作用，无法形成高温稳定的碳化物强化体系，TZM 也就失去了最重要的强化机制。因此，碳实际上是连接 Ti 和 Zr 强化作用的关键纽带。碳含量过低，会导致 TiC 和 ZrC 生成不足，强化效果下降；碳含量过高，则容易析出粗大碳化物，降低材料塑性和韧性，因此必须严格控制。

（四）TiC 和 ZrC 为什么能够强化 TZM？

Ti、Zr 和 C 真正发挥作用的形式，并不是元素本身，而是形成的 TiC 和 ZrC 颗粒。这些细小碳化物通常弥散分布在晶粒内部及晶界附近，主要发挥以下作用：提高高温强度、阻碍位错运动、提高屈服强度和抗拉强度，抑制晶界迁移、提高再结晶温度，减缓晶粒粗化、保持组织稳定，降低晶界滑移、提高抗蠕变性能，改善长期高温服役寿命。正是这种典型的弥散强化机制，使 TZM 成为目前工业应用最成熟的钼基高温合金。

（五）为什么三种元素必须协同作用？

TZM 的强化效果来源于三种元素的协同配合，而不是任何一种元素单独发挥作用。Ti 负责形成主要强化相，提高高温强度；Zr 形成更加稳定的强化相，提高长期组织稳定性；C 则促使两者形成稳定碳化物，实现真正的弥散强化。如果缺少任何一种元素，强化体系都会受到影响。例如，仅加入 Ti 而不加入 C，Ti 无法形成 TiC，强化作用十分有限；仅加入 Zr，同样无法形成稳定强化体系；只有 Ti、Zr 和 C 按合理比例共同存在，才能形成性能优异的 TZM 材料。

（六）为什么不继续提高 Ti 和 Zr 含量？

很多人认为，提高强化元素含量可以进一步提高性能，但事实并非如此。大量研究表明，当 Ti 和 Zr 超过最佳含量后，材料中容易形成粗大的碳化物团聚体，不仅降低塑性和韧性，还会增加加工难度，并降低组织均匀性。因此，国际标准采用 0.40~0.55% 的 Ti 和 0.06~0.12% 的 Zr，正是经过长期实验和工程验证后确定的最佳配比。

Ti、Zr、C 作用综合对比

元素	标准含量 (wt.%)	主要作用	对性能的贡献
Ti (钛)	0.40~0.55	与碳形成 TiC 弥散强化相	提高高温强度、提高屈服强度、提高再结晶温度
Zr (锆)	0.06~0.12	与碳形成 ZrC 稳定强化相	提高组织稳定性、抗蠕变性能、延长高温寿命
C (碳)	0.01~0.04	与 Ti、Zr 形成 TiC、ZrC	建立弥散强化体系，是强化作用实现的关键
TiC 颗粒	——	位错强化、晶粒细化	提高强度、抑制再结晶
ZrC 颗粒	——	晶界钉扎、长期稳定	提高抗蠕变能力、保持组织稳定

（七）三种元素协同强化机制示意

Ti + C → TiC：提供主要弥散强化，提高高温强度和再结晶温度。**Zr + C → ZrC**：提高高温组织稳定性和抗蠕变能力。**Ti + Zr + C 协同作用**：形成均匀分布的 TiC、ZrC 复合强化体系，实现高温强度、组织稳定性和长期服役寿命的综合提升。

中钨智造认为，TZM 之所以能够成为全球应用最广泛的钼基高温合金，其根本原因并不在于 Ti、Zr 或 C 任何一种元素本身，而在于三者形成了经典而高效的微合金化强化体系。Ti 主要负责提高高温强度，Zr 主要负责提高组织稳定性和抗蠕变能力，C 则是形成 TiC 和 ZrC 弥散强化相不可缺少的关键元素。经过七十余年的理论研究和工程实践，这一成分设计已被证明能够在材料性能、加工性能和制造成本之间取得最佳平衡，也成为后来 MHC、ZHM 等新型钼基高温合金设计的重要理论基础。对于现代 TZM 材料而言，相比进一步提高 Ti、Zr 含量，通过降低氧、氮等杂质、优化碳化物尺寸及分布、提高组织均匀性和纯净度，通常更有利于提升材料的综合性能和长期服役可靠性。

Q13 钛锆钼该合金（TZM）中 Ti 含量为什么控制在 0.40~0.55%？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）中的钛（Ti）是最主要的强化元素，其标准含量通常控制在 0.40~0.55 wt.%。这一范围并非经验值，而是经过数十年粉末冶金研究、高温性能测试及工业应用验证后确定的最佳配比。过低会导致强化不足，过高则会降低材料综合性能，因此这一含量区间被 ASTM、AMS 等国际标准长期采用。

（一）保证形成足够数量的 TiC 强化相

Ti 加入 TZM 最重要的目的，是与碳结合形成细小弥散的 TiC 颗粒。这些 TiC 颗粒均匀分布于钼基体和晶界附近，可有效阻碍位错运动，提高高温强度，同时抑制晶粒长大，提高再结晶温度。研究表明，当 Ti 含量约为 0.4% 以上时，能够形成数量充足且分布均匀的 TiC 强化相，使 TZM 获得明显优于纯钼的综合性能。

（二）Ti 过低，强化作用明显不足

如果 Ti 含量低于约 0.40%，材料中能够形成的 TiC 数量明显减少。此时，高温强度下降、抗蠕变能力减弱、再结晶温度降低，长期高温服役过程中晶粒更容易粗化，材料寿命也会缩短。因此，Ti 不足无法充分发挥微合金化强化作用。

（三）Ti 过高，会降低综合性能

许多人认为强化元素越多越好，但事实并非如此。当 Ti 含量超过约 0.55% 以后，多余的 Ti 容易形成粗大的 TiC 颗粒或局部偏析。这些粗大碳化物不仅不能继续提高强度，反而会削弱材

料塑性和韧性，同时增加加工难度，使组织均匀性下降。此外，过多 Ti 还可能影响烧结致密化过程，增加内部缺陷形成概率。

（四）兼顾加工性能与制造稳定性

TZM 不仅要求具有优异的高温性能，还要求能够进行锻造、轧制、旋锻及精密机械加工。0.40~0.55%的 Ti 既能够保证强化效果，又不会明显降低材料的热加工性能，因此成为工业生产中最合理的控制范围。

（五）钛锆钼铌合金（TZM）与 Zr、C 形成最佳协同强化

TZM 采用的是 Ti-Zr-C 协同强化体系。Ti 负责形成主要强化相，Zr 进一步提高组织稳定性，C 则促进 TiC 和 ZrC 生成。大量实验表明，当 Ti 控制在 0.40~0.55%时，与约 0.06~0.12%的 Zr 及 0.01~0.04%的 C 能够形成最佳比例的复合碳化物体系，使材料获得最佳综合性能。

钛锆钼铌合金（TZM）中 Ti 含量控制原因综合汇总

Ti 含量	对材料的影响	综合评价
<0.40%	TiC 形成不足、高温强度下降、再结晶温度降低	不推荐
0.40~0.55%	TiC 数量适中、强化效果最佳、加工性能良好	最佳范围
>0.55%	粗大 TiC 增多、塑性下降、加工难度增加	不推荐

中钨智造认为，TZM 中 Ti 含量控制在 0.40~0.55%，本质上体现的是强化效果与加工性能之间的最佳平衡。Ti 并非越多越好，而是在最佳含量下形成均匀细小的 TiC 弥散强化相，才能最大程度提高高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，同时保证良好的加工性能和批次一致性。这也是 TZM 能够长期保持工业主流地位的重要材料设计基础。

Q14 钛锆钼铌合金（TZM）中 Zr 含量为什么只有约 0.06~0.12%？

与 Ti 相比，TZM 中的锆（Zr）含量非常低，通常仅为 0.06~0.12 wt.%，约为 Ti 含量的五分之一左右。然而，锆在 TZM 中的作用却十分关键，其主要任务并不是提供主要强化，而是提高组织稳定性和长期高温服役性能。大量研究证明，仅需极少量 Zr 即可充分发挥强化作用，继续增加含量不仅收益有限，反而可能降低材料性能。

（一）Zr 主要形成热稳定性更高的 ZrC

锆加入后，同样会与碳形成 ZrC 颗粒。相比 TiC，ZrC 具有更高的熔点、更低的扩散速率及更好的高温稳定性，因此在长期高温条件下能够持续钉扎晶界，抑制晶粒长大，提高组织稳定性。虽然数量不多，但作用十分明显。

（二）少量即可达到最佳强化效果

由于 ZrC 强化效率较高，因此无需大量加入锆。当 Zr 达到约 0.06%以后，已经能够形成稳定的晶界强化体系，再继续增加，其强化效果提升十分有限。因此工业生产通常采用最低而有效的添加原则。

（三）过多 Zr 容易形成粗大析出物

如果锆含量过高，多余 Zr 容易形成粗大的 ZrC 颗粒。这些颗粒不仅降低组织均匀性，还可能成为裂纹萌生源，影响塑性、韧性及疲劳性能，同时增加热加工难度。因此国际标准始终

将 Zr 控制在较低范围内。

（四）降低制造成本

锆属于价格较高的稀有金属。在满足强化要求的前提下，仅加入约 0.06~0.12%的 Zr，不仅能够获得优异性能，还可降低原材料成本，提高工业化生产经济性。

（五）与 Ti 形成优势互补

TZM 中 Ti 负责提高高温强度，Zr 负责保持长期组织稳定，两者作用并不重复，而是形成互补。这种分工明确的强化机制，使 TZM 能够在长期高温环境下保持优异综合性能。

钛锆钼铌合金（TZM）中 Zr 含量控制原因综合汇总

Zr 含量	对材料的影响	综合评价
<0.06%	ZrC 不足、晶界稳定性下降	不推荐
0.06~0.12%	ZrC 稳定形成、抗蠕变性能最佳	最佳范围
>0.12%	粗大析出物增加、塑性下降、成本提高	不推荐

中钨智造认为，Zr 虽然仅占 TZM 总成分的极小比例，却承担着保持长期组织稳定性的关键任务。合理控制 Zr 含量，不仅能够形成高热稳定性的 ZrC 强化相，还能兼顾加工性能和制造成本。TZM 成功的重要原因之一，正是在于充分发挥了少量 Zr 的高效强化作用，而不是简单提高合金元素含量。

Q15 为什么钛锆钼铌合金（TZM）中碳含量极低？

在 TZM 中，碳（C）的标准含量通常仅为 0.01~0.04 wt.%，约占材料总质量的万分之一至千分之几，是所有主要合金元素中含量最低的元素之一。虽然含量极低，但碳却是 TZM 强化体系不可缺少的核心元素。如果没有碳，Ti 和 Zr 几乎无法形成 TiC 和 ZrC 强化相，TZM 也就失去了最重要的高温强化机制。

（一）碳的作用不是固溶强化，而是形成碳化物

碳本身几乎不承担强化作用。它的主要作用是分别与 Ti 和 Zr 结合，生成细小均匀的 TiC 和 ZrC 颗粒。真正提高 TZM 性能的是这些碳化物，而不是自由存在的碳元素。

（二）极少量碳即可满足强化需求

Ti 和 Zr 总含量本身就不足 1%。因此，仅需极少量碳即可与其充分反应形成强化相，不需要大量加入碳。继续增加碳含量，并不会进一步提高强化效果。

（三）碳过高容易形成粗大碳化物

如果碳含量过高，会出现剩余碳无法完全参与理想强化反应，容易析出粗大的碳化物颗粒。这些粗大颗粒会降低塑性和韧性，并增加裂纹萌生风险，同时影响烧结致密化和组织均匀性。因此，必须严格控制碳含量。

（四）保持良好的加工性能

TZM 不仅要求高温性能优异，还要求具有良好的锻造、轧制和机械加工性能。适量碳既能够

形成强化相，又不会影响材料塑性和热加工性能，因此国际标准将其控制在极低范围内。

（五）保证长期组织稳定

适量碳形成的 TiC 和 ZrC 颗粒能够长期稳定存在。如果碳过多，粗大碳化物在长期高温环境下容易成为组织不稳定因素，反而降低材料长期服役寿命。因此，低碳设计是 TZM 长期可靠性的基础之一。

钛锆钼铪合金（TZM）中碳含量控制原因综合汇总

C 含量	对材料的影响	综合评价
<0.01%	TiC、ZrC 形成不足、强化作用下降	不推荐
0.01~0.04%	碳化物形成充分、组织均匀、综合性能最佳	最佳范围
>0.04%	粗大碳化物增多、塑性下降、加工性能变差	不推荐

中钨智造的综合评价

中钨智造认为，碳虽然是 TZM 中含量最低的合金元素，却是整个微合金化强化体系的核心纽带。其真正价值不在于自身，而在于促使 Ti 和 Zr 形成细小稳定的 TiC 和 ZrC 弥散强化相，从而实现高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性的全面提升。TZM 采用极低碳设计，并不是为了降低成本，而是经过长期理论研究和工业实践优化后的最佳结果，这也是 TZM 能够兼顾高温性能、加工性能和长期服役可靠性的关键原因之一。

Q16 钛锆钼铪合金（TZM）的 Ti/C 比例为什么十分重要？

在 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）中，钛（Ti）和碳（C）并不是独立发挥作用，而是通过形成 TiC 弥散强化相共同决定材料的高温性能。因此，与单纯控制 Ti 或 C 含量相比，Ti/C 比例（质量比）是否合理，对 TZM 最终的组织结构、强化效果及长期服役性能具有更加重要的影响。经过大量实验研究和长期工业实践，国际主流 TZM 产品均采用相互匹配的 Ti、C 含量，使二者能够充分反应形成细小均匀的 TiC 颗粒，而避免游离 Ti 或游离 C 残留。

（一）保证形成最佳 TiC 强化相

TZM 最主要的强化来源就是 TiC。只有 Ti 和 C 按照适当比例结合，才能形成数量充足、尺寸细小、分布均匀的 TiC 颗粒。这些颗粒能够均匀分布于晶粒内部及晶界附近，有效阻碍位错运动，提高高温强度，并抑制晶粒长大。因此，Ti/C 比例实际上决定了 TiC 强化体系是否完善。

（二）Ti 过剩会降低强化效率

如果 Ti 相对于 C 过多，则部分 Ti 无法形成 TiC。这些未参与反应的 Ti 主要以固溶状态存在，其强化作用远低于 TiC，同时还可能影响组织均匀性，降低强化效率。因此，单纯提高 Ti 含量并不能持续提高 TZM 性能。

（三）碳过剩容易形成粗大碳化物

如果 C 相对于 Ti 过多，则多余碳容易形成粗大的碳化物或其他析出相。这些粗大颗粒不仅降低材料塑性和韧性，还可能成为裂纹源，影响高温疲劳寿命及加工性能。因此，过量碳同

样不利于材料综合性能。

（四）影响再结晶温度和抗蠕变性能

合理的 Ti/C 比例可获得尺寸适中、数量充足的 TiC 颗粒。这些颗粒能够长期稳定钉扎晶界，提高再结晶温度，并降低晶界滑移速度，从而显著改善抗蠕变性能。如果比例失衡，则晶界钉扎作用减弱，高温组织稳定性下降。

（五）影响烧结和热加工组织

Ti/C 比例还会影响粉末烧结及热加工后的组织均匀性。比例合理时，碳化物分布均匀，组织细化，烧结致密度高，锻造和轧制性能良好。比例失衡时，则容易出现碳化物偏聚、晶粒不均匀及局部组织异常等问题。

（六）国际标准采用协同控制方式

目前 ASTM、AMS 及各主要制造商虽然主要规定 Ti、C 各自的含量范围，但实际生产中均采用协同控制方式。制造企业通常根据 Ti 含量精确调整碳加入量，使 Ti 基本能够形成稳定 TiC，而不是简单满足成分范围即可。因此，高端 TZM 产品之间性能差异，很大程度上来源于 Ti/C 比例控制水平。

Ti/C 比例对钛锆钼铪合金（TZM）性能影响汇总

Ti/C 状态	组织特点	对性能的影响
Ti 不足	TiC 形成不足	强化作用下降、高温强度降低
Ti/C 匹配合理	TiC 均匀细化	综合性能最佳、组织稳定
Ti 过剩	游离 Ti 增加	强化效率下降、组织均匀性降低
C 过剩	粗大碳化物析出	塑性下降、加工性能变差

中钨智造认为，Ti/C 比例是 TZM 成分设计中的核心控制参数之一。真正决定 TZM 性能的，并不是 Ti 或 C 的单独含量，而是二者能否形成数量充足、尺寸细小且分布均匀的 TiC 强化相。现代高性能 TZM 生产企业通常将 Ti/C 比例控制作为关键工艺参数，通过优化粉末混合、烧结制度及热处理工艺，实现 TiC 颗粒尺寸和分布的精准控制，这也是不同厂家 TZM 产品性能存在差异的重要原因之一。

Q17 钛锆钼铪合金（TZM）有哪些国际牌号？

经过七十余年的发展，TZM 已成为国际应用最广泛的钼基高温合金之一。目前，TZM 并没有像不锈钢或铝合金那样采用统一的数字牌号，而是依据不同国家、标准体系及制造商形成了多种表示方式。虽然名称不同，但其核心化学成分基本一致，即以 Mo 为基体，加入约 0.40~0.55%的 Ti、0.06~0.12%的 Zr 及 0.01~0.04%的 C。国际上常见的 TZM 牌号主要包括 ASTM 标准牌号、AMS 航空材料牌号、企业商业牌号及部分军工规范牌号。

（一）钛锆钼铪合金（TZM）——国际通用名称

TZM 是目前全球使用最广泛的名称，也是国际公认的标准商品名称。其中，T 代表 Titanium（钛）、Z 代表 Zirconium（锆）、M 代表 Molybdenum（钼）。无论美国、欧洲、日本还是中国，大多数企业均直接采用 TZM 作为产品名称。

（二）ASTM 标准中的钛锆钼铪合金（TZM）

美国 ASTM 标准是全球 TZM 应用最广泛的标准体系之一。ASTM B386、ASTM B387、ASTM B388 等标准均涵盖 TZM 产品，分别适用于板材、棒材、锻件、管材及其他加工产品，并规定了化学成分、力学性能、尺寸公差及检验要求。这些标准已成为国际贸易的重要依据。

（三）AMS 航空材料牌号

在航空航天领域，TZM 通常采用 SAE AMS（Aerospace Material Specification）材料规范。典型标准包括 AMS 7848 及相关规范，用于航空发动机、高温结构件及航天装备。AMS 标准对材料纯度、组织均匀性、加工状态及质量控制要求通常高于普通工业标准。

（四）美国军工规范

早期，美国军工及航天项目还曾采用 MIL 及 AMS-T 系列规范管理 TZM 材料，例如 AMS-T-21014 等。这些规范主要用于导弹、火箭发动机及高温军工装备，目前部分内容已逐步并入新的 AMS 标准体系。

（五）欧洲和日本商业牌号

欧洲、日本多数企业仍直接采用 TZM 作为商业牌号。例如，Plansee、H.C. Starck（现属 MHC 集团）、Elmet Technologies 等国际知名难熔金属企业，均使用 TZM 命名其系列产品，同时依据企业标准进一步细分不同纯度、加工状态及应用领域。因此，不同厂家虽然商品名称相同，但性能等级可能存在一定差异。

（六）中国钛锆钼铪合金（TZM）牌号

我国 TZM 材料的发展始于 20 世纪 70 年代后期，并于 20 世纪 80 年代逐步实现工业化。目前，国内多数生产企业同样采用国际通用名称 TZM，并依据 GB/T 及企业标准组织生产。近年来，随着半导体热场、航空航天及高端真空装备的发展，国产 TZM 在纯度控制、组织均匀性及大型构件制造方面已取得显著进步，部分产品性能达到国际先进水平。

（七）为什么没有钛锆钼铪合金（TZM）统一数字牌号？

与钢铁或铝合金不同，TZM 属于典型的小批量、高附加值工程材料。全球生产企业数量有限，材料体系相对稳定，因此行业长期采用 TZM 这一通用名称，而没有再细分大量数字牌号。真正决定产品性能的，更多是纯度等级、加工工艺、热处理制度及组织控制水平，而不是名称本身。

钛锆钼铪合金（TZM）主要国际牌号及标准汇总

名称或标准	所属体系	主要用途
TZM	国际通用商品名称	全球通用钼基高温合金名称
ASTM B386	ASTM	TZM 板材、带材
ASTM B387	ASTM	TZM 棒材、锻件
ASTM B388	ASTM	TZM 管材及相关产品
AMS 7848	SAE AMS	航空航天高温结构材料
AMS-T-21014（历史规范）	美国航空军工	军工及航天高温部件
企业 TZM 牌号	Plansee、Elmet、MHC 等	半导体、真空、航空航天等领域
中国 TZM	GB/T 及企业标准	半导体热场、真空设备、航空航天

中钨智造认为，TZM 最大的特点之一，是全球长期采用统一的材料名称，而不是复杂的数字牌号体系。这说明 TZM 的化学成分设计已经十分成熟，其核心差异并不在于牌号，而在于材料纯度、碳化物控制、组织均匀性、加工状态及质量管理水平。对于用户而言，在采购 TZM 时，应重点关注执行标准、化学成分、杂质控制、力学性能及供货状态，而不能仅依据 TZM 这一名称判断产品质量。对于高端半导体热场、航空航天及先进真空装备，更建议选择符合 ASTM、AMS 等国际标准，并具有稳定工程应用业绩的 TZM 产品，以确保长期服役的可靠性。

Q18 钛锆钼铪合金（TZM）有哪些 ASTM 标准？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）作为目前应用最广泛的钼基高温合金之一，美国 ASTM（American Society for Testing and Materials，现 ASTM International）建立了较为完善的材料标准体系。这些标准不仅规定了材料的化学成分，还对产品尺寸、公差、力学性能、制造工艺、检验方法及交货状态进行了统一规范，是目前全球 TZM 生产、采购和国际贸易最重要的技术依据之一。需要说明的是，ASTM 标准通常按照产品形式进行分类，因此不存在一部专门针对 TZM 的综合标准，而是分散于不同产品标准之中。

（一）ASTM B386——钼及钼合金板材、薄板和带材

ASTM B386 是 TZM 应用最广泛的标准之一，适用于板材、薄板和带材产品。该标准规定了 TZM 板材的化学成分、尺寸偏差、力学性能、表面质量、检验要求及交货状态，广泛应用于半导体热场、高温炉及真空设备。

（二）ASTM B387——钼及钼合金棒材和锻件

ASTM B387 主要适用于 TZM 棒材、锻造棒材及锻件。这是目前机械加工零件、高温结构件及热场支撑件最常采用的标准，也是国际采购 TZM 棒材的重要依据。

（三）ASTM B388——钼及钼合金无缝管

ASTM B388 适用于钼及 TZM 无缝管产品。主要应用于高温真空设备、热场保护管、高温测温管及特殊真空结构件。

（四）ASTM B777 等相关标准

ASTM B777 主要规范高密度钨基合金，并非 TZM 专用标准，但在难熔金属产业中常与 TZM 配套使用。此外，ASTM 还有部分涉及钼材料检验、化学分析及试验方法的辅助标准，可用于 TZM 产品检测。

（五）ASTM 标准的主要内容

对于 TZM 而言，ASTM 标准通常包括以下内容：化学成分要求、产品尺寸及公差、力学性能、制造工艺要求、组织质量、检验方法、包装与标识及交货条件。这些内容共同保证了不同厂家生产的 TZM 产品具有良好的互换性和一致性。

钛锆钼铪合金（TZM）主要 ASTM 标准汇总

ASTM 标准	产品形式	主要内容	典型应用
ASTM B386	板材、薄板、带材	化学成分、尺寸、公差、性能	半导体热场、高温炉

ASTM 标准	产品形式	主要内容	典型应用
ASTM B387	棒材、锻件	成分、力学性能、检验要求	高温零件、真空设备
ASTM B388	无缝管	管材尺寸、公差、性能	真空炉、热场保护管
ASTM 试验标准	检测方法	化学分析、力学性能检测	产品质量控制

中钨智造认为，ASTM 标准是当前全球 TZM 产品最重要的技术规范，也是国际贸易中认可度最高的标准体系。对于采购 TZM 材料而言，除了确认产品执行 ASTM B386、B387 或 B388 等标准外，还应进一步关注材料纯度、组织均匀性、晶粒度及高温性能，因为这些指标往往决定了 TZM 在高端半导体及航空航天领域的实际使用寿命。

Q19 钛锆钼铪合金（TZM）有哪些 ISO 标准？

与 ASTM 相比，ISO（International Organization for Standardization，国际标准化组织）目前并未制定专门针对 TZM 化学成分的独立国际标准。这是因为 TZM 属于典型的小批量、高技术、高附加值难熔金属材料，其全球市场规模远小于普通钢材、铝合金等通用工程材料，因此 ISO 更多关注检测方法、尺寸公差及质量管理，而产品成分标准仍主要采用 ASTM、AMS 及各国行业标准。

（一）ISO 暂无钛锆钼铪合金（TZM）专用材料标准

截至目前，ISO 尚未发布专门规定 TZM 化学成分及力学性能的独立标准。国际工程项目中，TZM 通常直接引用 ASTM B386、ASTM B387 及 ASTM B388 等标准作为材料采购依据。

（二）ISO 检测标准可用于钛锆钼铪合金（TZM）

虽然没有专门材料标准，但许多 ISO 检测标准同样适用于 TZM 产品，例如尺寸测量、机械性能测试、金相检验、硬度测试、粗糙度检测及质量管理体系等。这些标准广泛应用于 TZM 生产和质量控制过程中。

（三）ISO 质量管理体系

全球主要 TZM 制造企业通常通过 ISO 9001 质量管理体系认证。航空航天领域还常结合 AS9100 质量体系，医疗领域则可能采用 ISO 13485 等管理体系，以保证产品一致性和可追溯性。

（四）国际工程中的实际应用

目前国际高端装备制造中，通常采用 ASTM 规定材料要求，同时结合 ISO 检测方法和 ISO 质量管理体系共同实施产品验收。这种 ASTM 负责材料、ISO 负责管理和检测的模式，已经成为国际难熔金属行业的主流做法。

钛锆钼铪合金（TZM）涉及的主要 ISO 体系

ISO 类别	是否适用于 TZM	主要内容
TZM 专用材料标准	暂无	国际上主要采用 ASTM 标准
ISO 检测标准	是	尺寸、力学性能、金相、粗糙度检测
ISO 9001	是	质量管理体系

ISO 类别	是否适用于 TZM	主要内容
ISO 计量标准	是	检测设备校准、质量控制

中钨智造认为，目前全球 TZM 尚未形成统一的 ISO 材料标准，其原因在于 TZM 属于专业化程度极高的难熔金属材料，国际行业长期采用 ASTM 作为材料标准已能够满足工程需求。对于用户而言，判断 TZM 质量时，应优先关注产品执行的 ASTM 标准及制造企业的 ISO 9001 质量管理体系，而不是单纯寻找所谓 ISO 材料标准。

Q20 不同厂家钛锆钼铪合金（TZM）成分是否一致？

从国际标准来看，全球各厂家生产的 TZM 化学成分总体保持一致。无论美国、德国、日本还是中国，主流 TZM 产品均采用 Mo-Ti-Zr-C 体系，即 Mo 为基体、Ti 约 0.40~0.55%、Zr 约 0.06~0.12%、C 约 0.01~0.04%。因此，从名义化学成分来看，各厂家 TZM 产品基本相同。但是，这并不意味着不同厂家 TZM 具有完全相同的性能。真正决定 TZM 品质的，往往不是标准成分，而是制造工艺和组织控制水平。

（一）钛锆钼铪合金（TZM）标准成分基本一致

国际主要 TZM 生产企业均遵循 ASTM、AMS 及相关标准。因此，各厂家产品在 Ti、Zr、C 等主要元素含量方面差异很小，一般均控制在标准允许范围内。

（二）杂质控制水平存在差异

虽然主元素相同，但氧、氮、碳、铁、镍、硅等杂质控制水平可能明显不同。高端半导体级 TZM 通常具有更低的氧、氮含量，从而获得更好的塑性、高温稳定性和使用寿命。

（三）碳化物控制能力不同

现代 TZM 真正的技术核心，在于 TiC 和 ZrC 强化相的尺寸、数量和分布。不同企业采用不同的粉末制备、混料、烧结、热加工和热处理工艺，因此碳化物分布均匀性可能存在较大差异。这也是不同厂家 TZM 性能差异的重要来源。

（四）组织均匀性不同

即使化学成分完全相同，晶粒尺寸、织构、孔隙率及组织均匀性仍可能存在明显差异。这些因素直接影响高温蠕变性能、疲劳寿命及加工性能。

（五）加工状态不同

TZM 产品可能以烧结态、锻造态、轧制态、应力消除态或再结晶态交付。不同加工状态对应不同的组织和性能，因此采购时必须明确供货状态，而不能仅看化学成分。

（六）应用等级不同

不少国际企业还根据用途进一步细分 TZM 等级，例如普通工业级、高纯真空级、半导体热场级及航空航天级。虽然名称均为 TZM，但性能要求和质量控制标准并不完全相同。

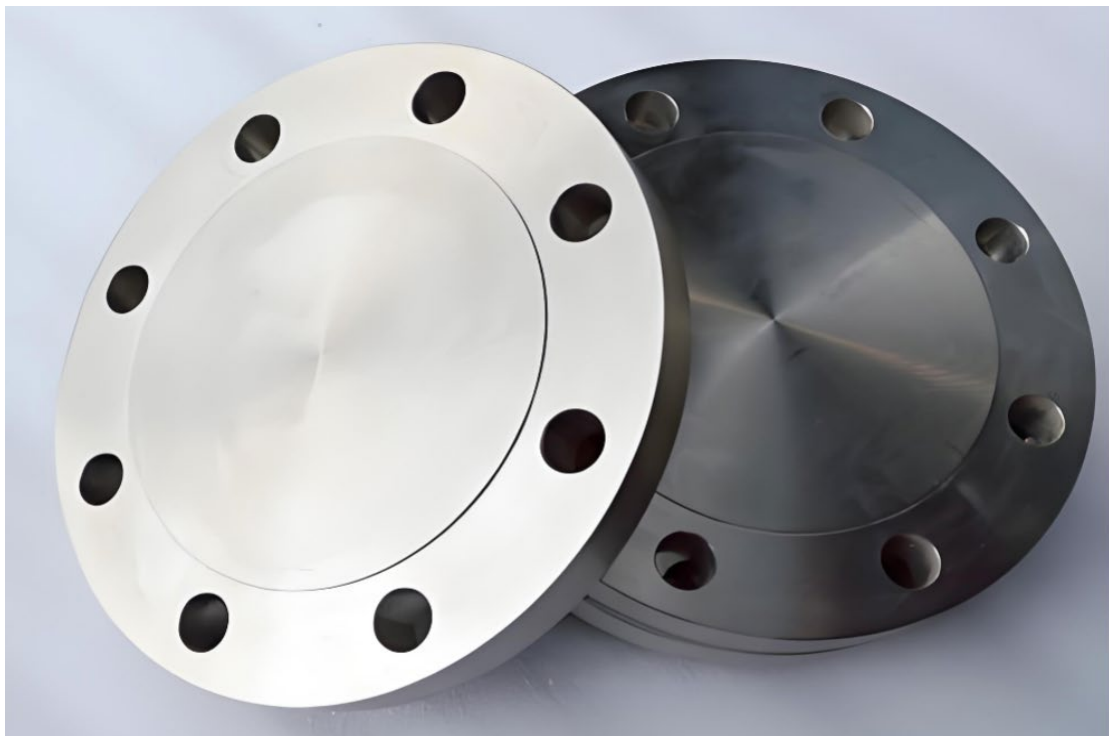
不同厂家钛锆钼铪合金（TZM）主要差异比较

对比项目	是否一致	对性能影响
Ti、Zr、C 标准成分	基本一致	差异较小

对比项目	是否一致	对性能影响
杂质控制	存在差异	影响塑性和高温寿命
TiC、ZrC 分布	差异较大	决定强化效果
晶粒组织	存在差异	影响高温稳定性
加工状态	存在差异	影响力学性能
半导体级纯度	差异明显	决定高端应用可靠性

中钨智造认为，各厂家 **TZM** 最大的共同点是遵循相同的国际标准成分，而最大的区别则体现在制造工艺和质量控制能力。真正高品质的 **TZM**，不仅要求 **Ti、Zr、C** 符合标准，更要求具有超低杂质含量、均匀细小的 **TiC** 和 **ZrC** 弥散强化相、稳定一致的晶粒组织以及成熟的热加工工艺。因此，在高端半导体热场、航空航天及先进真空装备领域，评价 **TZM** 优劣时，应更加关注材料纯净度、组织控制、高温性能和长期服役数据，而不能仅依据化学成分是否符合标准来判断产品质量。





第三篇 钛锆钼合金（TZM）的微观组织

Q21 钛锆钼合金（TZM）的强化机理是什么？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）之所以能够在保持钼优异高温特性的基础上，大幅提高高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，其根本原因在于建立了一套成熟、高效的微合金化弥散强化体系。与普通合金依靠大量添加合金元素进行固溶强化不同，TZM 仅加入不足 1% 的 Ti、Zr 和 C，便通过形成细小、均匀且热稳定的 TiC 和 ZrC 弥散强化相，实现了综合性能的大幅提升。因此，TZM 并非依靠单一强化机制，而是弥散强化、晶界强化、位错强化、细晶强化及固溶强化等多种机制协同作用的结果。

（一）弥散强化——TZM 最核心的强化机制

TZM 最重要的强化方式是碳化物弥散强化。烧结及热加工过程中，Ti 和 Zr 分别与 C 结合形成大量纳米级至亚微米级 TiC 和 ZrC 颗粒。这些强化相均匀分布于钼基体及晶界附近，如同大量微小锚点，有效阻碍位错运动，提高材料的屈服强度、高温强度及硬度。这种强化机制在高温条件下依然能够保持较高稳定性，是 TZM 区别于纯钼的核心所在。

（二）晶界钉扎强化

TiC 和 ZrC 颗粒不仅存在于晶粒内部，还大量分布于晶界附近。这些颗粒能够有效抑制晶界迁移，阻止晶粒在高温下快速长大，从而提高再结晶温度，并保持细小稳定的晶粒组织。尤其是 ZrC，由于热稳定性更高，在长期高温环境下仍具有优异的晶界钉扎能力，因此对 TZM 长期服役性能贡献尤为突出。

（三）位错强化

材料发生塑性变形时，位错需要不断移动。TiC 和 ZrC 颗粒成为位错运动的重要障碍，使位

错必须绕过颗粒或切穿强化相才能继续移动，从而显著提高材料的变形阻力。因此，即使在1000~1400℃高温条件下，TZM 仍能保持较高强度。

（四）抗蠕变强化

高温长期受力时，材料容易发生蠕变。TZM 中的碳化物颗粒能够降低晶界滑移速度，减少位错攀移，延缓高温塑性变形，因此具有明显优于纯钼的抗蠕变性能。这也是 TZM 广泛应用于高温热场和真空设备的重要原因。

（五）再结晶强化

纯钼通常在约 900~1100℃便开始明显再结晶。由于 TiC 和 ZrC 持续阻碍晶界迁移，TZM 再结晶温度通常可提高约 200~400℃，部分产品甚至更高。再结晶温度提高后，材料在长期高温服役过程中能够保持较好的尺寸稳定性和组织稳定性。

（六）少量固溶强化

除了形成碳化物外，极少量 Ti 和 Zr 还会以固溶形式存在于钼基体中。虽然固溶强化作用远低于碳化物强化，但仍可对材料强度产生一定贡献，与其他强化机制共同发挥作用。

钛锆钼合金（TZM）的强化机理综合汇总

强化机制	主要作用	对性能贡献
弥散强化	TiC、ZrC 阻碍位错运动	提高高温强度、硬度
晶界钉扎	抑制晶界迁移	提高再结晶温度、保持组织稳定
位错强化	增加位错运动阻力	提高屈服强度和抗变形能力
抗蠕变强化	抑制晶界滑移和位错攀移	延长高温服役寿命
细晶强化	保持细小晶粒	提高综合力学性能
固溶强化	少量 Ti、Zr 固溶于 Mo	辅助提高强度

中钨智造认为，TZM 成功的关键并不是依赖某一种强化方式，而是建立了以 TiC、ZrC 弥散强化为核心，多种强化机制协同工作的材料体系。正是由于位错强化、晶界强化、抗蠕变强化及组织稳定化共同作用，TZM 才能在 1000~1400℃长期保持优异的高温性能。这种经典设计理念不仅奠定了 TZM 作为工业主流钼基高温合金的地位，也成为后来 MHC、ZHM 及 ODS 钼合金等新型难熔金属材料的重要理论基础。

Q22 钛锆钼合金（TZM）的 TiC、ZrC 强化机制是什么？

TiC（碳化钛）和 ZrC（碳化锆）是 TZM 最重要的强化相，也是材料获得优异高温性能的根本来源。它们并不是简单存在于材料内部，而是以细小弥散颗粒形式均匀分布于钼基体和晶界附近，通过阻碍位错运动、稳定晶界组织及抑制高温扩散等多种机制共同提高材料性能。虽然二者都属于高熔点过渡金属碳化物，但由于物理性能不同，其强化作用各有侧重，TiC 更偏重于提高高温强度，而 ZrC 则更有利于保持长期组织稳定性。

（一）TiC 强化机制——提高高温强度

TiC 熔点约 3140℃，硬度高、弹性模量大，与钼具有良好的界面结合能力。细小 TiC 颗粒均匀分布于晶粒内部，可有效阻碍位错运动，使材料在高温条件下仍保持较高的屈服强度和抗

拉强度。因此，TiC 是 TZM 提高高温承载能力的主要强化相。

（二）ZrC 强化机制——提高长期组织稳定性

ZrC 熔点约 3540 °C，比 TiC 具有更高的热稳定性和更低的扩散速率。其主要分布于晶界附近，能够长期钉扎晶界，抑制晶粒粗化和晶界迁移，使材料即使长期工作于高温环境，也能保持稳定组织。因此，ZrC 对提高抗蠕变性能和长期服役寿命具有更加重要的作用。

（三）阻碍位错运动

无论 TiC 还是 ZrC，都属于高硬度强化颗粒。当材料发生塑性变形时，位错必须绕过这些颗粒或通过攀移才能继续移动，因此材料变形阻力显著增加。这也是 TZM 高温强度明显高于纯钼的重要原因。

（四）抑制晶界迁移

高温下，纯钼晶界容易移动，导致晶粒迅速长大。TiC 和 ZrC 颗粒分布于晶界附近，形成明显的晶界钉扎作用，有效抑制晶粒粗化，提高再结晶温度和组织稳定性。

（五）降低高温扩散速度

高温材料失效通常伴随原子扩散加快。TiC 和 ZrC 能够降低晶界扩散和体扩散速度，从而延缓组织演化，提高长期高温稳定性。这一作用对于长期连续工作的真空热场及高温炉尤为重要。

（六）TiC 与 ZrC 协同强化

TZM 并非依靠单一 TiC 或 ZrC 强化，而是利用二者优势互补。TiC 负责提高高温强度和硬度，ZrC 负责提高组织稳定性和抗蠕变能力，两者共同构成经典的复合碳化物强化体系。这种协同强化机制，也是 TZM 优于纯钼的重要原因。

钛锆钼合金（TZM）的 TiC 与 ZrC 强化作用比较		
项目	TiC	ZrC
熔点	约 3140 °C	约 3540 °C
热稳定性	高	更高
主要分布	晶粒内部	晶界附近及晶粒内部
主要作用	提高高温强度、硬度	提高组织稳定性、抗蠕变性能
位错阻碍能力	强	强
晶界钉扎能力	良好	更优
对长期服役贡献	较大	更大

中钨智造综合的观点是，TiC 和 ZrC 是 TZM 性能提升的真正载体，而不是 Ti、Zr 元素本身。TiC 主要承担提高高温强度和承载能力的任务，ZrC 则负责长期稳定晶界、抑制晶粒粗化和提高抗蠕变性能。二者通过复合碳化物强化体系形成优势互补，使 TZM 能够兼具高强度、高组织稳定性和长寿命等综合优势。近年来，高端 TZM 材料的发展重点也已从单纯控制化学成分，逐步转向精准调控 TiC、ZrC 颗粒的尺寸、数量、形貌和空间分布，以进一步提升材料在半导体热场、航空航天及先进能源装备中的长期服役性能。

Q23 钛锆钼合金（TZM）的固溶强化是什么？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的强化机制以 TiC、ZrC 弥散强化为主，但在材料组织中，还存在一定程度的固溶强化（Solid Solution Strengthening）。虽然其强化贡献远低于弥散强化，却是 TZM 综合强化体系的重要组成部分，对提高室温及中温强度、改善组织均匀性和辅助稳定高温性能具有积极作用。所谓固溶强化，是指部分合金元素以原子状态溶入钼晶格中，形成固溶体，由于不同元素的原子尺寸和弹性模量存在差异，会引起晶格畸变，从而增加位错运动阻力，提高材料强度。

（一）TZM 中的固溶强化来源

在 TZM 中，大部分 Ti 和 Zr 最终与 C 反应生成 TiC 和 ZrC 强化颗粒，但仍有少量 Ti、Zr 原子未参与碳化物形成，而是固溶于钼基体中。这些固溶原子均匀分布于晶格内部，使钼晶格发生轻微畸变，从而产生固溶强化作用。由于 TZM 中 Ti、Zr 含量较低，因此固溶强化属于辅助强化机制，而非主导机制。

（二）固溶强化的作用机理

Ti、Zr 原子进入钼晶格后，由于原子半径与 Mo 存在差异，会在晶体内部形成局部应力场。当位错运动经过这些区域时，需要克服额外阻力，因此材料的屈服强度和变形抗力有所提高。同时，这种晶格畸变还能降低部分原子的扩散速率，对提高组织稳定性具有一定帮助。

（三）固溶强化的性能贡献

TZM 中的固溶强化主要具有以下作用：提高室温及中温屈服强度、辅助提高高温强度、改善材料组织均匀性、降低局部塑性变形倾向、与弥散强化共同发挥协同强化作用。不过，在 1000 °C 以上长期服役条件下，其贡献明显小于 TiC、ZrC 弥散强化。

（四）为什么固溶强化不能替代弥散强化？

如果 Ti、Zr 全部以固溶形式存在，材料虽然能够获得一定强度提升，但随着温度升高，固溶强化效应会迅速减弱。而 TiC、ZrC 属于高熔点稳定碳化物，即使在 1200 °C 以上仍能保持较高稳定性，因此能够长期阻碍位错运动和晶界迁移。这也是 TZM 选择复合强化而不是单纯固溶强化的重要原因。

钛锆钼合金（TZM）的固溶强化特点

项目	内容
强化来源	少量 Ti、Zr 固溶于 Mo 晶格
强化方式	晶格畸变阻碍位错运动
主要作用	提高室温、中温强度，辅助高温强化
稳定性	中等，高温下作用逐渐减弱
强化贡献	小于 TiC、ZrC 弥散强化
与弥散强化关系	协同强化，共同提高综合性能

固溶强化虽然不是 TZM 最主要的强化机制，但它是完整强化体系中不可缺少的一环。少量 Ti、Zr 固溶于钼基体，可有效提高材料初始强度，并与 TiC、ZrC 弥散强化形成协同效应。现代 TZM 材料设计更强调多机制协同强化，而不是单纯依赖某一种强化方式，这也是 TZM 能够长期保持优异综合性能的重要原因。

Q24 钛锆钼合金（TZM）的第二相颗粒如何形成？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）之所以具有优异的高温性能，很大程度上来源于材料内部形成的大量细小第二相颗粒（Second-phase Particles）。这些颗粒主要由 TiC 和 ZrC 组成，是 TZM 实现弥散强化和晶界稳定化的核心。第二相颗粒并非后期人为加入，而是在粉末冶金、烧结和热加工过程中，通过 Ti、Zr 与 C 发生原位反应自然形成，并在后续工艺中不断细化和均匀分布。

（一）粉末混合阶段

TZM 通常采用粉末冶金工艺生产。首先，将高纯钼粉与钛粉、锆粉及碳源按照规定比例充分混合，使各种元素达到较高的分散均匀性，为后续碳化物形成创造条件。混合均匀程度越高，最终第二相颗粒分布通常越均匀。

（二）烧结阶段形成 TiC 和 ZrC

在高温烧结过程中，Ti 和 Zr 逐渐与碳发生反应，生成稳定的 TiC 和 ZrC 颗粒。由于 Ti、Zr 对碳具有较强亲和力，生成碳化物的热力学驱动力很高，因此绝大部分碳最终以碳化物形式存在，而不会长期保持游离状态。这一阶段是第二相颗粒形成的关键过程。

（三）热加工促进颗粒细化

烧结后的 TZM 通常还需经过锻造、轧制或旋锻等热机械加工。塑性变形不仅能够消除烧结孔隙，还可将较大的碳化物颗粒进一步打碎、细化，并促使其沿整个组织更加均匀地分布。因此，高质量 TZM 通常具有细小、均匀且数量适中的第二相颗粒。

（四）热处理稳定颗粒组织

后续热处理过程中，TiC 和 ZrC 颗粒继续发生轻微长大和重新分布，最终形成热稳定组织。合理控制热处理制度，可避免颗粒异常粗化，从而保持最佳强化效果。

（五）第二相颗粒的分布特点

成熟 TZM 材料中的 TiC 和 ZrC 主要分布于晶粒内部和晶界附近。晶粒内部颗粒主要负责阻碍位错运动，提高高温强度；晶界附近颗粒主要负责钉扎晶界，抑制晶粒长大，提高再结晶温度和抗蠕变性能。这种内外结合的分布方式，是 TZM 综合性能优异的重要原因。

（六）颗粒尺寸为何十分重要？

第二相颗粒并非越大越好，也不是越多越好。颗粒过大，会降低强化效率，并可能成为裂纹萌生源；颗粒过少，则强化作用不足；颗粒过于密集，还可能降低材料塑性。因此，现代 TZM 制造工艺的重点之一，就是精确控制 TiC、ZrC 颗粒的尺寸、数量、形貌及分布均匀性。

钛锆钼合金（TZM）的第二相颗粒形成过程

工艺阶段	主要过程	第二相变化
粉末混合	Mo、Ti、Zr、C 均匀混合	元素充分分散
高温烧结	Ti、Zr 与 C 发生原位反应	形成 TiC、ZrC 颗粒
热机械加工	锻造、轧制、旋锻	颗粒细化、均匀分布
热处理	组织稳定化	保持颗粒尺寸和热稳定性
最终组织	晶粒内部及晶界弥散分布	获得最佳强化效果

第二相颗粒的形成过程本质上是 TZM 材料组织设计的核心，也是不同厂家产品性能差异最大的来源之一。国际先进企业早已将研发重点由控制化学成分转向控制第二相颗粒，通过优化粉末粒度、混料均匀性、烧结制度、热加工工艺及热处理参数，实现 TiC、ZrC 颗粒的细化、均匀化和稳定化。未来，随着纳米粉末、快速烧结及数字化组织调控技术的发展，对第二相颗粒的精准控制将继续成为提升 TZM 高温性能和服役寿命的重要方向。

Q25 钛锆钼合金（TZM）中 TiC 颗粒尺寸一般是多少？

TiC（碳化钛）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）中最主要的强化相，其颗粒尺寸、数量、形貌及分布状态直接决定材料的高温强度、抗蠕变性能、再结晶温度及服役寿命。对于现代高性能 TZM 而言，控制 TiC 颗粒尺寸已成为材料制备过程中最重要的技术指标之一。目前 ASTM、AMS 等国际标准并未规定 TiC 颗粒的具体尺寸要求，而是由各生产企业通过粉末冶金、烧结及热机械加工工艺进行控制，因此不同制造商产品之间可能存在一定差异。

（一）工业 TZM 的典型 TiC 颗粒尺寸

根据国际公开文献及工业研究结果，传统工业 TZM 中的 TiC 颗粒尺寸通常约为 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$ ，其中多数集中在 $0.2\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 范围。经过优化工艺生产的高品质 TZM，可使 TiC 颗粒更加细小且分布均匀，从而获得更好的综合性能。

（二）为什么颗粒越细强化效果越好？

细小 TiC 颗粒具有更大的比表面积和更高的数量密度。当位错运动时，需要不断绕过大量细小颗粒，因此材料变形阻力明显增加。同时，细小颗粒还能更加均匀地分布于晶粒内部及晶界附近，提高强化效率。因此，在颗粒数量相同的情况下，尺寸越细，强化效果通常越明显。

（三）颗粒过大会产生哪些问题？

如果 TiC 颗粒尺寸超过约 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ，则强化效率明显下降。粗大颗粒不仅无法有效阻碍位错运动，还容易成为应力集中区域，在高温循环或热疲劳条件下诱发微裂纹，降低材料塑性、疲劳性能及服役寿命。因此，现代 TZM 均尽量避免形成粗大 TiC 颗粒。

（四）颗粒也不能无限细化

虽然 TiC 细化有利于强化，但颗粒并非越小越好。如果颗粒尺寸达到几十纳米甚至更小，在长期高温环境下容易发生聚集和粗化，导致强化作用逐渐减弱。同时，超细颗粒的制备工艺复杂、成本较高，对工业化生产提出更高要求。因此，目前工业 TZM 通常采用亚微米级 TiC 颗粒作为综合性能与制造成本之间的最佳平衡。

（五）现代 TZM 的发展趋势

近年来，随着高能球磨、放电等离子烧结（SPS）、热等静压（HIP）及纳米粉末技术的发展，国际先进企业正逐步实现 TiC 颗粒的进一步细化和均匀化。部分实验研究已获得平均尺寸约 $50\sim 200\ \text{nm}$ 的 TiC 颗粒，并表现出更优异的高温性能，但目前仍主要处于科研及部分高端应用阶段。

钛锆钼合金（TZM）中 TiC 颗粒尺寸对性能的影响

TiC 颗粒尺寸	强化效果	综合评价
>1 μm	强化作用下降、易形成应力集中	不理想
0.2~0.6 μm	强化效果优异、组织稳定	工业最佳范围
0.1~0.2 μm	强化能力进一步提高	高品质 TZM 常见
<100 nm	强化潜力较大，但制备复杂	主要用于科研及先进材料

TiC 颗粒尺寸是衡量 TZM 质量的重要微观指标之一。现代 TZM 的发展重点已由简单控制化学成分，逐步转向精准调控 TiC 颗粒的尺寸、数量和空间分布。对于半导体热场、航空航天及先进能源装备而言，均匀细小的亚微米级 TiC 颗粒通常能够兼顾强化效果、组织稳定性及工业制造可行性，是目前高性能 TZM 最理想的组织状态。

Q26 为什么 TZM 第二相颗粒决定寿命？

对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，材料的服役寿命并不仅仅取决于化学成分，而更多取决于内部第二相颗粒（主要为 TiC、ZrC）的尺寸、数量、分布及长期稳定性。在高温环境下，TZM 最终失效通常不是因为钼基体熔化，而是由于第二相颗粒逐渐失去强化能力，导致组织粗化、蠕变加剧和裂纹萌生。因此，第二相颗粒被普遍认为是决定 TZM 长期服役寿命的关键因素。

（一）第二相颗粒承担主要强化作用

TZM 的大部分高温性能均来自 TiC 和 ZrC 强化相。这些颗粒持续阻碍位错运动、抑制晶界迁移并降低高温扩散速度，使材料在长期高温下仍保持较高强度。一旦颗粒失去作用，材料强化体系便开始退化。

（二）长期高温会导致颗粒粗化

TZM 长期工作于 1000~1400 °C 甚至更高温度时，第二相颗粒会逐渐发生长大和聚并。颗粒数量减少、尺寸增大后，其对位错和晶界的阻碍作用明显减弱，强化效果下降，材料强度开始衰减。因此，颗粒粗化速度越慢，TZM 寿命通常越长。

（三）晶界失去钉扎后晶粒迅速长大

TiC 和 ZrC 长期稳定存在时，可持续钉扎晶界。当颗粒粗化或数量减少后，晶界开始自由迁移，晶粒迅速长大，再结晶组织形成，高温强度明显下降。这一过程通常是 TZM 寿命衰减的重要标志。

（四）蠕变速度显著增加

第二相颗粒能够降低晶界滑移和位错攀移速度。当颗粒强化作用减弱后，材料蠕变速率迅速增加，尺寸变化加快，最终失去使用精度或发生断裂。对于半导体热场和航空航天零件而言，这往往意味着服役寿命结束。

（五）裂纹更容易萌生和扩展

颗粒分布均匀时，应力能够均匀传递。如果颗粒粗化或局部聚集，则容易形成应力集中区域，在热循环和机械载荷作用下产生微裂纹，并逐渐扩展，最终导致材料失效。因此，第二相颗

粒不仅影响强度，也直接影响疲劳寿命。

（六）现代 TZM 研发的核心就是控制第二相
近年来，国际 TZM 研究重点已由提高 Ti、Zr 含量转向控制第二相颗粒。通过优化粉末粒度、烧结制度、热机械加工及热处理工艺，使 TiC、ZrC 颗粒长期保持细小、均匀和稳定，从而延长材料服役寿命。可以说，现代 TZM 制造水平，很大程度上取决于第二相颗粒控制能力。

第二相颗粒与钛锆钼合金（TZM）寿命关系

第二相状态	对材料组织影响	对寿命影响
颗粒细小且均匀	位错受阻、晶界稳定	使用寿命最长
颗粒轻微长大	强化能力略有下降	寿命开始降低
颗粒明显粗化	晶粒长大、蠕变加快	寿命明显缩短
颗粒聚集或偏析	应力集中、裂纹萌生	容易提前失效

第二相颗粒实际上决定了 TZM 高温性能能够保持多久，而不仅仅决定材料初始性能有多高。对于长期在极端环境下工作的 TZM 构件而言，真正影响使用寿命的并非名义化学成分，而是 TiC、ZrC 第二相颗粒能否长期保持细小、均匀、稳定的弥散分布。因此，国际先进 TZM 制造企业普遍将第二相调控作为核心技术，通过精准控制颗粒尺寸、数量和热稳定性，不断提升材料在半导体热场、航空航天、核能及先进真空装备中的长期服役可靠性。未来，围绕第二相颗粒演化规律及其长期稳定性的研究，仍将是 TZM 材料发展的重要方向。

Q27 TZM 再结晶温度是多少？

再结晶温度（Recrystallization Temperature）是衡量高温结构材料热稳定性的重要指标之一，也是评价 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）高温性能的核心参数。所谓再结晶，是指经过塑性加工后的材料在高温下形成新的无应变晶粒，并伴随晶粒快速长大的过程。一旦发生明显再结晶，材料的高温强度、硬度及抗蠕变性能都会明显下降。与纯钼相比，TZM 正是通过 TiC、ZrC 弥散强化相有效抑制晶界迁移，大幅提高了再结晶温度，因此能够长期工作于更高温度环境。

（一）纯钼的再结晶温度
工业纯钼的再结晶温度通常约为 900~1100 °C。其具体数值受纯度、变形量、晶粒尺寸及加工工艺影响较大。纯钼一旦达到该温度，晶粒迅速长大，材料强度明显下降，因此连续使用温度通常受到限制。

（二）TZM 的典型再结晶温度
由于 TiC 和 ZrC 颗粒持续钉扎晶界，TZM 的再结晶温度通常提高至约 1300~1500 °C。对于经过优化工艺制备的高品质 TZM，在特定条件下再结晶起始温度甚至可达到 1500 °C 以上。因此，相比纯钼，TZM 的再结晶温度一般提高约 200~400 °C。

（三）为什么不同文献数据存在差异？
国际公开资料中，TZM 再结晶温度通常报道为 1300~1500 °C，个别文献甚至超过 1600 °C。这种差异主要来源于试样状态和测试方法不同，包括冷加工变形量、加热速度、保温时间、

晶粒尺寸、杂质含量及第二相颗粒分布等因素。因此，再结晶温度并不是固定值，而是一个受工艺条件影响的范围。

（四）再结晶温度越高越好吗？

通常情况下，再结晶温度越高，说明材料组织越稳定，高温下保持强度和尺寸稳定性的能力越强。但如果通过过量添加强化相来提高再结晶温度，也可能降低材料塑性和加工性能。因此，高性能 TzM 更强调综合性能优化，而不是单纯追求最高再结晶温度。

（五）再结晶温度与使用温度的关系

需要注意，再结晶温度并不等于推荐使用温度。工程设计通常要求长期工作温度低于再结晶温度，以保证组织长期稳定。对于 TzM 而言，其长期连续使用温度一般控制在约 1200~1400 °C，短时间可承受更高温度，但具体仍取决于载荷、真空度及服役时间。

纯钼与 TzM 再结晶温度比较

材料	典型再结晶温度	长期组织稳定性
工业纯钼	900~1100 °C	一般
TzM	1300~1500 °C	优异
高品质 TzM	可达 1500 °C 以上（特定条件）	更优

再结晶温度是衡量 TzM 品质的重要指标之一，也是其区别于纯钼的核心优势。高再结晶温度意味着材料能够在更高温度下长期保持细小晶粒和稳定组织，从而获得更高的高温强度、更低的蠕变速率及更长的使用寿命。现代 TzM 的发展重点已经从单纯提高再结晶温度，逐步转向提高组织长期稳定性，使材料在数千小时甚至更长时间的高温服役过程中仍能保持稳定性能。

Q28 TzM 晶界强化机制是什么？

晶界强化（Grain Boundary Strengthening）是 TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最重要的高温强化机制之一，也是其能够长期保持优异组织稳定性的重要原因。对于高温材料而言，晶界往往是最容易发生变形和失效的区域，而 TzM 正是通过 TiC、ZrC 第二相颗粒持续稳定晶界，有效抑制晶界迁移和晶界滑移，从而显著提高高温性能。可以说，TzM 高温寿命的长短，很大程度上取决于晶界是否能够长期保持稳定。

（一）什么是晶界？

晶界是两个不同取向晶粒之间的界面。由于晶界内部原子排列较为紊乱，因此具有较高的自由能，也是高温扩散、晶粒长大、蠕变变形及裂纹萌生最容易发生的位置。因此，高温材料首先需要强化晶界，而不仅仅是强化晶粒内部。

（二）TiC、ZrC 钉扎晶界

TzM 中的 TiC 和 ZrC 颗粒大量分布于晶界附近。这些高熔点碳化物如同无数微小锚点，将晶界牢牢固定，使晶界难以迁移，从而有效抑制晶粒长大。这种作用通常称为晶界钉扎（Zener Pinning），也是 TzM 晶界强化最核心的机制。

（三）抑制晶界滑移

高温条件下，材料发生蠕变时，晶界会逐渐发生相对滑移。TiC 和 ZrC 颗粒能够显著降低晶界滑移速度，使高温塑性变形明显减缓，从而提高抗蠕变性能和长期尺寸稳定性。因此，晶界强化对于长期服役构件尤为重要。

（四）提高再结晶温度

再结晶本质上是晶界迁移形成新晶粒的过程。由于第二相颗粒持续阻碍晶界运动，TZM 需要更高温度才能完成再结晶，因此再结晶温度比纯钼提高约 200~400 °C。这也是 TZM 能够长期用于高温环境的重要原因之一。

（五）降低裂纹扩展速度

稳定的晶界还能有效分散应力，减少局部应力集中。当材料受到热循环或机械载荷作用时，裂纹不易沿晶界快速扩展，因此 TZM 具有更好的热疲劳性能和高温可靠性。

（六）ZrC 在晶界强化中的作用更加突出

虽然 TiC 和 ZrC 都参与晶界强化，但由于 ZrC 具有更高的熔点、更低的扩散速率和更优异的热稳定性，因此在长期高温服役过程中，对晶界稳定性的贡献通常比 TiC 更大。TiC 主要负责提高高温强度，ZrC 则更偏重于维持长期组织稳定，两者共同构成 TZM 完善的晶界强化体系。

钛锆钼合金（TZM）的晶界强化作用汇总

晶界强化作用	主要机制	对性能影响
晶界钉扎	TiC、ZrC 阻碍晶界迁移	提高再结晶温度
抑制晶粒长大	保持细晶组织	提高高温强度
降低晶界滑移	减缓高温蠕变	延长使用寿命
稳定组织	降低原子扩散速度	提高长期可靠性
抑制裂纹扩展	减少晶界应力集中	提高热疲劳性能

中钨智造认为，晶界强化是 TZM 区别于纯钼的重要优势之一，也是其长期服役性能优异的根本原因。现代 TZM 材料的发展方向，不仅是增加第二相颗粒数量，更重要的是优化其在晶界附近的尺寸、数量和分布,使晶界能够长期保持稳定而不过度粗化。随着先进粉末冶金、热等静压、快速烧结及组织调控技术的发展，未来 TZM 晶界强化将更加精准，这对于半导体热场、航空航天、聚变能源及先进真空装备等长期高温服役领域具有重要意义。

Q29 钛锆钼合金（TZM）的第二相如何抑制晶界迁移？

在 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）中，第二相颗粒主要指 TiC（碳化钛）和 ZrC（碳化锆）等高熔点碳化物。这些颗粒不仅是材料高温强化的核心,更是维持晶粒长期稳定、防止晶界迁移和晶粒粗化的关键因素。国际材料科学通常将这种作用称为 Zener Pinning（泽纳钉扎效应），它也是现代弥散强化高温合金最重要的理论基础之一。对于 TZM 而言，如果没有第二相颗粒持续稳定晶界，材料在长期高温下会迅速发生晶粒长大，再结晶加快，最终导致高温强度下降、蠕变速率增加和服役寿命缩短。

（一）钛锆钼合金（TZM）的晶界为什么会迁移？

晶界本质上是不同晶粒之间的界面，其原子排列较为紊乱，具有较高自由能。高温条件下，为了降低体系总能量，晶界会不断向前移动，使小晶粒逐渐消失，大晶粒不断长大，这就是晶粒长大（Grain Growth）现象。如果晶界不受限制，这一过程会持续进行。

（二）钛锆钼合金（TZM）的第二相颗粒形成机械阻挡

TZM 中的 TiC 和 ZrC 颗粒均匀分布于晶粒内部及晶界附近。当晶界移动时，必须绕过这些坚硬且热稳定的碳化物颗粒，而颗粒对晶界产生阻挡作用，使晶界迁移速度明显降低。颗粒数量越多、分布越均匀，这种阻碍作用通常越明显。

（三）钛锆钼合金（TZM）形成泽纳钉扎效应

当晶界与第二相颗粒接触时，会受到颗粒产生的反向约束力。只有当晶界迁移驱动力大于颗粒钉扎力时，晶界才能继续移动。因此，大量细小颗粒能够持续固定晶界位置，显著延缓晶粒长大。这就是经典的泽纳钉扎机制，也是 TZM 保持细晶组织的重要原因。

（四）提高再结晶温度

再结晶过程本质上也是晶界不断迁移形成新晶粒的过程。由于 TiC 和 ZrC 持续钉扎晶界，再结晶需要更高温度才能发生，因此 TZM 的再结晶温度通常比纯钼提高约 200~400 °C。

（五）保持长期组织稳定

高温设备往往需要连续工作数千小时甚至数万小时。如果第二相颗粒长期保持细小且稳定，晶界迁移速度始终受到抑制，材料组织变化缓慢，高温性能能够长期保持稳定。因此，第二相颗粒不仅影响初始性能，更决定长期服役可靠性。

（六）颗粒粗化后钉扎作用减弱

长期高温条件下，TiC 和 ZrC 颗粒会逐渐长大、聚集。随着颗粒数量减少、间距增大，晶界受到的约束力降低，迁移速度开始加快，晶粒迅速粗化，高温性能随之下降。因此，控制第二相颗粒长期稳定性，也是提高 TZM 寿命的重要方向。

钛锆钼合金（TZM）的第二相抑制晶界迁移过程

阶段	第二相状态	晶界行为	对性能影响
初始状态	颗粒细小、均匀	晶界受到有效钉扎	高温性能优异
长期服役	少量颗粒长大	晶界迁移缓慢	性能保持稳定
后期服役	颗粒明显粗化	晶界迁移加快	强度下降、蠕变增加
失效阶段	钉扎作用减弱	晶粒快速长大	材料寿命结束

中钨智造认为，第二相颗粒真正的重要作用并不仅仅是强化材料，而是长期稳定材料组织。TiC 和 ZrC 通过经典的泽纳钉扎效应持续抑制晶界迁移，使 TZM 能够长期保持细晶组织和优异的高温性能。当前国际先进 TZM 制造技术的竞争重点，已经从提高第二相数量转向提高第二相的热稳定性和空间分布均匀性，从而进一步延长材料在半导体热场、航空航天及先进能源装备中的服役寿命。

Q30 晶粒尺寸为何影响高温性能？

晶粒尺寸（Grain Size）是影响 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）综合性能的重要组织参数之一。即使化学成分完全相同，不同晶粒尺寸的 TZM，其高温强度、抗蠕变性能、热疲劳性能及使用寿命仍可能存在明显差异。因此，晶粒控制一直是国际高温材料研究的重要课题。总体而言，并不存在晶粒越细越好或越粗越好的绝对规律，而是需要根据实际服役条件进行优化设计。

（一）晶粒越细，室温强度通常越高

细晶材料具有更多晶界。晶界能够有效阻碍位错运动，因此材料的屈服强度、抗拉强度及硬度通常随晶粒细化而提高，这一规律可由经典的 Hall-Petch 关系描述。因此，细晶 TZM 通常具有较好的室温力学性能。

（二）高温性能并非完全依赖细晶

随着温度升高，晶界逐渐成为材料最容易发生扩散、滑移和蠕变的位置。晶界数量越多，高温扩散路径越多，因此在极高温长期服役条件下，过细晶粒反而可能加快晶界滑移，降低抗蠕变能力。因此，高温结构材料通常不会无限细化晶粒。

（三）粗晶粒有利于提高抗蠕变性能

较大的晶粒意味着晶界数量减少。晶界滑移和晶界扩散受到一定抑制，因此在 1200 °C 以上长期高温环境下，适当粗大的晶粒通常具有更好的抗蠕变性能和尺寸稳定性。这也是部分高温热场材料采用定向晶粒或粗晶组织的重要原因。

（四）晶粒过粗也存在不足

如果晶粒过于粗大，材料塑性下降，组织均匀性变差，热疲劳裂纹更容易萌生和扩展。此外，粗晶材料加工性能通常较差，不利于复杂零件制造。因此，晶粒过粗同样会影响材料综合性能。

（五）TZM 追求的是稳定晶粒

TZM 并非简单追求细晶或粗晶，而是依靠 TiC 和 ZrC 第二相颗粒长期稳定晶粒尺寸。这样既能保持较高强度，又能有效降低高温蠕变速率，实现强度、塑性和寿命之间的最佳平衡。

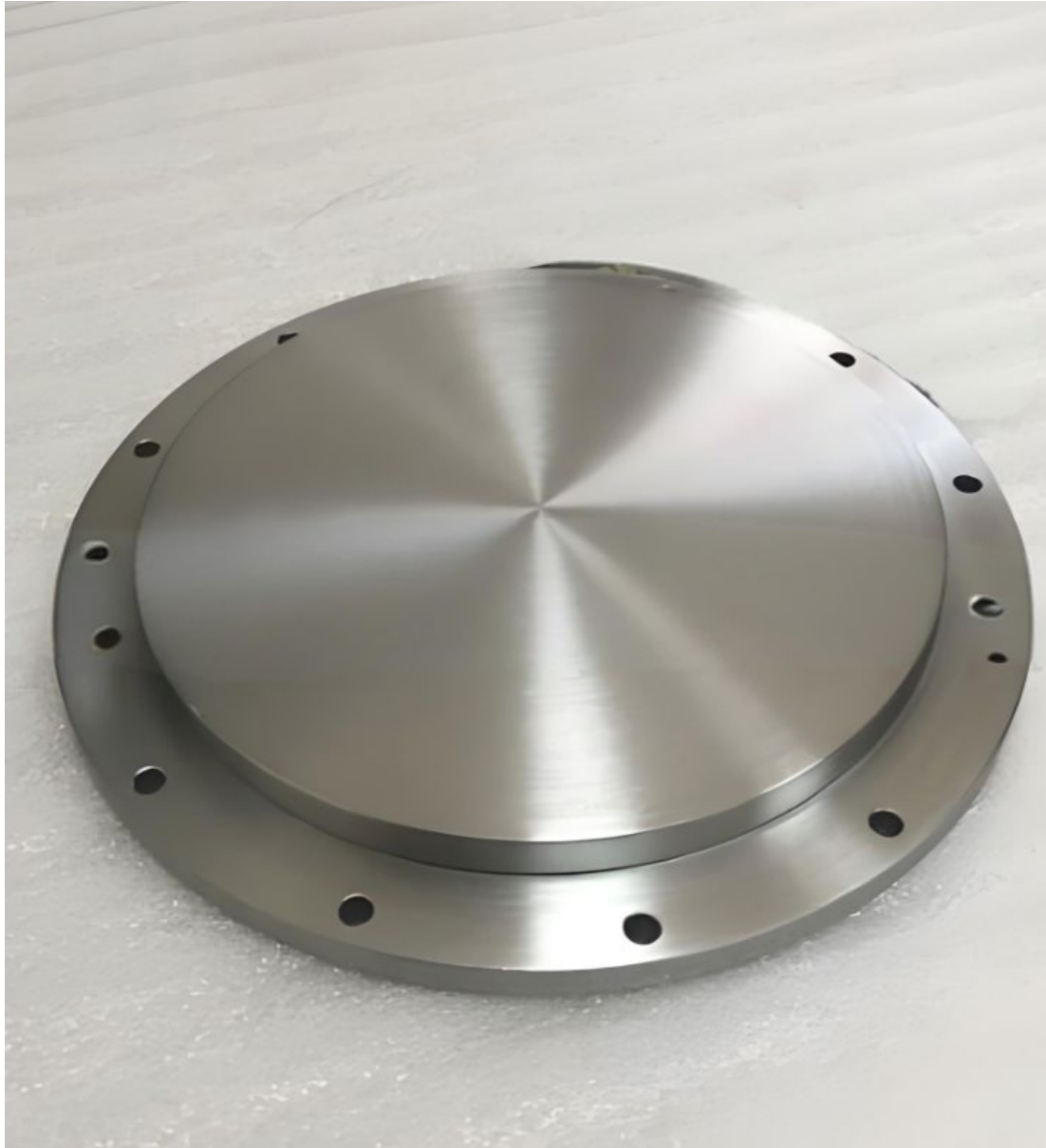
（六）现代 TZM 晶粒控制的发展方向

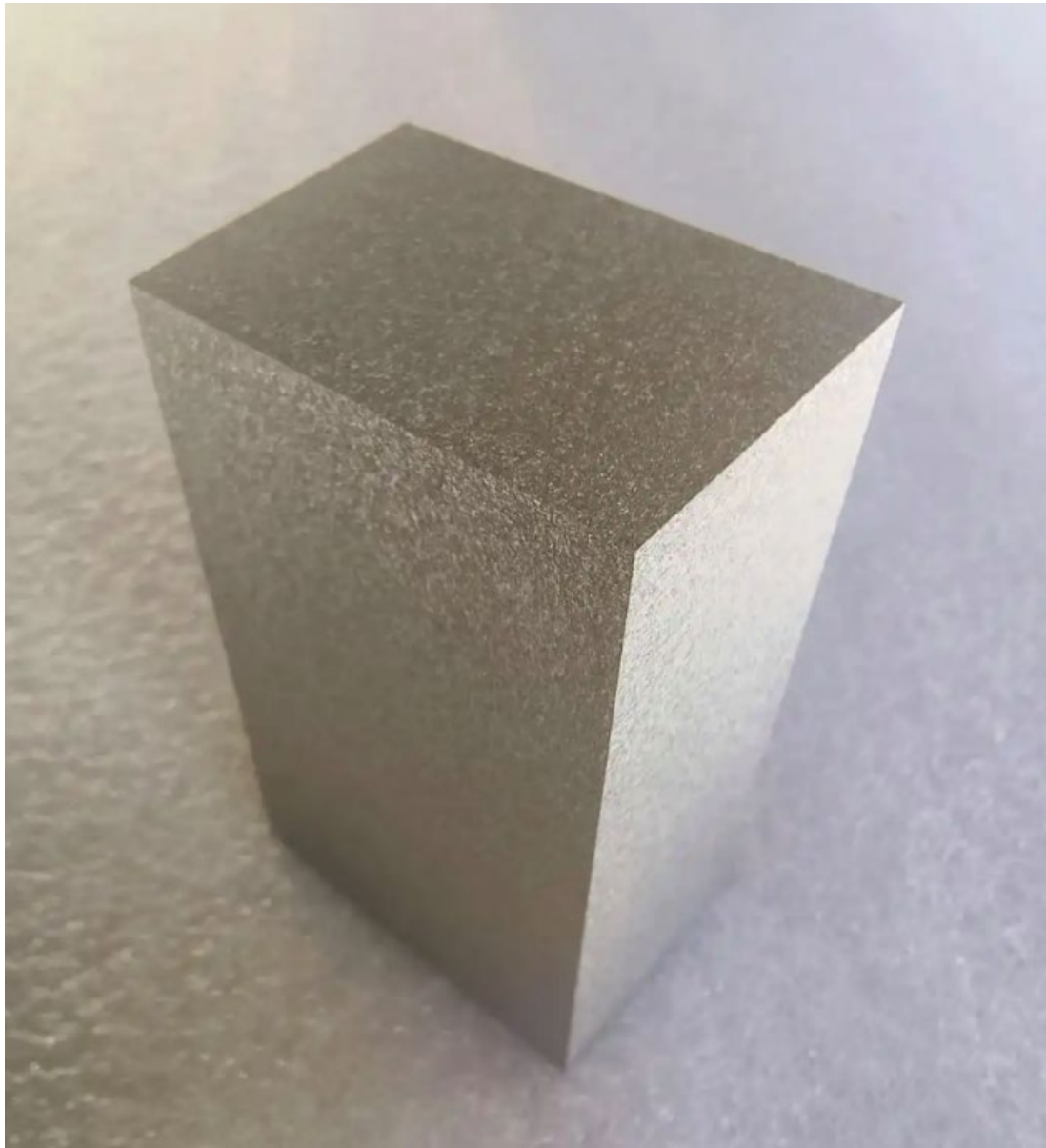
近年来，国际先进 TZM 制造企业更加重视晶粒尺寸及组织均匀性的精准控制。通过优化粉末粒径、热机械加工制度及热处理工艺，使晶粒尺寸保持适中且分布均匀，同时结合第二相颗粒稳定晶界，实现长期组织稳定和高温可靠性。

钛锆钼合金（TZM）的晶粒尺寸对性能的影响

晶粒状态	主要特点	对高温性能影响
细晶	强度高、塑性较好、晶界较多	室温性能优异，但长期高温蠕变可能增加
适中晶粒	强度、塑性及抗蠕变性能均衡	综合性能最佳
粗晶	晶界较少、扩散路径减少	抗蠕变性能较好，但塑性和抗热疲劳能力下降
晶粒粗化	再结晶明显、组织退化	高温强度下降，寿命缩短

中钨智造认为，晶粒尺寸是决定 **TZM** 长期高温性能的重要组织参数，但真正影响材料寿命的并不是晶粒尺寸本身，而是晶粒尺寸与第二相颗粒共同构成的稳定组织。现代 **TZM** 的发展目标已由单纯细化晶粒转向精准控制晶粒尺寸、晶界状态及第二相颗粒分布，实现组织长期稳定和综合性能最优。这也是国际高端 **TZM** 材料能够满足半导体热场、航空航天及先进真空装备长期服役要求的重要原因。





第四篇 钛锆钼合金（TZM）的制造工艺

Q31 钛锆钼合金（TZM）是如何生产的？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）属于典型的钼基难熔合金，由于钼熔点高达 2623 °C、高温活性强、塑性加工窗口窄，因此几乎不能采用普通铸造工艺生产。目前，全球工业化 TZM 几乎全部采用粉末冶金（Powder Metallurgy, PM）结合热机械加工工艺制造，这是国际公认最成熟、最可靠的生产路线。现代 TZM 生产工艺经过数十年的发展已较为成熟，但不同企业在粉末纯度、混料均匀性、烧结制度、热加工工艺及热处理技术等方面仍存在明显差异，因此产品性能也有所不同。

（一）高纯原料制备

TZM 生产首先采用高纯钼粉作为基体原料，同时加入规定比例的 Ti、Zr 及碳源。工业产品通常要求原料具有较低的氧、氮、碳、硫等杂质含量，以减少脆性相形成，提高高温性能和

加工性能。近年来，高端 TZM 已广泛采用超细钼粉及高纯合金粉，以进一步改善组织均匀性。

（二）粉末混合

将钼粉、钛粉、锆粉及碳源按照规定比例充分混合。现代企业通常采用高效混粉设备，使 Ti、Zr 及碳在钼粉中均匀分散，为后续形成均匀 TiC、ZrC 第二相创造条件。混料均匀性直接影响最终组织一致性。

（三）压制成形

混合后的粉末经过冷等静压（CIP）、模压或其他成形工艺压制成坯。此时坯体已具有一定机械强度，但内部仍存在较多孔隙，尚未形成真正致密组织。

（四）高温烧结

压坯随后进入高温真空烧结炉或氢气保护烧结炉。烧结过程中，粉末逐渐扩散结合形成连续钼基组织，同时 Ti、Zr 与 C 发生原位反应，形成 TiC、ZrC 第二相颗粒，这是 TZM 获得高温性能的关键阶段。近年来，部分高端产品还采用放电等离子烧结（SPS）等先进烧结技术，以获得更细小、更均匀的组织。

（五）热机械加工

烧结后的 TZM 通常还需经过锻造、轧制、旋锻、挤压等热加工。热机械加工能够进一步提高材料致密度，消除残余孔隙，细化晶粒，改善第二相颗粒分布，并提高综合力学性能。这一过程也是形成优良组织的重要工序。

（六）热处理与组织稳定化

根据产品用途，还需进行应力消除退火、组织均匀化处理或其他热处理。通过合理热处理，可进一步稳定 TiC、ZrC 颗粒，提高再结晶温度及长期高温稳定性。

（七）精密加工与质量检测

最终产品经过车削、磨削、线切割、EDM、电解加工等精密加工后，再进行尺寸、公差、密度、化学成分、组织、力学性能及无损检测。对于半导体、航空航天等高端用途，还需检测晶粒组织、第二相颗粒分布、氧氮含量及高温性能。

钛锆钼合金（TZM）的典型生产流程

工艺阶段	主要内容	主要目的
原料制备	高纯 Mo 粉、Ti 粉、Zr 粉及碳源	保证化学成分和纯度
粉末混合	均匀分散各组分	提高组织一致性
压制成形	模压或冷等静压	制备烧结坯体
高温烧结	真空或保护气氛烧结	实现致密化，形成 TiC、ZrC
热机械加工	锻造、轧制、旋锻、挤压	提高致密度、细化组织
热处理	消除应力、稳定组织	提高高温稳定性
精密加工	机械加工与检测	满足最终使用要求

中钨智造认为，TZM 虽然采用成熟的粉末冶金路线生产，但真正决定产品质量的并非工艺流

程本身，而是各工序之间的协同控制能力。国际先进企业普遍围绕高纯粉末制备、第二相颗粒调控、热机械加工及组织稳定化建立完整工艺体系，从而实现高密度、细晶粒、均匀弥散强化及优异的高温性能。未来，随着数字化工艺模拟、近净成形及增材制造等技术的发展，TZM 生产工艺将朝着更高一致性、更高效率和更复杂构件制造方向持续发展。

Q32 为什么钛锆钼合金（TZM）采用粉末冶金生产工艺？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）几乎全部采用粉末冶金（Powder Metallurgy，PM）生产，而不是传统铸造工艺。这并非工艺选择上的偶然，而是由钼及 TZM 材料本身的物理、化学和组织特性所决定。粉末冶金不仅能够解决钼熔点高、加工困难等问题，还能精确控制化学成分、第二相颗粒和微观组织，因此已成为全球 TZM 工业化生产的标准工艺路线。

（一）钼熔点极高，不适合普通铸造

钼的熔点高达 2623 °C，远高于普通钢铁及多数有色金属。如此高的熔炼温度不仅对熔炼设备提出极高要求，还容易引起严重蒸发、污染及成分波动，因此传统铸造难以实现稳定工业生产。粉末冶金则避免了整体熔化过程，更适合难熔金属制造。

（二）便于精确控制化学成分

TZM 中 Ti、Zr、C 含量都较低，其中 Zr 通常仅约 0.06%~0.12%。采用粉末混合法能够精确控制各元素比例，并保证成分均匀分布，而熔炼过程中则容易因偏析和烧损导致成分波动。

（三）有利于形成均匀第二相颗粒

TZM 性能主要依赖 TiC、ZrC 弥散强化。粉末冶金过程中，Ti、Zr 和 C 能够在烧结阶段原位生成细小、均匀分布的第二相颗粒，为获得优异高温性能提供基础。如果采用铸造工艺，第二相往往容易粗化、偏析，强化效果明显下降。

（四）能够获得高致密度组织

现代粉末冶金结合真空烧结、热等静压（HIP）及热机械加工，可使 TZM 材料达到很高的致密度，显著减少孔隙和内部缺陷，提高强度、导热性和可靠性。对于半导体和航空航天等领域，这一点尤为重要。

（五）组织更加均匀稳定

粉末冶金工艺可有效避免铸造组织中常见的枝晶偏析、缩孔、疏松和宏观偏析等缺陷，使 TZM 获得更加均匀的晶粒组织和第二相分布，从而提高材料批次一致性和长期稳定性。

（六）更适合难熔金属近净成形

粉末冶金能够直接制备棒材、板材、坯料及各种复杂预制件，材料利用率高，加工余量小，尤其适用于高价值钼基难熔合金。随着近净成形和增材制造的发展，粉末冶金的优势更加突出。

钛锆钼合金（TZM）的粉末冶金与传统铸造比较

对比项目	粉末冶金 TZM	传统铸造
熔炼要求	无需整体熔化	超高温熔炼困难

对比项目	粉末冶金 TZM	传统铸造
成分控制	精确、均匀	易烧损、易偏析
第二相形成	细小、均匀弥散	易粗化、偏聚
组织均匀性	优异	较差
致密度	高（结合 HIP 等工艺）	易出现缩孔、疏松
工业成熟度	全球主流工艺	基本不用于 TZM 工业生产

中钨智造认为，粉末冶金不仅是一种制造方法，更是 TZM 材料性能设计的重要组成部分。正因为采用粉末冶金工艺，TZM 才能实现微量元素的精准控制、TiC 和 ZrC 第二相的均匀形成以及稳定的细晶组织，这是传统铸造工艺难以达到的。当前国际高端 TZM 材料的发展重点，已经从传统粉末冶金进一步延伸至超细粉末、高能球磨、热等静压、放电等离子烧结（SPS）及增材制造等先进工艺，通过持续优化微观组织，不断提升 TZM 在半导体、航空航天、聚变能源及先进真空装备中的综合性能和长期服役可靠性。

Q33 TZM 粉末冶金生产工艺中原料纯度要求是多少？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的高温性能不仅取决于 Ti、Zr、C 三种强化元素的配比，更取决于原料粉末的纯度和杂质控制水平。由于 TZM 主要应用于半导体热场、航空航天、真空炉、核工业及高温模具等高端领域，任何微量杂质都可能降低材料的高温强度、塑性、抗蠕变性能及服役寿命。因此，国际先进企业普遍将高纯、低氧、低氮、低碳作为 TZM 原料控制的首要目标。

（一）钼粉纯度要求最高

钼粉是 TZM 的主体材料，其质量直接决定最终产品性能。工业生产通常采用纯度≥99.9%的高纯钼粉，高端 TZM 则普遍采用 99.95%以上，部分半导体及航空航天产品甚至采用 99.97%~99.99%的超高纯钼粉。研究表明，费氏粒径约 2.0~3.5 μm、纯度约 99.95%的钼粉，更有利于获得高强度 TZM 烧结组织。

（二）Ti、Zr 通常采用氢化物粉末

现代 TZM 生产中，Ti 和 Zr 多数并非直接加入金属粉，而是采用 TiH₂、ZrH₂粉末。这是因为氢化物粉末在烧结过程中脱氢后活性更高，更容易均匀扩散进入钼基体，同时还能降低氧污染风险，提高第二相形成效率。工业研究中常采用纯度约 99%的 TiH₂、ZrH₂，高端产品则进一步提高纯度。

（三）碳源纯度要求严格

碳通常采用高纯石墨粉、有机碳源或液态有机碳源加入。近年来，越来越多企业采用硬脂酸、果糖等液态有机碳源，通过固液混粉方式加入碳，以提高混合均匀性并减少局部碳偏析，从而获得更加均匀的 TiC、ZrC 第二相。

（四）氧、氮等杂质必须严格控制

氧是 TZM 最重要的有害杂质之一。氧含量升高容易生成氧化物夹杂，降低塑性，增加脆性，并削弱第二相强化效果；氮、硫、磷等杂质同样会降低高温性能和加工性能。因此，现代 TZM 生产全过程均尽量避免粉末氧化，并采用真空或氢气保护工艺。近年来，低氧 TZM 已成为

国际研究热点。

（五）粉末粒度同样重要

除纯度外，粒径分布也直接影响烧结性能。钼粉粒径过大，不利于烧结致密化；粒径过小，则容易团聚并增加氧含量。因此，工业 TZM 通常采用细而均匀的粉末，并严格控制粒径分布。

钛锆钼合金（TZM）的原料典型要求

原料	典型要求	主要目的
Mo 粉	≥99.9%，高端 99.95%-99.99%，费氏粒径 2.0-3.5 μm	保证基体纯度和烧结性能
TiH ₂ 粉	通常≥99%	提供 Ti，形成 TiC 强化相
ZrH ₂ 粉	通常≥99%	提供 Zr，形成 ZrC 强化相
碳源	高纯石墨或有机碳源	控制 TiC、ZrC 形成
氧、氮等杂质	越低越好	提高塑性和高温性能

中钨智造认为，高品质 TZM 首先来自高品质原料。随着半导体热场、聚变能源和航空航天等领域对材料可靠性的要求不断提高，TZM 原料控制重点已经从单纯提高金属纯度，发展到全过程控制氧、氮等杂质以及粉末粒径、粒形和分布均匀性。未来，超高纯粉末、低氧粉末及精准成分控制将继续成为高端 TZM 制造的重要发展方向。

Q34 TZM 粉末冶金生产工艺中如何混粉？

混粉（Powder Mixing）是 TZM 粉末冶金生产过程中最关键的工序之一，其目的并不仅仅是将几种粉末简单混合，而是使 Ti、Zr、C 等微量元素在钼粉中实现均匀、稳定、可控的分散，为后续形成细小均匀的 TiC、ZrC 第二相创造条件。大量研究表明，即使化学成分完全相同，如果混粉质量不同，最终 TZM 的组织均匀性、高温强度、抗蠕变性能及服役寿命仍可能存在明显差异。

（一）按设计成分精确配料

混粉前首先根据 TZM 标准成分准确称量各原料。现代企业通常采用高精度电子计量设备，确保 Ti、Zr 及碳含量控制在规定范围内，避免因配料误差导致第二相数量不足或过量。

（二）采用 TiH₂、ZrH₂作为添加剂

工业生产中，Ti 和 Zr 一般采用 TiH₂、ZrH₂粉末加入，而不是直接使用金属 Ti、Zr 粉末。氢化物粉末具有更好的分散性和反应活性，烧结过程中脱氢后可更加均匀地参与 TiC、ZrC 形成。

（三）采用机械混粉或高能球磨

传统 TZM 一般采用 V 型混料机、双锥混料机等低能混粉设备，使各种粉末充分混合而不过度破碎。对于高性能 TZM，则越来越多采用高能球磨，通过反复碰撞进一步细化粉末、提高混合均匀性，并促进元素均匀分布。

（四）采用固液混粉提高均匀性

近年来，固液混粉已成为高端 TZM 的重要工艺。例如，将硬脂酸、果糖等有机碳源溶于无水乙醇，再均匀加入混合粉末中，使碳元素以分子尺度分散；部分工艺还采用硝酸盐前驱体

加入合金元素，提高混合均匀性。相比直接加入石墨粉，固液混粉更有利于形成均匀细小的第二相颗粒。

（五）避免混粉过程氧化

混粉过程中粉末比表面积大，极易吸附氧和水分。因此，工业生产通常采用无水乙醇作为混合介质，并控制环境湿度；高端产品则在真空或保护气氛下混粉，甚至将混粉容器内氧含量控制至 100 ppm 以下，以降低氧污染。

（六）混粉后进行质量检测

完成混粉后，通常需要检测粉末流动性、松装密度、粒径分布、氧含量及混合均匀性。只有达到工艺要求后，粉末才能进入压制和烧结工序。

钛锆钼合金（TZM）的混粉工艺流程

工艺步骤	主要内容	控制重点
精确配料	称量 Mo、TiH ₂ 、ZrH ₂ 及碳源	成分准确
初步混合	机械混粉	防止偏析
强化混合	球磨或固液混粉	提高均匀性
防氧化处理	无水乙醇、保护气氛或低氧环境	控制氧污染
粉末检测	粒径、氧含量、均匀性等	保证烧结质量

中钨智造根据实践经验，总结认为，混粉质量决定了 TZM 微观组织的起点，也是影响最终性能的关键环节。现代高端 TZM 制造已经从传统机械混粉发展到固液混粉、高能球磨及低氧环境混粉等先进工艺，其核心目标是在微观尺度实现 Ti、Zr 和 C 的均匀分布，为形成细小、均匀且热稳定的 TiC、ZrC 第二相奠定基础。未来，随着数字化粉体工程、智能混粉及在线质量监测技术的发展，TZM 混粉工艺将进一步向高均匀性、高一致性和高洁净化方向发展。

Q35 TZM 粉末冶金生产工艺中如何压制？

压制（Compaction）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）粉末冶金生产中的关键成形工序，其主要作用是将均匀混合后的钼基合金粉末压制成具有一定强度和几何尺寸的生坯（Green Compact），为后续高温烧结创造条件。压制质量直接影响烧结收缩均匀性、材料致密度、晶粒组织及最终力学性能。如果压制密度分布不均，烧结过程中容易产生变形、开裂、残余孔隙及组织不均匀等缺陷，因此压制工艺是 TZM 制造的重要控制环节。

（一）压制目的

TZM 压制并不是简单提高密度，而是实现粉末颗粒之间的紧密接触。通过施加高压，使粉末获得足够的机械结合力，形成具有一定搬运强度的压坯，同时尽可能保证密度均匀，为烧结扩散提供良好的初始组织。

（二）常用压制方法

目前工业生产主要采用模具冷压（Die Pressing）和冷等静压（Cold Isostatic Pressing, CIP）两种方式。对于棒材、板材及规则零件，多采用机械模压；对于大型坯料、厚壁制品及高性能 TZM，则更多采用冷等静压，使粉末各方向同时受压，提高密度均匀性，减少内部密度梯

度。近年来，一些高端产品还采用模压与 CIP 相结合的复合压制工艺。

（三）压制压力控制

TZM 压制压力通常根据粉末粒度、形状及产品尺寸确定。工业生产中，模压压力一般约为 200~600 MPa，冷等静压压力通常约为 200~400 MPa。压力过低，压坯强度不足，烧结后孔隙较多；压力过高，则容易产生粉末分层、模具磨损加剧甚至压坯开裂，因此需要合理控制。

（四）压坯密度要求

压制后的 TZM 生坯通常仅达到理论密度的约 55%~70%。虽然此时仍保留一定孔隙，但已经具备较好的尺寸稳定性和搬运强度，后续烧结过程中将通过原子扩散进一步实现致密化。高端 TZM 产品通常要求压坯密度更加均匀，以减少烧结变形。

（五）影响压制质量的因素

压制质量主要受粉末粒度、粒形、混粉均匀性、润滑剂种类、压制速度、保压时间及模具设计等因素影响。其中，粉末流动性和粒径分布尤为重要，均匀细小的粉末通常能够获得更高、更均匀的压坯密度。

（六）压制后的检测

压坯完成后，通常需要检测尺寸、公差、密度、裂纹、边角完整性及内部均匀性。对于大型高端 TZM 坯料，还可能采用超声波或 X 射线检测，以确保不存在明显分层或裂纹。

钛锆钼合金（TZM）的压制工艺特点

工艺项目	典型要求	主要目的
压制方式	模压、冷等静压（CIP）	获得均匀生坯
模压压力	约 200~600 MPa	提高压坯强度
CIP 压力	约 200~400 MPa	提高密度均匀性
生坯密度	理论密度约 55%~70%	满足烧结要求
质量控制	密度、尺寸、裂纹、完整性	保证烧结质量

中钨智造认为，压制虽然只是 TZM 粉末冶金中的一道成形工序，但其对最终产品质量具有基础性影响。现代高性能 TZM 越来越重视压坯密度均匀性，而不仅仅追求更高压制密度。冷等静压、复合压制及数字化压力控制等先进技术，正在不断提升 TZM 压坯质量，为后续烧结获得高致密、低缺陷及均匀组织奠定基础。

Q36 TZM 粉末冶金生产工艺中如何烧结？

烧结（Sintering）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）粉末冶金生产过程中最核心的工序，也是决定材料最终组织和性能的关键环节。烧结不仅完成粉末颗粒之间的扩散结合，实现材料致密化，同时也是 TiC、ZrC 第二相原位生成的重要阶段。现代 TZM 几乎全部采用高温真空烧结或高纯氢气保护烧结工艺，部分高端产品还采用热等静压（HIP）、放电等离子烧结（SPS）等先进烧结技术，以进一步提高组织均匀性和材料性能。 [\(sciencedirect.com\)](https://www.sciencedirect.com)

（一）烧结目的

TZM 烧结主要完成三个任务：使粉末颗粒通过原子扩散结合形成连续金属基体、消除压坯内部孔隙并提高致密度、促使 Ti、Zr 与 C 发生原位反应生成细小均匀的 TiC、ZrC 强化相。因此，烧结不仅决定材料密度，也决定微观组织。

（二）烧结气氛

由于钼在高温下极易氧化，因此 TZM 通常采用高真空烧结或高纯氢气保护烧结。真空环境有利于脱除氧、氮等杂质，提高材料纯度；氢气烧结则具有一定还原作用，可进一步降低氧含量。现代高端 TZM 通常采用高真空烧结，以获得更低杂质水平。

（三）烧结温度

TZM 烧结温度通常约为 1800~2200 °C。烧结温度必须足够高，以促进钼颗粒之间充分扩散和结合，但又不能过高，否则容易导致晶粒异常长大和第二相颗粒粗化。因此，各企业通常根据粉末粒径、产品规格及后续加工工艺优化烧结制度。

（四）烧结保温

达到烧结温度后，还需保持一定保温时间，使扩散过程充分完成。保温时间过短，材料内部残余孔隙较多；保温时间过长，则可能引起晶粒粗化和强化相长大，降低综合性能。现代 TZM 生产通常通过大量工艺试验确定最佳烧结时间。

（五）第二相原位形成

烧结过程中，Ti 和 Zr 逐渐与碳发生反应，形成 TiC 和 ZrC 第二相颗粒。由于这一过程发生于烧结内部，因此称为原位生成（In-situ Formation）。这种形成方式能够获得更加细小、均匀且结合牢固的强化相，是 TZM 优异高温性能的重要基础。

（六）先进烧结技术

近年来，为进一步提高 TZM 性能，国际先进企业开始采用热等静压（HIP）和放电等离子烧结（SPS）。HIP 能够在高温高压下进一步消除残余孔隙，提高致密度；SPS 则利用脉冲电流实现快速烧结，可有效抑制晶粒长大，获得更加细小均匀的组织。目前，这些工艺主要用于高端半导体、航空航天及科研用途。

钛锆钼合金（TZM）的烧结工艺特点

工艺项目	典型要求	主要作用
烧结气氛	高真空或高纯氢气	防止氧化、降低杂质
烧结温度	约 1800~2200 °C	实现扩散结合
保温制度	根据产品优化	提高致密度、控制组织
第二相形成	Ti、Zr 与 C 原位生成 TiC、ZrC	获得弥散强化
先进工艺	HIP、SPS 等	提高致密度和组织均匀性

在中钨智造的钛锆钼合金制品的设计和生产中，烧结是 TZM 制造过程中决定组织演化和最终性能的核心工序。现代 TZM 的发展重点已经从传统烧结向精准烧结控制转变，即通过优化烧结温度、保温制度、真空水平及后续 HIP、SPS 等先进工艺，实现第二相颗粒细化、晶粒稳定和高致密化。未来，智能烧结控制、快速烧结及数字化工艺模拟将成为 TZM 高端制

造的重要发展方向，为半导体热场、聚变能源、航空航天及先进真空装备提供更加稳定可靠的高性能材料。

Q37 钛锆钼合金（TZM）的粉末冶金生产工艺中如何进行热等静压（HIP）的？

热等静压（Hot Isostatic Pressing, HIP）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）粉末冶金生产中的重要致密化工艺。它是在高温、高压惰性气体环境下，使材料各个方向同时受到均匀压力，从而消除残余孔隙、提高致密度、改善组织均匀性和增强力学性能。对于普通工业 TZM，经过常规烧结和热加工即可满足大多数应用要求；而对于半导体热场、航空航天、核工业及高端科研装备等领域，高品质 TZM 通常会增加 HIP 工艺，以进一步提高材料可靠性和长期服役性能。

（一）热等静压（HIP）的基本原理

HIP 是在密闭压力容器内，将 TZM 坯料置于高温环境，并利用高压氩气等惰性气体从各个方向均匀施压。在温度和压力共同作用下，材料内部孔隙逐渐闭合，粉末颗粒进一步扩散结合，最终获得接近理论密度的组织。由于压力来自各个方向，因此称为等静压。

（二）HIP 通常在烧结之后进行

对于 TZM 而言，HIP 一般不是替代烧结，而是作为烧结后的强化工艺。烧结完成后，材料虽然已基本致密，但内部仍可能存在少量微孔和微裂纹。HIP 能够进一步消除这些缺陷，提高材料整体致密性和组织均匀性。部分先进工艺也可采用 HIP 与烧结相结合的路线，但工业应用仍以烧结后 HIP 最为普遍。

（三）HIP 工艺参数

TZM 的 HIP 工艺参数因厂家和产品用途不同而有所差异。工业生产通常采用约 1700~2000 °C 的处理温度、100~200 MPa 的气体压力，保温数小时，使内部孔隙充分闭合。具体制度属于各企业的重要工艺技术，一般不会公开。

（四）HIP 对组织的改善作用

HIP 不仅提高致密度，还能明显改善材料内部组织。通过高温高压共同作用，可减少残余孔隙和微裂纹，使晶粒组织更加均匀，并改善 TiC、ZrC 第二相与钼基体之间的结合状态，从而提高材料整体性能。

（五）HIP 对性能的提升

经过 HIP 处理后，TZM 通常具有更高的密度、更好的高温强度、更低的蠕变速率、更优异的疲劳性能及更高的断裂可靠性。对于长期工作于 1200 °C 以上的高温构件，这种提升尤为明显。

（六）HIP 并非所有 TZM 产品都需要

由于 HIP 设备投资大、生产成本低，因此并非所有 TZM 产品都会采用该工艺。一般工业真空炉部件、普通模具等产品，多采用常规粉末冶金即可；而高端半导体热场、电子束蒸发源、高温结构件等，则更倾向采用 HIP 工艺。

热等静压（HIP）对钛锆钼合金（TZM）的性能的影响

项目	常规烧结 TZM	HIP 处理 TZM
致密度	较高	更接近理论密度
残余孔隙	少量存在	基本消除
组织均匀性	良好	更优
高温蠕变性能	优良	更优
疲劳寿命	较高	明显提高
制造成本	较低	较高

中钨智造认为,HIP 并不是 TZM 生产的必需工艺,而是高端 TZM 制造的重要性能提升技术。对于要求极高可靠性和长期高温稳定性的应用,HIP 能够进一步提高材料致密度,降低内部缺陷,延长服役寿命。随着半导体、聚变能源及航空航天产业的发展,HIP 已成为国际高端 TZM 制造的重要组成部分,也是衡量高品质 TZM 制造能力的重要标志之一。

Q38 钛锆钼合金（TZM）的粉末冶金生产工艺中如何锻造？

锻造（Forging）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）粉末冶金生产中最重要 的热机械加工工艺之一。经过烧结后的 TZM 虽然已经形成整体组织，但内部仍可能存在少量残余孔隙，晶粒尺寸也尚未达到最佳状态。因此，需要通过高温锻造进一步提高致密度、细化组织、优化第二相分布，并改善材料综合性能。对于工业 TZM 而言，锻造几乎是制造棒材、板材、圆盘及大型坯料不可缺少的重要工序。

（一）为什么 TZM 必须热锻？

钛锆钼合金（TZM）属于典型难熔合金。室温塑性较低，如果直接冷锻，很容易发生开裂，因此必须在高温条件下进行塑性加工。高温锻造不仅能够降低变形抗力，还能促进组织均匀化，提高后续加工性能。

（二）锻造通常在烧结之后进行

工业生产中，TZM 一般先完成烧结或 HIP，再进行热锻。烧结获得初始致密组织，锻造进一步压实材料，改善晶粒形貌，并提高组织均匀性。部分产品随后还会继续进行轧制、旋锻或挤压加工。

（三）锻造温度控制十分关键

TZM 热锻通常在约 1200~1600 ℃范围内进行。温度过低，材料塑性不足，容易产生裂纹；温度过高，则可能导致晶粒粗化和第二相颗粒长大，削弱强化效果。因此，各厂家都会根据产品规格制定相应的锻造制度。

（四）采用多道次渐进锻造

TZM 一般不会一次完成大变形，而是采用多道次、小变形量逐步锻造。每道次之间可适当重新加热，使材料始终保持良好的塑性状态，避免因一次变形过大而产生裂纹。这种渐进式工艺也是 TZM 获得优良组织的重要保证。

（五）锻造对组织的改善作用

热锻能够压闭残余孔隙，使组织更加致密；同时拉长并细化晶粒，改善晶粒取向，提高第二相颗粒分布均匀性，使 TiC、ZrC 强化作用更加充分。经过合理锻造后，TZM 通常具有更高的高温强度和更好的抗蠕变性能。

（六）锻后通常还需热处理

锻造完成后，TZM 一般还需进行应力消除退火或组织均匀化热处理。这样可以消除加工残余应力，稳定第二相颗粒，进一步提高材料长期服役可靠性。

钛锆钼合金（TZM）的锻造工艺特点

工艺项目	典型要求	主要作用
锻造方式	热锻、多道次锻造	提高塑性加工能力
锻造温度	约 1200~1600 °C	降低变形抗力
加工方式	小变形、多火次加工	防止开裂
组织改善	消除孔隙、细化晶粒、均匀第二相	提高综合性能
后续工艺	退火、轧制、旋锻等	稳定组织、改善性能

中钨智造的实践证明，锻造不仅是 TZM 的塑性加工过程，更是组织优化过程。高品质 TZM 的性能，很大程度上取决于热锻过程中晶粒、织构及 TiC、ZrC 第二相颗粒的协同演化。现代 TZM 制造越来越强调热机械加工一体化设计，即将烧结、HIP、锻造、轧制和热处理作为连续工艺进行优化，以获得细小均匀、长期稳定的组织结构。这也是国际高端 TZM 产品能够长期应用于半导体热场、航空航天和先进能源装备的重要技术基础。

Q39 钛锆钼合金（TZM）的粉末冶金生产工艺中如何轧制？

轧制（Rolling）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）粉末冶金生产中最重要 的热机械加工工艺之一，也是制造 TZM 板材、薄板、箔材及部分棒材、带材的核心工序。经过烧结、HIP 或锻造后的 TZM 坯料，通过热轧或温轧进一步塑性变形，可显著提高材料致密度、细化晶粒、优化织构，并改善 TiC、ZrC 第二相颗粒的分布，从而全面提升综合性能。国际主流 TZM 生产企业几乎都将轧制作为获得高性能产品的重要组织调控手段。

（一）为什么 TZM 需要轧制？

烧结后的 TZM 虽然已经形成整体组织，但晶粒尺寸、孔隙分布及组织均匀性仍有进一步优化空间。轧制能够使材料发生塑性流动，压实内部组织，减少残余孔隙，并使晶粒得到细化或形成合理织构，提高高温强度、抗蠕变性能及加工性能。对于高品质 TZM 而言，轧制不仅是尺寸加工过程，更是组织优化过程。

（二）TZM 通常采用热轧

由于 TZM 室温塑性较低，因此工业生产通常采用热轧或温轧，而很少直接冷轧。轧制一般在约 1000~1500 °C 范围内进行，使材料保持较好的塑性，降低轧制力，避免边裂、横裂及脆性断裂。对于部分超薄产品，可在热轧基础上进行少量冷轧，再配合中间退火完成最终加工。

（三）采用多道次逐步轧制

TZM 轧制通常采用多道次、小压下率加工，而不是一次完成大变形。每完成若干道次后，根据材料状态进行重新加热，再继续轧制，以保证塑性并防止加工裂纹产生。随着厚度不断减小，轧制精度和温度控制要求也越来越高。

（四）轧制改善晶粒组织

轧制过程中，大量塑性变形使晶粒发生拉长和细化，并形成一定取向织构。随后通过合理退火，可获得细小均匀的再结晶组织，提高材料强度、塑性及尺寸稳定性。同时，TiC 和 ZrC 第二相颗粒在轧制过程中进一步均匀分散，对晶界产生更有效的钉扎作用。

（五）轧制提高尺寸精度和表面质量

轧制不仅改善内部组织，也显著提高板材厚度一致性、平整度及表面质量。经过精密热轧和后续磨削处理，TZM 可满足半导体热场、电子器件及真空设备对尺寸精度和表面质量的严格要求。

（六）轧后通常需要退火

由于轧制会产生大量加工硬化和残余应力，因此 TZM 轧后通常需进行应力消除退火或再结晶退火。合理退火能够恢复塑性，稳定组织，为后续机械加工或最终使用创造条件。

钛锆钼合金（TZM）的轧制工艺特点

工艺项目	典型要求	主要作用
轧制方式	热轧、温轧，部分产品辅以冷轧	保证塑性加工
轧制温度	约 1000~1500 °C	防止脆裂
轧制制度	多道次、小压下率	提高组织均匀性
组织改善	细化晶粒、优化织构、均匀第二相	提高综合性能
后续处理	应力消除退火、再结晶退火	恢复塑性、稳定组织

在中钨智造生产 TZM 的实践中，轧制是 TZM 组织调控的重要环节，其作用远不只是改变产品尺寸，更重要的是改善微观组织和提升综合性能。现代高端 TZM 生产越来越重视轧制温度、压下率、道次安排及轧后热处理的协同优化，以实现晶粒尺寸、织构及第二相颗粒分布的精准控制。未来，随着智能轧制和在线组织监测技术的发展，TZM 轧制工艺将进一步向高精度、高一致性和高性能方向发展。

Q40 TZM 粉末冶金生产工艺中如何消除残余应力？

残余应力（Residual Stress）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）在烧结、HIP、锻造、轧制、机加工及焊接等过程中不可避免产生的内部应力。如果残余应力不能及时消除，不仅容易引起工件变形、尺寸变化和加工开裂，还可能降低材料的高温稳定性、热疲劳性能及服役寿命。因此，对于高品质 TZM 产品，消除残余应力是整个制造工艺中不可缺少的重要环节。

（一）残余应力从何而来？

TZM 在热加工过程中，由于各部位变形程度、冷却速度及温度分布不同，会形成复杂的内部应力。此外，机械加工去除材料后，原有应力重新分布，也会导致工件翘曲或尺寸变化。对

于大型板材、真空炉部件及半导体热场零件，这种影响更加明显。

（二）应力消除退火是最常用方法

工业生产中，TZM 通常采用应力消除退火（Stress Relief Annealing）来降低内部残余应力。退火一般在真空炉或高纯氢气保护炉中进行，加热至低于再结晶温度的适当温度，并保温一定时间，使材料内部应力逐步释放，而不会引起明显晶粒长大。这是目前应用最广泛、最成熟的方法。

（三）严格控制升温 and 冷却速度

应力消除不仅取决于退火温度，还与升温和冷却制度密切相关。升温过快容易产生新的温差应力，冷却过快则可能再次形成残余应力。因此，高端 TZM 通常采用缓慢升温、均匀保温及受控冷却工艺，以保证组织稳定。

（四）避免超过再结晶温度

应力消除退火的目的只是释放残余应力，而不是改变组织。如果退火温度过高，超过 TZM 再结晶温度，就可能导致晶粒明显长大，降低高温强度和抗蠕变性能。因此，应力消除退火通常控制在再结晶温度以下进行。

（五）大型零件可能进行多次退火

对于大型热场构件、厚板及复杂零件，往往需要在锻造、轧制、粗加工及精加工等多个阶段分别进行应力消除退火。这样可以逐步释放加工应力，提高尺寸稳定性，减少后续变形。

（六）最终检测尺寸稳定性

完成退火后，还需检测工件尺寸、公差、平直度及必要的残余应力状态。对于高精度半导体热场零件，还可能结合精密测量和无损检测，确保长期使用过程中具有良好的尺寸稳定性。

钛锆钼合金（TZM）的残余应力消除工艺

工艺项目	主要内容	主要目的
应力来源	烧结、HIP、锻造、轧制、机加工等	形成内部应力
消除方法	真空或保护气氛退火	释放残余应力
工艺控制	缓慢升温、均匀保温、受控冷却	防止产生新应力
温度要求	低于再结晶温度	保持组织稳定
适用阶段	粗加工后、精加工后或最终热处理	提高尺寸稳定性

中钨智造认为，残余应力控制是高品质 TZM 制造的重要组成部分，也是保证大型、高精度 TZM 零件长期稳定服役的重要技术措施。现代 TZM 制造已不仅关注材料本身的强度和组织，更重视全过程应力管理，通过合理安排锻造、轧制、热处理及机械加工工艺，实现组织稳定、尺寸稳定和性能稳定的统一。未来，结合数值模拟、在线温度控制及残余应力检测技术，TZM 应力控制将向更加精准和智能化方向发展。



第五篇 钛锆钼合金（TZM）的热处理

Q41 钛锆钼合金（TZM）是如何退火？

退火（Annealing）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）生产过程中最重要的热处理工艺之一，其主要作用是消除加工残余应力、恢复塑性、稳定组织、改善加工性能，并根据不同工艺目的控制再结晶行为。由于 TZM 属于典型的难熔金属高温合金，其退火工艺

与普通钢材和有色金属存在明显区别,对温度、气氛及保温制度均有较高要求。工业生产中,TZM 通常在烧结、锻造、轧制、旋锻及机械加工之后安排相应的退火工艺,不同产品所采用的退火制度也有所不同。

（一）钛锆钼合金（TZM）退火的主要目的

TZM 退火并不是简单加热,而是根据不同加工阶段达到不同目的。常见目的包括消除加工残余应力、恢复塑性、降低加工硬化、稳定第二相颗粒、改善组织均匀性,以及为后续锻造、轧制或精加工创造良好的组织条件。对于最终产品,还可提高长期尺寸稳定性和高温服役可靠性。

（二）钛锆钼合金（TZM）通常采用真空退火

由于钼在高温下极易氧化,因此 TZM 几乎全部采用高真空退火或高纯氢气保护退火。其中,高真空退火应用最广,可有效防止表面氧化,降低氧污染,保持材料纯净表面和优良组织。对于半导体及航空航天产品,高真空退火几乎成为标准工艺。

（三）采用缓慢升温

TZM 导热性能较高,但大型工件内部仍可能形成温差。因此退火一般采用缓慢升温,使工件整体温度均匀上升,避免因温度梯度过大而产生新的热应力或局部组织变化。

（四）合理保温

达到退火温度后,需要保持一定时间,使内部组织充分稳定。保温时间主要与工件尺寸、厚度及加工状态有关。尺寸较大的工件通常需要更长保温时间,以保证整个截面温度均匀一致。

（五）受控冷却

退火完成后,一般采用炉冷或缓冷方式。过快冷却可能重新产生热应力,而均匀缓慢冷却能够保持组织稳定,并减少后续加工变形。对于高精度 TZM 产品,冷却制度同样属于重要工艺控制内容。

（六）根据用途选择不同退火制度

TZM 退火通常可分为应力消除退火、中间退火及再结晶退火。应力消除退火主要释放残余应力;中间退火用于恢复塑性,便于继续加工;再结晶退火则主要用于获得新的均匀晶粒组织,但必须严格控制温度,避免晶粒异常长大。

钛锆钼合金（TZM）的常见退火类型

退火类型	主要目的	应用阶段
应力消除退火	消除残余应力、稳定尺寸	锻造、轧制、机械加工后
中间退火	恢复塑性、降低加工硬化	多道次加工之间
再结晶退火	获得均匀组织	最终组织调整
真空退火	防止氧化、保持纯净	高端 TZM 产品普遍采用

中钨智造的生产实践表明,退火是 TZM 组织控制的重要环节,其作用不仅是释放应力,更重要的是建立稳定的微观组织。现代高品质 TZM 越来越强调退火制度与锻造、轧制、HIP 等工艺的整体匹配,通过精准控制升温速度、保温时间及冷却制度,实现晶粒、第二相颗粒及残余应力的协同优化,从而获得更加稳定的高温性能和更长的服役寿命。

Q42 钛锆钼合金（TZM）的应力消除退火温度是多少？

应力消除退火（Stress Relief Annealing）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最常采用的热处理工艺之一，其主要作用是在不发生明显再结晶的条件下，释放加工过程中产生的残余应力，提高尺寸稳定性，并保持原有强化组织。对于 TZM 而言，应力消除退火温度必须严格控制在再结晶温度以下，否则容易导致晶粒长大和第二相强化作用减弱，从而降低高温性能。

（一）钛锆钼合金（TZM）的典型退火温度范围

工业生产中，TZM 应力消除退火通常控制在约 900~1200 °C 范围内。对于大多数锻件、轧制板材及机械加工零件，1000~1100 °C 是较为常见的工艺区间。具体温度会根据材料状态、加工变形量及产品用途进行调整，不同厂家通常具有各自成熟的工艺制度。

（二）为什么不能过高？

TZM 再结晶温度通常约为 1400~1600 °C。如果退火温度接近或超过这一范围，材料将开始发生明显再结晶，原有细晶组织和 TiC、ZrC 强化效果受到影响，导致高温强度和抗蠕变性能下降。因此，应力消除退火始终强调在低于再结晶温度条件下进行。

（三）保温时间同样重要

除温度外，保温时间也是影响应力释放效果的重要因素。保温时间过短，应力释放不充分；保温时间过长，则可能引起局部组织变化，降低生产效率。工业生产通常根据工件厚度和尺寸合理确定保温制度。

（四）退火气氛要求

应力消除退火一般采用高真空或高纯氢气保护。这样既可避免高温氧化，又可进一步降低表面氧含量，提高材料纯净度。对于半导体热场及航空航天产品，高真空退火已成为主流工艺。

（五）缓慢冷却防止重新产生应力

退火结束后通常采用炉冷或程序控制缓冷。如果冷却速度过快，材料内部容易再次形成温差应力，从而削弱退火效果，因此工业生产普遍采用受控冷却制度。

（六）不同产品退火制度存在差异

大型板材、厚壁构件及高精度热场零件，由于尺寸较大、应力分布复杂，通常需要采用更长保温时间或多次应力消除退火。因此，应力消除退火制度需要根据具体产品进行优化，而不是固定采用单一参数。

钛锆钼合金（TZM）的应力消除退火主要参数

工艺项目	典型范围	主要作用
退火温度	约 900~1200 °C，常用 1000~1100 °C	消除残余应力
保温制度	根据尺寸优化	保证应力充分释放
退火气氛	高真空或高纯氢气	防止氧化
冷却方式	炉冷或缓冷	避免产生新应力

工艺项目	典型范围	主要作用
组织要求	保持未再结晶状态	保留强化组织

中钨智造认为,应力消除退火虽然属于相对低温热处理,但却直接影响 TzM 后续加工精度、尺寸稳定性及长期服役可靠性。现代 TzM 制造越来越强调全过程热处理控制,将应力消除退火与锻造、轧制、机械加工等工艺有机结合,在充分释放残余应力的同时,最大限度保持细晶组织和 TiC、ZrC 弥散强化效果。这也是高端 TzM 能够长期稳定应用于半导体热场、航空航天及先进真空装备的重要工艺保障。

Q43 钛锆钼合金（TzM）的再结晶退火如何控制？

再结晶退火（Recrystallization Annealing）是 TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）热处理中的重要工艺，其主要目的是消除加工硬化、恢复塑性、形成新的等轴晶组织，并改善材料后续加工性能和组织均匀性。由于 TzM 依靠 TiC、ZrC 弥散强化及细晶组织获得优异的高温性能，因此再结晶退火必须严格控制温度、保温时间及冷却制度，在保证组织均匀的同时，避免晶粒异常长大和强化相失效。工业生产中，再结晶退火通常用于多道次热加工后的组织调整或最终组织优化，而不是所有产品都必须进行完全再结晶处理。

（一）控制退火温度

再结晶退火首先要准确控制退火温度。TzM 的再结晶温度通常约为 1400~1600 ℃，具体数值受加工变形量、晶粒尺寸、第二相颗粒分布及杂质含量等因素影响。工业生产通常选择略高于再结晶起始温度的工艺区间，使材料能够完成再结晶，同时尽量避免晶粒快速长大。

（二）合理控制保温时间

保温时间直接影响再结晶程度。保温时间过短，再结晶不完全，组织仍存在加工变形结构；保温时间过长，则晶粒持续长大，削弱细晶强化作用，并降低高温蠕变性能。因此，工业企业通常根据产品尺寸、加工状态和组织要求确定最佳保温制度。

（三）采用高真空或保护气氛

TzM 高温退火一般采用高真空或高纯氢气保护。高真空退火能够有效避免高温氧化，保持材料纯净表面，并减少氧、氮等有害杂质对晶界和组织稳定性的影响。对于半导体热场及航空航天产品，高真空退火几乎是标准配置。

（四）利用第二相控制晶粒长大

TzM 中弥散分布的 TiC、ZrC 颗粒能够钉扎晶界，减缓晶粒迁移速度。合理的再结晶退火制度能够充分发挥第二相颗粒的晶界钉扎作用，使新形成的晶粒保持细小均匀，而不会迅速粗化。因此，再结晶退火实际上也是强化相稳定性的控制过程。

（五）避免过度再结晶

对于部分长期高温服役的 TzM 产品，并不追求完全再结晶，而是保留一定加工组织。这样可以维持较高的位错密度和细晶结构，从而获得更高的高温强度和抗蠕变性能。因此，不同用途的 TzM 采用不同程度的再结晶控制。

（六）退火后组织检测

再结晶退火完成后，通常需要进行金相组织检测，观察晶粒尺寸、再结晶程度及第二相颗粒分布。对于高端产品，还会检测晶粒等级、显微硬度及高温力学性能，以验证退火效果是否达到设计要求。

钛锆钼合金（TZM）的再结晶退火控制要点

控制项目	主要要求	控制目的
退火温度	略高于再结晶起始温度	完成再结晶
保温制度	合理控制时间	防止晶粒粗化
退火气氛	高真空或高纯氢气	防止氧化
第二相控制	保持 TiC、ZrC 稳定分布	抑制晶粒长大
组织检测	晶粒、硬度、显微组织	保证组织稳定

中钨智造认为，再结晶退火并不是温度越高、时间越长越好，而是在完成组织恢复与保持强化组织之间寻求最佳平衡。现代 TZM 制造越来越强调精准热处理，通过控制再结晶程度，实现晶粒细化、第二相稳定及高温性能优化的统一。对于半导体、航空航天及聚变装置等高端应用，再结晶退火制度已成为各企业的重要核心工艺之一。

Q44 为什么钛锆钼合金（TZM）不能过烧？

过烧（Overheating 或 Burning）是指 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）在热处理、锻造、烧结或焊接过程中，由于温度过高、保温时间过长或局部过热，导致组织发生不可逆损伤的现象。对于 TZM 而言，过烧不仅会破坏细晶组织，还会削弱 TiC、ZrC 弥散强化作用，使材料高温性能明显下降，严重时甚至导致材料报废。因此，防止过烧是 TZM 生产和使用过程中必须严格控制的重要技术要求。

（一）晶粒会异常长大

TZM 优异性能的重要基础是细小均匀的晶粒组织。当温度超过合理范围或保温时间过长时，晶界快速迁移，晶粒迅速粗化，原有细晶强化作用明显减弱，高温强度、塑性及抗蠕变性能都会下降。晶粒一旦严重粗化，通常无法通过普通热处理恢复。

（二）第二相强化作用减弱

TiC 和 ZrC 颗粒是 TZM 最重要的强化相。过烧过程中，这些颗粒可能发生粗化、聚集甚至部分溶解，使其钉扎晶界和阻碍位错运动的能力下降，从而削弱材料整体强化效果。第二相稳定性也是限制 TZM 热处理温度的重要原因。

（三）再结晶组织失控

合理再结晶能够改善组织，而过烧则会导致再结晶失控。新形成的晶粒不断吞并周围晶粒，最终形成粗大的等轴晶组织，使材料失去原有组织优势，降低长期高温服役能力。

（四）高温力学性能下降

过烧后的 TZM 虽然室温强度可能变化不大，但高温强度、抗蠕变性能、抗热疲劳性能及长期尺寸稳定性都会明显下降。对于半导体热场、航空发动机及核工业设备而言，这种性能下降往往意味着使用寿命大幅缩短。

（五）加工性能恶化

晶粒粗化后，TZM 塑性加工性能下降，后续锻造、轧制及机械加工更容易产生裂纹、崩边及加工缺陷。对于大型精密零件，过烧还可能导致尺寸稳定性变差。

（六）过烧通常不可逆

加工硬化可以通过退火消除，残余应力可以通过应力消除退火释放，但过烧导致的晶粒粗化和强化相失效一般难以恢复。因此，工业生产通常采取严格的温度控制、保温时间控制及炉温均匀性控制，从源头避免过烧发生。

钛锆钼合金（TZM）过烧的主要影响

影响项目	过烧后变化	对性能影响
晶粒尺寸	明显粗化	强度下降
TiC、ZrC 颗粒	粗化、聚集或部分失效	强化作用减弱
再结晶组织	失去控制	高温性能下降
抗蠕变性能	明显降低	使用寿命缩短
加工性能	塑性下降	易开裂、易变形
可恢复性	基本不可逆	严重时只能报废

中钨智造认为，对于 TZM 而言，过烧是比加工硬化和残余应力更严重的组织缺陷，其本质是材料强化体系遭到不可逆破坏。现代 TZM 制造不仅要求严格控制烧结、锻造、轧制和热处理温度，还需要精确控制保温时间、炉温均匀性及冷却制度，通过全过程热处理管理保持细晶组织和 TiC、ZrC 弥散强化结构的稳定性。这也是国际高端 TZM 产品能够长期保持优异高温性能和服役寿命的重要工艺保障。

Q45 钛锆钼合金（TZM）晶粒粗化如何发生？

晶粒粗化（Grain Coarsening 或 Grain Growth）是指 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）在高温条件下，原有细小晶粒逐渐长大、晶界数量减少、组织由细晶向粗晶转变的过程。晶粒粗化属于典型的组织演化现象，也是影响 TZM 高温性能和服役寿命的重要因素。由于 TZM 的高温性能很大程度上依赖于细晶组织和 TiC、ZrC 弥散强化相，因此一旦发生明显晶粒粗化，其高温强度、抗蠕变性能及热疲劳性能都会不同程度下降。因此，在 TZM 生产和使用过程中，始终需要严格控制晶粒长大。

（一）高温是晶粒粗化的根本原因

晶粒粗化本质上是晶界迁移的结果。当 TZM 长期处于高温环境时，原子扩散能力显著增强，晶界不断向能量较低方向移动，小晶粒逐渐被大晶粒吞并，最终形成尺寸更大的晶粒组织。温度越高、保温时间越长，晶粒长大的速度通常越快。

（二）保温时间过长会加剧粗化

即使热处理温度合理，如果保温时间过长，晶界仍会持续迁移。随着时间延长，细晶逐渐减少，大晶粒不断扩大，组织均匀性下降。因此，在 TZM 热处理过程中，除了控制温度，还

必须合理控制保温时间。

（三）第二相颗粒失去钉扎作用

TZM 中的 TiC、ZrC 颗粒能够有效钉扎晶界，抑制晶界迁移。但当热处理温度过高或服役时间过长时，这些碳化物颗粒可能发生粗化、聚集甚至部分溶解，使晶界约束能力下降。一旦钉扎作用减弱，晶界迁移速度明显加快，晶粒粗化便迅速发生。

（四）加工变形程度影响再结晶晶粒

TZM 经过锻造、轧制等塑性加工后，内部储存大量变形能。合理热处理能够形成细小均匀的再结晶晶粒，而加工变形不足或热处理制度不合理，则容易形成较大的再结晶晶粒，为后续晶粒继续长大创造条件。因此，热加工制度与晶粒控制密切相关。

（五）长期高温服役也会缓慢粗化

即使制造阶段组织控制良好，TZM 在长期高温工作过程中仍会发生缓慢晶粒长大。例如，半导体热场、航空航天及聚变装置中的 TZM 部件，在长期 1200℃以上服役条件下，其晶粒会随着使用时间逐步演化，因此材料寿命通常与晶粒稳定性密切相关。

（六）晶粒粗化后的性能变化

晶粒明显粗化后，材料晶界数量减少，晶界强化作用减弱，高温强度、抗蠕变性能及抗热疲劳性能下降。此外，大晶粒组织还可能降低加工性能，使材料更容易产生裂纹和局部失效。因此，高品质 TZM 始终强调细晶稳定而不是单纯获得细晶。

钛锆钼合金（TZM）晶粒粗化主要影响因素

影响因素	对晶粒粗化的影响	控制措施
热处理温度	温度越高，粗化越快	控制退火制度
保温时间	时间越长，晶粒越大	缩短保温时间
第二相稳定性	TiC、ZrC 失效后粗化加快	保持强化相稳定
加工组织	初始晶粒越细，组织越稳定	优化锻造和轧制
长期服役温度	长期高温促进缓慢粗化	合理控制使用温度

中钨智造认为，TZM 晶粒粗化本质上是晶界迁移与第二相稳定性共同作用的结果。现代 TZM 制造的重点已经由单纯细化晶粒转向稳定细晶组织，通过优化 TiC、ZrC 弥散分布、提高碳化物热稳定性及精准控制热处理制度，使晶粒在长期高温环境下仍能保持稳定。这也是国际高端 TZM 材料能够长期应用于半导体热场、聚变装置和航空航天领域的重要技术基础。

Q46 热处理如何影响钛锆钼合金（TZM）的性能？

热处理（Heat Treatment）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）制造过程中控制组织和性能的核心工艺之一。虽然 TZM 属于典型的粉末冶金材料，其强化主要来源于 TiC、ZrC 弥散强化和细晶组织，而不是传统钢铁材料中的相变强化，但合理的热处理仍然能够显著影响晶粒尺寸、残余应力、第二相颗粒稳定性及高温力学性能。不同热处理制度可使 TZM 获得不同的组织状态，因此热处理工艺直接决定材料最终性能水平。

（一）影响晶粒尺寸

热处理首先影响 TZM 晶粒组织。合理的再结晶退火能够形成细小均匀的新晶粒，提高组织均匀性；热处理温度过高或保温时间过长，则会导致晶粒异常长大，使高温强度和抗蠕变性能下降。晶粒控制始终是 TZM 热处理的核心任务之一。

（二）影响第二相强化效果

TZM 中的 TiC、ZrC 颗粒决定材料高温强化能力。合理热处理能够保持第二相颗粒细小均匀，使其持续钉扎晶界、阻碍位错运动；如果热处理制度不合理，颗粒发生粗化或聚集，则强化效果下降，高温性能明显降低。

（三）消除残余应力

锻造、轧制及机械加工过程中都会产生残余应力。通过应力消除退火，可以释放内部应力，提高尺寸稳定性，降低后续加工变形和高温服役过程中产生裂纹的风险。对于大型半导体热场零件和精密真空部件，应力控制尤为重要。

（四）恢复塑性

经过大量塑性加工后，TZM 内部位错密度明显增加，材料发生加工硬化。中间退火能够降低位错密度，恢复塑性，提高后续锻造、轧制及机械加工能力，避免加工裂纹产生。因此，多次加工通常需要配合多次中间退火。

（五）影响高温服役性能

TZM 长期工作于高温环境时，对组织稳定性要求极高。合理热处理能够保持细晶组织和稳定的第二相颗粒，提高抗蠕变性能、抗热疲劳性能及长期尺寸稳定性，从而延长材料服役寿命。反之，不合理热处理会加速组织退化，缩短使用寿命。

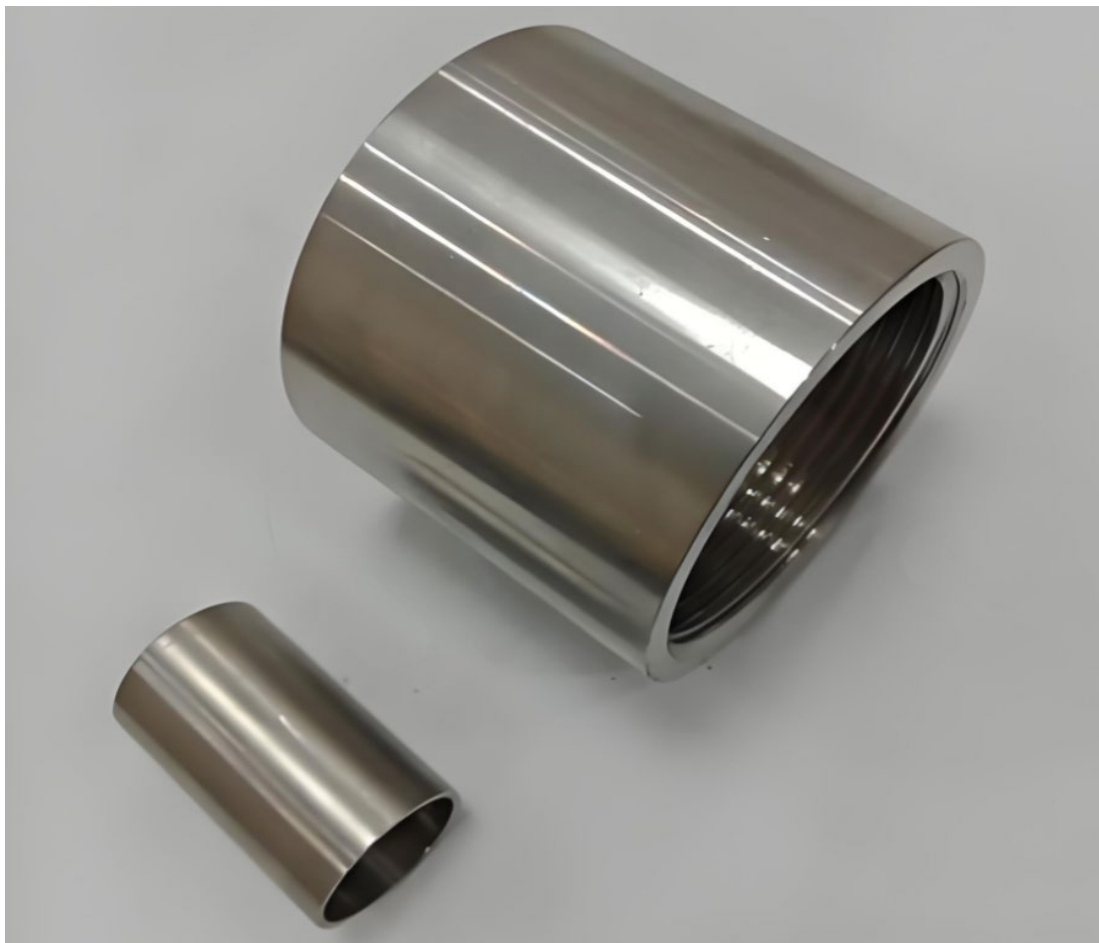
（六）不同热处理对应不同用途

TZM 并不存在一种适用于所有产品的热处理制度。应力消除退火主要用于稳定尺寸；中间退火用于恢复塑性；再结晶退火用于调整组织；最终稳定化热处理则用于高端产品长期服役前的组织优化。因此，热处理制度通常需要根据产品用途、加工状态及性能要求综合设计。

热处理对钛锆钼合金（TZM）性能的影响

热处理作用	对组织的影响	对性能的影响
应力消除退火	释放残余应力	提高尺寸稳定性
中间退火	降低位错密度	恢复塑性
再结晶退火	调整晶粒组织	改善组织均匀性
合理热处理	保持 TiC、ZrC 稳定分布	提高高温强度和抗蠕变性能
热处理不当	晶粒粗化、第二相失稳	高温性能下降、寿命缩短

中钨智造认为，热处理对于 TZM 而言，并不是传统意义上的强化工艺，而是组织优化和组织稳定工艺。现代高性能 TZM 的发展重点已经从单纯控制退火温度，发展到全过程热处理设计，即根据烧结、HIP、锻造、轧制及最终服役要求，制定针对性的热处理制度，使晶粒尺寸、TiC 和 ZrC 第二相颗粒、残余应力及组织稳定性达到最佳平衡。对于高端半导体、航空航天、核工业及聚变能源装备而言，热处理水平已经成为衡量 TZM 制造能力的重要技术指标之一。



Q47 如何获得钛锆钼合金（TZM）最佳组织？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的最佳组织，是指细小均匀的晶粒、弥散稳定的 TiC 和 ZrC 第二相颗粒、高致密度、低残余应力及均匀织构共同组成的综合组织状态。这种组织能够充分发挥 TZM 的高温强度、抗蠕变性能、抗热疲劳性能及尺寸稳定性，使材料在长期高温环境下仍保持优异的综合性能。TZM 不存在单一固定的最佳组织，不同应用领域对组织状态的要求有所不同，但总体原则都是在细晶强化、第二相强化和组织稳定性之间取得最佳平衡。

（一）采用高纯度原材料

最佳组织首先来源于高质量原材料。工业生产通常采用高纯钼粉、钛粉、锆粉及高纯石墨或碳源，严格控制氧、氮、铁、镍等杂质含量。原料纯度越高，烧结组织越均匀，第二相形成越稳定，为获得优良组织奠定基础。

（二）保证均匀混粉

Ti、Zr、C 必须在混粉阶段充分均匀分散。如果混合不均匀，会导致局部碳化物富集或缺失，使 TiC、ZrC 颗粒分布不均，最终造成组织不一致和性能波动。现代企业通常采用高效混粉设备，并严格控制混粉时间和均匀性。

（三）获得高致密度烧结组织

烧结质量直接决定初始组织。合理的烧结制度能够形成高致密度、低孔隙率的烧结体，为后续 HIP、锻造和轧制提供均匀组织基础。高端 TZM 产品通常还会配合 HIP 进一步消除残余孔隙，提高组织完整性。

（四）优化热机械加工工艺

锻造、轧制、旋锻等热加工不仅改变产品尺寸，更重要的是细化晶粒、改善织构，并促进 TiC、ZrC 颗粒均匀分布。现代 TZM 生产通常采用多道次、小变形量热加工，使组织逐步优化，而不是一次完成大变形。

（五）精准控制热处理

合理热处理是获得最佳组织的重要保证。应力消除退火用于释放残余应力，再结晶退火用于调整晶粒组织，同时严格控制退火温度和保温时间，防止晶粒粗化和第二相颗粒失稳。整个热处理过程需要与前道工艺协同设计。

（六）保持第二相稳定分布

TiC、ZrC 颗粒既要细小，又要均匀弥散。颗粒过粗会降低强化效果，颗粒过少则不能有效钉扎晶界。最佳组织通常表现为细小均匀的碳化物颗粒稳定分布于晶界和晶内，共同提高材料高温性能。

（七）避免晶粒异常长大

获得细晶组织后，还必须保证其长期稳定。生产过程中需要严格防止过烧、过度再结晶及长期高温保温，避免晶粒快速粗化。对于长期高温服役产品，组织稳定性往往比初始晶粒尺寸更加重要。

（八）建立全过程质量控制体系

高品质 TZM 组织不是由某一道工序决定，而是整个制造流程共同作用的结果。从粉末制备、混粉、压制、烧结、HIP、锻造、轧制、热处理到最终检验，每一道工艺都会影响最终组织，因此现代生产越来越强调全过程组织控制。

获得钛锆钼合金（TZM）最佳组织的关键措施

工艺环节	控制重点	对组织的作用
原料制备	高纯度、低杂质	提高组织纯净度
混粉	Ti、Zr、C 均匀分布	保证第二相均匀形成
烧结/HIP	高致密度、低孔隙	建立均匀初始组织
热加工	多道次、合理变形	细化晶粒、优化织构
热处理	精准控制温度和时间	稳定组织、释放应力
第二相控制	TiC、ZrC 细小弥散	强化晶界和基体
全过程控制	各工艺协同优化	获得稳定综合性能

中钨智造认为，TZM 最佳组织并非单纯追求最细晶粒，而是细晶组织、TiC 和 ZrC 弥散强化、高致密度、低残余应力及长期组织稳定性的综合平衡。现代国际先进企业越来越采用全过程组织设计理念，通过粉末冶金、热机械加工和精准热处理的协同控制，实现组织和性能的一体化优化，这也是高端 TZM 长期保持优异高温性能的重要原因。



Q48 如何检测钛锆钼合金（TZM）再结晶程度？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的再结晶程度，是评价热处理质量和组织稳定性的重要指标。合理的再结晶能够恢复塑性、改善组织均匀性，而过度再结晶则可能导致晶粒粗化和高温性能下降。因此，在 TZM 生产和质量控制过程中，通常需要综合采用金相分析、显微组织观察、硬度测试及力学性能测试等多种方法，对再结晶程度进行全面评价。不同检测方法反映的是再结晶过程的不同特征，实际生产中通常采用多种方法相互验证。

（一）金相显微组织观察

金相分析是最常用的方法。经过磨制、抛光和腐蚀后，在光学显微镜下可以观察晶粒形貌及组织状态。未再结晶组织通常呈现拉长纤维状晶粒；部分再结晶组织表现为新生等轴晶与变形组织并存；完全再结晶则形成均匀细小的等轴晶粒。金相组织能够直观判断再结晶程度。

（二）扫描电子显微镜（SEM）分析

SEM 具有更高分辨率，可观察晶界形貌、第二相颗粒分布及局部再结晶情况。同时，还可分析 TiC、ZrC 颗粒是否仍保持均匀弥散，从而判断热处理是否影响强化组织。对于高端 TZM 产品，SEM 已成为重要检测手段。

（三）电子背散射衍射（EBSD）分析

EBSD 是目前国际上评价再结晶程度最先进的方法之一。通过分析晶粒取向、晶界特征及取向差分布，可准确区分变形晶粒、回复组织和再结晶晶粒，并计算再结晶比例。对于科研及航空航天领域，EBSD 已广泛用于 TZM 组织研究。

（四）显微硬度测试

加工硬化状态下，TZM 硬度通常较高。随着再结晶进行，位错密度下降，硬度会有所降低。因此，通过测量显微硬度变化，可间接判断再结晶程度。不过，硬度只能作为辅助评价方法，

通常需结合组织分析共同判断。

（五）力学性能测试

再结晶会改变材料强度和塑性。适度再结晶能够恢复塑性，提高延伸率；过度再结晶则可能降低高温强度和抗蠕变性能。因此，拉伸试验、高温拉伸试验及蠕变试验也可用于评价热处理效果。

（六）晶粒度评级

依据相关标准,可对退火后的晶粒尺寸进行评级。细小均匀的晶粒通常表明再结晶控制较好；若晶粒明显粗化，则说明热处理制度可能存在过烧或保温过长等问题。晶粒等级也是 TZM 产品的重要质量控制指标之一。

（七）综合评价组织稳定性

现代 TZM 制造越来越强调综合评价，而不是仅依据单一指标。通常结合金相组织、EBSD、SEM、显微硬度及高温性能测试，对再结晶程度、第二相稳定性及晶粒尺寸进行综合分析，以确保材料满足长期高温服役要求。

钛锆钼合金（TZM）再结晶程度常用检测方法

检测方法	检测内容	主要特点
金相显微镜	晶粒形貌、再结晶组织	最常用、直观
SEM	晶界、第二相颗粒	分辨率高
EBSD	晶粒取向、再结晶比例	精度最高
显微硬度	位错密度变化	辅助判断
力学性能测试	强度、塑性、蠕变性能	验证组织效果
晶粒度评级	晶粒尺寸均匀性	评价热处理质量

中钨智造认为，再结晶程度不能简单理解为是否形成新晶粒，而应综合评价晶粒尺寸、再结晶比例、第二相颗粒稳定性及最终高温性能。现代高品质 TZM 制造通常采用金相分析结合 SEM、EBSD 等先进表征技术，对组织演化进行全过程监控，实现热处理制度的持续优化。这种基于组织定量分析的质量控制方法，也是当前国际先进 TZM 制造的重要发展方向。

Q49 钛锆钼合金（TZM）热处理后为何仍需加工？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）经过烧结、HIP、锻造、轧制及热处理后，虽然已经获得了稳定的组织和优良的综合性能，但通常仍不能直接作为最终产品使用，而需要进行车削、铣削、磨削、线切割、电火花加工等精密机械加工。这是因为热处理的主要作用是优化组织和性能，而不是保证最终尺寸、形位公差和表面质量。对于半导体热场、航空航天、真空装备及核工业等高端应用，最终加工精度往往决定产品能否满足使用要求。

（一）热处理不能保证最终尺寸精度

热处理主要改善材料内部组织，而不能保证工件达到最终尺寸。由于烧结收缩、热加工变形及热处理过程中产生的尺寸变化,工件通常需要预留加工余量,热处理完成后再进行精加工，以满足图纸要求。

（二）消除热处理后的尺寸变形

即使采用合理的热处理制度，材料仍可能发生轻微翘曲、弯曲或尺寸变化。通过后续机械加工，可以修正这些变形，使产品恢复规定尺寸和几何精度。对于大型板材、真空炉部件及热场构件，这一步尤为重要。

（三）获得更高的表面质量

烧结及热处理后的 TZM 表面可能存在氧化膜、脱碳层、轻微粗糙或加工痕迹。通过精密磨削、车削、抛光等工艺，可获得更低的表面粗糙度，提高零件配合精度，并降低高温使用过程中裂纹萌生的风险。

（四）加工复杂结构

许多 TZM 产品具有螺纹、定位孔、安装槽、密封面及复杂异形结构。这些精密特征通常无法通过烧结或热处理直接形成，而需要采用精密机械加工完成。随着半导体装备的发展，对复杂精密结构的加工要求越来越高。

（五）保证装配精度

TZM 零件通常需要与石墨、陶瓷、铜合金或其他耐高温材料配合使用。如果尺寸、公差或平面度不符合要求，将直接影响设备装配质量及运行稳定性。因此，热处理后精加工也是保证整机性能的重要工序。

（六）降低残余应力对精加工的影响

工业生产通常将粗加工安排在热处理之前，将精加工安排在热处理之后。这样可以避免大量切削后再热处理造成尺寸变化，同时利用热处理释放残余应力，提高最终加工精度和尺寸稳定性。对于超高精度零件，有时还会采用粗加工、应力消除退火、半精加工、再次退火、精加工的工艺路线。

（七）满足高端行业的精度要求

半导体、航空航天及聚变能源等领域，对 TZM 零件的尺寸精度、平面度、平行度及表面粗糙度要求极高。热处理后的精密加工，是保证这些技术指标的重要保证，也是高端 TZM 产品制造的重要组成部分。

钛锆钼合金（TZM）热处理后继续加工的主要原因

原因	主要目的	对产品的影响
修正尺寸	达到设计尺寸	保证互换性
修正变形	消除翘曲、弯曲	提高尺寸稳定性
提高表面质量	降低粗糙度	提高服役可靠性
加工复杂结构	完成孔、槽、螺纹等	满足装配要求
保证装配精度	控制形位公差	提高设备运行稳定性
控制加工应力	配合热处理工艺	降低后续变形

中钨智造认为，热处理和机械加工并不是相互独立的工序，而是 TZM 制造过程中相辅相成的重要环节。热处理决定材料内部组织和性能，加工决定产品最终精度和使用品质。现代高端 TZM 制造越来越强调热处理与机械加工协同优化，通过合理安排粗加工、热处理、精加工等工艺流程，实现组织稳定、尺寸稳定和性能稳定的统一。

Q50 如何制定钛锆钼合金（TZM）热处理制度？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）热处理制度（Heat Treatment Schedule）是根据材料成分、加工状态、组织特征及最终使用要求，对退火类型、加热温度、保温时间、保护气氛、冷却方式等工艺参数进行系统设计的全过程控制方案。合理的热处理制度能够优化组织、释放残余应力、稳定第二相颗粒、提高高温性能，并保证长期服役可靠性。由于 TZM 强化机制不同于普通钢材，因此其热处理制度并不存在统一固定参数，而需要根据不同产品进行针对性设计。

（一）根据产品用途确定目标组织

制定热处理制度首先要明确产品用途。用于半导体热场的 TZM，更强调组织稳定性和尺寸稳定性；用于航空航天及核工业，则更加关注高温强度和抗蠕变性能；用于机械加工坯料，则重点恢复塑性，提高加工性能。不同用途决定不同热处理目标。

（二）根据加工状态选择热处理类型

热处理制度应结合加工工艺制定。锻造、轧制后通常采用应力消除退火；多道次加工之间采用中间退火恢复塑性；最终组织调整则采用再结晶退火或稳定化热处理。不同阶段采用不同热处理方式，才能充分发挥各自作用。

（三）合理控制退火温度

退火温度是热处理制度中最重要的参数之一。应力消除退火一般控制在低于再结晶温度范围内，以释放残余应力而不改变组织；再结晶退火则应略高于再结晶起始温度，同时避免温度过高导致晶粒粗化和第二相失稳。

（四）优化保温时间

保温时间应与工件尺寸、厚度及热处理目的相匹配。保温不足，应力释放或再结晶不完全；保温过长，则容易导致晶粒长大、强化效果下降，同时增加生产成本。因此，工业企业通常通过工艺验证确定最佳保温制度。

（五）选择合适的保护气氛

TZM 热处理通常采用高真空或高纯氢气保护。对于高端产品，高真空退火能够最大限度避免高温氧化和杂质污染，保持材料纯净表面及稳定组织，是国际主流生产方式。

（六）制定合理冷却制度

冷却速度同样影响最终组织。应力消除退火通常采用炉冷或缓冷，防止重新产生热应力；部分组织调整工艺则根据产品要求选择适当冷却方式，以保证组织稳定和尺寸稳定。

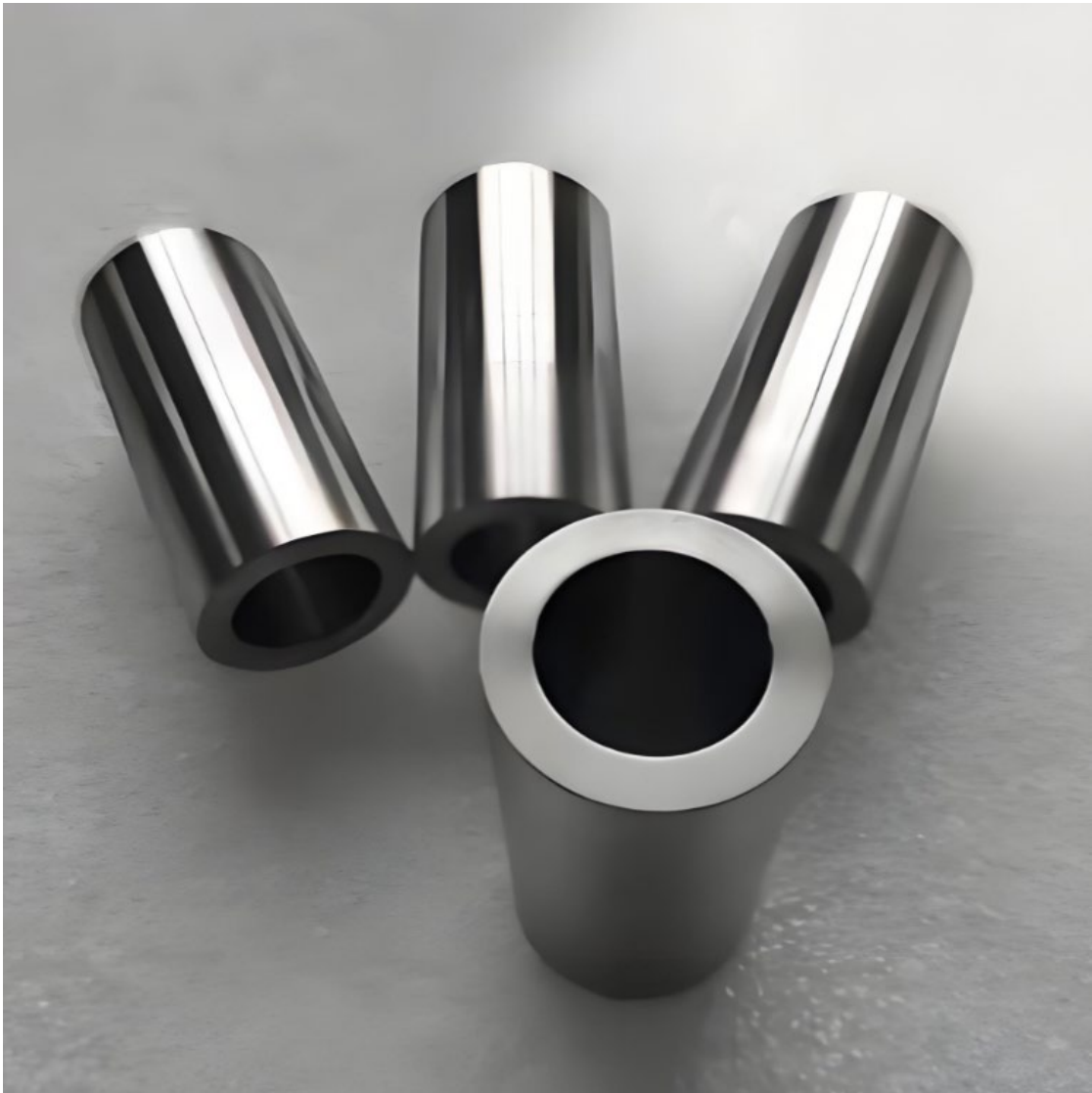
（七）结合组织检测持续优化

现代 TZM 热处理制度并非一次确定，而是结合金相组织、SEM、EBSD、显微硬度及高温性能测试不断优化。通过检测晶粒尺寸、再结晶程度、第二相颗粒分布及力学性能，对热处理制度进行持续改进，实现最佳组织控制。

制定钛锆钼合金（TZM）热处理制度的主要依据

制定依据	控制内容	主要目标
产品用途	半导体、航空航天、核工业等	确定性能目标
加工状态	锻造、轧制、机加工后	选择热处理类型
温度制度	应力消除或再结晶退火	优化组织
保温制度	根据尺寸合理确定	保证组织均匀
保护气氛	高真空或高纯氢气	防止氧化
冷却方式	炉冷、缓冷等	保持组织稳定
检测验证	金相、SEM、EBSD 等	持续优化工艺

中钨智造认为，TZM 热处理制度本质上是一套组织控制方案，而不仅仅是温度和时间参数的组合。现代高端 TZM 制造越来越强调全过程热处理设计，即结合粉末制备、烧结、HIP、锻造、轧制、机械加工及最终服役要求，建立系统化、精细化的热处理制度，实现晶粒组织、TiC 和 ZrC 第二相、残余应力及高温性能的协同优化。这种基于组织演化规律制定热处理工艺的方法，也是国际先进 TZM 制造技术的重要发展方向。





第六篇 力学性能（Q51-Q60）

Q51 钛锆钼合金（TZM）的抗拉强度是多少？

抗拉强度（Ultimate Tensile Strength, UTS）是衡量 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）承受最大拉伸载荷能力的重要力学性能指标，也是评价材料承载能力和结构安全性的关键参数。得益于 Ti、Zr 固溶强化及 TiC、ZrC 弥散强化作用，TZM 的抗拉强度明显高于纯钼，并且在中高温条件下仍能保持较高的强度水平，因此广泛应用于航空航天、半导体热场、核工业、高温模具及聚变装置等领域。TZM 的抗拉强度受产品规格、加工工艺、热处理状态、测试温度及加载方向等因素影响，不同标准和厂家公布的数据会存在一定差异。

（一）钛锆钼合金（TZM）的室温抗拉强度

工业生产的 TZM 棒材、板材和锻件，室温抗拉强度通常约为 700~900 MPa。其中，经过充分热机械加工并优化热处理后的高品质 TZM，抗拉强度一般可达到 800 MPa 以上，部分高性能产品甚至可接近 900 MPa。相比之下，纯钼的室温抗拉强度通常仅约 550~700 MPa，因此 TZM 具有明显优势。

（二）钛锆钼合金（TZM）高温仍保持较高强度

TZM 最大的优势并不仅体现在室温，而是在高温环境下仍能保持较高承载能力。随着温度升高，抗拉强度虽然逐渐下降，但下降速度明显低于纯钼。在 1000~1400 °C 工作区间，TZM 仍具有良好的高温强度，因此能够长期用于高温承力结构。

（三）加工状态影响强度

不同加工状态下，TZM 抗拉强度存在一定差异。经过锻造、轧制等热机械加工后，由于晶粒细化和织构优化，材料通常具有较高抗拉强度；而完全再结晶退火后，塑性提高，抗拉强度则会略有下降。不同产品需要根据用途选择合适的组织状态。

（四）晶粒尺寸影响抗拉强度

细晶组织能够提高晶界强化作用，因此通常具有更高抗拉强度。如果热处理不当导致晶粒粗化，抗拉强度会明显下降，同时高温蠕变性能也会受到影响。因此，晶粒控制始终是 TZM 制造的重要内容。

（五）第二相强化决定强度水平

TZM 优异的抗拉强度主要来自 TiC 和 ZrC 弥散强化。这些细小碳化物能够阻碍位错运动，并稳定晶界结构，使材料在室温和高温条件下均保持较高强度。强化相分布越均匀，抗拉性能通常越稳定。

（六）不同标准允许合理波动

ASTM、ISO 及各生产企业通常都会规定最低力学性能要求，而实际产品性能通常高于标准下限。在采购 TZM 材料时，应结合产品检测报告，而不是仅依据典型参考值进行判断。

钛锆钼合金（TZM）的抗拉强度典型范围

性能项目	典型数值	说明
室温抗拉强度	约 700~900 MPa	常见工业产品
高品质 TZM	≥800 MPa	优化加工及热处理后
高温强度	随温度升高逐渐下降	明显优于纯钼
影响因素	晶粒、第二相、加工状态、热处理	综合决定性能

中钨智造认为，TZM 抗拉强度的优势不仅体现在室温数值，更重要的是能够在 1000 °C 以上长期保持较高承载能力，这是纯钼及多数普通耐热材料难以实现的。现代 TZM 制造通过优化 TiC、ZrC 弥散强化体系、控制晶粒尺寸及完善热机械加工工艺，使材料在保证高强度的同时兼顾塑性和长期组织稳定性，从而满足先进高温装备对高可靠性的要求。

Q52 钛锆钼合金（TZM）的屈服强度是多少？

屈服强度（Yield Strength）是指 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）发生明显塑性变形前所能承受的最大应力，是设计高温承力构件时最重要的力学性能参数之一。较高的屈服强度意味着材料在载荷作用下能够保持形状稳定,不易发生永久变形,对于半导体热场、航空航天、核工业及高温模具等领域尤为重要。由于 TZM 具有 Ti、Zr 固溶强化和 TiC、ZrC 弥散强化机制，其屈服强度明显高于纯钼，并且在中高温环境下仍保持较好的抗变形能力。

（一）钛锆钼合金（TZM）的室温屈服强度

工业生产 TZM 的室温屈服强度通常约为 600~800 MPa。经过合理锻造、轧制及热处理后，高品质 TZM 产品屈服强度一般可达到 700 MPa 以上，部分高性能材料可接近 800 MPa。相比纯钼，TZM 具有更高的屈服强度和更好的承载能力。

（二）高温屈服性能优异

随着温度升高，TZM 屈服强度会逐渐降低，但由于第二相强化及稳定晶粒组织的作用，其下降速度明显慢于普通钼材料。因此，在 1000 °C 以上长期工作条件下，TZM 仍具有较好的抗塑性变形能力，是其能够应用于高温结构件的重要原因。

（三）加工工艺影响屈服强度

热机械加工能够细化晶粒，提高位错密度，并优化第二相颗粒分布，因此通常能够获得更高的屈服强度。如果材料经过完全再结晶退火，虽然塑性提高，但屈服强度通常会略有降低。不同用途对应不同的组织状态。

（四）第二相强化提高屈服能力

TiC 和 ZrC 颗粒能够有效阻碍位错运动，使材料在受力过程中更难发生塑性变形。正是这种弥散强化机制，使 TZM 具有远高于纯钼的屈服强度，也是其高温承载能力的重要来源。

（五）组织稳定性影响长期承载能力

屈服强度不仅取决于初始组织，还与长期高温服役后的组织稳定性密切相关。如果晶粒发生粗化或第二相颗粒失稳，屈服强度会逐渐下降，因此现代 TZM 制造特别重视热处理制度和组织稳定性控制。

（六）实际应用应参考检测报告

不同规格、不同标准及不同厂家生产的 TZM，其屈服强度会存在一定差异。工程设计通常依据材料检测报告或相关标准规定的最低性能值进行计算，以确保结构安全和可靠性。

钛锆钼合金（TZM）的屈服强度典型范围

性能项目	典型数值	说明
室温屈服强度	约 600~800 MPa	常见工业产品
高品质 TZM	≥700 MPa	优化组织后
高温屈服性能	随温度升高逐渐下降	保持较好抗变形能力
主要影响因素	晶粒、第二相、加工状态、热处理	综合决定性能

中钨智造认为，TZM 较高的屈服强度使其能够在高温、高载荷环境下保持优异的尺寸稳定性和结构可靠性。相比单纯追求更高的室温屈服强度，现代 TZM 研发更加重视高温屈服强度的长期稳定性，通过优化 TiC、ZrC 强化体系、细晶组织及热处理制度，使材料在长期高温服役过程中仍能保持优异的抗塑性变形能力，这也是 TZM 长期占据高端钼基高温材料主流地位的重要原因。

Q53 钛锆钼合金（TZM）的延伸率是多少？

延伸率（Elongation）是评价 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）塑性的重要力学性能指标，表示材料在拉伸断裂前所产生的塑性变形能力。对于高温结构材料而言，延伸率不仅关系到加工性能，也影响材料抵抗冲击载荷、热应力及复杂工况下开裂的能力。与普通钢材相比，TZM 属于难变形高温材料，其塑性并不高，但由于 Ti、Zr 合金化及 TiC、ZrC 强

化体系的优化,其延伸率明显优于纯钼,能够满足多数高温工程应用的要求。需要说明的是,TZM 的延伸率受加工状态、热处理制度、晶粒尺寸、测试温度及试样方向等因素影响,不同产品之间会存在一定差异。

（一）钛锆钼合金（TZM）的室温延伸率

工业生产 TZM 产品的室温延伸率通常约为 10%~20%。经过合理锻造、轧制及应力消除处理后,常见产品延伸率一般可达到 12%~18%,能够兼顾较高强度和适当塑性。相比纯钼,TZM 在保持较高强度的同时,仍具有较好的综合塑性。

（二）高温塑性明显提高

随着温度升高,TZM 塑性逐渐改善。当工作温度高于钼材料的脆性—塑性转变温度 (DBTT) 后,材料延伸率明显增加,加工性能及抗热冲击能力进一步提高,这也是 TZM 适用于高温环境的重要原因之一。

（三）加工状态影响延伸率

热机械加工后的 TZM 通常具有较高强度,但塑性略低。经过合理再结晶退火后,位错密度下降,晶粒重新形成,延伸率会有所提高,但抗拉强度和屈服强度可能略有降低。因此,工程应用通常需要在强度和塑性之间取得平衡。

（四）晶粒尺寸影响塑性

细晶组织不仅能够提高强度,也有助于改善塑性均匀性。如果晶粒过度粗化,材料塑性通常下降,裂纹更容易沿晶界扩展,从而降低延伸率和断裂韧性。因此,合理控制晶粒尺寸对保持 TZM 综合性能十分重要。

（五）杂质含量影响延伸率

氧、氮、碳等杂质会提高材料脆性,使延伸率下降。现代 TZM 生产通常采用高纯原料,并严格控制杂质含量,以提高塑性和加工性能。因此,高品质 TZM 产品通常具有更加稳定的延伸率。

（六）工程应用更加关注综合性能

对于 TZM 而言,工程设计通常不会单独追求较高延伸率,而是综合考虑抗拉强度、屈服强度、延伸率及高温蠕变性能。只有保持良好的强塑匹配,才能充分发挥 TZM 作为高温结构材料的优势。

钛锆钼合金（TZM）的延伸率典型范围

性能项目	典型数值	说明
室温延伸率	约 10%~20%	常见工业产品
常规高品质 TZM	约 12%~18%	强度与塑性匹配较好
高温延伸率	随温度升高而提高	高温塑性明显改善
影响因素	晶粒、热处理、杂质、加工状态	综合决定塑性

中钨智造认为,TZM 的延伸率虽然低于普通结构钢,但在高熔点金属材料中属于较高水平。现代 TZM 的发展方向并非单纯提高塑性,而是在保持高强度、高温稳定性和抗蠕变性能的

基础上，实现更加合理的强塑匹配，从而满足半导体、航空航天及聚变能源等高端装备对综合力学性能的要求。

Q54 钛锆钼合金（TZM）的硬度是多少？

硬度（Hardness）是衡量 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）抵抗局部塑性变形、压入及磨损能力的重要指标，也是评价材料强化效果和加工状态的重要依据。由于 Ti、Zr 固溶强化以及 TiC、ZrC 弥散强化作用，TZM 的硬度明显高于纯钼，并具有良好的高温硬度保持能力，因此广泛应用于高温模具、半导体热场、高温炉构件及航空航天等领域。TZM 的硬度受加工状态、热处理制度、晶粒尺寸及测试方法等因素影响，不同资料公布的数据会存在一定差异。

（一）室温硬度

工业生产 TZM 的室温维氏硬度（HV）通常约为 220~280 HV。经过充分热机械加工并保持细晶组织的高品质 TZM，其硬度一般可达到 240~270 HV；部分强化程度较高的产品，硬度还可进一步提高。相比纯钼，TZM 硬度通常提高约 20%~40%。

（二）热处理影响硬度

加工硬化状态下，TZM 硬度通常较高。经过应力消除退火后，硬度变化较小；完成再结晶退火后，由于位错密度降低，硬度一般会有所下降，但组织更加均匀，塑性得到改善。因此，硬度变化也是评价热处理效果的重要依据之一。

（三）第二相强化提高硬度

TiC 和 ZrC 颗粒能够有效阻碍位错运动，提高材料抵抗塑性变形的能力。第二相颗粒分布越均匀、尺寸越细小，TZM 硬度通常越高，同时耐磨性能和高温强度也更优。

（四）晶粒尺寸影响硬度

根据细晶强化规律，晶粒越细，材料硬度通常越高。如果热处理不当导致晶粒粗化，硬度会有所下降，并伴随高温性能减弱。因此，硬度能够在一定程度上反映组织变化情况。

（五）高温仍具有较好硬度保持能力

随着温度升高，TZM 硬度会逐渐降低，但由于具有稳定的强化相和较高的再结晶温度，其高温硬度保持能力明显优于纯钼及许多普通耐热材料。这也是 TZM 适用于高温耐磨部件的重要原因。

（六）硬度通常作为辅助检测指标

在工业生产中，硬度检测具有操作简单、效率高、重复性好的特点。企业通常将硬度测试与金相组织、抗拉强度、屈服强度及显微组织分析结合使用，以综合评价产品质量，而不会仅凭硬度判断材料性能。

钛锆钼合金（TZM）的硬度典型范围

性能项目	典型数值	说明
维氏硬度（HV）	约 220~280 HV	常见工业产品
高品质 TZM	约 240~270 HV	热机械加工优化后

性能项目	典型数值	说明
热处理影响	再结晶后略有下降	塑性提高、组织均匀
影响因素	第二相、晶粒、加工状态、热处理	综合决定硬度

中钨智造认为，TZM 硬度并不是越高越好，而应与强度、塑性及高温稳定性保持合理平衡。现代 TZM 制造更加重视通过 TiC、ZrC 弥散强化和细晶组织控制，实现适中的室温硬度、优异的高温硬度保持能力及稳定的综合力学性能，而不是单纯依靠提高硬度来提升材料性能。这也是高端 TZM 产品能够长期稳定应用于高温装备的重要原因。

Q55 钛锆钼合金（TZM）的杨氏模量是多少？

杨氏模量（Young's Modulus, Elastic Modulus, E）是衡量材料弹性变形能力的重要参数，表示材料在弹性范围内应力与应变之间的比例关系。杨氏模量越高，说明材料刚性越大，在相同载荷作用下产生的弹性变形越小。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，较高的杨氏模量意味着其具有优异的结构刚度和尺寸稳定性，是其能够长期应用于高温精密结构件的重要原因之一。由于 TZM 以钼为基体，Ti、Zr 添加量较低，因此其杨氏模量与纯钼接近，但由于组织强化及热机械加工影响，实际数值会略有变化。

（一）钛锆钼合金（TZM）的室温杨氏模量

工业生产 TZM 的室温杨氏模量通常约为 310~330 GPa。多数工程资料采用约 320 GPa 作为典型设计值，不同厂家公布的数据一般位于这一范围内。相比普通结构钢约 210 GPa 的杨氏模量，TZM 刚度提高约 50%，因此具有更高的抗弹性变形能力。

（二）高温下杨氏模量逐渐下降

随着温度升高，材料原子振动增强，弹性模量会逐渐降低。TZM 在 600~1200 °C 范围内仍保持较高刚性，但继续升高温度后，杨氏模量会持续下降。即便如此，其高温刚度仍明显优于多数普通耐热合金，因此能够保持较好的尺寸稳定性。

（三）组织状态对杨氏模量影响较小

与抗拉强度、硬度等性能相比，杨氏模量主要由材料本身的原子结合力决定。因此，热处理、晶粒尺寸及加工状态虽然会对杨氏模量产生一定影响，但影响幅度远小于对强度和塑性的影响。正常工业生产中，各种 TZM 产品的杨氏模量通常变化不大。

（四）孔隙率影响实际模量

如果烧结致密度不足，材料内部残留孔隙，会降低有效承载面积，使实际杨氏模量下降。因此，高品质 TZM 通常通过 HIP（热等静压）进一步提高致密度，以获得更加稳定的弹性模量。

（五）杨氏模量影响结构设计

对于半导体热场、电子束设备、高温夹具及聚变装置等应用，设计人员通常根据杨氏模量计算零件在受力条件下的弹性变形。较高的杨氏模量有助于降低挠度，提高定位精度和长期运行稳定性。

（六）工程应用通常结合高温模量设计

由于 TzM 多数工作于高温环境，实际工程设计通常采用对应温度下的弹性模量，而不是单纯采用室温数据。对于长期高温服役设备，高温杨氏模量是有限元分析和结构计算的重要输入参数。

钛锆钼合金（TZM）的杨氏模量典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温杨氏模量	约 310~330 GPa	常用设计值约 320 GPa
与纯钼比较	基本接近	略受强化组织影响
高温变化	随温度升高逐渐降低	保持较高刚性
主要影响因素	温度、致密度、材料纯度	热处理影响较小

中钨智造认为，TZM 较高的杨氏模量是其区别于普通耐热材料的重要优势之一。相比仅关注强度指标，高端装备制造更加重视材料的刚度和尺寸稳定性。TZM 凭借约 320 GPa 的高弹性模量，在高温环境下仍能保持较小的弹性变形，因此广泛应用于半导体热场、高温精密工装、真空装备及聚变能源装置等对尺寸精度要求极高的领域。

Q56 钛锆钼合金（TZM）的蠕变性能如何？

蠕变性能（Creep Resistance）是评价 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）长期高温承载能力的核心性能指标，是 TZM 能够成为高温结构材料的重要原因之一。蠕变是指材料在恒定载荷作用下，即使应力低于屈服强度，也会随着时间逐渐产生永久塑性变形的现象。对于长期工作于 1000℃以上的高温设备而言，决定材料寿命的往往不是抗拉强度，而是抗蠕变能力。因此，在半导体热场、航空航天、高温炉及聚变装置中，蠕变性能通常比室温力学性能更加重要。

（一）TZM 具有优异的抗蠕变性能

相比纯钼，TZM 的抗蠕变性能可提高数倍。这是由于 TiC、ZrC 弥散强化颗粒能够有效阻碍位错攀移和晶界滑移，同时稳定晶界结构，显著降低高温塑性变形速度。因此，在长期高温载荷下，TZM 能够保持较好的尺寸稳定性。

（二）适用于长期高温服役

TZM 通常可长期工作于 1000~1400℃范围内。在这一温度区间，其蠕变速率明显低于纯钼，因此广泛应用于半导体单晶炉热场、高温模具、电子束设备及核工业部件。对于短时间工作，TZM 甚至可承受更高温度。

（三）第二相强化是抗蠕变核心机制

TiC 和 ZrC 颗粒均匀分布于晶内和晶界，可持续阻碍位错运动，并有效钉扎晶界。这种弥散强化机制能够延缓高温组织演化，提高材料长期稳定性，因此是 TZM 优异抗蠕变性能的根本来源。

（四）细晶与粗晶需要合理平衡

对于一般力学性能，细晶通常有利于提高强度；但对于长期高温蠕变，晶界过多又可能增加晶界滑移。因此，工程 TZM 通常采用均匀稳定的晶粒组织，而不是一味追求最细晶粒，以兼顾强度和抗蠕变能力。

（五）热处理直接影响蠕变寿命

合理热处理能够保持 TiC、ZrC 颗粒稳定，控制晶粒尺寸，并降低残余应力。如果热处理不当导致晶粒粗化、第二相颗粒聚集或组织退化，则抗蠕变性能会明显下降，长期服役寿命缩短。

（六）工程设计通常采用蠕变数据

高温设备设计通常依据蠕变断裂寿命、稳态蠕变速率及允许应力等参数进行计算，而不会仅依据室温强度。对于航空航天、核工业及聚变装置，还需进行长期蠕变试验，以验证材料在实际工况下的可靠性。

钛锆钼合金（TZM）的蠕变性能特点

性能特点	表现	工程意义
抗蠕变能力	明显优于纯钼	长期高温稳定工作
适用温度	长期约 1000~1400 °C	满足高温结构应用
强化机制	TiC、ZrC 弥散强化	抑制位错和晶界滑移
影响因素	晶粒、热处理、第二相稳定性	决定服役寿命
主要应用	半导体、航空航天、聚变、核工业	高温承载部件

中钨智造认为，抗蠕变性能才是真正体现 TZM 价值的核心指标。现代 TZM 之所以能够长期作为国际主流钼基高温结构材料，并不是因为其室温强度最高，而是因为其能够依靠稳定的 TiC、ZrC 弥散强化体系和较高的再结晶温度，在长期高温载荷下保持优异的组织稳定性和尺寸稳定性。未来高端 TZM 的发展方向，也将继续围绕提高长期蠕变寿命、延缓组织退化及增强高温服役可靠性展开

Q57 钛锆钼合金（TZM）的疲劳性能如何？

疲劳性能（Fatigue Properties）是指 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）在交变载荷或循环应力作用下抵抗疲劳裂纹萌生和扩展的能力。对于长期承受周期性热应力、机械振动及交变载荷的高温零部件而言，疲劳性能直接关系到材料的服役寿命和运行可靠性。由于 TZM 具有较高的强度、稳定的细晶组织以及 TiC、ZrC 弥散强化结构，其疲劳性能明显优于纯钼，在高温循环工况下表现尤为突出，因此广泛应用于半导体热场、高温模具、电子束设备、航空航天及核工业等领域。需要指出的是，TZM 公开发表的疲劳数据相较于钢铁和钛合金较少，工程应用通常依据材料状态及疲劳试验结果进行设计。

（一）室温疲劳性能优于纯钼

TZM 的疲劳极限明显高于纯钼。这是因为 Ti、Zr 元素形成的 TiC、ZrC 强化相能够提高基体强度，并抑制微裂纹萌生，使材料在循环载荷作用下具有更长的疲劳寿命。对于承受反复机械载荷的构件，TZM 具有较好的可靠性。

（二）高温疲劳性能更加突出

TZM 最大的优势体现在高温循环条件下。在高温环境中，普通钼材料容易因组织软化和晶界滑移导致疲劳寿命迅速下降，而 TZM 由于具有稳定的强化相和较高的再结晶温度，其高温疲劳性能保持较好，能够长期承受热循环载荷。

（三）热疲劳性能优异

热疲劳是指材料因反复加热和冷却产生交变热应力而发生裂纹的现象。TZM 具有较低的热膨胀系数、较高的导热率及优异的高温强度，因此能够有效降低热应力集中，提高热疲劳寿命。这也是 TZM 广泛用于高温炉热场、压铸模具及电子束设备的重要原因。

（四）晶粒尺寸影响疲劳寿命

细小均匀的晶粒能够提高疲劳裂纹萌生阻力，使疲劳寿命得到改善。如果晶粒发生明显粗化，裂纹更容易沿晶界扩展，疲劳寿命会明显下降。因此，合理控制晶粒组织是提高疲劳性能的重要措施。

（五）表面质量影响疲劳性能

疲劳裂纹通常首先从材料表面产生。如果表面存在加工划痕、裂纹、氧化层或尖锐缺口，会形成应力集中，大幅降低疲劳寿命。此，高品质 TZM 零件通常需要进行精密加工和表面处理，以降低裂纹萌生风险。

（六）残余应力影响疲劳寿命

加工过程中形成的残余拉应力容易促进疲劳裂纹扩展，而合理的应力消除退火能够降低内部残余应力，提高材料循环使用寿命。因此，热处理也是改善 TZM 疲劳性能的重要工艺措施。

（七）工程设计通常考虑安全裕度

对于航空航天、聚变装置及半导体设备，TZM 通常需要长期承受数百万次甚至上亿次循环载荷。因此，工程设计通常结合疲劳寿命试验、有限元分析及安全系数综合确定允许工作应力，而不会仅依据静态强度设计。

钛锆钼合金（TZM）的疲劳性能主要特点

性能特点	表现	工程意义
室温疲劳性能	优于纯钼	提高循环载荷寿命
高温疲劳性能	保持较好	适用于长期高温循环
热疲劳性能	优异	抵抗冷热循环开裂
影响因素	晶粒、表面质量、残余应力、第二相强化	决定疲劳寿命
典型应用	半导体热场、航空航天、高温模具、核工业	长寿命高温结构件

中钨智造认为，TZM 的疲劳性能优势主要来源于稳定的 TiC、ZrC 弥散强化体系、细晶组织及优异的高温组织稳定性。对于高端装备而言，疲劳寿命往往比静态强度更能反映材料的实际服役能力，因此现代 TZM 制造越来越重视组织均匀性、表面质量及残余应力控制，以进一步提高长期循环工况下的可靠性。

Q58 钛锆钼合金（TZM）的高温强度保持率是多少？

高温强度保持率（High Temperature Strength Retention）是指材料在高温条件下仍能够保持室温强度的能力，通常表示为高温强度与室温强度之比。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，高温强度保持率是衡量其是否适合作为高温结构材料的重要指标，

也是其区别于普通钼及其他耐热材料的重要优势之一。由于 TZM 采用 Ti、Zr 微合金化及 TiC、ZrC 弥散强化机制，在高温环境下能够有效抑制位错运动和晶界滑移，因此具有优异的高温强度保持能力。

（一）高温保持率明显优于纯钼

随着温度升高，所有金属材料的强度都会下降。但相比纯钼，TZM 由于第二相强化和晶界稳定作用，其强度下降速度明显较慢，因此在 1000℃以上仍能保持较高承载能力。这也是 TZM 能够长期替代纯钼用于高温结构件的重要原因。

（二）1000℃左右仍保持较高强度

在约 1000℃工作条件下，TZM 通常仍可保持室温强度的大部分水平。根据不同产品状态及测试条件，高温强度保持率一般可达到约 70%~80%，能够满足多数高温设备长期运行要求。

（三）1200~1400℃仍具有工程应用价值

随着温度进一步提高，高温强度继续下降，但 TZM 仍具有良好的承载能力。在 1200~1400℃范围内，材料依然能够保持较高强度，因此广泛用于单晶炉热场、高温炉发热结构、电子束设备及聚变装置等高温环境。

（四）强化机制决定保持率

TZM 优异的高温强度保持率主要来源于 TiC 和 ZrC 弥散强化。这些稳定的碳化物能够持续阻碍位错运动，并有效抑制晶界迁移，使材料在高温下仍保持较高强度和组织稳定性。相比单纯依赖固溶强化的材料，TZM 具有更加稳定的高温性能。

（五）组织稳定性影响保持率

如果晶粒发生粗化、第二相颗粒聚集或组织退化，高温强度保持率将明显下降。因此，高品质 TZM 通常通过优化热机械加工及热处理制度，提高组织稳定性，从而保证长期高温服役性能。

（六）不同测试条件结果存在差异

高温强度保持率与测试温度、加载时间、试样状态及试验方法密切相关。因此，不同标准和厂家公布的数据可能有所不同，工程应用通常应参考对应温度下的实际力学性能数据，而不能简单采用统一保持率。

钛锆钼合金（TZM）的高温强度保持特点

温度范围	高温强度表现	工程意义
室温	作为基准	最高强度
约 1000℃	保持约 70%~80%的室温强度	长期高温承载
1200~1400℃	强度继续下降但仍具有较高承载能力	高温设备长期运行
主要强化机制	TiC、ZrC 弥散强化、细晶组织	保持高温组织稳定
影响因素	温度、组织稳定性、热处理、服役时间	决定长期性能

中钨智造认为，高温强度保持率是 TZM 最具代表性的性能优势之一，也是其长期作为国际主流钼基高温合金的重要原因。相比单纯关注室温强度，现代高温装备更加关注材料在长期

高温环境中的实际承载能力。通过优化 TiC、ZrC 弥散强化体系、提高组织稳定性及控制热处理工艺，现代 TZM 能够在 1000 °C 以上长期保持较高强度，为半导体制造、航空航天、聚变能源及核工业提供可靠的高温结构材料解决方案。

Q59 钛锆钼合金（TZM）的长期工作温度是多少？

长期工作温度（Continuous Service Temperature）是指材料在规定载荷、规定环境和长期连续服役条件下，仍能够保持组织稳定、尺寸稳定及力学性能稳定的最高推荐使用温度。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，长期工作温度是衡量其高温应用能力的核心指标，也是材料选型时最重要的技术参数之一。由于 TZM 采用 Ti、Zr 微合金化和 TiC、ZrC 弥散强化技术，其长期耐高温能力明显优于纯钼，因此广泛应用于半导体热场、高温真空炉、航空航天、核工业及聚变装置等领域。TZM 的长期工作温度并非固定数值，而是与工作载荷、工作气氛、服役时间、应力水平及结构形式密切相关。

（一）推荐长期工作温度

在真空、氢气或惰性气氛等非氧化环境中，TZM 推荐长期连续工作温度一般为 1000~1400 °C。在这一温度范围内，材料能够长期保持较高的强度、良好的抗蠕变性能及优异的尺寸稳定性，是目前工业应用最广泛的工作温度区间。

（二）短时间可承受更高温度

如果工作时间较短、载荷较低，TZM 可承受更高温度。在真空或保护气氛下，短时间使用温度可达到约 1600 °C 甚至更高，但随着温度持续升高，材料的强度、蠕变寿命及组织稳定性都会逐渐下降，因此通常不建议作为长期连续工作温度。

（三）空气中工作温度受到限制

TZM 虽然具有很高的熔点（约 2620 °C），但其抗氧化能力有限。在空气中，当温度超过约 400~500 °C 时，氧化速度明显加快；超过 600 °C 后，材料会形成挥发性氧化物，导致质量损失和性能下降。因此，TZM 通常只能在真空、氢气、高纯氩气等非氧化环境中长期高温使用。

（四）长期工作温度受载荷影响

材料承受的机械应力越大，可允许的长期工作温度通常越低。如果长期承受较高载荷，则需要适当降低使用温度，以避免蠕变变形加速；如果载荷较小，则可适当提高工作温度。因此，工程设计通常根据实际应力水平确定安全工作温度。

（五）组织稳定性决定使用寿命

长期高温服役过程中，TiC、ZrC 强化颗粒必须保持稳定分布，晶粒不能发生明显粗化。如果长期工作温度过高，第二相颗粒会逐渐聚集、晶粒不断长大，从而导致高温强度下降、蠕变速率增加，最终缩短使用寿命。因此，组织稳定性决定了 TZM 长期工作温度的上限。

（六）典型应用温度范围

不同应用领域，对 TZM 的长期工作温度要求有所不同。半导体单晶炉热场一般长期工作于 1100~1400 °C；高温真空炉结构件通常工作于 1000~1300 °C；电子束设备及航空航天高温构件则根据具体工况选择不同温度等级。

钛锆钼合金（TZM）的长期工作温度参考

工作环境	推荐长期工作温度	说明
真空	约 1000~1400 °C	最常见应用环境
氢气、惰性气体	约 1000~1400 °C	高温性能稳定
短时间工作	可达约 1600 °C或更高	不建议长期连续使用
空气环境	一般不宜超过 400~500 °C	高温易氧化
主要限制因素	氧化、蠕变、组织稳定性	决定使用寿命

中钨智造认为，TZM 真正的优势并不是能够承受极高瞬时温度，而是在 1000~1400 °C 范围内长期保持高强度、低蠕变及优异尺寸稳定性。现代高端 TZM 的发展重点已从单纯提高耐热温度，转向提高长期组织稳定性和服役寿命，使材料能够在数千小时甚至数万小时的高温运行中仍保持稳定性能，这也是 TZM 持续成为国际主流钼基高温材料的重要原因。

Q60 为什么钛锆钼合金（TZM）比纯钼强？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）是在纯钼基础上加入少量 Ti、Zr 及 C，通过粉末冶金工艺制备而成的高性能钼基高温合金。虽然 Ti 和 Zr 的总添加量不足 1%，但由于形成了稳定的强化组织，使 TZM 的室温强度、高温强度、抗蠕变性能及长期服役寿命均明显优于纯钼，因此被认为是目前应用最成功的钼基高温合金之一。TZM 之所以比纯钼更强，并不是某一种强化机制单独作用的结果，而是固溶强化、第二相强化、晶界强化及组织稳定化等多种强化机制共同作用的结果。

（一）Ti 和 Zr 形成固溶强化

少量 Ti 和 Zr 原子进入钼晶格后，会引起晶格畸变。这种晶格畸变增加了位错运动阻力，使材料发生塑性变形更加困难，从而提高屈服强度和抗拉强度。虽然固溶强化贡献有限，但它为 TZM 整体强化提供了基础。

（二）形成 TiC 和 ZrC 强化颗粒

TZM 最重要的强化机制来自 TiC 和 ZrC 第二相。在烧结和热加工过程中，Ti、Zr 与 C 形成细小弥散的碳化物颗粒，并均匀分布于晶粒内部及晶界附近。这些颗粒能够有效阻碍位错运动，提高材料强度，同时抑制高温塑性变形。这是 TZM 强度明显高于纯钼的主要原因。

（三）强化晶界组织

TiC 和 ZrC 颗粒不仅强化晶内，还能够钉扎晶界。晶界迁移受到抑制后，晶粒在高温下不易长大，材料能够长期保持细小稳定的组织，因此高温强度和抗蠕变性能均明显提高。

（四）提高再结晶温度

纯钼经过高温使用后容易发生再结晶，导致晶粒迅速粗化，材料强度明显下降。TZM 由于第二相颗粒稳定存在，再结晶温度通常比纯钼提高约 200~300 °C，使材料在更高温度下仍能保持强化组织。

（五）提高抗蠕变能力

高温下材料变形主要来自位错攀移和晶界滑移。TiC 和 ZrC 颗粒能够持续阻碍这些变形机制，因此 TZM 的蠕变速率远低于纯钼，长期承载能力明显提高。这也是 TZM 广泛用于高温结构件的重要原因。

（六）提高组织稳定性

TZM 强化颗粒具有较高热稳定性，在长期高温条件下仍能够保持较好的弥散分布。比纯钼，TZM 组织退化速度更慢，因此强度下降更加缓慢，长期服役寿命显著提高。

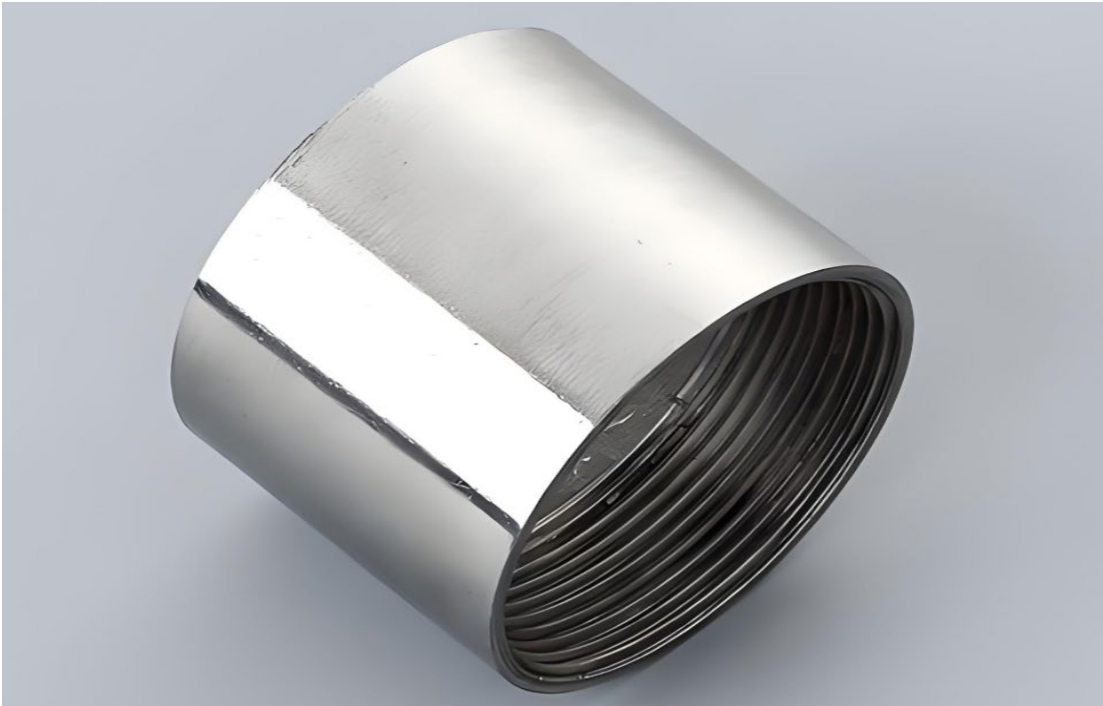
（七）粉末冶金工艺进一步提升性能

TZM 通常采用粉末冶金工艺制造，可使 Ti、Zr、C 均匀分布于整个材料中，并获得高致密度和均匀组织。相比传统熔炼材料，这种工艺更有利于充分发挥强化作用，也是 TZM 性能优于纯钼的重要原因之一。

钛钼钨合金（TZM）的比纯钼更强的主要原因

强化机制	作用	对性能的影响
固溶强化	Ti、Zr 进入钼晶格	提高强度
第二相强化	TiC、ZrC 弥散析出	显著提高强度和硬度
晶界强化	钉扎晶界	提高高温稳定性
再结晶强化	提高再结晶温度	延缓组织退化
抗蠕变强化	阻碍位错和晶界滑移	提高长期高温寿命
粉末冶金工艺	获得均匀组织和高致密度	提高综合性能

中钨智造认为，TZM 比纯钼更强的根本原因，并不是简单加入了 Ti、Zr 元素，而是通过粉末冶金工艺建立了一套稳定而高效的多重强化体系。其中，TiC、ZrC 弥散强化是核心机制，固溶强化、晶界强化及组织稳定化共同发挥作用，使 TZM 在室温、高温及长期服役条件下均明显优于纯钼。正因如此，TZM 几十年来始终保持着钼基高温结构材料主流牌号的地位，并成为国际高温工程领域应用最广泛的钼合金之一。





第七篇 钛锆钼合金（TZM）的热物理性能

Q61 钛锆钼合金（TZM）的导热率是多少？

导热率（Thermal Conductivity）是衡量材料传递热量能力的重要物理参数，通常以 $W/(m \cdot K)$ 表示。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，优异的导热性能能够快速均匀地传导热量，降低局部温度梯度和热应力，从而提高高温结构件的尺寸稳定性和服役寿命。因此，导热率是 TZM 应用于半导体热场、高温模具、电子束设备、聚变装置及真空炉等领域的重要性能指标之一。由于 TZM 以钼为基体，仅添加少量 Ti、Zr 和 C，因此其导热性能与纯钼接近，但略低于高纯钼。

（一）钛锆钼合金（TZM）的室温导热率

工业生产 TZM 的室温导热率通常约为 115~135 W/(m·K), 工程设计中一般采用约 125 W/(m·K) 作为典型参考值。相比纯钼约 135~145 W/(m·K) 的导热率, TZM 略有降低, 这是因为 Ti、Zr 固溶强化及 TiC、ZrC 第二相颗粒会增加电子散射, 使导热能力略有下降。尽管如此, TZM 的导热率仍明显高于大多数耐热钢、高温镍基合金及钛合金。

（二）温度升高时导热率变化

随着温度升高, TZM 导热率会发生一定变化。在中高温范围内, 由于电子和晶格热传导共同作用, 导热率通常缓慢下降, 但整体仍保持较高水平, 能够满足高温设备快速散热和均匀传热的要求。

（三）导热性能有助于降低热应力

TZM 具有较高导热率, 因此能够迅速将局部热量扩散至整个构件。这样可以减少局部过热现象, 降低温度梯度, 从而减小热应力, 提高材料抗热疲劳能力和尺寸稳定性。对于半导体热场及高温炉构件而言, 这一特点尤为重要。

（四）组织均匀性影响导热率

材料内部孔隙、夹杂、裂纹及组织不均匀都会阻碍热流传递, 使导热率下降。因此, 高品质 TZM 通常采用高纯原料、粉末冶金工艺及 HIP（热等静压）提高致密度, 以获得更加稳定的导热性能。

（五）第二相对导热率影响有限

TiC 和 ZrC 颗粒虽然会略微降低导热率, 但其含量极低, 通常不足 1%, 因此总体影响较小。相比导热率的轻微下降, 第二相带来的高温强度、抗蠕变性能及组织稳定性提升更加显著, 因此 TZM 仍具有极高的综合性能优势。

（六）高导热率适用于精密温控设备

由于 TZM 具有良好的导热性能和尺寸稳定性, 因此特别适用于对温度均匀性要求极高的设备, 例如蓝宝石单晶炉、硅单晶炉、电子束蒸发设备、离子注入设备及高温真空炉等。快速均匀导热能够有效提高产品质量和设备运行稳定性。

钛锆钼合金（TZM）的导热率典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温导热率	约 115~135 W/(m·K)	常用设计值约 125 W/(m·K)
与纯钼比较	略低	第二相强化导致轻微下降
高温变化	随温度升高缓慢下降	保持良好导热能力
主要影响因素	温度、致密度、组织均匀性、杂质含量	综合影响导热性能
典型应用	半导体热场、真空炉、电子束设备、高温模具	要求快速均匀导热

中钨智造认为, TZM 兼具较高导热率和优异高温强度, 是其区别于镍基高温合金的重要优势之一。现代高温装备越来越重视材料的热管理能力, 而 TZM 能够在保持强化组织和高温稳定性的同时, 仍具有优异的导热性能, 有助于降低热应力、提高温度均匀性和延长设备寿命, 因此已成为高端热场材料的重要选择。

Q62 钛锆钼合金（TZM）的热膨胀系数是多少？

热膨胀系数（Coefficient of Thermal Expansion, CTE）是描述材料随温度变化产生尺寸变化能力的重要物理参数，通常以 $\times 10^{-6}/K$ 表示。热膨胀系数越低，材料在加热和冷却过程中尺寸变化越小，热变形越小，尺寸稳定性越高。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，较低的热膨胀系数是其能够长期应用于半导体热场、真空炉、航空航天、高温模具及聚变装置等高精度设备的重要原因之一。

（一）室温热膨胀系数

TZM 在室温至约 100 °C 范围内的线膨胀系数通常约为 $4.8\sim 5.5\times 10^{-6}/K$ ，工程设计中一般采用约 $5.2\times 10^{-6}/K$ 作为典型参考值。由于 Ti 和 Zr 添加量极低，因此 TZM 热膨胀系数与纯钼基本相近，仅存在微小差异。相比普通碳钢约 $11\sim 13\times 10^{-6}/K$ 、不锈钢约 $16\sim 18\times 10^{-6}/K$ 及镍基高温合金约 $13\sim 16\times 10^{-6}/K$ ，TZM 热膨胀系数明显更低。

（二）随温度升高逐渐增大

与绝大多数金属材料相同，TZM 热膨胀系数会随着温度升高而逐渐增加。但即使在中高温范围，其膨胀系数仍保持较低水平，因此具有优异的尺寸稳定性。工程设计通常采用不同温度区间对应的平均热膨胀系数进行计算。

（三）低膨胀有利于尺寸稳定

TZM 尺寸变化较小，因此特别适用于要求高定位精度、高平面度及长期尺寸稳定性的设备。在半导体热场、电子束设备及聚变装置中，较低的热膨胀能够减少构件变形，提高设备加工精度和运行稳定性。

（四）降低热应力和热疲劳

热膨胀系数越低，加热和冷却过程中产生的热应力越小。TZM 配合其较高导热率，可进一步降低局部温差，因此具有优异的抗热疲劳性能。对于需要频繁冷热循环的设备，这一优势尤为明显。

（五）便于与其他低膨胀材料配合

TZM 常与石墨、高纯钼、钨及部分陶瓷材料共同组成高温结构。由于这些材料普遍具有较低热膨胀系数，因此 TZM 能够较好地实现热膨胀匹配，减少界面应力，提高整体结构可靠性。

（六）工程设计通常采用平均膨胀系数

由于热膨胀系数随温度连续变化，工程设计一般根据实际工作温度选取相应温度区间的平均值。对于高精度设备，还需结合有限元分析，对热变形进行预测和优化设计。

钛锆钼合金（TZM）的热膨胀系数典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温线膨胀系数	约 $4.8\sim 5.5\times 10^{-6}/K$	常用设计值约 $5.2\times 10^{-6}/K$
与纯钼比较	基本相同	略受微合金化影响
温度变化	随温度升高逐渐增大	整体保持较低水平
主要优势	热变形小、尺寸稳定	降低热应力

性能项目	典型数值	说明
典型应用	半导体热场、真空炉、航空航天、聚变装置	高精度高温结构件

中钨智造认为，低热膨胀系数是 TzM 能够长期应用于高精度高温装备的重要基础。相比许多耐热合金，TzM 不仅具有优异的高温强度和抗蠕变性能，还能够有效控制热变形，与高导热率共同构成其优异的热稳定性。这种高刚度、低膨胀、高导热和高温稳定性的综合优势，也是 TzM 在半导体制造、航空航天及先进能源装备中持续保持竞争力的重要原因。

Q63 钛锆钼合金（TzM）的热扩散率是多少？

热扩散率（Thermal Diffusivity）是衡量材料传递温度变化速度的重要热物性参数，表示材料受到局部加热后，热量向周围扩散的快慢，单位通常为 mm²/s 或 m²/s。热扩散率越高，材料达到热平衡的速度越快，局部温差越小，热应力也越容易得到缓解。对于 TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，较高的热扩散率配合较高的导热率和较低的热膨胀系数，使其具有优异的热稳定性，因此广泛应用于半导体热场、高温真空炉、电子束设备、聚变装置及航空航天等高温精密领域。热扩散率可按下式计算：

$\alpha = \lambda / (\rho \times C_p)$ 。其中， α 为热扩散率、 λ 为导热率、 ρ 为密度、 C_p 为比热容。

（一）室温热扩散率

TzM 室温热扩散率通常约为 50~60 mm²/s，工程设计中常采用约 55 mm²/s 作为典型参考值。这一数值明显高于普通结构钢、不锈钢及多数高温合金，因此 TzM 能够更快地消除局部温差，提高整体温度均匀性。

（二）温度升高时热扩散率变化

随着温度升高，TzM 导热率略有下降，而比热容逐渐增加，因此热扩散率通常呈缓慢下降趋势。尽管如此，在高温条件下，TzM 仍保持较高的热扩散能力，能够满足高温设备快速导热和均温的要求。

（三）高热扩散率降低热应力

局部快速升温容易产生较大的温度梯度，而 TzM 能够迅速将热量扩散至整个构件，减少局部过热现象。温度分布更加均匀后，热应力随之降低，可有效提高零件的热疲劳寿命和尺寸稳定性。

（四）组织均匀性影响热扩散率

孔隙、裂纹、夹杂及组织不均匀都会阻碍热流传递，使热扩散率下降。因此，高品质 TzM 通常采用高纯粉末、粉末冶金工艺及 HIP（热等静压）提高致密度，以保证稳定的热扩散性能。

（五）热扩散率决定温度响应速度

对于电子束蒸发、离子注入、单晶生长及高温模具等设备，材料不仅需要具有较高导热率，还需要快速响应温度变化。TzM 较高的热扩散率能够使设备更快达到热平衡，提高工艺稳定性和产品一致性。

（六）工程设计通常综合热物性参数

热扩散率通常不会单独作为设计依据，而是与导热率、比热容、热膨胀系数及高温力学性能

共同进行综合评价。现代热分析及有限元计算中，热扩散率是建立瞬态传热模型的重要输入参数。

钛锆钼合金（TZM）的热扩散率典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温热扩散率	约 50~60 mm²/s	常用设计值约 55 mm²/s
高温变化	随温度升高缓慢下降	保持较高热扩散能力
主要影响因素	导热率、密度、比热容、组织致密度	综合决定热扩散性能
工程优势	温度均匀、热应力低、响应速度快	有利于高温精密设备

Q64 钛锆钼合金（TZM）的比热容是多少？

比热容（Specific Heat Capacity, Cp）是指单位质量材料温度升高 1K 所需要吸收的热量，单位通常为 J/(kg·K)。比热容反映了材料储存热能的能力，也是热分析、热平衡计算及高温设备设计的重要基础参数。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，由于其主要成分仍为钼，因此比热容与纯钼基本接近。结合较高的导热率和热扩散率，TZM 能够快速吸收、传递和释放热量，从而保持优异的热稳定性。

（一）室温比热容

TZM 室温比热容通常约为 240~260 J/(kg·K)，工程设计中一般采用约 250 J/(kg·K)作为典型参考值。由于 Ti、Zr 及 C 添加量不足 1%，因此对总体比热容影响较小，TZM 与纯钼的比热容基本一致。

（二）温度升高时比热容增加

随着温度升高，原子热振动增强，比热容会逐渐增加。因此，在高温计算中，应采用对应温度下的比热容，而不能直接采用室温数据。现代热分析软件通常采用温度相关比热容曲线进行计算，以提高分析精度。

（三）比热容影响加热速度

在相同质量和相同加热功率条件下，比热容越低，材料升温越快。TZM 具有适中的比热容，因此能够较快达到工作温度，同时又不会因储热能力过低而造成温度剧烈波动。这一特点十分适合精密热场控制设备。

（四）与导热率共同决定热稳定性

单纯比热容高并不意味着热性能优异。TZM 真正的优势在于较高导热率、较高热扩散率、较低热膨胀系数及适中的比热容共同作用，使材料既能够快速传热，又具有良好的热稳定性。因此，其综合热性能明显优于许多普通耐热材料。

（五）高温设备设计的重要参数

比热容是热平衡计算、升温时间计算、热容量计算及瞬态温度场分析的重要输入参数。对于半导体单晶炉、电子束设备及高温真空炉，准确掌握 TZM 比热容有助于提高温度控制精度和设备运行效率。

（六）工程设计通常采用温度相关数据

由于比热容会随着温度连续变化,高温工程设计一般采用材料数据库提供的温度—比热容曲线,而不是单一固定值。这样能够更准确地预测材料在实际工况下的热响应行为。

钛锆钼合金（TZM）的比热容典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温比热容	约 240~260 J/(kg·K)	常用设计值约 250 J/(kg·K)
与纯钼比较	基本相同	微合金化影响很小
温度变化	随温度升高逐渐增加	高温分析采用对应数据
主要影响因素	温度、成分	温度影响最明显
工程应用	热分析、温度场计算、热容量设计	高温设备基础参数

中钨智造认为，比热容虽然不像高温强度和抗蠕变性能那样直观，但却是 TZM 热设计中不可缺少的重要参数。TZM 凭借适中的比热容、较高的导热率、优异的热扩散率及较低的热膨胀系数，形成了十分均衡的热物性体系，使其不仅能够快速建立热平衡，而且能够长期保持优异的温度均匀性和尺寸稳定性，这也是其成为高端热场材料的重要原因之一。

Q65 钛锆钼合金（TZM）的电阻率是多少？

电阻率（Electrical Resistivity）是衡量材料导电能力的重要物理参数，表示材料对电流流动的阻碍程度，单位通常为 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 或 $\Omega\cdot\text{m}$ 。电阻率越低，导电性能越好。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，由于其以钼为基体，仅添加少量 Ti、Zr 及 C，因此仍保持了良好的导电性能。虽然导电性略低于高纯钼，但远优于多数耐热合金，能够满足电子束设备、电阻加热元件、电极材料、高温导电结构件及真空电子器件等领域的使用要求。需要说明的是，TZM 通常不是作为高导电材料使用，而是利用其良好的导电性能与优异的高温力学性能相结合，满足高温环境下的综合应用需求。

（一）室温电阻率

TZM 室温电阻率通常约为 $5.5\sim5.8\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，工程设计中一般采用约 $5.6\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 作为典型参考值。相比高纯钼约 $5.2\sim5.4\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 的电阻率，TZM 略有提高，这是因为 Ti、Zr 固溶原子及 TiC、ZrC 强化颗粒增加了自由电子散射，使导电能力略有下降。尽管如此，其导电性能仍明显优于多数高温结构材料。

（二）温度升高时电阻率增加

随着温度升高，晶格热振动增强，自由电子散射增加，因此 TZM 电阻率会逐渐升高。这一规律与大多数金属材料一致。在高温设计过程中，应采用对应温度下的电阻率数据进行计算，而不能直接采用室温参数。

（三）组织均匀性影响导电性能

材料内部孔隙、裂纹、夹杂及组织不均匀都会增加电子散射，使电阻率上升。因此，高品质 TZM 通常采用高纯原料、粉末冶金工艺及 HIP（热等静压）提高致密度，以获得更加稳定的导电性能。

（四）第二相强化对导电率影响有限

虽然 TiC、ZrC 颗粒会增加一定电子散射，但其含量极低，因此总体影响有限。相比导电性能的轻微下降，第二相强化带来的高温强度、抗蠕变性能及组织稳定性提升更加显著，因此 TZM 仍具有极高的综合应用价值。

（五）良好的导电性能适用于高温电极

TZM 兼具较高导电率和高温强度，因此广泛用于电子束蒸发、电火花加工、电阻焊电极、高温导电夹具及真空电子器件等领域。相比普通导电材料，TZM 能够在高温环境下长期保持稳定的导电能力和尺寸精度。

（六）工程设计通常综合考虑电热性能

TZM 在实际应用中，电阻率通常与导热率、热膨胀系数及高温强度等参数共同考虑。对于高温导电构件而言，良好的导电性有助于降低焦耳热，提高设备运行效率，并减少局部过热现象。

钛锆钼合金（TZM）的电阻率典型参数

性能项目	典型数值	说明
室温电阻率	约 5.5~5.8 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	常用设计值约 5.6 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
与纯钼比较	略高	微合金化导致电子散射增加
温度变化	随温度升高逐渐增加	金属材料普遍规律
主要影响因素	温度、纯度、致密度、组织均匀性	综合影响导电性能
典型应用	电极、高温导电构件、电子束设备、真空电子器件	高温导电环境

中钨智造认为，TZM 虽然不是以导电性能见长，但其电阻率仍保持在钼材料的优良水平。相比普通高温合金，TZM 能够在保持较高导电能力的同时，兼具优异的高温强度、低热膨胀和高尺寸稳定性，因此成为高温导电结构件和真空电子装备的重要材料。

Q66 钛锆钼合金（TZM）的蒸气压为什么很低？

蒸气压（Vapor Pressure）是指材料在一定温度下，其表面原子逸出形成蒸气所产生的平衡压力。蒸气压越低，说明材料越不容易挥发，在高温真空环境中的质量损失越小，尺寸稳定性越好，污染风险也越低。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）继承了钼极低蒸气压的特点，同时通过 Ti、Zr 微合金化进一步提高了高温组织稳定性，因此在高温真空环境下具有极高的应用价值。这也是 TZM 广泛用于真空炉、半导体热场、电子束设备、航天真空系统及聚变装置的重要原因之一。

（一）高熔点决定了低蒸气压

TZM 以钼为基体，而钼熔点约为 2620 °C，属于高熔点金属。由于原子结合能较高，原子从材料表面逸出需要消耗较大的能量，因此即使在 1000~1600 °C 工作条件下，其蒸气压仍然极低。这也是高熔点金属普遍具有低蒸气压的重要原因。

（二）真空环境下挥发极少

在半导体及真空工业中，材料挥发会污染晶圆、光学元件及真空腔体。TZM 由于蒸气压极低，在长期真空高温环境下几乎不会产生明显挥发，因此能够保持设备内部洁净度，提高产品良率。这也是 TZM 成为半导体热场材料的重要原因之一。

（三）Ti、Zr 强化提高组织稳定性

虽然 TZM 蒸气压主要由钼基体决定，但 Ti、Zr 形成的 TiC、ZrC 强化相能够稳定组织，减缓晶界迁移及高温组织退化。组织更加稳定后，材料长期高温服役过程中尺寸变化更小，有助于进一步提高整体服役可靠性。需要指出的是，Ti、Zr 并不会直接降低蒸气压，其主要作用是提高高温组织稳定性，使材料在接近高温极限时仍能保持良好的综合性能。

（四）降低真空污染风险

高温材料如果蒸发严重，会在设备内壁形成沉积层，影响真空质量和工艺稳定性。TZM 极低的蒸气压能够显著降低蒸发污染，因此广泛应用于电子束蒸发源、离子注入设备、真空镀膜设备及聚变真空腔体等高洁净环境。

（五）适用于超高真空系统

超高真空设备通常要求材料具有极低的放气率和蒸发率。TZM 不仅蒸气压低，而且组织稳定、耐高温，因此能够长期满足超高真空系统对材料洁净性和稳定性的要求。

（六）蒸气压随温度呈指数增长

虽然 TZM 蒸气压极低，但随着温度不断升高，其蒸气压仍会按照热力学规律快速增加。因此，在极高温度下，仍需根据具体工作温度和真空等级进行材料选型，而不能认为 TZM 在任何温度下都不会挥发。

钛锆钼合金（TZM）的低蒸气压主要原因

原因	作用	工程意义
钼基体熔点高	原子结合能高	不易挥发
蒸气压极低	高温质量损失小	长期稳定工作
TiC、ZrC 强化组织	提高组织稳定性	保持尺寸稳定
真空挥发少	降低污染风险	提高设备洁净度
适用环境	真空、高纯氦气、氢气	高温真空设备

中钨智造认为，极低蒸气压是 TZM 能够长期应用于高温真空环境的重要基础，也是其区别于许多高温合金的重要优势之一。需要强调的是，TZM 低蒸气压主要来源于钼本身的高熔点和高原子结合能，而 Ti、Zr 微合金化的主要贡献在于提高组织稳定性和高温力学性能。正是低蒸气压、高温强度、低热膨胀及优异组织稳定性的综合作用，使 TZM 长期成为半导体、航空航天、聚变能源及真空工业最重要的高温结构材料之一。

Q67 钛锆钼合金（TZM）的热震性能如何？

热震性能（Thermal Shock Resistance）是指材料在短时间内经历剧烈升温或快速冷却时，抵抗热应力引起开裂、变形或失效的能力。对于长期工作于高温环境，并经常经历启停、冷热循环或局部急剧加热的设备而言，热震性能直接关系到材料的使用寿命和运行可靠性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）兼具较高导热率、较低热膨胀系数、高杨氏模量、高温强度及优异的组织稳定性，因此具有优异的热震性能，在众多耐高温金属材料中表现突出，广泛应用于半导体热场、高温真空炉、电子束设备、聚变装置及航空航天等领域。

需要说明的是，TZM 虽然具有优异的抗热震能力，但并非完全不会发生热震失效，其性能仍受到环境、结构设计及热循环条件等因素影响。

（一）高导热率降低温度梯度

TZM 室温导热率通常约为 115~135 W/(m·K)，能够快速将局部热量扩散到整个构件。由于温度分布更加均匀，材料内部产生的热应力明显减小，因此能够有效降低热震开裂风险。这也是 TZM 热震性能优于多数高温合金的重要原因之一。

（二）低热膨胀系数减少热变形

TZM 线膨胀系数约为 $4.8\sim5.5\times10^{-6}/K$ ，仅为普通耐热钢和不锈钢的一半左右。温度变化时尺寸变化较小，因此冷热循环过程中产生的热应力明显降低，有利于提高抗热震能力。

（三）高温强度保证结构完整性

即使在 1000~1400 °C 长期工作条件下，TZM 仍能够保持较高的强度和刚度。因此，在快速冷热循环过程中，材料仍具有较强的承载能力，不易发生塑性塌陷和永久变形。

（四）组织稳定提高热循环寿命

TiC、ZrC 弥散强化颗粒能够稳定晶粒组织，抑制晶界迁移及再结晶。经过大量冷热循环后，TZM 组织退化速度较慢，因此热震性能能够长期保持稳定，不会因组织粗化而迅速下降。

（五）热疲劳性能与热震性能相互关联

热震通常表现为一次或少数几次剧烈温度变化，而热疲劳则表现为长期反复冷热循环。TZM 不仅具有良好的热震性能，同时还具有优异的热疲劳性能，因此能够长期承受数千次甚至更多次冷热循环而保持稳定工作。

（六）氧化环境会降低热震能力

TZM 热震性能主要适用于真空、氢气及惰性气氛。如果在空气中高温使用，材料表面会迅速氧化，氧化层容易在冷热循环过程中剥落，从而降低热震寿命。因此，高温热震应用通常需要保护气氛或真空环境。

（七）结构设计同样影响热震寿命

实际工程中，尖角、厚薄突变、焊缝及应力集中部位更容易产生热震裂纹。因此，合理的设计、圆角过渡及均匀壁厚同样是提高 TZM 热震性能的重要措施。

钛锆钼合金（TZM）的热震性能特点

性能特点	表现	工程意义
导热率	高	快速均温，降低热应力
热膨胀系数	低	减少热变形
高温强度	高	防止高温变形
热循环寿命	长	长期冷热交替稳定工作
适用环境	真空、氢气、惰性气体	高温热循环设备

中钨智造认为，TZM 优异的热震性能来源于高导热率、低热膨胀系数、高温强度及稳定组织

的共同作用，而不是某一项性能单独决定。对于现代半导体装备、聚变装置及航空航天设备而言，材料不仅需要耐高温，更需要能够长期承受快速冷热循环。TZM 正是凭借优异的综合热物理性能，成为目前国际高端热场和真空设备中应用最成熟的钼基高温材料之一。

Q68 钛钨钼合金（TZM）的高温尺寸稳定性如何？

高温尺寸稳定性（High Temperature Dimensional Stability）是指材料在长期高温环境中，能够保持原有尺寸、形状和几何精度而不发生明显变形、蠕变、翘曲或组织退化的能力。对于半导体单晶炉、高温真空炉、电子束设备、聚变装置及航空航天等高端装备而言，高温尺寸稳定性往往比室温强度更加重要，因为即使材料没有断裂，只要发生微小变形，也可能导致设备精度下降甚至无法正常工作。TZM 凭借高温强度、高抗蠕变能力、低热膨胀系数及稳定的强化组织，在钼基材料中具有十分优异的高温尺寸稳定性。

（一）长期高温下变形较小

在真空或惰性气氛中，TZM 可长期工作于 1000~1400 °C。在这一温度范围内，材料能够长期保持较好的尺寸精度，不易发生明显弯曲、下垂或永久变形，因此广泛用于要求高尺寸精度的热场结构件。

（二）高抗蠕变性能保证尺寸稳定

高温长期工作时，材料最容易发生蠕变变形。TZM 由于 TiC、ZrC 弥散强化作用，能够有效抑制位错攀移和晶界滑移，因此蠕变速率明显低于纯钼，高温尺寸稳定性也显著提高。

（三）低热膨胀减少热变形

TZM 线膨胀系数仅约 $4.8 \sim 5.5 \times 10^{-6}/K$ 。在升温 and 降温过程中，尺寸变化较小，因此冷热循环后的累计变形较低，有利于保持构件长期几何精度。

（四）组织稳定避免尺寸漂移

长期高温工作过程中，如果晶粒不断长大或发生再结晶，材料尺寸稳定性会逐渐下降。TZM 中 TiC、ZrC 颗粒能够持续钉扎晶界，提高再结晶温度，减缓晶粒粗化速度，因此组织长期保持稳定，尺寸变化更加可控。

（五）适用于高精度热场设备

在半导体单晶炉中，热场构件长期工作于高温环境，任何细微变形都可能影响晶体生长质量。TZM 能够长期保持较好的尺寸稳定性，因此被广泛用于导流筒、加热器支撑件、隔热结构及高温承载部件。

（六）工作环境直接影响稳定性

TZM 高温尺寸稳定的前提是真空、氢气或惰性气氛。如果长期暴露于空气中高温工作，材料会发生氧化，氧化层不断生成和剥落，不仅降低力学性能，也会影响尺寸精度。因此，高温应用通常必须配合保护气氛使用。

（七）制造工艺决定最终稳定性

材料纯度、粉末冶金质量、HIP 致密化程度、锻造工艺及热处理制度都会影响最终尺寸稳定性。高品质 TZM 通常具有更加均匀的组织、更低的残余应力和更高的尺寸稳定性，因此不

同厂家产品在长期服役性能上可能存在一定差异。

钛锆钼合金（TZM）的高温尺寸稳定性特点

性能特点	表现	工程意义
长期工作温度	约 1000~1400 °C	长期保持尺寸稳定
抗蠕变性能	优异	防止长期高温变形
热膨胀系数	低	降低冷热循环变形
组织稳定性	高	防止晶粒粗化和尺寸漂移
典型应用	半导体热场、真空炉、电子束设备、聚变装置	高精度高温结构件

中钨智造认为，高温尺寸稳定性是 TZM 最具工程价值的核心性能之一，也是其能够长期服务于高端装备的重要原因。TZM 并不是依靠单一高强度获得尺寸稳定，而是依靠 TiC、ZrC 弥散强化、高再结晶温度、优异抗蠕变能力、低热膨胀系数及高导热率共同作用，在长期高温环境下保持稳定的几何尺寸和组织结构。这种综合优势，使 TZM 至今仍是半导体热场、航空航天及先进能源装备中最重要的高温结构材料之一。



Q69 钛锆钼合金（TZM）的发射率是多少？

发射率（Emissivity，又称辐射率）是衡量材料通过热辐射释放热能能力的重要参数，其数值介于 0~1 之间。发射率越高，材料通过热辐射散热的能力越强；发射率越低，则更多依赖导热或对流散热。对于 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）而言，其发射率与纯钼基本相近，但会受到表面状态、氧化程度、加工方式及工作温度等因素影响。由于 TZM 广泛应用于真空炉、半导体热场、电子束设备及聚变装置等高温真空环境，因此发射率是热设计、温度场模拟及热平衡计算中的重要参数。TZM 并不存在唯一固定的发射率数值，工程设计通常根据实际表面状态和工作温度选取相应数据。

（一）室温抛光表面发射率较低

经过机械抛光或精密加工后的 TZM 表面较为光滑，室温发射率通常约为 0.05~0.15。由于表面反射率较高，热辐射能力相对较弱，因此抛光表面更多依靠导热进行热量传递。

（二）高温时发射率逐渐增加

随着温度升高，材料表面对红外辐射的吸收和发射能力不断增强，因此发射率会逐渐提高。对于未经氧化的 TZM，在 1000~1600 °C真空环境中，发射率一般约为 0.15~0.30，高于室温水平，但仍属于较低发射率材料。

（三）表面粗糙度影响发射率

粗糙表面比镜面具有更高的发射率。喷砂、车削或磨削后的 TZM 表面，由于微观凹凸增加，能够增强热辐射，因此发射率通常高于精密抛光表面。在热分析过程中，应根据实际表面状态选择相应参数。

（四）氧化会明显提高发射率

如果 TZM 在空气中高温氧化，表面形成氧化钼层，其发射率会明显升高，甚至可达到 0.6 以上。虽然高发射率有利于辐射散热，但氧化层会降低材料寿命，因此 TZM 通常不允许在空气中长期高温工作，而是在真空、氢气或惰性气氛中使用。

（五）热设计通常采用温度相关发射率

现代热分析软件通常采用温度—发射率曲线，而不是固定数值。对于半导体热场及高温真空设备，合理选择发射率参数能够提高温度场模拟精度，使设计更加符合实际工况。

（六）发射率影响辐射换热能力

在真空环境中几乎不存在空气对流，热量主要依靠导热和热辐射传递。因此，TZM 发射率直接影响热辐射效率，是设计高温热场及真空设备时必须考虑的重要热物性参数之一。

钛锆钼合金（TZM）的发射率典型参数

表面状态	发射率（典型值）	说明
抛光表面（室温）	约 0.05~0.15	表面光滑，反射率高
真空高温表面	约 0.15~0.30	随温度升高逐渐增加
粗加工表面	高于抛光表面	粗糙度增加辐射能力
氧化表面	可达 0.6 以上	发射率提高，但不利于材料寿命

中钨智造认为，TZM 发射率并不是固定不变的材料常数，而是与表面状态、温度和氧化程度密切相关。对于高温真空设备而言，应采用符合实际工况的发射率数据进行热设计，而不能简单引用单一数值。TZM 较低且稳定的发射率，配合较高导热率和热扩散率，有助于实现更加均匀的温度分布，提高热场控制精度。

Q70 为什么钛锆钼合金（TZM）适用于真空环境？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）是目前应用最广泛的真空高温结构材料之一，广泛用于真空炉、半导体热场、电子束设备、离子注入设备、聚变装置、航天真空系统及高端科研装备。其适用于真空环境，并不是因为某一项性能突出，而是由于多种优异性能共同作用形成的综合优势。

（一）蒸气压极低，挥发极少

TZM 以高熔点钼为基体，在高温真空环境下具有极低的蒸气压。即使长期工作于 1000～1600℃，材料挥发量仍然很小，不易污染真空系统和工件，因此特别适用于半导体及真空电子设备。这是 TZM 适用于真空环境最重要的原因之一。

（二）高温强度保持良好

真空环境通常伴随着高温工作条件。TZM 在高温下仍具有优异的抗拉强度、屈服强度和抗蠕变性能，能够长期承载复杂载荷，不易发生塌陷和永久变形。因此，非常适合作为高温承载结构件。

（三）尺寸稳定性优异

TZM 具有较低的热膨胀系数、优异的抗蠕变能力及稳定的强化组织。长期高温工作过程中，材料尺寸变化很小，能够长期保持几何精度，这对于半导体热场及精密真空设备尤为重要。

（四）放气率低

真空设备要求材料尽可能减少气体释放，否则会降低真空度并影响工艺质量。经过规范脱气处理后的 TZM 具有较低放气率，不易释放吸附气体，因此能够满足高真空甚至超高真空系统的使用要求。

（五）热物理性能优异

TZM 具有较高导热率、较高热扩散率、适中的比热容及较低热膨胀系数。这些性能能够提高热场均匀性，降低热应力，使设备长期保持稳定运行。因此，在高端热场设计中具有明显优势。

（六）耐电子束和离子束轰击

TZM 具有较高熔点和良好的高温稳定性，在电子束、离子束及高能粒子作用下，不易发生熔化和严重组织退化。因此广泛应用于电子束蒸发设备、离子源及聚变装置等高能束流环境。

（七）组织长期稳定

TiC、ZrC 弥散强化颗粒能够稳定晶粒组织，提高再结晶温度，减缓晶粒粗化。因此，TZM 能够长期保持力学性能和尺寸稳定性，适合长寿命连续运行设备。

（八）需要注意氧化环境限制

虽然 TZM 非常适合真空环境，但在空气中超过约 400～500℃便会开始明显氧化，温度继续升高后氧化速度迅速增加。因此，其优势主要体现在真空、氢气及惰性气氛中，而不适用于长期空气高温环境。

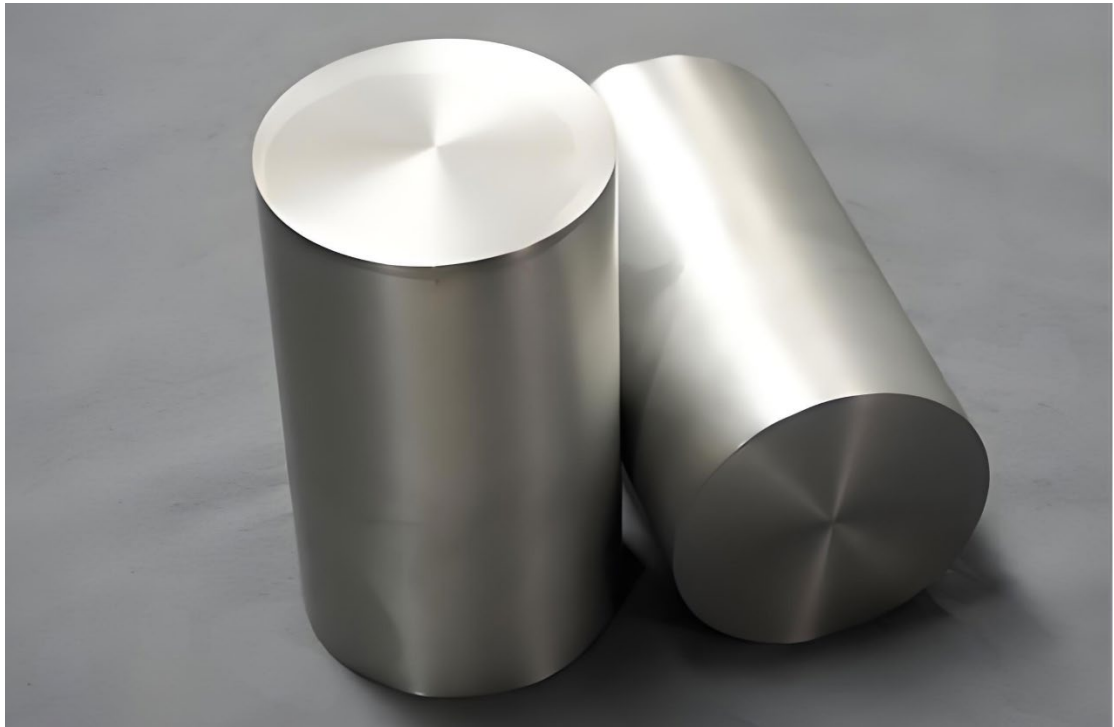
钛钨钼合金（TZM）适用于真空环境的主要原因

优势	工程意义
蒸气压极低	挥发少，不污染真空系统
放气率低	有利于保持高真空度
高温强度高	长期承载能力强
尺寸稳定性优异	长期保持几何精度

优势	工程意义
导热性能好	热场均匀，降低热应力
组织稳定	长寿命连续工作
耐电子束、离子束	适用于高能束流设备

中钨智造认为，TZM 之所以能够成为国际高端真空装备的主流材料，并非依靠单一性能，而是低蒸气压、低放气率、高温强度、高尺寸稳定性、优异热物理性能及稳定强化组织共同作用的结果。特别是在半导体制造、航空航天、聚变能源及高端真空装备等领域，TZM 已经形成成熟的工程应用体系，至今仍是综合性能最均衡、应用最广泛的钼基高温材料之一。





第八篇 钛锆钼合金（TZM）加工性能

Q71 钛锆钼合金（TZM）容易加工吗？

总体而言，TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）属于难加工材料，其切削加工难度明显高于普通钢材、不锈钢及铝合金，也略高于纯钼。这主要是因为 TZM 具有较高的强度、硬度和弹性模量，同时塑性较低，对刀具磨损较快，加工过程中容易产生崩边、裂纹和加工硬化现象。不过，只要采用合适的刀具材料、切削参数和加工工艺，TZM 完全可以实现高精度、高表面质量加工。目前已广泛应用于半导体热场、电子束设备、真空炉及航空航天等精密零部件制造。

（一）强度高，加工切削力较大

TZM 经过 TiC、ZrC 强化后，强度明显高于纯钼，因此切削阻力更大，对机床刚性和刀具强度提出更高要求。加工过程中如果切削参数选择不当，容易出现振刀、尺寸超差及刀具崩刃等问题。

（二）塑性较低，容易产生崩边

TZM 延伸率通常只有 10%~20%，低于普通钢材。尤其在室温条件下，材料塑性有限，加工薄壁件、尖角或小孔时，如果进刀过快或切削冲击较大，容易出现边缘崩裂或微裂纹。因此，加工时应尽量采用连续切削，避免冲击载荷。

（三）导热率较高但局部仍易积热

TZM 导热性能优于多数高温合金，但刀尖附近仍会产生较高切削热。如果刀具磨损后继续加工，切削温度会迅速升高，加快刀具失效，并影响工件表面质量。因此，应保持刀具锋利，并根据加工情况及时更换刀具。

（四）刀具磨损较快

由于 TzM 硬度较高，同时含有弥散分布的 TiC、ZrC 强化颗粒，对刀具具有一定磨粒磨损作用。加工过程中通常采用硬质合金、金属陶瓷或 PCD（聚晶金刚石）刀具，以提高刀具寿命和加工效率。

（五）加工后宜进行去应力处理

TzM 切削后会产生一定残余应力，特别是大型零件、薄壁件及高精度零件。对于尺寸稳定性要求较高的产品，可根据需要进行应力消除退火，以减少后续变形，提高长期服役稳定性。

（六）加工精度可以达到较高水平

虽然 TzM 加工难度较高，但采用合理工艺后，仍可获得较高的尺寸精度和表面质量。目前，高品质 TzM 零件可稳定加工至 IT6~IT7 级尺寸精度，表面粗糙度可达到 Ra0.4~0.8 μm，满足半导体和航空航天领域的要求。

钛锆钼合金（TzM）加工特点

项目	表现	工程影响
加工难度	较高	高于普通钢材和纯钼
切削力	较大	对机床刚性要求高
塑性	较低	易崩边、产生微裂纹
刀具磨损	较快	需采用高性能刀具
加工精度	较高	可满足精密制造要求

中钨智造认为，TzM 属于典型的高性能难加工材料，其加工难度主要来源于高强度、高硬度及较低塑性，而不是材料本身存在加工缺陷。通过合理选择刀具材料、切削参数及冷却方式，并结合必要的应力消除处理，TzM 完全能够实现高精度、高质量加工，目前已形成成熟的工业加工工艺。

Q72 如何车削钛锆钼合金（TzM）？

TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的车削加工应遵循低冲击、锋利刀具、稳定切削、充分冷却的原则。由于材料强度高、塑性较低，如果切削参数选择不合理，容易导致刀具磨损加快、工件崩边及尺寸精度下降。目前，TzM 车削工艺已经较为成熟，广泛应用于半导体热场、真空设备、航空航天及电子工业精密零件制造。

（一）选择合适刀具

TzM 通常采用细晶粒硬质合金刀具进行粗加工，高精度加工可采用涂层硬质合金、金属陶瓷或 PCD 刀具。刀具应保持锋利，前角适当增大，刀尖圆弧不宜过大，以降低切削力和加工硬化。

（二）采用中低切削速度

由于 TzM 切削温度较高，通常采用中低切削速度。一般推荐切削速度约 30~80 m/min，具体参数应根据刀具材料、工件尺寸及加工余量进行调整。速度过高会导致刀具迅速磨损，影响加工质量。

（三）合理控制进给量和切削深度

粗加工可适当增大切削深度，提高加工效率。精加工则应采用较小进给量和较浅切削深度，以获得较好的尺寸精度和表面质量。加工过程中应尽量保持连续切削，避免反复切入造成冲击。

（四）充分冷却润滑

车削 TzM 时宜采用充足的切削液进行冷却和润滑，以降低刀尖温度，减少刀具磨损。对于高精度零件，可采用高压冷却方式，提高排屑效果和加工稳定性。在某些真空零件加工中，也可根据后续工艺要求采用干式切削，但需严格控制切削参数。

（五）避免振动和冲击

TzM 对加工振动较为敏感。加工过程中应保证机床、夹具及刀具具有足够刚性，缩短刀具悬伸长度，避免断续切削和剧烈冲击，否则容易产生崩边、刀纹及尺寸误差。

（六）注意刀具磨损管理

TzM 加工时刀具磨损速度较快，应定期检查刀尖状态。一旦出现明显磨损，应及时更换刀具，避免继续加工导致表面粗糙度恶化、尺寸超差甚至产生加工裂纹。

（七）精加工后可进行去应力处理

对于大型精密零件或尺寸稳定性要求较高的产品，可在粗加工后进行应力消除退火，再进行精加工，以降低残余应力，提高长期尺寸稳定性。

钛锆钼合金（TzM）车削工艺建议

工艺项目	推荐做法	目的
刀具材料	硬质合金、金属陶瓷、PCD	提高刀具寿命
切削速度	约 30~80 m/min	降低刀具磨损
进给方式	连续、平稳	避免崩边和振动
冷却方式	充分冷却润滑	降低切削温度
刀具管理	保持锋利，及时更换	保证加工质量
后续处理	必要时进行去应力退火	提高尺寸稳定性

中钨智造认为，TzM 车削的关键不是追求高切削速度，而是保持稳定、连续、低冲击的加工过程。合理选择刀具材料、切削参数及冷却方式，可以显著提高加工效率和刀具寿命，同时获得优异的尺寸精度和表面质量。目前，TzM 车削工艺已经能够满足半导体、航空航天及高端真空装备对高精度零部件的制造要求

Q73 如何铣削钛锆钼合金（TzM）？

TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）属于典型的难加工高温合金材料，其铣削难度通常高于普通钢材和纯钼。由于材料具有高强度、高硬度、高弹性模量及较低塑性，在铣削过程中容易出现刀具磨损快、切削振动、边缘崩裂及表面质量下降等问题。实际生产中，只要采用合适的刀具材料、切削参数和加工工艺，TzM 能够获得较高的加工精度和表面质量，广泛应用于半导体热场、真空设备、电子工业及航空航天精密零件制造。

（一）选择高刚性刀具

TZM 铣削宜采用超细晶粒硬质合金立铣刀，高精度加工可采用 TiAlN、AlCrN 等耐磨涂层刀具。对于批量生产或高精度零件，也可采用 PCD（聚晶金刚石）刀具，以提高刀具寿命和加工稳定性。刀具应保持锋利，避免因刀刃磨损导致切削力增大和工件崩边。

（二）采用中低切削速度

由于 TZM 切削温度较高，铣削速度通常不宜过高。一般推荐切削速度约 30~80 m/min，根据刀具材料、加工余量及机床性能进行适当调整。切削速度过高容易造成刀具快速磨损，并影响工件表面质量。

（三）采用较小切削深度和适当进给

TZM 宜采用多次小切深加工，而不是一次大余量切削。粗加工可适当提高切削深度，提高材料去除效率；精加工应减小切削深度和进给量，以降低切削力，提高尺寸精度和表面质量。

（四）尽量采用顺铣

在机床刚性允许的情况下，推荐采用顺铣方式。顺铣切削更加平稳，切削力较小，可降低工件表面撕裂和崩边风险，同时延长刀具使用寿命。

（五）保证机床和夹具刚性

TZM 加工过程中切削力较大，如果机床、夹具或刀具刚性不足，容易产生振动。振动不仅会加速刀具磨损，还会导致加工表面出现振纹、尺寸误差甚至局部崩裂，因此应尽可能提高装夹刚性，并缩短刀具悬伸长度。

（六）充分冷却和及时排屑

铣削过程中宜采用充足切削液连续冷却，以降低切削温度并减少刀具磨损。同时，应及时清除切屑，避免切屑反复切削工件表面，影响加工质量。

（七）精加工后可进行应力消除

对于大型平板件、薄壁件或高精度零件，可在粗加工后进行应力消除退火，再进行精加工，以减少加工变形，提高长期尺寸稳定性。

钛锆钼合金（TZM）铣削工艺建议

工艺项目	推荐做法	工程目的
刀具材料	超细晶粒硬质合金、涂层刀具、PCD	提高耐磨性
切削速度	约 30~80 m/min	控制切削温度
铣削方式	优先采用顺铣	降低切削力
切削深度	粗加工较大、精加工较小	提高加工质量
冷却方式	充分冷却、及时排屑	延长刀具寿命
加工特点	高刚性、低振动	保证尺寸精度

中钨智造认为，TZM 铣削加工的核心在于控制切削热和切削冲击。相比追求高切削效率，更应重视加工稳定性和刀具寿命。采用高刚性设备、优质刀具及合理切削参数，可稳定获得高尺寸精度和优良表面质量，目前相关工艺已广泛应用于半导体装备和航空航天精密零件制造。

Q74 钛锆钼合金（TZM）如何钻孔？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）钻孔加工比普通钢材更加困难，尤其是小孔、深孔及高精度孔加工，对刀具、设备及工艺要求较高。由于 TZM 具有较高强度、较低塑性和较大的弹性回复，钻孔过程中容易出现钻头磨损快、排屑困难、孔壁粗糙及孔口崩边等问题。因此，应采用合理的钻削工艺，以保证孔加工质量和刀具寿命。

（一）采用高性能钻头

TZM 钻孔通常采用细晶粒硬质合金钻头，高精度加工可采用 TiAlN 等耐磨涂层钻头。对于微孔加工，也可采用 PCD 钻头，以提高耐磨性和尺寸稳定性。头必须保持锋利，否则容易产生较大轴向力，导致孔壁质量下降。

（二）采用较低钻削速度

由于 TZM 切削热较高，钻孔速度通常应低于普通钢材。一般推荐切削速度约 10~40 m/min，根据钻头材质、孔径大小及加工条件进行适当调整。钻削速度过高会明显缩短钻头寿命。

（三）合理控制进给量

钻孔应采用稳定连续的进给速度。进给量过小容易导致刀具摩擦发热，进给量过大则容易造成钻头崩刃和孔口崩边，因此应根据孔径合理选择进给参数。

（四）深孔采用分步钻削

对于较深孔加工，应采用分步钻削或啄钻（Peck Drilling）方式。每钻入一定深度后退出钻头排屑，再继续钻削，可有效降低切削温度，防止切屑堵塞，提高孔加工质量。

（五）充分冷却润滑

钻孔过程中应采用充足切削液冷却，并尽量将切削液直接输送至钻尖。高压内冷钻头能够进一步改善排屑效果，提高钻头寿命，尤其适用于深孔加工。

（六）防止孔口崩边

TZM 塑性较低，钻头即将钻穿工件时容易发生孔出口崩裂。可在工件背面增加支撑板，或适当降低钻穿阶段进给速度，以减少出口崩边，提高孔口质量。

（七）高精度孔宜采用后续精加工

对于尺寸精度和表面粗糙度要求较高的孔，一般采用钻孔后再进行扩孔、铰孔或精镗加工。这样可进一步提高孔径精度、圆柱度和表面质量，满足精密装配要求。

钛锆钼合金（TZM）钻孔工艺建议

工艺项目	推荐做法	工程目的
钻头材料	硬质合金、涂层钻头、PCD	提高耐磨性
切削速度	约 10~40 m/min	控制切削温度
进给方式	平稳连续	保证孔质量
深孔加工	分步钻削、啄钻	改善排屑
冷却方式	充分冷却、高压内冷优先	延长钻头寿命

工艺项目	推荐做法	工程目的
精密孔加工	钻孔后扩孔、铰孔或精镗	提高尺寸精度

中钨智造认为，T_{ZM} 钻孔加工最大的挑战在于切削热控制、排屑效率和孔口完整性。合理选择硬质合金或涂层钻头，采用低速、稳定进给、充分冷却及分步排屑工艺，可以有效提高加工效率和孔加工质量。对于高精度零件，钻孔通常只是预加工工序，后续配合扩孔、铰孔或精镗，才能充分发挥 T_{ZM} 在高端装备中的精密制造优势。

Q75 钛锆钼合金（T_{ZM}）如何磨削？

T_{ZM} (Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy) 具有较高硬度、高弹性模量及优异的高温强度，因此磨削是其精加工的重要工艺之一，广泛用于获得高尺寸精度、低表面粗糙度及良好的几何精度。相比车削、铣削等切削加工，磨削能够有效改善表面质量，但如果工艺控制不当，也容易产生磨削烧伤、表面微裂纹及残余应力增加等问题。目前，T_{ZM} 磨削工艺已较为成熟，可满足半导体热场、航空航天、电子工业及真空设备等高端制造领域的精密加工要求。

（一）优先采用金刚石砂轮

由于 T_{ZM} 硬度较高，通常采用金刚石砂轮进行磨削加工。树脂结合剂金刚石砂轮适用于精磨，可获得较好的表面质量；金属结合剂金刚石砂轮耐磨性更高，适用于批量生产和高效率加工。普通刚玉砂轮磨削效率较低，磨损较快，一般不推荐用于 T_{ZM} 精加工。

（二）采用较小磨削深度

T_{ZM} 宜采用小切深、多次磨削方式。一次磨削量过大会导致磨削温度迅速升高，增加烧伤和微裂纹风险，同时也会降低尺寸精度。精磨阶段通常采用较小进给量，以获得更好的表面质量。

（三）充分冷却防止磨削烧伤

磨削过程中应连续供应充足冷却液，及时带走磨削热。如果冷却不足，局部温度过高可能导致表面氧化、组织变化、残余应力增加及微裂纹形成，从而影响零件寿命。

（四）及时修整砂轮

随着加工进行，砂轮磨粒会逐渐钝化。应定期修整砂轮，使磨粒保持锋利，提高切削能力，降低磨削力和磨削温度，同时保证加工尺寸和表面质量的稳定性。

（五）控制表面粗糙度

通过合理选择砂轮粒度、磨削参数及修整方式，T_{ZM} 磨削后的表面粗糙度通常可达到 Ra0.2～0.8 μm。对于光学、电子及半导体领域的高精度零件，还可进一步采用抛光等工艺获得更低的粗糙度。

（六）防止残余应力影响尺寸稳定性

磨削虽然属于精加工，但仍可能引入一定残余应力。对于大型、高精度或长期高温服役零件，可根据需要进行低温应力消除处理，以进一步提高尺寸稳定性和服役可靠性。

（七）磨削后应进行质量检测

精密零件磨削完成后，应检测尺寸精度、平面度、圆度、表面粗糙度及是否存在磨削裂纹。对于重要零件，还可采用金相检测、渗透检测等方法检查表面质量，确保满足使用要求。

钛锆钼合金（TZM）磨削工艺建议

工艺项目	推荐做法	工程目的
砂轮类型	金刚石砂轮优先	提高加工效率和表面质量
磨削方式	小切深、多次磨削	防止烧伤和裂纹
冷却方式	连续充分冷却	降低磨削温度
砂轮维护	定期修整	保持磨粒锋利
表面质量	Ra0.2～0.8 μm	满足精密制造要求
后续检测	检测尺寸、粗糙度及裂纹	保证产品质量

中钨智造认为，磨削是 TZM 获得高尺寸精度和优异表面质量的关键精加工工艺，其核心在于控制磨削热和避免表面损伤。采用优质金刚石砂轮、小切深、多次磨削及充分冷却，不仅能够获得优良的加工质量，还能最大程度保持 TZM 原有的力学性能和组织稳定性。

Q76 能否进行钛锆钼合金（TZM）EDM 加工？

可以。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）具有良好的导电性，因此能够采用电火花加工（EDM，Electrical Discharge Machining）。对于复杂型腔、窄槽、深孔、微细结构及传统切削难以完成的精密零件，EDM 已成为 TZM 的重要加工方法之一。不过，电火花加工属于热加工过程，会在工件表面形成重熔层和热影响区，因此加工后通常需要进行适当的表面处理，以保证零件的服役性能。

（一）TZM 适合采用电火花加工

TZM 电阻率适中，能够稳定形成放电通道，因此无论是成形电火花加工还是电火花线切割（Wire EDM），均可实现较高的加工精度。对于复杂几何形状、锐角及微细结构，EDM 具有明显优势。

（二）适用于复杂结构加工

传统刀具难以加工的深窄槽、微孔、异形孔、复杂型腔及高深宽比结构，都可采用 EDM 完成。由于加工过程中刀具与工件不直接接触，不会产生传统切削中的机械切削力，因此特别适用于高精度复杂零件。

（三）不会产生切削力变形

EDM 依靠脉冲放电去除材料，不存在机械切削载荷。因此，对于薄壁件、细长件及高精度零件，不易产生因切削力导致的变形，提高了加工精度。

（四）加工效率低于传统切削

由于材料通过放电逐层去除，EDM 加工速度通常低于车削、铣削等机械加工方式。因此，在实际生产中，一般采用传统切削进行粗加工，再利用 EDM 完成复杂结构和精加工。

（五）表面会形成重熔层

放电过程中局部温度可达数千摄氏度，材料熔化后迅速凝固，会形成一定厚度的重熔层及热影响区。对于承受高温、高应力或疲劳载荷的重要零件，通常需要通过精磨、抛光或轻微去除加工层，消除重熔层的不利影响。

（六）线切割适用于板材和轮廓加工

电火花线切割广泛用于 TZM 板材、异形轮廓及高精度二维零件加工。其加工精度较高，可获得较好的轮廓尺寸一致性，是半导体、电子工业及科研设备制造中的常用工艺。

（七）加工参数需合理优化

TZM 导热性能较好，放电参数应根据工件厚度、精度要求及加工方式进行优化。合理控制脉冲宽度、放电电流及加工能量，有助于降低表面粗糙度和重熔层厚度，提高加工质量。

钛锆钼合金（TZM）电火花加工特点

项目	表现	工程意义
是否可加工	可以	导电性能良好
适用工艺	成形 EDM、线切割 EDM	满足复杂结构加工
加工特点	无机械切削力	适合薄壁及精密零件
加工效率	中等偏低	常作为精加工工艺
表面状态	存在重熔层	必要时进行后续处理
典型应用	微孔、异形孔、型腔、复杂轮廓	提高制造能力

中钨智造认为，EDM 是 TZM 复杂结构制造的重要补充工艺，其最大优势在于能够加工传统机械加工难以完成的复杂几何形状，同时避免机械切削力引起的变形。但由于电火花加工会形成重熔层和热影响区，对于高可靠性零件，建议在 EDM 后增加精磨、抛光或轻量精加工，以充分发挥 TZM 优异的高温性能和长期服役性能。

Q77 钛锆钼合金（TZM）能否激光加工？

可以。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）能够采用激光加工，包括激光切割、激光打孔、激光微加工、激光刻蚀及激光焊接等多种工艺。目前，激光加工已广泛应用于半导体、航空航天、电子工业及科研装备领域，尤其适用于高精度、小尺寸及复杂结构零件制造。不过，由于 TZM 属于高熔点金属，熔点约为 2620℃，同时导热率较高，因此激光加工难度明显高于普通钢材、不锈钢及铝合金，对激光设备和工艺参数要求较高。

（一）可以进行激光切割

TZM 可采用光纤激光器或固体激光器进行切割。由于材料导热率较高，激光能量容易扩散，因此通常需要较高功率密度，并合理控制切割速度，以保证切缝质量和切割效率。对于薄板零件，激光切割能够获得较高的尺寸精度和较小的热影响区。

（二）适用于激光微孔加工

激光能够加工传统钻削难以完成的微孔、微槽及复杂微结构。对于电子器件、真空元件及科研设备中的微小特征加工，激光加工具有非接触、高精度和自动化程度高等优点。

（三）热影响区较小

与传统机械加工相比，激光属于局部加热加工，热影响区通常较小。合理优化激光功率、扫描速度及焦点位置，可有效减少材料组织变化，提高加工质量。

（四）容易产生重熔层

激光加工过程中，局部材料熔化后迅速凝固，会形成一定厚度的重熔层。对于高精度、高可靠性零件，可根据需要增加磨削、抛光或化学清洗等后处理工序，以去除重熔层，提高表面质量。

（五）保护气体十分重要

TZM 在空气中高温容易氧化，因此激光加工通常采用高纯氩气或高纯氮气作为保护气体。充足的保护气体不仅能够减少氧化，还能改善切口质量，提高加工稳定性。

（六）适合自动化生产

激光加工无需机械接触，易于实现数控和自动化控制。对于批量生产、高一致性及复杂轮廓加工，激光具有较高生产效率，并能够降低刀具磨损带来的成本。

（七）加工参数需根据厚度优化

不同厚度 TZM 材料需要采用不同激光功率、焦点位置及切割速度。对于厚板加工，应适当提高功率并降低切割速度；对于薄板及微加工，则应采用较低热输入，以减少热变形。

钛锆钼合金（TZM）激光加工特点

项目	表现	工程意义
是否可加工	可以	已广泛用于精密制造
适用工艺	激光切割、打孔、微加工、刻蚀、焊接	满足复杂加工需求
热影响区	较小	有利于保持材料性能
表面状态	存在少量重熔层	必要时进行后处理
保护气体	高纯氩气、高纯氮气	防止高温氧化
自动化程度	高	适合批量精密制造

中钨智造认为，激光加工是 TZM 精密制造的重要技术之一，特别适用于复杂轮廓、微孔及自动化加工。由于 TZM 具有高熔点和高导热率，加工时应重点控制热输入和保护气氛，并根据产品要求进行必要的后处理，以获得最佳的尺寸精度和表面质量。

Q78 如何焊接钛锆钼合金（TZM）？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）可以焊接，但焊接难度较高，明显高于普通钢材及不锈钢。由于 TZM 塑性较低、再结晶温度高，并且在高温下容易吸收氧、氮、氢等气体，因此焊接过程中容易产生裂纹、气孔及组织脆化等缺陷。目前，TZM 焊接主要采用 TIG 焊、电子束焊（EBW）、激光焊（LBW）及真空钎焊等工艺，其中电子束焊和激光焊应用最为广泛。

（一）焊接环境应采用真空或保护气氛

TZM 在高温状态下极易氧化，因此焊接过程中必须采用真空环境，或使用高纯氩气、高纯氮气等惰性气体进行充分保护。保护不足会导致焊缝氧化、塑性下降及焊接性能明显恶化。

（二）电子束焊是最佳工艺

电子束焊具有热输入集中、焊缝窄、热影响区小及焊接变形小等优点。由于整个焊接过程通常在高真空环境下完成，可有效避免氧化，因此成为 TZM 高质量连接的首选方法，广泛应用于航空航天、核工业及半导体设备制造。

（三）激光焊适合精密零件

激光焊具有热输入小、速度快、自动化程度高等特点。对于薄板、小尺寸零件及精密组件，激光焊能够获得较好的焊接质量，但同样需要高纯保护气体，以防止焊缝氧化。

（四）TIG 焊可用于部分场合

采用 TIG 焊焊接 TZM 时，应尽量使用直流正接（DCEN），并采用高纯惰性气体进行全程保护。由于热输入相对较大，焊接过程中应严格控制焊接参数，以减少热影响区和焊接裂纹的产生。对于重要结构件，一般优先选择电子束焊或激光焊。

（五）焊前必须充分清洁

焊接前应彻底去除工件表面的油污、氧化层及杂质。通常采用机械打磨配合酒精或丙酮清洗，以减少气孔和夹杂，提高焊接质量。

（六）焊后可进行热处理

根据零件使用要求，可在焊后进行适当的应力消除热处理，以降低残余应力，提高尺寸稳定性和服役可靠性。对于高可靠性零件，还应进行焊缝无损检测，确认不存在裂纹、未熔合及气孔等缺陷。

（七）焊接接头性能略低于母材

由于焊接热循环会改变局部组织，焊缝及热影响区的力学性能通常略低于母材。因此，对于承受较大载荷的重要构件，应合理设计焊缝位置，并严格控制焊接工艺参数。

钛锆钼合金（TZM）焊接工艺特点

项目	推荐做法	工程意义
推荐工艺	电子束焊、激光焊	焊缝质量高
可采用工艺	TIG 焊、真空钎焊	满足一般连接需求
保护方式	真空、高纯氩气、高纯氮气	防止氧化
焊前处理	去除油污和氧化层	提高焊接质量
焊后处理	应力消除、无损检测	提高可靠性
焊接特点	热影响区性能略低于母材	合理设计焊缝位置

中钨智造认为，TZM 具有良好的可焊性，但焊接质量高度依赖工艺控制。对于高端装备制造，电子束焊仍是综合性能最佳的连接方法，激光焊则适用于自动化和精密焊接。无论采用哪种工艺，都应重点控制保护气氛、热输入及焊后质量检测，充分发挥 TZM 优异的高温性能和长期服役可靠性。

Q79 如何扩散焊钛锆钼合金（TZM）？

扩散焊（Diffusion Bonding，DB）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最重要的

固相连接工艺之一。其原理是在高温、一定压力和真空或保护气氛条件下，使接触表面的原子发生相互扩散，从而形成冶金结合，而不产生明显熔化。由于整个连接过程属于固相连接，焊缝组织均匀、变形小、残余应力低，因此广泛应用于航空航天、半导体设备、聚变装置、真空电子器件及高温热场等领域。

（一）连接表面必须精密加工

扩散焊对接触面的质量要求极高。焊接前应采用磨削、研磨或抛光等工艺获得平整表面，并保证较低的表面粗糙度，使两结合面能够充分接触，提高原子扩散效率。通常要求接触面无明显划痕、毛刺和加工损伤。

（二）焊前彻底清洁

TZM 表面的油污、氧化物及其他污染物会阻碍原子扩散。焊接前应采用酒精、丙酮等有机溶剂清洗，并避免焊后再次受到污染。对于高可靠性连接，还可采用真空加热脱气处理，提高连接质量。

（三）采用高真空环境

扩散焊通常在高真空条件下进行，以防止高温氧化。高真空不仅能够减少氧、氮等有害气体进入结合界面，还能够提高原子扩散能力，获得更加稳定的冶金结合。对于特殊情况，也可采用高纯氩气等惰性气氛进行保护。

（四）合理控制温度和压力

扩散焊需要同时施加温度和压力。焊接温度通常选择在再结晶温度以下或附近，使材料具有较高扩散能力，同时避免晶粒严重粗化；压力则应保证结合面充分贴合，但不能过大，以免造成零件变形。实际工艺参数应根据零件尺寸、厚度及结构进行优化。

（五）保温时间影响结合质量

达到焊接温度后，应保持一定保温时间，使界面原子充分扩散。保温时间不足，结合强度较低；保温时间过长，则可能导致晶粒长大，影响高温性能。因此，应根据工件尺寸及扩散距离合理确定保温制度。

（六）冷却过程应均匀

扩散焊完成后，应控制冷却速度，避免因温度梯度过大而产生热应力。对于大型精密构件，均匀冷却有助于提高尺寸稳定性，减少变形风险。

（七）适用于复杂高温组件

扩散焊特别适用于传统焊接难以完成的复杂结构连接，例如多层热场组件、真空密封结构、异形流道及高温承载构件。由于焊缝几乎不存在明显熔化组织，因此连接后的高温性能通常优于熔焊接头。

中钨智造认为，扩散焊是 TZM 最理想的连接工艺之一。由于整个连接过程没有明显熔化，因此能够最大程度保持 TZM 原有的高温组织和力学性能。对于高可靠性、高真空及高温服役构件，扩散焊已成为国际高端装备制造的重要连接技术。

Q8o 如何真空钎焊钛锆钼合金（TZM）？

真空钎焊（Vacuum Brazing）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）常用的连接工艺之一。与熔焊不同，真空钎焊利用熔点低于母材的钎料熔化后填充接头间隙，通过润湿和扩散形成冶金结合，而母材本身不发生熔化。由于热输入较低、变形小、适合复杂结构及异种材料连接，真空钎焊广泛应用于半导体设备、航空航天、高温热场、电子器件及真空系统制造。

（一）采用高真空焊接环境

TZM 在高温下容易氧化，因此真空钎焊通常在高真空炉内进行。高真空环境能够防止母材和钎料氧化，提高钎料润湿能力和焊缝质量，同时避免焊接污染。

（二）合理选择钎料

TZM 真空钎焊常采用镍基、铜基或贵金属基钎料，具体选择应根据工作温度、接头强度及耐腐蚀要求确定。对于高温长期服役零件，应优先选用耐高温性能较好的钎料体系。

（三）焊前充分清洁

焊接前应彻底去除 TZM 表面的油污、氧化物及杂质。可采用机械打磨配合酒精、丙酮等有机溶剂清洗，必要时进行真空脱气处理，以提高钎料润湿效果。

（四）控制接头间隙

真空钎焊要求合理的装配间隙。间隙过小，钎料不易流动；间隙过大，则容易形成气孔或降低接头强度。合理控制接头尺寸是获得高质量焊缝的重要条件。

（五）合理制定加热制度

加热过程中应采用均匀升温方式，避免局部温差过大。
达到钎料熔化温度后，应保持适当保温时间，使钎料充分润湿和填充接头，并完成必要的界面扩散。

（六）冷却速度应适当控制

焊接结束后，应均匀冷却，避免因热应力导致接头开裂或零件变形。对于大型、高精度构件，可根据产品要求制定专门的冷却制度，提高尺寸稳定性。

（七）适用于异种材料连接

真空钎焊不仅可连接 TZM 与 TZM，还可连接 TZM 与石墨、陶瓷、不锈钢及部分高温合金等材料。因此，在半导体热场及真空设备制造中应用十分广泛。

（八）钛锆钼合金（TZM）真空钎焊工艺特点

项目	推荐做法	工程意义
焊接环境	高真空炉	防止氧化，提高润湿性
钎料选择	镍基、铜基、贵金属基	满足不同工况要求
焊前处理	去除油污和氧化层	提高焊接质量

项目	推荐做法	工程意义
接头设计	合理控制间隙	保证钎料充分填充
加热方式	均匀升温、合理保温	获得稳定接头
典型应用	真空设备、半导体热场、异种材料连接	复杂结构制造

中钨智造认为，真空钎焊是 TZM 连接复杂结构和异种材料最成熟、应用最广泛的工艺之一。其最大的优势在于焊接变形小、尺寸精度高、适合批量生产，并能够实现传统熔焊难以完成的结构连接。在高端真空装备和半导体制造领域，真空钎焊已成为 TZM 组件制造的重要工艺。

Q81 能否进行电子束焊钛锆钼合金（TZM）？

可以。电子束焊（Electron Beam Welding, EBW）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最成熟、最可靠的焊接工艺之一，也是航空航天、核工业、半导体装备、聚变装置及高端真空设备中应用最广泛的 TZM 连接方法。电子束焊利用高速电子束轰击工件，将电子动能转化为热能，实现局部快速熔化和深熔焊接。由于整个焊接过程通常在高真空环境中进行，因此能够有效避免 TZM 高温氧化，获得质量优异的焊接接头。

（一）真空环境是电子束焊的最大优势

TZM 在空气中高温容易发生氧化，而电子束焊通常在高真空环境下完成。真空不仅能够防止氧、氮、氢等有害气体进入焊缝，还能够保证电子束稳定传播，因此特别适合 TZM 等高熔点活性金属焊接。

（二）热输入集中，热影响区小

电子束焊具有极高的能量密度，热量集中在极小区域。因此，焊缝宽度较窄，热影响区较小，可有效减少晶粒粗化和组织退化，同时降低焊接变形和残余应力。

（三）能够焊接厚壁 TZM 构件

电子束焊具有较大的熔深能力，可实现一次焊透较厚的 TZM 零件。相比传统 TIG 焊，多层焊接需求明显减少，有利于提高焊接效率和接头质量。

（四）焊缝质量较高

合理控制电子束功率、聚焦位置及焊接速度后，可获得致密、连续、气孔少、裂纹少的焊缝组织。焊缝强度通常较高，能够满足高温、高真空及高可靠性设备的使用要求。

（五）焊接变形较小

由于热输入区域极小，焊接过程中整体受热范围有限，因此工件变形明显小于传统熔焊。对于高精度零件及复杂组件，这一优势尤为明显。

（六）焊前仍需严格清洁

虽然电子束焊在真空中进行，但焊接前仍必须彻底清除油污、氧化层及杂质。通常采用机械清理配合酒精或丙酮清洗，必要时进行真空脱气，以减少焊接缺陷。焊后宜进行质量检测对于重要构件，应进行 X 射线检测、超声检测或金相分析，检查焊缝内部是否存在气孔、裂

纹及未熔合等缺陷。根据产品要求，也可进行焊后应力消除处理，提高长期服役可靠性。

（七）钛锆钼合金（TZM）电子束焊特点

项目	表现	工程意义
是否适用	非常适用	TZM 首选焊接工艺
焊接环境	高真空	防止高温氧化
热影响区	很小	保持母材性能
焊接变形	较小	提高尺寸精度
焊缝质量	高	满足高可靠性要求
典型应用	半导体设备、航空航天、聚变装置、真空系统	
	高端装备制造	

中钨智造认为，电子束焊是目前 TZM 综合性能最优的焊接工艺。其高真空环境、高能量密度及低热输入特点，能够最大程度保持 TZM 原有的组织和高温性能，因此长期以来一直是高端真空设备、半导体装备及航空航天领域 TZM 连接的首选方案。

Q82 钛锆钼合金（TZM）能否用于增材制造（3D 打印）？

可以，但目前仍属于高难度、高技术门槛的增材制造材料。近年来，随着激光选区熔化(SLM)、激光粉末床熔融（LPBF）、电子束选区熔化（EBM）及定向能量沉积（DED）等技术的发展，TZM 增材制造已取得明显进展，并逐步进入科研及部分工程应用阶段。不过，由于 TZM 具有高熔点、高导热率及较大的热应力敏感性，其打印难度明显高于钛合金、不锈钢及镍基高温合金，目前尚未形成大规模工业化应用。

（一）可以采用多种增材制造工艺

目前 TZM 主要采用激光粉末床熔融（LPBF）、电子束熔融（EBM）及定向能量沉积（DED）等工艺进行研究和制造。其中，电子束增材制造由于在真空环境中进行，对 TZM 更加有利，可有效降低氧化风险。但高熔点提高打印难度较大，TZM 熔点约 2620 °C，远高于普通金属材料。因此，需要较高激光或电子束能量密度才能实现稳定熔化，对设备性能提出更高要求。

（二）高导热率容易产生热应力

TZM 导热率较高，熔池热量迅速向周围扩散。快速冷却容易形成较大的温度梯度，从而产生较高热应力，增加裂纹和变形风险。因此，打印过程中通常需要基板预热及优化扫描策略。

（三）粉末质量要求极高

增材制造要求 TZM 粉末具有高纯度、高球形度、良好流动性及较窄粒径分布。粉末中的氧、氮、碳等杂质含量应严格控制，否则容易降低打印件性能。

（四）打印后通常需要热处理

增材制造过程中会产生残余应力及组织不均匀现象。因此，打印完成后通常需要进行应力消除退火、热等静压（HIP）或再结晶热处理，以改善组织，提高致密度和力学性能。

（五）复杂结构优势明显

对于传统加工难以制造的内部流道、轻量化结构及复杂异形零件，增材制造具有明显优势。

因此，在聚变装置、高温热场及航天结构件等领域具有较好的发展前景。目前，TZM 增材制造仍主要应用于科研、试制及高附加值零件制造。随着设备、粉末及工艺不断成熟，其在高端装备制造中的应用范围有望进一步扩大。

（六）钛锆钼合金（TZM）增材制造特点

项目	表现	工程意义
是否可打印	可以	已进入工程研究阶段
主要工艺	LPBF、EBM、DED	满足不同制造需求
技术难点	高熔点、高导热率、热应力大	工艺控制要求高
粉末要求	高纯度、高球形度、高流动性	保证打印质量
后处理	退火、HIP 等	提高组织和性能
应用方向	聚变装置、半导体、航空航天、高温热场	高附加值复杂构件

中钨智造认为，TZM 完全具备增材制造的可行性，并已成为国际高温难熔金属增材制造的重要研究方向。虽然目前受高熔点、高导热率及热应力控制等因素影响，工业化应用仍处于发展阶段，但随着高品质球形粉末、电子束增材制造及热处理工艺不断成熟，TZM 有望在聚变能源、航空航天、半导体及高端热场装备等领域发挥越来越重要的作用。





第九篇 钛锆钼合金（TZM）与其他钼材料的对比

Q83 钛锆钼合金（TZM）与纯钼有什么区别？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）是在纯钼（Mo）基础上加入少量 Ti、Zr 和 C，通过粉末冶金工艺制备而成的高性能钼基高温合金。虽然 TZM 的钼含量通常仍超过 99%，但由于形成了弥散分布的 TiC、ZrC 强化相，其综合性能明显优于纯钼，是目前应用最广泛的钼基高温结构材料。总体来看，纯钼具有导热性能好、加工性能较好、成本较低等优点，而 TZM 则具有更高的高温强度、更好的抗蠕变性能、更高的再结晶温度和更长的使用寿命。

（一）化学成分不同

纯钼主要由钼组成，杂质含量较低。TZM 则在钼基体中加入约 0.40~0.55% 的 Ti、约 0.06~0.12% 的 Zr 及约 0.01~0.04% 的 C，在烧结过程中形成 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒。因此，TZM 属于典型的沉淀强化型钼基高温合金。

（二）强化机制不同

纯钼主要依靠晶粒本身承载载荷，高温下晶界容易迁移，再结晶较快，因此高温强度下降较快。TZM 则通过 TiC、ZrC 颗粒强化、晶界强化及少量固溶强化共同作用，有效抑制位错运动和晶界迁移，因此具有更高的高温力学性能。

（三）高温强度明显不同

室温下，TZM 抗拉强度通常比纯钼提高约 20%~50%。随着温度升高，两者差距进一步扩大。在 1000℃以上，TZM 仍能保持较高强度，而纯钼强度下降较快，因此 TZM 更适合长期高温承载。

（四）抗蠕变性能不同

纯钼长期高温使用时容易发生蠕变变形。TZM 由于第二相颗粒能够有效阻碍位错运动和晶界滑移，因此抗蠕变能力明显提高，长期尺寸稳定性更好。这也是 TZM 成为高温结构材料的重要原因之一。

（五）再结晶温度更高

纯钼再结晶温度通常约为 900~1100℃。TZM 由于第二相颗粒钉扎晶界，再结晶温度一般提高至约 1300~1400℃，部分产品甚至更高，因此高温组织更加稳定。

（六）加工性能略有差异

纯钼塑性略高，加工相对容易。TZM 由于强度和硬度更高，加工难度有所增加，对刀具、设备及加工工艺要求更高，但仍具有良好的机械加工性能。

（七）应用领域不同

纯钼主要用于电极、加热元件、蒸发舟、耐高温零件及部分结构件。TZM 则主要用于半导体热场、真空炉、高温模具、电子束设备、聚变装置、航空航天及其他高温承载部件。

（八）TZM 与纯钼性能对比

对比项目	TZM	纯钼
化学组成	Mo-Ti-Zr-C 合金	几乎全部为 Mo
强化方式	第二相强化、晶界强化、固溶强化	基体强化为主
高温强度	更高	较低
抗蠕变性能	优异	一般
再结晶温度	更高	较低
加工难度	略高	略低
使用寿命	更长	相对较短
典型应用	高温结构件	一般耐高温零件

Q84 钛锆钼合金（TZM）与钼铪碳（MHC）有什么区别？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和 MHC（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy，钼铪碳合金）都是高性能钼基高温合金，二者均采用第二相强化机制，并主要通过粉末冶金工艺制造。相比 TZM，MHC 采用 Hf 和 C 形成 HfC 强化颗粒，由于 HfC 具有更高的热稳定性，因此 MHC 在更高温度下仍能保持较好的组织稳定性和高温强度。不过，MHC 成本更高、加工难度更大，目前应用范围不及 TZM 广泛。

（一）强化元素不同

TZM 采用 Ti、Zr 和 C 形成 TiC、ZrC 强化颗粒。MHC 则采用 Hf 和 C 形成 HfC 强化颗粒。

由于 HfC 熔点约 3900 °C，明显高于 TiC 和 ZrC，因此高温稳定性更好。

（二）高温性能不同

TZM 适用于长期工作温度约 1200~1400 °C。MHC 能够在更高温度下保持组织稳定，其长期使用温度通常高于 TZM，更适合极端高温环境。再结晶温度也不同，TZM 再结晶温度一般约 1300~1400 °C；MHC 由于 HfC 颗粒具有更强的晶界钉扎能力，再结晶温度通常更高，因此长期组织稳定性优于 TZM。

（三）抗蠕变性能不同

两种材料均具有优异抗蠕变能力，但在 1400 °C 以上，MHC 通常表现更加突出。这是因为 HfC 颗粒在高温下更稳定，对晶界迁移和位错运动的抑制作用更加持久。

（四）加工性能不同

TZM 经过多年工业应用，加工工艺成熟，车削、铣削、磨削及焊接技术较完善。MHC 由于强度更高、强化颗粒更稳定，加工难度进一步增加，对刀具和工艺要求更高。

（五）成本差异较大

Ti、Zr 资源较丰富，因此 TZM 成本相对较低。
Hf 属于稀有金属，价格明显高于 Ti 和 Zr，因此 MHC 制造成本较高，通常仅用于极端工况或高附加值产品。

（六）应用领域有所不同

TZM 目前广泛应用于半导体、真空炉、高温模具、航空航天及聚变装置等领域。
MHC 主要用于要求更高工作温度、更长寿命或更严苛服役环境的特殊装备，例如超高温热场、高功率电子束设备及部分核聚变装置。

（七）TZM 与 MHC 性能对比

对比项目	TZM	MHC
强化元素	Ti、Zr、C	Hf、C
第二相	TiC、ZrC	HfC
高温强度	很高	更高
抗蠕变性能	优异	更优
再结晶温度	高	更高
加工性能	较成熟	难度更高
成本	较低	较高
应用范围	最广	高端特殊领域

中钨智造认为，TZM 和 MHC 代表了两代典型的钼基高温合金。TZM 凭借成熟的工艺、优异的综合性能和较高的性价比，至今仍是全球应用最广泛的钼基高温结构材料；MHC 则依靠 HfC 强化体系，在超高温性能方面进一步提升，更适用于极端服役环境。但从工业应用规模来看，TZM 仍然是目前最成熟、最经济、综合性能最均衡的主流选择。

Q85 钛锆钼合金（TZM）与钼钛锆碳合金（Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon alloy）有什么异同？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）与 Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy（钼钛锆碳合金）本质上是同一种材料，并不存在材料上的区别，只是命名方式不同。TZM 是国际上广泛采用的商品名称和牌号名称，而 Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy 则是按照材料组成进行描述的学术名称，两者均指以钼（Mo）为基体，加入少量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C），并通过粉末冶金工艺制备的沉淀强化型钼基高温合金。此，在国际标准、科研论文、航空航天文献及工业产品目录中，这两个名称通常可以互换使用。严格来讲，两者属于同一种材料 TZM 并不是一种独立于钼钛锆碳合金之外的新材料，而是钼钛锆碳合金最成熟、应用最广泛的工业牌号。无论采用哪种名称，其强化机制、组织结构、制造工艺及应用领域基本一致。

（一）命名方式不同

TZM 属于商业简称，其名称来源于 Titanium（Ti）、Zirconium（Zr）和 Molybdenum（Mo）的英文缩写组合。Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy 则采用材料全称描述，更常见于科研论文、教材、专利及部分国际文献。国际标准通常采用 TZM 名称。目前国际主流标准和工业规范普遍采用 TZM 作为正式名称，例如 ASTM 标准、AMS 航空材料标准以及众多国际企业产品目录。在科研论文中，则经常同时写作 TZM alloy 或 Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon (TZM) alloy。

（二）化学成分一致

典型 TZM 材料通常含有约 0.40~0.55% 的 Ti、约 0.06~0.12% 的 Zr 及约 0.01~0.04% 的 C，其余为 Mo。不同厂家允许范围略有差异，但总体均符合 TZM 材料体系。

（三）强化机制一致

两者均通过 Ti 和 C 形成 TiC、Zr 和 C 形成 ZrC 弥散强化颗粒。这些第二相颗粒能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，提高材料的高温强度、抗蠕变性能及再结晶温度。因此，两者的强化机理完全相同。

（四）生产工艺一致

目前工业 TZM 全部采用粉末冶金路线生产，包括高纯钼粉配料、混粉、压制、烧结、热等静压（部分产品）、锻造、轧制、热处理及机械加工等工艺。科研文献中所称的 Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy，同样采用上述工艺制造。

（五）应用领域一致

无论称为 TZM 还是钼钛锆碳合金，其主要应用领域均包括半导体热场、真空炉、高温模具、电子束设备、聚变装置、航空航天、高温炉构件及其他高温结构件。目前全球绝大多数工业产品均直接采用 TZM 这一名称进行销售和推广。

（六）TZM 与 Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy 对比

对比项目	TZM	Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy
材料本质	相同	相同

对比项目	TZM	Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon Alloy
化学成分	相同	相同
强化机制	TiC、ZrC 沉淀强化	TiC、ZrC 沉淀强化
制造工艺	粉末冶金	粉末冶金
国际标准	普遍采用 TZM 名称	多用于学术描述
工业应用	广泛使用	通常指同一种材料
是否存在性能差异	无	无

Q85A 什么是钼钛锆碳合金（Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon alloy,TZC）合金？

钼钛锆碳合金（Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon alloy）TZC 合金是一种性能优异的钼（Mo）基合金，它的全称是钼钛锆碳合金（Molybdenum-Titanium-Zirconium-Carbon alloy）。我们可以把它看作是另一种常见钼合金 TZM 的升级版。

（1）核心成分与升级逻辑

TZC 合金的典型成分（质量分数）为：钛（Ti）约 1.25%、锆（Zr）约 0.15%、碳（C）约 0.15%，其余为钼（Mo）基体。它通过在钼中加入钛、锆和碳，形成弥散分布的碳化物颗粒（如 TiC、ZrC），对合金起到沉淀强化和固溶强化作用，从而极大提升了高温性能。

（2）性能优势

与 TZM 合金相比，TZC 合金的主要优势在于更优的高温性能：（1）更高的高温强度和硬度：加入的合金元素含量更高，使其在超高温环境下能保持更好的强度和硬度。（2）更高的再结晶温度：抵抗高温下晶粒长大的能力更强，意味着能在更苛刻的温度下工作。当然，性能的提升也带来了一个短板：它的塑性会相对较差，因此加工成型比 TZM 合金更困难，对加工设备和工艺要求更高。

（3）主要用途

凭借出色的耐高温能力，TZC 合金主要被用在吃高温的领域：（1）高温模具：这是它的核心应用之一，例如用作粉末高温合金的等温锻造模具，以及有色金属和黑色金属的压铸模具。（2）航空航天部件：用于制造火箭的喷嘴、燃气管道等需要承受极端高温的零部件。（3）核工业部件：用作核能设备中的热交换器、屏蔽材料和支撑架等。

Q86 钛锆钼合金（TZM）与锆钼钼（ZHM）有什么区别？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和 ZHM（Zirconium-Hafnium-Molybdenum Alloy）均属于高性能钼基高温合金，两者都利用碳化物或高稳定强化相提高高温性能，但强化元素体系存在明显差异。TZM 采用 Ti、Zr 和 C 作为主要强化元素，以 TiC、ZrC 弥散强化为主；ZHM 则采用 Zr、Hf 等元素进行强化，利用 Hf 较高的高温稳定性进一步提高材料在超高温环境下的组织稳定性和服役寿命。总体而言，TZM 综合性能成熟、应用广泛；ZHM 则定位于更高温、更苛刻工况，但制造成本明显更高。TZM 采用 Ti 和 Zr 作为主要强化元素，原材料供应较成熟，因此制造成本相对较低。ZHM 含有 Hf，Hf 属于稀有金属，价格远高于 Ti，因此整体成本明显高于 TZM。除了材料成本不同之外，还有以下异同：

（一）强化体系不同

TZM 主要形成 TiC 和 ZrC 强化颗粒。ZHM 则引入 Hf 元素，通过形成更加稳定的强化相，提高材料在超高温下的组织稳定性。于 Hf 具有较高熔点和较低扩散速率，因此高温强化效果更加持久。

（二）高温性能不同

TZM 能够长期工作于约 1200~1400 °C。ZHM 更适用于更高温度工况，在长期高温服役过程中，强度保持率和组织稳定性通常优于 TZM。TZM 依靠 TiC、ZrC 颗粒抑制晶界迁移。ZHM 中的 Hf 强化相在高温下更加稳定，因此再结晶温度通常更高，长期组织稳定性也更好，因此，再结晶稳定性也不同。

（三）抗蠕变能力不同

两种材料均具有优异抗蠕变性能。由于 Hf 强化作用更加稳定，ZHM 在超高温长期载荷条件下通常表现出更低的蠕变速率和更长的使用寿命。

（四）加工性能不同

TZM 加工工艺成熟，可采用常规车削、铣削、磨削及焊接工艺。ZHM 由于强化程度更高，加工难度进一步增加，对刀具性能、加工参数及设备刚性要求更高。

（五）应用领域不同

TZM 目前广泛应用于半导体装备、航空航天、电子工业、真空炉及聚变装置等领域。ZHM 主要用于要求极高工作温度、极长服役寿命及特殊高温环境的科研设备和先进能源装备。

（六）TZM 与 ZHM 性能对比

对比项目	TZM	ZHM
强化元素	Ti、Zr、C	Zr、Hf（部分体系含 C）
强化特点	TiC、ZrC 强化	Hf 高温强化
高温强度	很高	更高
抗蠕变性能	优异	更优
再结晶稳定性	高	更高
加工性能	较成熟	难度更高
材料成本	较低	较高
典型应用	主流高温结构件	超高温特殊装备

中钨智造认为，TZM 和 ZHM 都属于先进钼基高温合金，但设计目标有所不同。TZM 追求综合性能、制造成本和工业成熟度之间的最佳平衡，因此成为全球应用最广泛的钼基高温结构材料；ZHM 则利用 Hf 元素进一步提升超高温性能，更适用于极端工况和高端科研装备，但由于成本高、加工难度大，目前应用规模明显小于 TZM。

Q87 钛锆钼合金（TZM）与钨合金相比如何？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和钨合金（Tungsten Alloy）都是典型的高温难熔金属材料，在航空航天、半导体、真空设备、电子工业及高温装备领域均有广泛应用。但两者的设计目标并不相同。TZM 更加注重高温结构性能、加工性能及热加工能力，而钨合金则更强调超高熔点、高密度、耐烧蚀及抗辐照性能。因此，两者并不存在绝对优劣，而是针对不同应用场景进行选择。

（一）熔点不同

TZM 属于钼基合金，其熔点约 2620 °C。钨合金以钨为主要成分，钨的熔点约 3420 °C，是所有金属中最高的，因此钨合金能够适用于更高温度环境。对于超高温热源、等离子体面对材料及高温电子发射器件，钨合金具有明显优势。

（二）密度差异较大

TZM 密度约 10.1~10.2 g/cm³。钨合金密度通常可达 17~19 g/cm³，约为 TZM 的两倍，因此广泛用于配重、惯性元件、射线屏蔽及高密度部件。如果需要轻量化设计，则 TZM 更具优势。

（三）加工性能不同

TZM 塑性优于钨，加工性能明显好于多数钨合金。车削、铣削、钻孔、磨削及塑性加工均相对容易，刀具寿命也较长。钨合金硬度较高、脆性更大，加工难度更高，加工成本通常也更高。

（四）高温强度各有优势

在 1000~1400 °C 范围内，TZM 具有非常优异的高温强度和抗蠕变性能。当工作温度进一步提高至 1500 °C 以上时，钨合金凭借更高熔点和更好的高温稳定性，其优势逐渐体现。因此，两者适用温度范围有所不同。TZM 导热性能优异，热膨胀系数较低，具有良好的抗热震性能。普通钨合金虽然耐高温能力更强，但由于材料刚性较高，在剧烈冷热循环条件下，对热应力控制要求更高。

（五）成本不同

TZM 以钼为主要原料，材料价格通常低于高性能钨合金。同时，TZM 加工效率更高，因此综合制造成本一般低于钨合金。

（六）应用领域有所区别

TZM 主要用于半导体热场、真空炉、高温模具、电子束设备、聚变装置及航空航天结构件。钨合金则主要用于高温电极、聚变第一壁、电子发射阴极、X 射线靶材、火箭喷管、屏蔽材料及高密度配重等领域。

（七）TZM 与钨合金性能对比

对比项目	TZM	钨合金
基体材料	钼	钨
熔点	约 2620 °C	约 3420 °C
密度	约 10.2 g/cm³	约 17~19 g/cm³

对比项目	TZM	钨合金
加工性能	较好	较难
高温强度	1000~1400 °C优势明显	超高温优势明显
抗热震性能	优异	良好
综合成本	较低	较高
典型应用	高温结构件	超高温、高密度部件

（八）中钨智造综合观点

作为极少数既详细解钨合金性能，又熟悉 TZM 材料性能的生产者，中钨智造认为，TZM 和钨合金分别代表钼基和钨基难熔金属材料的发展方向。TZM 凭借优异的加工性能、高温强度及较低成本，成为高温结构件的主流选择；钨合金则依靠极高熔点、高密度和优异耐烧蚀性能，在超高温和极端环境中具有不可替代的优势。工程选材应综合考虑工作温度、结构载荷、重量要求及制造成本，而不是简单比较两者性能高低。

Q88 钛锆钼合金（TZM）与石墨相比有哪些优势？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和石墨（Graphite）都是高温设备中广泛使用的材料，尤其在真空炉、半导体热场、晶体生长及高温工艺设备中经常出现。石墨具有重量轻、耐高温、易加工及价格相对较低等优点，而 TZM 则具有更高的机械强度、更好的尺寸稳定性、更低的磨损率及更长的使用寿命。因此，两者通常不是互相替代，而是根据不同工况进行合理选材。

（一）高温强度明显更高

石墨随着温度升高仍能保持一定强度，但整体属于脆性材料。TZM 不仅具有较高的室温强度，在 1000~1400 °C 范围内仍能保持较高的承载能力，更适合作为受力结构件使用。

（二）尺寸稳定性更好

TZM 具有较高的弹性模量和优异的抗蠕变性能。长期高温工作过程中，不易发生变形和尺寸漂移，特别适用于要求高尺寸精度的半导体设备和真空热场。石墨长期使用则可能发生烧蚀、磨损及尺寸变化。

（三）耐磨性能更优

TZM 硬度较高，耐磨性能优于石墨。对于需要长期摩擦、定位或反复装配的零件，TZM 能够保持更好的尺寸精度和使用寿命。

（四）机械可靠性更高

石墨属于典型脆性材料，抗冲击能力较低，受到机械冲击后容易产生裂纹或断裂。TZM 具有更高的韧性和抗冲击能力，能够承受较大的机械载荷和热应力。

（五）洁净度更高

高纯 TZM 在真空环境中放气率较低，不会像石墨那样产生石墨粉尘。因此，在半导体、真空电子器件及超高真空设备中，更有利于保持洁净环境。

（六）加工精度更高

TZM 可通过精密车削、磨削、电火花加工及激光加工获得较高尺寸精度和较低表面粗糙度。石墨虽然容易加工，但边缘容易崩裂，精密尺寸保持能力通常不如 TZM。

（七）使用寿命通常更长

在氧含量较低或真空环境中，TZM 具有较好的长期稳定性。对于长期连续工作的高温结构件，TZM 通常具有更长的使用寿命，可减少停机维护和零件更换频率。

TZM 与石墨性能对比

对比项目	TZM	石墨
高温强度	很高	较低
尺寸稳定性	优异	一般
耐磨性能	优异	较低
抗冲击性能	较好	较差
洁净度	高	易产生粉尘
加工精度	高	一般
使用寿命	较长	相对较短
材料成本	较高	较低

中钨智造认为，TZM 最大的优势并非耐温高于石墨，而是在高温条件下仍能保持优异的机械强度、尺寸稳定性和长期可靠性。对于需要承载载荷、高精度定位、长期连续运行及高洁净环境的设备，TZM 通常优于石墨；而石墨凭借成本低、易加工及耐超高温等特点，仍然是许多热场部件的重要材料。在现代半导体热场设计中，TZM 与石墨往往采用组合应用方式，以兼顾性能、寿命和成本

Q89 钛锆钼合金（TZM）与陶瓷相比有哪些优势？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和工程陶瓷都是典型的高温材料，广泛应用于半导体、航空航天、真空设备、核工业及高温装备领域。常见高温陶瓷包括氧化铝（ Al_2O_3 ）、氮化硅（ Si_3N_4 ）、氮化铝（ AlN ）、氧化锆（ ZrO_2 ）及碳化硅（ SiC ）等。总体来看，陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、绝缘性能优异等特点，而 TZM 则在机械性能、抗冲击能力、加工性能及可靠性方面具有明显优势，两者适用于不同的工程需求。

（一）韧性明显优于陶瓷

陶瓷最大的缺点是脆性较高，几乎没有塑性变形能力。TZM 属于金属材料，具有一定塑性和断裂韧性，在受到冲击或局部应力集中时，不容易发生突然断裂，因此整体可靠性更高。对于承受机械载荷和复杂应力的结构件，TZM 具有明显优势。

（二）抗热震性能更好

TZM 具有较高的导热率和较低的热膨胀系数，能够快速均匀传递热量，减少内部温差。因此，在快速加热、快速冷却及频繁冷热循环条件下，TZM 通常比大多数工程陶瓷更不容易发生热裂纹。

（三）机械加工性能更好

TZM 可采用车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工、激光加工等多种机械加工方式制造复杂零件。陶瓷加工主要依赖金刚石磨削、超声加工及激光加工，不仅加工效率较低，而且制造成本较高。对于复杂结构和高精度零件，TZM 加工优势更加明显。

（四）可焊接和可连接性更好

TZM 可以采用电子束焊、激光焊、扩散焊及真空钎焊等多种工艺进行连接。陶瓷由于脆性大、热膨胀系数差异明显，焊接难度较高，通常需要采用活性钎焊或特殊连接工艺。因此，在大型复杂组件制造中，TZM 更容易实现可靠连接。

（五）承载能力更强

TZM 具有较高的抗拉强度、屈服强度及抗蠕变性能。陶瓷虽然抗压强度很高，但抗拉强度较低，对缺口和裂纹极为敏感，不适合作为高载荷受力结构件。

（六）维修和再加工更加方便

TZM 零件在使用过程中可进行机械修整、重新加工甚至焊接修复。陶瓷一旦产生裂纹或崩裂，通常无法修复，只能整体更换，因此维护成本相对较高。

（七）适合复杂受力结构

TZM 兼具高温性能和金属材料综合力学性能，非常适合制造复杂受力结构、高温模具、半导体热场支撑件及真空设备关键部件。陶瓷则更适用于绝缘、耐腐蚀及耐磨部件。

TZM 与陶瓷性能对比

对比项目	TZM	工程陶瓷
韧性	优异	较低
抗热震性能	优异	一般
加工性能	良好	较难
焊接性能	可以	困难
承载能力	高	抗压高、抗拉低
可维修性	可以修复	基本不能修复
复杂结构制造	容易	较困难
典型应用	高温结构件	绝缘、耐磨、耐腐蚀部件

中钨智造认为，TZM 最大的优势在于兼具金属材料的韧性、加工性和高温性能，在复杂受力、高温循环及高可靠性应用中明显优于工程陶瓷。陶瓷则凭借优异的耐腐蚀性、耐磨性及电绝缘性能，在绝缘部件和耐磨部件中仍具有不可替代的优势。现代高端装备通常将 TZM 与陶瓷组合使用，以充分发挥两类材料各自的优势。

Q90 钛锆钼合金（TZM）为什么价格高于纯钼？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）是在纯钼基础上发展起来的高性能钼基高温合金。虽然其主要成分仍然是钼，但由于添加了 Ti、Zr、C 等强化元素，并采用更加复杂的粉末冶金制造工艺，因此其生产成本明显高于纯钼，市场价格通常也高于纯钼产品。不过，从整个使用周期来看，TZM 由于寿命更长、性能更稳定、维护成本更低，其综合使用成本往往优于纯钼。

（一）合金化成本更高

TZM 不仅需要高纯钼粉，还需要加入高纯 Ti、Zr 及 C 等强化元素。这些元素的纯度、粒度及配比均需严格控制，以保证形成均匀弥散分布的 TiC 和 ZrC 强化颗粒，因此原材料成本高于纯钼。

（二）生产工艺更加复杂

纯钼产品部分可采用熔炼、烧结等相对简单工艺制造。TZM 则通常采用高纯粉末制备、精密混粉、压制、烧结、锻造、轧制、热处理及精加工等完整粉末冶金工艺流程，制造周期更长，设备投入更高。

（三）质量控制更加严格

TZM 对成分均匀性、晶粒尺寸、第二相分布、密度及内部缺陷均有严格要求。生产过程中通常需要更多检测环节，包括化学成分分析、金相检验、超声检测、尺寸检测及性能测试，因此质量控制成本更高。

（四）加工成本更高但综合使用成本反而更低

TZM 强度和硬度均高于纯钼。因此，加工过程中刀具磨损更快，加工效率相对较低，对设备精度及加工工艺要求更高，进一步增加了制造成本。虽然 TZM 采购价格高于纯钼，但由于其高温强度更高、抗蠕变性能更好、使用寿命更长，更换频率和维护成本通常低于纯钼。因此，对于长期连续运行设备而言，TZM 往往具有更好的经济性。

（五）市场需求相对较小，研发投入也大

纯钼属于通用难熔金属材料，市场规模较大。TZM 主要应用于半导体、航空航天、核工业及高端真空设备等专业领域，市场需求相对有限，生产批量较小，因此单位制造成本更高。TZM 涉及粉末冶金、组织控制、热处理及高温性能优化等多项关键技术。高品质 TZM 产品通常需要长期工艺积累和持续研发投入，这部分成本也会体现在产品价格中。

（六）TZM 价格高于纯钼的主要原因

成本因素	TZM	纯钼
原材料	Ti、Zr、C 强化元素	主要为钼
制造工艺	粉末冶金、多道热加工	相对简单
质量控制	更严格	一般
加工成本	较高	较低
市场规模	较小	较大
产品寿命	更长	相对较短

成本因素	TZM	纯钼
综合使用成本	通常更低	通常更高

（七）中钨智造的实践经验

在经过了近 20 年的钼及其合金的研发生产实践经验的基础上，中钨智造认为，TZM 价格高于纯钼，主要源于合金化设计、复杂的粉末冶金工艺、严格的质量控制以及较高的制造成本，而不是单纯因为添加了少量 Ti、Zr 和 C。从全生命周期来看，TZM 凭借更高的高温强度、更长的使用寿命和更低的维护成本，通常能够显著降低设备的综合运行成本，因此在高端制造领域具有更高的性价比。

Q91 为什么钛锆钼合金（TZM）加工性能优于 MHC？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和 MHC（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy）均属于高性能钼基高温合金，但在实际工程应用中，TZM 的机械加工性能普遍优于 MHC，因此更容易实现车削、铣削、钻孔、磨削及复杂零件制造。这并不意味着 TZM 的性能优于 MHC，而是两种材料的设计目标不同。TZM 追求高温性能与加工性能之间的最佳平衡，而 MHC 更加注重极限高温性能，因此加工难度相应增加。

（一）强化颗粒不同

TZM 主要依靠 TiC 和 ZrC 弥散强化。MHC 主要依靠 HfC 强化。HfC 硬度更高、热稳定性更强，因此虽然能够显著提高高温性能，但也会增加切削阻力和刀具磨损，使机械加工更加困难。

（二）材料硬度不同，塑性略有差异

MHC 通常具有比 TZM 更高的高温强度和硬度。加工过程中，切削力更大，刀具磨损速度更快，对刀具材料和机床刚性的要求也更高。TZM 则具有适中的强度和硬度，更容易获得稳定的加工质量。TZM 具有较好的塑性和一定的加工变形能力。MHC 强化程度更高，塑性相对较低，加工过程中更容易出现崩边、裂纹及局部加工损伤，因此加工窗口相对较窄。

（三）刀具寿命更长

加工 TZM 时，硬质合金刀具、PCBN 刀具及金刚石砂轮均具有较好的使用寿命。加工 MHC 时，由于强化颗粒更加坚硬，刀具磨损明显加快，加工成本随之增加。

（四）加工工艺更加成熟，制造成本较低

TZM 已有数十年的工业应用历史，车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及激光加工等工艺均已十分成熟。MHC 主要用于少量高端领域，成熟加工经验相对较少，加工参数通常需要针对具体产品进行优化。由于加工效率较高、刀具寿命较长、废品率较低，TZM 整体制造成本通常低于 MHC。因此，在满足使用要求的前提下，TZM 具有更好的经济性。

（五）更适合批量生产

TZM 具有良好的加工一致性和较稳定的工艺窗口，更容易实现标准化和自动化加工。因此，在半导体设备、真空炉及航空航天等行业，更适合进行批量生产。

（六）TZM 与 MHC 加工性能对比

对比项目	TZM	MHC
强化相	TiC、ZrC	HfC
加工难度	较低	较高
刀具磨损	较小	较大
加工效率	较高	较低
工艺成熟度	很高	相对较低
制造成本	较低	较高
批量生产	更适合	一般用于特殊产品

中钨智造认为，TZM 加工性能优于 MHC，并不是因为材料性能更先进，而是由于强化体系更加均衡，在保持优异高温性能的同时，兼顾了机械加工性能和制造成本。因此，TZM 成为目前工业应用最广泛的钼基高温合金，而 MHC 则主要用于极端高温和特殊工况。

Q92 为什么钛锆钼合金（TZM）成为工业标准材料？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）自 20 世纪 60 年代实现工业化以来，经过长期工程验证，已成为全球应用最广泛、最成熟的钼基高温结构材料。几十年来，虽然陆续出现了 MHC、ZHM 等新型钼基合金，但 TZM 凭借综合性能均衡、制造成熟、标准完善和成本合理等优势，至今仍然是国际工业标准材料。TZM 之所以能够长期保持主导地位，并不是因为它在某一项性能上最好，而是在性能、制造、成本和可靠性之间实现了最佳平衡。

（一）综合性能最均衡

TZM 兼具较高的高温强度、优异的抗蠕变性能、较高的再结晶温度、良好的导热性能及较好的机械加工性能。虽然部分新型钼基合金在某些单项性能上有所提升，但 TZM 整体综合性能更加均衡，更适合绝大多数工业应用。

（二）制造工艺成熟，综合成本合理

TZM 经过几十年的产业发展，粉末冶金、锻造、轧制、热处理及机械加工工艺已经十分成熟。全球众多企业均已建立稳定的生产体系，产品质量一致性高，供货能力可靠。虽然 TZM 价格高于纯钼，但远低于部分新型高性能钼基合金。同时，其使用寿命长、维护成本低，因此全生命周期成本具有明显优势。

（三）国际标准体系完善

TZM 拥有完善的国际标准和行业规范，包括 ASTM、AMS、ISO 及各国企业标准。统一的材料标准使不同厂家产品具有良好的互换性，也便于全球采购和工程应用。

（四）加工性能良好

相比多数新型钼基高温合金，TZM 更容易进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及焊接。良好的加工性能有效降低了制造成本，也提高了生产效率。

（五）产业链完善，应用经验丰富

目前，TZM 已形成完整的原料、粉末、烧结、锻造、加工、检测及应用产业链。完善的产业配套不仅保证了产品质量，也促进了其持续成为工业主流材料。TZM 已在半导体、航空航

天、核工业、电子工业、聚变装置及高温热场等领域积累了数十年的应用经验。大量长期服役数据证明，其可靠性和稳定性已经得到充分验证。

（六）TZM 成为工业标准材料的主要原因

优势	工程意义
综合性能均衡	满足大多数高温结构应用
制造工艺成熟	产品质量稳定、一致性高
国际标准完善	全球范围内可互换使用
加工性能良好	降低制造成本
应用经验丰富	长期可靠性得到验证
综合成本合理	全生命周期经济性好
产业链完善	供应稳定、应用广泛

中钨智造认为，TZM 能够成为国际工业标准材料，并不是因为它在所有性能指标上都是最高，而是因为它实现了性能、制造工艺、加工性能、标准化程度、供应能力和使用成本之间的最佳平衡。正因如此，尽管近年来出现了 MHC、ZHM 等性能更高的钼基高温合金，TZM 仍然是全球半导体、航空航天、真空设备及高温装备领域应用最广泛、最成熟、最具代表性的钼基高温结构材料。

Q93 为什么 MHC 没有取代钛锆钼合金（TZM）？

MHC（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy，钼钨碳合金）是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）之后发展起来的新一代钼基高温合金，其采用 HfC 强化体系，在超高温强度、抗蠕变性能及组织稳定性方面通常优于 TZM。然而，自 20 世纪 70 年代以来，尽管 MHC 已经成功应用于部分航空航天、核工业及高温装备领域，但至今仍未取代 TZM 成为工业主流材料。原因并不是 MHC 性能不足，而是 TZM 在综合性能、制造成本、加工性能及产业成熟度等方面仍具有明显优势。

（一）TZM 综合性能更加均衡

MHC 虽然具有更高的高温性能，但 TZM 已经能够满足绝大多数工业应用需求。对于半导体热场、真空炉、高温模具、电子束设备及航空航天结构件而言，TZM 在强度、导热性、尺寸稳定性及加工性能之间实现了良好的平衡，因此无需为了有限的性能提升而全面更换材料。

（二）TZM 加工性能更好

TZM 强化体系以 TiC 和 ZrC 为主，加工性能明显优于 MHC。MHC 中的 HfC 颗粒硬度更高，导致切削阻力更大、刀具磨损更快，加工效率降低，加工成本也相应增加。因此，对于复杂结构零件，TZM 更适合批量制造。

（三）MHC 制造成本更高，但性价比优势明显

Hf 属于稀有金属，资源相对有限，价格远高于 Ti 和 Zr。此外，MHC 制造过程对粉末纯度、组织控制及热处理要求更加严格，因此整体制造成本明显高于 TZM。对于大多数工业产品而言，这种成本增加难以完全通过性能提升来抵消。虽然 MHC 性能更高，但性能提升幅度并不足以覆盖其明显增加的材料成本和制造成本。因此，从全生命周期经济性来看，TZM 仍然具有更高的综合性价比。

（四）TZM 产业体系更加成熟、工程验证更加充分

经过几十年的发展，TZM 已经建立了完善的国际标准、生产工艺、检测体系及供应链。全球众多企业均可稳定生产 TZM，而 MHC 生产厂家相对较少，产业化程度明显低于 TZM。成熟的产业体系使 TZM 具有更好的供应稳定性和工程可靠性。TZM 已在半导体、航空航天、核工业及真空设备等领域长期应用，积累了大量工程经验和寿命数据。相比之下，MHC 的应用范围较小，长期服役数据相对有限，因此工程设计人员通常更倾向于选择风险更低的 TZM。

（五）应用需求有限

MHC 最大的优势主要体现在 1400℃以上或极端高温环境。而绝大多数工业设备长期工作温度并未达到这一水平，因此 TZM 已经能够满足实际需求，没有必要全面升级为 MHC。

（六）TZM 与 MHC 产业竞争对比

对比项目	TZM	MHC
高温性能	很高	更高
加工性能	更好	较差
制造成本	较低	较高
工艺成熟度	很高	一般
工程应用	非常广泛	特殊领域
标准体系	完善	相对较少
综合性价比	更高	特殊工况优势明显

中钨智造认为，MHC 没有取代 TZM，并不是因为性能不够先进，而是因为 TZM 已经在性能、加工、制造、标准化及成本之间形成了最佳平衡。对于绝大多数高温结构件而言，TZM 已经能够满足使用要求，而 MHC 则更适用于极端高温、高载荷及超长寿命等特殊工况。因此，未来两者更可能长期并存，而不是简单替代关系。

Q94 钛锆钼合金（TZM）未来会被哪些材料替代？

从目前全球难熔金属材料的发展趋势来看，TZM 仍然是应用最广泛的钼基高温结构材料，在未来相当长时期内仍将保持重要地位。但随着高温装备、聚变能源、航空航天及半导体制造技术的发展，一些性能更高的新型材料正在不断发展，并有望在部分特殊领域逐步替代 TZM。需要指出的是，这些材料更多是在特定工况下进行补充，而不是全面取代 TZM。

（1）钛锆钼合金（TZM）未来可能会被 MHC（钼铪碳合金）替代

MHC 是目前最有可能在超高温领域替代 TZM 的钼基合金。由于 HfC 强化体系具有更高的热稳定性，其高温强度、抗蠕变性能及组织稳定性通常优于 TZM，因此适用于更高工作温度及更长寿命要求。不过，由于成本较高，加工难度较大，目前主要应用于高端装备。

（2）未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-ZHM（锆钼钨合金）

ZHM 通过引入 Hf 进一步提高高温组织稳定性。未来在聚变能源、先进热场及超高温结构件中，可能成为 TZM 的重要补充材料。

(3) 未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-ODS 钼合金

氧化物弥散强化（ODS）钼合金通过纳米级氧化物颗粒强化基体，可进一步提高高温强度、抗蠕变能力及长期组织稳定性。目前仍处于持续研发和工程化推进阶段，被认为是未来钼基高温材料的重要发展方向。

(4) 未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-高熵难熔合金

近年来发展迅速的高熵难熔合金（Refractory High Entropy Alloys, RHEAs），采用 Mo、W、Ta、Nb、V、Hf 等多种难熔元素组成多主元体系。其理论上具有更高的高温强度、更好的抗氧化性能及优异的组织稳定性，但目前制造成本高、加工困难，距离大规模工业应用仍有一定距离。

(5) 未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-钨基高温合金

对于 1500 °C 以上的超高温环境，钨基合金仍具有明显优势。随着钨基复合材料及钨基高温合金的发展，在极端高温装备中，部分 TZM 应用可能被钨基材料替代。

(6) 未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-陶瓷基复合材料（CMC）

碳化硅陶瓷基复合材料、氧化物陶瓷基复合材料等具有质量轻、耐高温及抗氧化等优势。未来在航空发动机及部分高温热结构件中，可能替代部分 TZM 零件，但由于脆性较大，目前难以全面取代金属材料。

(7) 未来可能会替代钛锆钼合金（TZM）的材料-增材制造专用新型钼基合金

随着增材制造技术的发展，未来可能出现针对 3D 打印优化的新型钼基高温合金。这些材料将在组织设计、强化机制及复杂结构制造方面优于传统 TZM，但目前仍处于研发阶段。

(8) 未来可能替代 TZM 的材料汇总表

材料	替代方向	当前成熟度
MHC	超高温结构件	较成熟
ZHM	极端高温设备	工程应用逐步增加
ODS 钼合金	长寿命高温结构件	研发与产业化推进中
高熵难熔合金	下一代高温材料	实验研究为主
钨基高温合金	超高温环境	成熟，但成本较高
陶瓷基复合材料	轻量化高温结构	部分成熟
新型增材制造钼合金	复杂结构制造	持续发展

(9) 中钨智造的观点

中钨智造认为，在未来较长时间内，TZM 仍将是全球钼基高温结构材料的工业标准，其成熟的制造工艺、完善的国际标准、稳定的供应体系及优异的综合性能，使其难以被单一材料全面替代。未来的发展趋势更可能是形成多材料协同应用格局：TZM 继续覆盖绝大多数高温结构件，MHC、ZHM 及 ODS 钼合金服务于更高温、更长寿命工况，高熵难熔合金和新型增材制造材料则面向下一代高端装备的发展需求。

Q95 如何根据工况选择钛锆钼合金（TZM）或 MHC？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）和 MHC（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy）都是高性能钼基高温合金，两者均采用第二相弥散强化机制，具有优异的高温强度和抗蠕变性能。但两种材料的设计目标有所不同，TZM 强调综合性能、加工性能及经济性，MHC 则更加侧重极限高温性能和长期组织稳定性。工程选材时，应根据工作温度、载荷大小、服役时间、加工难度、成本预算及寿命要求进行综合分析，而不能单纯追求性能最高的材料。

（一）根据工作温度选择

当长期工作温度在 1000~1400℃时，TZM 通常已经能够满足绝大多数工业需求。当长期工作温度超过 1400℃，或短时间接近 1500℃以上时，MHC 由于 HfC 强化相具有更高的热稳定性，其高温强度和抗蠕变性能通常优于 TZM，因此更适合作为高温结构材料。

（二）根据服役寿命、行业应用选择

对于一般工业设备、半导体热场及真空炉等应用，TZM 已具有较长的使用寿命。如果设备需要长期连续运行数千甚至上万小时，并要求高温性能长期稳定，则 MHC 通常具有更好的寿命优势。半导体设备、真空炉、高温模具、电子束设备及大多数航空航天结构件，目前仍以 TZM 为主。聚变装置、超高温试验设备、先进能源装备及部分极端高温部件，则越来越多采用 MHC。

（三）根据载荷大小选择

对于一般高温结构件，TZM 能够提供足够的承载能力。如果零件长期承受较大的机械载荷，同时工作温度较高，则 MHC 更低的高温蠕变速率能够有效提高长期可靠性。

（四）根据加工难度选择

TZM 具有成熟的机械加工工艺，可方便进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及焊接。MHC 强化程度更高，刀具磨损更快，加工难度明显增加。对于结构复杂、尺寸精度要求较高的零件，TZM 通常更容易制造。

（五）根据成本预算、维护成本选择

TZM 采用 Ti 和 Zr 作为主要强化元素，材料价格和制造成本相对较低。MHC 含有价格较高的 Hf 元素，加工成本也明显增加。因此，在满足使用要求的情况下，TZM 通常具有更高的经济性。虽然 TZM 采购成本较低，但如果设备长期运行于极限工况，频繁更换零件造成的停机损失可能远高于材料价格。对于维护成本极高、停机代价较大的设备，MHC 较长的服役寿命往往能够降低全生命周期成本。

（六）中钨智造关于 TZM 与 MHC 选材建议

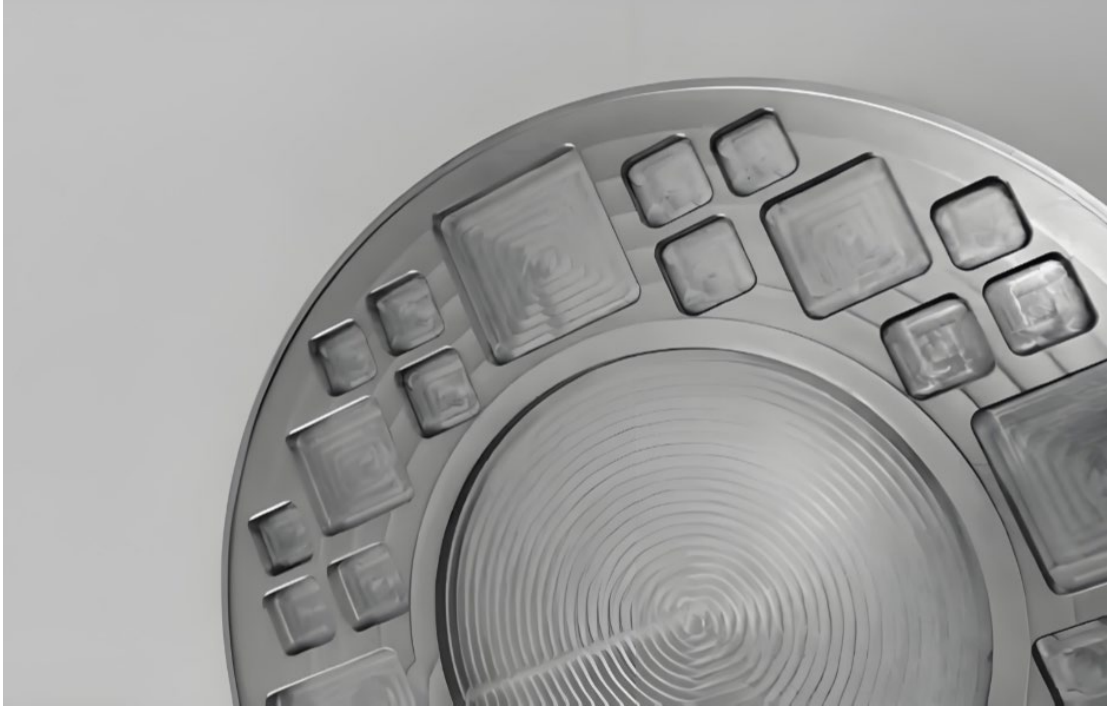
选材因素	推荐 TZM	推荐 MHC
长期工作温度	≤1400℃	>1400℃
短期峰值温度	中等	极高
高温强度要求	高	极高
抗蠕变要求	高	极高
加工复杂程度	复杂结构	简单或中等结构

选材因素	推荐 TZM	推荐 MHC
加工成本	较低	较高
材料成本	较低	较高
使用寿命要求	一般至较长	极长
批量生产	更适合	一般用于特殊产品

（七）中钨智造的常见应用推荐

应用场景	推荐材料	主要原因
半导体热场	TZM	综合性能优异、加工成熟、成本合理
真空炉构件	TZM	长期应用成熟、尺寸稳定性好
热等静压模具	TZM	强度高、加工方便
聚变装置高热负荷部件	MHC	抗蠕变性能更优
超高温试验设备	MHC	高温组织稳定性更好
航空航天极端热结构	根据工况选择	温度较高时优先 MHC，一般工况优先 TZM

中钨智造认为，TZM 和 MHC 并不存在简单的替代关系，而是针对不同工况形成互补。对于绝大多数工业应用，TZM 凭借成熟的工艺、优异的综合性能、良好的加工性能和较高的性价比，仍然是首选材料；而对于长期超高温、高热负荷及极端服役环境，MHC 能够提供更高的高温强度和更长的使用寿命，更适合作为高端装备的关键结构材料。在工程设计中，应优先根据实际工况进行材料匹配，而不是单纯追求性能指标最高的材料。





第十篇

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）产品类型

Q96 钛锆钼合金（TZM）有哪些产品形态？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）经过几十年的产业发展，已形成较为完整的产品体系，可满足半导体、航空航天、电子工业、真空炉、聚变装置及高温装备等领域的不同需求。根据制造工艺和最终用途，TZM 可制成棒材、板材、片材、丝材、管材、异形件及深加工零部件等多种产品形态。不同产品通常采用粉末冶金制备，经锻造、轧制、旋锻、机加工及热处理后形成最终尺寸和组织。

（1）钛锆钼合金棒材（TZM Rod、Bar）

棒材是 TZM 最常见、应用最广泛的产品形态。可作为机械加工毛坯，用于制造热场支撑件、电极、高温模具、紧固件、加热元件支架及各种结构零件。根据用途不同，可提供锻造棒、轧制棒、磨光棒及精密棒材。

（二）钛锆钼合金板材（TZM Plate）

TZM 板材主要用于高温挡板、隔热板、热屏、真空炉构件及大型热场结构件。根据厚度不同，可分为厚板和中板，通常采用锻造后轧制工艺生产。

（三）薄板与片材（Sheet、Foil）

厚度较小的 TZM 板材通常称为薄板或片材。主要应用于电子工业、热屏、真空设备、特殊散热部件及科研装置。超薄片材生产难度较高，对轧制工艺要求严格。

（四）丝材（Wire）

TZM 丝材主要用于高温支撑件、电子器件、加热元件及特殊真空装置。由于 TZM 塑性低于纯钼，拉丝难度较大，因此生产规格相对较少。

（五）管材（Tube）

TZM 管材主要用于高温保护管、热电偶保护套、真空管路及特殊高温设备。根据制造工艺，可分为无缝管和机加工管。

（六）异形件（Profile）

根据用户需求，可加工成方棒、六角棒、型材、导轨、支撑件及各种特殊截面产品。通常采用棒材或板材进行精密机械加工获得。

（七）精密机械加工件

目前半导体设备中大量 TZM 产品并非标准材料，而是经过数控车削、铣削、磨削、电火花加工及线切割制造的高精度零部件。典型产品包括热场组件、电极、夹具、导向件、支撑件、反射板及高温模具。

（八）定制大型锻件

部分大型真空炉及航空航天设备采用 TZM 大型锻件。此类产品通常采用大尺寸烧结坯，经热锻和热处理后加工而成，可获得较好的组织均匀性和高温性能。

TZM 常见产品形态

产品形态	主要用途
棒材	电极、模具、结构件、机械加工毛坯
板材	热屏、挡板、真空炉构件
薄板、片材	热场、电子器件、散热部件
丝材	高温支撑件、电子元件
管材	热电偶保护管、真空管路
异形件	导轨、支架、专用结构件
精密加工件	半导体设备、高温模具、航空航天零件
大型锻件	大型热场及高温装备

中钨智造认为，目前 TZM 已形成覆盖原材料、半成品及高精度零部件的完整产品体系。其中，棒材和板材是应用最广泛的基础产品，而随着半导体及高端装备的发展，高精度深加工零件正逐渐成为 TZM 产品的主要发展方向。



Q97 钛锆钼合金（TZM）棒材有哪些规格？

TZM 棒材是应用最广泛的 TZM 产品之一，也是制造各种高温结构件和精密零部件的重要原材料。经过粉末冶金、烧结、锻造、轧制及热处理后，可生产从微细棒材到大型锻造棒材的多种规格。不同厂家规格略有差异，但国际市场已形成较为成熟的标准尺寸系列，同时也可根据用户要求提供非标准尺寸定制。

（一）常用直径范围

TZM 棒材常见直径约为 3~100 mm。其中，小直径棒材主要用于电子工业和精密加工，中大直径棒材主要用于高温模具、半导体热场及航空航天结构件。部分厂家可生产直径超过 150 mm 的大规格锻造棒材。

（二）常见标准规格

工业中常见棒材直径包括 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、16 mm、20 mm、25 mm、30 mm、40 mm、50 mm、60 mm、80 mm、100 mm 等。多数规格长期备有库存，可满足一般机械加工需求。

（三）长度规格

标准长度通常为 300 mm、500 mm、1000 mm 及 1500 mm。大型锻造棒材可根据设备能力提供更长尺寸，也可按用户要求切割供货。

（四）供货状态

TZM 棒材可提供烧结态、锻造态、轧制态、磨光态、车光态及应力消除退火态等不同供货状态。用户可根据后续加工工艺选择适合的材料状态。

（五）尺寸公差

普通棒材通常按标准公差供货。磨光棒和精密棒材可达到更严格的直径公差，满足半导体设备及精密机械加工要求。对于高精度产品，还可根据图纸要求定制尺寸和形位公差。

（六）表面状态

TZM 棒材可提供黑皮面、车光面、磨光面及抛光面等多种表面状态。半导体、真空设备及科研领域通常采用磨光或抛光产品，以降低表面缺陷和污染风险。

（七）特殊规格定制

对于大型热场、高温模具及航空航天设备，可根据用户要求生产超长、超大直径或特殊尺寸棒材。部分厂家还可提供近净成形毛坯，以减少后续机械加工余量，提高材料利用率。

TZM 棒材常见规格

项目	常见范围
直径	3~100 mm（可定制更大规格）
常用直径	3、4、5、6、8、10、12、16、20、25、30、40、50、60、80、100 mm
标准长度	300、500、1000、1500 mm
供货状态	烧结态、锻造态、轧制态、磨光态、车光态、退火态
表面状态	黑皮、车光、磨光、抛光
定制能力	可提供特殊尺寸、超长、超大规格及近净成形毛坯

TZM 棒材已经形成成熟的国际规格体系，能够覆盖绝大多数工业应用需求。对于普通高温结构件，标准规格即可满足使用要求；对于半导体设备、聚变装置及航空航天等高端应用，则通常采用高精度磨光棒材或按图纸定制的特殊规格，以获得更好的尺寸一致性、加工效率和最终产品性能。

中钨智造钛锆钼合金（TZM）产品覆盖棒材、板材、薄板、管材、坩埚、靶材、热场组件及精密异形件等多种形式，可根据半导体晶体生长、真空热处理、航空航天、高温模具及科研装备等不同应用场景提供定制化解决方案。实际供货时，TZM 规格通常需要结合使用温度、受力条件、真空环境、尺寸精度及加工方式综合确定，而不是单纯依据尺寸选择材料。

中钨智造科技有限公司

钛锆钼合金（TZM）常见产品形态及基本规格范围

实际供应规格可根据客户图纸、设备结构及应用需求进行定制。

产品类型	常见规格范围（mm）	典型状态	主要应用
TZM 棒材	直径 Φ3-Φ100 ， 长度 50-2000	锻造态、退火态、磨光态	半导体支撑杆、真空炉配件、电极、紧固件
TZM 板材	厚 2-50 ， 宽 100-600 ， 长 100~2000	轧制态、退火态	热场板、隔热屏、真空炉结构件
TZM 薄板	厚度 0.1-2， 宽度 50-500	冷轧态、光亮退火态	半导体热屏、精密隔板、电子设备零件
TZM 圆片	直径 Φ10-Φ500， 厚度 0.5-50	机加工、研磨态	靶材、炉内支撑片、实验设备部件
TZM 管材	外径 Φ10-Φ100， 壁厚 1-10 ， 长度 ≤2000	烧结、热加工、精加工	高温炉管、保护套、晶体生长设备部件
TZM 丝材	直径 Φ0.05-Φ3	拉丝态、退火态	高温弹簧、加热元件支撑、精密零件

产品类型	常见规格范围（mm）	典型状态	主要应用
TZM 坩埚	直径 Φ20-Φ500，高度 20-600，壁厚 1-10	旋压、焊接、整体加工	蓝宝石长晶、晶体生长、真空熔炼
TZM 靶材	直径 Φ25-Φ400mm，厚度 2-50	锻造、轧制、磨削态	真空镀膜、电子束设备
TZM 异形件	按图纸定制，尺寸可达数百毫米级	CNC 精加工、研磨、抛光	半导体设备、航空航天、科研装置
TZM 热场组件	根据设备尺寸设计	精密装配件	单晶硅炉、SiC 晶体炉、真空热处理炉

中钨智造科技有限公司
钛锆钼合金（TZM）材料常见性能规格

性能指标	典型范围
钼含量（Mo）	余量，通常≥99%
钛（Ti）含量	约 0.40～0.55%
锆（Zr）含量	约 0.06～0.12%
碳（C）含量	约 0.01～0.08%
密度	≥10.0 g/cm³
熔点	约 2620 °C
再结晶温度	约 1300～1400 °C
热膨胀系数	约 5.5×10 ⁻⁶ /K
导热率（室温）	约 115～140 W/(m·K)
硬度	约 200～300 HV（根据状态变化）

中钨智造科技有限公司
钛锆钼合金（TZM）常见表面状态

表面状态	特点	应用
黑皮态	保留热加工表面	普通结构件
酸洗态	去除氧化层	后续加工坯料
磨光态	表面较光洁，尺寸精度较高	热场零件
车加工态	满足尺寸要求	机械结构件
镜面抛光态	高洁净、高光洁度	半导体、科研设备

Q: 定制 TZM、TZC、MHC 钼合金需要提交哪些资料和技术要求?

TZM（钛锆钼合金）、TZC（钛锆碳钼合金）及 MHC（钼铪碳合金）属于高性能钼基高温合金，广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、核工业等领域。由于产品多为定制化制造，不同应用对材料成分、组织、尺寸、公差、表面状态及检测要求差异较大，在询价订购时，提供完整准确的技术资料，能够提高报价准确率，也能缩短沟通周期，提高订单成功率，避免交付风险。中钨智造总结了几十年的设计生产经验，建议客户尽可能提供以下信息。

一、产品基本信息

首先，应明确产品名称及材料牌号，例如 TZM、TZC、MHC，或说明执行标准、企业标准及客户指定材料牌号。如果已有历史采购型号，也建议一并提供。同时应说明产品类别，例如棒材、板材、薄板、管材、丝材、坩埚、靶材、热场部件、异形件或其他定制零件。如没有特别的保密需求，应明确告知欲订购的正式名称，这对于中钨智造出口报关十分重要，并且能够帮助准确判断是否属于两用物项，是否需要特别批准，能否在获得出口退税等优惠。

二、产品图纸

图纸是报价最重要的依据。建议提供 PDF 图纸，同时附带 STEP、STP、IGES、DWG、DXF 或 SolidWorks、UG、Creo 等三维模型文件。如涉及复杂曲面、装配关系或焊接结构，三维模型能够大幅提高报价准确性。图纸应尽量标注完整，包括产品尺寸、关键尺寸、公差要求、形位公差、倒角、圆角、螺纹规格、加工基准、装配要求及特殊说明。如无正式图纸，可提供草图、样品照片或手工尺寸图。如果设计图属于保密资料，请在图纸钱发送保密协议有中钨智造签署后再发图纸。

三、材料技术要求

建议明确材料技术指标，包括材料牌号、化学成分要求、密度要求、晶粒尺寸要求、显微组织要求、氧含量、氮含量及其他杂质控制要求。如执行 ASTM、ISO、GB、AMS 等标准，也应注明标准编号。如果没有特殊要求，可注明采用制造商标准或国标。

四、机械性能要求

如项目涉及高温服役，应说明需要达到的性能指标，例如室温拉伸强度、屈服强度、延伸率、高温拉伸性能、蠕变性能、硬度及再结晶温度要求。也可仅注明执行标准。

五、产品尺寸及公差要求

中钨智造建议明确外形尺寸、加工余量、尺寸公差、平面度、平行度、同轴度、垂直度、圆度及其他关键尺寸要求。对于半导体零件，建议重点标明关键配合尺寸。中钨智造认为应请明确标注尺寸使用的公制/英制单位。

六、表面状态要求

不同应用对表面状态要求差异较大，应提前说明，例如：黑皮态、酸洗态、车削态、磨削态、精磨态、镜面抛光、Ra 粗糙度要求、去毛刺要求及是否允许加工刀纹。对于半导体行业，还可注明是否需要超声波清洗、真空清洗、无油包装等洁净要求。

七、热处理要求

如有特殊要求，应说明是否需要应力消除退火、真空退火、高温退火或客户指定热处理工艺。

八、检测要求

建议明确是否需要提供以下检测报告化学成分分析、氧氮检测、密度检测、显微组织、晶粒尺寸、TiC 或 HfC 颗粒检测、硬度检测、拉伸性能检测、尺寸检测及无损检测。中钨智造认为如果需要第三方检测,应提前说明,并在中钨智造认可和同意的前提下在合同中明确体现。

九、使用工况

这是很多客户容易忽略,但对于材料推荐非常重要的信息。建议说明工作温度、最高温度、长期使用温度、真空度、工作气氛(真空、氩气、氢气、空气等)、受力情况、热循环次数、是否接触熔融金属、是否接触腐蚀介质及预计使用寿命。这些信息有助于制造商判断 TZM、TZC 还是 MHC 更加适合。由于保密原因不能在订购时说明在使用工况,中钨智造不能保证在特殊条件下的使用性能。

十、采购数量

询价应注明样品数量、批量数量、年度需求量及是否存在后续长期采购计划。批量不同,制造工艺及成本也会有所不同。

十一、交货要求

建议说明交货时间、目的地国家或地区、包装要求、运输方式及是否需要出口文件,例如原产地证、材质证明、RoHS、REACH 等。

十二、商务要求

应同时注明报价币种、贸易方式(EXW、FOB、CIF、DAP 等)、付款方式及其他商务要求。

中钨智造的建议

中钨智造建议,客户在询价 TZM、TZC、MHC 等高性能钨基合金时,不仅提供产品尺寸,更应同时说明材料牌号、使用工况、检测要求及图纸资料。完整、准确的技术信息能够显著提高报价准确率,缩短沟通周期,减少重复确认,提高订购成功率,并保证最终产品真正满足设备使用要求。

中钨智造的联系信息

中钨智造科技有限公司(CTIA GROUP LTD)

地址:中国福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼,邮编 361008

电话: +86 592 512 9696、+86 592 512 9595 电子邮箱: sales@chinatungsten.com

官方网站: <http://ctia.group> www.ctia.com.cn

欢迎将下表内容填写完整,与产品图纸、图片、技术要求、样品资料、营业执照等发送至上述邮箱,中钨智造将尽快为您提供专业的材料选型建议、制造方案及准确报价。

中钨智造科技有限公司 建议客户提供的资料清单和一次性发送询价资料示例

项目	是否建议	示例
产品名称	强烈建议	TZM 热场支撑板
产品图纸	必须	PDF+STEP,
三维模型	强烈建议	有,见附件(STEP/STP)

产品照片或样品	建议	见附件，仅供参考
材料牌号	必须	中钨智造
尺寸及公差	必须	按图要求加工
数量	必须	20
使用工况	强烈建议	工作温度：1350℃，高真空环境
表面状态要求	建议	精磨， $Ra \leq 0.8 \mu m$
检测要求	建议	化学成分、密度、显微组织、硬度
执行标准	建议	TZM（ASTM B387
包装及运输要求	建议	真空包装，空运/快递
交付地点	必须	详见采购人联系地址
交付时间	必须	合同后最长 6 周
采购人/负责人	必须	示例：中钨智造科技有限公司 韩斯疆
采购人联系信息	必须	示例：0592 512 9696 sales@chinatungsten.com
采购人联系地址	必须	示例：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一，3 楼 361009
采购人工商资料	必须	见附件 营业执照

中钨智造科技有限公司
建议客户提供的资料清单和一次性发送询价资料示例

项目	是否建议	示例
产品名称	强烈建议	TZM 热场支撑板
产品图纸	必须	PDF+STEP,
三维模型	强烈建议	有，见附件（STEP/STP）
产品照片或样品	建议	见附件，仅供参考
材料牌号	必须	中钨智造
尺寸及公差	必须	按图要求加工
数量	必须	20
使用工况	强烈建议	工作温度：1350℃，高真空环境
表面状态要求	建议	精磨， $Ra \leq 0.8 \mu m$
检测要求	建议	化学成分、密度、显微组织、硬度
执行标准	建议	TZM（ASTM B387
包装及运输要求	建议	真空包装，空运/快递
交付地点	必须	详见采购人联系地址
交付时间	必须	合同后最长 6 周
采购人/负责人	必须	示例：中钨智造科技有限公司 韩斯疆
采购人联系信息	必须	示例：0592 512 9696 sales@chinatungsten.com
采购人联系地址	必须	示例：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一，3 楼 361009
采购 人工 商资料	必须	见附件 营业执照



Q98 钛锆钼合金（TZM）板材有哪些规格？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）板材是继棒材之后应用最广泛的产品形态之一，主要用于半导体热场、真空炉、高温模具、热屏、航空航天及电子工业等领域。TZM 板材通常采用粉末冶金制备，经烧结、锻造、多道热轧及热处理后生产，具有组织均匀、高温强度高和尺寸稳定性好的特点。由于 TZM 属于高性能难熔金属材料，目前尚无全球统一的标准尺寸系列，不同厂家可根据设备能力和用户需求提供标准规格或定制规格。

（一）钛锆钼合金（TZM）板材的厚度规格

TZM 板材一般指厚度大于 3 mm 的产品。

常见厚度包括 3 mm、5 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、40 mm 及 50 mm。中钨智造可以为客户定制生产厚度超过 80 mm 甚至 100 mm 的大规格板材，用于大型热场和高温模具。

（二）钛锆钼合金（TZM）板材的宽度规格

常见板材宽度约为 50~600 mm。根据轧机能力和材料规格，中钨智造可提供更宽尺寸，但超宽板材制造难度明显增加，成本也相应较高。

（三）钛锆钼合金（TZM）板材的长度规格

常见长度包括 100 mm、200 mm、300 mm、500 mm 及 1000 mm。对于大型设备的现实需求，中钨智造可根据用户要求提供更长尺寸或按图纸切割供货。

（四）钛锆钼合金（TZM）板材的供货表面状态

TZM 板材可提供烧结态、锻造态、热轧态、应力消除退火态及精加工态。对于半导体和真空设备，通常采用热轧后经应力消除退火处理的产品，以保证尺寸稳定性和后续加工性能。中

钨智造可以根据客户具体表面要求建工生产。中钨智造可以根据客户实际使用要求，可提供黑皮面、铣削面、磨削面及抛光面。对于高洁净真空环境，多采用精磨或抛光表面，以减少污染源和表面缺陷。

（五）钛锆钼合金（TZM）板材的尺寸公差

普通工业板材按常规尺寸公差供货。精密板材可根据用户图纸控制厚度、平面度及平行度，以满足半导体设备及航空航天零件的制造要求。

（六）中钨智造的钛锆钼合金（TZM）板材定制加工

TZM 板材可根据需要加工成圆板、异形板、开孔板、热屏组件及各种近净成形毛坯。许多高端应用均采用定制板材，而非标准库存规格。中钨智造在过去的近 20 年间积累了近千例客户定制实践经验，可以满足客户各类定制板材需求。

（七）中钨智造的钛锆钼合金（TZM）板材常见规格

项目	常见范围
厚度	3~50 mm（可定制更厚规格）
常用厚度	3、5、6、8、10、12、15、20、25、30、40、50 mm
宽度	50~600 mm
长度	100~1000 mm
供货状态	烧结态、锻造态、热轧态、退火态
表面状态	黑皮、铣削、磨削、抛光
定制能力	可加工圆板、异形板、热屏及大型结构件

中钨智造的 TZM 板材已形成较成熟的规格体系，其中 10~30 mm 厚度产品应用最为广泛，主要用于半导体热场、高温模具及真空设备。对于大型热场及航空航天结构件，则更多采用按图纸定制的大尺寸板材，以兼顾组织均匀性、加工效率和服役可靠性。

Q99 钛锆钼合金（TZM）薄板有哪些规格？

TZM 薄板（Sheet）是指厚度较小的 TZM 轧制产品，通常用于半导体热场、电子工业、真空设备、高温屏蔽板、散热构件及科研装置。由于 TZM 塑性低于纯钼，薄板轧制工艺难度较高，因此生产成本高于普通钼板，对轧制工艺、热处理制度及板形控制要求也更加严格。目前 TZM 薄板主要采用热轧结合精整工艺生产，可提供标准规格及定制规格。

（1）钛锆钼合金（TZM）薄板的厚度规格

TZM 薄板通常指厚度约 0.2~3.0 mm 的产品。常见厚度包括 0.2 mm、0.3 mm、0.5 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm 及 3.0 mm。对于更薄的产品，加工难度明显增加，一般需采用特殊轧制工艺。

（2）钛锆钼合金（TZM）薄板的宽度规格

常见宽度约为 50~300 mm。根据轧制设备能力，可提供更宽尺寸，但超宽薄板的板形控制难度较高。

（3）钛锆钼合金（TZM）薄板的长度规格

常见长度包括 100 mm、200 mm、300 mm、500 mm 及 1000 mm。也可根据用户要求进行定尺切割。

（4）钛锆钼合金（TZM）薄板的供货状态

TZM 薄板通常提供热轧态、应力消除退火态及精整态。对于精密电子设备及真空系统，通常采用退火状态供货，以降低残余应力，提高尺寸稳定性。

（5）钛锆钼合金（TZM）薄板的表面质量和平面度要求

可提供轧制面、磨光面及抛光面。高端应用通常要求表面无裂纹、折叠、压痕、氧化皮及其他影响使用性能的缺陷。由于薄板容易产生翘曲和波浪变形，高品质 TZM 薄板通常要求良好的平面度。对于半导体热场及真空设备，还可根据图纸要求控制平整度和厚度均匀性。

（6）钛锆钼合金（TZM）薄板的典型应用

TZM 薄板主要用于半导体热屏、真空挡板、高温反射板、电子束设备、科研热场及各种轻量化高温构件。随着半导体设备向大型化、高精度方向发展，对 TZM 薄板的尺寸一致性和表面质量要求也不断提高。

（7）中钨智造钛锆钼合金（TZM）薄板的常见规格

项目	常见范围
厚度	0.2~3.0 mm
常用厚度	0.2、0.3、0.5、0.8、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm
宽度	50~300 mm
长度	100~1000 mm
供货状态	热轧态、退火态、精整态
表面状态	轧制面、磨光面、抛光面
典型应用	热屏、挡板、反射板、真空设备、电子工业

TZM 薄板是半导体及高端真空设备的重要基础材料，其核心竞争力不仅体现在高温性能，更体现在板形控制、厚度一致性、表面质量及长期尺寸稳定性。目前，0.5~2.0 mm 厚度范围是工业应用最广泛的规格，而随着先进半导体制造和真空技术的发展，高精度、超薄及大尺寸 TZM 薄板将成为未来的重要发展方向。

Q100 钛锆钼合金（TZM）管材如何制造？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）管材广泛应用于半导体设备、真空炉、高温保护管、电子工业、航空航天及科研装置等领域。由于 TZM 属于高强度难熔金属合金，塑性低于纯钼，因此其管材制造难度明显高于普通金属管材，目前主要采用粉末冶金结合塑性加工或机械加工工艺生产。根据尺寸、壁厚及用途不同，TZM 管材主要有以下几种制造路线。

（一）粉末冶金制坯

首先采用高纯钼粉、钛粉、锆粉及碳源按标准配比混合，经球磨混粉后进行冷等静压或模压成形。随后在高温氢气保护或真空环境中烧结，使材料形成高致密度烧结坯，为后续加工提供均匀组织。

（二）锻造与旋锻

烧结坯通常经过热锻或旋锻加工，提高材料致密度，细化晶粒，并改善组织均匀性。对于大型管材毛坯，这一步也是获得良好力学性能的重要工序。

（三）钻孔加工

对于中小尺寸厚壁管，大多数产品采用棒材钻孔方式制造。先加工成实心棒，再采用深孔钻、枪钻或 BTA 深孔加工技术形成内孔。这种方法尺寸精度高、组织均匀，目前应用最广。

（四）热轧或热挤压制管

对于部分较大规格管材，可采用热挤压或热轧穿孔工艺形成管坯，再进行后续校直和精加工。由于 TZM 塑性有限，这类工艺难度较大，目前应用相对较少。

（五）精密机械加工

管材外圆、内孔及端面通常采用数控车削、内孔磨削、外圆磨削等工艺进行精加工。对于半导体设备用 TZM 管，还需要严格控制同轴度、壁厚均匀性及表面粗糙度。

（六）热处理

机械加工完成后，一般进行应力消除退火。对于部分产品，还需进行组织稳定化热处理，以消除加工应力，提高高温尺寸稳定性。

（七）质量检验

TZM 管材通常需要进行尺寸检测、超声探伤、密度检测、化学成分分析及金相组织检验。对于高端真空设备，还可能进行气密性检测及表面洁净度检测。

目前工业 TZM 管材大多采用棒材钻孔加工路线，而不是传统无缝钢管生产工艺。这是因为 TZM 塑性较低，机械加工不仅能够保证尺寸精度和组织均匀性，还能获得更高的产品可靠性。对于高端半导体及真空设备，精密机加工管材仍是目前最成熟、最可靠的制造方案。

Q101 钛锆钼合金（TZM）坩埚如何制造？

TZM 坩埚是 TZM 最重要的深加工产品之一，广泛应用于蓝宝石生长、单晶硅生长、稀土熔炼、高温蒸发、电子束熔炼、真空镀膜及科研热场等领域。由于 TZM 具有优异的高温强度、抗蠕变性能及尺寸稳定性，其坩埚寿命通常明显长于纯钼坩埚。根据尺寸、壁厚及用途不同，目前 TZM 坩埚主要采用机械加工、旋压成形及焊接组合等制造工艺。

（一）粉末冶金制备坯料

首先采用标准 TZM 粉末冶金工艺生产高致密度板材或棒材。材料通常经过锻造、轧制及热处理，以获得细小均匀的组织 and 良好的高温性能。

（二）整体机加工制造

对于中小尺寸 TZM 坩埚，目前最常见的方法是采用大规格 TZM 棒材直接进行数控车削加工。通过逐步车削内腔和外圆，可获得整体无焊缝结构。这种坩埚组织连续、强度高、真空密封性能好，是高端产品的主要制造方式。

（三）板材旋压成形

较薄壁、大尺寸坩埚，可采用 TzM 板材经热旋压或旋压成形制造。旋压过程中材料逐步形成筒形结构，再进行后续精加工和热处理。该方法材料利用率较高，适合中大型坩埚生产。

（四）焊接组合制造

对于超大型 TzM 坩埚，可分别加工筒体、底板及法兰等部件，再采用电子束焊、激光焊或真空扩散焊连接。焊后通常进行应力消除处理，以提高焊缝稳定性。

（五）精密机械加工

成形后的坩埚需进行内外圆精车、端面加工及磨削。对于半导体及光伏行业，还需控制圆度、同轴度、壁厚均匀性及表面粗糙度，以满足高精度设备要求。

（六）热处理

加工完成后，一般进行应力消除退火。部分高端产品还需进行组织稳定化处理，以减少高温使用过程中的变形和残余应力释放。

（七）检测与验收

TzM 坩埚通常需检测尺寸、密度、金相组织、焊缝质量、表面缺陷及高温性能。对于半导体行业，还可能增加超声探伤、渗透检测及真空洁净度检测。

（八）TzM 坩埚主要制造工艺

工艺步骤	主要内容
坯料制备	粉末冶金、锻造、轧制
成形方式	整体机加工、旋压成形、焊接组合
精加工	数控车削、磨削、尺寸修整
热处理	应力消除、组织稳定化
检测	尺寸、组织、焊缝、密度、无损检测

（九）TzM 坩埚不同制造方式特点

制造方式	优点	适用范围
整体机加工	无焊缝、强度最高、可靠性最好	中小尺寸、高端坩埚
旋压成形	材料利用率高、重量较轻	中大型薄壁坩埚
焊接组合	可制造超大尺寸、结构灵活	大型工业坩埚

中钨智造总结实践经验认为，TzM 坩埚的制造核心在于获得均匀稳定的组织、较低的残余应力及优良的尺寸精度。目前，中小尺寸高端 TzM 坩埚仍以整体机加工产品为主，可获得最佳的高温强度和使用寿命；对于大型坩埚，则更多采用旋压成形或焊接组合工艺，以兼顾制造成本、材料利用率和工程可行性。随着大尺寸半导体热场和先进晶体生长设备的发展，高精度、大尺寸、长寿命 TzM 坩埚将成为未来的重要发展方向。



Q102 钛锆钼合金（TBM）靶材有哪些要求？

TBM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）靶材主要用于磁控溅射、离子镀、电子束蒸发及其他物理气相沉积（PVD）工艺，可制备钼基功能薄膜、扩散阻挡层、高温耐磨涂层及特殊电子薄膜。相比纯钼靶材，TBM 靶材具有更高的高温强度、更好的尺寸稳定性和更低的热变形，在大功率、长时间溅射条件下具有明显优势。为了保证镀膜质量和靶材寿命，TBM 靶材通常需要满足以下要求。

（一）高纯度化学成分

TBM 靶材应采用高纯原材料生产，严格控制 Ti、Zr、C 含量，同时限制氧、氮、碳（游离碳）、铁、镍、铜等杂质含量。高纯度能够减少放电异常和颗粒污染，提高薄膜纯净度。

（二）高致密度

靶材通常要求相对密度达到 98% 以上，高端产品一般要求接近理论密度。较高的致密度能够降低放电过程中局部烧蚀和异常放电，提高靶材利用率。

（三）组织均匀

晶粒尺寸应均匀一致，TiC、ZrC 强化相应均匀分布，不允许存在粗大晶粒、偏析及明显组织不均。均匀组织有助于获得稳定的溅射速率和均匀的薄膜厚度。

（四）内部缺陷少

靶材内部应避免存在气孔、裂纹、夹杂、分层及疏松等缺陷。高品质 TBM 靶材通常采用超声检测等无损检测方法进行质量控制。

（五）尺寸精度高

平面靶、圆形靶及旋转靶均要求较高的尺寸精度。特别是旋转靶，对圆度、同轴度及直线度

要求较高，以保证设备高速运转时的稳定性。

（六）表面质量优良

加工后的靶材表面应光洁，无划伤、裂纹、压痕及氧化污染。高端半导体行业通常要求进行精磨、抛光及超声清洗，以降低颗粒污染风险。

（七）良好的结合性能

对于背板结合型靶材，应具有良好的钎焊性能或扩散焊性能。靶材与背板结合牢固，可提高散热效率，避免长期工作过程中发生脱层。

（八）稳定的溅射性能

TZM 靶材应具有均匀的溅射速率、较低的颗粒产生率及良好的靶材利用率。长期工作过程中，应保持稳定的放电性能和均匀的侵蚀形貌。

TZM 靶材主要技术要求

技术指标	主要要求
化学纯度	高纯、低杂质
相对密度	≥98%，高端产品接近理论密度
晶粒组织	细小均匀、无偏析
内部质量	无裂纹、气孔、夹杂、分层
尺寸精度	高圆度、高平面度、高同轴度
表面质量	精磨或抛光、无污染
结合性能	良好的钎焊或扩散焊性能
溅射性能	放电稳定、颗粒少、利用率高

中钨智造认为，TZM 靶材的关键并不仅在于材料性能，更在于组织均匀性、内部致密度和精密加工质量。随着半导体及高端镀膜设备向大功率、高均匀性方向发展，高纯度、高致密度、大尺寸及低颗粒污染 TZM 靶材将成为未来的重要发展方向。

Q103 钛锆钼合金（TZM）旋转阳极如何加工？

TZM 旋转阳极（Rotating Anode）主要应用于高功率 X 射线管、工业 CT、医学 CT 及高端无损检测设备。由于 TZM 具有优异的高温强度、抗蠕变性能、导热性能和尺寸稳定性，因此常作为旋转阳极盘的重要基体材料。旋转阳极长期工作在高速旋转、高温循环及真空环境中，对材料组织、尺寸精度和动平衡性能要求极高，其制造过程远比普通 TZM 零件复杂。

（一）制备高品质 TZM 坯料

首先采用高纯 TZM 粉末，经粉末冶金、烧结、锻造和热轧工艺制备高致密度坯料。材料应具有均匀细小晶粒、高致密度及稳定的 TiC、ZrC 强化组织，为高速运行提供可靠基础。

（二）粗加工成形

采用数控车削将坯料加工成旋转阳极盘毛坯。同时预留后续精加工余量，以保证最终尺寸精度和热处理后的修正空间。

（三）热处理

粗加工后通常进行应力消除退火，必要时进行组织稳定化处理。通过消除加工残余应力，提高旋转阳极在长期高速旋转过程中的尺寸稳定性。

（四）精密机械加工

采用高精度数控车床、磨床及专用夹具，对外圆、内孔、安装面及工作面进行精加工。加工过程中需严格控制平面度、圆度、同轴度及端面跳动，以保证高速旋转时的稳定性。

（五）钨靶层结合

多数高功率 X 射线旋转阳极采用 TZM 作为基体，在工作面结合高纯钨或钨钼合金靶层。结合方式通常采用真空钎焊、扩散焊或其他高可靠性连接工艺，以保证良好的导热性能和结合强度。

（六）动平衡校正

旋转阳极通常工作于数千至一万转每分钟以上。因此必须进行高精度动平衡校正，尽量降低高速旋转产生的振动，保证设备寿命和成像质量。

（七）质量检测

产品需进行尺寸检测、动平衡检测、超声探伤、金相组织分析、结合层检测及高速旋转模拟试验。高端医疗设备还需进行寿命试验及热循环试验，以验证长期可靠性。

（八）TZM 旋转阳极主要制造流程

工艺步骤	主要内容
坯料制备	粉末冶金、烧结、锻造
粗加工	数控车削成形
热处理	应力消除、组织稳定化
精加工	精车、精磨、尺寸控制
靶层结合	真空钎焊或扩散焊钨、钨钼靶层
动平衡	高速动平衡校正
检测	尺寸、组织、结合层、转速及寿命测试

（九）TZM 作为旋转阳极基体的主要优势

性能优势	工程意义
高温强度高	承受高速旋转产生的离心应力
抗蠕变性能优异	长期高温尺寸稳定
导热性能好	快速传导靶面热量
热膨胀系数较低	降低热应力和变形
加工性能优于钨	易于获得高精度尺寸
与钨靶层匹配性好	有利于高可靠性连接

中钨智造认为，TZM 旋转阳极代表了 TZM 材料在医疗影像和工业检测领域的重要应用，其

制造难点不仅在于 TzM 材料本身，还包括高精度机械加工、高可靠性钨靶层连接及高速动平衡控制。目前，采用 TzM 基体配合钨或钨钼靶层，仍然是全球高性能 X 射线旋转阳极最成熟、最可靠的技术方案之一。

Q104 中钨智造如何制造钛锆钼合金（TzM）异形件？

TzM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）异形件是指具有复杂几何形状、非标准结构或特殊功能的 TzM 零部件，广泛应用于半导体设备、航空航天、电子工业、真空炉、聚变装置及科研设备。典型产品包括热场支架、导轨、定位块、反射板、电极、夹具、喷嘴、法兰、屏蔽件及各种定制高温结构件。由于 TzM 属于高性能难熔金属合金，塑性较低、加工硬化明显，因此异形件通常采用近净成形毛坯结合精密机械加工制造，而很少采用一次成形工艺。中钨智造有近 20 年的为客户设计生产定制异形件的经验，总结如下。

（一）选择合适毛坯

根据零件结构和尺寸，首先选择 TzM 棒材、板材、管材或锻件作为加工毛坯。对于材料去除量较大的产品，可采用接近最终尺寸的近净成形坯料，以提高材料利用率，降低加工成本。

（二）数控车削、铣削

对于回转类零件，如法兰、套筒、阳极基体、圆柱支撑件等，通常采用数控车床完成外圆、内孔、端面及螺纹加工。车削时一般采用较小切削深度和稳定切削参数，以降低切削应力和刀具磨损。对于导轨、夹具、热场支架及复杂平面结构件，多采用三轴、四轴或五轴数控加工中心完成。复杂曲面及空间结构通常依靠多轴联动加工，以保证尺寸精度和加工效率。

（三）钻孔与深孔加工

TzM 异形件常包含安装孔、冷却孔及定位孔。

普通孔采用硬质合金钻头加工，大深径比孔通常采用枪钻、深孔钻或电火花加工完成。

（四）电火花加工（EDM）

对于细槽、锐角、窄缝及传统刀具难以加工的复杂轮廓，可采用电火花成形加工或线切割加工。EDM 能够避免较大的机械切削力，适用于高精度复杂结构。

（五）磨削与精整

关键尺寸和配合面通常采用平面磨削、外圆磨削或内孔磨削。磨削不仅能够提高尺寸精度，还可改善表面粗糙度，提高零件装配质量。

（六）焊接与组合制造

对于超大型异形件或复杂组合结构，可分别加工各部件，再采用电子束焊、激光焊、扩散焊或真空钎焊完成装配。焊后一般需进行应力消除处理，以保证尺寸稳定性。

（七）热处理与检测

异形件完成机械加工后，通常进行应力消除退火。随后进行尺寸检测、金相分析、超声探伤、表面质量检查及必要的动平衡测试，确保满足设计要求。

（八）中钨智造钛锆钼合金（TzM）异形件典型制造流程

工艺步骤	主要内容
毛坯准备	棒材、板材、管材、锻件
粗加工	数控车削、铣削
特殊加工	深孔加工、电火花加工、线切割
精加工	精车、精铣、磨削
焊接装配	电子束焊、扩散焊、真空钎焊
热处理	应力消除退火
检测	尺寸、组织、无损检测、表面质量

中钨智造多年来积累了大量的为客户设计制造 TzM 异形件的经验与教训，我们总结认为，TzM 异形件的制造重点不是材料成形，而是高精度机械加工能力。随着五轴加工中心、电火花加工及精密检测技术的发展，目前已能够制造结构极其复杂的 TzM 零部件。对于半导体设备、聚变装置及航空航天等高端应用，制造精度、组织稳定性和尺寸一致性往往比材料本身更加重要。

Q105 钛锆钼合金（TzM）表面状态有哪些？

TzM 产品根据制造工艺、交货状态及最终用途不同，可提供多种表面状态。不同表面不仅影响外观，还直接影响后续加工、真空洁净度、焊接性能、热辐射性能及服役寿命。对于普通工业用途，通常采用机加工表面；对于半导体、真空电子及航空航天等高端领域，则往往要求更高等级的表面质量。

（1）烧结表面（As Sintered）

烧结完成后的 TzM 产品保留原始烧结表面。其表面通常呈灰黑色，存在一定氧化层和烧结痕迹，主要作为后续锻造或机械加工毛坯使用。

（2）锻造表面（Forged Surface）

热锻后的产品保留锻造氧化皮和加工痕迹。一般仍需进一步车削、铣削或磨削，不作为最终使用表面。

（3）黑皮面（Black Surface）

黑皮面是保留热加工氧化膜的表面状态。成本较低，适用于一般机械加工毛坯及对表面质量要求不高的产品。

（4）车光面（Turned Surface）

通过数控车削加工形成。表面尺寸精度较高，可满足多数机械零件加工要求，是 TzM 棒材和圆柱零件最常见的交货状态之一。

（5）铣削面（Milled Surface）

板材和大型结构件通常采用铣削加工获得平整表面。铣削面适合后续精加工或装配加工。

（6）磨光面（Ground Surface）

采用平面磨、外圆磨或无心磨加工形成。具有较高尺寸精度和较低表面粗糙度，是半导体设备及精密机械中应用最广泛的表面状态之一。

(7) 抛光面 (Polished Surface)

通过机械抛光、精密研磨等工艺进一步降低表面粗糙度。抛光面可减少颗粒脱落和表面污染，提高真空洁净度，广泛应用于真空电子、半导体及科研设备。

(8) 化学清洗表面 (Chemical Cleaned)

采用化学清洗工艺去除油污、氧化物及加工残留。该状态通常作为真空设备和半导体零件交付前的重要处理工序。

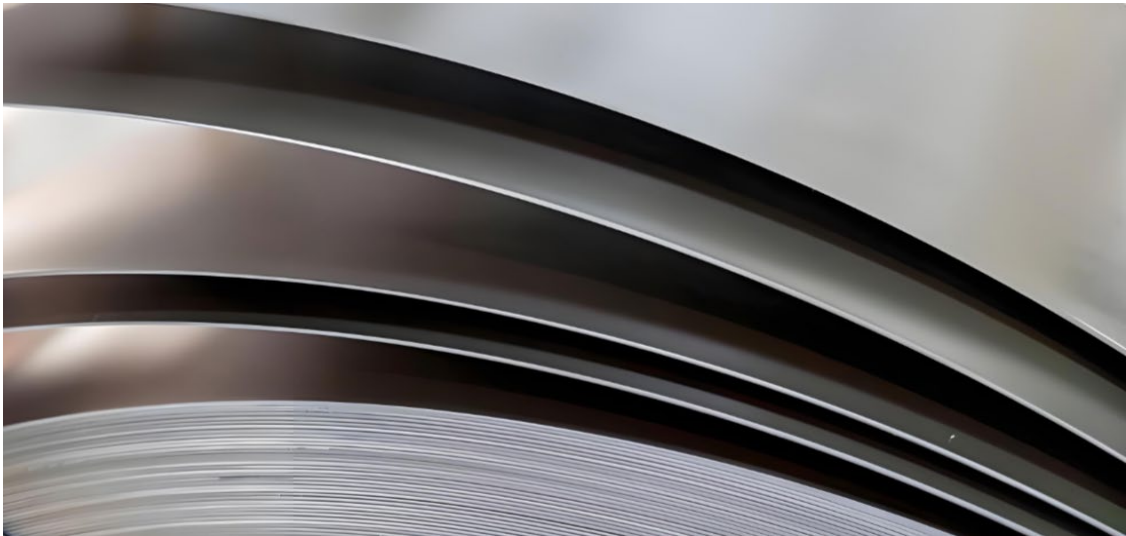
(9) 超声清洗表面 (Ultrasonic Cleaned)

精密零件常在最终加工后进行超声波清洗，去除微细颗粒和加工残留。部分产品还会采用超纯水漂洗和洁净包装，以满足高洁净应用要求。

(10) 中钨智造 TZM 的常见表面状态

表面状态	特点	典型用途
烧结表面	保留烧结状态	毛坯
锻造表面	保留锻造痕迹	后续加工
黑皮面	保留氧化层	普通工业用途
车光面	尺寸精度较高	棒材、轴类零件
铣削面	平整度较好	板材、结构件
磨光面	粗糙度低、精度高	半导体、精密设备
抛光面	表面最光洁	真空设备、科研装置
化学清洗	去除污染物	真空行业
超声清洗	高洁净度	半导体、电子工业

中钨智造的 TZM 产品的表面状态应根据最终使用环境进行选择，而不是越光亮越好。普通高温结构件通常采用车光或磨光表面即可；对于半导体、真空电子及航空航天等高端领域，则需要采用磨光、抛光、化学清洗及超声清洗等组合工艺，以获得更低的表面粗糙度、更高的洁净度和更稳定的服役性能。随着先进制造技术的发展，高洁净、低缺陷、超低粗糙度表面将成为 TZM 高端产品的重要发展方向。





第十一篇 钛锆钼合金（TZM）的应用领域

钛锆钼合金（TZM）在半导体产业的应用有哪些？

半导体产业是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）最重要、应用规模最大的领域之一。凭借优异的高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性及真空兼容性，TZM 已广泛应用于单晶硅生长、化合物半导体制造、晶圆加工、真空镀膜及先进封装等多个关键工艺环节，是现代半导体装备中不可替代的重要高温结构材料。随着芯片制造向大尺寸晶圆、更高工艺精度及更长连续运行时间发展，对 TZM 材料的纯度、组织均匀性、加工精度及寿命要求也不断提高。

（一）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 单晶硅生长设备

TZM 在直拉法（CZ）和区熔法（FZ）单晶硅生长设备中应用十分广泛。主要用于热场支撑结构、加热器支架、电极、连接件、隔热屏支撑、导向件及各种高温承力部件。由于 TZM 具有较高的高温强度和较低的高温蠕变速率，可在 1400 °C 以上长期保持尺寸稳定，有利于提高单晶硅生长过程的稳定性和晶体质量。

（二）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 蓝宝石及化合物半导体晶体生长

在蓝宝石、砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）、碳化硅（SiC）及氮化镓（GaN）等晶体生长设备中，TZM 广泛用于高温热场结构件。典型产品包括坩埚支架、热屏、承载盘、连接件及高温定位件。其优异的高温尺寸稳定性能够保证晶体生长过程中热场分布稳定，从而提高晶体品质。

（三）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 真空镀膜设备

在磁控溅射、电子束蒸发及离子镀设备中，TZM 主要用于靶材背板、电子束蒸发坩埚、蒸发舟支架、热屏及高温固定件。由于 TZM 导热性能优良，并具有较高的蒸气压和良好的真空性能，可有效降低污染，提高镀膜稳定性。

（四）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 半导体热处理设备

在退火炉、扩散炉及高温烧结炉中，TZM 可用于炉内支撑件、加热系统结构件、导轨及承载装置。TZM 能够长期承受反复热循环，并保持较好的尺寸精度和力学性能，有助于提高设备可靠性。

（五）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 离子注入及真空设备

部分离子注入设备及超高真空设备中，TZM 用于制造高温电极、固定件、支撑架及热管理部件。其低放气率、低蒸气压及优异的真空兼容性，有助于维持设备洁净环境。

（六）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 半导体检测设备

在部分 X 射线检测设备、电子束检测设备及高温测试平台中，TZM 用于制造高温平台、支撑件及散热结构件。材料具有较高的刚性和热稳定性，可保证检测精度。

（七）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 先进封装装备

随着先进封装及第三代半导体的发展，高温键合、烧结及封装设备对热场均匀性提出更高要求。TZM 可用于高温压头支撑件、定位治具及耐热夹具，提高设备重复精度和长期稳定性。

（八）半导体行业典型 TZM 产品

应用设备	典型 TZM 零件
单晶硅炉	热场支架、加热器支撑、电极、连接件
蓝宝石炉	坩埚支架、热屏、定位件
SiC、GaN 晶体炉	高温支撑件、承载盘、连接件
真空镀膜设备	蒸发坩埚、靶材背板、热屏、固定件
扩散炉、退火炉	导轨、支架、承载件
离子注入设备	电极、真空支撑件
检测设备	高温平台、散热件
先进封装设备	治具、夹具、热压支撑件

（九）TZM 在半导体产业中的主要优势

材料特性	对半导体制造的意义
高温强度高	保证热场长期稳定运行
抗蠕变性能优异	长时间使用不易变形
导热性能好	有利于热量快速均匀传递
热膨胀系数低	降低热应力，提高加工精度
蒸气压低	减少真空污染
真空兼容性好	放气率低，不污染工艺环境
加工性能优于纯钨	易制造复杂精密零件
使用寿命长	降低设备维护和停机成本

（十）钛锆钼合金（TZM）的应用领域-半导体产业 未来发展趋势

随着 300 mm 及更大尺寸晶圆制造、第三代半导体、先进封装及高功率器件的发展，TZM 材

料正向高纯化、高致密化、大尺寸化及高精度加工方向发展。未来，高洁净 TZM、大规格整体结构件、超低残余应力产品及近净成形深加工零件，将成为半导体装备制造的重要发展方向。中钨智造认为，半导体产业已成为全球 TZM 材料最重要的应用市场之一。从单晶硅生长到真空镀膜、从热处理设备到先进封装装备，TZM 几乎覆盖了半导体制造全过程中的高温结构件。随着芯片制造工艺不断升级，对 TZM 材料的纯度、组织均匀性、尺寸精度、表面洁净度及长期稳定性的要求也将持续提高，高性能、高可靠性、高精密 TZM 产品将成为未来半导体装备关键材料的发展重点。

Q106 为什么钛锆钼合金（TZM）广泛用于半导体设备？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）是目前全球半导体装备中应用最广泛的难熔金属结构材料之一。从单晶硅生长炉、蓝宝石炉、碳化硅（SiC）晶体生长设备，到真空镀膜设备、热处理设备及先进封装装备，TZM 几乎贯穿整个半导体制造产业链。TZM 能够长期占据这一重要地位，并不是因为某一项性能特别突出，而是因为其在高温性能、真空性能、加工性能及工程可靠性之间实现了极佳的综合平衡，因此成为现代半导体装备的重要基础材料。

（一）钛锆钼合金（TZM）具有优异的高温强度

半导体热场设备长期工作温度通常在 1200~1600 °C 之间，部分设备局部温度甚至更高。普通金属在这一温度范围内已明显软化，而 TZM 依靠 TiC、ZrC 弥散强化，仍能保持较高的高温强度和承载能力，可长期支撑热场结构及晶体生长系统。

（二）钛锆钼合金（TZM）的抗蠕变性能优异

晶体生长炉通常连续运行数百小时甚至数千小时。TZM 在高温下具有远低于纯钼的蠕变速率，可长期保持尺寸稳定，避免热场结构发生下垂、变形及位置偏移。对于单晶硅拉晶设备而言，这一点直接关系到晶体质量和设备寿命。

（三）钛锆钼合金（TZM）的热导率较高

TZM 继承了钼良好的导热性能。材料能够快速传递热量，使热场温度分布更加均匀，减少局部过热和热应力，提高晶体生长稳定性。

（四）钛锆钼合金（TZM）的热膨胀系数较低

TZM 线膨胀系数较小，在反复升温 and 降温过程中尺寸变化较小。因此能够降低热疲劳和热变形，提高热场定位精度和长期重复性。

（五）钛锆钼合金（TZM）的真空性能优异

绝大多数半导体设备工作于高真空或超高真空环境。TZM 具有极低蒸气压、低放气率及良好的真空兼容性，高温下不易挥发，也不会向真空系统释放大量杂质，从而有效降低污染风险。

（六）钛锆钼合金（TZM）的高温尺寸稳定性好

经过合理热处理后的 TZM 具有较高的再结晶温度，在长期使用过程中晶粒增长缓慢，能够保持稳定的几何尺寸。对于要求微米级定位精度的现代半导体设备，这是极其重要的性能。

（七）钛锆钼合金（TZM）的加工性能优于其他难熔金属

相比纯钨及部分新型钼基高温合金，TZM 具有更好的机械加工性能。可以方便地进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接，适合制造各种复杂结构件。

（八）钛锆钼合金（TZM）的综合寿命长

由于高温强度高、抗蠕变性能好、抗热疲劳能力强，TZM 零件通常具有较长服役寿命。虽采购成本高于纯钼，但全生命周期成本通常更低，因此成为半导体行业长期采用的标准材料。

TZM 适用于半导体设备的主要原因

材料特点	对半导体设备的意义
高温强度高	保证热场长期稳定
抗蠕变性能优异	长时间运行不易变形
导热性能好	热场均匀、温度稳定
热膨胀系数低	提高定位精度
真空兼容性好	减少污染和放气
蒸气压低	不污染晶体和薄膜
易加工	可制造复杂精密零件
使用寿命长	降低维护和停机成本

中钨智造认为，TZM 能够成为半导体设备的主流材料，并不是依赖某一项极端性能，而是因为它在高温性能、真空性能、机械加工性能及工程可靠性之间实现了最佳平衡。目前，无论是 300 mm 硅片生产线，还是第三代半导体设备、高端真空热场及先进封装装备，TZM 仍然是最成熟、最可靠的高温结构材料之一。

Q107 钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用有哪些？

单晶硅生长炉是 TZM 应用最广泛的设备之一。无论是直拉法（CZ，Czochralski）还是区熔法（FZ，Float Zone）单晶硅生长设备，TZM 都承担着热场支撑、高温连接及精密定位等重要功能。由于晶体生长过程通常持续几十小时至数百小时，并长期工作在 1300~1600 °C 以上的高温和高真空环境，因此热场材料必须具有优异的高温强度、抗蠕变性能及尺寸稳定性，而 TZM 正是目前最成熟的解决方案。

（一）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-加热器支撑结构

石墨加热器通常通过 TZM 支架进行固定。TZM 能够长期承受高温和热循环，不易发生弯曲和下垂，从而保证加热器位置稳定，维持热场分布一致。

（二）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-热屏支撑件

多层石墨热屏通常采用 TZM 支架、连接杆及固定件进行支撑。由于 TZM 热膨胀较小，可保证热屏长期保持设计位置，提高炉内温度均匀性。

（三）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-电极及导电连接件

TZM 常用于制造高温电极及各种导电连接件。其优良的导电性能和高温稳定性能够保证长期稳定供电，同时减少高温变形。

（四）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-坩埚支撑系统

石英坩埚或石墨坩埚通常安装于 TZM 支撑结构上。TZM 具有较高的承载能力，可长期承受熔融硅重量，并保持良好的几何稳定性。

（五）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-导向及定位结构

在晶体提升系统和热场装配过程中，大量采用 TZM 导向件、定位块及安装件。其尺寸稳定性能够保证晶体始终处于设计位置，提高拉晶质量。

（六）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-连接杆与支撑杆

TZM 连接杆和支撑杆广泛应用于炉内高温区域。相比纯钼，其长期抗弯曲能力更强，使用寿命明显提高。

（七）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-隔热结构件

部分热场隔热组件采用 TZM 骨架进行固定。由于材料导热均匀且高温变形小，可提高整个热场系统的稳定性。

（八）钛锆钼合金（TZM）的单晶硅生长炉应用-真空炉内承载件

在装卸晶体及维护过程中，TZM 还可用于承载平台、支架及辅助高温结构件。其较高的刚性能够保证设备长期运行的可靠性。

单晶硅生长炉中典型 TZM 零件

应用位置	主要 TZM 零件
加热系统	加热器支架、电极、导电连接件
热场系统	热屏支架、固定件、连接杆
坩埚系统	坩埚支撑、承载件
提升系统	导向件、定位件、安装座
炉体内部	支撑杆、隔热骨架、承载平台
辅助结构	高温夹具、连接法兰、固定支架

TZM 在单晶硅生长炉中的主要优势

性能优势	工程价值
高温强度高	长期支撑热场结构
抗蠕变性能优异	防止热场下垂和变形
导热性能好	提高温度均匀性
热膨胀小	保证晶体定位精度
真空性能优良	不污染炉内环境
使用寿命长	降低维护频率和停机时间
易于加工	可制造复杂热场零件

中钨智造认为，单晶硅生长炉是 TZM 应用最成熟、用量最大的领域之一。目前，一套大尺寸直拉单晶硅生长炉通常包含数十种甚至上百件 TZM 零部件。从加热系统、热场系统到支撑和定位结构，TZM 几乎贯穿整个高温区域。随着 300 mm、450 mm 大尺寸晶圆及第三代半导体的发展，对 TZM 材料的纯度、组织均匀性、高温尺寸稳定性及加工精度提出了更高要求，高性能 TZM 仍将长期保持其在半导体热场中的核心地位。

Q108 为什么钛锆钼合金（TZM）适用于蓝宝石长晶设备？

蓝宝石（ Al_2O_3 ）晶体广泛应用于 LED 衬底、消费电子盖板、光学窗口、激光器及高端仪器等领域。无论是泡生法（Kyropoulos, KY）、导模法（EFG）、热交换法（HEM）还是其他长晶工艺，其核心设备均需要在 1800~2100 °C 左右的高温环境下长期稳定运行，对热场材料提出了极高要求。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）虽然不能直接接触熔融氧化铝，但由于具有优异的高温力学性能和尺寸稳定性，已成为蓝宝石长晶设备中最重要的高温结构材料之一。

（一）钛锆钼合金（TZM）具有优异的高温承载能力

蓝宝石长晶周期通常持续数天甚至数周，设备长期处于高温状态。TZM 经过 TiC、ZrC 第二相强化后，高温强度明显高于纯钼，可长期承受热场结构及大型坩埚系统重量，而不易发生塑性变形。

（二）钛锆钼合金（TZM）的抗蠕变性能优异

蓝宝石晶体生长要求热场几何尺寸长期保持稳定。如果支撑件发生蠕变或下垂，将导致温场发生变化，影响晶体生长方向、生长速度及内部应力。TZM 较低的高温蠕变速率能够保证热场长期稳定，提高晶体成品率。

（三）钛锆钼合金（TZM）的尺寸稳定性高

TZM 具有较高的再结晶温度和较低的晶粒长大速度。在反复升温、保温及冷却过程中，零件尺寸变化较小，可长期保持装配精度和热场位置。对于大尺寸蓝宝石晶体，这一点尤为重要。

（四）钛锆钼合金（TZM）的导热性能良好

TZM 保持了钼优良的导热能力，可使热量快速均匀传递。有利于维持炉内稳定的温度梯度，降低局部过热和热应力，提高晶体质量。

（五）钛锆钼合金（TZM）的真空及保护气氛兼容性好

蓝宝石长晶设备通常工作于真空或惰性气氛。TZM 蒸气压低、放气率低，不易挥发和污染炉内环境，可保证晶体生长过程稳定。

（六）钛锆钼合金（TZM）的加工性能优于钨

蓝宝石热场结构往往形状复杂，尺寸精度要求高。相比纯钨，TZM 更容易进行车削、铣削、钻孔、磨削及焊接，可制造各种复杂高温结构件。

（七）钛锆钼合金（TZM）的综合寿命较长

由于高温强度高、抗蠕变能力强，TZM 热场零件通常比纯钼具有更长的使用寿命。虽然采购成本较高，但能够减少停炉维护次数，降低整体运行成本。

（八）TZM 在蓝宝石长晶设备中的主要优势

材料性能	工程意义
高温强度高	长期支撑热场及坩埚系统
抗蠕变性能优异	保持热场几何稳定

材料性能	工程意义
导热性能好	提高温场均匀性
热膨胀较低	减少热变形
真空兼容性好	降低污染风险
易加工	制造复杂结构件
使用寿命长	降低维护成本

（九）中钨智造为客户设计生产的蓝宝石长晶设备中的典型 TZM 零件

TZM 广泛用于热场支架、坩埚支撑环、加热器支撑件、导向杆、定位块、连接件、固定法兰、承载平台、隔热屏支架及各种高温承力结构件。这些零件虽然不直接接触熔融蓝宝石，但承担着整个热场系统的支撑和定位功能，对设备稳定运行具有决定性作用。

中钨智造认为，TZM 已成为现代蓝宝石长晶设备最成熟的高温结构材料之一。随着大尺寸蓝宝石晶体、Mini LED、Micro LED 及光学窗口材料的发展，设备对热场稳定性要求越来越高，TZM 凭借优异的高温性能、尺寸稳定性及较长使用寿命，未来仍将在蓝宝石长晶装备中保持重要地位。

Q109 钛锆钼合金（TZM）在 SiC 晶体生长中有哪些应用？

碳化硅（SiC）是第三代半导体的重要代表材料，广泛应用于新能源汽车、电力电子、轨道交通、5G 通信、工业控制及航空航天等领域。目前工业化 SiC 单晶主要采用物理气相传输法（Physical Vapor Transport, PVT）生长，晶体生长温度通常高达 2100~2500 °C，属于目前工业中温度最高的晶体生长工艺之一。在如此苛刻的工作环境下，TZM 并不能直接用于最高温的升华坩埚，但由于其优异的高温力学性能和尺寸稳定性，仍然大量应用于 SiC 晶体生长设备的外围热场和承载系统，是现代 SiC 长晶炉的重要结构材料。

（一）热场支撑结构

SiC 长晶炉内部采用多层热场结构。TZM 主要用于支撑石墨热场、隔热结构及加热系统，长期承受高温载荷而不易发生蠕变变形。

（二）加热器支架

石墨电阻加热器通常安装在 TZM 支撑件上。TZM 能够保持加热器几何位置稳定，有利于形成稳定的温度场，提高晶体生长质量。

（三）隔热屏支架

多层石墨隔热屏通常采用 TZM 支撑框架固定。TZM 具有良好的刚性和高温尺寸稳定性，可保证隔热结构长期保持设计位置。

（四）导向与定位结构

TZM 广泛用于炉内定位块、导向件、连接杆及安装件。这些零件决定了热场系统的装配精度，对晶体生长温场分布具有重要影响。

（五）承载平台

部分设备采用 TzM 承载平台支撑热场组件。由于材料抗蠕变性能优异，即使长期工作于高温环境，也能够保持较好的平整度和承载能力。

（六）高温连接件

TzM 大量用于制造高温螺栓、螺母、垫片、连接法兰及固定件。相比纯钼，这些零件具有更高的强度和更长的使用寿命。

（七）真空炉结构件

SiC 长晶设备通常工作于真空或低压惰性气氛。TzM 蒸气压低、放气率低，适合制造炉内真空结构件，可有效降低杂质污染。

（八）为什么 TzM 通常不直接制造 SiC 生长坩埚？

虽然 TzM 具有优异的高温性能，但在 2100~2500 °C 的长期工作条件下，其高温强度和抗升华能力仍不及高纯石墨。同时，SiC 晶体生长需要特定的热场设计和升华环境，高纯等静压石墨具有加工容易、热导率可调、耐升华性能较好的优势，因此目前工业 SiC 生长坩埚仍以高纯石墨为主。TzM 更多承担热场外围承力和定位功能，而不是直接作为晶体生长容器。

（九）SiC 长晶设备中的典型 TzM 零件

应用部位	典型 TzM 零件
热场系统	支撑架、支撑环、连接杆
加热系统	加热器支架、电极连接件
隔热系统	隔热屏支架、固定件
定位系统	导向块、定位块、安装座
承载系统	支撑平台、承载件
真空系统	法兰、连接件、高温紧固件

（十）TzM 在 SiC 长晶设备中的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	支撑大型热场结构
抗蠕变性能优异	保持温场长期稳定
导热性能好	有利于热场控制
尺寸稳定性高	提高晶体生长一致性
真空性能优良	降低污染风险
加工性能较好	易制造复杂结构件
使用寿命长	减少停机维护

中钨智造认为，随着 8 英寸、12 英寸 SiC 晶体的发展，热场尺寸不断增大，对结构件的高温强度和长期稳定性提出了更高要求。TzM 虽然不会取代高纯石墨成为晶体生长坩埚材料，但在热场支撑、加热系统、定位系统及高温连接结构中的应用将持续增加。未来，高纯度、低残余应力、高尺寸精度的大规格 TzM 结构件，将成为第三代半导体装备的重要组成部分。

Q110 钛锆钼合金（TZM）为什么适用于 GaN 设备？

氮化镓（GaN, Gallium Nitride）是第三代半导体的重要代表材料，具有宽禁带、高击穿电场、高电子迁移率及耐高温等优点，广泛应用于 5G 通信、射频器件、快充电源、新能源汽车、电力电子及激光器等领域。GaN 晶体生长、外延生长及高温热处理设备通常需要在高温、高真空或高纯保护气氛下长期运行，对热场材料提出了极高要求。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 钛锆钼合金）凭借优异的综合性能，已成为 GaN 装备中最重要的高温结构材料之一。需要说明的是，TZM 通常作为热场结构件、支撑件及高温承载件使用，并不直接作为 GaN 晶体或外延生长的反应材料。

（1）具有优异的高温强度

GaN 晶体生长及部分热处理工艺温度可达 1200~1800 °C，部分设备局部温度甚至更高。TZM 经过 TiC、ZrC 强化后，高温强度明显优于纯钼，可长期承受热场结构、自重及装配载荷，不易发生塑性变形。

（2）抗蠕变性能优异

GaN 晶体生长和外延设备通常需要长时间连续运行。TZM 具有较低的高温蠕变速率，可保证热场几何尺寸长期稳定，避免支撑结构变形影响温场分布。

（3）导热性能良好

TZM 导热率较高，可快速传导热量，使热场温度更加均匀。均匀稳定的温度分布有助于提高 GaN 晶体及外延层的质量，降低热应力和缺陷密度。

（4）真空兼容性优异

GaN 设备通常工作于高真空或高纯氮气、氩气等保护气氛。TZM 具有极低蒸气压和较低放气率，高温下不易挥发，可减少杂质污染，提高工艺稳定性。

（5）尺寸稳定性高

TZM 再结晶温度较高，高温下晶粒生长缓慢。长期使用过程中尺寸变化较小，可保证热场系统和外延设备保持稳定的几何关系，提高工艺重复性。

（6）易于制造复杂结构件

GaN 设备内部零件形状复杂，通常要求较高的尺寸精度。TZM 加工性能优于纯钼及多数难熔金属，可方便进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接。

（7）使用寿命较长

由于具有优异的高温性能及抗热疲劳能力，TZM 零件通常能够长期重复使用。相比普通钼材料，可明显降低设备维护频率和综合运行成本。

（8）TZM 在 GaN 设备中的典型应用

TZM 主要用于热场支架、加热器支撑件、电极、隔热屏支架、导向件、连接杆、定位块、安装座、高温固定件及真空炉内各种承力结构件。在 HVPE（氢化物气相外延）、Ammonothermal（氨热法）、MOCVD（金属有机化学气相沉积）等设备中，TZM 主要承担高温结构支撑和热

场稳定作用。

（9）TZM 适用于 GaN 设备的主要原因

材料性能	工程价值
高温强度高	支撑热场结构
抗蠕变性能优异	长期保持温场稳定
导热性能好	提高热场均匀性
真空兼容性好	降低杂质污染
热膨胀系数较低	减少热变形
加工性能较好	制造复杂精密零件
使用寿命长	降低维护成本

中钨智造认为，随着 GaN 功率器件和射频器件快速发展，对晶体生长及外延装备提出了更高要求。TZM 凭借高温强度、尺寸稳定性及优异的真空性能，已成为 GaN 设备中最成熟的高温结构材料之一。未来，随着大尺寸 GaN 晶体及 8 英寸 GaN 外延技术的发展，高纯、高精度、大尺寸 TZM 热场零件的需求仍将持续增长。

Q111 钛锆钼合金（TZM）热场部件包括哪些？

热场（Hot Zone）是各种高温真空设备、晶体生长炉及热处理设备中最核心的组成部分，其作用是建立稳定、均匀、可控的高温环境。TZM 由于具有高温强度高、抗蠕变性能优异、导热性能好及真空兼容性优良等特点，被广泛用于热场系统中的各种承力和支撑部件。需要指出的是，TZM 通常用于热场结构件，而直接与熔体接触的坩埚、发热体等部件，则根据不同工艺采用石墨、钨、钽等其他材料。

（一）钛锆钼合金（TZM）热场部件-热场支架（Support Frame）

热场支架是整个热场系统的骨架。TZM 支架负责承载加热器、隔热屏及坩埚系统，要求长期保持较高的刚性和尺寸稳定性。

（二）钛锆钼合金（TZM）热场部件-支撑杆（Support Rod）

支撑杆连接各层热场结构，是应用最广泛的 TZM 零件之一。其主要作用是传递载荷并保证热场各部件的位置关系。

（三）钛锆钼合金（TZM）热场部件-连接杆（Connecting Rod）

连接杆用于连接不同热场模块。由于长期工作于高温环境，要求具有优异的抗蠕变性能和较高的连接可靠性。

（四）钛锆钼合金（TZM）热场部件-隔热屏支架（Heat Shield Support）

石墨或钼隔热屏通常采用 TZM 支架进行固定。支架必须保证隔热屏长期保持设计位置，以维持炉内温度场稳定。

（五）钛锆钼合金（TZM）热场部件-加热器支撑件（Heater Support）

加热器一般通过 TZM 支撑结构固定。高温下不易变形，有利于保持加热器几何形状及电极间距稳定。

（六）钛锆钼合金（TZM）热场部件-电极及导电连接件（Electrode and Connector）

TZM 广泛用于制造高温电极、导电连接件及电极支撑结构。其良好的导电性能和高温稳定性能够满足长期供电要求。

（七）钛锆钼合金（TZM）热场部件-坩埚支撑件（Crucible Support）

虽然坩埚本体通常采用石英、石墨、钨或其他材料，但坩埚外围支撑系统大量采用 TZM 制造。其主要作用是支撑坩埚重量并保持热场稳定。

（八）钛锆钼合金（TZM）热场部件-定位块（Positioning Block）

定位块用于保证各部件安装精度。TZM 尺寸稳定性优异，可长期保持装配尺寸不发生明显变化。

（九）钛锆钼合金（TZM）热场部件-导向件（Guide Component）

导向件用于晶体提升、坩埚移动及热场装配系统。要求具有较高的尺寸精度及良好的耐高温性能。

（十）钛锆钼合金（TZM）热场部件-安装法兰及固定件（Flange and Fastener）

包括法兰、螺栓、螺母、压板、卡箍及各种固定结构。TZM 能够长期承受热循环，不易因高温松动或失效。

（十一）钛锆钼合金（TZM）热场部件-承载平台（Support Platform）

部分热场采用 TZM 承载平台安装大型部件。平台要求具有较高平整度及抗变形能力，以保证热场系统稳定运行。

（十二）钛锆钼合金（TZM）热场部件-热屏骨架（Heat Shield Frame）

大型多层热屏通常采用 TZM 骨架支撑。其刚性高、重量适中，可保证热屏在长期高温下保持设计形状。

（十三）热场系统中常见 TZM 零件

类别	典型部件
支撑结构	支架、支撑杆、连接杆
加热系统	加热器支架、电极、导电连接件
隔热系统	热屏支架、热屏骨架
坩埚系统	坩埚支撑环、承载件
定位系统	导向件、定位块、安装座
固定系统	法兰、螺栓、螺母、压板
承载系统	承载平台、高温夹具

（十四）TZM 热场部件的共同特点

性能要求	作用
高温强度高	长期承载热场重量

性能要求	作用
抗蠕变性能优异	保持几何尺寸稳定
导热性能好	有利于热场均匀
真空兼容性好	减少放气和污染
热膨胀系数低	提高热场定位精度
易加工	可制造复杂结构件
使用寿命长	降低维护和更换成本

中钨智造认为，TZM 并非热场中的发热材料，而是热场系统最重要的结构材料。从支架、连接杆、热屏骨架到电极、导向件和承载平台，TZM 承担着支撑、连接、定位及承载等关键作用。现代半导体、光伏、蓝宝石、SiC 及 GaN 设备中的热场系统，几乎都离不开 TZM 高温结构件，其性能直接决定热场稳定性、晶体质量及设备寿命。

Q112 钛锆钼合金（TZM）如何提高晶体生长稳定性？

晶体生长是一个持续数十小时、数百小时甚至数周的连续过程，无论是单晶硅、蓝宝石、碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）还是其他功能晶体，其质量都高度依赖于热场系统的长期稳定性。温度场一旦发生变化，就可能导致晶体位错增加、应力集中、晶体开裂、杂质分布不均或生长界面失稳，从而降低产品良率。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）虽然并不直接参与晶体生长过程，也不直接接触熔体，但作为热场系统最重要的高温结构材料，通过保证热场几何稳定、温场稳定和设备运行稳定，在提高晶体生长质量方面发挥着关键作用。

（一）保持热场几何尺寸稳定

晶体生长设备中的热场结构通常由加热器、热屏、坩埚、支撑件及定位件组成。TZM 具有优异的高温强度和抗蠕变性能，在长期高温下不易发生弯曲、下垂或变形，因此能够长期保持各热场部件之间的相对位置，使整个热场结构保持设计状态。热场几何尺寸越稳定，晶体生长条件越稳定。

（二）维持稳定的温度场

晶体生长过程中，温度梯度决定晶体生长速度、晶体形貌及内部缺陷。TZM 具有较高的导热率和较低的热膨胀系数，可减少局部热积聚和热变形，使热量分布更加均匀，从而维持稳定的温度场。稳定的温场能够减少晶体内部热应力，提高晶体完整性。

（三）降低热场漂移

普通材料在长期高温下容易因蠕变而导致热场缓慢变化。例如支撑杆下垂、热屏位置偏移、加热器变形等，都可能改变炉内热流分布。TZM 由于再结晶温度高、抗蠕变能力强，可显著降低热场漂移，使晶体生长条件在整个长晶周期内保持基本一致。

（四）减少热循环变形

晶体生长炉需要反复经历升温、保温和冷却过程。TZM 热膨胀系数较低，热循环过程中尺寸变化较小，能够降低热疲劳和热应力积累，避免零件因反复热循环而逐渐失去精度。

（五）提高设备装配精度保持能力

热场系统通常由大量支架、连接杆、导向件及定位块组成。TZM 具有较高的刚性和尺寸稳定性，能够长期保持装配尺寸，提高热场定位精度，使晶体始终处于设计生长位置。

（六）降低杂质污染

TZM 具有极低的蒸气压和较低的放气率，在真空及惰性气氛下不易挥发。因此不会明显增加炉内杂质来源，有利于保持晶体纯度，提高材料电学性能。

（七）延长热场使用寿命

热场零件寿命越长，热场参数变化越小。TZM 相比纯钼具有更高的高温强度和更好的抗蠕变性能，可显著延长热场零件使用寿命，减少因更换零件造成的设备重新校准，提高工艺一致性。

（八）提高工艺重复性

现代半导体晶体生长要求不同炉次之间保持高度一致。TZM 能够长期保持热场结构和温度场稳定，使设备在不同批次生产中具有更好的重复性，从而提高晶体良率和产品一致性。

（九）TZM 提高晶体生长稳定性的主要机制

TZM 性能	对晶体生长的作用
高温强度高	防止热场结构变形
抗蠕变性能优异	保持长期几何稳定
导热性能好	维持均匀温场
热膨胀系数低	减少热循环变形
尺寸稳定性高	保持定位精度
真空兼容性好	降低杂质污染
使用寿命长	保持长期工艺一致性

（十）对晶体质量的影响

采用 TZM 热场结构后，通常可带来以下工程效果：晶体直径更加稳定、生长界面更加平整、温度梯度控制更加均匀、位错密度降低、晶体内部热应力减小、开裂风险降低，同时能够提高晶体电学性能和产品一致性。对于单晶硅、蓝宝石、SiC 及 GaN 等晶体材料，这些改进都会直接提高晶圆良率和最终器件性能。

中钨智造认为，TZM 提升晶体生长稳定性的本质，并不是直接改善晶体材料本身，而是通过提高热场系统的长期稳定性，实现温场稳定、结构稳定和工艺稳定。对于现代晶体生长设备而言，热场稳定性直接决定晶体质量，而热场稳定性的核心又取决于高温结构材料的性能。因此，TZM 已经成为单晶硅、蓝宝石、SiC、GaN 等晶体生长设备中应用最成熟、最可靠的高温结构材料之一，也是保证高质量晶体连续稳定生产的重要基础材料。

（十一）TZM 在真空热处理设备中的典型零件

设备类型	典型 TZM 部件
真空淬火炉	热场支架、导轨、电极、承载平台

设备类型	典型 TZM 部件
真空回火炉	支撑件、连接件、导向件
真空退火炉	热屏骨架、支架、料架
真空钎焊炉	工装夹具、定位件、承载盘
真空烧结炉	支撑柱、承载板、热屏支架
脱脂烧结炉	料架、托盘、支撑件
石墨化炉	电极连接件、高温固定件
扩散焊炉	压板、支撑平台、定位结构
热压烧结炉	模具支撑件、承载平台
高温实验炉	样品架、夹具、热场结构件

（十二）TZM 在真空热处理行业的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	长期承载炉内结构
抗蠕变性能优异	热场长期不变形
导热性能好	有利于炉温均匀
热膨胀系数低	降低热变形
真空兼容性优良	放气率低、污染少
蒸气压低	保持炉内洁净环境
加工性能好	易制造复杂工装及结构件
使用寿命长	降低维护成本

（十三）未来发展趋势

随着航空航天、高端模具、半导体、新能源及先进制造产业的发展，真空热处理设备正向更高温度、更大尺寸、更高洁净度及更智能控制方向发展。相应地，TZM 热场部件也正向高纯化、大规格、一体化、近净成形、高精度加工及长寿命方向发展，以满足现代高端真空热处理装备对稳定性和可靠性的更高要求。

中钨智造认为，真空热处理行业是 TZM 继半导体产业之后最重要的应用领域之一。TZM 虽然并非发热元件，但几乎承担了真空炉热场系统全部关键承力和支撑功能。从热场支架、热屏骨架到工装夹具、承载平台及导向系统，TZM 决定了热场几何稳定性、温场均匀性及设备长期可靠性，是现代高端真空热处理装备不可替代的核心高温结构材料。

Q112A 钛锆钼合金（TZM）在真空热处理行业的应用领域有哪些？

真空热处理是真空技术与热处理工艺相结合的重要制造技术，广泛应用于航空航天、半导体、汽车、模具、工具钢、粉末冶金、硬质合金及医疗器械等行业。由于设备长期工作于高温、高真空或高纯保护气氛环境，对炉内结构材料提出了极高要求。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性及真空兼容性，已成为现代真空热处理设备中最重要的高温结构材料之一，广泛用于各种

真空炉热场系统及高温承载部件。

（一）真空淬火炉（Vacuum Hardening Furnace）

真空淬火炉主要用于模具钢、高速钢、轴承钢及高合金钢的热处理。TZM 主要用于加热室支撑结构、热屏支架、电极、导轨、工装夹具及承载平台等高温部件。其优异的高温尺寸稳定性能够保证热场均匀，提高工件热处理质量。

（二）真空回火炉（Vacuum Tempering Furnace）

真空回火炉工作温度相对较低，但需要长期连续运行。TZM 主要用于高温支撑件、导向件、连接件及承载结构，可提高设备寿命并降低维护频率。

（三）真空退火炉（Vacuum Annealing Furnace）

真空退火广泛用于不锈钢、高温合金、铜合金、钛合金及电子材料。TZM 用于制造热场支架、热屏骨架、导轨及承载盘，保证炉内温场稳定和工件均匀受热。

（四）真空钎焊炉（Vacuum Brazing Furnace）

真空钎焊通常在 900~1250℃进行，对热场稳定性要求较高。TZM 广泛用于钎焊工装、定位夹具、支撑架、承载盘及热场结构件，可减少工件变形，提高焊接一致性。

（五）真空烧结炉（Vacuum Sintering Furnace）

粉末冶金、硬质合金及陶瓷材料烧结通常采用真空烧结炉。TZM 主要用于高温承载板、料架、支撑柱、隔热屏支架及加热系统固定件。由于抗蠕变性能优异，可长期保持热场几何稳定。

（六）真空脱脂烧结一体炉

金属注射成形（MIM）及粉末注射成形（PIM）广泛采用脱脂烧结一体设备。TZM 可用于高温托盘、料架及支撑结构，能够承受长时间烧结循环。

（七）高温石墨化炉

石墨材料、高性能碳材料生产通常采用石墨化炉。TZM 用于支撑件、电极连接件及高温固定结构，可长期耐受高温热循环。

（八）真空扩散焊炉

扩散焊需要较高温度及较长保温时间。TZM 主要用于压板、定位装置、支撑平台及高温承力部件，保证焊接过程中工件位置稳定。

（九）真空热压烧结炉

陶瓷、复合材料及先进粉末材料常采用热压烧结。TZM 可作为模具支撑件、承载平台及高温结构件，提高设备长期运行稳定性。

（十）高温实验炉

科研院所、高校及企业研发中心大量使用高温真空实验炉。TZM 用于各种实验夹具、样品架、支撑结构及热场部件，具有良好的重复使用性能。

Q113 钛锆钼合金（TZM）为什么是真空炉核心材料？

TZM (Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 钛锆钼合金) 是真空热处理设备、真空烧结炉、真空钎焊炉、单晶硅生长炉及各种高温真空设备中应用最广泛的高温结构材料之一。在现代真空炉热场系统中，TZM 通常承担支撑、连接、定位及承载等关键作用，被业内普遍认为是高端真空炉的核心结构材料。所谓核心材料，并不是指 TZM 直接产生热量，而是因为它决定了热场系统的稳定性、设备寿命及热处理质量。热场结构一旦发生变形、下垂或位置偏移，即使加热器仍能正常工作，也会导致炉温分布发生变化，从而影响整个热处理工艺。

（一）能够长期承受高温载荷

真空炉通常工作在 1000~1800 °C 之间，部分高温烧结炉甚至超过 2200 °C。TZM 经过 TiC、ZrC 弥散强化后，高温强度明显高于纯钼，在长期高温下仍具有较高承载能力，可支撑热场系统及工件重量，而不会发生明显塑性变形。

（二）抗蠕变性能优异

真空炉一次工作时间通常长达数小时至数十小时，大型工业设备甚至连续运行数百小时。TZM 具有较低的高温蠕变速率，可长期保持热场几何尺寸稳定，避免支架、导轨和承载平台发生下垂。热场越稳定，炉温均匀性越高。

（三）保证炉温均匀性

热场系统的位置决定了炉内温度场。如果支撑件发生变形，加热器、热屏及工件之间的相对位置就会改变，导致炉温分布不均。TZM 能够长期保持热场结构稳定，因此有助于提高温场均匀性和工艺一致性。

（四）高温尺寸稳定性优异

TZM 具有较高的再结晶温度，晶粒在长期高温下增长缓慢。因此零件能够长期保持尺寸精度，提高热场重复定位能力，减少设备重新校准次数。

（五）真空兼容性优异

真空炉要求炉内材料具有极低放气率和较低蒸气压。TZM 在高真空环境下挥发极少，不易释放杂质，可保持炉内洁净环境，尤其适用于半导体、航空航天及高纯材料热处理。

（六）导热性能良好

TZM 保持了钼较高的导热率，可快速均匀传递热量。这不仅有利于热场温度均匀，还可降低局部热应力，提高热场系统稳定性。

（七）耐热循环性能好

工业真空炉需要频繁经历升温、保温和冷却循环。TZM 热膨胀系数较低，抗热疲劳性能优良，可长期重复使用而不易产生裂纹或永久变形。

（八）易于制造复杂热场结构

相比纯钨等难熔金属，TZM 具有更好的加工性能。可进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接，能够制造各种复杂热场结构件。

（九）综合使用寿命长

由于高温强度高、抗蠕变性能优异及热疲劳性能良好，TZM 热场零件通常具有较长使用寿命。虽然初始采购成本高于普通钼材料，但全生命周期成本更低，因此成为工业真空炉最成熟的选择。

（十）TZM 成为真空炉核心材料的主要原因

材料性能	对真空炉的意义
高温强度高	支撑热场系统长期运行
抗蠕变性能优异	防止热场下垂变形
高温尺寸稳定性好	保持温场一致性
导热性能好	提高炉温均匀性
真空兼容性优良	降低放气和污染
热循环稳定性好	提高设备寿命
加工性能较好	制造复杂热场零件
综合寿命长	降低运行成本

中钨智造认为，TZM 之所以成为现代真空炉的核心材料，并不是因为它能够耐受最高温度，而是因为它能够在长期高温环境下保持热场结构稳定。对于真空炉而言，热场稳定性直接决定温场均匀性，而温场均匀性又决定工件质量。因此，TZM 实际上是保证现代高端真空炉长期稳定运行的基础材料，也是目前最成熟、应用最广泛的钼基高温合金。

Q114 钛锆钼合金（TZM）适用于哪些真空炉部件？

TZM 广泛应用于各种工业真空炉、真空烧结炉、真空钎焊炉、单晶炉及高温实验炉的热场系统。由于其主要作用是承载、连接、支撑和定位，因此几乎覆盖了真空炉内部所有关键高温结构件。根据不同设备结构，TZM 既可以加工成标准零件，也可以制造各种大型异形件。

（一）热场支架

热场支架是整个热场系统的主体骨架。TZM 支架负责支撑加热器、热屏及各种承载结构，是应用最广泛的 TZM 零件之一。

（二）支撑杆

支撑杆连接热场各层结构。要求具有较高的刚性和抗蠕变能力，以保证长期高温下热场位置不发生变化。

（三）连接杆

连接杆用于固定各类热场模块。TZM 连接杆可长期保持结构稳定，减少热场漂移。

（四）热屏支架

石墨或钼热屏通常采用 TZM 支架固定。支架必须长期保持热屏间距稳定，以保证炉温均匀。

（五）热屏骨架

大型热屏通常采用 TzM 骨架作为承力框架。相比普通钼，TzM 更不容易发生高温变形。

（六）加热器支撑件

电阻加热器或石墨加热器通常通过 TzM 固定。TzM 支撑件可保证加热器位置长期稳定，提高热场一致性。

（七）电极及导电连接件

TzM 广泛用于制造高温电极、电极夹具及导电连接件。其导电性能和高温稳定性均较优异。

（八）承载平台

用于放置工件或热场模块。TzM 承载平台长期承受工件重量，仍可保持良好平整度。

（九）工装夹具

真空钎焊、烧结及热处理中，大量采用 TzM 工装夹具。可有效控制工件位置，减少高温变形。

（十）导轨及导向件

导轨、导向杆及定位结构通常采用 TzM 制造。其尺寸稳定性可保证工件装卸和运动系统的定位精度。

（十一）定位块

定位块用于保证热场及工件安装位置准确。TzM 定位件长期使用后仍能保持较高尺寸精度。

（十二）高温紧固件

包括螺栓、螺母、压板、卡箍及固定法兰等。TzM 紧固件在高温下不易松弛，可靠性高于普通钼材料。

真空炉中典型 TzM 部件

部件类别	典型产品
热场结构	热场支架、支撑杆、连接杆
加热系统	加热器支撑、电极、导电连接件
隔热系统	热屏支架、热屏骨架
承载系统	承载平台、托盘、料架
工装系统	工装夹具、定位治具
导向系统	导轨、导向件、定位块
固定系统	法兰、螺栓、螺母、压板

TzM 部件的共同特点

性能要求	工程作用
高温强度高	承载炉内结构及工件
抗蠕变性能优异	长期保持热场稳定
尺寸稳定性好	提高炉温一致性
真空兼容性优良	保持炉内洁净环境

性能要求	工程作用
导热性能好	有利于温场均匀
易于加工	制造各种复杂异形件
使用寿命长	降低维护成本

中钨智造认为，在现代真空炉中，TZM 几乎覆盖了所有高温承力结构件。从热场支架、热屏骨架到工装夹具、承载平台，再到电极、导轨及定位系统，TZM 承担着热场支撑、结构连接、精确定位和长期承载等关键功能。随着真空热处理设备向更高温度、更大尺寸、更高洁净度方向发展，大规格、高纯度、高精度 TZM 部件的应用比例仍将持续提高。

Q115 为什么钛锆钼合金（TZM）适合作加热元件支撑件？

在各种真空热处理炉、真空烧结炉、单晶硅生长炉、蓝宝石长晶炉及第三代半导体设备中，加热元件（Heater）是热场系统的核心，而加热元件支撑件（Heater Support）则是保证加热元件长期稳定工作的关键结构件。虽然支撑件本身并不发热，但其性能直接决定加热元件的位置稳定性、热场均匀性及设备使用寿命。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，已成为现代高端真空设备中制造加热元件支撑件的标准材料之一。

（一）高温下仍具有较高强度

加热元件通常长期工作于 1200~1800℃，部分烧结炉和晶体生长设备甚至超过 2000℃。在如此高温环境下，普通金属早已失去承载能力，而 TZM 经过 TiC、ZrC 弥散强化后，仍能保持较高的高温强度，可长期支撑加热元件而不发生明显塑性变形。

（二）抗蠕变性能优异

加热元件通常连续工作数十小时甚至数百小时。如果支撑件发生蠕变下垂，加热元件的位置便会改变，导致热场分布发生变化，影响整个设备的温度均匀性。TZM 具有远低于纯钼的高温蠕变速率，可长期保持加热元件位置稳定。

（三）保持热场几何尺寸稳定

热场设计经过精确计算，加热元件与热屏、工件及坩埚之间均有严格间距要求。TZM 尺寸稳定性高，可保证这些关键尺寸长期保持不变，从而维持稳定的热场结构。

（四）热膨胀较小

TZM 线膨胀系数较低。在反复升温 and 降温过程中，加热元件支撑件尺寸变化较小，可减少热应力，提高加热系统长期稳定性。

（五）导热性能良好

TZM 保持了钼较高的导热能力。能够减少局部温度集中，降低支撑件自身温度梯度，减少热应力和热疲劳。

（六）真空兼容性优异

加热元件支撑件通常直接位于高真空热场中。TZM 蒸气压低、放气率低，高温下不会释放大量化挥发物，有助于保持炉内洁净环境。对于半导体、航空航天及高纯材料热处理尤为重要。

（七）加工性能较好

加热元件支撑件通常结构复杂，包括支架、吊架、挂钩、连接板及各种异形件。TZM 加工性能优于纯钨，可方便进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接。

（八）使用寿命长

由于具有优异的高温强度和抗热疲劳能力，TZM 支撑件通常能够经历大量热循环而保持稳定。相比普通钼材料，可明显延长热场维护周期，降低运行成本。

TZM 作为加热元件支撑件的主要优势

材料性能	工程意义
高温强度高	长期支撑加热元件
抗蠕变性能优异	防止支架下垂
热膨胀系数低	保持热场尺寸稳定
导热性能好	减少局部热应力
真空兼容性好	降低放气污染
易于加工	制造复杂支撑结构
使用寿命长	降低维护成本

常见 TZM 加热元件支撑件

包括加热器支架、吊杆、支撑杆、固定板、连接座、挂钩、电极支撑件、绝缘隔离支架、定位块及安装法兰等。这些零件虽然不直接产生热量，却决定着整个加热系统的长期稳定运行。中钨智造认为，加热元件支撑件是真空热场中最重要的结构件之一，其作用类似建筑中的钢结构。TZM 凭借高温强度、抗蠕变能力及尺寸稳定性，可长期保证加热元件保持设计位置，从而维持稳定的温度场。因此，在现代真空热处理设备、晶体生长设备及高温烧结设备中，TZM 已成为制造加热元件支撑件最成熟、应用最广泛的材料之一。

Q116 钛锆钼合金（TZM）在烧结炉中的作用是什么？

烧结炉（Sintering Furnace）广泛应用于粉末冶金、硬质合金、先进陶瓷、磁性材料、难熔金属、金属注射成形（MIM）及增材制造后处理等领域。烧结过程中通常需要在高温、真空或高纯保护气氛下连续保温数小时至数十小时，对热场系统的稳定性要求极高。TZM 并不是烧结对象本身，也不是加热元件，而是烧结炉热场系统的重要结构材料。它通过支撑、承载、连接和定位等作用，保证烧结过程温度均匀、结构稳定及工艺重复性。

（一）支撑热场系统

烧结炉中的加热器、热屏、隔热层及承载系统均需要稳定支撑。TZM 作为热场骨架材料，可长期承受高温载荷，保持热场几何尺寸稳定。

（二）承载烧结工件

烧结过程中，工件通常放置于托盘、料架或承载平台上。TZM 承载件具有较高高温强度，不易因长期受力而弯曲变形，可保证工件保持设计位置。

（三）保证温场稳定

烧结质量很大程度取决于炉内温度均匀性。TZM 具有较好的导热性能和尺寸稳定性，可保证热场结构长期保持设计状态，从而维持稳定的温度分布。

（四）减少热场漂移

普通材料在长期高温下容易发生蠕变。TZM 抗蠕变性能优异，可有效防止热屏、支架及承载平台下垂，使烧结工艺更加稳定。

（五）提高烧结一致性

烧结炉通常要求不同批次产品具有一致性能。ZM 长期保持热场稳定，可减少不同炉次之间温场变化，提高产品尺寸一致性和组织均匀性。

（六）降低杂质污染

烧结炉广泛用于高纯金属、电子材料及先进陶瓷生产。TZM 蒸气压低、放气率低，不易向炉内释放杂质，可保证高纯烧结环境。

（七）提高设备使用寿命

由于热场长期保持稳定，设备维护次数减少。TZM 热场部件通常具有较长使用寿命，可降低停炉时间和运行成本。

（八）适应多种烧结工艺

TZM 适用于真空烧结、保护气氛烧结、压力烧结、热压烧结、脱脂烧结及高温扩散烧结等多种工艺，可满足不同烧结设备对热场结构材料的要求。

TZM 在烧结炉中的典型应用

应用部位	主要 TZM 部件
热场系统	热场支架、支撑杆、连接杆
加热系统	加热器支撑件、电极连接件
隔热系统	热屏支架、热屏骨架
承载系统	承载平台、托盘、料架
定位系统	导向件、定位块、安装座
固定系统	法兰、压板、螺栓、连接件

TZM 在烧结炉中的主要作用

作用	工程价值
支撑热场	保持热场结构稳定
承载工件	防止承载件高温变形
稳定温场	提高烧结均匀性
抑制蠕变	保持长期尺寸稳定
降低污染	提高材料纯度
延长寿命	降低维护成本
提高重复性	保证批次一致性

中钨智造认为，TZM 在烧结炉中的价值，并非直接参与烧结反应，而是通过稳定热场、稳定温场和稳定结构，提高整个烧结系统的可靠性。现代高端烧结设备的发展方向正朝着更高温度、更长保温时间、更大装炉量及更高洁净度发展，这对热场结构材料提出了更高要求。凭借优异的高温综合性能，TZM 仍将是未来真空烧结炉和高温烧结设备最重要的高温结构材料之一。

Q117 钛锆钼合金（TZM）为什么适合高真空烧结？

高真空烧结（High Vacuum Sintering）是粉末冶金、硬质合金、难熔金属、先进陶瓷、磁性材料、金属注射成形（MIM）及高纯电子材料制造中最重要的热处理工艺之一。典型真空度通常为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ Pa，高端设备甚至可达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa，同时烧结温度可达 $1200 \sim 2400$ °C。如此苛刻的工况要求热场材料不仅具有优异的高温力学性能，还必须具备极高的真空洁净性和长期稳定性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）兼具高温性能和真空性能，因此成为现代高真空烧结炉热场系统中应用最广泛的高温结构材料之一。需要说明的是，TZM 主要用于烧结炉热场结构件、支撑件及工装夹具，并非所有烧结工艺中的烧结容器材料。对于超高温烧结或特殊材料烧结，坩埚仍可能采用石墨、钨、钼或其他专用材料。

（一）蒸气压极低，适合高真空环境

高真空烧结最忌讳材料挥发。若热场材料蒸发，会污染工件表面，降低材料纯度，并影响真空系统稳定运行。TZM 保持了钼极低的蒸气压，在高真空和高温条件下挥发量很小，能够长期保持炉内洁净环境。

（二）放气率低

材料内部吸附的气体会在高温下释放出来，导致真空度下降。TZM 经过粉末冶金、高温烧结、塑性加工及真空热处理后，内部组织致密，残余气体含量较低，放气率远低于普通耐热钢，因此非常适用于高真空设备。

（三）高温强度优异

高真空烧结通常需要长时间保温。TZM 经过 TiC、ZrC 强化后，高温强度明显高于纯钼，在长期工作过程中仍具有良好的承载能力，不易发生塑性变形。

（四）抗蠕变性能突出

烧结过程可能持续数小时至数十小时。如果热场支架或承载平台发生蠕变下垂，将改变工件位置和温场分布。TZM 具有优异的抗蠕变性能，可长期保持热场几何尺寸稳定。

（五）保持温场稳定

烧结质量高度依赖于温场均匀性。TZM 导热性能良好，同时具有较低热膨胀系数，可减少热变形，使热场结构长期保持设计状态，提高烧结均匀性。

（六）耐热循环性能优异

工业烧结炉需要长期重复进行升温、保温和冷却循环。TZM 具有较好的抗热疲劳性能，在多次热循环后仍能保持较高的尺寸稳定性和力学性能。

（七）污染风险低

TZM 中 Ti 和 Zr 主要以稳定碳化物形式存在，不会像某些耐热合金那样在高温下释放大量活性元素。因此不会明显增加烧结产品中的杂质含量，尤其适用于高纯金属、电子材料及功能陶瓷烧结。

（八）易于加工各种热场结构

TZM 可加工成支架、承载板、导轨、定位块、连接件及各种复杂工装。相比纯钨，其加工性能更好，可降低制造成本，提高装配精度。

（九）综合使用寿命长

由于高温强度高、抗蠕变能力强及热疲劳性能优良，TZM 热场部件能够长期稳定工作。虽然初始成本高于普通钼材料，但设备维护次数减少，全生命周期成本更低。

TZM 适合高真空烧结的主要原因	
材料性能	工程意义
蒸气压极低	减少材料挥发，保持真空洁净
放气率低	有利于维持高真空度
高温强度高	长期支撑热场系统
抗蠕变性能优异	保持热场尺寸稳定
导热性能好	提高温场均匀性
热膨胀系数低	降低热变形
抗热疲劳性能好	适应长期热循环
易加工	制造复杂热场零件
使用寿命长	降低设备运行成本

（十）TZM 在高真空烧结炉中的典型应用

在高真空烧结炉中，TZM 主要用于热场支架、支撑杆、连接杆、承载平台、料架、托盘、加热器支撑件、热屏支架、导轨、定位块、电极连接件、高温夹具及各种承力结构件。这些部件共同保证热场系统长期稳定运行，提高烧结产品的一致性和成品率。

中钨智造认为，高真空烧结设备对热场材料的要求，本质上是高温性能与真空性能的综合要求。TZM 不仅具有优异的高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性，还兼具极低蒸气压、低放气率及良好的真空兼容性，可长期保持热场结构和温场稳定，避免污染烧结产品。因此，TZM 已经成为现代高真空烧结炉最成熟、最可靠的高温结构材料之一，在粉末冶金、硬质合金、先进陶瓷、电子材料及难熔金属烧结等领域具有不可替代的重要地位。

Q118 钛锆钼合金（TZM）在航空航天的应用有哪些？

航空航天是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）最早实现工程化应用的重要领域之一，也是目前高端应用最集中的行业之一。由于航空发动机、火箭发动机、航天推进系统及空间飞行器需要长期承受高温、高热流、高真空及剧烈热循环等极端工况，因此对材料提出了极高要求。TZM 凭借高温强度高、抗蠕变性能优异、导热性能好、蒸气压

低、真空兼容性好及尺寸稳定性高等综合优势,长期应用于航空航天高温结构件、推进系统、热防护系统及试验设备等多个领域。**TZM** 通常用于高温结构件和热场部件,对于长期暴露于强氧化环境的飞行热端部件,则通常需要采用防氧化涂层,或与钨合金、钼合金、镍基高温合金、陶瓷基复合材料等材料配合使用。

（一）火箭发动机热端结构件

液体火箭发动机和部分固体火箭发动机试验装置中,**TZM** 可用于喷注器支撑件、高温连接件、燃烧室辅助结构、高温固定件及热场支撑结构。由于材料具有较高的高温强度和较低的蠕变速率,可长期保持结构稳定,提高发动机可靠性。

（二）火箭喷管及喷管部件

在部分火箭发动机中,**TZM** 用于制造喷管支撑件、喷管加强环及喷管外围高温结构件。对于部分试验发动机,还可制造喷管喉部试验件及高温热流测试部件。由于 **TZM** 在空气中抗氧化能力有限,实际飞行产品通常需要采用硅化物、铝化物等防氧化涂层,或仅用于真空及保护气氛环境。

（三）航天推进系统

离子推进器、电推进系统及霍尔推进器等航天推进装置中,**TZM** 可用于高温电极支撑件、推进器结构件、放电室支撑件及高温连接件。其低蒸气压和良好的真空兼容性,可减少材料挥发,提高推进系统稳定性。

（四）真空热试验设备

航天器在发射前通常需要进行真空热平衡试验和热真空试验。**TZM** 广泛用于大型热真空试验设备中的热场支架、加热系统支撑件、样品夹具及高温固定结构,可长期保持尺寸稳定。

（五）航空发动机试验设备

航空发动机燃烧室、高温材料及涡轮叶片试验平台通常需要高温真空或保护气氛环境。**ZM** 可用于高温夹具、试样支架、定位件及热场结构件,提高试验重复性和可靠性。

（六）高超声速飞行研究

在高超声速飞行器材料研究及地面模拟试验中,**TZM** 广泛用于高热流加载平台、高温固定件及试验夹具。由于其耐高温和热稳定性优异,可长期承受反复热循环。

（七）再入热防护系统试验

航天器返回地球时,需要承受极高的气动加热。**TZM** 可用于热防护材料试验装置、高温模拟平台及各种热冲击测试设备中的承力部件。

（八）卫星及空间科学设备

部分空间望远镜、深空探测器及空间实验装置中,**TZM** 可用于高温支撑结构、真空机构件及精密定位件。材料低放气率和高尺寸稳定性有利于长期空间服役。

（九）航空航天材料试验装备

TZM 还是航空航天材料研发的重要基础材料。广泛用于高温拉伸试验炉、蠕变试验设备、疲劳试验平台及各种真空高温实验装置中的热场结构件。

（十）航空航天电子设备

部分航天电子封装、高温电子器件及真空电子管设备中，TZM 可作为高温支撑件、散热结构件及真空结构材料使用。

（十一）航空航天领域典型 TZM 产品

应用系统	典型 TZM 零件
火箭发动机	喷注器支撑件、高温连接件、喷管支撑环
电推进系统	电极支架、放电室支撑件、固定结构
热真空设备	热场支架、样品夹具、承载平台
发动机试验	高温夹具、定位件、热场结构件
热防护试验	热流加载平台、高温固定件
空间设备	真空结构件、定位支架
材料试验	高温试验夹具、承载件

（十二）TZM 在航空航天中的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	长期承受高温载荷
抗蠕变性能优异	保持结构稳定
导热性能好	提高热管理能力
热膨胀系数低	保持尺寸精度
真空兼容性优良	适用于空间真空环境
蒸气压低	高温下挥发少
易加工	制造复杂高温结构件
使用寿命长	提高系统可靠性

（十三）与其他航空航天材料的配合应用

在航空航天工程中，TZM 通常并非单独使用，而是与多种高温材料形成互补。例如，在氧化环境中可配合硅化物防护涂层使用；在更高温区域可与钨及钨重合金配合；在需要减轻重量时可与钛合金、镍基高温合金或陶瓷基复合材料协同设计；在真空环境下则可充分发挥 TZM 低蒸气压、高尺寸稳定性的优势。

（十四）TZM 在航空航天的发展趋势

随着可重复使用运载火箭、高超声速飞行器、深空探测、核热推进及商业航天的发展，航空航天装备对高温结构材料提出了更高要求。未来 TZM 将向高纯化、超细晶化、大规格整体锻件、高性能抗氧化涂层及增材制造等方向发展，以满足更高温度、更长寿命及更复杂结构的应用需求。

中钨智造认为，TZM 是航空航天领域应用历史最长、工程经验最丰富的钨基高温合金之一。从火箭发动机、航天推进系统到真空热试验设备，从高温试验夹具到空间科学装置，TZM 始终承担着高温承载和热场稳定的重要任务。尽管近年来陶瓷基复合材料、难熔高熵合金等新

材料不断发展，但凭借成熟的制造工艺、优异的综合性能和可靠的工程验证，TZM 在航空航天高温结构件领域仍将长期保持重要地位。

Q118 钛锆钼合金（TZM）为什么用于航空航天？

航空航天装备长期工作于高温、高热流、高真空、强热冲击及复杂应力环境，对材料的综合性能要求远高于普通工业领域。传统结构材料在高温下容易发生强度下降、蠕变变形、尺寸失稳或氧化失效，而 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，自 20 世纪 60 年代以来便成为航空航天领域应用最成熟的钼基高温合金之一，广泛用于火箭发动机、航天推进系统、高温试验设备及空间真空装备等领域。需要说明的是，TZM 并不是航空航天所有高温部件的通用材料。对于长期暴露于空气中的热端飞行部件，由于 TZM 抗氧化能力有限，通常需要配合防氧化涂层使用，或与镍基高温合金、钨合金、钨合金及陶瓷基复合材料形成互补。

（一）高温强度远高于纯钼

航空航天设备大量部件需要长期工作在 1000~1600 °C，部分试验装置甚至更高。TZM 通过 TiC、ZrC 弥散强化，使高温强度明显高于纯钼，即使在高温下仍能保持较高承载能力，不易发生塑性变形。

（二）抗蠕变性能优异

火箭发动机及航天试验设备通常需要长时间承受高温载荷。TZM 具有较低的高温蠕变速率，可长期保持结构尺寸稳定，保证系统可靠运行。

（三）耐热冲击能力强

航空航天设备经常经历快速升温和快速冷却。TZM 导热性能较高，热膨胀系数较低，能够有效降低热应力，提高抗热冲击能力，减少热裂纹产生。

（四）尺寸稳定性高

对于发动机、推进系统及精密试验设备而言，高温尺寸稳定性十分重要。TZM 具有较高的再结晶温度，在长期高温下晶粒增长缓慢，因此能够长期保持结构尺寸及装配精度。

（五）导热性能优良

TZM 保持了钼良好的导热能力。能够快速传导局部热量，减少热点形成，有利于高温部件散热和温度均匀分布。

（六）适用于真空环境

外层空间属于高真空环境。TZM 具有极低蒸气压、低放气率及优良的真空兼容性，高温下挥发极少，不易污染光学系统及电子设备，因此特别适用于航天器和空间实验装置。

（七）加工性能优于钨

相比纯钨及部分难熔合金，TZM 更容易进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接。因此能够制造各种复杂高温结构件，提高零件加工效率。

（八）长期可靠性高

航空航天设备要求极高可靠性。**TZM** 经过几十年的工程应用验证，在火箭发动机、高温试验设备及空间装备中积累了丰富的丰富使用经验，是目前工程可靠性最高的钼基高温合金之一。

TZM 用于航空航天的主要原因

材料性能	工程意义
高温强度高	长期承受高温载荷
抗蠕变性能优异	保持结构稳定
导热性能好	提高热管理能力
热膨胀系数低	降低热变形
耐热冲击性能好	适应剧烈温度变化
真空兼容性优良	适用于空间环境
易加工	制造复杂高温结构
工程经验丰富	长期应用可靠

（九）典型航空航天应用
TZM 广泛应用于火箭发动机高温结构件、电推进系统、真空热试验设备、高超声速材料试验平台、空间科学仪器、高温夹具、推进系统固定件及各种高温真空结构件。

中钨智造认为，**TZM** 用于航空航天的核心原因，在于其能够同时满足高温承载、长期稳定、真空兼容和精密加工四项关键要求。虽然近年来出现了多种新型高温材料，但 **TZM** 凭借成熟的制造工艺、可靠的工程验证及优异的综合性能，至今仍是航空航天高温结构材料的重要组成部分。

Q119 钛锆钼合金（TZM）如何应用于火箭发动机？

火箭发动机是航空航天领域工作环境最苛刻的装备之一。发动机内部需要承受高温燃气、高压、高热流密度及剧烈热循环，同时还要求结构件具有较高的尺寸稳定性和长期可靠性。**TZM** 由于兼具高温强度、抗蠕变性能、导热性能及真空兼容性，在火箭发动机研发、地面试验及部分飞行系统中得到广泛应用。需要说明的是，**TZM** 一般不作为现代大型液体火箭发动机燃烧室或喷管主体材料，而更多用于高温结构件、支撑件、试验件及热端辅助部件。在长期氧化环境下使用时，还需要配合防氧化涂层。

（一）燃烧室辅助结构件
TZM 可用于燃烧室外围高温支撑件、固定件及连接结构。材料具有较高高温强度，可保证燃烧室外围结构长期稳定。

（二）喷注器支撑件
喷注器要求具有较高装配精度。**TZM** 尺寸稳定性优异，可用于喷注器安装支架、定位件及连接件，提高装配可靠性。

（三）喷管支撑结构
TZM 可用于喷管外围支撑环、加强件及安装结构。高温下能够保持较高刚性，减少喷管热变

形。

（四）喷管喉部试验件

在部分发动机材料研究和地面试验中，TZM 可加工成喷管喉部试验件，用于评价材料耐高温及抗热冲击性能。工程产品通常根据工况选择是否采用 TZM 或钨基材料。

（五）高温固定件

包括高温螺栓、螺母、压板、连接法兰及定位件等。TZM 在高温下强度保持率较高，可长期保持连接可靠性。

（六）燃烧试验平台

发动机地面试验设备大量采用 TZM 制造高温夹具、支撑架、导向件及承载平台。材料能够承受长期高温及频繁热循环。

（七）推进剂点火系统

部分高温点火试验平台中，TZM 可用于点火器支撑件、电极固定件及高温结构件。其低蒸气压有助于保持试验环境洁净。

（八）火箭发动机材料验证

TZM 还是火箭发动机材料研发的重要对象。广泛用于燃烧试验、高温力学试验、热冲击试验及寿命评估，为新一代发动机材料开发提供基础数据。

火箭发动机中的典型 TZM 零件

应用部位	典型 TZM 产品
燃烧室	支撑件、固定件、连接件
喷注器	安装座、支撑架、定位件
喷管	支撑环、加强件、试验件
推进系统	电极支架、高温连接件
地面试验	高温夹具、承载平台、定位装置
材料研发	热流试样、燃烧试样、高温试验件

TZM 用于火箭发动机的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受高温载荷
抗蠕变性能优异	保持结构尺寸稳定
导热性能好	降低局部热应力
热膨胀系数低	减少热变形
真空兼容性优良	适用于航天环境及试验系统
加工性能好	制造复杂高温零件
工程可靠性高	长期应用成熟

（九）与其他火箭发动机材料的配合

现代火箭发动机通常采用多种材料协同设计。例如，燃烧室内壁常采用高导热铜合金或铜铬钼合金配合再生冷却结构，喷管延伸段可能采用钼合金、碳/碳复合材料或陶瓷基复合材料，高温承力结构则根据具体工况采用 TZM、钨基材料或其他难熔金属。因此，TZM 更多承担高温结构支撑、连接及试验验证等关键作用，而不是完全替代其他热端材料。

中钨智造认为，TZM 在火箭发动机中的价值主要体现在高温结构稳定性和长期可靠性。经过数十年的工程实践，TZM 已广泛应用于发动机试验、高温支撑结构及推进系统辅助部件，并成为火箭发动机研发和制造过程中不可缺少的重要高温结构材料。随着可重复使用火箭、深空探测及核热推进技术的发展，高纯、高强度及耐氧化 TZM 材料仍具有广阔的发展前景。

Q120 钛锆钼合金（TZM）喷管有哪些优势？

喷管（Nozzle）是火箭发动机、航天推进系统和高温燃气装置中的关键部件，其主要作用是将燃烧室产生的高温高压燃气进行膨胀加速，将热能转化为高速射流动能，从而产生推力。喷管工作环境极其严苛，尤其是喉部区域，需要承受最高温度、最大热流密度和最强热冲刷。因此，喷管材料必须同时具备高温强度、高导热性、抗热震性、尺寸稳定性及耐烧蚀能力。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）由于具有优异的高温综合性能，在火箭发动机喷管研发、地面试验喷管及部分高温推进结构中得到应用。需要说明的是，现代大型液体火箭发动机喷管通常采用铜合金、钼合金、钨合金、C/C 复合材料及陶瓷基复合材料等多种材料组合设计，TZM 更多应用于喷管喉部试验件、支撑结构、高温加强件及特殊工况喷管部件。

（一）高温强度高

喷管喉部长期承受高温燃气冲刷，温度可达到 1000~3000℃范围。

TZM 经过 TiC、ZrC 强化后，在高温下仍保持较高强度，可承受较大的机械载荷和热应力。相比纯钼，TZM 在高温条件下具有明显更高的结构稳定性。

（二）抗蠕变性能优异

喷管工作时间虽然可能较短，但重复使用发动机或长期试验设备要求材料具有良好的抗蠕变能力。TZM 能够降低高温变形，保持喷管几何尺寸稳定，使喷管喉径、扩张角等关键参数长期保持一致。

（三）导热性能良好

喷管喉部承受大量热流。TZM 保持钼较高的导热率，能够快速传递热量，降低局部温度集中，减少热应力和热裂纹风险。

（四）抗热冲击能力强

火箭发动机启动和关闭过程中，喷管经历快速升温 and 降温过程。TZM 热膨胀系数较低，热应力较小，可降低由于温度骤变导致的开裂风险。

（五）尺寸稳定性高

喷管属于高精度流道部件。任何微小变形都会影响燃气流动和发动机性能。TZM 再结晶温度

较高，高温下晶粒长大速度较慢，因此能够长期保持精密结构尺寸。

（六）适用于真空及保护气氛环境

航天推进系统和发动机试验大量涉及真空环境。TZM 蒸汽压低、放气率低，在高温真空环境中不易挥发，可保持系统洁净。

（七）加工性能优于钨

喷管通常具有复杂内流道结构。相比纯钨，TZM 更容易进行机械加工，可制造精密孔道、复杂曲面及薄壁结构，有利于提高制造效率。

（八）适合重复使用发动机

未来可重复使用火箭要求发动机多次启动。TZM 优良的热循环稳定性和疲劳性能，有助于提高喷管部件重复使用寿命。

TZM 喷管的主要优势

TZM 性能	对喷管的作用
高温强度高	承受高温燃气载荷
抗蠕变性能优异	保持喷管尺寸稳定
导热率高	降低热集中
热膨胀系数低	减少热裂纹
高温组织稳定	延长使用寿命
真空兼容性好	适合航天环境
加工性能较好	制造复杂结构

（九）TZM 喷管典型应用

包括发动机地面试验喷管、喷管喉部试验件、高温燃气试验喷嘴、推进系统高温支撑结构、喷管加强环、喷管固定件及热流测试组件等。

中钨智造认为，TZM 喷管的核心优势在于高温结构稳定性，而不是单纯追求最高耐温。对于需要长期保持尺寸精度和承受热循环的喷管结构而言，TZM 能够提供强度、导热、加工性和可靠性的综合平衡。因此，在火箭发动机研发、材料试验和部分特殊推进系统中，TZM 仍具有重要应用价值。

Q121 钛锆钼合金（TZM）如何应用于高超声速飞行器？

高超声速飞行器（Hypersonic Vehicle）通常指飞行速度超过 5 马赫的飞行器，包括高超声速导弹、空天飞机、可重复使用航天器及高超声速试验平台等。当飞行速度达到高超声速状态时，飞行器表面会产生剧烈气动加热，局部温度可能超过 1000~2000 ℃，同时还伴随高速气流冲刷、热循环和机械载荷。因此，高超声速飞行器需要大量耐高温、尺寸稳定和抗热冲击材料。TZM 由于具有优异的高温力学性能，在高超声速飞行器材料研究、热防护系统试验及部分高温结构件中具有重要应用。

（一）用于高温承力结构

高超声速飞行器内部存在大量高温承力部件，例如连接件、支撑件、固定件及框架结构。TZM

高温强度高，可在高温环境下保持承载能力，提高结构可靠性。

（二）用于热防护系统支撑件

热防护系统（Thermal Protection System，TPS）需要长期承受气动加热。TZM 可用于隔热瓦固定件、热防护组件连接件及高温支撑结构，保证防护系统位置稳定。

（三）用于发动机热端部件

高超声速飞行器通常采用超燃冲压发动机（Scramjet）。发动机内部燃烧温度极高，TZM 可用于部分高温支撑件、喷注系统结构件及试验部件。

（四）用于进气道高温结构研究

超燃冲压发动机进气道前缘承受高速气流冲击和高热流。TZM 可用于进气道材料试验件、高温模拟件及支撑结构。

（五）用于高温试验设备

高超声速材料需要经过地面模拟试验。TZM 广泛用于电弧风洞、激光加热设备、等离子体风洞及高温热流试验平台中的夹具、支撑件和承载结构。

（六）用于热循环环境

高超声速飞行器经历快速升温、巡航保温和冷却过程。TZM 抗热疲劳性能较好，可适应多次热循环，提高结构寿命。

（七）用于真空空间环境部件

部分空天飞机及再入飞行器同时经历高温和真空环境。TZM 低蒸气压、低放气率，有利于保持空间设备洁净和长期稳定。

高超声速飞行器中的典型 TZM 部件

应用位置	TZM 产品
热防护系统	支撑件、连接件、固定件
发动机系统	高温支架、喷注器结构件、试验件
进气道	高温试验件、承力结构
热试验设备	夹具、支撑架、承载平台
空间结构	真空高温固定件

TZM 应用于高超声速飞行器的主要原因

性能	作用
高温强度高	承受气动加热后的机械载荷
抗蠕变性能强	保持结构尺寸
导热性能好	降低局部热峰值
热膨胀低	减少热变形
真空性能好	适应空间环境
加工性能优良	制造复杂结构

（八）未来发展方向

随着高超声速飞行器向更高速度、更长航程和重复使用方向发展，材料需要同时满足更高温度、更长寿命和更复杂环境要求。未来 TZM 的发展重点包括高纯 TZM、大尺寸整体锻件、细晶强化 TZM、耐氧化涂层 TZM 以及 TZM 与 C/C 复合材料、陶瓷基复合材料的组合应用。

中钨智造认为，TZM 在高超声速飞行器中的主要价值，是作为高温结构稳定材料，而不是单独承担全部热防护任务。其优异的高温强度、尺寸稳定性和真空适应能力，使其成为高超声速发动机研发、热防护试验、高温承力结构及先进航空航天装备中的重要候选材料。随着高超声速技术快速发展，TZM 仍将在极端温度环境材料体系中保持重要地位。

Q122 钛锆钼合金（TZM）为什么适用于再入飞行器？

再入飞行器（Re-entry Vehicle）是航空航天领域中工作环境最严苛的装备之一，包括载人飞船返回舱、可重复使用航天器、空间探测器返回舱及高超声速飞行器等。飞行器从轨道高速进入大气层时，由于与空气发生剧烈摩擦和压缩加热，表面会承受极高热流、高温氧化、快速热循环以及复杂机械载荷。再入过程中，局部热端区域温度可能达到 1000~2000 °C 甚至更高，对材料提出了极高要求。材料不仅需要耐高温，还必须具备高温强度、抗热震能力、尺寸稳定性、低密度污染和长期可靠性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，在再入飞行器高温结构件、热防护系统支撑件、热试验设备及相关航天装备中具有重要应用价值。需要说明的是，TZM 通常不是再入飞行器外表面直接承受大气摩擦烧蚀的主要防护材料。再入飞行器外部热防护层通常采用烧蚀材料、陶瓷基复合材料、C/C 复合材料或隔热结构。TZM 更多用于内部高温承力结构、连接件、支撑件及试验验证部件。

（一）高温强度保持能力强

再入飞行器在高速下降过程中，结构局部温度快速升高。普通金属材料在高温下会迅速软化，导致承载能力下降。而 TZM 经过 TiC、ZrC 弥散强化后，在高温状态下仍能保持较高强度，可承受热防护系统及内部结构产生的机械载荷。这使 TZM 适用于热防护层支撑结构、连接框架、高温固定件、热端承力件等。

（二）抗蠕变性能优异

再入飞行虽然持续时间通常较短，但航天器可能经历多次热循环，例如可重复使用飞行器需要反复执行升空和返回任务。高温载荷作用下，材料容易发生蠕变变形，导致热防护结构松动、连接位置变化、气动外形精度下降。TZM 具有优良的抗蠕变性能，可以长期保持结构尺寸稳定，提高再入系统可靠性。

（三）耐热冲击性能好

再入过程具有典型的快速温度变化特点。进入大气前处于接近真空低温环境，进入大气后迅速遭受高热流冲击。这种剧烈温差容易导致材料内部产生热应力。TZM 具有较高导热率、较低热膨胀系数、较好的热疲劳性能。因此能够降低热应力集中，减少热裂纹产生。

（四）保持高温尺寸稳定性

再入飞行器结构对尺寸精度要求极高。任何微小变形都可能影响气动外形、热防护间隙、结构连接可靠性。TZM 具有较高再结晶温度，晶粒粗化速度较慢，在长期高温环境下仍能保持

较好的组织稳定性，因此能够维持关键结构尺寸。

（五）导热性能优良，有利于热管理

再入过程中，热量集中区域容易产生局部热点。TZM 保持钼良好的导热能力，可以快速传递热量，降低局部温度梯度。这有助于减少热应力、降低结构温差、提高热防护系统可靠性。

（六）真空环境适应能力强

再入飞行器在进入大气前长期处于空间真空环境。TZM 具有低蒸气压、低放气率、高温挥发少。因此适用于空间推进系统、高温机构件、真空热结构件及航天试验设备。不会明显污染敏感电子设备或光学设备。

（七）适合作为热防护系统支撑材料

再入飞行器通常采用多层热防护结构。外层负责隔热和烧蚀，内部需要可靠的金属支撑结构。TZM 可用于热防护瓦固定件、隔热层连接件、热屏支撑件、内部高温框架。其作用是保证热防护系统在高速再入过程中保持完整。

（八）适合高温试验验证

再入飞行器开发过程中，需要大量地面模拟试验。例如电弧风洞试验、等离子体热流试验、激光加热试验、热循环试验。TZM 广泛用于这些设备中的高温夹具、试样支架、承载平台、热流测试部件。

（九）加工性能优于钨材料

再入飞行器高温结构件通常具有复杂形状和精密尺寸。相比纯钨，TZM 加工难度较低、韧性更好、焊接性能更优。因此更适合制造复杂连接件、薄壁结构件、精密支撑件。

TZM 适用于再入飞行器的主要原因

TZM 性能	再入飞行器应用价值
高温强度高	承受热环境下机械载荷
抗蠕变性能好	保持结构长期稳定
导热率高	降低局部热峰
热膨胀系数低	减少热变形
热疲劳性能好	适应快速温度变化
真空兼容性优良	适应空间环境
尺寸稳定性高	保持结构精度
加工性能较好	制造复杂高温部件

再入飞行器中 TZM 典型应用部件

系统	TZM 部件
热防护系统	支撑件、连接件、固定件
高温结构	承力框架、加强件
推进系统	高温支架、电极结构

系统	TZM 部件
热试验系统	夹具、试样架、承载件
空间机构	高温定位件、精密结构件

（十）与其他再入材料相比的特点

与 C/C 复合材料相比，TZM 具有更好的金属韧性和加工性能，适合承力结构；与陶瓷基复合材料相比，TZM 抗机械冲击能力更强，制造成熟度更高；与钨相比，TZM 密度较低、加工性能更好、热循环适应性更优。但 TZM 的主要不足是高温氧化环境下容易氧化，因此实际应用中通常需要采用防氧化涂层、封闭结构设计、惰性气氛保护或作为内部结构材料使用。

中钨智造认为，TZM 适用于再入飞行器的核心原因，在于它能够在极端热环境下保持结构稳定，而不是单纯追求最高耐温。再入飞行器需要的不仅是耐高温材料，更需要能够长期保持强度、尺寸和连接可靠性的高温结构材料。TZM 凭借高温强化机制、优异抗蠕变性能、良好热物理性能以及成熟制造体系，成为再入飞行器热防护支撑结构和高温试验装备中的重要候选材料。随着可重复使用航天器、高超声速飞行器和深空探测技术的发展，TZM 及其改性材料仍将在先进航天高温结构领域保持重要应用价值。

Q123 钛锆钼合金（TZM）在核工业与聚变领域的应用有哪些？

核工业与聚变能源是对高温材料性能要求最高的应用领域之一。核反应堆、聚变装置、等离子体实验设备长期面临高温、高热流、中子辐照、真空环境、热循环及强腐蚀等复杂工况，对材料提出了极高要求。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）作为典型钼基高温合金，凭借高温强度高、抗蠕变性能优异、低蒸气压、良好导热性能及尺寸稳定性，在核工业高温设备、真空核试验装置、聚变实验装置及相关高温结构件中具有重要应用价值。在聚变堆第一壁、偏滤器等直接面对强等离子体轰击的位置，目前研究重点更多集中于钨、钨合金、钨纤维增强材料及钨基复合材料。TZM 更多应用于支撑结构、连接部件、热管理结构、高温实验部件及非直接等离子体接触区域。

（一）核工业高温结构件

核工业设备经常需要在高温真空或保护气氛环境中运行。TZM 由于具有优异的高温力学性能，可用于高温支撑件、炉内结构件、定位件、夹具、承载件及热屏组件。其主要作用是保证设备长期运行过程中的结构稳定性。

（二）核燃料制造设备

核燃料制备过程中涉及粉末处理、压制、烧结及高温热处理。TZM 可用于高温烧结炉热场部件、燃料烧结夹具、承载平台、支撑架及高温工装。其低放气率和低污染特性，有利于保持高纯制造环境。

（三）核材料高温试验设备

核材料研发需要进行高温力学测试、辐照后性能分析、高温退火实验、热循环实验。TZM 可作为试验炉热场结构、样品支架、高温夹具、承载平台。由于尺寸稳定性高，可提高实验重复性。

（四）聚变装置真空热结构

磁约束聚变装置，例如托卡马克（Tokamak）和相关等离子体实验装置，需要大量高温真空结构件。TZM 可用于高温支撑件、真空炉内结构件、热屏支架、加热系统支撑件及实验夹具。其低蒸气压和低放气率适合高真空环境。

（五）聚变装置热负荷测试部件

聚变装置研究需要模拟极端等离子体热流。TZM 可用于热流测试样件、高温靶材支撑结构、实验平台承载件。其优良导热性能有助于降低局部热应力。

（六）等离子体实验装置辅助部件

在等离子体研究设备中，部分区域存在高温、高真空、强热循环环境。TZM 可用于电极支撑件、固定件、连接件、定位结构及高温屏蔽件。

（七）聚变堆工程研发中的候选结构材料

未来聚变能源装置要求材料同时具备高温强度、抗热疲劳、低活化潜力、尺寸稳定性。TZM 作为成熟难熔金属合金，长期被研究用于聚变工程中的高温结构应用。其优势包括较高再结晶温度、良好的高温强度、成熟制造技术。

（八）核热推进系统

核热推进（Nuclear Thermal Propulsion，NTP）是未来深空探测的重要方向。核热推进系统需要材料承受极高温度、强热循环、氢气环境。TZM 可用于燃料组件支撑件、高温结构件、试验组件及反应堆热结构研究部件。

（九）放射性环境高温设备

部分核工业设备需要长期运行于辐照和高温环境。TZM 可用于远程操作设备高温结构件、高温容器内部件及特殊工装。但长期中子辐照环境下，需要结合辐照损伤数据进行材料选择。

TZM 在核工业与聚变领域典型应用

应用领域	典型 TZM 部件
核燃料制造	烧结夹具、热场支架、承载平台
核材料研究	高温试验件、样品架、夹具
聚变实验装置	真空结构件、热屏支撑件
等离子体研究	电极支架、高温连接件
热负荷实验	靶材支撑、测试平台
核热推进	高温结构件、试验组件

TZM 应用于核工业与聚变领域的主要优势

性能	工程意义
高温强度高	承受极端温度载荷
抗蠕变性能好	保持长期尺寸稳定
再结晶温度高	延长高温寿命
导热性能优良	降低热应力
热膨胀系数低	减少热变形

性能	工程意义
蒸气压低	适合高真空环境
放气率低	保持洁净环境
加工性能较好	制造复杂结构件

（十）TZM 与聚变材料体系的关系

在未来聚变装置中，不同材料承担不同功能钨及钨合金主要承担等离子体面对材料（PFM）任务，承受最高热流和粒子轰击；铜合金主要用于高导热冷却结构；低活化钢用于大型结构框架；TZM 则更多用于高温真空结构件、支撑件、实验部件及特殊热负荷区域。因此，TZM 并不是钨在聚变第一壁领域的替代材料，而是在聚变工程体系中承担高温结构稳定功能的重要材料。中钨智造认为，TZM 在核工业与聚变领域的核心价值，在于其兼具难熔金属的高温能力和工程制造成熟度。虽然未来聚变堆等离子体直接接触区域将继续以钨基材料为主，但 TZM 凭借高温强度、低蒸气压、良好加工性能和长期工业应用经验，仍将在核燃料制造、高温真空设备、聚变实验装置及核热推进研发中保持重要地位。随着先进聚变能源和核空间动力技术的发展，高纯 TZM、大尺寸 TZM 构件及改性 TZM 材料仍具有较大的应用潜力。

Q123 钛锆钼合金（TZM）为什么可以用于核工业？

核工业设备长期工作于高温、高真空、强热流、热循环及辐射等复杂环境，对材料提出了极高要求。材料不仅要具有优异的高温力学性能，还必须具有良好的尺寸稳定性、低污染特性及长期服役可靠性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借高温强度高、抗蠕变性能优异、导热性能好、蒸气压低及成熟的制造工艺，成为核工业高温设备和实验装置中应用最广泛的钼基高温合金之一。需要说明的是，TZM 并不是所有核反应堆核心结构材料，也不是燃料包壳材料。对于长期承受高剂量中子辐照的堆芯部件，目前通常采用锆合金、奥氏体不锈钢、镍基合金或低活化铁素体/马氏体钢等专用核材料。TZM 主要应用于高温设备、真空系统、核燃料制造装备及核材料研究装置。

（一）高温强度优异

核工业大量设备工作于 1000℃以上。TZM 经过 TiC、ZrC 弥散强化后，高温强度明显高于纯钼，可长期承受高温载荷而不发生明显塑性变形。因此适用于高温炉体结构、热场支架、承载平台及各种高温结构件。

（二）抗蠕变性能突出

核工业设备往往需要连续运行数百甚至数千小时。TZM 具有极低的高温蠕变速率，可长期保持设备尺寸稳定，提高运行可靠性。

（三）导热性能良好

TZM 保持了钼较高的导热能力。能够快速传导热量，降低局部温度梯度，减少热应力，提高高温设备稳定性。

（四）高温尺寸稳定性好

核工业设备通常要求较高装配精度。TZM 再结晶温度较高，高温组织稳定，长期工作过程中晶粒长大较慢，因此能够保持较好的尺寸稳定性。

（五）蒸气压极低

高真空核设备要求材料挥发极少。TZM 高温蒸气压很低，不易污染真空系统及核材料，提高设备洁净度。

（六）放气率低

TZM 经过粉末冶金及真空热处理后，内部残余气体含量较低。在高温真空环境下放气率较小，有利于维持高真空条件。

（七）加工性能成熟

TZM 可加工各种复杂高温结构件。包括支撑架、夹具、定位件、连接件、热屏骨架及承载平台。制造工艺成熟，工程经验丰富。

（八）长期可靠性高

TZM 已在核工业高温设备中应用数十年。具有成熟的数据积累和可靠的服役经验，是核工业高温结构材料的重要组成部分。

TZM 适用于核工业的主要原因

材料性能	工程价值
高温强度高	承受长期高温载荷
抗蠕变性能优异	保持设备尺寸稳定
导热性能好	提高热管理能力
再结晶温度高	延长高温寿命
蒸气压低	保持真空洁净
放气率低	适用于高真空设备
易加工	制造复杂高温结构
工程经验成熟	长期运行可靠

（九）TZM 在核工业中的典型应用

包括核燃料烧结炉热场系统、高温真空炉、高温夹具、样品支架、承载平台、热屏结构、核材料实验设备及高温研究装置等。

中钨智造认为，TZM 能够用于核工业，并不是因为它具有特殊的核反应特性，而是由于其优异的高温综合性能和真空适应能力。对于核工业大量高温真空设备而言，TZM 能够长期保持结构稳定、降低污染并提高设备寿命，因此成为核燃料制造、高温实验及核材料研究领域最成熟的钨基结构材料之一。

Q124 钛锆钼合金（TZM）如何应用于聚变装置？

聚变装置（Fusion Device）是目前世界上工作环境最极端的工程系统之一。磁约束聚变装置如托卡马克（Tokamak）、仿星器（Stellarator）及各种聚变实验平台，需要长期承受高热流、高真空、热循环、强电磁环境及中子辐照等复杂工况。TZM 凭借高温强度、抗蠕变性能、导

热能力及真空兼容性，在聚变装置多个系统中得到应用。需要说明的是，目前国际聚变研究中，直接面对等离子体的第一壁（First Wall）和偏滤器（Divertor）主要采用钨及钨基材料。TZM 更多应用于非直接等离子体接触区域、高温支撑结构、实验部件及真空系统。

（一）热场支撑结构

聚变实验装置内部存在大量高温热场系统。TZM 可用于热屏支架、连接框架、固定件及承力结构。其高温尺寸稳定性可保证热场长期保持设计状态。

（二）真空结构件

聚变装置长期运行于高真空环境。TZM 蒸汽压低、放气率低，不易污染真空腔体，因此适用于高温真空支撑件、连接件、定位件及内部固定结构。

（三）高温实验平台

聚变材料需要进行大量高热流模拟实验。TZM 广泛用于高热流试验平台、样品支架、高温夹具及承载结构。能够长期保持试样位置稳定。

（四）等离子体实验辅助部件

虽然 TZM 通常不直接面对等离子体，但可用于电极支撑件、诊断系统高温结构件、固定架及实验组件。其导热性能有助于降低局部热应力。

（五）偏滤器和第一壁研发试验

在聚变材料研究过程中，TZM 常作为支撑结构、过渡连接件及试验组件。用于验证钨材料、高热流部件及新型结构设计。

（六）聚变材料测试设备

聚变研究需要大量材料性能评价。TZM 可用于高温拉伸试验、高温蠕变试验、热疲劳试验及热循环实验设备中的热场结构件。

（七）高温热负荷装置

聚变装置需要模拟数 MW/m²以上热流密度。TZM 可制造高温散热结构、承载平台及测试靶支撑系统。

（八）未来聚变工程中的结构应用

未来聚变示范堆（DEMO）将需要大量高温结构材料。ZM 凭借成熟制造技术，在高温真空结构、辅助热场、高温连接件及特殊工程部件方面仍具有应用潜力。

TZM 在聚变装置中的典型应用

应用系统	TZM 部件
真空系统	支撑件、连接件、定位件
热场系统	热屏支架、承力结构
材料试验	样品架、高温夹具
热流实验	靶材支撑、承载平台
等离子体研究	电极支架、实验结构件
聚变研发	高温连接件、辅助结构

TZM 应用于聚变装置的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	长期承载高温结构
抗蠕变性能优异	保持尺寸稳定
导热性能好	提高热管理能力
真空兼容性优良	适用于聚变真空环境
蒸气压低	降低材料挥发
加工性能好	制造复杂实验结构
工程经验丰富	聚变研发应用成熟

（九）TZM 与聚变材料体系的关系

现代聚变装置采用多种材料协同工作。钨及钨合金承担第一壁和偏滤器等直接等离子体面对材料；铜合金负责高热流冷却结构；低活化钢承担大型承力结构；TZM 则主要用于高温真空结构件、热场支撑件、实验平台及材料研究设备。因此，TZM 不是钨的替代材料，而是聚变工程材料体系中的重要组成部分。

中钨智造认为，TZM 在聚变装置中的优势，不在于直接承受最高热流，而在于为聚变系统提供稳定可靠的高温结构支撑。凭借优异的高温强度、良好的导热性能、低蒸气压及成熟制造工艺，TZM 已广泛应用于聚变实验平台和高温真空设备，并将在未来聚变工程及核聚变装备研发中继续发挥重要作用。

Q125 钛锆钼合金（TZM）适合作中子辐照部件吗？

中子辐照是核裂变反应堆和聚变装置中最严苛的服役环境之一。高速中子持续轰击材料，会引起位移损伤、点缺陷聚集、位错环形成、辐照硬化、辐照脆化及尺寸变化等一系列组织演化，从而影响材料的强度、塑性和服役寿命。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）具有优异的高温性能，因此长期以来一直是核材料研究的重要对象。但从目前工程应用来看，TZM 适用于部分中子辐照环境，并不适合作为所有长期强中子辐照部件的通用材料。

（一）具有较好的高温辐照稳定性

与许多普通金属相比，TZM 在高温下组织较稳定。TiC、ZrC 弥散强化相能够抑制晶粒长大，使材料在一定辐照剂量下仍保持较好的高温力学性能。因此在中高温辐照条件下，TZM 通常比纯钼具有更好的组织稳定性。

（二）能够承受一定辐照剂量

在实验堆、材料试验堆及聚变材料研究中，TZM 常被用于中子辐照实验。其主要用途包括辐照试样、试验夹具、高温承载件及材料评价试件。大量研究积累了 TZM 在不同温度和中子通量下的性能数据。

（三）辐照后仍会发生硬化和脆化

虽然 TZM 具有良好的高温性能，但中子辐照仍会产生大量晶格缺陷。随着辐照剂量增加，材料通常会出现屈服强度提高；延伸率下降；韧性降低；脆性转变温度升高。因此，TZM

并不能完全避免辐照损伤。

（四）高温有利于缺陷恢复

当工作温度较高时，部分辐照缺陷能够通过扩散逐渐恢复。因此 TzM 在高温辐照环境中的性能通常优于低温辐照环境。这也是 TzM 主要用于高温核设备的重要原因之一。

（五）不属于低活化材料

未来聚变堆强调低活化（Low Activation）设计，即材料在退役后能够较快衰变，降低放射性废物处理难度。钼在中子照射后会产生一定放射性活化产物，因此 TzM 通常不被归类为低活化结构材料。目前聚变工程更倾向于采用低活化铁素体/马氏体钢、钨及部分先进难熔材料。

（六）更适用于辅助高温结构

由于辐照活化及长期服役限制，TzM 目前主要用于高温支撑件、试验部件、热场结构、实验平台及真空设备。而不是长期处于最高中子通量区域的核心承压部件。

TzM 作为中子辐照部件的适用性

项目	评价
高温辐照稳定性	良好
抗辐照组织稳定性	较好
辐照硬化	会发生
辐照脆化	会发生
长期堆芯结构材料	一般不采用
聚变实验部件	可采用

中钨智造认为，TzM 适合一定剂量、高温条件下的中子辐照环境，尤其适用于核材料研究、聚变实验及高温辅助结构件。但由于中子辐照后仍会发生硬化、脆化及放射性活化，目前并不是商业核反应堆堆芯或未来聚变堆第一壁长期服役结构材料的主流选择，而更多承担实验验证、高温支撑及特殊工况结构件的角色。

Q126 钛锆钼合金（TzM）如何应用于等离子体装置？

等离子体装置（Plasma Device）包括托卡马克、仿星器、线性等离子体装置、等离子体风洞、离子源及各种聚变实验平台，是研究可控核聚变和高温等离子体的重要装备。这些设备通常具有高真空、高热流、高温、强电磁场及频繁热循环等特点，对材料提出了极高要求。TzM 凭借高温强度高、导热性能好、尺寸稳定性优异及真空兼容性好，在等离子体装置中得到广泛应用。需要说明的是，直接面对高热流等离子体的第一壁和偏滤器，目前主要采用钨及钨基材料。TzM 更多用于支撑结构、辅助热场部件及实验设备。

（一）真空腔体高温支撑件

等离子体装置内部存在大量高温支撑结构。TzM 可用于支撑架、固定件、连接件、定位件及承力结构。能够长期保持结构尺寸稳定。

（二）热屏支撑系统

聚变实验装置通常设置多层热屏。TzM 可用于热屏骨架、连接杆、安装支架及固定结构。其低热膨胀特性可减少热变形。

（三）高温样品夹具

聚变材料需要进行高热流及等离子体暴露实验。TZM 广泛用于样品夹具、样品架、定位装置及承载平台。能够保证试样位置稳定，提高测试精度。

（四）等离子体热流实验平台

等离子体热负荷试验通常需要模拟数 MW/m²以上热流密度。TZM 可作为试验平台、支撑结构、散热支架及固定件。良好的导热能力有助于降低局部热应力。

（五）高温电极支撑件

部分等离子体设备需要高温电极。TZM 可用于电极安装座、绝缘结构支撑件及高温连接件。其高温尺寸稳定性可保证电极位置精度。

（六）诊断系统结构件

等离子体诊断系统需要大量高精度结构件。TZM 可用于探针支架、光学系统固定件及真空结构件。由于放气率低，不易污染真空系统。

（七）高温真空实验装置

聚变材料研发通常配套高温真空炉。TZM 广泛用于热场支架、承载平台、夹具及高温结构件。

（八）等离子体材料研究

TZM 不仅作为结构材料，也常作为研究对象。研究内容包括高热流作用、热疲劳行为、等离子体相容性及辐照性能等。

TZM 在等离子体装置中的典型应用

应用位置	TZM 部件
真空腔体	支撑件、连接件
热屏系统	热屏骨架、固定架
热流实验	样品架、承载平台
电极系统	支撑座、安装件
诊断系统	定位件、固定件
高温实验	热场结构、夹具

TZM 应用于等离子体装置的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受高热流载荷
导热性能好	降低局部温升
抗蠕变性能优异	保持尺寸稳定
真空兼容性优良	适合超高真空环境
放气率低	保持实验洁净

材料性能	工程价值
加工性能好	制造复杂结构件
工程成熟度高	长期应用可靠

中钨智造认为，T_{ZM} 在等离子体装置中的定位是高温真空结构材料，而非直接等离子体面对材料。凭借优异的高温力学性能、良好的热物理性能和成熟制造技术，T_{ZM} 已广泛应用于聚变实验平台、高热流测试系统及等离子体研究设备，为现代聚变能源研究提供了可靠的高温结构支撑。

Q126A 钛锆钼合金（T_{ZM}）在玻璃工业的应用有哪些？

玻璃工业是 T_{ZM}（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）最重要的传统应用领域之一，也是继航空航天、半导体之后的重要高端市场。现代玻璃制造不仅包括普通浮法玻璃，还涵盖液晶显示玻璃、超薄电子玻璃、光学玻璃、石英玻璃、光伏玻璃、药用玻璃及特种玻璃等多个领域。玻璃熔体通常处于 1200~1700 °C 高温环境，部分特种玻璃熔制温度甚至接近 1800 °C。同时，设备还需要长期连续运行数月甚至数年，因此要求材料具有优异的高温强度、抗蠕变性能、尺寸稳定性及耐玻璃液腐蚀能力。T_{ZM} 凭借这些综合优势，在玻璃工业高温装备中得到广泛应用。需要说明的是，T_{ZM} 并不直接适用于所有玻璃熔池环境。对于长期直接浸泡于高温玻璃液中的部件，根据玻璃成分不同，还可能采用铂合金、铂钨合金、钼、钨或陶瓷材料。T_{ZM} 主要应用于高温承力结构、成形设备及部分接触玻璃液的专用部件。

（一）玻璃熔炉高温结构件

玻璃熔炉长期处于高温连续运行状态。T_{ZM} 广泛用于热场支架、连接件、承载结构、定位件及各种高温固定件。其高温尺寸稳定性可保证炉体长期保持设计状态。

（二）玻璃电熔炉电极结构

部分电熔玻璃炉采用钼电极进行加热。T_{ZM} 可用于电极支撑件、电极连接件、固定结构及高温安装座。由于高温强度更高，可提高电极系统稳定性。

（三）玻璃搅拌器（Stirrer）

高品质光学玻璃和显示玻璃需要均匀化熔体成分。T_{ZM} 可制造玻璃搅拌器支撑件、连接轴、加强结构及部分搅拌组件。其抗蠕变性能可保证长期稳定运转。

（四）玻璃漏板（Orifice Plate）辅助结构

玻璃纤维生产过程中需要大量漏板系统。T_{ZM} 通常用于漏板支撑件、连接结构及固定装置。部分特殊工艺中也可作为高温辅助构件。

（五）玻璃拉丝设备

玻璃纤维、石英纤维及特种纤维生产过程中，T_{ZM} 可用于导向件、支撑件、承载平台及高温连接件。材料高温稳定性有利于保证拉丝精度。

（六）玻璃成形设备

玻璃压制、吹制及热加工设备需要长期高温运行。T_{ZM} 广泛用于模具支撑结构、定位件、热

压夹具、高温承载平台及导向机构。

（七）石英玻璃制造

石英玻璃熔制温度极高。TZM 可用于高温热场结构、支撑架、承载件及实验设备。由于导热性能好，可提高温场稳定性。

（八）光学玻璃制造

光学玻璃要求极高均匀性。TZM 可用于高温搅拌装置、热场支架、夹具及承载结构。有助于提高玻璃均匀性和产品质量。

（九）液晶显示玻璃生产

LCD、OLED 及半导体玻璃基板制造需要高精度热加工设备。TZM 广泛应用于高温支撑件、热处理夹具、玻璃运输治具及热场结构。其尺寸稳定性有助于保证玻璃平整度。

（十）玻璃工业高温试验设备

玻璃配方研发需要大量高温实验。TZM 可用于实验炉热场系统、高温夹具、承载平台及试样支架。长期保持尺寸稳定，提高实验重复性。

TZM 在玻璃工业中的典型产品

应用系统	TZM 部件
玻璃熔炉	热场支架、连接件、固定件
电熔炉	电极支撑、电极连接件
搅拌系统	搅拌器支架、连接轴
拉丝设备	导向件、承载件、支撑架
成形设备	模具支撑、定位件、夹具
光学玻璃	热场结构、高温支架
显示玻璃	热处理治具、运输夹具
实验设备	热场平台、试样架

TZM 用于玻璃工业的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	长期承受高温载荷
抗蠕变性能优异	保持设备尺寸稳定
导热性能好	保持温场均匀
再结晶温度高	延长高温寿命
热膨胀系数低	降低热变形
加工性能好	制造复杂玻璃设备
使用寿命长	降低维护成本
真空及保护气氛适应性好	适合高端玻璃工艺

（十一）TZM 与其他玻璃工业材料的关系

玻璃工业通常根据不同工艺选择不同材料。铂及铂铑合金主要用于高纯玻璃熔制和长期直接

接触玻璃液的关键部件；纯钼广泛用于玻璃电极和部分熔化设备；钨用于更高温特殊场合；氧化物陶瓷用于隔热及耐腐蚀部件；TZM 则主要承担高温承力结构、热场支撑、搅拌系统及高精度热加工设备中的关键结构件作用。因此，TZM 并不是取代所有玻璃工业材料，而是现代高温玻璃装备中不可缺少的重要高温结构材料。

中钨智造认为，玻璃工业是 TZM 最成熟、应用最广泛的传统工业领域之一。随着超薄电子玻璃、大尺寸显示玻璃、高纯石英玻璃、光伏玻璃及高性能光学玻璃的发展，设备对高温稳定性、尺寸精度和连续运行寿命提出了更高要求。TZM 凭借优异的高温综合性能，已成为现代玻璃工业高温装备的重要结构材料，并将在高端玻璃制造领域继续保持广泛应用。

Q127 钛锆钼合金（TZM）为什么用于玻璃制造？

现代玻璃制造包括浮法玻璃、光学玻璃、液晶显示玻璃、超薄电子玻璃、石英玻璃、光伏玻璃及特种玻璃等多个领域。玻璃熔制温度通常为 1200~1700℃，部分特种玻璃可接近 1800℃，生产设备还需要连续运行数月甚至数年，因此对高温材料提出了极高要求。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借高温强度、抗蠕变性能、导热性能及尺寸稳定性等综合优势，成为现代玻璃工业最重要的高温结构材料之一。需要说明的是，TZM 并不是所有玻璃设备的直接接触玻璃液材料。对于长期浸没于高温玻璃液中的关键部件，仍可能采用铂合金、铂钨合金、纯钼或其他耐腐蚀材料。TZM 主要用于高温承力结构、热场系统及部分辅助工艺部件。

（一）高温强度优异

玻璃熔炉长期工作于高温环境。普通耐热钢在高温下容易软化，而 TZM 经过 TiC、ZrC 强化后，在 1000℃以上仍保持较高强度，能够长期承受设备重量及热应力。

（二）抗蠕变性能突出

玻璃生产通常连续运行数千小时。如果高温结构发生蠕变，容易造成设备变形、玻璃液流场改变及产品质量下降。TZM 具有极低的高温蠕变速率，可长期保持结构稳定。

（三）导热性能良好

玻璃熔制要求温场均匀。TZM 保持钼较高导热率，可快速传导热量，减少局部热点，提高炉内温度均匀性。

（四）尺寸稳定性高

玻璃成形设备要求较高几何精度。TZM 再结晶温度高，晶粒长大缓慢，长期高温运行后仍可保持较好的尺寸稳定性。

（五）耐热循环性能好

玻璃设备需要经历启动、停炉、维修等热循环过程。TZM 具有较好的抗热疲劳性能，可减少热裂纹，提高设备寿命。

（六）污染风险低

高端光学玻璃、电子玻璃对杂质极为敏感。TZM 纯度高，在高温下挥发较少，不易引入杂质，有助于提高玻璃品质。

（七）加工性能较好

TZM 能够加工各种复杂高温结构件。包括支架、夹具、连接件、导向件及承载平台。制造精度较高，装配方便。

（八）使用寿命长

由于高温强度高、抗蠕变能力强及热稳定性优异，TZM 热场结构使用寿命明显长于普通钼材料，可降低停炉维修频率。

TZM 用于玻璃制造的主要原因

材料性能	工程价值
高温强度高	承受长期高温载荷
抗蠕变性能优异	保持设备尺寸稳定
导热性能好	保证温场均匀
再结晶温度高	延长高温寿命
热疲劳性能好	适应反复热循环
污染风险低	提高玻璃纯度
加工性能好	制造复杂设备
使用寿命长	降低运行成本

中钨智造认为，TZM 用于玻璃制造的根本原因，在于其能够长期保持高温结构稳定，而不仅仅是耐高温。对于连续运行的大型玻璃生产线而言，TZM 能够有效降低设备变形，提高温场稳定性和产品一致性，因此成为现代高端玻璃装备不可缺少的重要高温结构材料。

Q128 钛锆钼合金（TZM）如何应用于玻璃熔炉？

玻璃熔炉（Glass Melting Furnace）是玻璃制造的核心设备，其主要任务是将配合料加热熔化、澄清、均化，并为后续成形工序提供稳定的高温玻璃液。玻璃熔炉通常长期运行于 1200～1700 °C，部分特种玻璃熔炉温度更高，同时要求全年连续生产，因此高温结构件必须具有优异的强度、抗蠕变能力及长期尺寸稳定性。TZM 在玻璃熔炉中主要承担高温结构支撑和热场稳定作用，而不是全部直接接触玻璃液。

（一）热场支撑结构

TZM 最广泛的应用是热场系统。主要包括热场支架、承载框架、连接杆、固定件及安装结构。这些部件长期承受高温载荷，需要保持结构刚性。

（二）电极支撑系统

电熔玻璃炉通常采用钼电极加热。TZM 可用于电极安装座、电极固定件、支撑架及连接结构。高温下能够保持较高刚度，提高电极稳定性。

（三）玻璃搅拌系统

光学玻璃和显示玻璃通常需要搅拌均化。TZM 用于搅拌器支撑轴、安装结构、连接件及加强件。其抗蠕变性能有助于长期保持搅拌精度。

（四）玻璃液输送设备

部分玻璃液输送系统需要高温承力结构。TZM 用于导流槽支撑件、输送平台及固定结构。提高设备整体稳定性。

（五）玻璃成形设备

玻璃进入成形工序后仍保持高温。TZM 广泛用于成形夹具、承载平台、定位件、模具支撑结构及导向机构。

（六）热屏系统

现代玻璃熔炉通常设置多层热屏。TZM 可制造热屏支架、连接件及固定框架。保持热屏几何尺寸稳定，提高隔热效率。

（七）检修及实验设备

玻璃工业实验炉和检修设备中，TZM 常用于高温试样架、实验夹具、承载平台及维修工装。

TZM 在玻璃熔炉中的典型部件

系统	TZM 部件
热场系统	支架、连接杆、固定件
电极系统	电极安装座、支撑架
搅拌系统	支撑轴、连接件
输送系统	支撑件、固定平台
成形设备	夹具、定位件、导向件
热屏系统	热屏骨架、安装结构

TZM 应用于玻璃熔炉的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	长期承受炉内载荷
抗蠕变性能优异	保持设备尺寸稳定
导热性能好	提高温场均匀性
热膨胀系数低	降低热变形
热疲劳性能好	延长设备寿命
加工性能好	制造复杂热场结构
工程经验成熟	长期运行可靠

（八）与其他玻璃熔炉材料的配合应用

现代玻璃熔炉通常采用多种材料协同工作。直接接触高纯玻璃液的重要部件可采用铂或铂铑合金；钼用于电极及部分熔化部件；耐火材料构成炉衬；TZM 则主要承担热场支撑、结构连接和高温承力等功能。通过这种材料组合，可兼顾耐腐蚀性、高温强度、加工性能和设备寿命。中钨智造认为，TZM 在玻璃熔炉中的核心作用，是维持热场系统长期稳定运行。其优异的高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性，使热场结构能够在连续高温生产条件下保持精度，

从而提高玻璃熔化均匀性、产品质量及设备使用寿命。因此，TZM 已成为现代高端玻璃熔炉不可替代的重要高温结构材料之一。

Q128A 钛锆钼合金（TZM）在金属加工领域的应用有哪些？

金属加工行业涵盖粉末冶金、热锻、热压、热等静压（HIP）、真空烧结、热处理、有色金属加工、难熔金属加工及高温成形等多个领域。这些工艺通常需要在 1000~2000 °C 甚至更高温度下进行，同时要求设备长期保持尺寸稳定和较高机械强度。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借高温强度高、抗蠕变性能优异、导热性能好、热膨胀系数低及真空兼容性好，在金属加工行业广泛应用于高温工装、模具、夹具、热场系统及各种承力结构件。TZM 通常不是普通机械加工设备的主体材料，而主要用于高温、高真空及特殊热加工装备。

（一）真空热处理工装

真空热处理炉长期工作于 1000~1600 °C。TZM 广泛用于料架、托盘、支撑梁、夹具、定位件及承载平台。能够长期保持尺寸稳定，提高热处理一致性。

（二）粉末冶金烧结工装

粉末冶金烧结需要高温和真空环境。TZM 可用于烧结托盘、支撑架、烧结舟、定位夹具及承载结构。其低放气率有利于保持烧结环境洁净。

（三）热等静压（HIP）辅助工装

HIP 设备工作于高温高压环境。TZM 可制造高温支撑件、定位工装、承载平台及实验夹具。在高温下仍具有较高刚度。

（四）高温热压模具

部分金属及陶瓷材料采用热压烧结工艺。TZM 可作为热压模具支撑结构、压头、隔热结构及承载件。其抗蠕变性能有助于保持模具精度。

（五）热锻设备

难变形合金、高温合金及难熔金属热锻时，需要耐高温工装。TZM 可用于模具支撑件、定位块、导向件及高温夹具。

（六）高温轧制辅助设备

在钼、钨及其他难熔金属加工过程中，TZM 可用于导向件、支撑辊座、定位装置及高温承载结构。

（七）扩散焊工装

扩散焊通常在真空高温条件下进行。TZM 可制造压板、夹具、定位件及承载平台。由于热膨胀较小，可保证焊接精度。

（八）真空钎焊工装

TZM 广泛用于钎焊夹具、固定架、定位块及支撑结构。能够避免工装在高温下发生明显变形。

（九）高温试验设备

金属材料研发需要各种高温实验设备。TZM 可用于拉伸夹具、蠕变试验架、热疲劳试验工装及承载平台。

（十）难熔金属加工

TZM 本身也是钼、钨及其合金加工的重要工装材料。例如钼板烧结工装、钨制品热处理夹具及难熔金属热加工设备。

（十一）TZM 在金属加工领域典型产品

应用系统	TZM 部件
真空热处理	托盘、料架、支撑梁
粉末冶金	烧结舟、夹具、支撑架
HIP 设备	承载平台、定位件
热压设备	模具支撑、压头
热锻设备	导向件、定位块
扩散焊	压板、夹具
真空钎焊	工装、固定架
高温实验	拉伸夹具、试验平台

（十二）TZM 用于金属加工的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受高温加工载荷
抗蠕变性能优异	保持工装尺寸稳定
导热性能好	保证温度均匀
热膨胀系数低	减少热变形
真空兼容性好	适用于真空工艺
放气率低	提高工艺洁净度
加工性能好	制造复杂工装
使用寿命长	降低维护成本

（十三）TZM 的典型应用行业

TZM 已广泛应用于粉末冶金、真空热处理、高温烧结、热等静压、扩散焊、真空钎焊、难熔金属加工、航空航天零部件制造、核工业高温工装及先进材料研发等领域。

中钨智造认为，TZM 在金属加工行业的定位，是高温精密工装和热场结构材料，而非普通加工材料。其最大的优势在于能够长期保持高温尺寸稳定性和结构强度，在连续高温生产过程中有效降低工装变形，提高产品尺寸一致性和工艺重复性。随着粉末冶金、增材制造、高温扩散连接及先进材料加工技术的发展，TZM 在高端金属加工装备中的应用仍将持续扩大。

Q129 钛锆钼合金（TZM）为什么适合作压铸模芯？

压铸（Die Casting）是铝合金、镁合金、铜合金及部分锌合金最重要的精密成形工艺之一。压铸模芯（Core）直接参与金属液充型和凝固过程，需要长期承受高温金属液冲刷、快速冷热循环、机械冲击及较高注射压力，因此对材料的耐热性、尺寸稳定性和抗热疲劳性能要求极高。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，在部分高端压铸模具，尤其是局部高热负荷模芯、细长型芯和特殊镶件中得到应用。需要说明的是，TZM 价格较高，加工成本也明显高于热作模具钢，因此通常不会制造整套压铸模具，而是作为关键高温模芯、局部镶件或易失效区域的强化材料。

（一）高温强度远高于热作模具钢

压铸过程中，模芯表面会反复接触 650~1100℃左右的金属液（不同合金温度不同）。普通 H13 等热作模具钢随着温度升高强度迅速下降，而 TZM 在高温下仍保持较高强度，不易发生塑性变形。因此适用于细长模芯、深腔型芯及局部高温区域。

（二）抗热疲劳性能优异

压铸模具每个循环都经历喷涂冷却→金属液充型→凝固→脱模。这种冷热交替极易产生热疲劳裂纹。TZM 具有较高导热率、较低热膨胀系数及良好的高温强度，因此能够降低热应力，延缓热疲劳裂纹形成。

（三）导热性能好

TZM 导热率明显高于多数热作模具钢。能够更快将热量传递至模具内部，有利于缩短凝固时间、改善温度分布、提高生产节拍。

（四）尺寸稳定性高

高温下模芯尺寸变化直接影响铸件精度。TZM 再结晶温度高，长期高温使用后组织稳定，能够保持模芯尺寸精度，提高产品一致性。

（五）抗蠕变性能突出

长期高温工作时，普通模具钢容易发生蠕变。TZM 高温蠕变速率极低，可长期保持模芯几何形状。特别适用于薄壁型芯、深孔型芯及复杂内腔结构。

（六）降低粘模风险

TZM 表面与部分有色金属熔体之间的润湿性较低。合理配合表面处理后，可减少局部粘附，提高脱模性能。

（七）延长局部寿命

对于高热负荷区域，采用 TZM 镶件通常可明显提高使用寿命。因此高端压铸模具常采用钢制主体+TZM 局部模芯的组合结构。

TZM 适合作压铸模芯的主要原因

材料性能	工程优势
高温强度高	防止高温变形
抗热疲劳性能优异	延长模芯寿命

材料性能	工程优势
导热性能好	加快冷却速度
抗蠕变性能好	长期保持尺寸
热膨胀系数低	降低热裂纹
尺寸稳定性高	提高铸件精度

中钨智造认为，TZM 并非替代整个压铸模具，而是解决压铸模具局部高温失效问题的重要材料。对于传统模具钢容易出现热裂纹、塌陷和烧损的区域，采用 TZM 模芯或 TZM 镶件能够显著延长模具寿命，提高生产稳定性，因此在高端铝合金、镁合金及铜合金压铸领域具有重要应用价值。

Q130 钛锆钼合金（TZM）为什么用于热冲压模具？

热冲压（Hot Stamping）是汽车高强钢、超高强钢及航空航天钣金制造的重要工艺。板材通常加热至 850~950℃奥氏体化后迅速转移至模具，在模具内完成冲压和快速冷却，实现成形与淬火同步完成。热冲压模具不仅需要承受较大的机械载荷，还要反复经历高温接触和快速冷却，因此模具材料必须具备优异的耐热性能和尺寸稳定性。TZM 凭借高温强度、导热性能和抗热疲劳能力，在部分热冲压模具关键区域得到应用。需要说明的是，目前工业上绝大多数热冲压模具主体仍采用 H13、1.2367 等热作模具钢，并配备内部水冷系统。TZM 主要用于局部高热负荷镶块、模芯及特殊工艺模具，而不是整副模具。

（一）高温强度保持能力突出

热冲压过程中，模具不断接触 900℃左右的钢板。普通模具钢长期使用容易发生软化。TZM 高温强度明显更高，可保持局部结构稳定。

（二）导热性能优异

热冲压要求模具快速带走钢板热量。TZM 具有较高导热率，可提高局部冷却效率，有利于提高淬火速度、缩短成形周期及改善组织均匀性。

（三）抗热疲劳性能好

模具每个循环都经历高温接触→快速冷却→再次升温。TZM 能够降低热应力集中，减少热疲劳裂纹。

（四）尺寸稳定性优异

汽车热冲压零件尺寸精度要求极高。TZM 长期工作后变形较小，可保持模具几何尺寸，提高零件一致性。

（五）抗蠕变性能高

长期高温循环容易使模具局部发生塑性变形。TZM 抗蠕变能力优异，可长期保持局部型面精度。

（六）适用于局部高热区域

模具局部凸台、尖角及细长型芯热负荷最高。采用 TZM 局部镶块，可显著提高这些区域寿

命。

（七）提高模具使用寿命

在热冲压模具中，TZM 通常作为局部耐热镶块、局部模芯、局部支撑件。能够明显延缓高温失效，提高整副模具寿命。

TZM 用于热冲压模具的主要优势

材料性能	工程优势
高温强度高	防止高温软化
导热性能好	提高冷却效率
抗热疲劳性能优异	减少裂纹形成
抗蠕变性能高	保持模具尺寸
热膨胀系数低	降低热变形
使用寿命长	减少维修停机

（八）与热作模具钢的配合应用

现代热冲压模具通常采用组合设计主体采用热作模具钢，以兼顾成本、韧性和加工性能；局部高热负荷区域采用 TZM 镶块或 TZM 模芯，以提高耐热性、导热能力和抗热疲劳性能。这种钢+TZM 组合结构已成为部分高端热冲压模具的重要设计方案。

中钨智造认为，TZM 用于热冲压模具的核心价值，在于解决局部高热负荷区域的寿命问题。其高温强度、优异导热性能和长期尺寸稳定性，使其特别适合作为热冲压模具的关键镶件和模芯材料。虽然受成本限制，TZM 难以替代热作模具钢成为主体材料，但在高端汽车、航空航天及先进成形装备中，钢+TZM 复合模具将继续保持重要应用前景。

Q131 钛锆钼合金（TZM）如何应用于等温锻造？

等温锻造（Isothermal Forging）是一种高精度近净成形工艺，广泛用于航空航天发动机、燃气轮机、钛合金、高温合金及难变形材料制造。与普通热锻不同，等温锻造要求坯料和模具保持接近相同的高温，以减少材料流动阻力，提高组织均匀性和尺寸精度。根据加工材料不同，等温锻造温度一般为 800~1200 °C，部分难熔金属和特殊材料工艺温度更高。因此，模具和工装必须具有极高的高温强度、抗蠕变性能及尺寸稳定性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，在等温锻造设备中广泛应用于模具、模芯、压头及各种高温工装。需要说明的是，TZM 主要用于高温等温锻造模具及工装，并不适用于所有锻造材料。例如，大型钢件普通热锻通常采用热作模具钢，而 TZM 主要用于钛合金、高温合金等高附加值零件的精密等温锻造。

（一）作为等温锻造模具

TZM 最重要的应用是制造等温锻造模具。在高温状态下，其强度明显高于普通热作模具钢，可长期保持模具型腔尺寸，适用于航空发动机叶片、盘件及精密结构件等高要求零件。

（二）作为模芯和局部镶块

复杂锻件往往存在局部高应力、高温区域。TZM 常用于模芯、型腔镶块、局部加强件及细长凸模。通过局部使用 TZM，可提高关键区域寿命，同时降低整套模具成本。

（三）作为压头和冲头

等温锻造压头需要长期承受高温和高压力。TZM 具有优异的抗压强度和抗蠕变性能，可用于压头、冲头、顶杆及承载件。能够减少高温塑性变形，提高锻造精度。

（四）作为高温支撑工装

等温锻造设备中大量采用高温支撑结构。TZM 可制造支撑板、定位块、导向件、承载平台及连接结构。长期高温下仍能保持刚性和尺寸稳定。

（五）提高模具寿命

普通热作模具钢在 1000 °C 左右容易软化和蠕变。TZM 由于再结晶温度高、TiC 和 ZrC 弥散强化作用明显，在高温下组织稳定，可显著延长模具使用寿命。

（六）提高锻件尺寸精度

等温锻造要求模具型腔在整个加工过程中几乎不发生尺寸变化。TZM 热膨胀系数较低，抗蠕变能力强，可保持型腔尺寸稳定，提高锻件一致性。

（七）改善锻件组织均匀性

TZM 导热性能优于多数热作模具钢，有助于保持模具温度均匀，减少局部温差。稳定的温场能够改善材料流动，提高晶粒组织均匀性，降低折叠、流线紊乱等锻造缺陷。

（八）适用于高价值材料锻造

TZM 广泛用于合金、高温镍基合金、钼合金及部分难变形材料的等温锻造。这些材料加工成本高，对模具性能要求极高，TZM 能够充分发挥其高温性能优势。

TZM 在等温锻造中的典型应用

应用部位	TZM 产品
等温模具	上模、下模、型腔
模芯系统	模芯、镶块、凸模
压力系统	压头、冲头、顶杆
工装系统	支撑板、定位块、导向件
热场系统	承载平台、高温夹具

TZM 用于等温锻造的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受高温锻压力
抗蠕变性能优异	保持模具尺寸稳定
再结晶温度高	延长模具寿命
导热性能好	保持温场均匀
热膨胀系数低	提高锻件尺寸精度
加工性能较好	制造复杂模具

材料性能	工程价值
高温组织稳定	保证长期连续生产

（九）与其他等温锻造模具材料比较

目前等温锻造模具通常根据加工温度和材料进行选择热作模具钢适用于中温等温锻造，成本较低，但高温软化较快。镍基高温合金适用于部分高温工装，但导热性能较低。TZM 适用于 1000℃以上的高温精密等温锻造，具有更高的高温强度和尺寸稳定性。钨合金耐温更高，但加工难度大、韧性较低，因此通常用于更极端的高温场合。

中钨智造认为，TZM 在等温锻造中的核心优势，是能够在长期高温条件下保持模具几何尺寸和力学性能。对于航空航天发动机叶片、钛合金大型结构件、高温合金盘件等高附加值产品，TZM 模具能够显著提高锻件尺寸一致性、组织均匀性和模具使用寿命。因此，TZM 已成为高端等温锻造装备中最重要的难熔金属模具材料之一。

Q132 钛锆钼合金（TZM）在医疗与电子领域的应用有哪些？

医疗与电子产业是高端 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）的重要应用领域之一。两大行业虽然产品不同，但都具有共同特点：工作环境洁净度要求高、尺寸精度要求高、热稳定性要求高，部分设备还需要长期在高真空、高温或高热流条件下运行。TZM 凭借高温强度、优异导热性能、低蒸气压、低放气率和高尺寸稳定性，在医疗设备和电子制造装备中得到广泛应用。需要说明的是，TZM 在医疗领域主要用于医疗设备制造，而不是人体植入材料。目前人体植入物仍以钛合金（如 Ti-6Al-4V）、钴铬合金及不锈钢等生物医用材料为主。

（一）医疗 CT 球管旋转阳极

TZM 最成熟的医疗应用是 X 射线 CT 球管旋转阳极（Rotating Anode）。旋转阳极长期承受电子束轰击，局部瞬时温度可超过 2000℃。TZM 具有高温强度高、导热性能好、热疲劳性能优异、热膨胀小。因此成为旋转阳极基体的标准材料之一。

（二）医用 X 射线设备

除 CT 外，工业及医疗 X 射线设备中的高温部件也大量采用 TZM。例如阳极支撑件、高温固定件及热管理结构。

（三）放疗设备

直线加速器（LINAC）等放疗设备需要高温电子束系统。TZM 可用于电子束靶支撑件、高温结构件及真空部件。

（四）电子束设备

电子束焊接、电子束加工及电子束熔炼设备长期工作于高真空环境。TZM 可制造电子束靶座、支撑件、夹具及高温结构件。

（五）真空电子器件

电子管、微波器件及部分高功率电子元件需要高温真空材料。TZM 可用于阴极支架、阳极结

构件及高温支撑系统。

（六）半导体电子设备

半导体设备属于电子产业的重要组成部分。TZM 广泛应用于离子注入设备、PVD 设备、CVD 设备、MOCVD 设备、晶圆热处理设备及高温热场系统。

（七）电子封装设备

先进电子封装需要高温烧结和真空焊接。TZM 可用于烧结托盘、夹具、定位件及热处理工装。

（八）显示面板制造

LCD、OLED 及 Micro LED 制造过程中需要大量高温设备。TZM 可用于热处理治具、玻璃承载平台、定位结构及真空夹具。

（九）电子陶瓷烧结

电子陶瓷广泛应用于 MLCC、电阻、电容、压电陶瓷等产品。TZM 可用于烧结夹具、承载平台及高温支撑件。

（十）电子材料研发

电子材料研发通常需要高温真空实验、高温热处理及热循环实验。TZM 可用于实验夹具、承载平台、高温支架及试验设备。

TZM 在医疗与电子领域典型产品

应用领域	TZM 产品
CT 球管	旋转阳极基体
医疗 X 射线	阳极支架、固定件
放疗设备	高温电子束结构件
真空电子	阴极支架、阳极结构
半导体设备	热场部件、夹具、支撑件
显示制造	热处理治具、承载平台
电子封装	烧结托盘、定位件
电子陶瓷	烧结夹具、高温支撑

TZM 用于医疗与电子领域的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受高热流载荷
导热性能优异	快速散热
热膨胀系数低	保持高精度尺寸
热疲劳性能好	延长设备寿命
蒸气压低	适用于高真空环境
放气率低	保持设备洁净
加工性能好	制造复杂精密零件
使用寿命长	降低维护成本

（十一）TZM 典型行业应用

TZM 已广泛应用于医疗 CT 设备、数字 X 射线设备、放疗系统、半导体制造设备、显示面板装备、真空电子设备、电子陶瓷制造、高端电子封装及先进电子材料研发等领域。中钨智造认为，医疗与电子行业是 TZM 附加值最高的应用市场之一。尤其是在 CT 旋转阳极领域，TZM 已经成为国际主流标准材料；在半导体和电子制造装备领域，TZM 凭借高温稳定性、优异导热性能和高真空适应能力，成为现代高端装备的重要组成部分。随着医疗影像设备、高端芯片制造、先进封装和新型显示技术的发展，TZM 在医疗与电子产业中的应用仍将持续扩大。

Q132 钛锆钼合金（TZM）为什么用于 X 射线旋转阳极？

X 射线旋转阳极（Rotating Anode）是 CT、数字 X 射线（DR）、血管造影及工业 CT 等设备中的核心部件。工作时，高能电子束以极高功率轰击阳极靶面，将电子动能转化为 X 射线。在这一过程中，约 99% 的能量转化为热，仅约 1% 转化为 X 射线，因此阳极必须在极短时间内承受极高热流密度和剧烈热循环。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）凭借优异的高温综合性能，成为国际主流旋转阳极盘基体材料。需要说明的是，实际旋转阳极通常采用复合结构：靶面一般覆有钨或钨铼（W-Re）靶层，以提高 X 射线产生效率和耐磨性；TZM 主要作为阳极盘基体，负责承载、导热和保持结构稳定，而不是直接作为发射 X 射线的靶材。

（一）高温强度极高

电子束轰击会使靶面局部瞬时温度达到 2000 °C 以上。TZM 在高温下仍具有较高的机械强度，可防止阳极盘发生塑性变形。

（二）导热性能优异

旋转阳极必须迅速将靶面热量传导至整个阳极盘，并进一步散热。TZM 保持了钼较高的导热率，可有效降低局部热点，提高设备连续工作能力。

（三）抗热疲劳性能突出

阳极在工作过程中不断经历电子束加热 → 停止照射 → 冷却。长期热循环容易产生热疲劳裂纹。TZM 因导热快、热膨胀较低、组织稳定，可显著提高抗热疲劳能力。

（四）高温尺寸稳定性好

CT 设备要求阳极高速旋转，转速通常达到数千至上万转/分钟。高速旋转条件下，如果阳极发生变形，会影响转子平衡和成像质量。TZM 具有优异的尺寸稳定性，可长期保持转子动平衡。

（五）抗蠕变性能优异

阳极长期处于高温和高速离心力共同作用下。TZM 高温蠕变速率极低，可避免阳极盘长期使用后产生永久变形。

（六）热膨胀较小

较低热膨胀系数能够减少热应力。有利于降低靶层开裂风险，提高钨靶层与基体结合可靠性。

（七）加工性能较好

TZM 能够加工大型高精度旋转盘。可进行锻造、机加工、精密磨削及动平衡加工。满足医疗设备极高的制造精度要求。

（八）长期工程验证成熟

TZM 旋转阳极已经应用数十年。目前全球主流 CT 球管制造商均采用 TZM 作为阳极盘基体材料之一，具有成熟的制造工艺和可靠的临床应用经验。

TZM 用于 X 射线旋转阳极的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受电子束热流
导热性能优异	快速散热
抗热疲劳性能优异	延长阳极寿命
抗蠕变性能好	保持高速旋转稳定
热膨胀系数低	降低热应力
尺寸稳定性高	保证成像精度

中钨智造认为，TZM 成为 X 射线旋转阳极标准材料的关键，并非因为其产生 X 射线能力更强，而是因为它能够长期承受极端热负荷并保持结构稳定。作为钨靶层的高性能基体，TZM 兼具高温强度、优异导热性和抗热疲劳性能，是现代 CT 球管和高端 X 射线设备不可或缺的重要材料。

Q133 钛锆钼合金（TZM）为什么用于电子束设备？

电子束设备（Electron Beam Equipment）包括电子束焊接（EBW）、电子束熔炼（EBM）、电子束蒸发、电子束增材制造（EBAM）及各种电子束实验设备。这些设备通常工作于高真空环境，电子束能量密度极高，局部温度可迅速升高，因此设备内部材料必须同时满足耐高温、高真空、低污染及长期稳定运行等要求。TZM 凭借优异的综合性能，在电子束设备中广泛用于高温结构件、支撑件、夹具及部分受热部件。

（一）耐电子束高热流

电子束具有极高能量密度。局部受热区域温度可迅速升高至数千摄氏度。TZM 高温强度高，可长期承受电子束热负荷而不发生明显变形。

（二）导热性能优异

TZM 导热率较高。能够迅速将电子束产生的热量扩散至整体结构，降低局部热应力，提高设备稳定性。

（三）高真空兼容性好

电子束设备通常工作于 $10^{-3}\sim10^{-6}$ Pa 甚至更高真空。TZM 具有蒸气压低、放气率低、高温挥发少。 有助于维持稳定真空环境，减少污染。

（四）尺寸稳定性高

电子束加工需要极高定位精度。TZM 高温下尺寸变化小，可保证电子束焦点和工件位置稳定，提高加工精度。

（五）抗热疲劳性能优异

电子束设备频繁启停。TZM 能够承受反复热循环，降低裂纹产生风险，延长设备寿命。

（六）适用于高温工装

TZM 广泛用于电子束焊接夹具、定位件、支撑架及承载平台。高温下仍保持较高刚性。

（七）适合作电子束蒸发设备部件

电子束蒸发广泛用于光学镀膜和半导体制造。TZM 用于坩埚支撑、热屏结构、固定件及高温连接件。挥发率低，可减少薄膜污染。

（八）适用于电子束熔炼设备

电子束熔炼主要用于高纯钛、钼、钨及难熔金属。TZM 可用于支撑结构、高温夹具、导向件及承载系统。能够长期保持高温尺寸稳定。

TZM 在电子束设备中的典型应用

应用系统	TZM 部件
电子束焊接	夹具、定位件、支撑架
电子束熔炼	承载平台、固定件
电子束蒸发	热屏、支撑结构、连接件
电子束增材制造	高温工装、承载件
实验设备	样品架、高温结构件

TZM 用于电子束设备的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受电子束热流
导热性能好	快速散热
蒸气压低	保持高真空
放气率低	减少设备污染
抗热疲劳性能优异	延长使用寿命
尺寸稳定性高	提高加工精度
加工性能好	制造复杂高温结构

中钨智造认为，TZM 在电子束设备中的核心作用，是提供稳定可靠的高温真空结构。它不仅能够承受电子束产生的高热流，还能凭借低蒸气压和低放气率维持洁净真空环境，从而保证电子束加工、熔炼和蒸发等工艺的稳定性 and 产品质量。因此，TZM 已成为现代电子束装备的重要工程材料之一。

Q134 钛锆钼合金（TZM）为什么用于离子注入设备？

离子注入设备（Ion Implanter）是半导体制造中的关键装备之一，用于将硼（B）、磷（P）、砷（As）等掺杂离子精确注入硅片，从而形成 PN 结及各种半导体器件结构。离子注入过程通常在高真空环境下进行，设备内部同时受到离子束轰击、局部发热、等离子体作用及长期真空运行等影响，因此内部材料必须具有优异的高温稳定性、低污染特性及良好的尺寸稳定性。TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）因综合性能优异，被广泛用于离子注入设备的高温结构件和关键工装。需要说明的是，TZM 通常用于设备内部结构件、离子束通道部件、夹具及热场部件，而不是作为离子源材料本身。

（一）适应高真空环境

离子注入设备一般工作在 $10^{-4}\sim10^{-7}$ Pa 甚至更高真空。TZM 具有极低蒸气压、极低放气率、高温挥发少。能够长期保持洁净真空环境，减少颗粒和杂质污染。

（二）耐离子束局部加热

离子束轰击会使部分部件产生局部高温。TZM 高温强度高，可长期承受热载荷而不发生明显变形。

（三）尺寸稳定性高

离子束传输系统要求极高定位精度。TZM 热膨胀系数较低，长期运行后仍能保持几何尺寸稳定，有利于保证离子束轨迹精度。

（四）导热性能优异

TZM 导热率较高，可迅速传导局部热量，降低温度梯度，减少热应力，提高设备运行稳定性。

（五）抗热疲劳性能好

设备频繁启停及工艺切换会产生反复热循环。TZM 具有良好的抗热疲劳性能，可延长关键部件寿命。

（六）污染风险低

半导体工艺对金属污染极为敏感。TZM 纯度高、挥发少、颗粒释放少，有助于满足先进制程对洁净度的要求。

（七）加工精度高

TZM 能够加工复杂精密零件。常用于离子束挡板、支撑架、定位件、样品夹具及热处理工装。

TZM 在离子注入设备中的典型应用

应用位置	TZM 部件
真空系统	支撑件、连接件
离子束通道	挡板、定位件
晶圆系统	承载件、夹具
热处理系统	热场部件、支撑架
高温工装	固定件、安装座

TZM 用于离子注入设备的主要优势

材料性能	工程价值
高温强度高	承受局部热负荷
导热性能好	快速散热
蒸气压低	保持高真空
放气率低	减少污染
尺寸稳定性高	保证束流精度
抗热疲劳性能优异	延长设备寿命

中钨智造认为，TZM 在离子注入设备中的价值主要体现在高真空、高洁净和高尺寸稳定性三方面。随着先进制程向更高集成度发展，设备对污染控制和结构精度要求不断提高，TZM 仍将是高端离子注入装备的重要工程材料。

Q135 钛锆钼合金（TZM）还能应用于哪些科研装备？

除了半导体、航空航天、玻璃工业及核聚变等产业应用外，TZM 还广泛用于各类科研装备。科研设备通常具有高真空、高温、高热流、高精度及长期稳定运行等特点，对材料综合性能要求极高。TZM 凭借高温强度、抗蠕变性能、导热性能、低蒸气压及优异的真空兼容性，已成为许多大型科学装置的重要结构材料。

（一）同步辐射装置

同步辐射光源内部存在大量高热流真空部件。TZM 可用于高温支撑件、光束线热管理结构、固定件及实验工装。

（二）自由电子激光（FEL）

自由电子激光装置需要高精度真空系统。TZM 可制造束线支撑、高温结构件、实验夹具及热管理部件。

（三）粒子加速器

高能加速器中的部分实验装置需要耐高温和高真空材料。TZM 可用于实验样品架、靶座、支撑件及定位结构。

（四）聚变实验装置

包括托卡马克、仿星器及线性等离子体装置。TZM 主要用于热场支撑、样品夹具、实验平台及高温结构件。

（五）高温材料试验设备

科研院所广泛开展高温拉伸、蠕变、疲劳及热循环实验。TZM 可用于夹具、承载平台、试样架及定位工装。

（六）真空物理实验平台

各种真空实验设备需要高温真空兼容材料。TZM 可用于样品台、支撑架、连接件及热屏结构。

（七）电子束与离子束实验设备

科研电子束和离子束系统中，TZM 常用于样品夹具、束流挡板、热场部件及高温支撑结构。

（八）高温炉与实验热场

材料科学研究大量使用真空高温炉。TZM 广泛应用于热场支架、加热区承载件、夹具及实验平台。

（九）晶体生长实验设备

科研晶体生长设备包括蓝宝石、SiC、GaN 及氧化物晶体实验炉。ZM 可用于热场结构、支撑件、夹具及定位件。

（十）先进制造研究平台

包括增材制造、高温扩散焊、电子束熔炼及粉末冶金实验设备。TZM 广泛作为高温工装和承载结构材料。

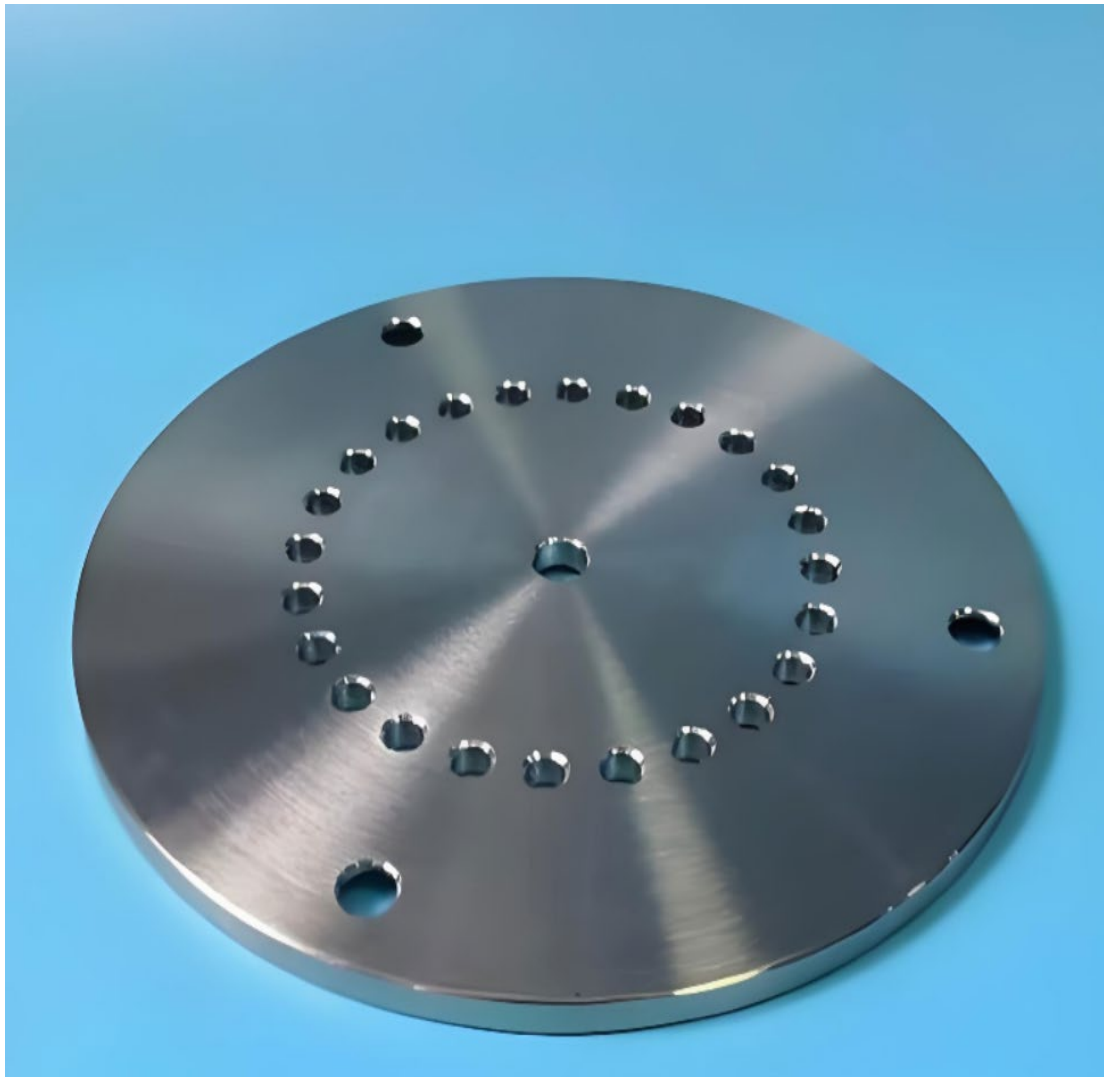
TZM 在科研装备中的典型应用

科研装备	TZM 应用
同步辐射	热管理结构、支撑件
自由电子激光	真空结构、高温支撑
粒子加速器	靶座、实验工装
聚变实验	热场结构、样品架
真空高温炉	热场系统、夹具
晶体生长设备	支撑件、定位件
电子束实验	挡板、夹具、承载件
材料测试平台	拉伸夹具、蠕变工装

TZM 用于科研装备的主要优势

材料性能	科研价值
高温强度高	满足极端实验条件
抗蠕变性能优异	保持长期稳定
导热性能好	提高热场均匀性
蒸气压低	保持超高真空
放气率低	降低实验污染
尺寸稳定性高	保证实验精度
易于精密加工	满足复杂科研装备需求

中钨智造认为，TZM 不仅是一种成熟的工业材料，也是现代大型科研装备的重要基础材料。从同步辐射光源、粒子加速器、聚变实验装置，到高温材料测试平台和先进制造实验设备，TZM 都因其优异的高温性能和真空兼容性发挥着关键作用。随着大科学装置和先进材料研究的发展，TZM 在科研领域的应用范围仍将持续扩大。



第十二篇 钛锆钼合金（TZM）全球产业是怎样的？

Q135 钛锆钼合金（TZM）全球产业格局是怎样的？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）属于高性能钼合金，是难熔金属产业的重要组成部分。全球 TZM 产业规模虽然远小于普通钢铁、有色金属及钛合金，但由于广泛应用于半导体、航空航天、医疗 CT、真空热处理、核工业及先进制造等高端领域，具有技术门槛高、产品附加值高、客户认证周期长等特点。目前全球 TZM 产业已形成以中国、德国、美国、日本为代表的产业格局。

（一）全球产业规模较小但附加值高

与普通金属相比，TZM 市场属于典型的小批量、高价值市场。其特点包括产品规格多样，定制化比例高；高端应用占比较高；单位产品价值远高于普通钼材料；下游行业集中于先进制造和战略产业。

（二）中国成为全球最大的 TZM 生产基地

中国拥有全球最完整的钼产业链。优势包括丰富的钼资源、完整的粉末冶金产业体系、较强的机械加工能力、完善的热加工和热处理能力、成本优势明显。 目前，中国已成为全球最大的 TZM 原材料和制品供应国，在棒材、板材、靶材、坩埚及各种异形件方面具有较强竞争力。

（三）德国保持高端制造优势

德国长期处于难熔金属技术领先地位。其优势主要体现在高纯粉末制备、高端粉末冶金工艺、精密热加工、医疗 CT 旋转阳极材料、导体高端热场材料。 德国产品以高可靠性和高一致性著称。

（四）美国聚焦航空航天和国防

美国 TZM 产业主要服务航空航天、国防装备、核工业、聚变研、科研装备。 其特点是产品标准严格，应用集中于高端装备和战略领域。

（五）日本专注半导体产业

日本 TZM 主要应用于半导体设备、真空设备、精密热处理设备、医疗影像设备。 产品强调超高纯度、高尺寸精度及长期稳定性。

（六）欧洲其他国家

法国、英国、奥地利等国家也具有一定 TZM 研发和制造能力。主要面向航空航天、科研装备及核工业。

全球 TZM 主要应用市场

应用领域	市场特点
半导体设备	最大增长市场
医疗 CT 球管	技术成熟、附加值高
真空热处理	用量稳定
航空航天	高性能需求
核工业与聚变	战略应用
晶体生长设备	快速增长
科研装备	高端定制市场

全球 TZM 产业链结构

环节	主要内容
上游	钼精矿、氧化钼、钼粉、Ti、Zr、C 原料
材料制备	混粉、压制、烧结、HIP
热加工	锻造、轧制、旋锻、拉拔
精密加工	CNC、磨削、EDM、焊接
下游应用	半导体、航空航天、医疗、真空设备等

全球未来 TZM 产业发展趋势

半导体成为最大增长动力。随着 SiC、GaN、先进封装及晶圆制造发展，高端 TZM 需求持续

增长。

医疗影像持续扩大。CT、工业 CT 及高端 X 射线设备市场增长，将持续带动旋转阳极 TZM 需求。

聚变能源带来新增需求。ITER 及未来商业聚变装置的发展，将推动高性能 TZM 及相关钼合金应用。

高端制造需求增加。包括增材制造； 真空热处理； 高温烧结； 精密热加工； 均推动 TZM 市场增长。

国产化持续推进。近年来，中国高端 TZM 产品在半导体设备； 医疗设备； 真空炉装备； 晶体生长设备； 等领域的国产替代速度明显加快。

全球 TZM 产业竞争特点

特点	表现
技术门槛高	粉末冶金和组织控制要求高
市场规模较小	属于高端细分市场
产品附加值高	定制化比例高
客户认证周期长	半导体、医疗行业要求严格
应用集中	战略产业占比较高
国产替代加快	中国竞争力不断增强

中钨智造认为，全球 TZM 产业正由传统高温工业材料向高端装备关键材料转型。未来市场增长将主要来自半导体、第三代半导体、医疗影像、聚变能源及先进制造等战略性产业。凭借完整的钼产业链、成熟的粉末冶金技术和不断提升的精密制造能力，中国正在从全球最大的 TZM 生产基地逐步向高端 TZM 技术创新和应用中心发展

Q136 全球钛锆钼合金（TZM）主要生产国家有哪些？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，钛锆钼合金）的生产高度依赖钼资源、粉末冶金技术、真空烧结设备及精密加工能力，因此全球能够实现规模化、高质量生产 TZM 的国家并不多。目前主要集中在中国、德国、美国、日本，此外奥地利、法国、英国、韩国等国家也具备一定生产能力。

（一）中国

中国是目前全球最大的 TZM 生产国，也是最完整的钼产业链所在地。主要优势包括全球领先的钼资源储量和产量、完整的粉末冶金产业体系、完善的锻造、轧制、拉拔及机加工能力、产品覆盖棒材、板材、薄板、管材、靶材、坩埚及各种异形件， 在半导体、真空炉、医疗及航空航天领域应用不断扩大。 近年来，中国高端 TZM 产品在尺寸精度、组织均匀性和批次稳定性方面持续提升，国产替代进程明显加快。

（二）德国

德国是全球 TZM 高端制造技术的重要代表。主要特点粉末冶金技术成熟、产品一致性高、医疗 CT 旋转阳极材料技术领先、半导体及高温热场材料应用经验丰富。 德国企业长期服务于医疗设备、科研装备及高端真空设备市场。

（三）美国

美国 TzM 产业主要服务于战略工业。重点领域包括航空航天、国防装备、核工业、聚变研究、科研设备。 其产品特点是质量标准高、认证体系完善，但生产规模相对有限。

（四）日本

日本主要面向高端电子产业。TzM 产品主要应用于半导体设备、真空设备、医疗影像设备、精密热处理装备。 日本企业强调超高纯度、超高加工精度及长期稳定性。

（五）奥地利

奥地利在粉末冶金和难熔金属加工方面具有较强实力。产品主要应用于真空热处理、半导体装备、高温工业设备。

（六）法国、英国

两国主要面向核工业； 航空航天； 科研装备。 生产规模相对较小，以高端定制产品为主。

（七）韩国

韩国近年来随着半导体产业发展，也开始布局 TzM 材料及零部件制造，主要用于本土半导体设备配套。

全球 TzM 主要生产国家对比

国家	产业特点	主要应用方向
中国	全球最大生产基地，产业链完整	半导体、真空炉、医疗、航空航天
德国	高端制造能力强	CT 球管、半导体、科研设备
美国	战略工业导向	航空航天、国防、核工业
日本	精密制造优势	半导体、医疗设备
奥地利	粉末冶金成熟	真空设备、热处理
法国、英国	高端定制	核工业、科研
韩国	新兴布局	半导体装备

中钨智造认为，全球 TzM 生产已形成以中国为制造中心、德国和美国为高端技术代表、日本为精密电子应用代表的产业格局。随着中国在粉末冶金、精密加工及高端装备配套能力的提升，全球 TzM 产业正在向更加多元化和国际化发展。

Q137 全球主要 TzM 制造企业有哪些？

全球能够稳定生产高品质 TzM 的企业数量并不多，大多数企业同时也是钼及其他难熔金属材料制造商。根据产品定位，大致可分为国际知名企业和中国主要制造企业两大类。

（一）国际主要 TzM 制造企业

1. Plansee（奥地利）

Plansee 是全球最具影响力的难熔金属制造企业之一。主要产品包括 TzM 棒材、板材； 高温零部件； 半导体热场材料； 医疗 CT 旋转阳极材料； 航空航天高温部件。特点是产品一致性高，高端市场占有率较高。

2. H.C. Starck Solutions（德国）

H.C. Starck 长期专注于钼、钨、TZM、MHC 等难熔金属材料。 主要服务半导体、医疗、航空航天及科研设备。

3. ATI（美国）

ATI 主要提供航空航天及国防领域高性能材料。TZM 主要用于航空发动机、核工业及特殊科研装备。

4. Mi-Tech Tungsten Metals（美国）

主要产品 TZM 棒材、板材、加工件、真空炉零部件。以高端定制加工见长。

（二）中国主要 TZM 制造企业

近年来，中国已形成较完整的 TZM 产业体系，主要企业包括中钨高新材料股份有限公司洛阳钼业、金钼股份、中钨智造等专业难熔金属加工企业。 国内企业产品涵盖 TZM 棒材、板材、薄板、管材、靶材、坩埚、热场部件、异形精密加工件。 近年来已广泛应用于半导体设备、真空热处理、单晶炉、医疗设备及航空航天等领域。

全球主要 TZM 企业产品特点

企业	国家	主要优势
Plansee	奥地利	高端 TZM 及热场材料
H.C. Starck Solutions	德国	高纯 TZM、半导体材料
ATI	美国	航空航天、国防应用
Mi-Tech Tungsten Metals	美国	定制化 TZM 零部件
中国主要制造企业	中国	全产业链、规格齐全、成本竞争力强

（三）全球 TZM 材料竞争趋势

目前全球 TZM 企业的发展重点主要集中在更高纯度粉末制备；更均匀的 TiC、ZrC 弥散强化组织； 大尺寸板材及棒材制造； 半导体级超洁净 TZM； 医疗 CT 阳极专用 TZM； 聚变与先进科研装备用高性能 TZM。

中钨智造认为，全球 TZM 市场仍属于技术密集型、高门槛细分市场。国际企业在医疗、航空航天和高端科研领域积累深厚，而中国企业凭借完整产业链、规模制造能力和快速提升的质量控制水平，正在不断扩大在半导体、真空设备和高端装备领域的市场份额，并逐步向国际高端市场迈进。

Q138 全球 TZM 市场规模有多大？

TZM (Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, 钛钨钼合金)属于难熔金属中的高端细分材料，市场规模远小于普通钢铁、铝合金或钛合金，但产品附加值较高，主要服务于半导体、航空航天、医疗影像、真空热处理、核工业及科研装备等战略产业。由于 TZM 属于细分市场，不同市场研究机构对统计口径存在较大差异。有的仅统计 TZM 原材料，有的包含加工件和终端零部件，因此公开数据差别较大。近年的公开市场研究给出的 2025 年全球 TZM 市场规模约在 1.2 亿~14 亿美元之间，差异主要来自统计范围不同。从产业实际情况来看，如果仅统计 TZM 材料（棒材、板材、管材、靶材等），市场规模通常为数亿美元级。 如果将 TZM 深加工产品、高温零部件及系统配套一并统计，则市场规模可达到十亿美元以上。

（1）主要应用市场占比

目前 TZM 消费主要集中在以下行业：

应用领域	市场特点
半导体设备	增长最快，需求持续扩大
单晶硅、SiC、GaN 晶体生长	高温热场核心材料
医疗 CT 旋转阳极	高附加值市场
真空热处理	需求稳定
航空航天	高端应用
核工业与聚变	战略需求
科研装备	定制化比例高

其中，半导体设备和第三代半导体产业已成为全球 TzM 需求增长最快的驱动力。

(2) 区域市场分布

目前全球 TzM 消费主要集中于亚洲（尤其中国、日本、韩国）；欧洲（德国、奥地利等）；北美（美国）。亚洲已经成为全球最大的 TzM 生产和消费地区，其中中国占据最大的制造能力。

(3) 未来发展趋势

未来几年，TzM 市场仍将保持增长，主要驱动力包括半导体设备国产化与扩产；SiC、GaN 功率器件产业发展；医疗 CT 和工业 CT 需求增长；聚变能源及大型科研装置建设；真空热处理及先进制造升级。

Q139 TzM 价格由哪些因素决定？

TzM 属于典型的高附加值难熔金属材料，其价格不仅取决于钼原料成本，更受到制造工艺、加工难度、规格尺寸及质量等级等多方面因素影响。通常，TzM 精密加工件的价格可达到普通工业钼材料的数倍甚至十几倍。

(一) 钼原材料价格

TzM 约 99% 以上的质量来自钼，因此钼粉价格是决定 TzM 成本的基础因素。当国际钼价上涨时，钼粉成本增加；TzM 整体价格通常同步上涨。

(二) 粉末纯度

高端 TzM 通常采用高纯钼粉。例如半导体级、医疗级、科研级。纯度越高，粉末成本越高，最终产品价格也越高。

(三) Ti、Zr、C 添加质量

虽然 Ti、Zr 含量很低，但必须精确控制。如果 TiC、ZrC 析出均匀则材料性能明显提高。高品质配料及组织控制直接影响产品价值。

(四) 粉末冶金工艺

TzM 必须经过混粉、压制、真空烧结、热等静压（HIP）（部分产品）、锻造、轧制。工艺越复杂制造成本越高。

(五) 热加工难度

TzM 加工温度高。需要高温锻造、高温轧制及多次退火。加工次数越多价格越高。

（六）规格尺寸

大型产品制造难度明显增加。例如大尺寸板材、大直径棒材、超大型坩埚、大型热场结构件。由于成材率下降，价格通常明显提高。

（七）精密加工要求

TZM 硬度较高，加工难度大。如果需要 CNC 精密加工、磨削、EDM、高精度检测等，制造成本会显著增加。

（八）产品质量等级

不同应用要求差异很大。例如普通工业 TZM；真空炉级；半导体级；医疗 CT 级；航空航天级。质量等级越高：检测项目越多，价格越高。

（九）订货数量

TZM 属于典型定制产品。大批量价格较低；小批量或单件定制价格较高。

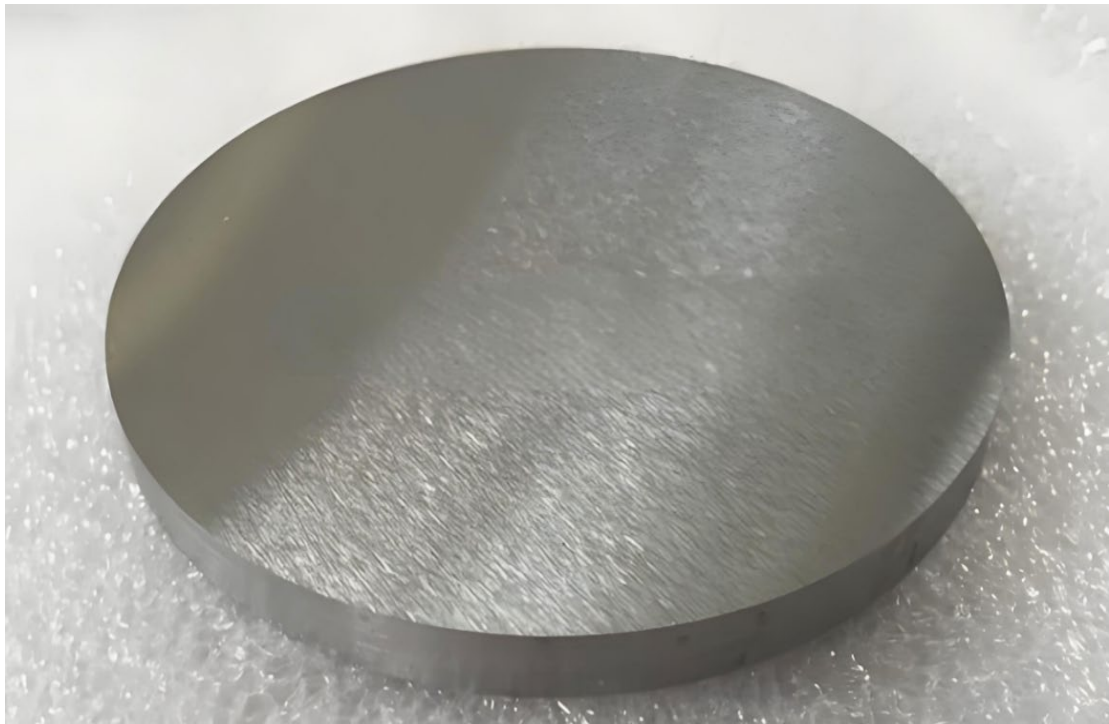
（十）国际市场供需

TZM 市场规模较小。当半导体扩产、航空航天需求增加、钼原料价格上涨，都会推动 TZM 价格上升。

（十一）为什么 TZM 比纯钼贵？

主要原因包括添加 Ti、Zr、C 后需要更严格的成分控制、粉末冶金工艺更复杂、高温锻造、轧制及热处理工序更多、精密加工难度更高、高端应用需要更严格的组织和性能检测、产品批量较小，研发和制造成本分摊较高。

中钨智造认为，TZM 的价格本质上反映的是高温性能和制造技术，而不仅仅是原材料成本。对于半导体、医疗 CT、航空航天等高端应用而言，材料稳定性、组织一致性和长期可靠性远比材料单价更重要，因此高品质 TZM 具有较高的市场价值。





第十三篇 钛锆钼合金（TZM）的检测与质量控制

Q146 如何检测钛锆钼合金（TZM）的化学成分？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的化学成分直接决定其高温强度、再结晶温度、抗蠕变性能及组织稳定性，因此生产过程中必须进行严格的成分分析。检测对象不仅包括 Mo、Ti、Zr、C 等主要合金元素，还包括 Fe、Ni、Cr、Cu、Si 等杂质元素。通常依据 ASTM B386、ASTM B387、ASTM E1019、ISO 9001 企业质量体系及相关企业标准进行检测。

（一）X 射线荧光光谱（XRF）

XRF 是最常用的快速成分检测方法。适用于钼（Mo）、钛（Ti）、锆（Zr）、Fe、Ni、Cr 等杂质元素。优点是无损检测、分析速度快、适合来料及生产过程控制，但是也有局限，如对轻元素（如 C、O、N）的检测能力有限。

（二）电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）

ICP-OES 适用于痕量元素分析。可检测 Ti、Zr、Fe、Ni、Cr、Cu、Al、Ca、Mg 等，其特点是灵敏度高、多元素同时分析、定量准确、通常需要先将样品溶解。

（三）ICP-MS

对于超高纯 TZM，可采用 ICP-MS 检测痕量杂质。检测能力可达到 ppm 甚至 ppb 级。主要用于半导体级 TZM、医疗级 TZM、科研级 TZM。

（四）碳硫分析仪

TZM 中的碳含量一般约为 0.01%~0.05%，是形成 TiC、ZrC 强化相的重要元素。通常采用高频燃烧红外法进行检测。特点是精度高、重复性好、可快速完成分析。

（五）湿法化学分析

部分标准仍采用经典湿化学方法进行仲裁检测。适用于 Ti、Zr 等元素的精确定量分析。虽然效率较低，但结果可靠。

（六）电子探针（EPMA）

EPMA 主要用于微区成分分析。能够检测 TiC 分布、ZrC 分布、元素偏析、第二相组成常用于失效分析和研发。

（七）扫描电镜 EDS

SEM-EDS 主要用于定性或半定量分析。可观察第二相颗粒、Ti、Zr 分布、杂质富集。适用于组织分析。

中钨智造认为，高端 TZM 的化学成分检测通常采用多种分析方法组合。生产过程多使用 XRF 进行快速检测，最终质量控制则结合 ICP-OES、碳硫分析及必要的 ICP-MS 进行精确分析，以确保合金成分符合标准要求，并满足半导体、医疗和航空航天等高端应用对纯度和一致性的要求。

Q147 如何检测钛锆钼合金（TZM）的氧氮杂质？

氧（O）和氮（N）是 TZM 中最重要的间隙杂质元素之一，它们会明显影响材料的塑性、韧性、焊接性能及高温性能。一般而言，氧含量越高，材料越容易脆化；氮含量过高，也会降低塑性并增加加工开裂风险。因此，高端 TZM 生产中通常将氧、氮作为重点控制指标。

（一）惰性气体熔融法（IGF）

这是国际上检测氧、氮含量最常用的方法，也是 ASTM 和 ISO 标准推荐方法。检测原理是将样品置于石墨坩锅中，在惰性气体（通常为氦）保护下高温熔融。氧与石墨反应生成 CO 或 CO₂；氮以 N₂形式释放。随后利用检测器测定气体含量，并计算氧、氮浓度。该方法的优点是精度高、重复性好、可同时测定氧和氮。

（二）LECO 氧氮分析仪

工业中最常见的设备之一。特点是自动化程度高、检测速度快、适合批量质量控制。广泛用于 TZM 生产企业和第三方检测机构。

（三）真空熔融分析

对于科研和仲裁检测，可采用真空熔融法。特点是灵敏度高、适用于超低氧、超低氮材料分析。

（四）辉光放电质谱（GDMS）

用于超高纯 TZM。可检测 O、N、H 以及其他痕量杂质。主要应用于半导体及科研级材料分

析。

（五）组织间接评价

虽然不能直接测量氧、氮含量，但可通过金相组织、SEM 断口分析、第二相分布、晶界形貌等判断是否存在因氧、氮过高导致的脆化现象。

氧、氮杂质对 TZM 质量的影响

杂质	主要影响
氧（O）	提高硬度、降低塑性和韧性、增加脆性
氮（N）	降低延展性、增加加工开裂风险
氧、氮同时升高	焊接性能下降、高温性能恶化

（六）高端 TZM 对氧氮控制要求

不同企业和用途要求不同，但总体原则是：（1）普通工业级控制在标准允许范围内；（2）半导体级、医疗级及航空航天级通常要求更低的氧、氮含量，以保证高温性能和长期可靠性。具体限值应以产品标准或采购技术协议为准。

TZM 氮氧含量常用检测方法比较

检测方法	氧	氮	特点
惰性气体熔融法	√	√	国际标准方法，精度高
LECO 氧氮分析仪	√	√	生产现场应用最广
真空熔融法	√	√	仲裁和科研分析
GDMS	√	√	超高纯材料分析

中钨智造认为，氧、氮含量是评价 TZM 质量的重要指标之一。现代 TZM 生产普遍采用惰性气体熔融法配合 LECO 氧氮分析仪进行检测，既能够满足生产效率要求，又能保证分析精度。对于半导体、医疗和航空航天等高端应用，还会采用 GDMS 等高灵敏度分析技术，对氧、氮及其他痕量杂质进行全面检测，以确保材料具有优异的高温性能和长期服役可靠性。

Q148 如何检测钛锆钼合金（TZM）的显微组织？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的显微组织直接决定其高温强度、抗蠕变性能、塑性、再结晶行为及使用寿命。因此，显微组织检测是 TZM 质量控制和研发中的核心检测项目之一。检测内容主要包括晶粒形貌、再结晶程度、TiC、ZrC 第二相颗粒分布、孔隙及夹杂、裂纹和组织缺陷、晶界状态。通常依据 ASTM E3、ASTM E407、ASTM E112、ISO 643 及企业标准进行检测。

（一）金相显微镜（OM）

金相显微镜是最基础、应用最广泛的检测方法。检测流程包括取样、镶嵌、磨样、抛光、化学或电解腐蚀、光学观察。主要观察晶粒形貌、再结晶组织、孔隙、裂纹、加工流线。优点是操作简单、成本较低、适合批量检验。

（二）扫描电子显微镜（SEM）

SEM 能够获得远高于光学显微镜的分辨率。主要观察第二相颗粒、TiC、ZrC 尺寸、孔隙、

微裂纹、晶界细节。 放大倍数通常可达到数万倍。

（三）EDS 能谱分析

EDS 通常与 SEM 配合使用。主要作用是分析第二相颗粒元素组成。例如确认 TiC、ZrC、氧化物、杂质颗粒。

（四）EBSD 电子背散射衍射

EBSD 是研究 TZM 组织最重要的方法之一。可获得晶粒尺寸、晶粒取向、再结晶比例、晶界类型、晶粒取向分布（织构）。对于评价热加工质量非常重要。

（五）电子探针（EPMA）

EPMA 主要用于元素分布、第二相组成、微区偏析。 能够绘制 Ti、Zr 等元素二维分布图。

（六）透射电子显微镜（TEM）

TEM 主要用于科研。可观察纳米级 TiC 颗粒、位错、析出强化相、晶界结构。是研究强化机制的重要工具。

（七）X 射线衍射（XRD）

XRD 主要分析晶体结构、第二相组成、残余应力、再结晶变化。不能直接观察组织形貌，但可辅助分析。

TZM 显微组织检测内容	
检测项目	常用方法
晶粒形貌	OM、SEM
TiC、ZrC 颗粒	SEM、TEM
元素分布	EDS、EPMA
再结晶程度	EBSD、OM
孔隙	OM、SEM
裂纹	OM、SEM
位错	TEM

中钨智造认为，TZM 显微组织检测通常采用金相显微镜进行常规质量控制，以 SEM 和 EDS 分析第二相及微观缺陷，高端产品则结合 EBSD、TEM 和 EPMA 开展组织研究。其中，EBSD 已成为评价 TZM 热加工质量和再结晶状态的重要技术手段。

Q149 如何检测钛锆钼合金（TZM）的晶粒尺寸？

晶粒尺寸是评价 TZM 性能的重要指标之一。晶粒越细,高温强度通常越高、室温塑性较好、加工性能较佳。 晶粒过粗则容易导致蠕变性能下降、热疲劳寿命降低、高温组织稳定性变差。 因此，TZM 生产过程中通常都会进行晶粒尺寸检测。

（一）金相法（ASTM E112）

这是工业中应用最广的方法。其流程是制备金相试样、腐蚀晶界、光学显微镜观察、 根据 ASTM E112 测量晶粒尺寸。 常见测量方法包括比较法、截线法、面积法。 适用于常规生产

质量控制。

（二）线截法（Heyn 法）

在显微照片上绘制测量线。统计测量线与晶界交点数量。根据公式计算平均晶粒尺寸。特点是操作简单、重复性好、国际标准广泛采用。

（三）面积法（Jeffries 法）

统计一定面积内完整晶粒数量。计算平均晶粒直径。适用于晶粒尺寸较均匀的 TZM。

（四）EBSD 自动测量

EBSD 是目前最先进的方法之一。能够自动获得平均晶粒尺寸、晶粒尺寸分布、晶界类型、再结晶比例、晶粒取向。对于科研及高端产品评价最为准确。

（五）SEM 辅助测量

对于晶粒较细或腐蚀困难的样品，可利用 SEM 观察晶界，再通过图像分析软件测量晶粒尺寸。

（六）图像分析软件

现代金相软件可自动识别晶界。可实现晶粒尺寸统计、晶粒分布、平均值、最大最小值、晶粒均匀性分析。提高检测效率。

TZM 晶粒检测标准

通常采用 ASTM E112、ISO 643，企业内部也会根据产品用途制定更严格的晶粒控制要求。

TZM 晶粒尺寸检测方法比较

方法	特点	应用
金相比较法	快速	常规检验
线截法	精度较高	工业生产
面积法	统计准确	常规分析
EBSD	自动化、高精度	科研、高端产品
SEM 测量	分辨率高	超细晶分析

晶粒尺寸对 TZM 性能的影响

晶粒状态	性能特点
细晶	强度高、塑性好、加工性能好
中等晶粒	综合性能最佳
粗晶	高温蠕变性能和热疲劳性能下降，组织稳定性变差

TZM 并非晶粒越细越好。对于长期高温服役的部件，通常需要在细晶强化与高温稳定性之间取得平衡，因此工业上更关注晶粒尺寸的均匀性和受控分布，而不是单纯追求最小晶粒。中钨智造认为，晶粒尺寸检测是 TZM 质量控制的重要环节。工业生产中以 ASTM E112 金相测量为主，高端产品则结合 EBSD 进行自动统计和组织分析。通过严格控制锻造、轧制和热处理工艺，使晶粒保持均匀、稳定，是保证 TZM 高温性能和使用寿命的关键。



Q150 如何检测钛锆钼合金（TZM）的 TiC 颗粒？

TiC 颗粒是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最重要的强化相之一，与少量 ZrC 共同形成弥散强化体系。TiC 颗粒的尺寸、数量、分布均匀性及界面状态直接影响 TZM 的再结晶温度、高温强度、抗蠕变性能和使用寿命，因此是高端 TZM 质量评价的重要内容。检测 TiC 颗粒通常不仅要确认其是否存在，还需要测量颗粒尺寸、数量、分布及化学组成。

（一）扫描电子显微镜（SEM）

SEM 是工业中检测 TiC 颗粒最常用的方法。可观察 TiC 颗粒尺寸、颗粒数量、分布均匀性、晶界析出情况、团聚现象。一般采用二次电子（SE）或背散射电子（BSE）成像。其中 BSE 模式由于原子序数反差，更容易区分 TiC 颗粒与钼基体。优点是分辨率高、操作方便、适用于生产质量控制。

（二）EDS 能谱分析

SEM 通常配合 EDS 进行分析。EDS 能够检测 Ti 元素、C 元素（半定量）、Zr 元素、Mo 元素。用于确认颗粒是否为 TiC、ZrC 或其他夹杂物。

（三）电子探针（EPMA）

EPMA 具有更高的元素分析精度。主要用于 Ti 元素二维分布、TiC 颗粒成分分析、Ti、Zr 偏析研究、微区定量分析。适用于研发及失效分析。

（四）透射电子显微镜（TEM）

TEM 是研究 TiC 颗粒最重要的方法。可观察纳米级 TiC 颗粒、TiC 与基体界面、位错与 TiC 相互作用、TiC 析出机制；还能利用电子衍射确认 TiC 晶体结构。主要用于科研和新材料开发。

（五）EBSD 辅助分析

EBSD 不能直接识别 TiC 颗粒，但可分析其对组织的影响。例如晶粒尺寸、再结晶程度、晶界迁移受阻情况。可间接评价 TiC 强化效果。

（六）X 射线衍射（XRD）

XRD 可检测 TiC 晶体相。主要用于确认是否形成 TiC、判断是否存在其他碳化物、分析相组成。由于 TiC 含量较低，对检测设备灵敏度要求较高。

（七）图像分析软件

现代金相和 SEM 图像可利用专业软件进行统计分析。可获得平均颗粒尺寸、最大颗粒尺寸、面积分数、数量密度、颗粒间距、分布均匀性。这些参数是评价 TZM 组织质量的重要指标。

（八）高端 TZM 重点关注指标

通常重点评价 TiC 平均粒径、TiC 尺寸分布、TiC 数量密度、TiC 晶界分布、是否存在粗大团聚颗粒、TiC 与 ZrC 弥散强化是否均匀。粗大的 TiC 团聚会降低强化效果，并可能成为裂纹萌生源，因此生产过程中通常要求颗粒细小且分布均匀。中钨智造认为，TiC 颗粒检测是评价 TZM 组织质量的核心项目。工业生产通常采用 SEM+EDS 进行质量控制，高端产品和研发则结合 TEM、EPMA 及图像分析软件，对 TiC 颗粒尺寸、数量和分布进行系统评价，以确保材料具有优异的高温性能和长期服役可靠性。

Q151 如何检测钛锆钼合金（TZM）的密度？

密度是 TZM 的重要质量指标之一，可直接反映材料的致密化程度、烧结质量及内部孔隙情况。高密度通常意味着烧结充分、孔隙率低、力学性能稳定、高温性能优良。TZM 理论密度约为 $10.1\sim 10.2\text{ g/cm}^3$ ，不同成分和杂质含量会有轻微变化。工程产品通常要求相对密度达到理论密度的 99% 以上。

（一）阿基米德排水法（Archimedes Method）

这是工业中最常用、最标准的密度检测方法。原理依据阿基米德浮力定律：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

检测步骤：测量试样空气中的质量、测量试样浸入液体后的质量、根据液体密度计算材料体积、计算材料密度。优点是精度高、操作简单、国际标准广泛采用。常依据 ASTM B311、ISO 2738 等标准执行。

（二）几何尺寸法

适用于规则形状试样。主要步骤是精确测量长度、宽度、高度或直径；计算体积；称重；计算密度。适用于棒材、板材及标准试样。缺点则是对于复杂零件误差较大。

（三）氦气比重仪（Helium Pycnometer）

主要测量真实密度。其原理是利用氦气能够进入微细孔隙的特点，精确测量试样真实体积。具有精度极高、可用于科研分析、能区分开口孔隙和闭口孔隙的特点。

（四）CT 工业断层扫描

工业 CT 虽然不能直接计算材料密度，但可检测内部孔隙、缩孔、裂纹、致密化程度。常作为密度检测的重要辅助方法。

（五）金相孔隙分析

通过金相组织统计孔隙率。利用图像分析软件计算孔隙面积分数、孔径分布、孔隙数量。可间接评价材料致密程度。

密度与 TZM 性能关系

密度状态	性能影响
接近理论密度	强度高、蠕变性能好、寿命长
密度偏低	孔隙增加、塑性下降、疲劳性能降低
局部致密度不足	易形成裂纹源，降低可靠性

因此，高端 TZM 通常要求密度接近理论密度，并结合超声检测、工业 CT 或金相分析等方法综合评价内部质量。中钨智造认为，密度是评价 TZM 烧结和热加工质量最直接的指标之一。工业生产普遍采用阿基米德排水法进行检测，高端产品则结合氦气比重仪、工业 CT 及金相孔隙分析，对材料致密化程度进行综合评价，以确保 TZM 具备优异的力学性能、高温性能和长期服役可靠性。

Q152 如何检测钛锆钼合金（TZM）的硬度？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）的硬度能够反映材料的组织状态、加工硬化程度、热处理效果及再结晶程度，是生产质量控制的重要指标之一。TZM 常用的硬度检测方法包括维氏硬度、洛氏硬度和显微硬度，其中以维氏硬度应用最广。

（一）维氏硬度（HV）

维氏硬度是 TZM 最常用的检测方法。检测原理是采用 136°金刚石四棱锥压头，在规定载荷下压入试样表面，测量压痕对角线长度后计算硬度值。优点是精度高、适用于不同尺寸试样、国际应用最广。通常依据 ASTM E92 或 ISO 6507 进行检测。

（二）显微维氏硬度（Micro Vickers）

显微硬度主要用于 TiC 颗粒附近硬度、热影响区、晶粒内部、局部组织分析。适用于科研及失效分析。

（三）洛氏硬度（HR）

TZM 也可采用洛氏硬度。常见为 HRA、HRB（较少）。特点是检测速度快、适合批量检测。但由于 TZM 较硬且弹性模量较高，工业中仍以维氏硬度为主。

（四）纳米压痕（Nanoindentation）

主要用于科研。能够测量纳米尺度硬度、弹性模量、TiC 颗粒局部力学性能。适用于组织强化机制研究。

（五）自动硬度测试系统

现代生产通常采用自动硬度仪。可自动完成加载、测量、图像识别、数据统计。提高检测效率。

（六）TZM 硬度检测流程

TZM 硬度检测流程一般包括：制备平整试样、精细磨抛、清洁表面、加载压头、测量压痕、自动计算硬度。表面不得存在氧化层、划痕、毛刺、严重加工变形。否则会影响测试结果。

热处理对硬度的影响

组织状态	硬度变化
冷加工态	硬度较高
应力消除退火	略有下降
再结晶后	明显降低
TiC 分布均匀	硬度保持稳定
	不同组织状态对应不同硬度，硬度常用于判断材料是否发生再结晶。

常用检测标准

常见标准包括 ASTM E92（维氏硬度）、ASTM E384（显微硬度）、ISO 6507（维氏硬度）、ISO 6508（洛氏硬度）。

中钨智造认为，维氏硬度是 TZM 最常用、最可靠的硬度评价方法。对于高端 TZM 产品，通常结合显微硬度和金相组织分析，对热处理状态和组织均匀性进行综合评价，以保证材料具有稳定的力学性能和高温服役性能。

Q153 如何检测钛锆钼合金（TZM）的高温拉伸性能？

TZM 的主要优势体现在高温环境，因此高温拉伸试验比室温拉伸更能反映其实际使用性能。高温拉伸主要评价：高温抗拉强度（UTS）、高温屈服强度（YS）、延伸率、断面收缩率、高温变形行为。常依据 ASTM E21、ISO 783 及相关企业标准进行检测。

（一）高温万能试验机

高温拉伸试验通常采用配备高温炉的电子万能试验机。主要组成包括加载系统、高温炉、高温引伸计、温度控制系统、数据采集系统。

（二）试样制备

试样一般加工为标准拉伸试样。要求表面光洁、尺寸符合标准、不得存在裂纹和加工缺陷。试样方向通常与产品加工方向一致，以反映实际性能。

（三）加热过程

试样安装后缓慢升温。达到目标温度后，一般保温 15~30 分钟，使整个标距段温度均匀稳定。常见测试温度包括 800℃、1000℃、1200℃、1400℃、1600℃。根据实际应用选择。

（四）温度测量

通常采用热电偶直接测量试样附近温度。要求整个标距段温差控制在标准允许范围内，以保证测试准确性。

（五）拉伸测试

达到稳定温度后，以规定应变速率进行拉伸。记录力、位移、应变、温度。最终获得完整应力—应变曲线。

（六）断后分析

试验结束后通常进行断口观察、SEM 分析、金相分析、再结晶分析。评价韧性断裂、脆性断

裂、晶界断裂、TiC 强化效果。

高温拉伸主要测试指标

测试项目	内容
高温抗拉强度	最大拉伸应力
高温屈服强度	0.2%屈服强度
延伸率	塑性指标
断面收缩率	韧性评价
应力—应变曲线	整体变形行为

高温拉伸注意事项

为了获得可靠数据，应注意炉温均匀、试样充分保温、温度控制稳定、高温引伸计准确、避免试样氧化（通常采用真空或惰性气氛）。

高温拉伸结果的影响因素

主要包括晶粒尺寸、TiC、ZrC 强化程度、再结晶状态、氧、氮杂质含量、热处理制度、加工方向（纵向、横向）。 因此，高温拉伸结果通常需要结合显微组织和化学成分进行综合分析。

常用检测标准

高温拉伸试验常采用 ASTM E21《金属材料高温拉伸试验方法》、ISO 783《金属材料高温拉伸试验》

中钨智造认为，高温拉伸试验是评价 TZM 性能最重要的力学试验之一。相比室温测试，高温拉伸能够真实反映 TZM 在真空炉、半导体热场、航空航天及聚变装置等工况下的承载能力。结合高温拉伸、显微组织分析和断口分析，可以全面评价 TZM 的组织质量及高温服役可靠性。

Q154 如何检测钛锆钼合金（TZM）的蠕变性能？

蠕变性能是 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）最重要的高温性能指标之一。对于长期在 1000~1600 °C高温下工作的真空炉热场、半导体晶体生长设备、航空航天热端部件及聚变装置，蠕变性能往往比室温强度更重要。蠕变试验用于评价材料在恒定温度和恒定载荷下，随时间发生缓慢塑性变形的能力。通常依据 ASTM E139、ISO 204 等标准进行测试。

（一）高温蠕变试验机

TZM 蠕变测试采用专用高温蠕变试验机。主要组成包括恒载荷系统、高温电阻炉或感应炉、高温引伸计、温度控制系统、长时间数据采集系统。 设备能够连续运行数百小时甚至数千小时。

（二）试样制备

通常采用标准圆棒拉伸试样。要求表面光洁、尺寸符合标准、无裂纹和加工缺陷、加工方向明确（纵向或横向）。

（三）试验条件设定

根据实际工况设定温度（如 1000 °C、1200 °C、1400 °C、1600 °C）； 恒定拉应力； 试验时间。 部分长期评价试验持续数千小时。

（四）加热与恒温

试样升温后需保温一定时间，使标距段温度均匀稳定。通常采用热电偶实时监测温度，确保试验过程中温度波动满足标准要求。

（五）记录蠕变曲线

试验过程中连续记录时间、应变、应变速率。 最终得到完整的蠕变曲线。典型蠕变曲线分为三个阶段：初始蠕变（初生蠕变）——应变速率逐渐降低； 稳态蠕变（二次蠕变）——应变速率基本恒定，是评价 TZM 长期服役性能的关键阶段； 加速蠕变（三次蠕变）——应变速率迅速增加，最终断裂。

（六）主要评价指标

高温蠕变通常关注

指标	含义
蠕变应变	指定时间内累计变形量
稳态蠕变速率	长期高温性能核心指标
蠕变断裂寿命	断裂所需时间
蠕变强度	指定寿命对应的允许应力
最小蠕变速率	材料长期稳定性的评价指标

（七）断口分析

试验结束后通常结合 SEM 断口分析、金相组织观察、EBSD 分析、TiC、ZrC 颗粒分布分析。研究晶界滑移、孔洞形成、再结晶、第二相强化效果。

影响 TZM 蠕变性能的主要因素

主要包括晶粒尺寸、 TiC、ZrC 弥散强化程度、再结晶程度、氧、氮等间隙杂质含量、使用温度、工作应力、热处理工艺。其中，均匀弥散的 TiC、ZrC 颗粒能够有效阻碍位错和晶界迁移，提高蠕变抗力。

中钨智造认为，蠕变试验是评价 TZM 长期高温服役能力最重要的方法。对于半导体热场、真空炉及航空航天等应用，通常不仅考察短时高温强度，更关注稳态蠕变速率和蠕变断裂寿命，以保证材料在长期高温条件下保持尺寸稳定和可靠承载能力。

Q155 如何评价钛锆钼合金（TZM）的质量等级？

TZM 的质量等级并没有全球统一的分级标准，但工业上通常根据化学成分、组织质量、力学性能、加工精度及应用领域进行综合评价。不同应用对 TZM 质量要求差异较大，例如半导体级材料的要求明显高于普通工业级。

（一）化学成分

首先检查主要合金元素是否符合标准。重点包括 Ti 含量、Zr 含量、C 含量、 Mo 纯度。同时控制 Fe、Ni、Cr、Cu、Si 等杂质元素。高端产品通常要求更低的杂质含量。

（二）氧、氮等间隙元素

氧、氮含量直接影响塑性、韧性、焊接性能、高温寿命。半导体、医疗及航空航天产品通常要求更严格的控制。

（三）显微组织

重点检查晶粒均匀性、TiC、ZrC 分布、再结晶程度、是否存在偏析、是否存在粗大碳化物。组织越均匀，质量等级越高。

（四）致密度

通常要求接近理论密度、孔隙率低、无明显缩孔和夹杂。高端产品一般要求相对密度达到理论密度 99%以上。

（五）力学性能

主要评价抗拉强度、屈服强度、延伸率、硬度、高温强度、蠕变性能。性能稳定、批次一致性好，质量等级更高。

（六）尺寸精度

评价内容包括尺寸公差、直线度、平面度、厚度均匀性、表面粗糙度。精密加工件要求远高于普通型材。

（七）内部质量

通常结合超声检测、工业 CT、金相分析。确认无裂纹、无夹杂、无内部疏松、无分层。

（八）TZM 应用等级

质量等级	典型用途
普通工业级	真空炉普通结构件、一般高温部件
高纯工业级	真空热处理、玻璃工业、热加工模具
半导体级	单晶硅、SiC、GaN 热场部件、溅射靶材
医疗级	CT 旋转阳极、高端医疗设备
航空航天级	火箭喷管、再入飞行器、高温结构件
科研级	聚变装置、高能束流设备、实验装置

（九）TZM 综合评价指标

检测项目	评价内容
化学成分	主元素及杂质是否符合标准
氧、氮含量	间隙元素控制水平
晶粒组织	是否均匀、是否发生异常再结晶
TiC、ZrC 分布	弥散强化是否充分
致密度	孔隙率及烧结质量
力学性能	室温及高温性能
加工精度	尺寸和表面质量
无损检测	裂纹、夹杂、内部缺陷

检测项目	评价内容
批次一致性	不同批次性能稳定性

中钨智造认为，T_ZM 的质量等级应采用综合评价方法，而不是单一指标。对于普通工业应用，满足标准化学成分和力学性能即可；而半导体、医疗和航空航天等高端领域，还需要对纯度、组织均匀性、TiC 和 ZrC 弥散强化效果、内部缺陷、高温蠕变性能以及批次一致性进行全面控制。真正的高品质 T_ZM 不仅具有优异的性能，更能够保证长期、高温、严苛工况下的稳定可靠服役。





第十四篇 中钨智造专家关于钛锆钼合金（TZM）的问答

Q156 为什么钛锆钼合金（TZM）能够长期保持市场主导地位？

TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）自 20 世纪 60 年代实现工业化以来，已广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、医疗影像、核工业和科研装备等领域。虽然期间出现了 MHC、ODS 钼、钼铌合金等多种新型难熔材料，但 TZM 至今仍是全球应用最广泛、产业化程度最高的高温钼合金。其长期保持市场主导地位，主要源于以下几个方面。

（一）钛锆钼合金（TZM）综合性能均衡

TZM 并非某一项性能达到极致，而是在多个关键性能之间取得了良好的平衡。主要优势包括高温强度高、再结晶温度高、抗蠕变性能优异、导热性能良好、热膨胀系数低、尺寸稳定性高、真空性能优异。这种综合性能使 TZM 能够适应大多数高温工程应用。

（二）成熟的粉末冶金工艺

经过数十年的发展，TZM 已形成成熟稳定的制造体系，包括高纯粉末制备、精确配料、等静压成形、真空烧结、热加工、热处理、精密加工。成熟工艺保证了产品质量的一致性和稳定性。

（三）产业链完善

全球已经建立完整的 TZM 产业链，包括钼粉生产、合金制造、型材加工、精密机加工、检测认证、应用开发。完善的供应体系降低了制造成本，提高了供货可靠性。

（四）应用经验丰富

TZM 经过几十年的工程验证。在以下行业积累了大量实际应用数据半导体晶体生长、真空热处理、X 射线 CT、火箭发动机、聚变研究、高温科研设备。大量工程经验降低了新项目采用 TZM 的技术风险。

（五）成本与性能匹配

相比更新型材料，ODS 钼制造成本更高、钼铌合金价格昂贵、钨合金加工难度更大。 TZM 能够以相对合理的成本提供优异的综合性能，因此具有较高的性价比。

（六）加工性能较好

在难熔金属中，TZM 具有较好的加工适应性。可进行锻造、轧制、拉拔、车削、铣削、磨削、EDM、电子束焊。相比部分新型强化钼合金，加工工艺更加成熟。

（七）标准体系完善

TZM 拥有完善的国际标准和企业规范。例如 ASTM、ISO、AMS、各类行业标准。 便于全球采购和质量控制。

（八）持续改进能力强

近年来，TZM 制造技术持续优化，包括更高纯度粉末、更均匀的 TiC、ZrC 弥散强化、更大的板材和棒材尺寸、 更高的尺寸精度、更稳定的批次一致性。成熟材料仍具有持续升级空间。

（九）为什么新材料尚未完全取代 TZM？

新材料	限制因素
MHC	成本较高、加工难度较大、应用经验相对不足
ODS 钼	制造工艺复杂、价格高
钼铌合金	铌价格昂贵，资源有限
钨合金	密度高、加工困难、成本较高
陶瓷	脆性大、抗热冲击能力有限

尽管有很多限制因素，在大多数高温装备中，TZM 仍然是综合性能最优的工程选择。中钨智造认为，TZM 能够长期保持市场主导地位，并不是因为它拥有某一项绝对领先的性能，而是因为其综合性能优异、制造工艺成熟、供应体系完善、工程应用经验丰富，并在性能、成本和可靠性之间取得了良好的平衡。这也是 TZM 至今仍然是高温钼合金工业标准材料的重要原因。

Q157 钛钨钼合金（TZM）最大的技术优势是什么？

TZM 最大的技术优势可以概括为通过少量 Ti、Zr 和 C 形成稳定、细小、均匀弥散分布的 TiC 和 ZrC 强化相，在几乎不降低钼优异导热性和高熔点的前提下，显著提高了材料的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性。这一优势使 TZM 成为高温难熔金属材料中最成功的工程化合金之一。

（一）弥散强化机制

TZM 仅添加少量 Ti、Zr、C。 这些元素在烧结和热加工过程中形成细小 TiC、ZrC 颗粒。这些强化相能够阻碍位错运动、抑制晶界迁移、延缓再结晶、提高高温强度。这是 TZM 性能提升的核心机制。

（二）高温强度显著提高

相比纯钼，TZM 在 1000~1400 °C 仍能保持较高强度。因此特别适用于真空热场、半导体设备、火箭喷管、高温模具等领域。

（三）抗蠕变性能优异

TiC 和 ZrC 颗粒能够有效降低高温蠕变速率。因此长期高温服役时，TZM 尺寸变化更小，寿命更长。

（四）再结晶温度提高

纯钼较容易发生再结晶。TZM 由于碳化物强化，再结晶温度明显提高。这意味着长期高温工作后仍能保持细晶组织和较高强度。

（五）保持钼的优良基础性能

TZM 强化后，仍保留了钼的重要优势是熔点高、导热率高、热膨胀系数低、蒸气压低、真空兼容性好。 这是许多其他强化材料难以兼顾的特点。

（六）工程适用性强

TZM 不仅性能优异，而且能够工业化制造。可制成棒材、板材、薄板、管材、坩埚、电极、靶材、热场部件、精密异形件。当代工业中 TZM 制造工艺成熟，适合批量生产。

（七）TZM 核心技术优势总结

技术特点	带来的优势
TiC、ZrC 弥散强化	提高高温强度和抗蠕变性能
抑制再结晶	长期保持组织稳定
保持钼高导热性	提高热管理能力
低热膨胀	提高尺寸稳定性
成熟粉末冶金工艺	产品一致性高、可规模化生产
综合性能均衡	适用于多种高温装备

（八）TZM 与其他高温材料相比

TZM 的特点不是某项性能极端突出，而是比纯钼更强、比钨更容易加工、比陶瓷更耐热冲

击、比 ODS 钼制造更成熟、比钼铌合金更经济。这种综合优势，使其成为众多高温装备的首选材料。

中钨智造认为，TZM 最大的技术优势在于成功实现了弥散强化与工程可制造性的统一。通过 TiC 和 ZrC 颗粒对组织进行稳定强化，在基本保持钼优异物理性能的同时，大幅提升了高温力学性能和长期服役稳定性。这种性能、工艺和成本之间的最佳平衡，使 TZM 成为过去几十年乃至未来相当长时期内，高温钼合金领域最具代表性的工业标准材料。



Q158 钛锆钼合金（TZM）最大的技术瓶颈是什么？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）经过数十年的工业应用，已经成为高温难熔金属领域最成熟的工程材料之一。然而，作为一种采用粉末冶金工艺制造的高性能钼合金，其生产和应用仍然存在一些关键技术瓶颈。这些瓶颈不仅影响材料性能，也决定了高端 TZM 产品的制造成本、产品一致性和应用范围。从目前全球产业发展来看，TZM 最大的技术瓶颈并非基础成分设计，而是组织控制和制造一致性的控制能力。

第一，TiC 和 ZrC 弥散强化相的精确控制

TZM 性能的核心来源于 Ti、Zr 与 C 形成的细小 TiC、ZrC 弥散强化颗粒。这些碳化物能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，提高材料的再结晶温度和高温强度。然而，TiC、ZrC 颗粒必须满足细小、均匀、稳定三个条件。如果颗粒尺寸过大，会降低强化效果，并可能成为裂纹萌生源；如果颗粒分布不均匀，则容易导致局部组织性能差异，影响材料的整体可靠性；如果颗粒数量不足，则无法充分发挥弥散强化作用。因此，如何稳定获得均匀分布的 TiC、ZrC 强化相，是 TZM 制造过程中最关键的核​​心技术之一。

第二，大尺寸材料组织均匀性的控制

随着半导体、航空航天及聚变装备的发展，TZM 产品不断向大型化发展，例如大尺寸板材、大直径棒材和大型热场部件。尺寸越大，烧结温度分布、热加工变形及冷却速度越难保持一致，容易导致晶粒尺寸不均匀、碳化物偏析及残余应力增加。因此，大尺寸 TZM 制品的组织均匀性控制仍然是行业的重要挑战。

第三，高纯度控制

对于半导体设备、医疗 CT 旋转阳极及高端科研装备，TZM 不仅要求合金元素准确，还要求极低的氧、氮、铁、镍、硅等杂质含量。氧和氮属于间隙元素，会降低材料塑性并增加脆性；金属杂质则可能影响高温性能和真空洁净度。因此，高纯原料制备、洁净生产环境和全过程污染控制，是高端 TZM 制造的重要技术难点。

第四，烧结致密化能力

TZM 通常采用粉末冶金工艺制造，烧结质量直接决定材料密度和内部缺陷水平。如果烧结不足，会产生残余孔隙，降低材料的抗拉强度、疲劳寿命及高温蠕变性能；如果烧结参数控制不当，则可能造成晶粒异常长大。因此，如何在实现高致密度的同时抑制晶粒粗化，是烧结工艺的重要课题。

第五，高温加工窗口较窄

TZM 必须在较高温度下进行锻造、轧制和旋锻。加工温度过低，材料塑性不足，容易产生裂纹；加工温度过高，则可能引起晶粒快速长大，削弱强化效果。同时，不同规格产品所需的变形量、变形速度和退火制度也有所不同，因此工艺窗口相对较窄，对设备能力和工艺经验要求较高。

第六，批次一致性控制

对于半导体设备、航空航天和医疗行业，同一型号 TZM 产品往往需要多年保持稳定性能。因此，不仅要求单件产品合格，更要求不同批次之间在化学成分、显微组织、晶粒尺寸、力学性能及高温性能方面保持高度一致。这种长期稳定的批次一致性，也是衡量制造企业技术水平的重要指标。

中钨智造综合评价

中钨智造认为，TZM 最大的技术瓶颈并不是配方设计，而是微观组织的精准控制能力。只有实现 TiC、ZrC 强化相的均匀弥散分布、高致密度、细晶组织以及稳定的批次一致性，才能生产出满足半导体、航空航天、医疗和聚变等高端领域要求的高品质 TZM 材料。

Q159 钛锆钼合金（TZM）生产最难控制的工艺参数是什么？

TZM 生产涉及混粉、压制、烧结、热等静压（HIP）、锻造、轧制、热处理及精密加工等多个工序，每一道工艺都会影响最终性能。但从整个制造流程来看，真正最难控制的并不是某一个单独参数，而是多个关键参数之间的协同匹配。其中，对最终产品性能影响最大的，是烧结温度、热加工制度和热处理制度。

第一，烧结温度

烧结是 TBM 粉末冶金工艺的核心环节。烧结温度过低，粉末之间扩散不足，容易残留孔隙，导致材料密度降低和力学性能下降；烧结温度过高，则会促进晶粒快速长大，削弱 TiC、ZrC 颗粒的强化作用。因此，烧结温度必须控制在能够充分致密化而又避免晶粒异常长大的合理范围内。

第二，烧结保温时间

保温时间决定烧结反应是否充分。时间过短，烧结不完全；时间过长，则会增加晶粒粗化风险，同时降低生产效率。因此，需要根据产品尺寸和烧结设备能力合理设定保温时间。

第三，烧结真空度

TBM 属于高温活性材料，烧结过程中必须保持高真空或高纯保护气氛。真空度不足会导致氧、氮等杂质进入材料，引起脆化并降低真空使用性能。因此，高真空烧结设备的稳定性是保证高品质 TBM 的重要条件。

第四，热加工温度

锻造和轧制过程中，加工温度直接影响组织演变。温度过低，材料塑性不足，容易开裂；温度过高，则晶粒快速长大，再结晶提前发生，最终降低高温性能。因此，需要严格控制加热温度及出炉后的加工节奏。

第五，总变形量

TBM 需要通过足够的塑性变形细化组织。如果总变形量不足，组织难以充分细化，性能提升有限；如果变形过大，则可能增加加工难度，甚至导致裂纹。因此，合理设计锻造比和轧制压下率，是获得优良组织的重要措施。

第六，冷却速度

热加工和热处理结束后的冷却速度同样十分重要。冷却过慢可能影响碳化物分布和组织稳定性，冷却过快则可能产生较大的热应力。不同产品通常采用炉冷、空冷或控制冷却等不同方式，以获得最佳组织状态。

第七，退火温度

退火制度直接影响最终晶粒尺寸和残余应力。应力消除退火温度不足，残余应力无法有效释放；退火温度过高，则可能引起再结晶甚至晶粒粗化。因此，应根据加工变形量和产品用途选择合适的退火制度。

第八，TiC 和 ZrC 形成条件

TiC、ZrC 强化相的形成受碳含量、烧结温度、保温时间及后续热加工共同影响。只有这些工艺参数相互匹配，才能形成细小、均匀、稳定的弥散强化相，这是 TBM 获得优异高温性能的关键。

第九，为什么这些参数最难控制？

这些工艺参数之间并不是彼此独立，而是相互影响。例如，烧结温度的变化会影响晶粒尺寸，也会影响后续锻造难度；锻造制度又会影响到退火后的组织状态；退火制度进一步决定最终晶粒尺寸和高温性能。因此，TBM 制造实际上是一个完整的工艺系统，而不是若干独立工序的简单组合。

中钨智造认为，TZM 生产过程中最难控制的不是单一工艺参数，而是烧结、热加工和热处理全过程的协同优化。其中，烧结温度、热加工温度及 TiC、ZrC 强化相的形成条件，是决定材料最终性能的三大核心工艺控制点。只有建立稳定的全过程工艺控制体系，才能持续生产出组织均匀、性能稳定、满足高端装备应用要求的高品质 TZM 产品。

Q160 钛锆钼合金（TZM）颗粒越细越好吗？

对于钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）而言，很多人认为 TiC、ZrC 强化颗粒越细越好。事实上，这种认识并不完全正确。颗粒细化确实能够提高强化效果，但只有在颗粒尺寸、数量、分布及稳定性达到合理平衡时，才能获得最佳综合性能。因此，评价 TZM 组织质量时，不能简单追求颗粒越细越好，而应追求细小、均匀、稳定、适量的弥散强化组织。

TZM 的强化主要来源于 TiC 和 ZrC 颗粒。这些颗粒能够阻碍位错运动，抑制晶界迁移，提高再结晶温度，并改善高温蠕变性能。如果颗粒尺寸控制在细小且均匀分布的范围内，可以显著提升材料的高温强度和组织稳定性，因此细化强化相是 TZM 工艺优化的重要方向之一。然而，颗粒尺寸过细也会带来新的问题。极细的碳化物颗粒具有较高的表面能，在长期高温服役过程中更容易发生聚集、粗化或溶解，从而削弱弥散强化效果。此外，过细颗粒在烧结和热加工过程中对工艺条件更加敏感，一旦分布不均匀，反而容易造成局部组织性能差异。

另一方面，如果颗粒过大，同样会降低材料性能。粗大的 TiC 或 ZrC 颗粒不能有效阻碍位错运动，强化效率明显下降。同时，这些粗大颗粒容易成为应力集中位置，在热循环或机械载荷作用下可能诱发微裂纹，对疲劳性能和热冲击性能产生不利影响。除了颗粒尺寸之外，颗粒分布同样重要。即使颗粒尺寸较小，如果出现局部团聚，也会造成组织不均匀，使不同区域的高温性能产生差异。因此，高品质 TZM 更强调强化相在整个基体中的均匀弥散分布，而不是单纯追求最小颗粒尺寸。颗粒数量也需要保持合理水平。数量不足时，强化作用有限，无法充分提高高温性能；数量过多，则可能影响材料塑性和加工性能，并增加生产工艺控制难度。因此，强化相含量必须与 Ti、Zr、C 元素配比及热加工制度相匹配。

对于不同应用领域，最佳颗粒状态也有所不同。半导体热场材料更加注重长期组织稳定性和尺寸稳定性，航空航天部件更加关注高温强度和抗蠕变能力，而医疗 CT 旋转阳极则更强调导热性能与抗热疲劳性能。因此，不同用途的 TZM，其强化相设计目标也有所区别。

总之，高品质 TZM 追求的是强化颗粒尺寸适中、分布均匀、数量合理，并能够在长期高温环境下保持稳定，而不是无限制地细化颗粒。中钨智造认为，TiC 和 ZrC 颗粒并非越细越好，而是应在细化强化与长期稳定之间取得最佳平衡。真正优秀的 TZM 组织应具有细小而稳定的弥散强化颗粒、均匀一致的组织结构以及良好的高温抗粗化能力，这也是决定 TZM 长期服役性能和可靠性的关键所在。

Q161 如何进一步提高钛锆钼合金（TZM）高温性能？

TZM 已经是目前应用最广泛的高温钼合金之一，其高温性能明显优于纯钼。然而，随着半导体晶体生长、聚变能源、航空航天及先进热处理装备不断向更高温度、更长寿命和更高可靠性发展，TZM 仍有进一步提升高温性能的空间。目前，提高 TZM 高温性能主要从组织优化、工艺改进和新型强化技术三个方面开展。

首先，应进一步优化 TiC 和 ZrC 弥散强化相。强化颗粒不仅需要细小，更重要的是保持长期高温稳定。通过优化 Ti、Zr 和 C 元素配比，并改进烧结及热加工工艺，可以获得更加均匀、更加稳定的碳化物分布，提高材料的抗蠕变能力和再结晶温度。

其次，进一步细化并稳定晶粒组织。合理控制锻造、轧制和热处理制度，可以获得均匀细晶组织，同时避免异常晶粒长大。细晶组织有利于提高材料的室温和中高温强度，而保持晶粒在长期高温下的稳定性，则能够延长材料的使用寿命。

降低氧、氮等间隙杂质含量，也是提高高温性能的重要措施。氧和氮会降低材料塑性，增加高温脆化倾向，并影响晶界稳定性。采用更高纯度原料、更高真空烧结工艺及更加严格的生产环境控制，有助于进一步改善 TZM 的综合性能。

提高材料致密度同样十分重要。烧结过程中若残留孔隙，不仅降低强度，也会成为高温蠕变和疲劳裂纹的起始位置。通过优化烧结制度、热等静压等工艺，可以进一步提高材料致密度，增强长期服役可靠性。

热加工工艺的持续优化也是重要方向。合理控制锻造温度、变形量、轧制制度和退火工艺，不仅能够细化组织，还可以改善晶粒取向，使材料获得更加均匀的组织结构和更好的高温力学性能。

近年来，新型强化技术也成为 TZM 发展的重要方向。例如，通过引入纳米级氧化物形成氧化物弥散强化（ODS）结构，可以进一步提高材料的高温稳定性和抗蠕变性能；采用多级复合强化、梯度组织设计及晶界工程等先进材料设计理念，也有望进一步突破传统 TZM 的性能极限。此外，制造技术的升级同样不可忽视。高纯粉末制备、超细粉末控制、热等静压、精密热加工以及数字化工艺控制等先进制造技术，可以有效提升产品的一致性和稳定性，为高温性能的持续提升提供基础保障。

提高 TZM 高温性能并不是简单追求某一项指标，而是在高温强度、塑性、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性及加工性能之间取得新的平衡。任何一种强化措施，如果导致加工性能显著下降或制造成本大幅提高，都难以真正实现产业化应用。中钨智造认为，未来 TZM 高温性能的提升方向，将集中在更加稳定的 TiC 和 ZrC 弥散强化、更高纯度原料、更高致密度制造、更精确的热加工控制以及新型复合强化技术等方面。对于当前工业应用而言，优化组织均匀性和全过程工艺控制，比单纯增加合金元素更具有现实意义，也是未来高性能 TZM 发展的主要技术路线。

Q162 中国钛锆钼合金（TZM）与国际先进水平还有哪些差距？

近年来，中国钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）的研发和产业化水平取得了显著进步，在粉末冶金、真空烧结、热加工及精密机械加工等方面已经形成了较完整的产业链，能够生产棒材、板材、管材、坩埚、靶材及各类复杂异形件，广泛应用于半导体、真空热处理、医疗设备和航空航天等领域。总体来看，中国 TZM 产品已经能够满足绝大多数工业应用需求，在部分产品领域已达到国际先进水平。但如果与欧美、日本等长期积累高端 TZM 制造经验的企业相比，在部分关键技术和高端产品方面仍存在一定差距。

首先，批次一致性仍然是最重要的差距之一。

国际领先企业经过数十年的工艺积累，已经建立了完善的全过程质量控制体系，不同批次产品在化学成分、晶粒尺寸、TiC 和 ZrC 强化相分布以及高温性能等方面具有较高的一致性。而高端装备制造对材料稳定性的要求极高，长期保持这种一致性仍然需要持续积累制造经验。

其次，微观组织控制能力仍有进一步提升空间。

高品质 TZM 不仅要求晶粒细小，而且要求 TiC、ZrC 强化颗粒尺寸适中、分布均匀，并能够在长期高温条件下保持稳定。虽然国内企业已经能够实现较好的组织控制，但在超大尺寸产品、超高纯产品以及长期服役稳定性方面，与国际先进企业相比仍有一定提升空间。

第三，高纯度控制能力仍然是高端产品的重要竞争点。

半导体、医疗影像及聚变科研装备通常要求极低的氧、氮及金属杂质含量，同时要求严格控制材料放气性能和真空洁净度。近年来国内企业高纯 TZM 领域进步明显，但在部分极端洁净要求的应用中，国际高端产品仍具有一定优势。

第四，大尺寸、高精度产品制造能力仍需持续完善。

随着半导体晶体生长设备和大型真空热处理装备的发展，对大规格 TZM 板材、棒材及复杂热场构件的需求不断增加。大尺寸产品不仅要求尺寸精度高，更要求组织均匀、内部无缺陷，这对烧结、锻造和热处理全过程提出了更高要求。

第五，高温长期服役数据库仍需进一步积累。

欧美、日本企业经过几十年的工程应用，建立了丰富的高温蠕变、热疲劳、长期组织稳定性及服役寿命数据库，可为航空航天、核工业等领域提供完善的数据支持。国内企业虽然正在快速积累相关数据，但在长期工程验证方面仍需要时间。不过，这种差距正在逐步缩小。随着国内高纯钼粉制备技术、真空烧结设备、热等静压工艺、精密热加工及检测技术不断提升，越来越多国产 TZM 产品已经进入国际高端市场，并在半导体、光伏、真空炉等领域实现批量应用。

中钨智造认为，中国 TZM 产业已经具备较强的国际竞争力，在普通工业级和多数高端工业级产品方面已达到国际先进水平。未来进一步提升的重点，不是基础制造能力，而是高纯度控制、组织均匀性、批次一致性、长期高温服役可靠性以及大型复杂构件制造能力。随着这些关键技术不断突破，中国 TZM 整体水平将进一步接近甚至达到国际领先水平。

Q163 钛锆钼合金（TZM）未来是否会完全被 MHC 替代？

近年来，随着钼钨碳合金（MHC，Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy）的发展，很多人认为 MHC 最终会全面取代 TZM。事实上，从目前的技术发展和产业应用来看，这种情况发生的可能性较低。未来相当长一段时间内，TZM 和 MHC 更可能形成互补关系，而不是简单的替代关系。MHC 最大的优势在于更高的高温性能。由于 HfC 颗粒具有更高的热稳定性，在极高温环境下能够比 TiC、ZrC 保持更好的强化效果，因此 MHC 通常具有更高的再结晶温度、更优异的抗蠕变性能和更长的高温使用寿命。在部分超高温应用中，MHC 确实表现优于 TZM。然而，高性能并不意味着能够全面替代 TZM。

首先，TZM 拥有极其成熟的产业体系。

经过数十年的工业化发展，TZM 已经形成完整的原材料供应、粉末制备、烧结、热加工、精密加工和质量控制体系，制造经验丰富，产品规格齐全，供应稳定。这种成熟的产业基础，是 MHC 短时间内难以完全复制的。

其次，TZM 具有更好的经济性。

钨属于稀有金属，价格远高于钛和锆，因此 MHC 制造成本明显高于 TZM。在很多工业应用中，TZM 已经能够满足性能要求，继续采用成本更高的 MHC 并不具有明显经济优势。

第三，加工制造难度不同。

由于 HfC 颗粒更加稳定，MHC 在热加工和机械加工过程中通常比 TZM 更难控制，对设备和工艺要求更高。这意味着其制造成本、加工周期及产品一致性控制难度也相应增加。

第四，绝大多数应用并不需要 MHC 的极限性能。

例如半导体热场、真空热处理设备、玻璃工业及医疗 CT 旋转阳极等领域，目前 TZM 已经能够满足长期稳定使用要求，没有必要为了有限的性能提升而承担更高的材料成本。当然，在一些极端工况下，MHC 的优势会更加明显。例如聚变装置、高超声速飞行器、先进火箭发动机热端部件以及超高温科研设备，对于高温强度和长期组织稳定性的要求已经接近 TZM 的性能极限，此时 MHC 可能成为更优的选择。

未来的发展趋势更可能是材料分级应用。对于绝大多数工业领域，TZM 仍将继续作为标准高温钼合金广泛应用；对于温度更高、寿命要求更长或工况更加严苛的特殊装备，则逐步采用 MHC 等性能更高的新型钼合金。从产业发展的规律来看，一种成熟工程材料往往不会因为出现性能更高的新材料而立即退出市场。只要其性能能够满足需求，并具有成本、制造和供应优势，就仍然会长期保持较大的市场份额。

中钨智造认为，未来 MHC 将在超高温、高可靠性和极端工况领域获得越来越多的应用，但 TZM 不会因此完全退出市场。凭借成熟的制造工艺、稳定的供应体系、优异的综合性能和较高的性价比，TZM 仍将长期保持全球高温钼合金主流材料的地位。未来的发展方向更可能是 TZM 与 MHC 根据不同工况实现优势互补，而不是一种材料完全取代另一种材料。

Q164 钛锆钼合金（TZM）未来是否会被高熵合金替代？

高熵合金（High-Entropy Alloys, HEAs）是近年来材料科学领域的重要研究方向。由于其由多种主要元素组成，具有高混合熵效应、晶格畸变效应和缓慢扩散效应，在高温强度、耐磨性、耐腐蚀性等方面展现出良好的发展潜力。因此，有观点认为高熵合金未来可能取代 TZM（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy）等传统高温材料。从目前的发展水平来看，高熵合金在未来有望成为部分高端领域的重要补充材料，但在可预见的未来，并不会全面替代 TZM。

首先，两类材料的发展成熟度存在明显差异。

TZM 经过六十多年工业化应用，已经建立了完善的材料体系、制造工艺、产品标准和工程数据库，其性能经过大量实际工况验证。而高熵合金虽然研究十分活跃，但目前仍主要集中于实验室研究和小规模工程验证阶段，大规模产业化应用还处于发展过程中。

其次，高熵合金并没有统一的成分体系。

目前全球已经开发出数百种甚至上千种不同配方的高熵合金，每一种材料都有不同的性能特点，并不存在一种能够全面替代 TZM 的标准高熵合金。因此，高熵合金更像是一个材料平台，而不是一种成熟定型的工程材料。

第三，TZM 在导热性能方面仍具有明显优势。

许多高熵合金虽然具有较高的的高温强度，但导热率通常明显低于钼基材料。在半导体热场、单晶硅生长、X 射线旋转阳极等应用中，材料不仅需要承受高温，还需要快速传导热量。导热性能不足，会直接影响设备效率和温度均匀性，因此目前多数高熵合金尚不能满足这些应用要求。

第四，高熵合金的制造成本和工艺复杂度普遍较高。

由于通常需要采用多种高纯金属元素，并配合真空熔炼、快速凝固或粉末冶金等复杂工艺，其生产成本明显高于成熟的 TZM 制造工艺。同时，不同元素之间的偏析控制、组织稳定性和批次一致性，也仍是高熵合金产业化过程中需要解决的重要问题。

第五，高温长期可靠性仍需要大量工程验证。

TZM 已经积累了丰富的高温蠕变、热疲劳、再结晶及长期服役数据，而高熵合金目前缺乏几十年工程应用积累，对于长期高温组织稳定性、服役寿命及失效机理，还需要更多研究和实际验证。当然，高熵合金也具有自身优势。在超高温结构材料、耐磨零件、特殊腐蚀环境以及新型航空航天材料等领域，高熵合金未来可能展现出比传统 TZM 更高的性能潜力。如果未来能够解决制造成本、组织稳定性及产业化问题，高熵合金将在部分极端应用中占据重要位置。

未来更可能出现的情况是，根据不同工况选择不同材料。对于需要优异导热性能、成熟制造工艺和稳定供应体系的应用，TZM 仍将保持竞争优势；对于追求极限高温性能或特殊服役环境的新型装备，高熵合金则可能成为新的选择。中钨智造认为，高熵合金代表了未来高温材料的重要发展方向，但目前仍处于快速发展阶段。凭借成熟的产业体系、优异的综合性能和丰富的工程应用经验，TZM 在未来较长时期内仍将是高温钼合金领域的重要工业标准材料。未来两类材料更可能根据不同应用场景形成互补，而不是简单的替代关系。

Q165 钛锆钼合金（TZM）是否适合增材制造时代？

随着增材制造（Additive Manufacturing, AM）或 3D 打印技术的快速发展，人们开始关注 TZM 是否能够适应这一新的制造模式。从材料特性来看，TZM 具备开展增材制造研究的基础，但由于钼基材料本身具有较高的熔点和较大的加工难度，其增材制造仍面临不少技术挑战。TZM 适合增材制造，但目前仍属于高难度、高技术门槛的应用领域。

首先，TZM 具有较高的熔点。

钼的熔点约为 2623 °C，TZM 的熔点与纯钼接近，这意味着增材制造过程中需要高能量激光或电子束才能实现充分熔化。相比钛合金、不锈钢等常见打印材料，TZM 对设备功率和工艺控制提出了更高要求。

其次，TZM 容易在快速冷却过程中产生热应力。

由于钼基材料室温塑性较低，打印过程中形成的巨大温度梯度容易导致残余应力积累，严重时可能产生裂纹。因此，目前多数 TZM 增材制造工艺都会采用基板预热、高温打印环境或打印后热处理等措施，以降低开裂风险。

第三，打印粉末质量要求极高。

用于增材制造的 TZM 粉末通常要求具有球形度高、粒径分布均匀、流动性好、氧含量低等特点。粉末质量不仅影响成形质量，也直接关系到打印件的致密度和最终性能。目前，电子束选区熔化（EBM）和激光粉末床熔融（LPBF）是研究 TZM 增材制造最主要的两种技术路线。其中，电子束工艺由于能够在高温真空环境下工作，更有利于降低热应力和避免氧化，因此更适合钼及 TZM 等难熔金属材料。对于复杂结构零件，增材制造具有明显优势。传统 TZM 加工通常需要大量机械加工，而采用 3D 打印能够直接制造复杂内流道、轻量化结构及异形热场部件，显著降低材料浪费，提高设计自由度。这对于航空航天、聚变装置及部分科研设备具有较高价值。不过，从工业化角度来看，目前增材制造 TZM 仍不能完全替代传统粉末冶金工艺。传统工艺在组织均匀性、尺寸稳定性、批量生产效率和制造成本等方面仍具有明显优势，特别是大尺寸板材、棒材及标准型材，仍以传统粉末冶金工艺为主。

未来，增材制造更适合用于高附加值、小批量、复杂结构和定制化 TZM 零件，而传统粉末冶金仍将承担大规模标准产品的生产任务。中钨智造认为，TZM 完全能够适应增材制造时代，但应用模式将发生变化。对于复杂结构、高端定制和快速研发产品，增材制造将成为重要制造手段；对于标准板材、棒材、管材及大批量产品，传统粉末冶金工艺仍将长期保持主导地位。未来，两种制造技术更可能协同发展，通过传统工艺保证材料品质，通过增材制造实现复杂结构设计，共同推动 TZM 在高端装备制造领域的进一步应用。

Q166 钛锆钼合金（TZM）未来最大的市场在哪里？

随着全球高端制造业不断升级，钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）的应用领域正在持续扩大。虽然 TZM 已经广泛应用于真空热处理、航空航天、核工业、医疗设备及科研装备等多个行业，但从未来十年至二十年的发展趋势来看，半导体产业将成为 TZM 最大的市场，也是推动其技术升级和需求增长的核心动力。

首先，半导体产业正在向更高精度、更大尺寸和更高性能方向发展。无论是集成电路、功率半导体，还是第三代半导体材料，都需要大量高温、高纯、真空环境下工作的关键设备，而 TZM 正是这些设备的重要材料之一。

在单晶硅制造领域，随着 300mm 硅片全面普及以及更大尺寸晶圆的发展，单晶炉热场系统对于材料的高温强度、尺寸稳定性和导热性能提出了更高要求。TZM 广泛应用于加热器支撑件、导流部件、连接件及其他热场结构件，其需求将随着晶圆产能扩张持续增长。

在碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）产业，高温晶体生长温度远高于传统硅材料，对热场材料提出了更加严格的要求。TZM 凭借优异的高温强度、低蒸气压和良好的真空兼容性，已经成为许多关键部件的重要选择。随着新能源汽车、光伏逆变器、轨道交通和 5G 通信的发展，第三代半导体市场快速扩大，也将进一步带动 TZM 需求增长。

半导体设备制造同样是未来的重要市场。包括外延设备、真空热处理设备、离子注入设备、PVD 设备及电子束设备等，都需要大量能够长期稳定工作的高温结构材料。随着全球晶圆厂持续扩建，高端装备国产化和设备更新换代不断推进，TZM 产品需求也将同步增加。

除了半导体产业，航空航天仍将保持稳定增长。高超声速飞行器、火箭发动机、再入飞行器及新一代推进系统的发展，使高温难熔金属材料的重要性不断提高。虽然部分极端应用可能采用 MHC 等性能更高的新型材料，但 TZM 凭借成熟的制造工艺和较高的性价比，仍将在大量高温部件中保持重要地位。

聚变能源的发展也值得关注。随着国际聚变研究持续推进，高热流密度部件、等离子体实验装置及高温真空系统对高性能钼合金的需求不断增加。虽然目前聚变产业规模尚小，但从长期来看具有较大的发展潜力。

此外，真空热处理、粉末冶金烧结、玻璃制造、医疗 CT 设备、高端科研装备等传统市场仍将保持稳定需求，为 TZM 提供持续的产业基础。从区域市场来看，亚洲预计仍将是未来最大的消费区域。中国、日本、韩国和中国台湾地区集中了全球大部分半导体制造能力，也是 TZM 需求增长最快的地区。其中，中国随着半导体产业链不断完善、高端装备制造持续发展，有望成为全球最大的 TZM 消费市场之一。

中钨智造认为，未来推动 TZM 市场增长的核心力量将来自半导体产业，尤其是单晶硅、碳化硅、氮化镓晶体生长设备以及高端半导体装备制造。与此同时，航空航天、聚变能源、高端真空装备等领域将形成稳定增长的新市场，共同推动 TZM 产业持续向高性能、高纯度和大型化方向发展。

Q167 半导体产业为何持续推动钛锆钼合金（TZM）需求增长？

近年来，全球半导体产业持续高速发展，已经成为推动 TZM 需求增长最快的行业之一。从传统集成电路到第三代半导体，再到人工智能、高性能计算、新能源汽车和先进封装技术，几乎所有高端半导体制造环节都离不开高温真空设备，而 TZM 正是这些设备中的关键材料。

首先，半导体制造本质上属于高温、高真空、高洁净度制造过程。

无论是单晶硅拉制、SiC 晶体生长、GaN 外延还是各种热处理工艺，都需要设备长期工作在高温真空环境中。TZM 具有高熔点、低蒸气压、高温强度高、导热性能优异和尺寸稳定性好的特点，非常符合这些设备对材料性能的要求。

其次，晶圆尺寸不断扩大，对热场材料提出了更高要求。

随着 300mm 晶圆成为主流，更大尺寸晶圆的发展趋势日益明显，热场系统需要保持更高的温度均匀性和结构稳定性。TZM 较低的热膨胀系数和优异的抗蠕变性能，有助于降低热变形，提高晶体生长质量，因此被广泛应用于各种热场支撑结构。

第三，第三代半导体快速发展进一步扩大了 TZM 的应用空间。

碳化硅和氮化镓晶体生长温度通常达到 2000 °C 以上，对热场部件提出了比传统硅材料更加严苛的要求。随着新能源汽车、充电设施、风电、光伏和高速通信的发展，SiC 和 GaN 产业快速扩张，也直接带动了 TZM 材料需求。

第四，半导体设备数量持续增加。

全球晶圆厂不断扩建，新建生产线需要大量晶体生长炉、退火炉、烧结炉、外延设备及真空热处理设备。这些设备内部都包含大量 TZM 零部件，因此设备投资规模越大，对 TZM 的需求也越高。

第五，设备升级速度不断加快。

先进制程持续向更高精度发展，设备更新周期不断缩短，对热场系统、加热系统及高温结构件提出了更高要求。部分原有 TZM 部件需要升级换代，同时也促进了高纯 TZM、大尺寸 TZM 及精密加工 TZM 产品的发展。

此外，半导体产业对于材料纯度要求极高。设备中的任何材料都必须具有极低的杂质含量和优异的真空洁净性能。TZM 经过长期应用验证，在高温真空环境下具有较低的放气率和较好的化学稳定性，因此能够满足先进半导体制造对于材料可靠性的严格要求。

未来，随着人工智能芯片、高性能计算、数据中心、新能源汽车、电力电子及先进封装技术持续发展，全球半导体产业仍将保持较高投资水平，这也意味着 TZM 作为关键热场材料，其需求将继续增长。中钨智造认为，半导体产业持续推动 TZM 需求增长的根本原因，在于高温真空制造对材料性能提出了越来越高的要求，而 TZM 在高温强度、导热性能、尺寸稳定性、低蒸气压及真空洁净性等方面具有突出的综合优势。随着单晶硅、SiC、GaN 及先进半导体设备不断升级，TZM 不仅不会被替代，反而将在未来半导体高端装备制造中发挥更加重要的作用。

Q168 核聚变会带来钛锆钼合金（TZM）新的发展机遇吗？

核聚变被认为是未来最具潜力的清洁能源技术之一。随着国际热核聚变实验堆（ITER）、中国聚变工程实验堆（CFETR）、美国、欧洲以及日本等多个聚变项目持续推进，高性能耐高温材料的重要性不断提升。作为一种成熟的高温钼合金，钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）有望在聚变产业的发展过程中迎来新的市场机遇。不过，需要明确的是，TZM 并不会成为所有聚变装置的主要结构材料，而是在部分关键高温部件中发挥重要作用。

聚变装置具有极其严苛的工作环境。等离子体温度可达到数千万摄氏度，虽然通过磁约束或惯性约束避免了材料直接接触如此高的温度，但装置内部许多部件仍需长期承受高热流密度、高真空、热循环以及强辐照等复杂工况。因此，聚变工程对于材料提出了极高要求，包括高温强度、高导热率、尺寸稳定性、低蒸气压以及良好的真空兼容性。

TZM 在这些方面具有明显优势。其高熔点、高温强度和优异的抗蠕变性能，使其能够长期工作于高温真空环境；较高的导热率有助于快速传导热量，降低局部热应力；低热膨胀系数则有利于维持部件尺寸稳定，减少热变形。这些特点使 TZM 非常适合作为聚变装置中的高温结构材料。

目前，TZM 已经在聚变相关科研设备中得到应用，例如高热流实验装置、高温真空系统、等离子体诊断设备、电子束加热系统及中子辐照实验设备等。在这些设备中，TZM 主要承担高温支撑件、屏蔽件、连接件、加热部件以及真空结构件等功能。

未来，如果聚变发电逐步进入工程化和商业化阶段，对高温材料的需求将明显增加。聚变装置不仅需要大量实验设备，还需要大量能够长期稳定运行的高温部件，这将为 TZM 提供新的市场空间。

不过，在聚变堆第一壁、偏滤器等直接承受高能中子轰击的核心部位，目前更多采用钨及钨基复合材料。这是因为钨具有更高的熔点、更低的溅射率以及更好的耐等离子体侵蚀能力，而 TZM 在高能中子长期辐照环境下仍存在一定局限。因此，在未来聚变装置中，TZM 与钨材料更可能形成分工合作，而不是彼此替代。

此外，聚变产业的发展还将推动 TZM 制造技术不断升级。为了满足聚变装备更高的可靠性要求，高纯 TZM、大尺寸 TZM、低杂质 TZM 以及更加稳定的弥散强化组织，将成为未来的重要发展方向。

中钨智造认为，核聚变将为 TZM 带来新的发展机遇，但这种机遇主要体现在高温真空部件、辅助热场系统、实验装备和部分结构件，而不是聚变堆所有核心部位。随着聚变产业逐步走向工程化，高品质 TZM 有望在聚变装备产业链中占据越来越重要的位置。

Q169 AI 芯片制造是否会增加钛锆钼合金（TZM）需求？

近年来，人工智能（AI）技术快速发展，大模型训练、高性能计算和数据中心建设推动了 AI 芯片需求持续增长。AI 芯片本身并不直接使用 TZM，但 AI 芯片制造过程高度依赖先进半导体设备，而这些设备大量采用 TZM 材料。因此，AI 产业的发展实际上会间接推动 TZM 需求持续增长。

AI 芯片通常采用先进制程工艺，例如 5 nm、3 nm 甚至更先进的工艺节点。这些先进工艺需要更加复杂的制造流程，也需要性能更高、精度更高的半导体设备。从硅片制造开始，到晶体生长、外延、生长退火、离子注入、薄膜沉积及真空热处理，整个制造链条都需要大量高温真空装备，而 TZM 正是这些设备的重要材料之一。

首先，AI 芯片推动了晶圆需求快速增长。

随着 AI 服务器、智能终端及数据中心持续扩张，全球先进晶圆产能不断增加，越来越多的单晶硅拉晶炉和热处理设备投入建设。这些设备中的热场支撑件、连接件及高温结构件大量采用 TZM，因此晶圆产能扩张直接带动了 TZM 市场需求。

其次，先进封装技术的发展同样增加了高温设备需求。

为了提高芯片集成度和运算能力，AI 芯片广泛采用先进封装工艺，这些工艺需要更加复杂的真空热处理和高温制造设备，从而进一步扩大了 TZM 在设备中的应用。

第三，AI 芯片推动了第三代半导体产业的发展。

随着 AI 服务器功耗不断提升，电源转换效率成为关键问题，SiC 和 GaN 功率器件的重要性持续增加。这些材料的晶体生长温度远高于传统硅材料，对高温热场部件提出了更高要求，进一步提升了 TZM 的应用价值。

第四，全球半导体设备投资持续增加。

为了满足 AI 芯片制造需求，各大晶圆厂不断扩建先进生产线，新设备采购规模持续扩大。每增加一条晶圆生产线，都意味着需要配套大量采用 TZM 制造的高温部件，因此设备投资与 TZM 需求具有明显的同步增长关系。

与此同时，AI 产业对于产品可靠性和制造精度要求越来越高，也推动了 TZM 向高纯度、高均匀性和高尺寸精度方向发展。未来，高端半导体设备制造商不仅关注 TZM 是否能够满足基本性能要求，更关注材料批次一致性、长期高温稳定性以及真空洁净性能，这也将促进 TZM 制造技术持续升级。AI 芯片不会直接消耗 TZM，而是通过带动半导体设备投资、晶圆厂扩建和第三代半导体产业发展，形成对 TZM 需求的持续拉动。因此，AI 产业的发展与 TZM 市场之间属于典型的间接需求关系。

中钨智造认为，AI 芯片产业将成为未来推动 TZM 需求增长的重要力量。虽然 TZM 并不属于芯片材料本身，但 AI 芯片制造所依赖的晶圆制造设备、热处理设备、SiC 和 GaN 晶体生长设备以及先进封装装备，都需要大量高性能 TZM 部件。随着全球 AI 产业持续扩张，TZM 作为高温真空装备关键材料的重要性也将进一步提升。

Q170 下一代钼基高温合金的发展方向是什么？

钼基高温合金凭借高熔点、高导热率、低热膨胀系数和优异的高温力学性能，长期以来一直是半导体、航空航天、核工业、真空热处理及高端科研装备的重要材料。作为其中最成熟、应用最广泛的代表，钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）已经成为全球高温钼合金的工业标准。然而，随着半导体产业向更高温度、更大尺寸发展，航空航天不断突破极端热环境，聚变能源逐步迈向工程化，以及人工智能、高端装备制造对材料性能提出更高要求，传统 TZM 也面临进一步提升性能的需求。因此，下一代钼基高温合金的发展方向，已经从单纯提高强度，逐步转向综合性能、长期可靠性和先进制造能力的全面提升。

（1）更高效的弥散强化技术

未来钼基高温合金仍将以弥散强化作为核心技术路线，但强化相将更加稳定、更加细小、更加均匀。传统 TZM 主要依靠 TiC 和 ZrC 颗粒强化，而未来材料可能采用更加稳定的碳化物、氧化物或复合强化颗粒，提高长期高温组织稳定性，进一步降低高温蠕变速率，并提高再结晶温度，使材料能够适应更高的工作温度和更长的服役寿命。

（2）氧化物弥散强化（ODS）钼合金

氧化物弥散强化（ODS）是当前国际研究的重要方向之一。通过在钼基体中引入纳米级稳定氧化物颗粒，可以显著提高材料在超高温环境下的组织稳定性和抗蠕变能力。相比传统 TZM，ODS 钼合金在极端高温下具有更大的发展潜力，因此被认为是下一代高温钼材料的重要候选体系。不过，目前 ODS 钼合金制造工艺复杂、成本较高，产业化程度仍然有限，未来仍需要进一步完善制备技术。

（3）多元复合强化设计

未来钼基合金的发展趋势之一，是采用多种强化机制协同作用，而不是依赖单一强化方式。例如，将碳化物强化、氧化物强化、晶粒细化强化和固溶强化有机结合，通过不同强化机制相互配合，在保持良好导热性能和加工性能的同时，进一步提升材料的综合性能。这种复合强化设计，有望突破传统 TZM 性能提升的瓶颈。

（4）高纯化与低杂质控制

随着半导体和聚变产业的发展，对材料纯度的要求越来越高。未来高端钼基合金将更加重视氧、氮、碳及金属杂质的精确控制，通过采用更高纯度原料、更洁净的生产环境以及更加先进的真空烧结技术，进一步提高材料的高温稳定性和真空洁净性能。对于高端半导体装备而言，高纯化甚至比单纯提高强度更加重要。

（5）晶界工程与组织设计

传统材料设计更多关注化学成分，而未来的发展方向将更加重视微观组织设计。通过优化晶粒尺寸、晶界形貌、晶粒取向以及强化颗粒分布，可以提高材料抵抗晶界滑移和高温变形的能力，从而改善高温蠕变性能和热疲劳寿命。这种晶界工程理念，已经成为先进高温材料研究的重要方向。

（6）增材制造专用钼合金

随着增材制造技术不断成熟，未来钼基高温合金也将向适合 3D 打印方向发展。传统 TZM 主要针对粉末冶金工艺进行设计，而未来可能开发专门适用于激光粉末床熔融（LPBF）、电子

束选区熔化（EBM）等工艺的新型钼基合金。这类材料将更加重视打印过程中的抗裂能力、组织稳定性及打印后热处理性能，以满足复杂结构零件制造需求。

（7）高熵钼基合金

近年来，高熵合金成为国际材料研究热点。未来钼基高温材料可能引入高熵设计理念，通过多种难熔元素共同组成新型高熵钼基合金，在提高高温强度和组织稳定性的同时，探索新的强化机制。不过，目前这类材料仍主要处于实验研究阶段，距离大规模工程应用还有较长的发展过程。

（8）面向极端工况的专用材料

未来钼基高温合金的发展将更加专业化，而不是追求一种材料适用于所有工况。例如：半导体领域更加关注高纯度、低放气率和尺寸稳定性；聚变领域更加关注抗辐照性能和高热流密度服役能力；航空航天更加关注超高温强度和热疲劳寿命；医疗设备则更加关注导热性能和长期可靠性。不同应用场景，将催生不同类型的专用钼基高温合金。

（9）智能制造与全过程质量控制

未来材料竞争不仅体现在材料本身，也体现在制造能力。数字化生产、智能烧结控制、在线组织监测、全过程质量追溯及人工智能工艺优化，将成为高端钼基材料制造的重要组成部分。未来高品质钼基合金不仅要求性能优异，更要求不同批次之间保持高度一致，能够满足航空航天、半导体等行业对于长期稳定性的严格要求。

（10）中钨智造综合评价

下一代钼基高温合金的发展方向，不是简单取代 T₂M，而是在 T₂M 成熟技术基础上不断演进。未来发展重点将集中在更加稳定的弥散强化体系、更高纯度控制、更先进的晶界工程、多元复合强化、增材制造适配以及智能制造等方面。在未来相当长一段时间内，T₂M 仍将是工业应用的主流材料，而 ODS 钼合金、高熵钼基合金及其他新型强化体系，将逐步在极端工况和高端装备领域发挥越来越重要的作用，共同推动钼基高温材料进入新的发展阶段。

