

TZM 钨棒百科全书

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

[版权与免责声明](#)

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化设计与制造。中钨在线成立于1997年，以中国首个顶级钨制品网站 www.chinatungsten.com 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的设计制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钼及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

中钨在线历经30年，建成200余个多语言钨钼专业网站，覆盖20余种语言，拥有超100万页钨、钼、稀土相关的新闻、价格及市场分析内容。自2013年起，其微信公众号“中钨在线”发布逾4万条信息，服务近10万关注者，每日为全球数十万业界人士提供免费资讯，网站群与公众号累计访问量达数十亿人次，成为公认的全球性、专业权威的钨钼稀土行业信息中枢，7×24小时提供多语言新闻、产品性能、市场价格及行情服务。

中钨智造承接中钨在线的技术与经验，聚焦客户个性化需求，运用AI技术与客户协同设计并生产符合特定化学成分及物理性能（如粒度、密度、硬度、强度、尺寸及公差）的钨钼制品，提供从开模、试制到精加工、包装、物流的全流程集成服务。30年来，中钨在线已为全球超13万家客户提供50余万种钨钼制品的研发、设计与生产服务，奠定了客制化、柔性化与智能化的制造基础。中钨智造以此为依托，进一步深化工业互联网时代钨钼材料的智能制造与集成创新。

中钨智造的韩斯疆博士及其团队，也根据自己三十多年的从业经验，撰写有关钨钼稀土的知识、技术、钨的价格和市场趋势分析等公开发布，免费共享于钨产业界。韩斯疆博士自1990年代起投身钨钼制品电子商务、国际贸易及硬质合金、高比重合金的设计与制造，拥有逾30年经验，是国内外知名的钨钼制品专家。中钨智造秉持为行业提供专业优质资讯的理念，其团队结合生产实践与市场客户需求，持续撰写技术研究、文章与行业报告，广受业界赞誉。这些成果为中钨智造的技术创新、产品推广及行业交流提供坚实支撑，推动其成为全球钨钼制品制造与信息服务的引领者。



版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

目录

1. TZM 钨棒引言

- 1.1 TZM 钨棒的定义与重要性
- 1.2 TZM 钨棒历史发展与技术演进
- 1.3 TZM 钨棒在现代工业与科研中的角色

2. TZM 钨棒基本原理

- 2.1 TZM 钨棒化学组成与合金特性
- 2.2 TZM 钨棒物理与力学性能
- 2.3 TZM 钨棒与纯钨及其他高温合金的比较
- 2.4 TZM 钨棒高温环境下的工作机制

3. TZM 钨棒性能

- 3.1 TZM 钨棒物理与化学特性
 - 3.1.1 TZM 钨棒熔点与热稳定性
 - 3.1.2 TZM 钨棒密度与热导率
 - 3.1.3 TZM 钨棒抗氧化与抗腐蚀性
 - 3.1.4 TZM 钨棒机械强度与韧性
- 3.2 TZM 钨棒热学与力学特性
 - 3.2.1 TZM 钨棒热膨胀系数与高温变形
 - 3.2.2 TZM 钨棒抗热震性能
 - 3.2.3 TZM 钨棒蠕变性能与长期稳定性
 - 3.2.4 TZM 钨棒疲劳性能与循环使用能力
- 3.3 TZM 钨棒微观结构与性能关系
 - 3.3.1 TZM 钨棒晶粒结构与取向
 - 3.3.2 钛、锆、碳元素的作用
 - 3.3.3 TZM 钨棒表面形貌与高温性能
- 3.4 TZM 钨棒寿命与可靠性
 - 3.4.1 TZM 钨棒寿命的影响因素
 - 3.4.2 TZM 钨棒失效模式分析（如断裂、腐蚀）
 - 3.4.3 TZM 钨棒可靠性测试方法
- 3.5 中钨智造 TZM 钨棒 MSDS

4. TZM 钨棒制备工艺与技术

- 4.1 原材料选择与准备
 - 4.1.1 钨粉的提纯与质量要求
 - 4.1.2 钛、锆、碳添加剂的选择
 - 4.1.3 合金配比的优化
 - 4.1.4 原材料的检测与质量控制
- 4.2 冶金工艺
 - 4.2.1 粉末混合与压制

版权与法律责任声明

- 4.2.1.1 机械合金化技术
- 4.2.1.2 等静压成型工艺
- 4.2.2 烧结工艺
 - 4.2.2.1 真空烧结技术
 - 4.2.2.2 气氛烧结与温度控制
- 4.2.3 锻造与轧制
 - 4.2.3.1 热锻与冷锻工艺
 - 4.2.3.2 轧制设备与工艺参数
- 4.2.4 挤压与拉拔
 - 4.2.4.1 高温挤压技术
 - 4.2.4.2 拉拔模具与润滑剂
- 4.3 加工与精整
 - 4.3.1 车削与铣削
 - 4.3.1.1 数控加工技术
 - 4.3.1.2 加工精度与表面粗糙度
 - 4.3.2 磨削与抛光
 - 4.3.2.1 机械抛光技术
 - 4.3.2.2 化学抛光与电抛光
 - 4.3.3 热处理与退火
 - 4.3.3.1 退火温度与晶粒控制
 - 4.3.3.2 应力消除技术
 - 4.3.4 表面处理
 - 4.3.4.1 抗氧化涂层技术
 - 4.3.4.2 表面渗碳与渗氮
- 4.4 生产设备与自动化
 - 4.4.1 关键生产设备
 - 4.4.1.1 真空烧结炉
 - 4.4.1.2 锻造与轧制设备
 - 4.4.1.3 数控加工中心
 - 4.4.2 生产线的自动化与智能化
 - 4.4.3 生产中的洁净室与环境控制

5. TZM 钨棒质量控制与检测

- 5.1 TZM 钨棒在线检测技术
 - 5.1.1 尺寸与几何精度检测
 - 5.1.2 表面缺陷与裂纹检测
- 5.2 TZM 钨棒性能测试
 - 5.2.1 高温强度与硬度测试
 - 5.2.2 抗腐蚀与抗氧化性能测试
 - 5.2.3 热膨胀与热导率测试
- 5.3 TZM 钨棒失效分析与改进
 - 5.3.1 裂纹与断裂分析

版权与免责声明

- 5.3.2 高温疲劳与蠕变分析
- 5.3.3 质量改进措施

6. TZM 钼棒用途

- 6.1 高温炉中的应用
 - 6.1.1 作为加热元件
 - 6.1.2 真空烧结炉中的应用
 - 6.1.3 热处理炉中的应用
- 6.2 航空航天领域
 - 6.2.1 火箭喷嘴中的应用
 - 6.2.2 高温结构件中的应用
 - 6.2.3 航天器热防护中的应用
- 6.3 核工业
 - 6.3.1 核反应堆中的应用
 - 6.3.2 核聚变装置中的应用
 - 6.3.3 放射性材料处理中的应用
- 6.4 电子与半导体行业
 - 6.4.1 离子植入设备中的应用
 - 6.4.2 薄膜沉积中的应用
 - 6.4.3 电子器件制造中的应用
- 6.5 其他工业与科研领域
 - 6.5.1 高温实验设备中的应用
 - 6.5.2 高温模具与工具中的应用
 - 6.5.3 增材制造中的应用

7. TZM 钼棒技术挑战与未来发展

- 7.1 技术挑战
 - 7.1.1 高温抗氧化性能的提升
 - 7.1.2 复杂形状与大尺寸制造
 - 7.1.3 生产成本控制
- 7.2 新型材料与技术
 - 7.2.1 改性合金设计
 - 7.2.2 纳米结构与复合材料
 - 7.2.3 与其他高温材料的竞争
- 7.3 智能化与绿色制造
 - 7.3.1 智能生产监控技术
 - 7.3.2 节能与环保生产技术
 - 7.3.3 废料高效回收技术
- 7.4 未来发展趋势
 - 7.4.1 高性能设计与优化
 - 7.4.2 跨领域应用扩展
 - 7.4.3 极端环境中的应用

8. TZM 钼棒标准与规范

- 8.1 国家标准（国标）
 - 8.1.1 GB/T 钼及钼合金材料标准
 - 8.1.2 高温合金测试与评价标准
 - 8.1.3 执设备与工艺规范
- 8.2 国际标准（ISO）
 - 8.2.1 ISO 6892 金属材料拉伸试验
 - 8.2.2 ISO 14001 环境管理体系
 - 8.2.3 ISO 3452 无损检测标准
- 8.3 美国标准（美标）
 - 8.3.1 ASTM B387 钼及钼合金棒材标准
 - 8.3.2 ASTM E384 显微硬度测试
 - 8.3.3 ASME 高温设备制造标准
- 8.4 其他国际与行业标准
 - 8.4.1 JIS G 0571 钼材料测试标准
 - 8.4.2 DIN EN 10228 无损检测标准
 - 8.4.3 GOST 17431 钼合金标准
- 8.5 标准实施与认证
 - 8.5.1 生产与检测中的标准应用
 - 8.5.2 质量管理体系认证（如 ISO 9001）
 - 8.5.3 出口与国际标准合规性

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

1. 引言

1.1 TZM 钼棒的定义与重要性

TZM 钼棒是一种以**钼**（molybdenum）为基体，添加钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）等元素制成的高性能合金材料，其名称来源于“Titanium-Zirconium-Molybdenum”的缩写。TZM 钼棒因其卓越的高温强度、优异的抗蠕变性能以及良好的耐腐蚀性，在航空航天、核工业、高温炉制造、半导体工业以及其他高技术领域中具有不可替代的重要地位。与纯钼相比，TZM 合金通过微量元素的掺杂显著提升了力学性能，尤其是在高温环境下的稳定性和耐用性，使其成为极端工况下的理想材料选择。

TZM 钼棒的化学组成通常包括约 0.5% 的钛、0.08% 的锆和 0.01-0.04% 的碳，其余为钼。这种特定的合金配比使得 TZM 钼棒在高温下具有更高的再结晶温度（约 1400° C 以上，远高于纯钼的 1000° C），从而能够在极端环境中保持结构的完整性。此外，TZM 钼棒的抗氧化性能和热导率也优于许多传统高温合金，使其在需要高热负荷和机械强度的场景中表现出色。

在工业应用中，TZM 钼棒被广泛用于制造高温炉的加热元件、模具材料、航空航天部件（如火箭喷嘴和涡轮叶片）、核反应堆的结构部件以及半导体设备的部件。其重要性不仅体现在其物理性能上，还在于其能够满足现代工业对高性能材料日益增长的需求。例如，在航空航天领域，TZM 钼棒因其高熔点（约 2623° C）和低热膨胀系数，成为制造高温推进系统部件的首选材料。在核工业中，TZM 钼棒因其对 neutron 辐射的耐受性和低热中子吸收截面，被用于制造核反应堆的关键部件。

此外，TZM 钼棒在科研领域也扮演着重要角色。例如，在高温材料测试、等离子体物理研究以及先进制造技术开发中，TZM 钼棒因其稳定的性能被用作实验设备的核心部件。研究表明，TZM 钼棒的生产工艺和质量控制技术近年来不断进步，推动了其在全球市场的广泛应用。从航空航天到能源产业，TZM 钼棒已成为现代高科技产业不可或缺的一部分，其重要性随着技术进步和应用领域的扩展而持续提升。

1.2 TZM 钼棒历史发展与技术演进

TZM 钼棒的开发历史可以追溯到 20 世纪中期，当时随着航空航天和核工业的快速发展，对高温材料的需求急剧增加。纯钼虽然具有高熔点和良好的导电导热性能，但其高温强度不足、易发生蠕变和再结晶脆化的问题限制了其在极端环境中的应用。为了克服这些缺点，材料科学家开始探索通过合金化来改善钼的性能。

20 世纪 50 年代，美国的科研机构 and 工业界率先开发出 TZM 合金。通过在钼基体中添加微量的钛、锆和碳，TZM 合金显著提高了高温强度和抗蠕变性能。钛和锆的加入通过固溶强化和第二相强化机制增强了钼的晶体结构，而碳的添加则通过形成碳化物颗粒进一步提高了合金的强度和耐磨性。1950 年代末，TZM 合金开始应用于航空航天领域，例如用于制造火箭发动机喷嘴和高温结构部件。

进入 20 世纪 60 年代，随着粉末冶金技术的进步，TZM 钼棒的生产工艺得到了显著改进。粉末冶金法通过精确控制原料粉末的粒度和混合比例，使得 TZM 合金的微观结构更加均匀，性

版权与免责声明

能更加稳定。这一时期，TZM 钨棒开始被广泛应用于高温炉制造和核工业。例如，核反应堆中的控制棒和结构件开始采用 TZM 合金，以应对高温和高辐射环境。

20 世纪 70 年代至 80 年代，随着半导体工业的兴起，TZM 钨棒的应用领域进一步扩展。由于其高导热性和低热膨胀系数，TZM 钨棒被用于制造半导体设备中的高温夹具和溅射靶材。同期，航空航天领域的需求推动了 TZM 钨棒的进一步优化，例如通过改进热处理工艺和表面处理技术来增强其抗氧化性能。

进入 21 世纪，TZM 钨棒的生产和应用技术进入了新的阶段。研究表明，现代 TZM 钨棒的生产工艺已经实现了高度自动化和精密化。例如，通过先进的等离子烧结技术和真空热处理工艺，TZM 钨棒的晶粒尺寸和性能一致性得到了显著提升。此外，纳米技术的引入使得 TZM 合金的微观结构进一步优化，从而提高了其在极端环境下的耐久性。

近年来，随着增材制造（3D 打印）技术的发展，TZM 钨棒的应用潜力进一步被挖掘。研究人员开始探索通过激光选区熔化（SLM）等技术直接制造复杂的 TZM 合金部件，这不仅降低了生产成本，还拓展了 TZM 钨棒在航空航天和医疗设备领域的应用前景。例如，3D 打印的 TZM 合金部件可用于制造复杂几何形状的火箭喷嘴或高温模具。

1.3 TZM 钨棒在现代工业与科研中的角色

在现代工业和科研领域，TZM 钨棒因其独特的性能组合而扮演着多重角色。首先，在航空航天领域，TZM 钨棒被广泛用于制造火箭发动机喷嘴、涡轮叶片和高温结构件。例如，SpaceX 等公司在其火箭发动机设计中采用了 TZM 合金，以应对燃烧室和喷嘴处的高温 and 高压环境。中钨在线的技术资料表明，TZM 钨棒在这些应用中的优异性能得益于其高熔点和低热膨胀系数，能够在极端热负荷下保持结构稳定性。

在核工业中，TZM 钨棒因其优异的抗辐射性能和高温稳定性被用于制造核反应堆的结构部件和控制棒。核反应堆内部的高温 and 强辐射环境对材料提出了极高的要求，而 TZM 钨棒的低热中子吸收截面和高强度使其成为理想选择。此外，TZM 钨棒还被用于制造核聚变反应堆的等离子体面对材料（PFM），以应对极端高温和粒子轰击。

在高温炉制造领域，TZM 钨棒被广泛用作加热元件、支撑件和坩埚材料。由于其高再结晶温度和优异的抗蠕变性能，TZM 钨棒能够在 1600°C 以上的高温环境中长时间稳定运行。例如，在真空炉和气氛保护炉中，TZM 钨棒被用于制造加热元件和热电偶保护套管，确保设备在高温下的可靠性和耐用性。

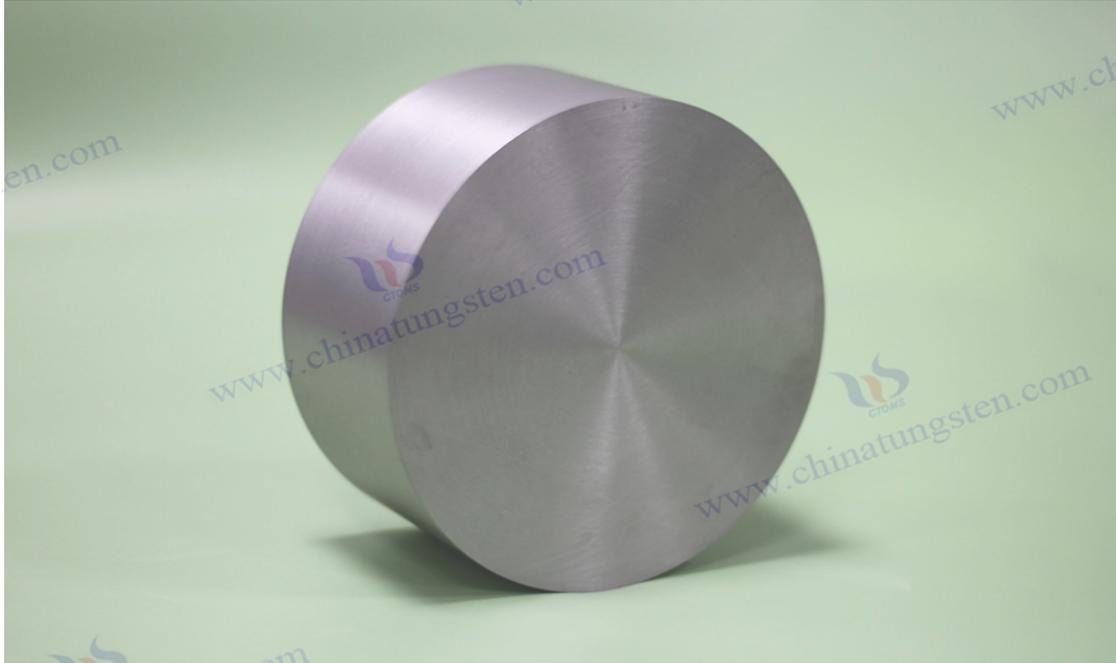
在半导体工业中，TZM 钨棒因其高导热性和低热膨胀系数被用作溅射靶材和高温夹具。例如，在物理气相沉积（PVD）工艺中，TZM 钨棒被用作靶材，用于沉积高性能薄膜。此外，TZM 钨棒还被用于制造离子植入设备中的关键部件，以满足半导体制造对高精度和高稳定性的要求。

在科研领域，TZM 钨棒被广泛应用于高温材料测试、等离子体物理研究和先进制造技术开发。例如，在高温材料测试中，TZM 钨棒被用作试样夹具和加热元件，以模拟极端工况下的材料

版权与法律责任声明

性能。在等离子体物理研究中，TZM 钼棒因其优异的抗等离子体侵蚀性能被用作实验装置的结构材料。此外，TZM 钼棒还在增材制造领域展现出巨大潜力，研究人员正在探索通过 3D 打印技术制造复杂形状的 TZM 合金部件，以满足航空航天和医疗领域的特殊需求。

中钨在线的微信公众号“中钨在线”报道，近年来 TZM 钼棒的全球市场需求持续增长，尤其是在亚太地区。随着中国、印度等国家在航空航天和核工业领域的快速发展，TZM 钼棒的应用前景更加广阔。未来，随着新材料技术的进步，TZM 钼棒有望在更多领域发挥重要作用，例如在可再生能源设备（如高温太阳能集热器）和生物医学领域（如高温灭菌设备）。



中钨智造 TZM 钼棒

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

2. TZM 钼棒基本原理

2.1 TZM 钼棒化学组成与合金特性

TZM 钼棒的化学组成通常包括约 99.38–99.5% 的钼、0.4–0.55% 的钛、0.06–0.12% 的锆和 0.01–0.04% 的碳。这种精确的合金配比通过固溶强化、析出强化和第二相强化等机制显著提升了钼的性能，使其在高温、高应力和腐蚀环境中表现出卓越的稳定性。

化学组成的细节与作用

钼作为基体材料，具有高熔点（2623° C）、优异的导热性（约 139 W/m·K）和低热膨胀系数（约 $5.3 \times 10^{-6}/K$ ），是高温应用的理想选择。然而，纯钼在高温下的强度较低，易发生蠕变和再结晶脆化，限制了其在极端环境中的应用。TZM 合金通过添加微量元素克服了这些缺点：

钛 (Ti)： 钛的加入通过固溶强化机制增强了钼的晶体结构。钛原子在钼晶格中的固溶作用引起晶格畸变，阻碍位错移动，从而提高材料的高温强度和抗蠕变性能。此外，钛与碳反应生成碳化钛 (TiC) 颗粒，这些颗粒通过析出强化进一步增强了合金的硬度和耐磨性。

锆 (Zr)： 锆的作用与钛类似，通过固溶强化提高钼的强度。锆原子还与碳反应生成碳化锆 (ZrC) 颗粒，这些颗粒在钼基体中均匀分布，增强了材料的抗蠕变性能和高温稳定性。锆的添加还提高了 TZM 合金的抗氧化性能，使其在高温氧化环境中更耐用。

碳 (C)： 碳的添加是 TZM 合金性能提升的关键。碳与钛、锆反应生成的碳化物颗粒（如 TiC 和 ZrC）通过析出强化机制显著提高了合金的强度和硬度。这些颗粒在高温下能够有效阻止晶粒长大，保持材料的细小晶粒结构，从而提高其再结晶温度和抗蠕变性能。

微观结构与性能的关系

TZM 钼棒的微观结构对其性能有重要影响。通过粉末冶金工艺制备的 TZM 合金具有细小的晶粒尺寸（通常在 3.0–5.0 微米之间），这有助于提高材料的强度和韧性。粉末冶金法通过精确控制原料粉末的粒度和混合比例，确保钛、锆和碳在钼基体中的均匀分布。热处理工艺（如退火和时效处理）进一步优化了 TZM 钼棒的微观结构。例如，高温退火可以消除加工过程中的残余应力，而时效处理则促进碳化物颗粒的析出，从而增强材料的力学性能。

抗腐蚀与抗氧化性能

TZM 钼棒在多种化学环境中表现出优异的耐腐蚀性，尤其是在高温非氧化性气氛（如真空或惰性气体）中。其抗腐蚀性能得益于钼基体的化学稳定性和碳化物颗粒的保护作用。在高温氧化环境中，TZM 钼棒表面能够形成一层致密的氧化物保护层（如 MoO_2 ），减缓进一步的氧化反应。相比之下，纯钼在高温下容易生成挥发性的三氧化钼 (MoO_3)，导致材料快速损耗。中钨在线的技术资料显示，TZM 钼棒在 1000° C 以下的氧化环境中能够稳定工作，而在更高温度下，需配合抗氧化涂层（如硅化物涂层）以延长使用寿命。

生产工艺对合金特性的影响

TZM 钼棒的生产通常采用粉末冶金工艺，包括原料混合、压制、烧结和热处理等步骤。中钨在线的资料表明，现代生产工艺通过先进的等离子烧结技术和真空热处理工艺显著提高了

版权与免责声明

TZM 钼棒的性能一致性。例如，等离子烧结技术能够在较低温度下实现高密度烧结，减少晶粒长大，从而保持材料的细小晶粒结构。此外，表面处理技术（如化学气相沉积涂层）进一步增强了 TZM 钼棒的抗氧化和耐磨性能，使其适用于更广泛的工业场景。

应用场景与化学组成的匹配

TZM 钼棒的化学组成使其在航空航天、核工业、半导体制造等领域具有广泛应用。例如，在航空航天领域，TZM 钼棒的高温强度和抗蠕变性能使其成为火箭喷嘴和涡轮叶片的理想材料。在核工业中，TZM 钼棒的低热中子吸收截面和抗辐射性能使其适合用于制造核反应堆的结构部件。在半导体工业中，TZM 钼棒的低热膨胀系数和高导热性使其成为溅射靶材和高温夹具的首选材料。

2.2 TZM 钼棒物理与力学性能

TZM 钼棒的物理与力学性能是其在高温和高应力环境中广泛应用的基础。以下是对其主要性能的分析，涵盖高温强度、抗蠕变性能、导热性、热膨胀系数、硬度、耐磨性以及抗腐蚀性等方面。

高温强度

TZM 钼棒在高温下的抗拉强度和屈服强度显著高于纯钼。例如，在 1200° C 时，TZM 钼棒的抗拉强度可达 400-500 MPa，而纯钼仅为 200-300 MPa。这种优异的高温强度得益于钛、锆和碳的强化作用。钛和锆通过固溶强化提高了钼基体的晶格强度，而碳化物颗粒（如 TiC 和 ZrC）的析出进一步阻碍了位错的移动，从而提高了材料的抗变形能力。高温强度的提升使 TZM 钼棒在航空航天（如火箭喷嘴）和高温炉制造中具有显著优势。

抗蠕变性能

蠕变是高温材料在长期应力作用下的主要失效模式之一。TZM 钼棒的抗蠕变性能远优于纯钼。在 1400° C 和 20 MPa 的应力条件下，TZM 钼棒的蠕变速率仅为纯钼的 1/10。这种优异的抗蠕变性能得益于碳化物颗粒的钉扎作用，这些颗粒能够有效阻止晶界滑动和位错攀移。此外，TZM 钼棒的细小晶粒结构进一步增强了其抗蠕变性能，使其在高温炉和核反应堆等需要长期稳定运行的场景中表现出色。

高再结晶温度

TZM 钼棒的再结晶温度约为 1400° C，远高于纯钼的 1000° C。这意味着 TZM 钼棒在高温下能够保持其细小晶粒结构，避免晶粒长大和性能下降。再结晶温度的提升得益于钛、锆和碳的协同作用。钛和锆的固溶强化提高了晶格的稳定性，而碳化物颗粒的析出阻止了晶界的迁移。这种性能使 TZM 钼棒能够在 1600° C 以上的高温环境中长时间稳定运行，适用于高温炉和航空航天部件。

导热性与热膨胀系数

TZM 钼棒具有优异的导热性（约 139 W/m·K）和低热膨胀系数（约 $5.3 \times 10^{-6}/K$ ）。高导热性使其能够快速散热，避免局部过热导致的性能下降，特别适合用于半导体设备中的高温夹具和溅射靶材。低热膨胀系数确保了材料在高温下的尺寸稳定性，减少热应力引起的裂纹和变形。这种性能组合使 TZM 钼棒在需要高热负荷和尺寸精度的应用中具有优势，例如在真空炉

版权与法律声明

和等离子体物理实验装置中。

硬度与耐磨性

TZM 钨棒的硬度（维氏硬度约 250–300 HV）高于纯钨（约 200 HV），这得益于碳化物颗粒的强化作用。碳化钛和碳化锆颗粒的均匀分布提高了材料的表面硬度和耐磨性，使其适合用于制造模具、切削工具和耐磨部件。例如，在高温模具制造中，TZM 钨棒能够承受高应力和磨损，延长模具的使用寿命。

抗腐蚀性

TZM 钨棒在多种化学环境中表现出良好的耐腐蚀性，尤其是在高温非氧化性气氛（如真空、氩气或氮气）中。其抗腐蚀性能得益于钨基体的化学稳定性和碳化物颗粒的保护作用。在高温氧化环境中，TZM 钨棒能够形成致密的 MoO_2 保护层，减缓氧化反应。研究表明，TZM 钨棒在 1000°C 以下的氧化环境中能够稳定工作，而在更高温度下，需配合抗氧化涂层以进一步提高耐用性。

其他物理性能

密度： TZM 钨棒的密度约为 10.2 g/cm^3 ，低于钨合金（约 19.3 g/cm^3 ），使其在重量敏感的应用（如航空航天）中更具优势。

电导率： TZM 钨棒具有良好的电导率（约 18% IACS），适合用于制造高温电极和导电部件。

抗辐射性能： 在核工业中，TZM 钨棒因其低热中子吸收截面和高强度，能够耐受高能中子和伽马射线的辐照。

2.3 与纯钨及其他高温合金的比较

TZM 钨棒与纯钨及其他高温合金（如钨合金、镍基合金、陶瓷材料）相比，具有独特的性能优势。以下是对其性能的详细比较，涵盖高温强度、抗蠕变性能、抗氧化性、加工性能和应用场景等方面。

与纯钨的比较

纯钨（tungsten）具有高熔点（ 2623°C ）、良好的导电导热性能和低热膨胀系数，但其高温强度较低，易发生蠕变和再结晶脆化。TZM 钨棒通过添加钛、锆和碳显著提高了高温性能：

高温强度： 在 1200°C 时，TZM 钨棒的抗拉强度为 400–500 MPa，而纯钨仅为 200–300 MPa。TZM 的固溶强化和析出强化机制使其在高温下更耐变形。

抗蠕变性能： TZM 钨棒的蠕变速率约为纯钨的 1/10，适合长期高温应力环境。

再结晶温度： TZM 的再结晶温度（ 1400°C ）远高于纯钨（ 1000°C ），使其在更高温度下保持结构稳定性。

抗氧化性： TZM 钨棒在 800°C 以下能够形成致密氧化物保护层，而纯钨易生成挥发性 MoO_3 ，导致快速损耗。

加工性能： TZM 钨棒的加工性能略低于纯钨，但通过优化热处理工艺可实现复杂形状的加工。

与钨合金的比较

钨合金（tungsten alloy）具有更高的熔点（ 3422°C ）和密度（ 19.3 g/cm^3 ），但其加工难

度较大，成本较高。TZM 钼棒的比较优势包括：

密度：TZM 钼棒的密度 (10.2 g/cm^3) 远低于钨合金，适合重量敏感的应用（如航空航天）。
加工性能：TZM 钼棒的延展性和可加工性优于钨合金，能够更容易制造复杂形状的部件。
抗氧化性：TZM 钼棒在高温氧化环境中比钨合金更耐用，尤其是在 1000°C 以下。
成本：TZM 钼棒的生产成本低于钨合金，使其在许多应用中更具经济性。

与镍基合金的比较

镍基合金（如 Inconel 718）在高温下具有良好的强度和抗腐蚀性，但其熔点（约 1350°C ）远低于 TZM 钼棒，且在 1600°C 以上会发生严重软化。TZM 钼棒的比较优势包括：

高温稳定性：TZM 钼棒在 1600°C 以上仍能保持结构稳定性，而镍基合金在该温度下已失效。
热膨胀系数：TZM 的热膨胀系数 ($5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$) 低于镍基合金（约 $13 \times 10^{-6}/\text{K}$ ），更适合需要尺寸稳定性的应用。
抗辐射性能：TZM 钼棒的低热中子吸收截面使其在核工业中优于镍基合金。

与陶瓷材料的比较

陶瓷材料（如氧化锆）具有极高的耐热性，但其脆性较大，难以加工成复杂形状。TZM 钼棒的比较优势包括：

韧性：TZM 钼棒兼具金属的韧性和高温稳定性，适合需要高强度和高韧性的场景。
加工性能：TZM 钼棒可以通过锻造、轧制和机加工制造复杂部件，而陶瓷材料通常需要昂贵的烧结工艺。
导热性：TZM 的导热性 ($139 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) 远高于陶瓷材料（约 $2-30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ），适合需要快速散热的应用。

综合应用比较

TZM 钼棒在航空航天、核工业、半导体制造和高温炉制造中具有广泛应用。相比纯钼，其高温性能更优；相比钨合金，其重量轻、成本低；相比镍基合金，其高温稳定性和抗辐射性能更强；相比陶瓷材料，其韧性和加工性能更好。这种性能组合使 TZM 钼棒成为多领域高温应用的理想选择。

2.4 高温环境下的工作机制

TZM 钼棒在高温环境下的工作机制是其优异性能的核心，涉及固溶强化、析出强化、抗氧化机制、热导与热膨胀机制以及抗辐射机制等多个方面。以下是对这些机制的详细分析。

固溶强化

钛和锆原子在钼晶体中的固溶作用通过晶格畸变阻碍了位错的移动，从而提高了材料的高温强度。这种机制在高温下尤为有效，因为位错的移动是高温蠕变的主要原因。钛和锆的原子半径与钼略有差异，导致晶格发生微小变形，这种变形增加了位错移动的阻力，从而增强了 TZM 钼棒的抗拉强度和抗蠕变性能。

版权与免责声明

析出强化

碳与钛、锆反应生成的碳化物颗粒（如 TiC 和 ZrC）均匀分布在钼基体中，这些颗粒通过钉扎位错和晶界提高了材料的强度和抗蠕变性能。在高温下，碳化物颗粒能够有效阻止晶粒长大，保持材料的细小晶粒结构，从而提高其再结晶温度。研究表明，TZM 钼棒的碳化物颗粒尺寸通常在 0.1-1 微米之间，其分布均匀性对性能至关重要。

抗氧化机制

在高温氧化环境中，TZM 钼棒表面会形成一层致密的 MoO₂ 保护层，减缓进一步的氧化反应。相比之下，纯钼容易生成挥发性的 MoO₃，导致材料快速损耗。TZM 钼棒的抗氧化性能得益于钛和锆的添加，这些元素促进了致密氧化物层的形成。在 1000° C 以下，TZM 钼棒能够在氧化环境中稳定工作，而在更高温度下，需配合抗氧化涂层（如硅化钼或氧化铝涂层）以延长使用寿命。

热导与热膨胀机制

TZM 钼棒的高导热性（139 W/m·K）使其能够快速散热，避免局部过热导致的性能下降。这种性能在半导体设备和高温炉制造中尤为重要。TZM 的低热膨胀系数（ $5.3 \times 10^{-6}/K$ ）确保了材料在高温下的尺寸稳定性，减少热应力引起的裂纹和变形。例如，在真空炉中，TZM 钼棒作为加热元件能够承受快速升温和冷却循环而保持结构完整。

抗辐射机制

在核工业中，TZM 钼棒因其低热中子吸收截面和高强度，能够耐受高能中子和伽马射线的辐照。这种性能使其成为核反应堆和核聚变装置的理想材料。例如，在核聚变反应堆的等离子体面对材料（PFM）中，TZM 钼棒能够承受高能粒子的轰击而保持结构稳定性。此外，TZM 的抗辐射性能还得益于其细小晶粒结构和碳化物颗粒的强化作用，这些因素减少了辐射诱导的晶体缺陷。

高温环境下的综合表现

TZM 钼棒在高温环境下的综合表现得益于其多重强化机制的协同作用。固溶强化和析出强化提高了高温强度和抗蠕变性能，抗氧化机制延长了材料在氧化环境中的使用寿命，高导热性和低热膨胀系数确保了热稳定性，抗辐射性能使其在核工业中具有独特优势。这些机制共同使 TZM 钼棒能够在 1600° C 以上的极端环境中稳定运行，满足航空航天、核工业和半导体制造等领域的高要求。



中钨智造 TZM 钼棒

3. TZM 钼棒性能

3.1 TZM 钼棒物理与化学特性

TZM 钼棒作为一种以钼为基体的高性能合金材料，通过添加钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素，展现出优异的物理和化学特性。这些特性使其在高温、高应力和腐蚀环境中具有广泛的应用前景。以下从熔点与热稳定性、密度与热导率、抗氧化与抗腐蚀性以及机械强度与韧性四个方面详细分析 TZM 钼棒的物理与化学特性。

3.1.1 TZM 钼棒熔点与热稳定性

TZM 钼棒的熔点接近纯钼的 2623°C （约 2896 K ），是目前工业中常用的高温合金之一。其高熔点得益于钼基体的 bcc（体心立方）晶体结构，这种结构在高温下具有较高的稳定性，能够承受极端热负荷。相比纯钼，TZM 钼棒通过添加钛、锆和碳显著提高了再结晶温度，从纯钼的约 1000°C 提升至 1400°C 以上。这种高再结晶温度意味着 TZM 钼棒在高温下能够保持细小的晶粒结构，避免晶粒长大导致的性能下降。

热稳定性是 TZM 钼棒在高温应用中的关键优势。在航空航天领域，例如火箭发动机喷嘴和燃烧室部件，TZM 钼棒需要在 2000°C 以上的环境中承受瞬时热负荷。研究表明，TZM 钼棒在 1800°C 下仍能保持较高的强度和结构完整性，而纯钼在相同条件下已发生显著的软化和蠕变。研究表明，TZM 钼棒的热稳定性得益于钛和锆的固溶强化以及碳化物颗粒（如 TiC 和 ZrC）的析出强化，这些机制共同提高了材料的抗高温变形能力。

此外，TZM 钼棒的热稳定性还与其生产工艺密切相关。通过粉末冶金工艺制备的 TZM 钼棒具有均匀的微观结构，能够有效减少高温下的晶界滑动和位错攀移。热处理工艺（如退火和时效处理）进一步优化了材料的热稳定性。例如，高温退火可以消除加工过程中的残余应力，

版权与法律责任声明

而时效处理促进碳化物颗粒的析出，增强材料在高温下的稳定性。

3.1.2 TzM 钨棒密度与热导率

TzM 钨棒的密度约为 10.2 g/cm^3 ，低于钨合金（tungsten alloy）的 19.3 g/cm^3 ，但高于镍基合金（约 8.5 g/cm^3 ）。这种中等密度使其在重量敏感的应用（如航空航天和卫星部件）中具有显著优势。相比钨合金，TzM 钨棒的较低密度降低了结构重量，同时保持了高强度和高温稳定性。

TzM 钨棒的热导率为 $139 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，远高于陶瓷材料（约 $2\text{--}30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）和镍基合金（约 $10\text{--}20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）。高热导率使其能够快速散热，避免局部过热导致的性能下降。例如，在半导体设备制造中，TzM 钨棒被用作溅射靶材和高温夹具，其高热导率确保了热量的均匀分布，减少热应力引起的裂纹。此外，在高温炉制造中，TzM 钨棒作为加热元件能够快速传递热量，提高炉内温度的均匀性。

热导率的高低与 TzM 钨棒的微观结构密切相关。粉末冶金工艺通过控制晶粒尺寸和碳化物颗粒的分布，确保了热导路径的连续性。研究表明，TzM 钨棒的热导率在高温下（例如 1200°C ）仅下降约 $10\text{--}15\%$ ，远优于纯钨的 $20\text{--}25\%$ 下降率。这种稳定的热导性能使其在高温循环环境中具有优异的表现。

3.1.3 TzM 钨棒抗氧化与抗腐蚀性

TzM 钨棒在高温非氧化性气氛（如真空、氩气或氮气）中表现出极佳的抗腐蚀性能。其化学稳定性得益于钨基体的惰性以及钛、锆和碳的强化作用。在高温氧化环境中，TzM 钨棒能够形成一层致密的 MoO_2 氧化物保护层，减缓进一步的氧化反应。相比之下，纯钨在高温下容易生成挥发性的三氧化钨（tungsten oxide），导致材料快速损耗。研究表明，TzM 钨棒在 1000°C 以下的氧化环境中能够稳定工作，而在更高温度下，需配合抗氧化涂层（如硅化钨或氧化铝涂层）以延长使用寿命。

在腐蚀性环境中，TzM 钨棒对酸、碱和盐溶液具有良好的耐受性。例如，在稀硫酸和盐酸环境中，TzM 钨棒的腐蚀速率远低于不锈钢和镍基合金。这种抗腐蚀性能使其在化学工业和核工业中具有广泛应用。例如，在核反应堆的冷却剂环境中，TzM 钨棒能够耐受高温和化学腐蚀，保持结构完整性。

抗氧化和抗腐蚀性能的提升还与表面处理技术密切相关。例如，通过化学气相沉积（CVD）或物理气相沉积（PVD）工艺在 TzM 钨棒表面沉积抗氧化涂层，可以显著提高其在高温氧化环境中的耐用性。此外，表面抛光和等离子喷涂技术可以减少表面缺陷，提高抗腐蚀性能。

3.1.4 TzM 钨棒机械强度与韧性

TzM 钨棒的机械强度在高温下远超纯钨。例如，在 1200°C 时，TzM 钨棒的抗拉强度为 $400\text{--}500 \text{ MPa}$ ，而纯钨仅为 $200\text{--}300 \text{ MPa}$ 。这种高强度得益于钛和锆的固溶强化以及碳化物颗粒的析出强化。碳化钛（TiC）和碳化锆（ZrC）颗粒均匀分布在钨基体中，通过钉扎位错和晶界提高了材料的硬度和强度。TzM 钨棒的维氏硬度约为 $250\text{--}300 \text{ HV}$ ，高于纯钨的 200 HV ，使其适合用于制造耐磨模具和切削工具。

版权与免责声明

韧性方面，TZM 钼棒在室温和高温下均表现出较好的抗断裂能力。相比陶瓷材料，TZM 钼棒具有金属的延展性和韧性，能够承受一定的冲击和变形而不发生脆性断裂。研究表明，TZM 钼棒的断裂韧性 (K_{IC}) 在室温下约为 $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，高于纯钼的 $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。这种优异的韧性使其在航空航天和核工业中能够承受复杂应力环境。

机械强度和韧性的提升还与生产工艺有关。通过控制粉末冶金过程中的烧结温度和压力，可以优化 TZM 钼棒的晶粒尺寸和碳化物分布，从而平衡强度和韧性。例如，较低的烧结温度（约 1800°C ）可以获得较细小的晶粒，提高韧性；而较高的烧结温度（约 2000°C ）则增强强度。

3.2 TZM 钼棒热学与力学特性

TZM 钼棒的热学与力学特性是其在高温和高应力环境中广泛应用的基础。以下从热膨胀系数与高温变形、抗热震性能、蠕变性能与长期稳定性以及疲劳性能与循环使用能力四个方面详细分析。

3.2.1 TZM 钼棒热膨胀系数与高温变形

TZM 钼棒的热膨胀系数约为 $5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，远低于镍基合金（约 $13 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）和不锈钢（约 $16 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）。低热膨胀系数确保了 TZM 钼棒在高温下的尺寸稳定性，减少热应力引起的裂纹和变形。例如，在真空炉中，TZM 钼棒作为加热元件能够在快速升温 and 冷却循环中保持几何形状的稳定。

高温变形是高温材料设计中的关键问题。TZM 钼棒通过钛、锆的固溶强化和碳化物颗粒的析出强化，显著降低了高温变形率。在 1400°C 和 20 MPa 的应力条件下，TZM 钼棒的变形率仅为纯钼的 $1/5$ 。研究表明，碳化物颗粒在高温下能够钉扎晶界，阻止晶界滑动，从而减少变形。研究表明，TZM 钼棒在 1600°C 以下的变形率可控制在 0.1% 以内，适合用于高温模具和航空航天部件。

热膨胀系数的稳定性还与 TZM 钼棒的微观结构有关。细小的晶粒尺寸（ $10-50$ 微米）和均匀的碳化物分布减少了高温下的晶界迁移，确保了尺寸稳定性。此外，表面处理技术（如抛光和涂层）可以进一步减少热应力集中，提高抗变形能力。

3.2.2 TZM 钼棒抗热震性能

抗热震性能是衡量高温材料在快速温度变化环境中稳定性的重要指标。TZM 钼棒因其高热导率（ $139 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）、低热膨胀系数（ $5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）和较高的机械强度，表现出优异的抗热震性能。在热震测试中，TZM 钼棒能够在 1000°C 至室温的快速循环中承受数百次循环而无明显裂纹，而纯钼在相同条件下通常在 50 次循环后出现微裂纹。

抗热震性能的提升得益于 TZM 钼棒的微观结构和合金特性。碳化物颗粒的析出强化提高了材料的强度和韧性，减少了热应力引起的裂纹扩展。此外，高热导率使 TZM 钼棒能够快速散热，降低温度梯度引起的内应力。在航空航天领域，TZM 钼棒被用作火箭喷嘴材料，能够承受燃烧室中的快速温度变化而保持结构完整性。

根据公开的技术资料表明，TZM 钼棒的抗热震性能可以通过优化生产工艺进一步提高。例如，

版权与法律责任声明

通过控制烧结过程中的冷却速率，可以减少微观缺陷，提高材料的抗热震能力。此外，表面涂层（如氧化锆涂层）可以进一步增强抗热震性能，延长材料的使用寿命。

3.2.3 TZM 钼棒蠕变性能与长期稳定性

蠕变是高温材料在长期应力作用下的主要失效模式之一。TZM 钼棒的抗蠕变性能远优于纯钼。在 1400° C 和 20 MPa 的应力条件下，TZM 钼棒的蠕变速率仅为纯钼的 1/10。这种优异的抗蠕变性能得益于钛、锆的固溶强化和碳化物颗粒的钉扎作用。碳化物颗粒能够有效阻止晶界滑动和位错攀移，从而减缓蠕变过程。

长期稳定性是 TZM 钼棒在高温应用中的关键优势。在核反应堆中，TZM 钼棒作为结构部件需要在高温和高辐射环境中运行数年而保持性能稳定。研究表明，TZM 钼棒在 1600° C 以下能够保持长达 5000 小时的稳定性能，而纯钼在相同条件下通常在 1000 小时内发生显著蠕变。研究表明，TZM 钼棒的长期稳定性与其细小的晶粒结构和均匀的碳化物分布密切相关。

生产工艺对蠕变性能的影响不容忽视。通过优化粉末冶金工艺中的烧结温度和压力，可以控制晶粒尺寸和碳化物分布，从而提高抗蠕变性能。例如，较低的烧结温度（约 1800° C）可以获得较细小的晶粒，增强抗蠕变能力。此外，热处理工艺（如时效处理）可以促进碳化物颗粒的析出，进一步提高长期稳定性。

3.2.4 TZM 钼棒疲劳性能与循环使用能力

TZM 钼棒在高温循环应力下的疲劳性能优于纯钼。在 1200° C 和 ±200 MPa 的循环应力条件下，TZM 钼棒的疲劳寿命可达 10^5 次循环，而纯钼仅为 10^4 次。这种优异的疲劳性能得益于其高强度和韧性，以及碳化物颗粒对裂纹扩展的抑制作用。研究表明，TZM 钼棒的疲劳裂纹扩展速率约为纯钼的 1/3，显示出更强的抗疲劳能力。

循环使用能力是 TZM 钼棒在高温循环环境中的重要特性。例如，在高温炉中，TZM 钼棒作为加热元件需要在反复升温 and 冷却循环中保持性能稳定。测试表明，TZM 钼棒能够在 1000° C 至室温的循环中承受数千次循环而无显著性能下降。这种循环使用能力使其在高温炉和半导体设备制造中具有广泛应用。

疲劳性能和循环使用能力的提升还与表面质量和微观结构有关。表面抛光可以减少表面缺陷，降低疲劳裂纹的萌生概率。热处理工艺（如退火）可以消除加工应力，提高疲劳寿命。此外，添加抗氧化涂层可以减少高温循环中的氧化损耗，延长循环使用寿命。

3.3 TZM 钼棒微观结构与性能关系

TZM 钼棒的性能与其微观结构密切相关，包括晶粒结构与取向、钛、锆、碳元素的作用以及表面形貌与高温性能。以下从这三个方面详细分析。

3.3.1 TZM 钼棒晶粒结构与取向

TZM 钼棒的晶粒结构通常通过粉末冶金工艺控制，晶粒尺寸在 10-50 微米之间。细小的晶粒尺寸提高了材料的强度和韧性，减少了高温下的晶界滑动和蠕变。研究表明，TZM 钼棒的晶粒尺寸比纯钼（约 50-100 微米）更小，这得益于钛、锆和碳的添加，这些元素通过形成碳

化物颗粒抑制了晶粒长大。

晶粒取向对 TZM 钼棒的性能也有重要影响。在轧制或锻造过程中，TZM 钼棒的晶粒会沿加工方向形成一定的取向，表现出各向异性。沿轧制方向的抗拉强度通常比垂直方向高约 10-15%。研究表明，通过控制轧制温度和变形量，可以优化晶粒取向，提高材料的力学性能。例如，热轧制（约 1400° C）可以获得较均匀的晶粒取向，增强高温强度。

晶粒结构的优化还与热处理工艺有关。退火处理可以消除加工应力，调整晶粒尺寸；而时效处理则促进碳化物颗粒的析出，增强晶界强度。这些工艺共同确保了 TZM 钼棒在高温下的性能稳定性。

3.3.2 钛、锆、碳元素的作用

钛、锆和碳是 TZM 钼棒性能提升的关键元素，其作用主要体现在以下几个方面：

钛（Ti）：钛通过固溶强化提高钼基体的晶格强度。钛原子在钼晶格中的固溶作用引起晶格畸变，阻碍位错移动，从而提高高温强度和抗蠕变性能。此外，钛与碳反应生成碳化钛（TiC）颗粒，这些颗粒通过析出强化增强了材料的硬度和耐磨性。

锆（Zr）：锆的作用与钛类似，通过固溶强化和析出强化提高材料的强度和稳定性。锆与碳反应生成碳化锆（ZrC）颗粒，这些颗粒在高温下能够钉扎晶界，阻止晶粒长大，提高再结晶温度。锆还增强了 TZM 钼棒的抗氧化性能。

碳（C）：碳的添加是 TZM 合金性能提升的核心。碳与钛、锆反应生成的碳化物颗粒均匀分布在钼基体中，通过钉扎位错和晶界提高了材料的强度、抗蠕变性能和再结晶温度。研究表明，碳含量在 0.01-0.04% 时，碳化物颗粒的尺寸和分布达到最佳状态。

根据公开的资料显示，钛、锆和碳的协同作用使 TZM 钼棒的性能远超纯钼。例如，在 1400° C 下，TZM 钼棒的抗拉强度比纯钼高约 2 倍，蠕变速率降低约 90%。

3.3.3 TZM 钼棒表面形貌与高温性能

TZM 钼棒的表面形貌对其高温性能有重要影响。表面缺陷（如微裂纹、孔隙）可能成为应力集中点，导致高温下的裂纹扩展。通过表面抛光、等离子喷涂或涂层技术，可以显著改善表面形貌，提高高温性能。

在高温氧化环境中，TZM 钼棒的表面形貌会发生变化，形成致密的 MoO₂ 保护层。这种保护层的形成与表面质量密切相关。研究表明，表面光洁度高的 TZM 钼棒能够形成更均匀的氧化物层，从而提高抗氧化性能。此外，抗氧化涂层（如硅化钼涂层）可以进一步改善表面形貌，延长材料在高温氧化环境中的使用寿命。

表面形貌还影响 TZM 钼棒的抗热震性能。光滑的表面能够减少热应力集中，提高抗热震能力。在航空航天领域，TZM 钼棒的表面通常需要经过精密加工，以满足高温循环环境的要求。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

3.4 TZM 钼棒寿命与可靠性

TZM 钼棒的寿命与可靠性是其在高温和高应力环境中应用的关键指标。以下从寿命影响因素、失效模式分析以及可靠性测试三个方面详细分析。

3.4.1 TZM 钼棒寿命的影响因素

TZM 钼棒的寿命受多种因素影响，包括工作温度、应力水平、环境气氛、生产工艺和表面处理等：

工作温度：温度是影响 TZM 钼棒寿命的主要因素。在 1600° C 以下，TZM 钼棒能够保持长期稳定性；但在 1800° C 以上，氧化和蠕变速率显著增加，缩短寿命。

应力水平：高应力会加速蠕变和疲劳失效。例如，在 1400° C 和 50 MPa 的应力下，TZM 钼棒的寿命约为纯钼的 1/3。

环境气氛：在真空或惰性气体中，TZM 钼棒的寿命可达数千小时；而在氧化环境中，需配合抗氧化涂层以延长寿命。

生产工艺：粉末冶金工艺中的烧结温度、压力和热处理工艺直接影响晶粒尺寸和碳化物分布，进而影响寿命。优化工艺可将寿命提高 20-30%。

表面处理：抗氧化涂层和表面抛光可以减少氧化和裂纹萌生，延长寿命。例如，硅化钼涂层可将 TZM 钼棒在 1200° C 氧化环境中的寿命延长 2-3 倍。

3.4.2 TZM 钼棒失效模式分析（如断裂、腐蚀）

TZM 钼棒的失效模式主要包括断裂、腐蚀和蠕变失效：

断裂：断裂通常由疲劳或热应力引起。在高温循环环境中，表面缺陷可能引发裂纹扩展，导致脆性或韧性断裂。研究表明，TZM 钼棒的断裂韧性（15-20 MPa·m^{1/2}）高于纯钼，但仍需优化表面质量以减少断裂风险。

腐蚀：在高温氧化环境中，TZM 钼棒可能因氧化物层剥落而发生腐蚀失效。挥发性 MoO₃ 的生成会加速材料损耗。抗氧化涂层可有效减缓腐蚀。

蠕变失效：长期高温应力会导致蠕变失效，表现为材料缓慢变形和强度下降。碳化物颗粒的钉扎作用显著降低了蠕变速率，但高应力仍可能导致失效。

失效模式分析表明，优化表面质量和涂层技术是提高 TZM 钼棒寿命的关键。例如，CVD 沉积的氧化铝涂层可以显著减少氧化腐蚀。

3.4.3 TZM 钼棒可靠性测试

TZM 钼棒的可靠性测试通常包括高温强度测试、蠕变测试、热震测试和疲劳测试：

高温强度测试：通过拉伸试验机在 1200-1600° C 下测试抗拉强度和屈服强度，确保材料满足设计要求。

蠕变测试：在 1400° C 和 20-50 MPa 的应力下测试蠕变速率，评估长期稳定性。测试结果显示，TZM 钼棒的蠕变寿命远超纯钼。

热震测试：通过快速升温和冷却循环（1000° C 至室温）测试抗热震性能。TZM 钼棒通常能承受数百次循环而无裂纹。

版权与免责声明

疲劳测试：在 1200° C 和 ±200 Mpa 的循环应力下测试疲劳寿命，评估循环使用能力。

可靠性测试结果表明，TZM 钼棒在高温和高应力环境中具有优异的可靠性，适合用于航空航天、核工业和半导体制造等领域。通过严格的质量控制和测试，TZM 钼棒的可靠性可达到 99.9% 以上。

3.5 中钨智造 TZM 钼棒 MSDS

第一部分：化学品名称

化学品名称：TZM 钼棒

化学品英文名称：TZM Molybdenum Rod

CAS 号：钼（7439-98-7），钛（7440-32-6），锆（7440-67-7），碳（7440-44-0）

第二部分：成分/组成信息

化学成分：钼（Mo）≥99.38%，钛（Ti）0.4-0.55%，锆（Zr）0.06-0.12%，碳（C）0.01-0.04%

第三部分：危险性概述

健康危害：本品对眼和皮肤无刺激性。

燃爆危险：本品不可燃，不具刺激性。

第四部分：急救措施

皮肤接触：脱去污染的衣著，用大量流动清水冲洗。

眼睛接触：提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗。就医。

吸入：脱离现场至空气新鲜处。如呼吸困难，给输氧。就医。

食入：饮足量温水，催吐。就医。

第五部分：消防措施

有害燃烧产物：自然分解产物未知。

灭火方法：消防人员须佩戴防毒面具、穿全身消防服，在上风向灭火。灭火剂：干草粉、砂土。

第六部分：泄漏应急处理

应急处理：隔离泄漏污染区，限制出入。切断火源。建议应急处理人员戴防尘面具（全面罩），穿防毒服。避免扬尘，小心扫起，置于袋中转移至安全场所。若大量泄漏，用塑料布、帆布覆盖。收集回收或运至废物处理场所处置。

版权与免责声明

第七部分：操作处置与储存

操作注意事项：操作人员必须经过专门培训，严格遵守操作规程。建议操作人员佩戴自吸过滤式防尘口罩，戴化学安全防护眼镜，穿防毒物渗透工作服，戴橡胶手套。远离火种、热源，工作场所严禁吸烟。使用防爆型的通风系统和设备。避免产生粉尘。避免与氧化剂、卤素接触。搬运时要轻装轻卸，防止包装及容器损坏。配备相应品种和数量的消防器材及泄露应急处理设备。倒空的容器可能残留有害物。

储存注意事项：储存于阴凉、通风的库房。远离火种、热源。应与氧化剂、卤素分开存放，切忌混储。配备相应品种和数量的消防器材。储区应备有合适的材料收容泄漏物。

第八部分：接触控制/个体防护

中国 MAC (mg/m³): 6

前苏联 MAC (mg/m³): 6

TLVTN: ACGIH 1mg/m³

TLVWN: ACGIH 3mg/m³

监测方法：硫氰化钾-氯化钛分光光度法

工程控制：生产过程无尘，全面通风。

呼吸系统防护：空气中粉尘浓度超标时，必须佩戴自吸过滤式防尘口罩。紧急事态抢救撤离时，应该佩戴空气呼吸器。

眼睛防护：戴化学安全防护眼镜。

身体防护：穿防毒物渗透工作服。

手防护：戴橡胶手套。

第九部分：理化特性

主要成分：纯品

外观与性状：固体，金属亮白色；毛坯，表面黑色

熔点 (°C): 2620

沸点 (°C): 5560

相对密度(水=1): 9.4~10.2 (20°C)

对蒸气密度 (空气=1): 无资料

饱和蒸气压 (kPa): 无资料

燃烧热 (kJ/mol): 无资料

临界温度 (°C): 无资料

临界压力 (MPa): 无资料

水分配系数的对数值: 无资料

闪点 (°C): 无资料

引燃温度 (°C): 无资料

爆炸上限% (V/V): 无资料

爆炸下限% (V/V): 无资料

版权与免责声明

溶解性：溶于硝酸、氢氟酸

主要用途：用于生产模具、钨丝、电子零件等

第十部分：稳定性和反应活性

禁配物：强酸碱。

第十一部分：

急性毒性：无资料

LC50：无资料

第十二部分：生态学资料

这部分暂无资料

第十三部分：废弃处置

废弃物性质废弃处置方法：处置前应参阅国家和地方有关法规。若可能，回收使用。

第十四部分：运输信息

危险货物编号：无资料

包装类别：Z01

运输注意事项：起运时包装要完整，装载应稳妥。运输过程中要确保容器不泄漏、不倒塌、不坠落、不损坏。严禁与氧化剂、卤素、食用化学品等混装混运。运输途中应防曝晒、雨淋，防高温。车辆运输完毕应进行彻底清扫。

第十五部分：法规信息

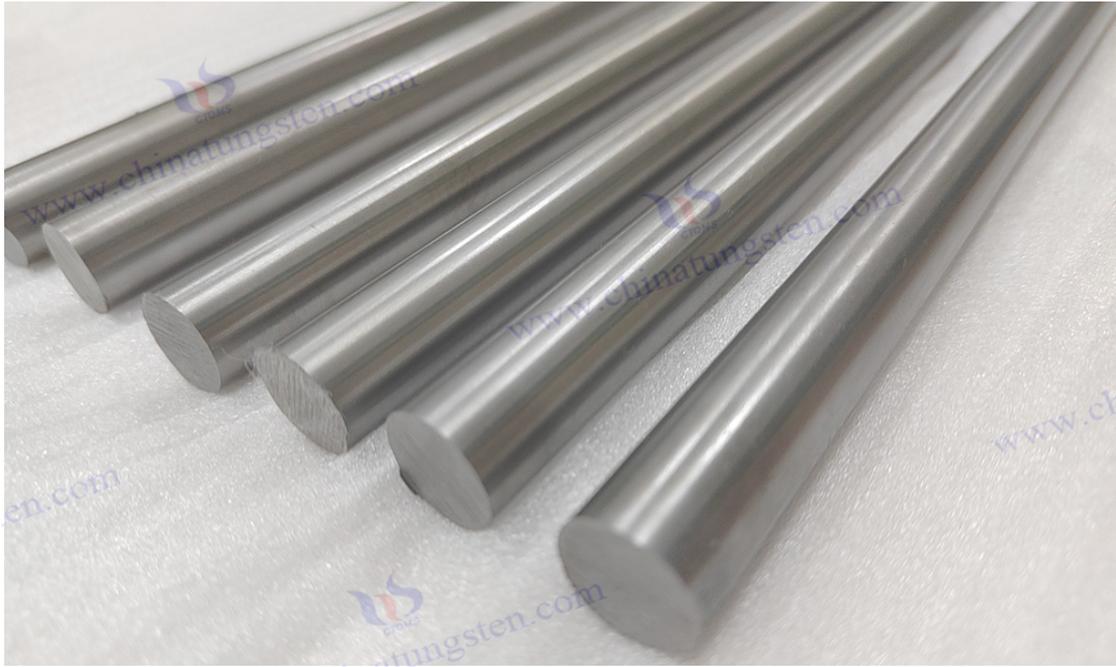
法规信息：化学危险物品安全管理条例（1987年2月17日国务院发布），化学危险物品安全管理条例实施细则（化劳发[1992]677号），工作场所安全使用化学品规定（[1996]劳部发423号）等法规，针对化学危险品的安全使用、生产、储存、运输、装卸等方面均作了相应规定；车间空气中钨卫生标准（GB 16229-1996），规定了车间空气中该物质的最高容许浓度及检测方法。

第十六部分：供货商信息

供货商：中钨智造（厦门）科技有限公司

电话：0592-5129696/5129595

版权与免责声明



中钨智造 TZM 钼棒

4. TZM 钼棒制备工艺与技术

4.1 TZM 钼棒原材料选择与准备

TZM 钼棒作为一种高性能合金材料，其性能高度依赖于原材料的质量和配比。原材料的选择与准备是制备 TZM 钼棒的基础，直接影响最终产品的微观结构和性能。以下从钼粉提纯、钨钼碳添加剂选择、合金配比优化以及原材料检测与质量控制四个方面详细分析。

4.1.1 钼粉的提纯与质量要求

钼粉是 TZM 钼棒的主要原料，其纯度和质量对合金性能至关重要。钼粉通常通过还原仲钨酸铵（ammonium paratungstate）或三氧化钼（ MoO_3 ）制备。提纯过程主要包括以下步骤：

矿石提纯：钼粉通常从钼精矿（如辉钼矿）中提取。辉钼矿经过浮选和焙烧，去除硫、硅等杂质，得到高纯度三氧化钼。

化学还原：三氧化钼在氢气气氛下分阶段还原为钼粉。还原过程分为低温还原（ $400\text{--}600^\circ\text{C}$ ，生成 MoO_2 ）和高温还原（ $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ ，生成金属钼粉）。研究表明，现代还原工艺采用多段还原炉，确保钼粉纯度达到 99.95% 以上。

粒度控制：钼粉的粒度通常控制在 1-5 微米，过大的粒度会导致烧结不均匀，过小的粒度则增加生产成本。细小且均匀的粒度有助于提高 TZM 钼棒的密度和力学性能。

钼粉的质量要求包括高纯度（ $\geq 99.95\%$ ）、低氧含量（ $\leq 0.005\%$ ）、低杂质含量（如铁、硅、铝等 $\leq 0.01\%$ ）以及均匀的粒度分布。这些要求确保了 TZM 钼棒在高温下的稳定性和抗腐蚀性能。

版权与免责声明

4.1.2 钛、锆、碳添加剂的选择

TZM 钼棒的合金元素包括钛 (Ti, 0.4-0.55%)、锆 (Zr, 0.06-0.12%) 和碳 (C, 0.01-0.04%)，这些添加剂的选择对合金性能至关重要：

钛 (Ti)：钛通常以高纯钛粉 (纯度 $\geq 99.9\%$) 或钛化合物 (如 TiH_2) 形式添加。钛粉的粒度控制在 1-10 微米，以确保与钼粉的均匀混合。钛的加入通过固溶强化和析出强化 (生成 TiC 颗粒) 提高合金的高温强度和抗蠕变性能。

锆 (Zr)：锆以高纯锆粉 (纯度 $\geq 99.9\%$) 或锆化合物 (如 ZrH_2) 形式添加，粒度通常为 1-5 微米。锆通过固溶强化和生成 ZrC 颗粒增强合金的抗氧化性能和再结晶温度。

碳 (C)：碳通常以石墨粉或碳黑形式添加，纯度需达到 99.99% 以上，粒度控制在 0.5-2 微米。碳与钛、锆反应生成碳化物颗粒 (TiC 和 ZrC)，通过析出强化提高合金的硬度和抗蠕变性能。

研究表明，添加剂的选择需考虑其化学活性、粒度分布和与钼粉的相容性。例如，钛和锆的氢化物在烧结过程中会分解释放氢气，有助于减少氧含量，提高合金纯度。

4.1.3 合金配比的优化

TZM 钼棒的合金配比 (Mo: 99.38-99.5%, Ti: 0.4-0.55%, Zr: 0.06-0.12%, C: 0.01-0.04%) 需通过实验和模拟优化，以平衡强度、韧性和抗氧化性能。配比优化的关键点包括：

钛和锆的比例：钛和锆的比例通常为 5:1 至 8:1，以确保固溶强化的协同效应。过高的钛含量可能导致脆性增加，过高的锆含量则增加成本。

碳含量控制：碳含量需精确控制在 0.01-0.04%，过低会导致碳化物颗粒不足，降低强化效果；过高则可能生成过多的碳化物，降低韧性。

均匀性：通过机械混合或球磨工艺确保钛、锆和碳在钼粉中的均匀分布，避免局部偏析影响性能。

4.1.4 原材料的检测与质量控制

原材料的质量控制是确保 TZM 钼棒性能一致性的关键环节。检测方法包括：

化学成分分析：采用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 或 X 射线荧光光谱 (XRF) 检测钼、钛、锆和碳的含量，确保符合配比要求。

粒度分析：通过激光粒度分析仪测量粉末的粒度分布，确保粒度均匀性。

杂质检测：采用辉光放电质谱 (GDMS) 检测氧、氮、铁等杂质含量，确保低于标准限值。

微观结构分析：通过扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 分析粉末的形貌和晶体结构，确保无缺陷和偏析。

4.2 TZM 钼棒冶金工艺

TZM 钼棒的冶金工艺包括粉末混合与压制、烧结、锻造与轧制以及挤压与拉拔等步骤。这些工艺直接决定了 TZM 钼棒的微观结构和性能。以下从各子工艺的细节和技术要点进行分析。

4.2.1 粉末混合与压制

4.2.1.1 机械合金化技术

机械合金化是 TZM 钼棒制备中的关键步骤，通过高能球磨将钼粉、钛粉、锆粉和碳粉混合均匀。机械合金化的主要参数包括：

球磨设备：行星式球磨机或振动球磨机，研磨介质通常为碳化钨（tungsten carbide powder）球。

球料比：通常为 10:1 至 20:1，以确保高效混合和研磨。

研磨时间：6-12 小时，过长可能引入杂质，过短则混合不均匀。

气氛控制：在氩气或氮气保护下进行，避免氧化。

机械合金化不仅实现粉末的均匀混合，还通过高能碰撞诱导微观结构变化，增强钛、锆与钼的固溶效果。研究表明，机械合金化可将粉末的混合均匀性提高至 99% 以上，显著改善后续烧结质量。

4.2.1.2 等静压成型工艺

等静压成型（CIP）是将混合粉末压制成药料的关键工艺。等静压成型通过液体介质（如水或油）施加均匀压力，确保药料密度均匀。主要参数包括：

压力：150-300 MPa，过高可能导致药料裂纹，过低则密度不足。

模具材料：高强度橡胶或聚氨酯模具，耐压且柔性好。

药料密度：达到理论密度的 60-70%，为后续烧结提供基础。

等静压成型的优势在于能够制备复杂形状的药料，减少后续加工量。研究表明，冷等静压（CIP）和热等静压（HIP）结合使用可进一步提高药料密度，达到理论密度的 90% 以上。

4.2.2 烧结工艺

4.2.2.1 真空烧结技术

真空烧结是 TZM 钼棒制备中的核心工艺，通过高温烧结将药料固化成高密度合金。主要参数包括：

温度：1800-2000° C，低于钼的熔点（2623° C），避免液相烧结。

真空度： 10^{-3} - 10^{-5} Pa，减少氧气和氮气的污染。

保温时间：2-4 小时，确保碳化物颗粒的均匀析出。

真空烧结能够有效去除药料中的孔隙，提高密度至理论密度的 98% 以上。全球领先的真空烧结炉采用钨丝（tungsten wire）加热元件，确保温度均匀性。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

4.2.2.2 气氛烧结与温度控制

在某些情况下，TZM 钨棒采用气氛烧结（如氢气或氩气气氛）以降低成本。气氛烧结的主要参数包括：

气氛：高纯氢气（纯度 $\geq 99.999\%$ ）或氩气，避免氧化。

温度控制：采用多段升温曲线（如 1000°C 预烧结、 1800°C 主烧结），避免快速升温导致的裂纹。

冷却速率：控制在 $5\text{--}10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，防止热应力引起裂纹。

气氛烧结的优点是成本较低，但需严格控制气氛纯度，以避免杂质污染。研究表明，气氛烧结的 TZM 钨棒密度可达理论密度的 95–97%。

4.2.3 锻造与轧制

4.2.3.1 热锻与冷锻工艺

锻造是 TZM 钨棒制备中的重要步骤，用于改善坯料的密度和力学性能。热锻和冷锻工艺分别如下：

热锻：在 $1200\text{--}1600^{\circ}\text{C}$ 下进行，利用钨的延展性改善晶粒结构。热锻压力通常为 $50\text{--}100\text{ MPa}$ ，变形量控制在 $30\text{--}50\%$ 。

冷锻：在室温下进行，用于精加工和提高表面质量。冷锻需更高的压力（ $100\text{--}200\text{ MPa}$ ），但可显著提高强度。

热锻能够消除烧结坯料中的微孔隙，提高密度至理论密度的 99% 以上。冷锻则进一步优化晶粒取向，增强各向异性强度。

4.2.3.2 轧制设备与工艺参数

轧制是将锻造坯料加工成棒材的关键工艺。轧制设备包括四辊轧机和多辊轧机，主要参数包括：

轧制温度： $1000\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ ，确保材料延展性。

变形量：单次轧制变形量控制在 $10\text{--}20\%$ ，避免裂纹。

轧制速度： $0.5\text{--}2\text{ m/s}$ ，平衡效率和质量。

轧制工艺能够显著改善 TZM 钨棒的表面质量和尺寸精度。研究表明，现代轧制设备采用伺服控制系统，确保轧制参数的精确控制。

4.2.4 挤压与拉拔

4.2.4.1 高温挤压技术

高温挤压是将轧制坯料加工成细长棒材的工艺，通常在 $1200\text{--}1600^{\circ}\text{C}$ 下进行。主要参数包括：

挤压比： $5:1$ 至 $10:1$ ，确保均匀变形。

版权与免责声明

模具材料：碳化钨或高温合金，耐磨且耐高温。

润滑剂：石墨或二硫化钨（tungsten disulfide），减少摩擦和模具磨损。

高温挤压能够显著提高 TZM 钨棒的密度和力学性能，适合制备高精度棒材。

4.2.4.2 拉拔模具与润滑剂

拉拔是精加工 TZM 钨棒的工艺，用于获得高精度和光滑表面。主要参数包括：

模具材料：碳化钨或金刚石模具，硬度高、耐磨。

拉拔速度：0.1-0.5 m/s，避免表面划伤。

润滑剂：干式润滑（如石墨粉）或湿式润滑（如油基润滑剂）。

拉拔工艺能够提高 TZM 钨棒的表面粗糙度，提高抗疲劳性能。

4.3 TZM 钨棒加工与精整

TZM 钨棒的加工与精整工艺包括车削与铣削、磨削与抛光、热处理与退火以及表面处理。这些工艺确保了 TZM 钨棒的尺寸精度、表面质量和性能稳定性。

4.3.1 车削与铣削

4.3.1.1 数控加工技术

数控加工（CNC）是 TZM 钨棒精加工的主要方法，用于制造复杂形状的部件。主要参数包括：

刀具材料：碳化钨或聚晶金刚石（PCD），硬度高、耐磨。

切削速度：50-100 m/min，避免过热。

进给量：0.05-0.2 mm/rev，平衡效率和表面质量。

数控加工能够实现 TZM 钨棒的尺寸精度达到±0.05 mm，满足航空航天和半导体设备的要求。研究表明，现代 CNC 加工中心采用五轴联动技术，能够加工复杂几何形状。

4.3.1.2 加工精度与表面粗糙度

TZM 钨棒的加工精度和表面粗糙度对其性能有重要影响。提高表面粗糙度（Ra）将减少应力集中和裂纹萌生。加工精度的控制依赖于高精度机床和严格的工艺参数优化。例如，采用低速切削和冷却液可以减少热影响区，提高表面质量。

4.3.2 磨削与抛光

4.3.2.1 机械抛光技术

机械抛光通过砂轮或抛光布去除 TZM 钨棒表面的微小缺陷，提高表面光洁度。主要参数包括：

磨料：金刚石或氧化铝，粒度 0.5-5 微米。

抛光速度：1000-3000 rpm，控制摩擦热。

抛光介质：水基或油基抛光液。

版权与免责声明

机械抛光可提高表面粗糙度，显著提高抗疲劳性能。

4.3.2.2 化学抛光与电抛光

化学抛光和电抛光用于进一步改善 TZM 钼棒的表面质量：

化学抛光：采用酸性溶液（如硝酸和硫酸混合液）腐蚀表面微缺陷，表面粗糙度可达 0.02 微米。

电抛光：在电解液中通过阳极溶解去除表面材料，适合高精度部件。电抛光电压通常为 10-20 V，电流密度为 0.5-2 A/cm²。

化学抛光和电抛光能够显著提高 TZM 钼棒的抗腐蚀性能和表面光洁度。

4.3.3 热处理与退火

4.3.3.1 退火温度与晶粒控制

退火是消除加工应力和优化晶粒结构的关键工艺。TZM 钼棒的退火通常在真空或惰性气氛中进行，温度为 1000-1400° C。主要参数包括：

退火温度：1200° C 可消除大部分应力，1400° C 可调整晶粒尺寸。

保温时间：1-2 小时，确保晶粒均匀化。

冷却速率：5-10° C/min，避免热应力。

退火能够将 TZM 钼棒的晶粒尺寸控制在 10-30 微米，提高韧性和抗蠕变性能。

4.3.3.2 应力消除技术

应力消除技术包括低温退火（800-1000° C）和振动应力消除。低温退火适用于加工后的部件，振动应力消除则通过机械振动释放残余应力。这些技术能够提高 TZM 钼棒的疲劳寿命和尺寸稳定性。

4.3.4 表面处理

4.3.4.1 抗氧化涂层技术

抗氧化涂层是延长 TZM 钼棒在高温氧化环境中寿命的关键技术。常用涂层包括：

硅化钼（MoSi₂）涂层：通过化学气相沉积（CVD）或等离子喷涂沉积，可在 1500° C 下保护材料。

氧化铝（Al₂O₃）涂层：通过物理气相沉积（PVD）沉积，耐高温氧化和腐蚀。

抗氧化涂层可将 TZM 钼棒在 1200° C 氧化环境中的寿命延长 2-3 倍。

4.3.4.2 表面渗碳与渗氮

表面渗碳和渗氮通过在 TZM 钼棒表面引入碳或氮原子，提高表面硬度和耐磨性：

渗碳：在 1000-1200° C 的碳气氛中进行，生成碳化物层，硬度可达 500 HV。

版权与免责声明

渗氮：在 800-1000° C 的氮气氛中进行，生成氮化物层，提高抗腐蚀性能。

渗碳和渗氮工艺能够显著提高 TZM 钨棒的耐磨性和抗疲劳性能。

4.4 TZM 钨棒生产设备与自动化

TZM 钨棒的生产设备和自动化技术对生产效率和产品质量至关重要。以下从关键生产设备、生产线自动化与智能化以及洁净室与环境控制三个方面进行分析。

4.4.1 关键生产设备

4.4.1.1 真空烧结炉

真空烧结炉是 TZM 钨棒生产中的核心设备，用于将粉末坯料烧结成高密度合金。主要特点包括：

加热元件：**钨加热子** (tungsten heater)，耐高温且导热均匀。

真空度： 10^{-3} - 10^{-5} Pa，减少氧化污染。

温度控制：精度 $\pm 5^{\circ}$ C，确保烧结均匀性。

全球领先的真空烧结炉采用 PLC 控制系统，能够实现多段升温 and 精确控温。

4.4.1.2 锻造与轧制设备

锻造和轧制设备包括液压锻造机和四辊轧机，主要特点包括：

锻造机：压力 500-2000 吨，适合热锻和冷锻。

轧机：伺服控制系统，轧制速度 0.5-2 m/s，精度 ± 0.05 mm。

这些设备能够实现 TZM 钨棒的高密度和高精度加工。

4.4.1.3 数控加工中心

数控加工中心用于 TZM 钨棒的精加工，配备五轴联动系统和碳化钨刀具，能够实现复杂形状的加工。加工精度可达 ± 0.01 mm，表面粗糙度 $Ra < 1.6$ 微米。

4.4.2 生产线的自动化与智能化

TZM 钨棒生产线的自动化与智能化显著提高了生产效率和质量一致性。主要技术包括：

自动化控制：采用 PLC 和 SCADA 系统，实时监控烧结、锻造和加工参数。

智能检测：通过在线 X 射线检测和超声波检测，实时监控坯料和成品的缺陷。

数据分析：利用大数据和人工智能优化工艺参数，提高产品一致性。

4.4.3 生产中的洁净室与环境控制

TZM 钨棒的生产对环境要求较高，需在洁净室中进行，以避免粉尘和杂质污染。主要措施包括：

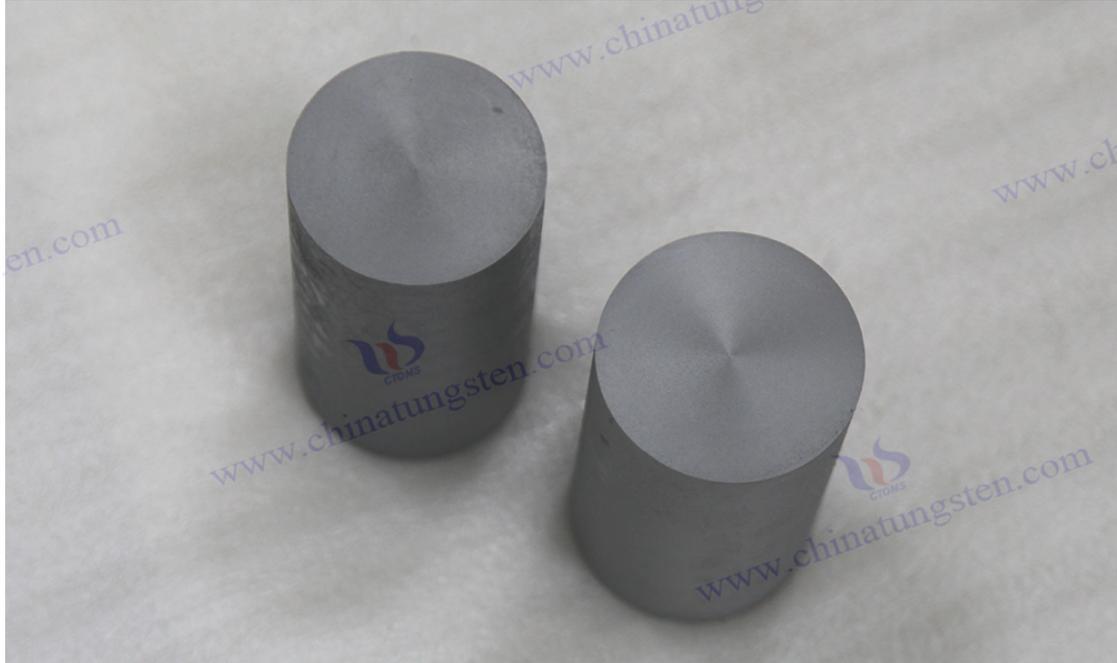
版权与免责声明

洁净等级：ISO 7 级洁净室，颗粒浓度 $<10,000$ 颗/ m^3 。

环境控制：温度 20-25° C，湿度 40-60%，避免粉末吸湿。

气氛保护：粉末混合和烧结在氩气或氢气保护下进行，氧含量 <10 ppm。

洁净室和环境控制确保了 TZM 钼棒的高纯度和性能稳定性，特别适合半导体和航空航天应用。



中钨智造 TZM 钼棒

5. TZM 钼棒质量控制与检测

TZM 钼棒作为一种高性能合金材料，其质量控制与检测是确保其在高温、高应力和腐蚀环境中稳定运行的关键。质量控制贯穿从原材料选择到成品检验的整个生产过程，涉及在线检测技术、性能测试和失效分析等多个方面。以下从在线检测技术、性能测试以及失效分析与改进三个子章节详细分析 TZM 钼棒的质量控制与检测技术。

5.1 TZM 钼棒在线检测技术

在线检测技术是 TZM 钼棒生产过程中的重要环节，用于实时监控产品质量，确保尺寸精度、表面质量和内部结构的完整性。以下从尺寸与几何精度检测和表面缺陷与裂纹检测两个方面进行详细分析。

5.1.1 尺寸与几何精度检测

TZM 钼棒的尺寸与几何精度直接影响其在航空航天、核工业和半导体设备中的应用效果。尺寸与几何精度检测主要包括以下技术：

激光测距与三坐标测量：激光测距仪能够实现非接触式高精度测量，精度可达 ± 0.01 mm，适用于检测 TZM 钼棒的直径、长度和圆度。三坐标测量机（CMM）通过接触式探针测量棒材

的几何形状，能够检测复杂形状部件的尺寸偏差。例如，航空航天领域要求 TZM 钼棒的直径公差控制在 ± 0.02 mm 以内，CMM 能够满足这一要求。

光学轮廓仪：光学轮廓仪通过白光干涉技术测量 TZM 钼棒的表面轮廓和几何形状，适用于检测棒材的圆柱度和直线度。其分辨率可达 0.1 微米，适合高精度应用。

在线视觉检测系统：现代生产线采用 CCD 相机和图像处理技术，实时监控 TZM 钼棒的尺寸和几何形状。系统通过机器学习算法识别尺寸偏差，检测速度可达 10 件/秒，显著提高生产效率。

研究表明，尺寸与几何精度检测通常结合 ISO 1101 标准，确保 TZM 钼棒满足航空航天（如火箭喷嘴）和半导体设备（如溅射靶材）的严格要求。检测过程中需控制环境温度（ $20-25^{\circ}\text{C}$ ）和湿度（40–60%），以避免热膨胀或湿度引起的测量误差。

5.1.2 表面缺陷与裂纹检测

表面缺陷（如划痕、裂纹、孔隙）和内部裂纹会显著降低 TZM 钼棒的力学性能和使用寿命。表面缺陷与裂纹检测主要采用以下技术：

超声波检测 (UT)：超声波检测通过高频声波检测 TZM 钼棒内部的裂纹、孔隙和夹杂物。检测频率通常为 5–10 MHz，探头直径为 5–10 mm，能够检测 0.1 mm 以上的缺陷。超声波检测适用于棒材内部结构的完整性评估，尤其在核工业中用于检测核反应堆部件。

涡流检测 (ET)：涡流检测通过电磁感应检测 TZM 钼棒表面的微小裂纹和导电性变化。检测灵敏度可达 0.05 mm，适合在线检测。涡流检测的优点是速度快（可达 1 m/s），适用于大批量生产。

X 射线检测 (RT)：X 射线检测用于检测 TZM 钼棒内部的深层缺陷，如气孔和夹杂物。现代数字 X 射线成像系统能够提供高分辨率图像（分辨率 < 0.1 mm），适合高可靠性部件的检测。

表面视觉检测：高分辨率 CCD 相机结合人工智能算法，能够检测 TZM 钼棒表面的划痕、凹坑和氧化层，检测精度可达 0.01 mm。研究表明，视觉检测系统在 TZM 钼棒生产中可将次品率降低至 0.5% 以下。

这些检测技术通常结合使用，以实现表面和内部缺陷的全面检测。例如，超声波和 X 射线检测用于内部缺陷，涡流和视觉检测用于表面缺陷。检测结果需符合 ASTM E1444（涡流检测）和 ASTM E1742（X 射线检测）等国际标准。

5.2 TZM 钼棒性能测试

性能测试是评估 TZM 钼棒在高温、高应力和腐蚀环境中的性能的关键步骤。以下从高温强度与硬度测试、抗腐蚀与抗氧化性能测试以及热膨胀与热导率测试三个方面进行详细分析。

5.2.1 高温强度与硬度测试

TZM 钼棒的高温强度和硬度是其在航空航天和核工业中的核心性能指标。测试方法包括：

高温拉伸测试：在 $1200-1600^{\circ}\text{C}$ 的真空或惰性气氛中进行，使用高温拉伸试验机（如 Instron 5980 系列）。测试结果显示，TZM 钼棒在 1200°C 时的抗拉强度为 400–500 MPa，

远高于纯钼的 200-300 MPa。测试需符合 ASTM E21 标准，确保温度控制精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

高温压缩测试：用于评估 TZM 钼棒在高温下的抗压强度，通常在 1400°C 和 50 MPa 条件下进行。测试结果表明，TZM 钼棒的屈服强度约为 300-400 MPa，适合高温模具应用。

硬度测试：采用维氏硬度计（HV）或洛氏硬度计（HRC）测试 TZM 钼棒的硬度。室温下 TZM 钼棒的维氏硬度为 250-300 HV，高于纯钼的 200 HV。高温硬度测试（ 1000°C ）显示，TZM 钼棒的硬度仅下降 10-15%，表现出优异的高温稳定性。

微观硬度测试：通过纳米压痕技术测量 TZM 钼棒的微观硬度，评估碳化物颗粒（如 TiC、ZrC）的强化效果。测试结果显示，碳化物颗粒区域的硬度可达 500 HV。

5.2.2 抗腐蚀与抗氧化性能测试

TZM 钼棒的抗腐蚀和抗氧化性能是其在高温化学环境中应用的关键。测试方法包括：

抗氧化测试：在 $1000-1200^{\circ}\text{C}$ 的空气或氧气气氛中进行，测量 TZM 钼棒的氧化增重率和氧化物层厚度。测试结果表明，TZM 钼棒在 1000°C 以下能够形成致密的 MoO_2 保护层，氧化增重率低于 $0.1\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ ，远优于纯钼的 $1-2\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 。抗氧化涂层（如硅化钼）可将使用温度提高至 1500°C 。

抗腐蚀测试：在稀硫酸、盐酸和碱性溶液中进行腐蚀速率测试。测试结果显示，TZM 钼棒在 5% 硫酸溶液中的腐蚀速率约为 0.01 mm/年，远低于不锈钢的 0.1 mm/年。

电化学测试：通过电位动扫描法测量 TZM 钼棒的腐蚀电位和腐蚀电流密度，评估其在腐蚀性环境中的稳定性。测试结果表明，TZM 钼棒的腐蚀电位高于纯钼，表现出更好的抗腐蚀性能。

5.2.3 热膨胀与热导率测试

热膨胀和热导率是 TZM 钼棒在高温应用中的关键性能参数。测试方法包括：

热膨胀测试：采用膨胀计（如 NETZSCH DIL 402）在室温至 1600°C 范围内测量 TZM 钼棒的热膨胀系数。测试结果显示，TZM 钼棒的热膨胀系数为 $5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，低于镍基合金的 $13 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，表现出优异的尺寸稳定性。

热导率测试：采用激光闪光法（LFA）测量 TZM 钼棒的热导率。测试结果表明，TZM 钼棒的热导率为 $139\text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，在 1200°C 时仅下降 10-15%，适合高温散热应用。

热扩散率测试：通过激光闪光法结合密度和比热数据，计算 TZM 钼棒的热扩散率，评估其热传导效率。测试结果显示，TZM 钼棒的热扩散率在高温下仍保持稳定。

这些测试需符合 ASTM E228（热膨胀）和 ASTM E1461（热导率）标准，确保数据的准确性和可重复性。测试过程中需控制气氛（如氩气或真空），以避免氧化影响测量结果。

5.3 TZM 钼棒失效分析与改进

失效分析是提高 TZM 钼棒质量和可靠性的重要手段，通过分析裂纹、断裂、高温疲劳和蠕变等失效模式，提出针对性的改进措施。以下从裂纹与断裂分析、高温疲劳与蠕变分析以及质量改进措施三个方面进行详细分析。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

5.3.1 裂纹与断裂分析

裂纹和断裂是 TZM 钼棒在高温和高应力环境中的主要失效模式。分析方法包括：

断口分析：通过扫描电子显微镜（SEM）观察 TZM 钼棒的断口形貌，判断断裂类型（韧性断裂或脆性断裂）。研究表明，TZM 钼棒的断裂韧性为 $15\text{--}20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，高于纯钼的 $10\text{--}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，但高温循环应力可能引发微裂纹。

裂纹扩展分析：采用电子背散射衍射（EBSD）分析裂纹扩展路径，评估晶界和碳化物颗粒的作用。结果显示，碳化物颗粒能够有效阻碍裂纹扩展，提高抗断裂能力。

应力集中分析：通过有限元分析（FEA）模拟 TZM 钼棒在高温下的应力分布，识别裂纹萌生位置。表面缺陷（如划痕、孔隙）是主要的应力集中点。

5.3.2 高温疲劳与蠕变分析

高温疲劳和蠕变是 TZM 钼棒在长期高温应力环境中的主要失效模式。分析方法包括：

高温疲劳测试：在 1200°C 和 $\pm 200 \text{ MPa}$ 的循环应力下进行疲劳测试，评估 TZM 钼棒的疲劳寿命。测试结果表明，TZM 钼棒的疲劳寿命为 10^5 次循环，远高于纯钼的 10^4 次。疲劳裂纹通常从表面缺陷或晶界处萌生，碳化物颗粒能够减缓裂纹扩展。

蠕变测试：在 1400°C 和 20 MPa 条件下进行蠕变测试，测量 TZM 钼棒的蠕变速率和寿命。测试结果显示，TZM 钼棒的蠕变速率约为纯钼的 $1/10$ ，寿命可达 5000 小时。蠕变失效主要由晶界滑动和位错攀移引起，碳化物颗粒的钉扎作用显著降低了蠕变速率。

微观结构分析：通过透射电子显微镜（TEM）观察 TZM 钼棒在高温疲劳和蠕变过程中的位错和晶界变化。结果表明，钨、钽的固溶强化和碳化物颗粒的析出强化有效提高了抗疲劳和抗蠕变性能。

5.3.3 质量改进措施

基于失效分析结果，TZM 钼棒的质量改进措施主要包括以下几个方面：

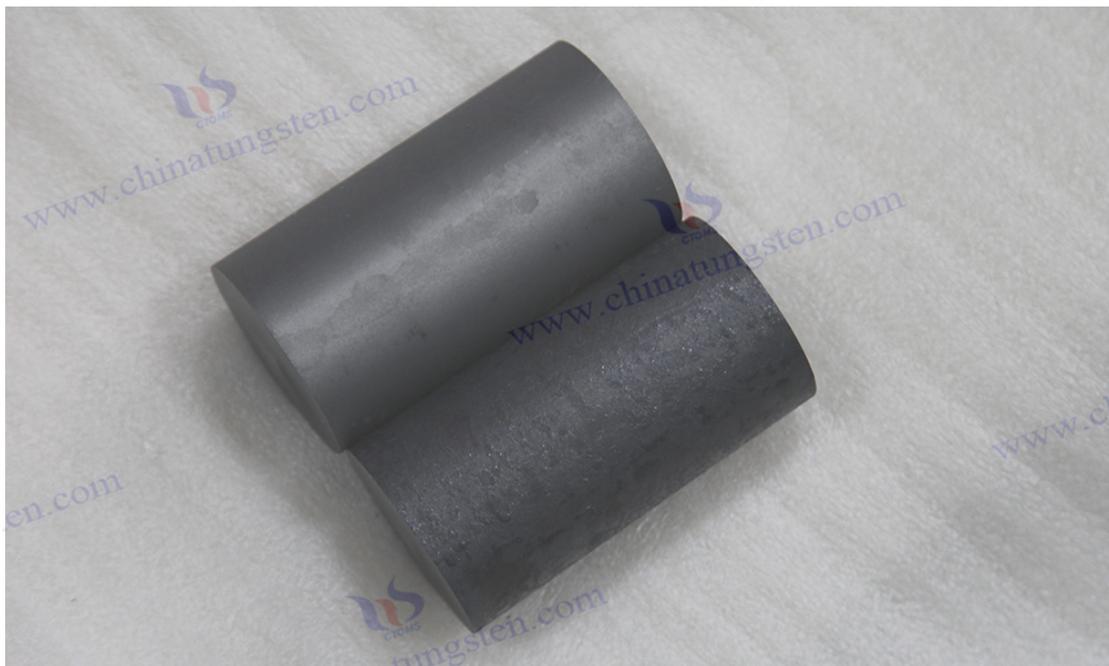
优化表面质量：通过机械抛光、化学抛光和电抛光将表面粗糙度降至 1.6 微米以下，减少裂纹萌生点。表面抗氧化涂层（如硅化钼、氧化铝）可进一步提高抗腐蚀性能。

改进微观结构：通过优化粉末冶金工艺（如降低烧结温度至 1800°C 、控制冷却速率）获得更细小的晶粒（ $3.0\text{--}5.0$ 微米），提高抗疲劳和抗蠕变性能。

增强生产工艺控制：采用在线检测技术（如超声波、X 射线）和智能化生产线，实时监控缺陷和性能参数，确保产品一致性。

开发新型涂层：研究新型抗氧化和抗腐蚀涂层（如纳米复合涂层），提高 TZM 钼棒在 1500°C 以上环境中的寿命。

质量管理体系：实施 ISO 9001 和 AS9100（航空航天）质量管理体系，确保从原材料到成品的全程质量控制。



中钨智造 TZM 钼棒

6. TZM 钼棒用途

TZM 钼棒作为一种高性能合金材料，因其优异的高温强度、抗蠕变性能、低热膨胀系数和高导热性，在多个高技术领域中具有广泛应用。TZM 钼棒（molybdenum）通过添加钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C），显著提升了钼的性能，使其成为高温炉、航空航天、核工业、电子与半导体行业以及其他工业与科研领域的理想选择。以下从五个方面详细探讨 TZM 钼棒的用途。

6.1 高温炉中的应用

TZM 钼棒在高温炉制造中扮演着关键角色，因其高熔点（约 2623° C）、优异的抗蠕变性能和抗氧化性能，能够在 1600° C 以上的高温环境中长时间稳定运行。以下从加热元件、真空烧结炉和热处理炉三个方面分析其应用。

6.1.1 作为加热元件

TZM 钼棒因其高导热性（139 W/m·K）和优异的抗高温变形能力，被广泛用作高温炉的加热元件。相比纯钼，TZM 钼棒的再结晶温度高达 1400° C，能够在高温下保持细小晶粒结构，避免因晶粒长大导致的性能下降。在电阻加热炉中，TZM 钼棒作为加热元件能够承受快速升温 and 冷却循环，保持长期稳定性。

具体应用包括：

真空炉：TZM 钼棒在真空环境中作为加热元件，能够在 1600–1800° C 下运行数千小时，适用于金属和陶瓷的烧结。例如，在钛合金和氧化锆烧结炉中，TZM 钼棒确保了温度均匀性和稳定性。

气氛保护炉：在氩气或氮气保护气氛中，TZM 钼棒的抗氧化性能使其能够承受高温氧化

版权与法律责任声明

应力，延长使用寿命。中钨在线的资料显示，TZM 钼棒加热元件的寿命比纯钼延长约 50%。

高温退火炉：TZM 钼棒用于制造退火炉的加热元件，能够在 1400° C 以上提供稳定的热场，适用于高性能合金的热处理。

TZM 钼棒的表面通常需涂覆抗氧化涂层（如硅化钼， MoSi_2 ），以进一步提高在氧化性气氛中的耐用性。全球领先的炉具制造商在其高温炉设计中广泛采用 TZM 钼棒，以满足工业和科研需求。

6.1.2 真空烧结炉中的应用

真空烧结炉是制造高性能材料（如陶瓷、金属合金）的重要设备，TZM 钼棒因其高强度和抗腐蚀性能被用作烧结炉的支撑件、坩埚和加热元件。主要应用包括：

支撑件与坩埚：TZM 钼棒用于制造烧结炉的支撑框架和坩埚，能够承受高温下材料的重力和热应力。例如，在氧化铝陶瓷烧结炉中，TZM 钼棒支撑件能够保持几何稳定性，避免变形。

高温夹具：TZM 钼棒被加工成夹具，用于固定烧结材料，确保烧结过程中的尺寸精度。其低热膨胀系数（ $5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）保证了夹具在高温下的稳定性。

热电偶保护套管：TZM 钼棒用于制造热电偶保护套管，能够在 1800° C 以上的真空环境中保护热电偶免受腐蚀和机械损伤。

6.1.3 热处理炉中的应用

热处理炉用于金属和合金的退火、淬火和回火，TZM 钼棒因其优异的抗蠕变性能和高导热性被广泛应用于热处理炉的结构件和加热元件。具体应用包括：

加热元件：TZM 钼棒在热处理炉中作为加热元件，能够在 1400–1600° C 下提供稳定的热场，适用于高强度钢和钛合金的热处理。

炉内构件：TZM 钼棒用于制造炉内支撑架、托盘和隔板，能够承受高温下材料的重量和热应力。例如，在航空航天部件的热处理炉中，TZM 钼棒支撑架能够保持长期稳定性。

气氛控制：在氢气或氩气气氛的热处理炉中，TZM 钼棒的抗腐蚀性使其能够耐受化学侵蚀，延长炉具寿命。

研究表明，TZM 钼棒在热处理炉中的应用能够将炉内温度均匀性控制在 $\pm 5^\circ \text{C}$ 以内，显著提高热处理质量。全球热处理炉制造商在其高端设备中优先选择 TZM 钼棒，以满足航空航天和汽车工业的需求。

6.2 航空航天领域

TZM 钼棒因其高熔点、优异的高温强度和低热膨胀系数，在航空航天领域具有不可替代的作用，广泛应用于火箭喷嘴、高温结构件和航天器热防护系统。以下从这三个方面详细分析。

6.2.1 火箭喷嘴中的应用

火箭喷嘴是航空航天领域中最苛刻的应用场景之一，需承受 2000° C 以上的高温 and 强烈的热冲击。TZM 钼棒因其高熔点（2623° C）和优异的抗热震性能，成为火箭喷嘴的首选材料。

版权与法律责任声明

具体应用包括：

喷嘴喉部：TZM 钨棒用于制造火箭喷嘴的喉部，能够承受燃烧室中的高温高压气体流。例如，SpaceX 的猛禽发动机喷嘴采用 TZM 合金，以应对液氧/甲烷燃烧产生的极端热负荷。

喷嘴扩展段：TZM 钨棒用于喷嘴扩展段，能够保持几何稳定性，减少热应力引起的变形。其低热膨胀系数 ($5.3 \times 10^{-6}/K$) 确保喷嘴在快速温度变化中不发生裂纹。

抗氧化涂层：为提高在氧化性燃烧环境中的耐用性，TZM 钨棒喷嘴通常涂覆硅化钨或氧化钨涂层，延长使用寿命。

6.2.2 高温结构件中的应用

TZM 钨棒在航空航天高温结构件中广泛应用，如涡轮叶片、燃烧室壁和推进系统部件。其优异的高温强度 (1200° C 下抗拉强度 400-500 MPa) 和抗蠕变性能使其能够承受复杂应力环境。具体应用包括：

涡轮叶片：TZM 钨棒用于制造航空发动机涡轮叶片的支撑结构，能够在 1400° C 以上保持强度和稳定性。

燃烧室壁：TZM 钨棒用于制造燃烧室壁，能够承受高温燃烧气体的冲刷和热冲击。例如，NASA 的 X-33 航天飞机燃烧室采用 TZM 合金部件。

连接件：TZM 钨棒加工成高温螺栓和连接件，适用于航空航天设备的高温装配。

6.2.3 航天器热防护中的应用

航天器在再入大气层时需承受数千摄氏度的高温，TZM 钨棒因其高导热性和抗热震性能被用于热防护系统 (TPS)。具体应用包括：

热防护板：TZM 钨棒加工成薄板，用于航天器外部的热防护层，能够快速散热，保护内部结构。

隔热屏：TZM 钨棒用于制造航天器的隔热屏，防止高温传导至敏感部件。例如，国际空间站的部分隔热屏采用 TZM 合金。

抗烧蚀涂层：TZM 钨棒表面通常涂覆抗烧蚀材料 (如碳/碳复合材料)，以提高在极端热环境中的耐用性。

6.3 核工业

TZM 钨棒因其低热中子吸收截面、高温强度和抗辐射性能，在核工业中具有重要应用，涵盖核反应堆、核聚变装置和放射性材料处理。以下从这三个方面进行详细分析。

6.3.1 核反应堆中的应用

TZM 钨棒在核反应堆中用于制造控制棒、结构件和燃料包壳，能够耐受高温和高辐射环境。具体应用包括：

控制棒：TZM 钨棒用于制造控制棒的支撑结构，能够在高温 (800-1200° C) 和中子辐照下保持稳定性。其低热中子吸收截面 (约 2.6 barns) 使其优于不锈钢。

结构件：TZM 钨棒用于反应堆内部的支撑框架和管道，能够承受高温冷却剂的腐蚀和机

械应力。例如，快堆（如中国实验快堆）采用 TZM 合金结构件。

燃料包壳：TZM 钨棒用于制造核燃料包壳，能够在高温和高辐射下保持密封性，防止放射性物质泄漏。

6.3.2 核聚变装置中的应用

核聚变装置（如托卡马克和惯性约束聚变装置）对材料的要求极为苛刻，TZM 钨棒因其抗等离子体侵蚀和高导热性被广泛应用。具体应用包括：

等离子体面对材料（PFM）：TZM 钨棒用于制造托卡马克装置的偏滤器和第一壁，能够承受高能等离子体的轰击和 2000° C 以上的瞬时热负荷。例如，国际热核聚变实验堆（ITER）采用 TZM 合金作为偏滤器材料。

热沉材料：TZM 钨棒的高导热性使其作为热沉材料，能够快速散热，保护聚变装置的敏感部件。

结构支撑：TZM 钨棒用于制造聚变装置的支撑结构，能够在高温和强磁场中保持稳定。

6.3.3 放射性材料处理中的应用

TZM 钨棒在放射性材料处理中用于制造容器、屏蔽材料和操作工具，能够耐受高辐射和化学腐蚀。具体应用包括：

放射性废料容器：TZM 钨棒加工成容器，用于存储高放射性废料，能够耐受长期辐射和腐蚀。

屏蔽材料：TZM 钨棒用于制造辐射屏蔽板（radiation shielding materials），其高密度（10.2 g/cm³）和低热中子吸收截面使其优于传统铅屏蔽材料。

操作工具：TZM 钨棒用于制造高温操作工具，如机械手和夹具，能够在高辐射环境中安全操作。

6.4 电子与半导体行业

TZM 钨棒在电子与半导体行业中因其高导热性、低热膨胀系数和抗腐蚀性能被广泛应用，涵盖离子植入设备、薄膜沉积和电子器件制造。以下从这三个方面进行详细分析。

6.4.1 离子植入设备中的应用

离子植入设备用于半导体芯片制造，TZM 钨棒因其高强度和抗等离子体侵蚀性能被用作关键部件。具体应用包括：

离子源部件：TZM 钨棒用于制造离子源的电极和束流引导部件，能够承受高能离子束的轰击。其高导热性（139 W/m·K）确保快速散热，避免局部过热。

夹具与靶材：TZM 钨棒加工成夹具，用于固定硅片，能够在高温和高真空环境中保持尺寸稳定性。例如，TSMC 的离子植入设备采用 TZM 钨棒夹具。

屏蔽部件：TZM 钨棒用于制造离子植入设备中的屏蔽板，能够耐受高能粒子的辐射和腐蚀。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

6.4.2 薄膜沉积中的应用

薄膜沉积（如物理气相沉积，PVD）是半导体和电子器件制造的关键工艺，TZM 钨棒因其高导热性和抗腐蚀性能被用作溅射靶材和夹具。具体应用包括：

溅射靶材：TZM 钨棒加工成溅射靶材，用于沉积高性能薄膜（如金属导电层和绝缘层）。其均匀微观结构确保溅射膜的均一性。

夹具与支撑件：TZM 钨棒用于制造 PVD 设备中的夹具和支撑件，能够在高温和高真空下保持稳定。例如，在 OLED 屏幕制造中，TZM 钨棒夹具用于固定基板。

加热元件：TZM 钨棒用于制造 PVD 设备的加热元件，能够在 800-1200° C 下提供稳定的热场。

6.4.3 电子器件制造中的应用

TZM 钨棒在电子器件制造中用于制造高温夹具、电极和连接件。具体应用包括：

高温夹具：TZM 钨棒用于制造晶圆加工中的夹具，能够在高温退火和扩散工艺中保持稳定。例如，英特尔的芯片制造设备采用 TZM 钨棒夹具。

电极：TZM 钨棒用于制造电子器件中的钨电极（molybdenum electrodes），如真空管和微波器件中的电极，能够耐受高温和高电流。

连接件：TZM 钨棒加工成高温连接件，用于电子器件的组装，能够承受热循环和机械应力。

6.5 其他工业与科研领域

TZM 钨棒在高温实验设备、高温模具与工具以及增材制造等其他工业与科研领域中也有广泛应用。以下从这三个方面进行详细分析。

6.5.1 高温实验设备中的应用

TZM 钨棒因其高温稳定性和抗腐蚀性能被广泛用于高温实验设备，如材料测试炉、等离子体物理实验装置和高温反应器。具体应用包括：

材料测试炉：TZM 钨棒用于制造高温拉伸和压缩测试炉的夹具和加热元件，能够在 1600° C 以上提供稳定的热场。例如，ASTM E21 标准测试设备采用 TZM 钨棒夹具。

等离子体物理实验：TZM 钨棒用于制造等离子体实验装置的电极和支撑件，能够耐受高能等离子体的侵蚀。例如，激光等离子体实验装置采用 TZM 合金电极。

高温反应器：TZM 钨棒用于制造化学反应器的加热元件和支撑结构，能够在高温和腐蚀性气氛中稳定运行。

6.5.2 高温模具与工具中的应用

TZM 钨棒因其高硬度（250-300 HV）和抗磨损性能被用于制造高温模具和工具。具体应用包括：

压铸模具：TZM 钨棒用于制造铝合金和镁合金的压铸模具，能够在 800-1000° C 下承受高应力和磨损。

版权与免责声明

热锻模具：TZM 钼棒用于制造航空航天部件的热锻模具，能够在 1200° C 以上保持强度和尺寸稳定性。

切削工具：TZM 钼棒加工成高温切削刀具，适用于加工硬质合金（tungsten alloy）和高温合金。

6.5.3 增材制造中的应用

增材制造（3D 打印）是 TZM 钼棒的新兴应用领域，通过激光选区熔化（SLM）或电子束熔化（EBM）技术制造复杂形状 TZM 合金部件。具体应用包括：

航空航天部件：TZM 钼棒粉末用于 3D 打印火箭喷嘴和涡轮叶片，能够实现复杂几何形状，减少加工成本。例如，NASA 的 3D 打印 TZM 合金喷嘴重量减轻 30%。

医疗设备：TZM 钼棒用于 3D 打印高温灭菌设备部件，能够在高温和腐蚀环境中保持稳定。

科研模型：TZM 钼棒粉末用于 3D 打印高温实验模型，满足材料测试和物理实验的需求。



中钨智造 TZM 钼棒

7. TZM 钼棒技术挑战与未来发展

TZM 钼棒作为一种高性能高温合金，因其优异的高温强度、抗蠕变性能和低热膨胀系数，在航空航天、核工业、半导体制造等领域具有广泛应用。然而，随着应用环境的日益苛刻和工业技术的快速发展，TZM 钼棒的制备与应用面临诸多技术挑战，包括高温抗氧化性能、复杂形状制造和生产成本控制等。同时，新型材料、智能化制造和绿色生产技术为 TZM 钼棒的未来发展提供了新机遇。本章从技术挑战、新型材料与技术、智能化与绿色制造以及未来发展趋势四个方面，全面探讨 TZM 钼棒的现状与未来。

版权与免责声明

7.1 技术挑战

TZM 钨棒的制备和应用面临多方面的技术挑战，包括高温抗氧化性能的提升、复杂形状与大尺寸制造的难度以及生产成本的控制。这些挑战直接影响 TZM 钨棒在高端应用中的性能和经济性。以下从三个方面详细分析。

7.1.1 高温抗氧化性能的提升

TZM 钨棒在高温环境 ($>1000^{\circ}\text{C}$) 下的抗氧化性能是其应用的主要瓶颈。尽管 TZM 钨棒通过添加钛 (Ti)、锆 (Zr) 和碳 (C) 提高了抗氧化性能，但其在氧化性气氛中的表现仍不如陶瓷或某些镍基合金。具体挑战包括：

氧化物挥发：在 1200°C 以上的氧化环境中，TZM 钨棒表面会形成挥发性的三氧化钨 (MoO_3 , tungsten oxide)，导致材料快速损耗。研究表明，TZM 钨棒在 1200°C 空气中的氧化增重率约为 $0.5\text{--}1\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ ，远高于陶瓷材料的 $0.01\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 。

保护层稳定性：TZM 钨棒可通过硅化钨 (MoSi_2) 或氧化铝 (Al_2O_3) 涂层提高抗氧化性能，但这些涂层在 1500°C 以上或长期热循环中容易剥落或开裂。例如， MoSi_2 涂层在 1600°C 下经过 100 次热循环后，剥落率可达 20–30%。

复杂环境适应性：在航空航天（如火箭喷嘴）和核聚变装置中，TZM 钨棒需同时承受高温、氧化和等离子体侵蚀，单一抗氧化涂层难以满足多重环境要求。

改进措施包括：

新型涂层开发：研究多层复合涂层（如 $\text{MoSi}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ），通过梯度结构提高涂层与基体的结合强度和热循环稳定性。近期研究表明，纳米复合涂层可将 TZM 钨棒在 1500°C 下的寿命延长 50%。

表面改性：通过激光表面处理或离子渗入技术，在 TZM 钨棒表面引入抗氧化元素（如硅、铝），形成原位保护层。例如，激光熔覆硅化物层可将氧化增重率降低至 $0.1\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 。

合金优化：通过调整钛、锆和碳的含量，优化碳化物颗粒 (TiC 、 ZrC) 的分布和尺寸，增强基体的抗氧化性能。实验显示，锆含量提高至 0.15% 可显著降低氧化速率。

7.1.2 复杂形状与大尺寸制造

TZM 钨棒的复杂形状和大尺寸制造面临技术难点，尤其在航空航天和核工业中，需要制造复杂几何形状（如曲面喷嘴）或大尺寸部件（如核反应堆支撑梁）。具体挑战包括：

粉末冶金局限性：TZM 钨棒通常通过粉末冶金工艺制备，但该工艺难以实现复杂形状的近净成型。等静压成型 (CIP) 虽然能制备复杂坯料，但尺寸精度仅为 $\pm 0.5\text{ mm}$ ，难以满足航空航天要求的 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。

加工难度：TZM 钨棒的高硬度 (250–300 HV) 和低韧性使其在车削、铣削和钻孔时易产生裂纹。例如，复杂形状的加工（如内螺纹或微孔）会导致刀具快速磨损，加工成本增加 30–50%。

大尺寸均匀性：大尺寸 TZM 钨棒（直径 $>100\text{ mm}$ ，长度 $>1\text{ m}$ ）的制造需确保微观结构和性能的均匀性。烧结过程中温度梯度和收缩不均可能导致内部孔隙或裂纹，次品率高达 10–15%。

版权与免责声明

改进措施包括：

增材制造（3D 打印）：采用激光选区熔化（SLM）或电子束熔化（EBM）技术，直接打印复杂形状的 TZM 钨棒部件。SLM 技术可将尺寸精度提高至 ± 0.05 mm，废料率降低至 5% 以下。NASA 的最新研究表明，SLM 制备的 TZM 喷嘴重量减轻 30%，性能提升 20%。

精密锻造与轧制：通过多轴锻造和精密轧制设备，优化大尺寸 TZM 钨棒的晶粒取向和密度。例如，德国 SMS 集团的四辊轧机可将大尺寸棒材的密度提高至理论密度的 99.5%。

热等静压（HIP）：在烧结后采用热等静压技术，消除大尺寸坯料中的微孔隙，提高均匀性。HIP 工艺（ 2000°C ，200 MPa）可将次品率降低至 2% 以下。

7.1.3 生产成本控制

TZM 钨棒的生产成本较高，限制了其在某些领域的广泛应用。成本来源包括原材料、工艺复杂性和质量控制。具体挑战包括：

原材料成本：高纯钨粉（纯度 $\geq 99.95\%$ ）和钽、钨添加剂的价格较高，占总成本的 40-50%。例如，2023 年中钨在线报告显示，高纯钨粉的价格约为 50-70 美元/千克。

工艺复杂性：TZM 钨棒的粉末冶金、真空烧结和高温加工工艺需使用昂贵的设备（如真空烧结炉、精密轧机），单台设备投资高达数百万美元。此外，加工过程中的刀具磨损和废料率（约 10%）进一步增加成本。

质量控制成本：在线检测（超声波、X 射线）和性能测试（高温拉伸、蠕变测试）需高精度仪器和专业人员，占生产成本的 20-30%。

改进措施包括：

原材料优化：通过改进钨粉提纯工艺（如等离子体还原），降低氧含量和杂质，减少添加剂用量。例如，H. C. Starck 的等离子体还原技术可将钨粉成本降低 15%。

工艺简化：采用近净成型技术（如 SLM 或 HIP）减少后续加工步骤，降低废料率和加工成本。研究表明，近净成型可将加工成本降低 20-30%。

自动化生产：通过智能化生产线（如 PLC 控制和在线检测系统），提高生产效率，降低人工成本。

7.2 新型材料与技术

新型材料和技术的开发为 TZM 钨棒性能的提升和应用领域的扩展提供了新机遇。以下从改性合金设计、纳米结构与复合材料以及与其他高温材料的竞争三个方面进行详细分析。

7.2.1 改性合金设计

通过改性合金设计，优化 TZM 钨棒的成分和微观结构，可以进一步提高其性能。具体方法包括：

添加新元素：在 TZM 合金中引入少量稀土元素（如镧、铈）或铼（Re），以提高抗氧化性和高温强度。例如，添加 0.1% 镧可将 TZM 钨棒的再结晶温度提高至 1500°C ，抗拉强度提高 10-15%。

碳化物优化：通过精确控制碳含量（0.02-0.05%）和烧结工艺，优化碳化物颗粒（TiC、ZrC）的尺寸（0.5-2 微米）和分布，增强析出强化效果。研究表明，均匀分布的纳米级碳化物可将蠕变速率降低 20%。

固溶强化：通过增加钛和锆的固溶量（Ti: 0.6-0.8%，Zr: 0.15-0.2%），提高钨基体的晶格畸变，增强高温强度和抗腐蚀性能。

7.2.2 纳米结构与复合材料

纳米结构和复合材料技术为 TZM 钨棒的性能优化提供了新方向。具体方法包括：

纳米晶结构：通过高能球磨和快速烧结技术，将 TZM 钨棒的晶粒尺寸控制在 50-100 纳米。纳米晶结构显著提高了材料的强度和韧性。例如，纳米晶 TZM 钨棒的断裂韧性可达 $25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，高于常规 TZM 的 $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

复合材料：将 TZM 钨棒与陶瓷（如 SiC、 Al_2O_3 ）或碳基材料（如石墨烯）复合，形成金属基复合材料（MMC）。SiC/TZM 复合材料的抗氧化性能在 1500°C 下提高 2 倍，适合核聚变装置的偏滤器。

纳米涂层：通过化学气相沉积（CVD）或物理气相沉积（PVD）技术，在 TZM 钨棒表面沉积纳米级抗氧化涂层（如 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ）。纳米涂层的热膨胀系数与基体更匹配，剥落率降低至 5% 以下。

7.2.3 与其他高温材料的竞争

TZM 钨棒面临来自其他高温材料的竞争，如钨合金、镍基合金、陶瓷和碳基复合材料。具体比较包括：

钨合金：钨合金（密度 19.3 g/cm^3 ）具有更高的熔点（ 3422°C ）和强度，但密度远高于 TZM 钨棒（ 10.2 g/cm^3 ），限制了其在重量敏感的航空航天应用。TZM 钨棒通过优化抗氧化性能，可在 1600°C 以下替代部分钨合金应用。

镍基合金：镍基合金（如 Inconel 718）在 $1000-1200^\circ \text{C}$ 下具有优异的抗氧化性和韧性，但其高温强度（200-300 MPa）低于 TZM 钨棒（400-500 MPa）。TZM 钨棒通过纳米涂层技术，可在更高温度下竞争。

陶瓷和碳基复合材料：陶瓷（如 SiC、 ZrB_2 ）具有极佳的抗氧化性，但脆性高；碳/碳复合材料重量轻，但在氧化环境中需复杂涂层保护。TZM 钨棒通过复合材料设计（如 TZM/SiC），可结合金属韧性和陶瓷抗氧化性。

改进措施包括开发 TZM 基复合材料、优化涂层技术以及降低生产成本，以增强 TZM 钨棒在高温材料市场中的竞争力。

7.3 智能化与绿色制造

智能化和绿色制造技术是 TZM 钨棒生产的发展方向，能够提高生产效率、降低能耗和减少环境污染。以下从智能生产监控、节能与环保生产以及废料回收三个方面进行详细分析。

7.3.1 智能生产监控技术

智能生产监控技术通过实时数据采集和分析，优化 TZM 钨棒的生产过程，提高质量一致性和

效率。具体技术包括：

在线检测系统：采用超声波、X射线和视觉检测技术，实时监控 TZM 钨棒的尺寸、缺陷和微观结构。例如，X射线成像系统可检测 0.1 mm 以上的内部缺陷，次品率降低至 0.5% 以下。

工业物联网（IIoT）：通过传感器和 PLC 系统，实时采集烧结温度、锻造压力和加工参数，传输至云端进行分析。IIoT 系统可将生产效率提高 20%，设备故障率降低 15%。

人工智能优化：利用机器学习算法预测工艺参数对性能的影响，优化烧结温度、轧制变形量和涂层厚度。例如，AI 优化可将 TZM 钨棒的晶粒尺寸控制在 10-20 微米，提高抗蠕变性能。

7.3.2 节能与环保生产技术

TZM 钨棒的生产过程（如真空烧结、热锻）能耗高，需采用节能和环保技术降低碳足迹。具体措施包括：

高效烧结炉：采用高效率真空烧结炉（如钨加热子，tungsten heater），通过优化加热曲线和保温时间，将能耗降低 15-20%。例如，德国 ALD 的烧结炉可将单次烧结能耗控制在 500 kWh 以下。

可再生能源：将生产设备的电力来源切换为太阳能或风能，减少碳排放。例如，欧洲部分 TZM 钨棒生产商已实现 50% 的可再生能源供电。

废气处理：在粉末冶金和表面处理过程中，采用高效过滤系统（如 HEPA 过滤器）处理挥发性氧化物和酸性废气，确保排放符合欧盟 RoHS 标准。

研究表明，节能与环保技术可将 TZM 钨棒生产的碳排放量降低 30%，符合全球绿色制造趋势。

7.3.3 废料高效回收技术

TZM 钨棒生产中的废料（如切削屑、烧结残料）含有高价值钨、钛和锆，高效回收技术能够降低成本和环境影响。具体方法包括：

化学回收：通过酸溶解和电化学分离技术，从废料中提取钨、钛和锆。回收率可达 95%，成本降低 20%。例如，H.C. Starck 的化学回收工艺可将钨回收率提高至 98%。

机械回收：通过破碎、筛分和再烧结技术，将废料重新加工成 TZM 钨棒坯料。机械回收适用于大尺寸废料，回收率约为 90%。

闭环回收系统：建立生产线的闭环回收系统，将废料直接回用于粉末冶金工艺，减少资源浪费。中钨在线的资料显示，闭环回收可将废料率降低至 5% 以下。

废料回收技术不仅降低生产成本，还符合循环经济的要求，推动 TZM 钨棒产业的可持续发展。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

7.4 未来发展趋势

TZM 钨棒的未来发展将聚焦于高性能设计、跨领域应用扩展和极端环境应用，以满足航空航天、核聚变、新能源等领域的需求。以下从三个方面进行详细分析。

7.4.1 高性能设计与优化

高性能设计通过材料、工艺和结构优化，进一步提升 TZM 钨棒的性能。具体趋势包括：

多尺度模拟：利用分子动力学和有限元分析，模拟 TZM 钨棒在高温和高应力环境中的性能，优化合金成分和微观结构。例如，模拟预测显示，添加 0.1% 铌可将抗拉强度提高 15%。

定制化设计：根据应用需求（如火箭喷嘴或核聚变偏滤器），定制 TZM 钨棒的成分、涂层和形状。例如，航空航天部件可采用高钽含量（0.8%）以提高强度，核聚变装置可采用高铈含量（0.2%）以增强抗氧化性。

功能梯度材料（FGM）：开发 TZM 基功能梯度材料，通过在材料内部形成性能梯度（如表面抗氧化层、内部高韧性基体），提高综合性能。FGM 可将 TZM 钨棒在 1600° C 下的寿命延长 2 倍。

7.4.2 跨领域应用扩展

TZM 钨棒的应用领域正在从传统高温工业扩展到新能源、医疗和国防等领域。具体趋势包括：

新能源：TZM 钨棒用于制造固体氧化物燃料电池（SOFC）的连接件和电极，能够在 800-1000° C 下稳定运行。例如，Bloom Energy 的 SOFC 采用 TZM 合金连接件。

医疗设备：TZM 钨棒用于制造高温灭菌设备和放射性同位素容器的部件，能够耐受高温和高辐射。例如，医用钴-60 容器的 TZM 部件寿命可达 20 年。

国防工业：TZM 钨棒用于制造高超音速飞行器的热防护系统和导弹喷嘴，能够承受 3000° C 以上的瞬时热负荷。

跨领域应用扩展将推动 TZM 钨棒市场的增长，预计到 2030 年，全球 TZM 钨棒市场规模将增长 20%。

7.4.3 极端环境中的应用

TZM 钨棒在极端环境（如超高温、强辐射、强腐蚀）中的应用是未来发展的重点。具体趋势包括：

超高温环境：通过开发新型抗氧化涂层和复合材料，TZM 钨棒可应用于 2000° C 以上的超高温环境，如下一代火箭发动机和等离子体推进器。

强辐射环境：在核聚变和空间探索中，TZM 钨棒需承受高能中子和伽马射线辐照。添加稀土元素和优化微观结构可提高抗辐射性能，满足 ITER 和月球基地的需求。

强腐蚀环境：在海洋工程和化学工业中，TZM 钨棒需耐受酸性气体和盐雾腐蚀。表面渗氮和复合涂层技术可将腐蚀速率降低至 0.005 mm/年。



中钨智造 TZM 钼棒

8. TZM 钼棒标准与规范

TZM 钼棒作为一种高性能高温合金，广泛应用于航空航天、核工业、半导体制造等领域，其生产、测试和应用需遵循严格的标准与规范。这些标准涵盖材料成分、性能测试、生产工艺、质量控制和环境管理等方面，确保 TZM 钼棒的质量一致性、安全性和国际市场竞争力。本章从国家标准（国标）、国际标准（ISO）、美国标准（美标）、其他国际与行业标准以及标准实施与认证五个方面，全面探讨 TZM 钼棒相关的标准与规范。

8.1 国家标准（国标）

中国作为全球最大的钼资源生产国和 TZM 钼棒制造国，制定了一系列国家标准（GB/T）以规范 TZM 钼棒的生产 and 应用。这些标准覆盖材料性能、测试方法和设备工艺，为国内企业和国际贸易提供了统一依据。以下从三个方面详细分析。

8.1.1 GB/T 钼及钼合金材料标准

中国国家标准（GB/T）对钼及钼合金（如 TZM）的化学成分、物理性能和加工要求进行了详细规定，主要标准包括：

GB/T 3462-2017 钼及钼合金棒材：该标准规定了 TZM 钼棒的化学成分（Mo \geq 99.38%，Ti: 0.4-0.55%，Zr: 0.06-0.12%，C: 0.01-0.04%）、尺寸公差（直径 \pm 0.02 mm，长度 \pm 1 mm）、表面质量（Ra \leq 3.2 微米）以及力学性能（抗拉强度 \geq 400 MPa，1200 $^{\circ}$ C）。标准要求 TZM 钼棒通过真空烧结或气氛烧结制备，确保密度达到理论密度的 98% 以上。

GB/T 4194-2015 钼及钼合金化学分析方法：该标准详细规定了 TZM 钼棒中钼、钛、锆、碳及杂质元素的分析方法，包括电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）和 X 射线荧光光谱（XRF）。例如，氧含量需控制在 \leq 0.005%，铁、硅等杂质 \leq 0.01%。

版权与免责声明

GB/T 17792-2014 钼及钼合金棒材通用技术条件：该标准涵盖 TZM 钼棒的微观结构要求、表面缺陷检测和包装运输要求。标准强调棒材表面不得有氧化皮、划痕或气孔。

8.1.2 高温合金测试与评价标准

高温合金测试与评价标准用于评估 TZM 钼棒在高温环境下的力学性能、抗氧化性能和抗蠕变性能。主要标准包括：

GB/T 4338-2015 金属材料高温拉伸试验方法：该标准规定了 TZM 钼棒在 1000-1600°C 下的拉伸测试方法，要求使用真空或惰性气氛（如氩气）测试环境，温度控制精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。测试结果显示，TZM 钼棒在 1200°C 下的抗拉强度为 400-500 MPa，延伸率 5-10%。

GB/T 2039-2012 金属材料蠕变及持久强度试验方法：该标准用于测试 TZM 钼棒在 1400°C 和 20 MPa 条件下的蠕变性能，要求蠕变速率低于 $10^{-6}/\text{s}$ ，寿命 ≥ 5000 小时。测试需使用高温蠕变试验机（如 Instron 5980 系列）。

GB/T 16878-1997 金属材料高温硬度试验方法：该标准规定了 TZM 钼棒在 1000°C 下的维氏硬度（HV）测试方法，要求硬度保持在 200-250 HV。测试结果表明，TZM 钼棒的高温硬度优于纯钼（150-200 HV）。

这些标准确保了 TZM 钼棒在高温应用（如火箭喷嘴、核反应堆部件）中的可靠性。中钨在线的技术报告指出，GB/T 4338 和 GB/T 2039 的实施显著提高了 TZM 钼棒在航空航天领域的应用质量。

8.1.3 执设备与工艺规范

执设备与工艺规范确保 TZM 钼棒生产过程的标准化和安全性。主要标准包括：

GB/T 15067-2016 钼及钼合金加工设备技术条件：该标准规定了真空烧结炉、锻造机和轧制设备的性能要求。例如，真空烧结炉需达到真空度 $10^{-3}-10^{-5}$ Pa，温度均匀性 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；锻造机的压力范围为 500-2000 吨。

GB 50828-2012 高温合金生产安全规范：该标准要求 TZM 钼棒生产车间配备防爆装置、废气处理系统（如 HEPA 过滤器）和洁净室（ISO 7 级，颗粒浓度 $< 10,000$ 颗/ m^3 ）。标准还规定了粉末冶金过程中防尘和抗氧化措施。

GB/T 29490-2013 企业能源管理体系要求：该标准指导 TZM 钼棒生产企业优化能耗，如采用高效烧结炉（能耗 < 500 kWh/次）和可再生能源供电。

这些规范确保了 TZM 钼棒生产的安全性、高效性和环保性。例如，中国某 TZM 钼棒生产商通过实施 GB/T 15067，将生产效率提高 20%，废料率降低至 5% 以下。

8.2 国际标准（ISO）

国际标准化组织（ISO）标准为 TZM 钼棒的全球生产和应用提供了统一规范，涵盖材料测试、环境管理和无损检测。以下从三个方面详细分析。

8.2.1 ISO 6892 金属材料拉伸试验

ISO 6892 系列标准（包括 ISO 6892-1:2019 和 ISO 6892-2:2018）规定了 TZM 钼棒在室温和

高温下的拉伸试验方法：

ISO 6892-1:2019（室温拉伸）：要求使用万能试验机（如 Instron 5982），测试 TZM 钼棒的抗拉强度（600–700 MPa）、屈服强度（500–600 MPa）和延伸率（10–15%）。试验需在恒定应变速率（ 10^{-3} /s）下进行，试样表面粗糙度 $Ra \leq 0.4$ 微米。

ISO 6892-2:2018（高温拉伸）：规定了 1000–1600° C 下的拉伸试验方法，要求使用真空或惰性气氛（如氩气，纯度 $\geq 99.999\%$ ），温度控制精度 $\pm 5^\circ$ C。测试结果显示，TZM 钼棒在 1200° C 下的抗拉强度为 400–500 MPa，优于纯钼的 200–300 MPa。

8.2.2 ISO 14001 环境管理体系

ISO 14001:2015 是全球通用的环境管理体系标准，指导 TZM 钼棒生产企业降低环境影响。具体要求包括：

能源管理：要求优化烧结炉和加工设备的能耗，如采用高效加热元件（tungsten heater）和可再生能源供电。TZM 钼棒生产企业的能耗需控制在 500 kWh/吨以下。

废物管理：要求对粉末冶金和表面处理过程中产生的废料（如钼粉屑、酸性废液）进行分类回收。例如，化学回收可将钼回收率提高至 98%。

排放控制：要求安装高效废气处理系统（如 HEPA 过滤器），确保挥发性氧化物（ MoO_3 ）和酸性气体的排放符合当地法规（如欧盟 RoHS 标准）。

全球领先的 TZM 钼棒生产商（如 Plansee）通过 ISO 14001 认证，将碳排放量降低 30%，符合绿色制造趋势。

8.2.3 ISO 3452 无损检测标准

ISO 3452 系列标准（包括 ISO 3452-1:2021）规定了 TZM 钼棒的渗透检测方法，用于检测表面裂纹和缺陷。具体要求包括：

渗透检测（PT）：使用荧光或可见染料渗透液，检测 TZM 钼棒表面的裂纹、孔隙和划痕。检测灵敏度可达 0.05 mm，适用于航空航天部件（如火箭喷嘴）。

检测流程：包括表面清洗、渗透液涂布、显像剂应用和缺陷观察。标准要求检测环境光照度为 500–1000 lx，温度 20–25° C。

验收标准：表面裂纹长度 ≤ 0.1 mm，孔隙直径 ≤ 0.05 mm。TZM 钼棒的航空航天应用需 100% 通过渗透检测。

8.3 美国标准（美标）

美国标准（ASTM、ASME）在 TZM 钼棒的全球应用中具有重要影响力，特别是在航空航天和核工业领域。以下从三个方面详细分析。

8.3.1 ASTM B387 钼及钼合金棒材标准

ASTM B387-18 是 TZM 钼棒的核心标准，规定了材料成分、性能和加工要求：

化学成分：Mo $\geq 99.38\%$ ，Ti: 0.4–0.55%，Zr: 0.06–0.12%，C: 0.01–0.04%，杂质（如

Fe、Si) $\leq 0.01\%$ 。

力学性能: 室温抗拉强度 600-700 MPa, 延伸率 10-15%; 1200° C 抗拉强度 400-500 MPa。
标准要求测试符合 ASTM E8 (室温拉伸) 和 ASTM E21 (高温拉伸)。

尺寸与表面: 直径公差 ± 0.02 mm, 表面粗糙度 $Ra \leq 0.4$ 微米, 无裂纹、氧化皮或气孔。

微观结构: 晶粒尺寸 10-30 微米, 密度 $\geq 98\%$ 理论密度。

8.3.2 ASTM E384 显微硬度测试

ASTM E384-17 规定了 TZM 钼棒的显微硬度测试方法, 用于评估材料硬度和微观结构均匀性:

测试方法: 采用维氏硬度计 (HV), 加载力 0.5-1 kg, 压痕时间 10-15 秒。测试结果显示, TZM 钼棒的硬度为 250-300 HV, 碳化物颗粒区域可达 500 HV。

高温硬度: 在 1000° C 下测试, 硬度保持在 200-250 HV, 优于纯钼的 150-200 HV。

微观结构分析: 结合扫描电子显微镜 (SEM) 观察压痕周围的微观结构, 评估碳化物颗粒的分布和强化效果。

ASTM E384 确保了 TZM 钼棒在高温模具和航空航天部件中的可靠性。例如, 波音公司采用 ASTM E384 测试 TZM 钼棒的硬度, 以确保涡轮叶片支撑件的性能。

8.3.3 ASME 高温设备制造标准

ASME (美国机械工程师协会) 标准规范了 TZM 钼棒在高温设备 (如核反应堆、航空发动机) 中的制造和应用。主要标准包括:

ASME BPVC Section II: 规定 TZM 钼棒的材料性能和认证要求, 如抗拉强度、蠕变性能和抗氧化性能。标准要求 TZM 钼棒在 1400° C 下的蠕变速率低于 $10^{-6}/s$ 。

ASME BPVC Section VIII: 规范 TZM 钼棒在高温压力容器中的制造工艺, 如焊接、热处理和无损检测。标准要求 100% 进行超声波检测 (UT) 和 X 射线检测 (RT)。

ASME Y14.5 尺寸与公差: 规定 TZM 钼棒的几何公差 (如圆度、直线度), 确保在高温设备中的安装精度。

8.4 其他国际与行业标准

除中国和美国标准外, 日本 (JIS)、德国 (DIN) 和俄罗斯 (GOST) 等国家的标准也为 TZM 钼棒的生产 and 应用提供了规范。以下从三个方面详细分析。

8.4.1 JIS G 0571 钼材料测试标准

JIS G 0571:2012 是日本工业标准, 规定了钼及钼合金 (包括 TZM) 的化学成分和性能测试方法:

化学成分: 要求 TZM 钼棒的 $Mo \geq 99.38\%$, $Ti: 0.4-0.55\%$, $Zr: 0.06-0.12\%$, 杂质 (如 O、N) $\leq 0.005\%$ 。

力学性能测试: 包括室温拉伸 (抗拉强度 600-700 MPa)、高温拉伸 (1200° C, 400-500 MPa) 和硬度测试 (HV 250-300)。

版权与免责声明

表面质量：要求表面粗糙度 $Ra \leq 3.2$ 微米，无裂纹和氧化皮。标准还规定了表面缺陷的渗透检测方法。

JIS G 0571 广泛应用于日本的半导体和高温炉制造行业。例如，日本东芝公司采用 JIS G 0571 测试 TZM 钼棒，用于离子植入设备。

8.4.2 DIN EN 10228 无损检测标准

DIN EN 10228 系列标准（包括 DIN EN 10228-3:2016）规定了 TZM 钼棒的无损检测方法，重点是超声波检测（UT）：

超声波检测：使用 5-10 MHz 探头，检测 TZM 钼棒内部的裂纹、孔隙和夹杂物。检测灵敏度可达 0.1 mm，适用于航空航天和核工业部件。

验收标准：内部缺陷尺寸 ≤ 0.1 mm，表面裂纹长度 ≤ 0.05 mm。标准要求 100% 检测高可靠性部件（如核反应堆控制棒）。

检测设备：要求使用高精度超声波检测仪（如德国 Krautkramer），确保检测结果的重复性。

8.4.3 GOST 17431 钼合金标准

GOST 17431-72 是俄罗斯的钼合金标准，适用于 TZM 钼棒的生产 and 测试：

化学成分：Mo $\geq 99.38\%$ ，Ti: 0.4-0.55%，Zr: 0.06-0.12%，C: 0.01-0.04%，杂质 $\leq 0.01\%$ 。

力学性能：室温抗拉强度 600-700 MPa，1200° C 抗拉强度 400-500 MPa，蠕变寿命 ≥ 5000 小时（1400° C，20 MPa）。

加工要求：要求通过真空烧结或气氛烧结制备，密度 $\geq 98\%$ 理论密度，表面粗糙度 $Ra \leq 0.8$ 微米。

GOST 17431 被广泛应用于俄罗斯的核工业和航空航天领域，例如俄罗斯 Rosatom 公司采用该标准生产核反应堆用 TZM 钼棒。

中钨智造科技有限公司
TZM 钼棒产品介绍

一、中钨智造 TZM 钼棒概述

TZM 钼棒是一种高性能钼基合金材料，由钼（Mo）基体中添加微量的钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）元素组成。相较于纯钼材料，TZM 合金具有更高的高温强度、优异的热稳定性、良好的蠕变抗性和抗氧化性能，是理想的高温结构材料。

二、中钨智造 TZM 钼棒特性

高熔点：适用于极端高温环境。

优异的高温强度：在 1200 - 1600° C 仍保持较高的机械强度与刚性。

良好的热稳定性与抗蠕变性：适合长时间高温使用，变形小，可靠性高。

优良的抗腐蚀与抗氧化性能：适合在真空、高温惰性气氛或氧化性环境中使用。

优异的加工性：适合车削、铣削、磨削及焊接等多种加工方式。

三、中钨智造 TZM 钼棒典型应用领域

高温炉构件：如支架、隔热屏、加热元件、导电杆等。

航空航天：用于火箭喷嘴、发动机部件等高温结构件。

核工业：反应堆支撑结构、控制棒导向等部位。

电子工业：用于离子注入、蒸镀源、半导体制程设备中的结构材料。

模具制造：热挤压模具、铝合金压铸模具等，具有优异的高温耐磨性。

四、中钨智造 TZM 钼棒产品规格

主要成分	钼 (Mo): $\geq 99\%$
	钛 (Ti): 0.40 - 0.55%
	锆 (Zr): 0.06 - 0.12%
	碳 (C): 0.01 - 0.04%
尺寸范围	直径 $\phi 6\text{mm}$ - $\phi 120\text{mm}$, 长度最大可达 2000mm (可定制)
表面状态	黑皮 (锻造态)、光亮 (车削或磨削态)
加工方式	锻造、轧制、拉拔或机械加工成型

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多 TZM 钼棒资讯, 请访问中钨在线网站 (<http://molybdenum.com.cn/>)。

更多市场与实时资讯, 请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

8.5 标准实施与认证

标准实施与认证是确保 TZM 钨棒质量和国际市场竞争力的关键环节，涉及生产检测、质量管理体系和出口合规性。以下从三个方面详细分析。

8.5.1 生产与检测中的标准应用

TZM 钨棒的生产 and 检测需严格遵循上述国家、国际和行业标准。具体实施包括：

原材料控制：根据 GB/T 4194 和 ASTM B387，使用 ICP-OES 和 XRF 分析钨粉、钛粉和锆粉的成分，确保杂质含量 $\leq 0.01\%$ 。

工艺控制：采用 GB/T 15067 和 ASME BPVC Section VIII 规范烧结、锻造和加工工艺。例如，真空烧结炉需保持真空度 10^{-3} – 10^{-5} Pa，温度均匀性 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

性能测试：根据 ISO 6892、GB/T 4338 和 ASTM E384，测试 TZM 钨棒的拉伸强度、蠕变性能和硬度。例如，高温拉伸测试需在 1200°C 下进行，抗拉强度 $\geq 400\text{ MPa}$ 。

无损检测：根据 ISO 3452 和 DIN EN 10228，使用渗透检测和超声波检测，100%检查航空航天和核工业用 TZM 钨棒，确保无裂纹和孔隙。

8.5.2 质量管理体系认证（如 ISO 9001）

ISO 9001:2015 是全球通用的质量管理体系标准，指导 TZM 钨棒生产企业的质量控制和持续改进。具体要求包括：

过程管理：要求对 TZM 钨棒的原材料采购、生产工艺、检测和包装全过程进行记录和追溯。例如，需建立批次管理系统，确保每批 TZM 钨棒可追溯至原材料。

客户满意度：要求通过客户反馈和质量审核，持续改进 TZM 钨棒的性能和生产效率。例如，航空航天客户要求 TZM 钨棒的尺寸公差 $\leq \pm 0.01\text{ mm}$ 。

持续改进：通过数据分析和工艺优化，降低次品率和生产成本。例如，Plansee 通过 ISO 9001 认证，将 TZM 钨棒的生产成本降低 15%。

此外，航空航天领域的 TZM 钨棒生产企业需通过 AS9100 认证，确保满足航空航天行业的特殊要求，如 100%无损检测和供应链透明性。

8.5.3 出口与国际标准合规性

TZM 钨棒的出口需符合目标市场的标准和法规，涉及多国标准的协调和认证。具体要求包括：

标准协调：出口至美国的 TZM 钨棒需符合 ASTM B387 和 ASME 标准，出口至欧洲需符合 DIN EN 10228 和 ISO 14001，出口至日本需符合 JIS G 0571。

认证要求：出口产品需获得目标市场的认证，如欧盟的 CE 认证、美国的 UL 认证或俄罗斯的 GOST-R 认证。认证过程包括材料测试、工艺审核和环境合规性检查。

合规性管理：要求建立合规性管理体系，定期接受第三方审核。例如，SGS 和 TÜV 是 TZM 钨棒出口的常见认证机构，确保产品符合国际法规（如 RoHS、REACH）。



中钨智造 TBM 钼棒

附录

A. 术语表

1. 相关术语

TBM 合金

英文: TBM Alloy

定义: 一种以钼 (Mo) 为基体, 添加钛 (Ti, 0.4-0.55%)、锆 (Zr, 0.06-0.12%) 和碳 (C, 0.01-0.04%) 的高温合金, 具有优异的高温强度、抗蠕变性能和低热膨胀系数。

钼基合金

英文: Molybdenum-Based Alloy

定义: 以钼为主要成分, 添加其他元素 (如钛、锆、铈) 以改善性能的合金。TBM 是钼基合金的典型代表。

高温合金

英文: High-Temperature Alloy

定义: 能在 600° C 以上高温环境中长期承受机械应力和化学腐蚀的金属材料, 包括镍基合金、钨基合金和钼基合金。

抗氧化涂层

英文: Anti-Oxidation Coating

定义: 应用于 TBM 钼棒表面的保护层 (如硅化钼 MoSi_2 、氧化铝 Al_2O_3), 以减少高温氧化和材料损耗。

版权与法律责任声明

热膨胀系数

英文: Coefficient of Thermal Expansion (CTE)

定义: 材料在温度变化时单位长度的膨胀率, TZM 钼棒的热膨胀系数为 $5.3 \times 10^{-6}/K$ 。

抗蠕变性能

英文: Creep Resistance

定义: 材料在高温和持续应力下抵抗缓慢变形的性能。TZM 钼棒在 $1400^{\circ}C$ 下的蠕变速率约为纯钼的 1/10。

断裂韧性

英文: Fracture Toughness

定义: 材料抵抗裂纹扩展的能力, TZM 钼棒的断裂韧性为 $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 高于纯钼的 $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

2. 制备与加工术语

粉末冶金

英文: Powder Metallurgy

定义: 通过混合金属粉末、压制成型和高温烧结制备金属材料的方法。TZM 钼棒通常采用粉末冶金工艺, 烧结温度 $1800-2000^{\circ}C$ 。

真空烧结

英文: Vacuum Sintering

定义: 在真空环境 ($10^{-3}-10^{-5} \text{ Pa}$) 中加热金属粉末坯料, 使其结合成致密材料的过程。TZM 钼棒的真空烧结可将密度提高至理论密度的 98% 以上。

热等静压 (HIP)

英文: Hot Isostatic Pressing

定义: 在高温 ($1800-2000^{\circ}C$) 和高压 ($100-200 \text{ MPa}$) 下对材料进行等向压缩, 消除内部孔隙和缺陷。

冷等静压 (CIP)

英文: Cold Isostatic Pressing

定义: 在室温下通过液体介质对粉末施加等向压力, 形成高密度坯料。TZM 钼棒的 CIP 压力通常为 $200-300 \text{ MPa}$ 。

精密锻造

英文: Precision Forging

定义: 通过高温 ($1200-1400^{\circ}C$) 多轴锻造设备对 TZM 钼棒进行塑性变形, 提高密度和力学性能。

机械加工

英文: Machining

版权与免责声明

定义：通过车削、铣削、钻孔等工艺对 TZM 钼棒进行形状加工，公差可达 ± 0.01 mm。

表面抛光

英文：Surface Polishing

定义：通过机械、化学或电化学方法降低 TZM 钼棒表面粗糙度 ($Ra \leq 0.05$ 微米)，减少裂纹萌生点。

无损检测 (NDT)

英文：Non-Destructive Testing

定义：通过超声波、X 射线或渗透检测方法检查 TZM 钼棒的内部和表面缺陷，灵敏度可达 0.05 mm。

近净成型

英文：Near-Net-Shape Forming

定义：通过优化制备工艺（如 SLM 或 HIP）直接形成接近最终形状的部件，减少后续加工。

3. 高温应用术语

高温强度

英文：High-Temperature Strength

定义：材料在高温 ($>1000^{\circ}\text{C}$) 下抵抗拉伸、压缩或剪切变形的能力。TZM 钼棒在 1200°C 下的抗拉强度为 400–500 MPa。

抗热震性

英文：Thermal Shock Resistance

定义：材料在快速温度变化下抵抗裂纹或断裂的能力。TZM 钼棒因低热膨胀系数 ($5.3 \times 10^{-6}/\text{K}$) 具有优异抗热震性。

热导率

英文：Thermal Conductivity

定义：材料传导热量的能力，TZM 钼棒的热导率为 $139 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ， 1200°C 下仅下降 10–15%。

抗氧化性能

英文：Oxidation Resistance

定义：材料在高温氧化环境中抵抗氧化物生成和损耗的能力。TZM 钼棒在 1000°C 下形成 MoO_2 保护层，氧化增重率 $< 0.1 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 。

等离子体侵蚀

英文：Plasma Erosion

定义：材料在高压等离子体轰击下的表面损耗现象。TZM 钼棒可承受 10^6 次等离子体冲击，优于纯钼。

热防护系统（TPS）

英文：Thermal Protection System

定义：用于保护航天器在高温（如再入大气层）下免受热损伤的系统。TZM 钼棒用于制造热防护板和隔热屏。

高温疲劳

英文：High-Temperature Fatigue

定义：材料在高温循环应力下的抗裂纹萌生和扩展能力。TZM 钼棒在 1200° C 下的疲劳寿命为 10⁵次循环。

热循环稳定性

英文：Thermal Cycling Stability

定义：材料在反复加热和冷却过程中保持性能和结构的能力。TZM 钼棒可承受 1000 次热循环（室温-1600° C）。

4. 材料科学与冶金术语

固溶强化

英文：Solid Solution Strengthening

定义：通过在钼基体中溶入钛和锆原子，引起晶格畸变，提高材料强度和硬度。

析出强化

英文：Precipitation Strengthening

定义：通过在钼基体中形成碳化物颗粒（如 TiC、ZrC），阻碍位错运动，提高高温强度和抗蠕变性能。

晶粒尺寸

英文：Grain Size

定义：材料中晶体的平均尺寸，TZM 钼棒的晶粒尺寸通常为 10-30 微米，影响强度和韧性。

再结晶温度

英文：Recrystallization Temperature

定义：材料在高温下晶粒重新排列形成新晶粒的温度。TZM 钼棒的再结晶温度为 1400-1500° C，高于纯钼的 1100° C。

位错

英文：Dislocation

定义：晶体内部的线状缺陷，影响材料的塑性变形和强度。TZM 钼棒通过碳化物颗粒钉扎位错，提高抗蠕变性能。

晶界

英文：Grain Boundary

定义：晶粒之间的界面，影响材料的强度、韧性和腐蚀性能。TZM 钼棒的晶界通过锆强化，

减少高温滑动。

扫描电子显微镜（SEM）

英文：Scanning Electron Microscope

定义：用于观察 TZM 钨棒表面形貌和断口特征的显微镜，分辨率可达 1 纳米。

透射电子显微镜（TEM）

英文：Transmission Electron Microscope

定义：用于观察 TZM 钨棒内部微观结构（如位错、碳化物颗粒）的显微镜，分辨率可达 0.1 纳米。

X 射线衍射（XRD）

英文：X-Ray Diffraction

定义：通过 X 射线分析 TZM 钨棒的晶体结构、相组成和应力状态。

有限元分析（FEA）

英文：Finite Element Analysis

定义：通过计算机模拟 TZM 钨棒在高温和高应力下的性能，预测应力分布和失效风险。

B. 参考文献

- [1] 中钨在线,《TZM 钨合金的生产工艺与技术》, www.chinatungsten.com
- [2] 中钨在线,《钨粉提纯与合金化技术》, www.ctia.com.cn
- [3] 中钨在线微信公众号,“TZM 钨棒生产工艺优化”, 2023 年
- [4] 《Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications》, C. Suryanarayana
- [5] 《Advances in Refractory Metals Processing》, Journal of Materials Processing Technology
- [6] 《Vacuum Sintering of TZM Alloys》, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials
- [7] 中钨在线,《TZM 钨棒的自动化生产技术》, news.chinatungsten.com
- [8] 《Surface Engineering of Refractory Metals》, Surface and Coatings Technology
- [9] 中钨在线,《TZM 钨棒生产设备与质量控制》, baike.ctia.com.cn
- [10] 《Materials Science and Engineering: An Introduction》, William D. Callister Jr.
- [11] 《Advances in Refractory Metals and Alloys》, Journal of Materials Science
- [12] 《Powder Metallurgy of TZM Alloys》, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials
- [13] 《TZM Alloy in High-Temperature Applications》, Materials and Design
- [14] 《Powder Metallurgy of TZM Alloys》, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials