

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
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

目录

第一章 引言

- 1.1 钨棒的定义与概述
- 1.2 钨棒的历史发展
- 1.3 钨棒在现代工业中的重要性
- 1.4 全球市场现状与发展趋势

第二章 钨棒的材料特性

- 2.1 钨的化学组成与原子结构
- 2.2 钨的晶体结构与相态变化
- 2.3 钨棒的物理性能
 - 2.3.1 钨棒的密度与熔点
 - 2.3.2 钨棒的热导率与热膨胀系数
 - 2.3.3 钨棒的电导率与电阻率
- 2.4 钨棒的机械性能
 - 2.4.1 钨棒的强度与硬度
 - 2.4.2 钨棒的延展性与韧性
 - 2.4.3 钨棒在高温下的蠕变行为
- 2.5 钨棒的化学性能
 - 2.5.1 钨棒的抗氧化性
 - 2.5.2 钨棒的耐腐蚀性（酸、碱、熔盐等）
- 2.6 钨与钨基合金的比较
- 2.7 钨棒与其他高温材料的性能对比
- 2.8 中钨智造钨棒 MSDS

第三章 钨棒的制备与生产工艺

- 3.1 钨原料的获取
 - 3.1.1 钨矿石的开采与选矿
 - 3.1.2 钨精矿的提纯
- 3.2 钨棒的粉末冶金工艺
 - 3.2.1 钨粉的制备（还原法、雾化法）
 - 3.2.2 粉末粒度与纯度控制
 - 3.2.3 压制成型（冷等静压、模压）
- 3.3 钨棒的烧结工艺
 - 3.3.1 真空烧结
 - 3.3.2 氢气保护烧结
 - 3.3.3 高温烧结设备与参数优化
- 3.4 钨棒的热加工技术
 - 3.4.1 锻造工艺
 - 3.4.2 轧制工艺
 - 3.4.3 拉拔工艺

版权与免责声明

- 3.5 钨棒的表面处理技术
 - 3.5.1 机械抛光
 - 3.5.2 化学清洗
 - 3.5.3 表面涂层（抗氧化涂层等）
- 3.6 钨棒的质量控制与工艺优化
 - 3.6.1 生产过程中的缺陷控制
 - 3.6.2 工艺参数的监控与优化

第四章 钨棒的类型与规格

- 4.1 按成分分类
 - 4.1.1 高纯钨棒（纯度 $\geq 99.95\%$ ）
 - 4.1.2 掺杂钨棒（TZM、Mo-La、Mo-W 等）
- 4.2 按表面状态分类
 - 4.2.1 黑钨棒
 - 4.2.2 抛光钨棒
 - 4.2.3 清洗钨棒
- 4.3 按尺寸与形状分类
 - 4.3.1 圆形钨棒
 - 4.3.2 方形及其他异形钨棒
 - 4.3.3 微型钨棒与大型钨棒
- 4.4 定制化钨棒设计
 - 4.4.1 客户需求分析
 - 4.4.2 特殊规格与性能定制

第五章 钨棒的性能测试与评估

- 5.1 钨棒的力学性能测试
 - 5.1.1 钨棒的拉伸测试
 - 5.1.2 钨棒的压缩测试
 - 5.1.3 弯曲与剪切测试
- 5.2 钨棒的高温性能测试
 - 5.2.1 钨棒的蠕变测试
 - 5.2.2 钨棒的热疲劳测试
 - 5.2.3 钨棒的抗氧化性能测试
- 5.3 钨棒的微观结构分析
 - 5.3.1 扫描电子显微镜（SEM）分析
 - 5.3.2 X 射线衍射（XRD）分析
 - 5.3.3 能谱分析（EDS）
- 5.4 钨棒的化学性能测试
 - 5.4.1 钨棒的耐腐蚀性测试
 - 5.4.2 钨棒的化学稳定性评估
- 5.5 钨棒的失效分析
 - 5.5.1 钨棒的断裂机理分析

- 5.5.2 钨棒的疲劳与磨损分析
- 5.5.3 钨棒的生命预测模型

第六章 钨棒的生产设备

- 6.1 钨棒的原料处理设备
 - 6.1.1 破碎与研磨设备
 - 6.1.2 提纯设备（焙烧炉、还原炉）
- 6.2 钨棒的粉末冶金设备
 - 6.2.1 混料与压制设备
 - 6.2.2 烧结炉（真空炉、气氛炉）
- 6.3 钨棒的热加工设备
 - 6.3.1 锻造设备
 - 6.3.2 轧机与拉拔机
- 6.4 钨棒的表面处理设备
 - 6.4.1 抛光机
 - 6.4.2 清洗设备
- 6.5 钨棒的检测设备
 - 6.5.1 无损检测设备（超声、X射线）
 - 6.5.2 尺寸与表面质量检测设备
- 6.6 钨棒的自动化与智能化生产设备
 - 6.6.1 生产线的自动化控制
 - 6.6.2 智能监测与数据分析

第七章 钨棒的应用领域

- 7.1 高温炉与热工设备
 - 7.1.1 钨棒作为加热元件
 - 7.1.2 支撑与固定部件
- 7.2 电子与半导体行业
 - 7.2.1 电极材料
 - 7.2.2 溅射靶材
 - 7.2.3 真空管与离子源部件
- 7.3 航空航天
 - 7.3.1 高温结构件
 - 7.3.2 推进系统部件
- 7.4 玻璃与陶瓷工业
 - 7.4.1 玻璃熔化电极
 - 7.4.2 陶瓷烧结支撑
- 7.5 医疗与科研
 - 7.5.1 X射线管靶材
 - 7.5.2 实验室高温实验设备
- 7.6 新兴应用
 - 7.6.1 3D打印与增材制造

7.6.2 核工业应用

第八章 钨棒的国内外标准与规范

- 8.1 钨棒的国际标准
 - 8.1.1 ASTM 标准（ASTM B387 等）
 - 8.1.2 ISO 标准
- 8.2 钨棒的国内标准
 - 8.2.1 GB/T 标准（GB/T 3462 等）
 - 8.2.2 行业标准与企业标准
- 8.3 钨棒的认证与合规性
 - 8.3.1 材料认证流程
 - 8.3.2 环境与安全合规性
- 8.4 钨棒的标准对比与适用场景分析

第九章 钨棒的加工、使用与维护

- 9.1 钨棒的加工技术
 - 9.1.1 切割（线切割、激光切割）
 - 9.1.2 机加工（车削、铣削、钻孔）
 - 9.1.3 焊接与连接技术
- 9.2 钨棒的使用环境要求
 - 9.2.1 真空与惰性气氛
 - 9.2.2 高温氧化环境保护
- 9.3 钨棒的安装与固定
 - 9.3.1 安装工艺与夹具设计
 - 9.3.2 热膨胀匹配设计
- 9.4 钨棒的维护与清洁
 - 9.4.1 表面清洁方法
 - 9.4.2 定期检查与维护
- 9.5 钨棒的安全操作规范
 - 9.5.1 高温操作注意事项
 - 9.5.2 化学处理安全规范

第十章 钨棒的回收与可持续发展

- 10.1 钨棒的回收工艺
 - 10.1.1 废料收集与分类
 - 10.1.2 回收提纯技术
- 10.2 钨棒的环境影响与绿色生产
 - 10.2.1 生产过程中的能耗与排放
 - 10.2.2 环保工艺改进
- 10.3 钨棒的循环经济与可持续发展策略

第十一章 钨棒的最新技术与未来趋势

- 11.1 钨基合金的研发进展
 - 11.1.1 TZM 与 Mo-La 合金的优化
 - 11.1.2 新型掺杂技术
- 11.2 纳米结构钨棒的开发
- 11.3 智能化生产与检测技术
 - 11.3.1 在线监测与大数据分析
 - 11.3.2 人工智能在钨棒生产中的应用
- 11.4 钨棒在新能源领域的潜力
 - 11.4.1 氢能与储能应用
 - 11.4.2 高温超导材料支持
- 11.5 钨棒的未来研究方向与挑战

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

第一章 引言

1.1 钼棒的定义与概述

钼棒 (Molybdenum Rod) 是由高纯钼或钼基合金 (如 TZM、Mo-La) 制成的棒状材料, 通常通过粉末冶金工艺或热加工工艺生产, 具有优异的高温性能、机械强度和化学稳定性。钼棒的纯度通常达到 99.95% 以上, 直径范围从几毫米到几十毫米, 长度可根据应用需求定制。钼棒的表面状态包括黑棒 (未经抛光, 表面氧化层保留)、**抛光棒** (机械或化学抛光) 和 **清洗棒** (去除表面杂质), 以满足不同应用场景的需求。

钼作为一种难熔金属, 具有高熔点 (2623° C)、低热膨胀系数 (约 $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ} \text{C}$)、良好的热导率 (约 138 W/m·K) 和电导率, 使其在高温和极端环境中表现出色。钼棒的主要特性包括耐高温、抗腐蚀、抗蠕变以及良好的加工性能, 这些特性使其广泛应用于高温炉、电子半导体、航空航天、玻璃制造等行业。此外, 钼棒可以通过掺杂 (如钛、铅、镧等元素) 进一步优化其高温强度和抗氧化性能。

钼棒的形态多样, 包括圆形棒、方形棒以及其他异形棒材, 其生产工艺涉及从钼矿石提纯到粉末冶金、热加工和表面处理的完整流程。钼棒的性能和质量受原料纯度、烧结工艺和加工精度等因素影响, 因此生产过程中需严格控制工艺参数以确保产品一致性。钼棒的应用场景对其尺寸、表面状态和性能要求各异, 例如在半导体行业中要求高纯度和表面光洁度, 而在高温炉中则更注重抗氧化性和机械强度。

1.2 钼棒的历史发展

钼的历史可以追溯到 18 世纪末, 1778 年, 瑞典化学家卡尔·威廉·舍勒 (Carl Wilhelm Scheele) 首次从钼矿石中分离出钼酸, 奠定了钼化学研究的基础。1781 年, 彼得·雅各布·耶姆 (Peter Jacob Hjelm) 通过还原钼酸成功制备了金属钼, 标志着钼作为金属元素的正式发现。19 世纪初, 钼因其稀有性和提取难度主要用于实验室研究, 直到 20 世纪初, 随着冶金技术的进步, 钼的工业化生产才逐渐成为可能。

钼棒作为钼制品的一种, 其发展与粉末冶金技术的成熟密切相关。20 世纪初, 钼棒开始用于电灯泡和真空管制造, 因其高熔点和良好的导电性成为钨丝的替代材料。1920 年代, 美国和德国的工业化生产推动了钼棒在高温炉和玻璃工业中的应用。二战期间, 钼棒因其在高温合金和航空航天领域的潜力而受到重视, 特别是在喷气发动机和火箭推进系统中。

20 世纪中后期, 随着半导体行业的兴起, 钼棒作为溅射靶材和电极材料的用途显著增加。**TZM** (钛-锆-钼) 合金和 **Mo-La** (钼-镧) 合金的开发进一步提升了钼棒的高温性能和抗蠕变能力, 使其在更苛刻的环境中得到应用。21 世纪以来, 钼棒的生产工艺不断优化, 自动化和智能化技术的引入提高了生产效率和产品质量。例如, 现代钼棒生产采用真空烧结和精密轧制技术, 能够生产出高纯度、尺寸精确的棒材。

中国的钼产业在过去几十年中快速发展, 成为全球最大的钼生产和消费国。得益于丰富的钼矿资源和先进的生产技术, 中国企业在钼棒的研发和生产中占据重要地位, 推动了钼棒在全球市场的普及。

版权与免责声明

1.3 钨棒在现代工业中的重要性

钨棒在现代工业中具有不可替代的地位，其重要性源于其独特的材料性能和广泛的应用领域。以下从几个关键方面阐述钨棒在现代工业中的作用：

高温应用：钨棒的高熔点和抗蠕变性能使其成为高温炉（如真空炉、氢气炉）的理想材料，常用于加热元件、支撑杆和热屏。钨棒能在高达 1800° C 的环境中稳定工作，显著优于传统金属材料。

电子与半导体行业：钨棒作为溅射靶材广泛用于薄膜沉积工艺，生产集成电路、太阳能电池和平板显示器。其高纯度和均匀的微观结构确保了薄膜质量。此外，钨棒还用于真空管和离子源的电极材料。

航空航天：钨棒在航空航天领域用于制造高温结构件，如喷气发动机喷嘴和火箭推进系统部件。其低热膨胀系数和高强度确保了在极端温度和应力条件下的可靠性。

玻璃与陶瓷工业：钨棒在玻璃熔化炉中用作电极，因其耐高温腐蚀和化学稳定性，能够承受熔融玻璃的侵蚀。此外，钨棒还用于陶瓷烧结过程中的支撑部件。

医疗与科研：钨棒在 X 射线管中用作靶材，生成高能 X 射线用于医疗诊断和材料分析。在科研领域，钨棒是高温实验设备的关键部件，支持材料科学和物理学研究。

钨棒的重要性还体现在其可持续性。钨是一种可回收金属，废旧钨棒可以通过提纯工艺重新利用，符合现代工业对绿色制造的需求。钨棒的多样化应用推动了多个行业的技术进步，例如新能源（光伏、氢能）和高端制造领域。

1.4 全球市场现状与发展趋势

全球钨棒市场近年来呈现稳定增长态势，主要得益于电子、航空航天和能源行业的需求增加。根据行业报告，2024 年全球钨市场规模约为 XX 亿美元，其中钨棒作为重要产品形式占据了相当比例。中国是全球最大的钨生产国，产量占全球的 40% 以上，其次是美国、智利和秘鲁等国家。

市场现状

生产与供应：中国企业在钨棒生产中占据主导地位，依托丰富的钨矿资源和成熟的粉末冶金技术。

需求驱动：电子与半导体行业的快速发展推动了对高纯钨棒的需求，尤其是在 5G 技术、人工智能芯片和光伏产业中。航空航天领域对 T2M 和 Mo-La 合金棒材的需求也在增加。

价格波动：钨棒价格受原料供应、地缘政治和市场需求影响较大。近年来，钨价整体稳定，但因能源成本上升和环保法规趋严，生产成本有所增加。

发展趋势

高性能合金棒材：T2M 和 Mo-La 等掺杂钨棒的研发是未来重点，旨在提升高温强度和抗氧化性能，满足航空航天和核工业的需求。

版权与免责声明

绿色生产：随着环保要求的提高，钨棒生产企业正采用低能耗、低排放的工艺，如绿色提纯技术和废料回收系统。

智能化制造：自动化生产线和智能检测技术（如在线 X 射线检测）正在改变钨棒生产方式，提高效率和一致性。

新兴应用：钨棒在新能源领域（如氢能电解槽和高温超导材料）以及增材制造（3D 打印）中的潜力逐渐显现，预计将推动市场进一步增长。

区域市场动态：中国继续引领全球钨棒市场，同时印度和东南亚地区的需求快速增长，成为新的市场热点。

挑战

原料供应风险：钨矿资源的地区集中性可能导致供应波动。

技术壁垒：高纯钨棒和特殊合金棒材的生产对技术要求极高，中小型企业难以进入市场。

环保压力：钨提纯和加工过程中的能耗与排放问题需进一步解决。



中钨智造磨光钨棒

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

第二章 钼棒的材料特性

2.1 钼的化学组成与原子结构

钼 (Molybdenum, 元素符号 Mo, 原子序数 42) 是一种过渡金属, 属于第六周期第五族元素, 原子量为 95.94 g/mol。钼的化学组成主要以高纯单质钼为主, 工业用钼棒的纯度通常达到 99.95% 以上, 杂质元素 (如铁、碳、氧、氮等) 含量严格控制在 ppm 级, 以确保其性能稳定性。钼棒在某些应用中会掺杂微量元素 (如钛、锆、镧) 以形成钼基合金, 如 TZM (钛-锆-钼) 或 Mo-La (钼-镧), 以提升高温强度或抗氧化性能。

从原子结构来看, 钼的电子构型为 $[Kr] 4d^5 5s^1$, 具有较强的金属键结合能力。其原子半径约为 139 pm, 电负性为 2.16 (鲍林标度), 显示出适中的化学活性。钼的化学稳定性使其在高温和腐蚀环境中表现出色, 但在特定条件下 (如高温氧化环境) 需采取防护措施。钼的化学性质受其原子结构影响, 4d 和 5s 轨道的电子分布使其具有较高的熔点和机械强度, 同时保持一定的延展性。

钼的纯度对其性能至关重要。例如, 氧含量过高 (>50 ppm) 会导致晶界脆化, 降低钼棒的韧性。因此, 生产过程中常采用真空熔炼或氢气还原工艺以减少杂质。行业标准 (如 ASTM B387) 对钼棒的化学成分有明确要求, 例如铁含量 $\leq 0.01\%$ 、碳含量 $\leq 0.005\%$ 。中钨在线等行业信息指出, 高纯钼棒的生产需严格控制原料来源和提纯工艺, 以满足半导体和航空航天等高要求应用。

2.2 钼的晶体结构与相态变化

钼的晶体结构为体心立方 (BCC, Body-Centered Cubic), 晶格常数约为 0.3147 nm。这种结构赋予钼高熔点和良好的机械性能, 同时使其在高温下保持结构稳定性。BCC 结构的钼原子排列紧密, 晶体缺陷 (如位错、晶界) 较少, 有助于其抗高温蠕变能力。

钼在常温至熔点 ($2623^{\circ}C$) 范围内保持单一的 BCC 相, 不发生同素异构转变, 这使其在宽温度范围内具有稳定的物理和机械性能。然而, 在高温下, 钼的晶粒可能发生生长, 导致机械性能下降, 因此掺杂元素 (如镧或钛) 常用于细化晶粒, 增强晶界强度。Mo-La 合金通过添加氧化镧 (La_2O_3) 形成分散相, 有效抑制晶粒生长, 提高高温性能。

相态变化方面, 钼在常压下从固态直接升华为气态 (约 $4650^{\circ}C$), 不经过液态, 这使其在真空或惰性气氛中更适合高温应用。钼的相态稳定性使其成为高温炉和真空设备的理想材料, 但在氧化气氛中需警惕氧化反应 (生成 MoO_3)。X 射线衍射 (XRD) 分析显示, 钼棒的晶体取向和微观结构受加工工艺 (如轧制、锻造) 影响, 沿轴向的择优取向可提高其力学性能。

学术研究表明, 钼棒的晶体结构对其导电性和热导率有显著影响。BCC 结构的紧凑排列使其热导率较高, 而晶界和杂质的存在可能降低性能。因此, 生产高性能钼棒需优化烧结和热加工工艺, 以减少晶体缺陷和杂质。

2.3 钼棒的物理性能

钼棒的物理性能是其在高温和极端环境中广泛应用的基础。以下从密度与熔点、热导率与热

版权与免责声明

膨胀系数、电导率与电阻率三个方面详细阐述。

2.3.1 钨棒的密度与熔点

钨棒的密度为 10.28 g/cm^3 (20°C)，略低于钨 (19.25 g/cm^3)，但高于大多数常见金属（如铁、镍）。这一密度使其在需要高强度但重量敏感的应用（如航空航天）中具有优势。钨棒的密度受其纯度和加工工艺影响，高纯钨棒的密度接近理论值，而掺杂合金（如 TZM）密度略有变化（约 $10.1 - 10.3 \text{ g/cm}^3$ ）。

钨的熔点为 2623°C ，是所有金属中熔点较高的之一，仅次于钨 (3422°C) 和铯 (3186°C)。高熔点使钨棒能够在极端高温下（如真空炉内 1800°C 以上）保持结构完整性，适用于高温热处理、玻璃熔化和半导体制造。熔点的高低还影响钨棒的加工难度，高温锻造和烧结需在接近熔点的温度下进行，对设备要求较高。

2.3.2 钨棒的热导率与热膨胀系数

钨棒的热导率为 $138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (20°C)，表现出优异的热传导能力，适合作为高温炉的加热元件或热屏材料。与钨 ($173 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) 相比，钨的热导率略低，但在高温下仍能有效散热，减少热应力集中。热导率随温度升高略有下降，例如在 1000°C 时约为 $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，仍足以满足大多数高温应用需求。

钨棒的热膨胀系数较低，约为 $4.8 \times 10^{-6}/^\circ \text{C}$ ($20 - 1000^\circ \text{C}$)，远低于钢 (约 $12 \times 10^{-6}/^\circ \text{C}$) 和铜 ($16.5 \times 10^{-6}/^\circ \text{C}$)。低热膨胀系数使钨棒在高温循环中具有良好的尺寸稳定性，减少热应力引起的开裂或变形。这一特性在玻璃密封和半导体制造中尤为重要，因为钨棒的热膨胀系数与某些玻璃和陶瓷材料匹配。

2.3.3 钨棒的电导率与电阻率

钨棒的电导率约为 $1.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ (20°C)，电阻率为 $5.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，表现出良好的导电性能，适合用作电极或导电部件。电阻率随温度升高而增加，例如在 1000°C 时电阻率约为 $20 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。这种温度依赖性需在设计高温电极或加热元件时考虑，以确保电流稳定性和功率输出。

钨棒的电导率受杂质和微观结构影响，高纯钨棒的电导率优于掺杂合金。例如，TZM 合金因含有钽和锆，电阻率略高于纯钨棒。行业报告指出，半导体行业对钨棒的电导率要求极高，需通过高纯化工艺和表面处理减少电阻率波动。

2.4 钨棒的机械性能

钨棒的机械性能是其在工业应用中可靠性的关键，以下从强度与硬度、延展性与韧性、高温蠕变行为三个方面分析。

2.4.1 钨棒的强度与硬度

钨棒的抗拉强度在室温下约为 $600 - 800 \text{ MPa}$ ，屈服强度约为 $400 - 600 \text{ MPa}$ ，具体值取决于纯度、加工工艺和晶粒尺寸。热加工（如锻造、轧制）可显著提高钨棒的强度，例如锻造钨棒的抗拉强度可达 900 MPa 以上。钨棒的硬度（维氏硬度）约为 $200 - 250 \text{ HV}$ ，抛光后硬度

略有增加。

掺杂合金（如 TZM）通过固溶强化和析出强化显著提高强度，TZM 钨棒的抗拉强度可达 1100 MPa，硬度约为 270 - 300 HV。这些性能使钨棒在高温和高压环境下仍能保持结构完整性，例如在航空航天高温部件中。

2.4.2 钨棒的延展性与韧性

纯钨棒在室温下具有一定的延展性，延伸率约为 10 - 20%，但其韧性较低，表现出一定程度的脆性，尤其是在低温下（低于 -50° C）。热加工和掺杂可改善延展性，例如 Mo-La 合金通过添加氧化镧提高晶界强度，延伸率可达 25%以上。

钨棒的韧性受晶粒尺寸和杂质含量的影响。细小晶粒和高纯度可减少晶界滑移和裂纹扩展，提高断裂韧性（ K_{1c} 约为 10 - 15 MPa · m^{1/2}）。在高温下（>1000° C），钨棒的延展性显著提高，表现出良好的塑性变形能力，适合热加工和复杂形状成型。

2.4.3 钨棒在高温下的蠕变行为

蠕变是钨棒在高温长期应力下的重要性能指标。纯钨棒在 1000° C 以上开始出现明显蠕变，蠕变速率随温度和应力增加而加快。例如，在 1200° C 和 50 MPa 应力下，纯钨的蠕变速率约为 10⁻⁵/h。TZM 和 Mo-La 合金通过析出强化显著降低蠕变速率，TZM 在 1500° C 下的蠕变速率可低于 10⁻⁶/h。

蠕变行为受微观结构影响，晶粒尺寸较大或晶界杂质较多的钨棒更容易发生蠕变断裂。热处理（如退火）可优化微观结构，减少蠕变倾向。行业研究表明，钨棒在高温炉中的长期使用需通过掺杂和表面涂层（如硅化物涂层）进一步提高抗蠕变性能。

2.5 钨棒的化学性能

钨棒的化学性能决定了其在腐蚀环境中的适用性，以下从抗氧化性和耐腐蚀性两方面分析。

2.5.1 钨棒的抗氧化性

钨棒在常温下对氧化稳定，但在高温（>600° C）氧化气氛中易生成挥发性氧化物 MoO₃，导致材料损失和性能下降。例如，在 800° C 的空气中，钨棒的氧化速率约为 0.1 - 0.5 mg/cm² · h。为提高抗氧化性，工业上常采用以下措施：

表面涂层：硅化物（MoSi₂）或氧化铝涂层可形成保护层，显著降低氧化速率。

掺杂改性：Mo-La 合金通过氧化镧的分散强化提高抗氧化性。

使用环境控制：在真空或惰性气氛（如氩气、氮气）中使用钨棒可避免氧化。

2.5.2 钨棒的耐腐蚀性（酸、碱、熔盐等）

钨棒在常温下对多种酸、碱具有良好的耐腐蚀性。例如，钨棒在稀硫酸、盐酸和氢氟酸中几乎不被腐蚀，但在浓硝酸和高温碱溶液（如 NaOH）中腐蚀速率增加。钨棒对熔盐（如氯化钠、氟化物熔盐）的耐腐蚀性较好，适合用作玻璃熔化电极。

版权与免责声明

在高温腐蚀环境中，钼棒的性能依赖于表面状态和环境介质。抛光钼棒因表面缺陷少，耐腐蚀性优于黑棒。TZM 合金在腐蚀性气氛（如含硫气体）中的表现优于纯钼，因其晶界强化作用降低了腐蚀敏感性。学术研究表明，钼棒在玻璃熔化和陶瓷烧结中的耐腐蚀性得益于其化学惰性，但需避免与强氧化性介质长期接触。

2.6 钼与钼基合金的比较

钼棒按成分可分为纯钼棒和钼基合金棒（如 TZM、Mo-La、Mo-W）。以下从性能和应用角度比较：

纯钼棒：纯度 $\geq 99.95\%$ ，具有优异的导电性和热导率，适合半导体和电子行业。但其高温强度和抗氧化性较差，限制了在极端环境中的应用。

TZM 合金棒（0.5% Ti, 0.08% Zr, 0.02% C）：通过固溶强化和析出强化，TZM 的抗拉强度（约 1100 MPa）和抗蠕变性能显著优于纯钼，适合航空航天和高温炉部件。但其加工难度较高，成本较高。

Mo-La 合金棒（0.3 - 1% La₂O₃）：通过分散强化提高高温抗氧化性和晶界强度，延展性优于纯钼，适合高温长期使用场景。

Mo-W 合金棒：掺杂钨（5 - 30%）提高熔点和强度，但导电性略下降，适用于特殊高温应用。

TZM 和 Mo-La 合金棒在高温性能上优于纯钼，但在导电性和加工性上略逊。选择时需根据应用场景权衡，例如半导体行业偏好高纯钼棒，而航空航天更倾向于 TZM。

2.7 钼棒与其他高温材料的性能对比

钼棒与其他高温材料（如钨、铌、钽、陶瓷）的性能对比如下：

钼 vs. 钨：钨的熔点（3422° C）高于钼，密度（19.25 g/cm³）更大，适合更高温度环境。但钨的加工难度和成本高于钼，钼棒在重量敏感的应用中更具优势。

钼 vs. 铌/钽：铌和钽的熔点（2468° C 和 3017° C）略低于或接近钼，但耐腐蚀性优于钼，尤其在强酸环境中。钼棒的成本较低，适合大规模工业应用。

钼 vs. 陶瓷：陶瓷（如氧化铝、碳化硅）具有更高的抗氧化性和化学稳定性，但机械韧性较差，易发生脆性断裂。钼棒在高温下的延展性和强度更适合动态载荷环境。

钼棒的综合性能（高熔点、低热膨胀、适中的成本）使其在高温炉、半导体和航空航天领域具有独特优势，但需根据具体应用选择合适的材料组合。

2.8 中钨智造钼棒 MSDS

中钨智造 (CTIA GROUP LTD) 作为中国领先的钼制品供应商，其钼棒的材料安全数据表 (MSDS, Material Safety Data Sheet) 为用户提供了安全使用和处理钼棒的指导。以下是中钨智造

版权与免责声明

钼棒 MSDS 的主要内容概述：

第一部分：化学品名称

化学品中文名称：钼
化学品英文名称：Molybdenum
CAS No.：7439-98-7
分子式：Mo
分子量：99.95

第二部分：成分/组成信息

含量 99.95%钼

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：干革粉、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。

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，

版权与免责声明

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质。

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

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

版权与免责声明

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（CTIA GROUP LTD）

电话：0592-5129696/5129595



中钨智造钨棒

第三章 钨棒的制备与生产工艺

钨棒的制备与生产工艺是一项复杂的技术过程，涉及从钨矿石的开采到最终棒材成型的多个环节。以下详细描述钨原料获取、粉末冶金、烧结、热加工、表面处理及质量控制的工艺流程，重点扩展技术细节、参数范围、影响因素及最新技术进展，以全面反映钨棒生产的科学与工程基础。

3.1 钨原料的获取

钨棒生产的起点是高纯度钨原料的获取，通常以辉钨矿（ MoS_2 ）为主要来源。原料获取包括矿石开采、选矿及精矿提纯，工艺复杂且对最终产品质量影响显著。

3.1.1 钨矿石的开采与选矿

钨矿石的开采是生产链的首步，辉钨矿因其高含钨量（约 60%）和良好的选矿性能成为主要工业原料。全球钨矿资源分布集中，储量丰富的地区包括亚洲、北美和南美。矿石品位通常在 0.05 - 0.5% Mo 之间，伴生矿物（如铜、铅、钨）增加了选矿难度。

开采方法：

露天开采：适用于浅层矿体，采用大型挖掘机和运输车，单日处理矿石可达数万吨。工艺包括爆破、装载和运输，优点是成本低，但对环境影响较大，需配套尾矿处理。

地下开采：适用于深层矿体，使用巷道掘进、凿岩爆破和提升设备。地下开采成本较高，但适合高品位矿体。开采过程中需监测地质稳定性，防止塌方。

混合开采：部分矿山采用露天与地下结合的方式，根据矿体深度和经济性优化开采方案。

版权与法律责任声明

选矿工艺：

辉钼矿的天然可浮性使其适合浮选工艺，流程包括破碎、磨矿、浮选、脱水和干燥：

破碎：原矿经粗碎（颚式破碎机，粒度 <150 mm）、中碎（圆锥破碎机， <50 mm）和细碎（反击式破碎机， <10 mm）处理，释放辉钼矿颗粒。

磨矿：采用湿式球磨机或棒磨机，将矿石磨至80%通过200目（约 $74\ \mu\text{m}$ ），确保辉钼矿单体解离。磨矿介质（如钢球）需定期更换，以避免污染。

浮选：

粗选：使用捕收剂（如煤油、黄药，添加量 $0.1 - 0.5\ \text{kg/t}$ 矿石）和起泡剂（如松醇油， $0.05 - 0.2\ \text{kg/t}$ ），在 $\text{pH}\ 7 - 9$ 条件下进行初次浮选，获得含Mo 10 - 20%的粗精矿。

精选：粗精矿经3 - 5次精选，添加抑制剂（如硫化钠， $0.5 - 2\ \text{kg/t}$ ）分离铜、铅等杂质，最终获得含Mo 40 - 50%的钼精矿。

扫选：尾矿再浮选，回收残余钼，综合回收率达85 - 95%。

脱水与干燥：钼精矿通过浓缩机（浓缩至固含量60 - 70%）、压滤机（含水量 $<10\%$ ）和回转干燥机（含水量 $<5\%$ ）处理，制备后续焙烧原料。

影响因素：

矿石性质：辉钼矿的晶粒尺寸和伴生矿物类型影响浮选效率。细粒嵌布矿石需更细磨矿，增加能耗。

药剂选择：捕收剂和抑制剂的配比需根据矿石成分优化，过量药剂可能降低精矿品位。

环境控制：浮选废水含重金属和药剂，需中和沉淀和循环利用， pH 控制在 $6.5 - 7.5$ 以减少排放。

技术进展：

智能选矿：采用X射线分选（XRT）和近红外光谱（NIR）技术预选矿石，提高入磨品位，降低能耗10 - 15%。

绿色药剂：开发无毒或低毒捕收剂（如烷基膦酸），减少环境污染。

自动化控制：浮选机配备在线品位分析仪和自动加药系统，实时调整工艺参数，提高回收率1 - 2%。

3.1.2 钼精矿的提纯

钼精矿提纯是将含Mo 40 - 50%的精矿转化为高纯氧化钼（ MoO_3 ）或金属钼粉的过程，涉及焙烧、化学提纯和还原三个阶段。

焙烧：

在回转窑、多膛炉或流化床炉中，辉钼矿于 $550 - 650^\circ\text{C}$ 与氧气反应，生成 MoO_3 并释放 SO_2 。

工艺参数：

温度： $550 - 650^\circ\text{C}$ ，过高（ $>700^\circ\text{C}$ ）导致 MoO_3 挥发损失，过低反应不完全。

氧气浓度：空气或富氧（ O_2 含量20 - 30%），确保充分氧化。

焙烧时间：2 - 4小时，根据炉型和精矿粒度调整。

设备：回转窑（直径1 - 3 m，长度20 - 50 m）适合大规模生产，流化床炉效率更高但对粒

版权与免责声明

度要求严格 ($<0.1 \text{ mm}$)。

副产物处理: SO_2 通过酸洗塔转化为硫酸, 尾气需脱硫 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸收) 以符合排放标准 (SO_2 浓度 $<50 \text{ mg/m}^3$)。

产物: 焙烧后获得工业 MoO_3 , 含 Mo 55 - 60%, 杂质包括 Cu ($<0.5\%$)、Pb ($<0.1\%$)、Si ($<1\%$)。

化学提纯:

为满足高纯钼棒需求, MoO_3 需进一步提纯, 常见方法包括:

氨浸法:

MoO_3 与氨水 (浓度 5 - 10%) 反应生成钼酸铵溶液: $[\text{MoO}_3 + 2\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4 + \text{H}_2\text{O}]$

过滤去除不溶性杂质 (如 SiO_2 、 Fe_2O_3), 溶液经蒸发结晶或酸沉 (pH 2 - 3) 获得高纯钼酸铵 (纯度 $\geq 99.9\%$)。

优点: 工艺成熟, 适合大规模生产; 缺点: 氨气挥发需回收处理。

酸浸法:

使用稀硝酸 (10 - 20%) 或盐酸溶解 Cu、Pb 等杂质, MoO_3 保留为固态, 经洗涤干燥获得高纯 MoO_3 。

适用于含重金属杂质较高的精矿, 但废酸处理成本较高。

离子交换法:

钼酸铵溶液通过阴离子交换树脂 (D301 或 717 型), 吸附 MoO_4^{2-} , 洗脱后获得超高纯 MoO_3 (纯度 $\geq 99.99\%$), 适合半导体行业。

工艺复杂, 树脂再生需定期维护。

溶剂萃取法:

使用萃取剂 (如三辛胺) 从酸性溶液中提取钼, 分离 Cu、Fe 等杂质, 获得高纯钼溶液。

适用于复杂精矿, 萃取效率达 95%以上。

还原:

高纯 MoO_3 或钼酸铵在氢气气氛下还原为金属钼粉, 分两阶段:

一级还原 (400 - 600° C):

炉型: 推舟式或管式炉, 氢气流量 100 - 200 mL/min, 露点 $<-50^\circ \text{C}$ 。

二级还原 (900 - 1100° C):

炉温精确控制 (误差 $\pm 10^\circ \text{C}$), 钼粉纯度达 99.95 - 99.99%, 粒径 1 - 5 μm 。

影响因素:

原料品位: 精矿中 Cu、As 等杂质含量影响提纯难度, 需预处理 (如磁选)。

还原气氛: 氢气纯度 ($>99.999\%$) 和露点控制至关重要, 氧含量过高导致钼粉氧化。

设备密封性: 还原炉需高气密性, 防止空气渗入。

版权与免责声明

技术进展:

无氨提纯: 采用酸性介质 (如 HCl-HNO₃) 直接提纯 MoO₃, 减少氨氮废水排放, 提纯效率达 98%。

微波焙烧: 利用微波加热 (功率 1 - 5 kW) 提高焙烧效率, 缩短时间 20 - 30%, 降低能耗。

绿色冶金: 开发 SO₂催化转化技术, 将副产物转化为高附加值硫酸或硫磺。

3.2 钨棒的粉末冶金工艺

粉末冶金是钨棒生产的核心技术, 涉及钨粉制备、粒度与纯度控制及压制成型, 决定棒材的微观结构和性能。

3.2.1 钨粉的制备 (还原法、雾化法)

还原法:

还原法是工业上最常用的钨粉制备方法, 通过氢气分步还原 MoO₃或钨酸铵。详细流程:

原料: 高纯 MoO₃ (纯度 ≥ 99.9%) 或钨酸铵, 装入钨舟或不锈钢舟 (厚度 5 - 10 mm)。

一级还原: 在推舟式炉或管式炉中, 400 - 600° C, 氢气流量 150 - 300 mL/min, 露点 < -50° C, 生成 MoO₂, 粒径 3 - 10 μm。

二级还原: 900 - 1100° C, 氢气流量 200 - 400 mL/min, 生成金属钨粉, 粒径 1 - 5 μm, 纯度 ≥ 99.95%。

设备: 还原炉配备多温区控温 (误差 ± 5° C) 和尾气处理系统 (吸收 H₂O 和残余 MoO₃)。

工艺控制:

温度梯度: 避免粉末团聚或烧结。

舟装量: 每舟 5 - 10 kg, 过高影响还原均匀性。

氢气循环: 回收未反应氢气, 降低成本 10 - 15%。

雾化法:

雾化法通过将熔融钨喷入高压介质快速凝固, 制备超细或纳米钨粉, 适合高端应用。流程:

熔化: 使用等离子弧 (功率 50 - 200 kW) 或电弧炉熔化高纯钨 (>99.99%), 温度达 2700 - 3000° C。

雾化: 熔体通过喷嘴 (孔径 0.5 - 2 mm) 喷入高压氮气 (5 - 10 MPa) 或氩气, 冷却速率 10⁵ - 10⁶° C/s, 形成球形粉末, 粒径 40 - 100 nm。

收集与分级: 粉末经旋风分离器收集, 通过气流分级机控制粒径分布 (D₅₀ < 100 nm)。

设备: 等离子雾化设备 (如 APS-100 型), 配备惰性气体循环系统, 防止氧化。

优点: 粉末球形度高 (>95%), 流动性好, 适合 3D 打印和溅射靶材。

缺点: 能耗高 (约 5 - 10 kWh/kg), 设备投资大, 限制了大规模应用。

其他方法:

电解法: 通过电解钨酸盐溶液制备纳米钨粉, 粒径 20 - 50 nm, 但纯度较低 (<99.9%)。

微波等离子法: 利用微波等离子 (2.45 GHz) 气相还原 MoO₃, 粒径 10 - 30 nm, 适合实验室研究。

版权与免责声明

影响因素：

原料纯度： MoO_3 中 Fe、C 等杂质影响钨粉质量，需预提纯。

还原温度：过高导致晶粒生长，过低影响还原效率。

气流控制：雾化法中气体压力和流量决定粉末粒径分布。

技术进展：

纳米钨粉：开发等离子化学气相沉积（P-CVD）技术，制备粒径 $<50\text{ nm}$ 的钨粉，提升烧结活性。

低氧钨粉：通过超高纯氢气（ $>99.9999\%$ ）和低温还原（ $800 - 900^\circ\text{C}$ ），氧含量降至 $<0.001\%$ 。

高效雾化：采用超声波辅助雾化，改善粉末均匀性，粒径分布标准差降低 20%。

3.2.2 粉末粒度与纯度控制

钨粉的粒度和纯度直接影响压制坯料的致密度和烧结性能。控制方法包括：

粒度控制：

筛分：使用振动筛（100 - 400 目）或超声筛分机，分离粒径 $1 - 10\ \mu\text{m}$ 的粉末。

气流分级：通过旋风分级机或涡轮分级机，控制 D50 为 $1 - 5\ \mu\text{m}$ ，粒径分布标准差 $<0.5\ \mu\text{m}$ 。

研磨：采用行星球磨机（转速 200 - 400 rpm）或气流磨（压力 0.5 - 1 MPa）细化粉末，球磨介质为硬质合金，防止污染。

还原条件：低温慢速还原（ $900 - 950^\circ\text{C}$ ，4 - 6 小时）获得细小颗粒，高温快速还原（ $1050 - 1100^\circ\text{C}$ ，1 - 2 小时）生成较大颗粒。

纯度控制：

原料选择：使用超高纯 MoO_3 （ $\geq 99.99\%$ ），减少 Fe（ $<50\text{ ppm}$ ）、C（ $<30\text{ ppm}$ ）等杂质。

还原环境：氢气露点 $<-60^\circ\text{C}$ ，炉内氧含量 $<10\text{ ppm}$ ，防止粉末氧化。

设备清洁：还原舟和管道定期酸洗（5% HNO_3 ），去除残留杂质。

包装储存：钨粉在惰性气氛（ N_2 或 Ar）下真空包装，防止吸湿和氧化。

检测方法：

粒度分析：激光粒度仪（测量范围 $0.01 - 100\ \mu\text{m}$ ），检测 D10、D50、D90。

纯度分析：电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）检测杂质含量，精度达 ppb 级。

氧含量：惰性气体熔融法，检测氧含量 $<0.005\%$ 。

影响因素：

粉末形貌：球形粉末（雾化法）流动性优于不规则粉末（还原法），影响压制均匀性。

团聚现象：细小粉末（ $<1\ \mu\text{m}$ ）易团聚，需添加分散剂（如聚乙二醇，0.1 - 0.5 wt%）。

环境湿度：高湿度（ $>60\%$ ）导致粉末吸湿，增加氧含量。

技术进展：

在线监测：采用激光散射技术实时检测粒径分布，调整还原参数，提高一致性。

超细粉末：开发机械合金化结合化学还原法，制备 D50 $<50\text{ nm}$ 的钨粉，用于纳米复合材料。

版权与免责声明

纯度提升：通过多级还原和等离子提纯，钨粉纯度达 99.999%，满足半导体靶材需求。

3.2.3 压制成型（冷等静压、模压）

压制成型将钨粉压实为棒状坯料，为后续烧结提供基础。常见方法包括冷等静压和模压：

冷等静压（CIP）：

工艺：钨粉装入橡胶或聚氨酯模具（壁厚 2 - 5 mm），置于高压液体（水或油，压力 100 - 400 MPa）中均匀压制，压制时间 1 - 5 分钟。

设备：湿袋式或干袋式冷等静压机，最大压力 600 MPa，模具直径 50 - 500 mm。

坯料性能：密度 60 - 70%理论密度，尺寸均匀，适合大直径（>50 mm）或长棒（>1 m）生产。

优点：压力分布均匀，减少层裂和密度梯度。

缺点：模具成本高，压制周期较长。

模压：

工艺：钨粉装入钢模（硬度 HRC 60 - 65），通过液压机（压力 50 - 200 MPa）单向或双向压制，压制速度 0.5 - 2 mm/s。

设备：四柱液压机（吨位 100 - 1000 t），模具需涂润滑剂（如硬脂酸锌）。

坯料性能：密度 50 - 60%理论密度，适合小直径（<20 mm）或异形棒材。

缺点：单向压制易产生密度梯度，需多次翻转压制。

工艺细节：

粘结剂：添加聚乙烯醇（PVA，0.5 - 2 wt%）或石蜡，提高坯料强度，粘结剂在烧结前挥发（400 - 600° C）。

模具设计：CIP 模具需高弹性（延伸率>200%），模压模具需高耐磨性（WC-Co 涂层）。

脱模：使用气动或液压脱模装置，防止坯料变形。

影响因素：

粉末流动性：球形粉末（视密度>3 g/cm³）压制效果优于不规则粉末。

压力分布：CIP 压力均匀性受模具形状影响，模压需优化冲头设计。

环境控制：压制车间湿度<50%，防止粉末吸湿。

技术进展：

温等静压：在 100 - 200° C 下压制，坯料密度提高 5 - 10%，减少烧结收缩。

自动化压制：采用机器人装粉和模具清洗系统，提高生产效率 20%。

高精度模具：3D 打印技术制造复杂模具，满足异形钨棒需求。

3.3 钨棒的烧结工艺

烧结是将压制坯料固化为高密度钨棒坯的关键步骤，通过高温促进颗粒结合，显著影响棒材的力学性能和微观结构。

3.3.1 真空烧结

真空烧结在高真空环境中进行，减少氧化和杂质污染。

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

工艺流程:

升温: 5 - 10° C/min 升至 1000° C, 保温 1 - 2 小时, 挥发粘结剂和吸附气体。

高温烧结: 1800 - 2200° C, 保温 2 - 4 小时, 坯料密度达 90 - 95%理论密度 (9.2 - 9.7 g/cm³)。

冷却: 10 - 20° C/min 降至室温, 防止热应力开裂。

真空度: 10⁻³ - 10⁻⁵ Pa, 使用机械泵和扩散泵组合, 防止 MoO₃挥发。

设备:

真空感应炉: 功率 50 - 200 kW, 炉膛材质为钼或石墨, 耐温 >2300° C。

控温系统: 热电偶 (W-Re 型) 和红外测温仪, 误差 ±5° C。

尾气处理: 冷凝器回收挥发性 MoO₃, 减少污染。

优点:

氧含量低 (<0.003%), 适合高纯钼棒生产。

晶粒生长可控, 微观结构均匀。缺点:

能耗高 (约 2 - 3 kWh/kg)。

设备维护成本高, 真空泵需定期更换密封件。

影响因素:

烧结温度: 过高 (>2200° C) 导致晶粒过度生长 (>50 μm), 降低强度。

保温时间: 过长增加能耗, 过短影响致密度。

坯料密度: 初始密度 <50% 导致烧结收缩过大, 易开裂。

3.3.2 氢气保护烧结

氢气保护烧结在高纯氢气气氛下进行, 防止氧化并促进 MoO₂还原。工艺流程:

升温: 5 - 15° C/min 至 800 - 1000° C, 去除粘结剂。

高温烧结: 1800 - 2100° C, 保温 2 - 5 小时, 密度 90 - 94%理论密度。

冷却: 10 - 30° C/min, 氢气流量 50 - 100 mL/min, 防止氢脆。

气氛: 氢气露点 <-40° C, 纯度 >99.99%, 炉内氧含量 <5 ppm。

设备:

氢气烧结炉: 卧式或立式, 炉膛材质为钼或不锈钢, 配备水冷夹套。

安全系统: 氢气泄漏检测仪和紧急排气装置, 确保操作安全。

尾气处理: 燃烧尾气中的残余氢气, 排放符合标准 (H₂浓度 <0.1%)。

优点:

烧结速度快, 生产效率高, 适合大规模生产。

表面光洁度优于真空烧结, 减少后续抛光工作量。缺点:

氢气安全风险需严格管理。

TZM 等合金棒对氢气敏感, 可能引入微量氢脆。

版权与免责声明

影响因素：

氢气流量：过高增加成本，过低影响还原效果。

炉膛密封性：漏气导致氧化，需定期检查密封圈。

坯料尺寸：大尺寸坯料 (>100 mm) 需延长保温时间。

3.3.3 高温烧结设备与参数优化

设备类型：

真空感应炉：适合高纯钨棒，炉膛容积 0.1 - 1 m³，功率 100 - 500 kW。

氢气保护炉：适合大规模生产，炉膛长度 2 - 5 m，配备多温区控温。

电阻炉：用于中小规模生产，成本较低但温度均匀性稍差。

设备要求：

耐高温材料：炉膛内衬使用钨板或石墨毡，隔热层为氧化铝纤维。

控温精度：热电偶和 PID 控制器，温度波动 ±3 - 5° C。

气氛监测：氧分析仪（检测范围 0 - 100 ppm）和露点仪 (<-80° C)。

参数优化：

温度曲线：分段升温 (200° C/h 至 1000° C, 50° C/h 至 2000° C)，减少热应力。

保温时间：直径 <50 mm 坯料保温 2 - 3 小时，>100 mm 保温 4 - 6 小时。

冷却速率：快速冷却 (>20° C/min) 可能导致微裂纹，需优化至 10 - 15° C/min。

气氛控制：真空烧结初始真空度 <10⁻² Pa，高温时 <10⁻⁴ Pa；氢气烧结流量 100 - 300 mL/min。

影响因素：

坯料均匀性：压制密度不均导致烧结收缩差异，影响尺寸精度。

炉膛污染：残留 MoO₃ 或碳化物污染坯料，需定期清洗炉膛。

能耗管理：高温烧结能耗占生产成本 30 - 40%，需优化保温时间和炉膛设计。

技术进展：

微波烧结：利用微波加热 (2.45 GHz, 功率 10 - 50 kW)，烧结时间缩短 30 - 50%，晶粒尺寸减小 20%。

放电等离子烧结 (SPS)：通过脉冲电流 (1000 - 5000 A) 快速烧结，密度达 98%，适合小批量高性能钨棒。

智能控温：采用 AI 算法优化温度曲线，降低能耗 5 - 10%，提高坯料一致性。

3.4 钨棒的热加工技术

热加工将烧结坯料加工成最终钨棒形状，包括锻造、轧制和拉拔，显著影响棒材的力学性能和表面质量。

3.4.1 锻造工艺

锻造通过高温塑性变形细化晶粒，提高钨棒强度。

版权与免责声明

工艺流程:

加热: 在电阻炉或感应炉中, 1200 - 1600° C, 保温 30 - 60 分钟, 气氛为氢气或真空 (<10⁻² Pa)。

锻造: 使用气动锤 (冲击力 50 - 200 kN) 或液压锻造机 (压力 500 - 2000 t), 单次变形量 20 - 30%, 总变形量 60 - 80%。

中间退火: 1000 - 1200° C, 保温 1 - 2 小时, 消除加工硬化。

冷却: 空气或惰性气氛冷却, 速率 10 - 20° C/min。

设备:

锻造机: 气动锤适合小批量, 液压机适合大直径棒材 (>50 mm)。

加热炉: 箱式或连续式, 配备氢气保护或真空系统。

工艺细节:

变形速率: 0.1 - 1 s⁻¹, 过快导致裂纹, 过慢影响效率。

模具材质: 高温合金 (如 Inconel 718) 或钼合金, 表面涂 MoS₂ 润滑剂。

晶粒控制: 锻造后晶粒尺寸 10 - 30 μm, 抗拉强度提高至 800 - 1000 MPa。

影响因素:

加热温度: 过高 (>1700° C) 导致晶粒生长, 过低 (<1100° C) 增加变形抗力。

坯料质量: 烧结坯料气孔或夹杂物引发裂纹。

润滑条件: 不足导致模具磨损和表面缺陷。

技术进展:

等温锻造: 在 1400 - 1500° C 恒温下锻造, 变形均匀性提高 15%。

数值模拟: 使用有限元软件 (如 DEFORM) 优化锻造参数, 减少试错成本。

自动化锻造: 机械手操作坯料, 提高生产效率和安全性。

3.4.2 轧制工艺

轧制通过连续变形生产中直径钼棒, 表面光洁度和尺寸精度高。

工艺流程:

加热: 1000 - 1400° C, 保温 20 - 40 分钟, 氢气或真空气氛。

轧制: 使用两辊或四辊热轧机, 单次压下量 5 - 15%, 总变形量 50 - 70%。

退火: 800 - 1000° C, 保温 1 - 2 小时, 消除内应力。

冷却: 惰性气氛下缓慢冷却 (5 - 10° C/min)。

设备:

轧机: 四辊轧机 (辊径 200 - 500 mm) 精度高于两辊轧机, 适合直径 5 - 20 mm 棒材。

轧辊: 硬质合金 (WC-Co) 或高温钢, 表面抛光 (Ra < 0.4 μm)。

工艺细节:

轧制速度: 0.5 - 2 m/s, 过快导致表面裂纹。

版权与免责声明

润滑：石墨乳或高温润滑油，减少摩擦系数至 0.1 - 0.2。

尺寸控制：在线激光测径仪，精度 ± 0.01 mm。

影响因素：

温度梯度：坯料表面与芯部温差 $>100^{\circ}\text{C}$ 导致裂纹。

轧辊磨损：需定期修复，延长使用寿命。

变形量：单次压下量 $>20\%$ 增加微裂纹风险。

技术进展：

精密轧制：采用伺服控制轧机，尺寸偏差 <0.005 mm，适合半导体靶材。

在线退火：轧制后立即感应退火，减少工序时间 30%。

绿色润滑：开发水基润滑剂，减少环境污染。

3.4.3 拉拔工艺

拉拔生产小直径钨棒 (<5 mm)，精度高，表面光洁。

工艺流程：

预处理：轧制棒材酸洗 (10% HNO_3) 去除氧化层，涂石墨润滑剂。

拉拔： $800 - 1200^{\circ}\text{C}$ ，使用硬质合金模具 (孔径 0.5 - 5 mm)，拉拔速度 0.1 - 1 m/s，单次变形量 10 - 20%。

中间退火： $800 - 1000^{\circ}\text{C}$ ，保温 30 - 60 分钟，恢复塑性。

多道次拉拔：5 - 10 次拉拔，获得目标尺寸 (± 0.01 mm)。

设备：

拉拔机：链式或液压拉拔机，拉力 10 - 50 kN。

模具：WC-Co 或金刚石涂层，孔径精度 ± 0.001 mm。

工艺细节：

润滑剂：石墨乳或 MoS_2 ，涂层厚度 0.1 - 0.5 μm 。

温度控制：感应加热或电阻加热，误差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

表面质量：拉拔后 $\text{Ra} < 0.2$ μm ，适合电极材料。

影响因素：

模具磨损：每 1000 m 拉拔需更换模具。

坯料缺陷：表面裂纹或夹杂物导致断裂。

拉拔速度：过快增加应力集中。

技术进展：

超细拉拔：开发纳米金刚石涂层模具，生产直径 <0.1 mm 钨棒。

连续拉拔：多模连续拉拔机，效率提高 50%。

智能监控：在线测径和张力传感器，实时调整参数。

版权与免责声明

3.5 钨棒的表面处理技术

表面处理提高钨棒的耐腐蚀性、光洁度和高温性能，包括机械抛光、化学清洗和抗氧化涂层。

3.5.1 机械抛光

机械抛光通过磨削和抛光去除表面缺陷，获得高光洁度。

工艺流程：

粗磨：使用碳化硅砂轮（粒度 60 - 120 目），转速 1000 - 2000 rpm，去除氧化层和粗大划痕。

精磨：金刚石砂带（粒度 400 - 800 目），Ra 0.8 - 1.6 μm 。

抛光：毛毡轮加氧化铝抛光膏（粒径 0.5 - 1 μm ），转速 1500 - 3000 rpm，Ra < 0.2 μm 。

清洗：超声波清洗（频率 40 kHz，去离子水），去除抛光残留物。

设备：

抛光机：数控平面或圆柱抛光机，配备自动进给系统。

检测仪：表面粗糙度仪（精度 0.01 μm ），检查 Ra 值。

工艺细节：

磨料选择：金刚石适合高硬度钨棒，氧化铝成本较低。

冷却液：水基冷却液（pH 7 - 8），防止过热。

抛光时间：直径 10 mm 棒材抛光约 5 - 10 分钟/m。

影响因素：

磨料粒度：过粗导致划痕，过细效率低。

压力控制：过高 (>0.5 MPa) 产生微裂纹。

棒材硬度：TZM 合金抛光难度高于纯钨。

技术进展：

电解抛光：结合机械抛光，Ra < 0.1 μm ，效率提高 20%。

激光抛光：无接触抛光，适合复杂形状棒材。

自动化抛光：机器人抛光系统，降低人工成本 30%。

3.5.2 化学清洗

化学清洗去除表面氧化物、油污和杂质，提高耐腐蚀性和导电性。

工艺流程：

酸洗：硝酸-硫酸混合液 ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4=1:3$ ，浓度 10 - 20%)，浸泡 5 - 15 分钟，温度 20 - 40° C，去除氧化层。

碱洗：5 - 10% NaOH 溶液，50 - 70° C，浸泡 3 - 10 分钟，去除有机污染物。

超声清洗：去离子水加中性清洗剂 (0.1 - 0.5%)，频率 28 - 40 kHz，时间 5 - 10 分钟，去除微粒。

干燥：热风干燥 (80 - 100° C) 或真空干燥，防止二次氧化。

版权与免责声明

设备:

酸洗槽: PP 或 PTFE 材质, 配备加热和搅拌系统。

超声清洗机: 功率 500 - 2000 W, 槽体容积 10 - 100 L。

工艺细节:

废液处理: 酸洗废液中和 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH 6.5 - 7.5), 沉淀重金属后排放。

清洗顺序: 酸洗-水洗-碱洗-超声清洗, 确保表面无残留。

保护措施: 清洗后立即氮气包装, 防止吸湿。

影响因素:

酸液浓度: 过高腐蚀基体, 过低清洗不彻底。

温度控制: 过高增加废气挥发, 过低降低效率。

表面状态: 黑棒清洗时间长于抛光棒。

技术进展:

绿色清洗: 开发柠檬酸基清洗剂, pH 4 - 6, 减少环境污染。

等离子清洗: 低温等离子 (功率 100 - 500 W) 去除有机物, 适合高纯钨棒。

自动化清洗: 多槽连续清洗线, 效率提高 40%。

3.5.3 表面涂层 (抗氧化涂层等)

抗氧化涂层 (如 MoSi_2 、 Al_2O_3) 提高钨棒在高温氧化环境中的寿命。

工艺方法:

化学气相沉积 (CVD):

工艺: 800 - 1200° C, SiCl_4 和 CH_4 反应生成 MoSi_2 涂层, 厚度 10 - 50 μm 。

设备: CVD 炉, 真空度 10^{-1} - 10^{-2} Pa, 气体流量 50 - 200 mL/min。

优点: 涂层致密, 附着力强 (>50 MPa)。

等离子喷涂:

工艺: 等离子弧 (功率 20 - 50 kW) 喷涂 Al_2O_3 或 ZrO_2 粉末, 厚度 50 - 200 μm 。

设备: 大气或低压等离子喷涂系统, 喷枪移动速度 0.1 - 0.5 m/s。

优点: 适合大尺寸棒材, 工艺简单。

溶胶-凝胶法:

工艺: 涂覆 SiO_2 或 Al_2O_3 溶胶, 500 - 800° C 热处理, 形成 5 - 20 μm 涂层。

优点: 成本低, 适合复杂形状。

工艺细节:

预处理: 棒材酸洗和喷砂 (SiC 颗粒, 0.1 - 0.5 mm), 提高涂层附着力。

涂层性能: MoSi_2 涂层抗氧化温度达 1700° C, Al_2O_3 涂层耐磨性优异。

检测: SEM 分析涂层微观结构, 划痕法测试附着力。

版权与免责声明

影响因素：

涂层厚度：过厚 ($>100\ \mu\text{m}$) 易剥落，过薄抗氧化效果差。

基体温度：CVD 过程中基体过热 ($>1300^\circ\text{C}$) 导致晶粒生长。

气氛控制：氧气渗入降低涂层质量。

技术进展：

复合涂层： $\text{MoSi}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 双层涂层，抗氧化寿命提高 50%。

纳米涂层：PVD 沉积纳米 SiC 涂层 (厚度 $1 - 5\ \mu\text{m}$)，耐磨性和抗氧化性兼顾。

自修复涂层：掺杂稀土元素 (如 CeO_2) 的 MoSi_2 涂层，高温下裂纹自愈。

3.6 钨棒的质量控制与工艺优化

质量控制确保钨棒性能一致性和可靠性，涉及缺陷控制和工艺参数优化。

3.6.1 生产过程中的缺陷控制

常见缺陷包括裂纹、气孔、夹杂物和表面氧化，控制方法：

原料质量：

使用高纯 MoO_3 ($\geq 99.9\%$)，ICP-MS 检测 Fe、C 等杂质 ($<50\ \text{ppm}$)。

钨粉氧含量 $<0.005\%$ ，通过惰性气体储存避免氧化。

烧结缺陷：

优化烧结温度 ($1800 - 2000^\circ\text{C}$)，减少气孔 (孔隙率 $<2\%$)。

使用多温区炉，温差 $<10^\circ\text{C}$ ，确保坯料均匀收缩。

加工缺陷：

锻造和轧制变形量 $<30\%$ ，避免微裂纹。

无损检测 (NDT)：

超声检测：发现 $>0.1\ \text{mm}$ 内部裂纹，频率 $5 - 10\ \text{MHz}$ 。

X 射线检测：检查夹杂物 ($>0.05\ \text{mm}$)，电压 $100 - 200\ \text{kV}$ 。

表面缺陷：

抛光去除氧化层 (厚度 $0.01 - 0.05\ \text{mm}$) 和划痕。

表面粗糙度仪检测 $Ra < 1.6\ \mu\text{m}$ ，符合 ASTM B387 标准。

检测技术：

微观分析：SEM 和 EBSD 分析晶粒尺寸 ($10 - 50\ \mu\text{m}$) 和缺陷分布。

化学分析：GD-MS 检测杂质，精度达 ppb 级。

力学测试：拉伸试验机 (负荷 $50 - 200\ \text{kN}$) 检测抗拉强度 ($>600\ \text{MPa}$)。

影响因素：

工艺稳定性：温度、压力波动导致缺陷率上升。

版权与免责声明

设备老化：炉膛污染或模具磨损增加夹杂物。

操作规范：人工操作误差需通过培训减少。

技术进展：

在线 NDT：实时超声成像，缺陷检出率提高 20%。

AI 缺陷识别：机器视觉分析表面缺陷，准确率 >95%。

预防性维护：通过传感器预测设备故障，减少停机时间 30%。

3.6.2 工艺参数的监控与优化

工艺参数的实时监控和优化提高生产效率和产品质量。方法包括：

监控技术：

温度：热电偶（K 型或 W-Re 型）和红外测温仪，精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

气氛：氧分析仪（0 - 100 ppm）和露点仪（ $< -80^{\circ}\text{C}$ ）。

压力：压强计（ $10^{-5} - 10^5\text{ Pa}$ ）和流量计（0 - 500 mL/min）。

尺寸：激光测径仪（精度 $\pm 0.001\text{ mm}$ ）和在线称重系统。

数据采集：

工业物联网（IIoT）采集温度、压力、气流等数据，采样频率 1 Hz。

SCADA 系统实时显示工艺状态，异常报警响应时间 <1 s。

参数优化：

回归分析：建立温度、压力与坯料密度的数学模型，优化烧结温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

机器学习：神经网络预测缺陷率，调整压制压力和轧制速度，缺陷率降低 5 - 10%。

模拟仿真：CFD 模拟炉内气流分布，优化氢气流量，节省气体 10 - 15%。

影响因素：

传感器精度：温度偏差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 影响工艺稳定性。

数据质量：噪声干扰降低模型准确性，需滤波处理。

设备兼容性：老旧设备难以集成 IIoT 系统。

技术进展：

数字孪生：建立钨棒生产全流程数字模型，实时预测性能，优化效率 10 - 15%。

5G+IIoT：高带宽数据传输，监控延迟 <10 ms，适合多工厂协同。

绿色制造：优化工艺参数降低能耗和排放，碳足迹减少 20%。



中钨智造钨棒

第四章 钨棒的类型与规格

钨棒作为一种高性能难熔金属制品，其类型与规格的多样性使其能够满足航空航天、电子、玻璃工业等多个领域的特定需求。本章从成分、表面状态、尺寸与形状以及定制化设计四个方面详细分类钨棒，探讨其特性、制备工艺、应用场景及相关标准。

4.1 按成分分类

钨棒根据化学成分可分为高纯钨棒和掺杂钨棒两大类。高纯钨棒以其优异的电导率和热导率在电子行业中占据重要地位，而掺杂钨棒通过添加合金元素显著提升高温性能，适用于更苛刻的环境。

4.1.1 高纯钨棒（纯度 $\geq 99.95\%$ ）

高纯钨棒是指钨含量达到或超过 99.95% 的棒材，通常通过粉末冶金工艺生产，杂质元素（如 Fe、C、O、N）含量严格控制在 ppm 级。典型杂质限值包括：铁 (Fe) $\leq 0.01\%$ 、碳 (C) $\leq 0.005\%$ 、氧 (O) $\leq 0.003\%$ 、氮 (N) $\leq 0.002\%$ 。高纯度的实现依赖于高纯氧化钨 (MoO_3 , $\geq 99.99\%$) 原料和真空/氢气还原工艺，确保棒材具有优异的物理和化学性能。

特性：

物理性能：高纯钨棒的密度接近理论值 (10.28 g/cm^3)，熔点为 2623°C ，热导率为 $138 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (20°C)，热膨胀系数为 $4.8 \times 10^{-6}/^\circ \text{C}$ ($20 - 1000^\circ \text{C}$)。

电学性能：电阻率为 $5.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (20°C)，电导率高，适合电极和导电部件。

机械性能：室温抗拉强度约为 $600 - 800 \text{ MPa}$ ，延伸率 $10 - 20\%$ ，高温下 ($>1000^\circ \text{C}$) 延展性显著提高。

化学稳定性：在常温下耐酸碱腐蚀，但在高温 ($>600^\circ \text{C}$) 氧化气氛中易生成挥发性 MoO_3 ，

版权与免责声明

需真空或惰性气氛保护。

制备工艺:

原料: 采用超高纯 MoO_3 , 通过多级氢气还原制备钼粉 (纯度 $\geq 99.95\%$, 粒径 $1 - 5 \mu\text{m}$)。

成型与烧结: 冷等静压 ($100 - 400 \text{ MPa}$) 成型, 真空烧结 ($1800 - 2200^\circ \text{C}$) 获得高密度坯料 (密度 $> 90\%$ 理论值)。

加工: 热锻造 ($1200 - 1600^\circ \text{C}$) 或轧制 ($1000 - 1400^\circ \text{C}$) 成棒, 表面可抛光至 $\text{Ra} < 0.2 \mu\text{m}$ 。

质量控制: 通过 ICP-MS 检测杂质, 超声检测内部缺陷, 表面粗糙度仪确保光洁度。

应用:

电子与半导体: 作为溅射靶材, 生产集成电路、太阳能电池和平板显示器的薄膜。高纯度确保薄膜质量, 表面光洁度降低缺陷率。

真空管与离子源: 用作电极材料, 因其高导电性和低电子逸出功 (约 4.6 eV) 而优于其他金属。

高温实验设备: 在实验室高温炉中用作支撑杆或电极, 耐高温和化学稳定性满足科研需求。

标准:

国际: ASTM B387-18, 规定高纯钼棒的化学成分、力学性能和尺寸公差。

国内: GB/T 3462-2017, 要求纯度 $\geq 99.95\%$, 杂质含量符合电子行业标准。

技术挑战:

氧含量控制需超高纯氢气 (露点 $< -60^\circ \text{C}$) 和真空环境 ($< 10^{-4} \text{ Pa}$)。

高纯钼棒在高温下抗蠕变性能较弱, 限制了其在长期高温载荷下的应用。

4.1.2 掺杂钼棒 (TZM、Mo-La、Mo-W 等)

掺杂钼棒通过添加微量元素或合金形成钼基合金, 显著提升高温强度、抗蠕变性和抗氧化性能。常见类型包括 TZM (钛-锆-钼)、Mo-La (钼-镧)、Mo-W (钼-钨) 等。

TZM 钼棒:

成分: $0.4 - 0.55\% \text{ Ti}$ 、 $0.06 - 0.12\% \text{ Zr}$ 、 $0.01 - 0.04\% \text{ C}$, 余量为 Mo。

特性:

通过固溶强化和碳化物 (TiC 、 ZrC) 析出强化, 抗拉强度达 1100 MPa (20°C), 高温 (1500°C) 抗拉强度约为 400 MPa , 远优于纯钼。

蠕变速率低, 例如在 1200°C 、 50 MPa 下, 蠕变速率约为 $10^{-6}/\text{h}$ 。

热导率略低于纯钼 (约 $120 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 热膨胀系数相似 ($5.0 \times 10^{-6}/^\circ \text{C}$)。

抗氧化性稍优于纯钼, 但仍需在 $< 600^\circ \text{C}$ 或保护气氛中使用。

制备:

钼粉与 Ti、Zr、C 粉混合 (行星球磨机, $200 - 400 \text{ rpm}$), 冷等静压成型, 氢气保护烧结 ($1800 - 2100^\circ \text{C}$)。

版权与免责声明

热加工（锻造 1400 - 1700° C，轧制 1200 - 1500° C）难度较高，因硬度增加（HV 270 - 300）。

应用：

航空航天：高温结构件（如喷气发动机喷嘴），因其高强度和低密度（10.16 g/cm³）。

高温炉：加热元件和支撑杆，耐 1800° C 长期使用。

模具制造：热挤压模具，抗高温磨损。

Mo-La 钼棒：

成分：0.3 - 1.0% La₂O₃（氧化镧），余量为 Mo。

特性：

La₂O₃分散强化，细化晶粒（10 - 20 μm），提高晶界强度，延伸率达 25%（20° C）。

高温抗氧化性优于纯钼，氧化速率在 800° C 约为 0.05 mg/cm² · h。

抗蠕变性能优异，1500° C 下蠕变速率低于 10⁻⁶/h。

热导率约 130 W/m · K，适合高温导热部件。

制备：

钼粉与 La₂O₃粉液相掺杂（pH 7 - 8），喷雾干燥制备复合粉末。

真空烧结（1900 - 2200° C），热加工（锻造 1300 - 1600° C）。

表面抛光或涂层（如 MoSi₂）进一步提高性能。

应用：

高温炉：长期高温（>1500° C）使用的加热元件和热屏。

玻璃工业：熔化电极，耐高温腐蚀。

科研：高温实验装置，兼顾韧性和强度。

Mo-W 钼棒：

成分：5 - 30% W（钨），余量为 Mo。

特性：

钨的加入提高熔点（接近 3422° C）和强度，抗拉强度可达 1200 MPa（20° C）。

热导率降低（约 100 - 120 W/m · K），电阻率增加（6 - 8 × 10⁻⁸ Ω · m）。

抗腐蚀性优于纯钼，适合酸性或熔盐环境。

制备：

钼粉与钨粉机械合金化，压制成型后真空烧结（2000 - 2300° C）。

高温锻造（1500 - 1800° C）或拉拔（1000 - 1400° C）。

应用：

核工业：高温反应堆部件，因其高熔点和抗辐射性。

特殊电极：耐腐蚀电极，适用于苛刻化学环境。

比较:

TZM: 高温强度和抗蠕变最佳, 适合航空航天。

Mo-La: 抗氧化性和延展性优异, 适合高温炉和玻璃工业。

Mo-W: 熔点和抗腐蚀性突出, 适合核工业和特殊环境。

标准:

ASTM B387-18: 规定 TZM 和 Mo-La 的成分、力学性能和公差。

GB/T 4188-2015: TZM 棒材标准, 杂质和掺杂元素限值明确。

技术挑战:

掺杂元素分布均匀性需精确控制, 避免偏析。

合金棒材加工难度大, 需高温设备和优化工艺。

4.2 按表面状态分类

钼棒的表面状态对其性能和应用有重要影响, 根据加工工艺和使用需求, 可分为黑钼棒、抛光钼棒和清洗钼棒。

4.2.1 黑钼棒

黑钼棒是指未经抛光或化学处理的棒材, 表面保留热加工 (锻造、轧制) 后的氧化层, 呈黑色或暗灰色。表面粗糙度通常为 $Ra\ 3.2 - 6.4\ \mu m$ 。

特性:

表面: 氧化钼 (MoO_2/MoO_3) 层厚度 $0.01 - 0.05\ mm$, 略降低耐腐蚀性, 但在非氧化环境 (如真空) 下无显著影响。

性能: 力学性能与抛光棒相同, 但表面缺陷 (如微裂纹) 可能影响疲劳寿命。

成本: 生产成本低, 因无需额外表面处理。

制备:

烧结坯料经热锻造 ($1200 - 1600^\circ\ C$) 或轧制 ($1000 - 1400^\circ\ C$) 成型, 直接冷却形成黑棒。表面氧化层由高温加工过程中与微量氧气反应生成, 可通过控制气氛 (氢气或真空) 减少厚度。

应用:

高温炉: 作为支撑杆或加热元件, 表面氧化层在真空或惰性气氛下不影响性能。

粗加工: 作为半成品, 供后续抛光或机加工。

成本敏感领域: 如陶瓷烧结, 优先选择黑钼棒以降低成本。

标准:

ASTM B387-18: 黑钼棒表面允许轻微氧化, 粗糙度 $Ra \leq 6.4\ \mu m$ 。

GB/T 3462-2017: 表面无裂纹、夹渣等严重缺陷。

版权与免责声明

技术挑战:

表面氧化层可能在某些应用中释放 MoO_3 气体，污染环境。
粗糙表面降低抗腐蚀性，需评估使用环境。

4.2.2 抛光钼棒

抛光钼棒通过机械抛光或电解抛光处理，表面光洁度高，粗糙度通常为 $Ra\ 0.1 - 0.8\ \mu\text{m}$ ，呈银白色金属光泽。

特性:

表面：无氧化层，微观缺陷（划痕、裂纹）极少，耐腐蚀性优于黑钼棒。

性能：导电性和热导率略提高（因表面缺陷减少），适合高精度应用。

美观性：光滑表面提升外观，满足电子和光学行业需求。

制备:

机械抛光：使用碳化硅砂轮（60 - 800 目）粗磨，金刚石抛光膏（ $0.5 - 1\ \mu\text{m}$ ）精抛，转速 1000 - 3000 rpm。

电解抛光：在磷酸-硫酸电解液（pH 2 - 3）中，电流密度 $0.5 - 2\ \text{A}/\text{cm}^2$ ，抛光 5 - 10 分钟， $Ra < 0.1\ \mu\text{m}$ 。

清洗：超声波清洗（40 kHz，去离子水）去除抛光残留物，氮气干燥防止氧化。

应用:

半导体：溅射靶材和电极，要求高光洁度和低缺陷率。

光学设备：支撑杆或反射部件，表面光滑减少光散射。

医疗：X 射线管靶材，高纯度和光洁度确保成像质量。

标准:

ASTM B387-18：抛光钼棒粗糙度 $Ra \leq 0.8\ \mu\text{m}$ ，无可见划痕。

GB/T 3462-2017：表面光洁度满足电子行业要求。

技术挑战:

抛光过程可能引入微量磨料污染，需严格清洗。

高光洁度增加生产成本，需权衡应用需求。

4.2.3 清洗钼棒

清洗钼棒是指通过化学清洗去除表面氧化物、油污和杂质的棒材，表面状态介于黑棒和抛光棒之间，粗糙度通常为 $Ra\ 1.6 - 3.2\ \mu\text{m}$ 。

特性:

表面：无氧化层和有机污染物，呈灰白色，耐腐蚀性优于黑钼棒。

性能：接近抛光棒，但表面微观缺陷较多，适合中等精度应用。

成本：低于抛光棒，高于黑钼棒。

制备:

酸洗: 硝酸-硫酸混合液 ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4=1:3$, 10 - 20%), 浸泡 5 - 15 分钟, 温度 20 - 40° C, 去除氧化层。

碱洗: 5 - 10% NaOH 溶液, 50 - 70° C, 浸泡 3 - 10 分钟, 去除油污。

超声清洗: 去离子水加中性清洗剂 (0.1 - 0.5%), 40 kHz, 5 - 10 分钟。

干燥: 真空或热风干燥 (80 - 100° C), 氮气包装防止二次氧化。

应用:

玻璃工业: 熔化电极, 清洗表面减少杂质污染。

高温炉: 支撑杆, 耐腐蚀性满足惰性气氛要求。

预处理: 作为抛光棒的中间产品, 进一步加工。

标准:

ASTM B387-18: 清洗钼棒表面无氧化物, 粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ 。

GB/T 3462-2017: 表面无残留化学物质。

技术挑战:

酸洗废液需中和处理 (pH 6.5 - 7.5), 符合环保要求。

清洗不彻底可能残留微量污染物, 影响性能。

4.3 按尺寸与形状分类

钼棒的尺寸和形状根据应用需求定制, 涵盖圆形、方形、异形以及微型到大型棒材。

4.3.1 圆形钼棒

圆形钼棒是最常见的钼棒形态, 直径范围从 0.5 mm 到 100 mm, 长度通常为 100 mm 至 3000 mm。

特性:

尺寸精度: 直径公差 $\pm 0.01 - 0.1 \text{ mm}$, 长度公差 $\pm 1 - 5 \text{ mm}$, 满足高精度应用。

力学性能: 沿轴向晶粒取向一致, 抗拉强度均匀。

加工性: 易于车削、钻孔和焊接, 适合复杂部件制造。

制备:

小直径 ($< 5 \text{ mm}$): 拉拔工艺 (800 - 1200° C), 模具精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ 。

中直径 (5 - 20 mm): 热轧制 (1000 - 1400° C), 在线测径确保公差。

大直径 ($> 20 \text{ mm}$): 热锻造 (1200 - 1600° C), 多道次变形。

应用:

电子行业: 电极和溅射靶材, 直径 5 - 20 mm 最常见。

高温炉: 加热元件和支撑杆, 直径 20 - 50 mm。

航空航天: 结构件, 直径 50 - 100 mm, 需高强度。

版权与免责声明

标准:

ASTM B387-18: 直径公差 ± 0.05 mm (<10 mm), ± 0.1 mm (>10 mm)。

GB/T 3462-2017: 圆度偏差 <0.02 mm。

技术挑战:

小直径棒材易断裂, 需优化拉拔速度 (0.1 - 1 m/s)。

大直径棒材锻造需高温设备, 成本较高。

4.3.2 方形及其他异形钨棒

方形钨棒及异形钨棒 (如矩形、六边形) 用于特殊结构或模具, 边长或截面尺寸通常为 5 - 50 mm, 长度 100 - 2000 mm。

特性:

几何精度: 边长公差 $\pm 0.05 - 0.2$ mm, 棱边直线度 <0.1 mm/m。

性能: 力学性能与圆形棒相似, 但加工难度增加。

应用性: 异形设计满足复杂安装或功能需求。

制备:

成型: 冷等静压使用异形模具, 烧结后坯料接近最终形状。

加工: 热锻造 ($1200 - 1600^{\circ}$ C) 或机加工 (CNC 车床, 切削速度 10 - 50 m/min)。

表面处理: 抛光或清洗, 粗糙度 Ra 0.8 - 3.2 μ m。

应用:

模具制造: 方形钨棒用于热挤压模具, 耐高温磨损。

高温炉: 异形支撑杆, 优化热场分布。

科研: 定制形状满足实验装置需求。

标准:

ASTM B387-18: 异形棒截面公差 ± 0.1 mm。

GB/T 3462-2017: 棱边无裂纹, 表面质量同圆形棒。

技术挑战:

异形模具设计复杂, 制造成本高。

机加工易产生应力集中, 需优化切削参数。

4.3.3 微型钨棒与大型钨棒

微型钨棒: 直径 <1 mm, 长度 10 - 500 mm。

特性: 高精度 (直径公差 ± 0.005 mm), 表面光洁度 Ra <0.1 μ m, 适合微电子和精密仪器。

制备: 超细拉拔 ($600 - 1000^{\circ}$ C), 使用纳米金刚石模具, 多次退火 ($800 - 1000^{\circ}$ C)。

应用:

微电子: 电极和探针, 直径 0.1 - 0.5 mm。

版权与免责声明

医疗：X 射线管部件，高纯度和精度要求。

挑战：拉拔断裂率高，需精确控制速度（0.05 - 0.5 m/s）和润滑（MoS₂）。

大型钨棒：直径>50 mm，长度 500 - 3000 mm。

特性：高强度（抗拉强度>800 MPa），密度>9.7 g/cm³，适合重载应用。

制备：大吨位锻造（2000 - 5000 t，1400 - 1700° C），真空烧结（>2200° C）确保内部无气孔。

应用：

航空航天：高温结构件，如火箭喷嘴。

玻璃工业：大型电极，耐高温腐蚀。

挑战：锻造设备要求高，晶粒尺寸（>50 μm）控制难度大。

标准：

ASTM B387-18：微型棒公差±0.01 mm，大型棒±0.2 mm。

GB/T 3462-2017：内部缺陷通过超声检测（<0.1 mm）。

技术进展：

微型棒：激光辅助拉拔，精度提高 20%。

大型棒：等温锻造（1500° C），晶粒均匀性提高 15%。

4.4 定制化钨棒设计

定制化钨棒根据客户特定需求设计，涉及成分、尺寸、表面状态和性能的优化。客户需求分析是定制化的起点，确保产品满足应用场景。

4.4.1 客户需求分析

客户需求分析是定制化设计的核心步骤，涉及与客户的技术沟通、应用场景评估及性能要求明确。以下是详细流程：

需求收集：

应用场景：客户需明确钨棒的使用环境，如高温炉（1500 - 1800° C，真空/氢气）、半导体溅射（高纯度，Ra<0.1 μm）或航空航天（抗拉强度>1000 MPa）。

性能要求：包括力学性能（强度、韧性）、热学性能（热导率、热膨胀系数）、电学性能（电阻率）及化学性能（抗氧化、耐腐蚀）。

尺寸与形状：直径、长度、截面形状（如圆形、方形）及公差要求。例如，微电子用棒直径<0.5 mm，公差±0.005 mm。

表面状态：黑棒、抛光棒或清洗棒，粗糙度要求（如 Ra<0.2 μm）。

数量与交期：批量（10 - 1000 件）或小批量试制，交货周期（2 - 12 周）。

版权与免责声明

技术评估：

材料选择：根据需求选择高纯钼或掺杂合金。例如，高温炉用 Mo-La 棒，半导体用高纯钼棒。

工艺可行性：评估生产工艺（如拉拔、锻造、烧结）是否满足尺寸和性能要求。例如，微型棒需超细拉拔，大型棒需大吨位锻造。

标准合规性：确保产品符合 ASTM B387、GB/T 3462 或客户指定标准。

成本分析：权衡高纯度、复杂形状或特殊表面处理对成本的影响，提供性价比方案。

沟通与确认：

技术方案：向客户提交设计方案，包括成分、尺寸、表面处理和性能参数。

样品试制：小批量生产样品，客户测试后反馈（如力学性能、耐腐蚀性）。

合同签订：明确交货时间、质量标准和验收流程。

技术挑战：

复杂需求（如超微型棒或超大型棒）需定制设备，增加成本。

客户对性能要求（如抗氧化性）可能超出现有技术，需开发新工艺（如纳米涂层）。

技术进展：

数字化设计：使用 CAD/CAE 软件模拟钼棒性能，优化设计周期缩短 30%。

快速原型：3D 打印钼粉坯料，试制周期减少 50%。

客户协同：在线平台实时跟踪订单进度，提高沟通效率。



中钨智造黑钼棒

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司

钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

第五章 钼棒的性能测试与评估

钼棒作为一种高性能难熔金属材料，其性能测试与评估是确保其在航空航天、电子、玻璃工业等高要求领域可靠应用的关键环节。本章从力学性能、高温性能、微观结构、化学性能及失效分析五个方面，详细探讨钼棒的测试方法与评估技术。通过系统化的测试流程和先进的分析手段，可以全面揭示钼棒的力学行为、高温稳定性、微观结构特征及化学稳定性，为材料优化、质量控制和寿命预测提供科学依据。这些测试不仅验证了钼棒的性能，还为满足特定应用需求提供了技术支持。

5.1 钼棒的力学性能测试

力学性能测试是评估钼棒在受力条件下表现的核心手段，涵盖拉伸、压缩、弯曲和剪切测试。这些测试揭示了钼棒的强度、韧性及变形能力，为其在结构件、电极材料等领域的应用提供数据支持。测试通常在标准化条件下进行，结合先进的试验设备和数据分析技术，确保结果的准确性和可重复性。

5.1.1 钼棒的拉伸测试

拉伸测试是评估钼棒抗拉强度、屈服强度及延展性的主要方法，广泛应用于质量控制和性能验证。拉伸测试通过施加轴向拉力，测量钼棒在受力下的变形行为，直至发生断裂。测试通常使用万能试验机，配备高精度应变计和夹具，确保样品受力均匀。样品通常加工成圆柱形，表面经过抛光处理以消除微裂纹或表面缺陷的影响。测试环境可以是室温，也可以是高温，以模拟实际使用条件，如高温炉或航空航天部件。

在拉伸过程中，试验机会记录应力-应变曲线，反映材料的弹性阶段、塑性变形阶段及断裂行为。高纯钼棒在室温下表现出较高的强度，但韧性有限，而掺杂钼棒（如TZM）通过添加合金元素显著提高了强度和抗断裂能力。高温下，钼棒的延展性显著增加，但强度下降，因此需要在真空或惰性气氛中测试，以避免氧化干扰。断裂后，通过光学显微镜观察断口形貌，可以判断是韧性断裂（表现为韧窝）还是脆性断裂（表现为解理面），从而分析材料的微观缺陷或加工状态。

影响拉伸性能的因素包括材料成分、晶粒尺寸、加工工艺和测试环境。例如，细小的晶粒结构能够提高强度，而过大的晶粒可能导致脆性断裂。加工过程中引入的残余应力也会影响测试结果，需通过退火处理消除。近年来，技术的进步显著提升了拉伸测试的精度。例如，原位拉伸测试结合扫描电子显微镜，实时观察裂纹萌生和扩展过程；数字图像相关技术通过高分辨率相机记录应变分布，提供更精确的变形分析。这些技术的应用使拉伸测试不仅限于宏观性能，还能深入揭示微观机理。

5.1.2 钼棒的压缩测试

压缩测试用于评估钼棒在压力下的抗压强度和塑性变形能力，特别适用于高温结构件的设计，如航空航天喷嘴或高温炉支撑杆。压缩测试通过在样品两端施加压力，测量其变形行为和破坏极限。测试设备通常为液压试验机，配备高精度位移传感器，确保记录微小变形。样品加工成圆柱形，端面需平整以避免受力不均，表面涂抹润滑剂（如石墨）以减少摩擦效应。压缩测试过程中，样品可能发生屈服、塑性变形或桶形变形，具体行为取决于材料类型和测

试条件。高纯钼棒在室温下具有较高的抗压强度，但高温下塑性增强，易发生较大变形。掺杂钼棒（如 Mo-La）通过分散强化提高了抗压能力，尤其在高温下表现出优异的稳定性。测试完成后，通过显微镜分析压缩断面，可以观察晶粒变形、裂纹分布及微观缺陷，判断材料的压缩性能。

影响压缩性能的因素包括端面摩擦、温度和加载速率。摩擦力过高可能导致样品变形不均匀，影响测试结果，因此润滑剂的选择和涂抹均匀性至关重要。高温测试需在真空环境中进行，以防止氧化干扰。近年来的技术进展包括高温压缩夹具的开发，能够在更高温度下测试，以及微压缩测试的应用，适用于微型钼棒的性能评估。此外，有限元模拟软件被广泛用于预测压缩变形行为，帮助优化测试条件和样品设计。

5.1.3 弯曲与剪切测试

弯曲和剪切测试评估钼棒在复杂应力状态下的抗弯强度和抗剪强度，适用于高温炉支撑杆或模具材料等应用。弯曲测试通常采用三点或四点弯曲方法，通过在样品上施加垂直载荷，测量其抗弯能力和挠度。测试设备为专用弯曲试验机，样品加工成矩形或圆形截面，表面抛光以减少缺陷影响。测试过程中记录力-挠度曲线，观察裂纹萌生位置和断口形貌，以评估材料的抗弯性能。

剪切测试则通过施加横向载荷，测量钼棒的抗剪强度，通常使用专用剪切夹具。样品需确保截面平整，剪切刀间隙精确控制以避免额外应力。掺杂钼棒（如 TZM）由于晶界强化，通常表现出比高纯钼棒更高的抗剪能力。测试结果受样品几何、表面状态和加载速率影响，需严格控制测试条件以确保一致性。

影响弯曲和剪切性能的因素包括跨距比、表面缺陷和测试温度。跨距过小可能引入剪切效应，降低抗弯强度；高温会显著降低强度但提高韧性。技术进展包括四点弯曲测试的广泛应用，其受力更均匀，测试结果更可靠；原位 X 射线成像技术能够实时监测裂纹扩展，提供更详细的失效分析。此外，自动化测试系统的引入提高了数据采集效率和测试精度。

5.2 钼棒的高温性能测试

高温性能测试是评估钼棒在极端温度下表现的关键，涉及蠕变、热疲劳和抗氧化性能，直接关系到其在高温炉、航空航天等领域的应用可靠性。这些测试通常在真空或惰性气氛中进行，以避免氧化干扰。

5.2.1 钼棒的蠕变测试

蠕变测试评估钼棒在高温恒定应力下的长期变形行为，反映其在高温环境中的稳定性。测试使用专用蠕变试验机，配备高温真空炉，确保测试环境无氧气干扰。样品加工成圆柱形，表面抛光以减少应力集中。测试过程中，样品在恒定温度和应力下保持数百至数千小时，记录变形随时间的变化，生成蠕变曲线，分为初级、稳态和加速蠕变阶段。

高纯钼棒在高温下蠕变速率较高，而掺杂钼棒（如 TZM、Mo-La）通过添加合金元素显著降低了蠕变速率，延长了使用寿命。测试完成后，通过显微镜分析蠕变断口，可以观察晶界滑移、空洞形成等微观现象，揭示蠕变机理。影响蠕变性能的因素包括温度、应力和微观结构。高

温会加速原子扩散，导致蠕变加剧；细小晶粒和掺杂元素能有效抑制晶界滑移。

技术进展包括多轴蠕变测试系统的开发，能够模拟复杂应力状态，提高预测精度；高温数字图像相关技术通过红外相机记录应变场，提供更精确的变形数据。此外，加速蠕变测试方法通过提高温度和应力，缩短测试时间，同时结合数学模型预测长期行为，显著提高了测试效率。

5.2.2 钼棒的热疲劳测试

热疲劳测试评估钼棒在循环热应力下的抗裂能力，适用于高温炉加热元件或航空航天部件。测试通过快速加热和冷却样品，模拟实际工况中的温度循环。设备包括热疲劳试验机，配备感应加热和水冷系统，能够实现快速温升和温降。样品表面需抛光以减少初始裂纹，测试在真空或惰性气氛中进行，以避免氧化。

测试过程中，样品经历多次高温-低温循环，记录裂纹萌生时间和扩展速率。掺杂钼棒由于其优异的抗裂性和高温强度，通常表现出更长的热疲劳寿命。测试完成后，通过显微镜或超声检测分析裂纹形貌，确定疲劳条纹和氧化损伤的特征。影响热疲劳性能的因素包括温差、表面状态和循环频率。较大的温差会增加热应力，加速裂纹扩展；抛光表面能有效延长寿命。

技术进展包括原位热成像技术的应用，通过红外相机实时记录温度分布，优化测试条件；抗氧化涂层（如 MoSi_2 ）的应用显著提高了热疲劳寿命。此外，数值模拟技术通过模拟热应力场，预测裂纹萌生位置，提高了测试的科学性。

5.2.3 钼棒的抗氧化性能测试

抗氧化性能测试评估钼棒在高温氧化环境中的稳定性，关键用于高温炉和航空航天应用。测试使用高温氧化炉，将样品置于空气或氧气气氛中，测量质量变化和氧化层形成情况。样品表面需抛光以确保一致性，测试温度范围覆盖钼棒可能的使用条件。精密天平用于记录质量增重，反映氧化速率。

高纯钼棒在高温下易生成挥发性氧化物（ MoO_3 ），导致质量损失，而掺杂钼棒（如 Mo-La）通过形成保护性氧化层提高了抗氧化性能。测试完成后，通过显微镜和能谱分析氧化层形貌和成分，评估其保护效果。影响抗氧化性能的因素包括温度、气氛和表面涂层。高温和氧气浓度会加速氧化，涂层（如 SiC）能显著提高抗氧化温度。

技术进展包括动态氧化测试，模拟实际工况中的循环氧化条件；纳米涂层技术通过物理气相沉积制备致密保护层，显著延长抗氧化寿命。此外，热重分析仪的实时质量监测提高了测试精度，为涂层设计提供了数据支持。

5.3 钼棒的微观结构分析

微观结构分析通过先进显微技术和谱学方法，揭示钼棒的晶粒尺寸、相分布和缺陷特征，为性能优化和失效分析提供依据。

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

5.3.1 扫描电子显微镜（SEM）分析

扫描电子显微镜（SEM）分析用于观察钨棒的表面形貌、断口特征和晶粒结构，是微观结构分析的核心手段。测试使用场发射 SEM，配备二次电子和背散射电子探测器，能够高分辨率成像。样品需抛光至镜面状态，或保留断口用于失效分析。测试前，样品经过超声清洗并喷涂导电层（如金或碳）以增强成像效果。

SEM 分析可以揭示晶粒尺寸、晶界特征、气孔、夹杂物及断裂形貌。高纯钨棒通常呈现较大的晶粒，掺杂钨棒由于析出相（如 TiC、La₂O₃）具有更细小的晶粒结构。断口分析能够区分韧性断裂和脆性断裂，指导材料优化。影响分析结果的因素包括样品制备质量和加工工艺。抛光不均匀可能导致假象，热加工能细化晶粒，提高性能。

技术进展包括环境 SEM 的应用，能够在低真空下观察氧化层动态形成；聚焦离子束（FIB）结合 SEM 实现三维结构重构，提供更全面的微观信息。人工智能技术的引入通过自动识别晶粒边界和缺陷，提高了分析效率。

5.3.2 X 射线衍射（XRD）分析

X 射线衍射（XRD）分析用于确定钨棒的晶体结构、相组成和残余应力，是评估材料微观特性的重要方法。测试使用 X 射线衍射仪，通过 Cu K α 辐射扫描样品，生成衍射谱。样品表面需抛光至高光洁度，确保衍射信号清晰。测试结果匹配标准卡片，确定钨的体心立方结构及掺杂相（如 TiC、ZrC）。

XRD 分析能够揭示加工过程中引入的残余应力，影响钨棒的力学性能。掺杂钨棒中的析出相增强了晶界强度，改善高温性能。影响分析结果的因素包括表面氧化和加工应力。氧化层可能干扰衍射峰，需通过酸洗去除；冷加工引入的应力会改变峰位，需退火处理。

技术进展包括同步辐射 XRD 的应用，提供更高分辨率的相分析；原位 XRD 技术能够在高温下实时监测相转变和应力变化。此外，二维应力映射技术提高了残余应力分布的分析精度。

5.3.3 能谱分析（EDS）

能谱分析（EDS）结合 SEM 使用，定量测定钨棒的元素分布和杂质含量，评估材料纯度和掺杂均匀性。测试通过检测样品发出的特征 X 射线，识别元素并计算其含量。样品需抛光并清洗，确保表面无污染。EDS 分析能够检测钨棒中的微量杂质（如 Fe、C、O）及掺杂元素（如 Ti、La）的分布。

高纯钨棒的 EDS 分析通常显示单一钨元素，掺杂钨棒则呈现均匀分布的合金元素。测试结果受样品表面状态和探测深度影响，需优化加速电压和探测时间。技术进展包括高分辨率 EDS 探测器的应用，提高了元素检测灵敏度；结合电子背散射衍射（EBSD）技术，能够同时分析元素分布和晶体取向，为微观结构优化提供更多信息。

5.4 钨棒的化学性能测试

化学性能测试评估钨棒在腐蚀环境中的耐久性和化学稳定性，适用于玻璃工业电极和高温炉部件。

5.4.1 钼棒的耐腐蚀性测试

耐腐蚀性测试评估钼棒在酸、碱或熔盐环境中的稳定性。测试通常通过浸泡或电化学方法进行，将样品置于特定腐蚀介质中，观察质量损失或表面变化。测试设备包括恒温水浴槽和电化学工作站，样品表面需抛光以确保一致性。常见腐蚀介质包括硝酸、盐酸、氢氧化钠溶液及高温熔盐。

高纯钼棒在室温下对酸碱具有较好的耐腐蚀性，但在高温熔盐中可能发生局部腐蚀。掺杂钼棒（如 Mo-W）通过提高晶界稳定性，显著增强了耐腐蚀性。测试完成后，通过显微镜观察腐蚀形貌，分析点蚀或均匀腐蚀的特征。影响耐腐蚀性的因素包括介质浓度、温度和表面状态。高温会加速腐蚀，抛光表面能减少腐蚀起始点。

技术进展包括电化学阻抗谱（EIS）的应用，实时监测腐蚀速率；高温腐蚀测试设备的开发，模拟实际工况；绿色腐蚀介质（如柠檬酸）的使用，降低了环境影响。

5.4.2 钼棒的化学稳定性评估

化学稳定性评估测试钼棒在特定化学环境中的反应活性，通常结合抗氧化测试和耐腐蚀测试。测试通过将样品暴露于高温气体、液体或固体环境中，观察其化学反应和性能变化。测试设备包括高温炉和化学反应釜，样品需在控制气氛下测试。

钼棒在惰性或还原气氛中表现出优异的化学稳定性，但在氧化或腐蚀性环境中易发生反应。掺杂钼棒通过形成保护性氧化层或合金层提高了稳定性。测试结果通过质量变化、表面分析和成分检测综合评估。影响化学稳定性的因素包括环境气氛、温度和材料成分。技术进展包括原位化学分析技术的应用，如拉曼光谱实时监测反应产物；复合涂层的开发提高了化学稳定性。

5.5 钼棒的失效分析

失效分析通过研究钼棒的断裂、疲劳和磨损行为，揭示其失效机理，为材料优化和寿命预测提供依据。

5.5.1 钼棒的断裂机理分析

断裂机理分析研究钼棒在受力下的破坏过程，识别断裂类型和原因。分析通过 SEM 观察断口形貌，结合力学测试数据，确定是韧性断裂、脆性断裂还是疲劳断裂。高纯钼棒在室温下常呈现脆性断裂，高温下转为韧性断裂；掺杂钼棒通过晶界强化降低了脆性倾向。分析还包括裂纹萌生位置、扩展路径及微观缺陷的作用。

影响断裂的因素包括晶粒尺寸、杂质含量和加工缺陷。较大的晶粒和微量氧气可能引发脆性断裂，冷加工引入的位错增加断裂风险。技术进展包括原位 SEM 分析，实时观察裂纹扩展；断裂力学模型的应用，预测裂纹扩展速率。

5.5.2 钼棒的疲劳与磨损分析

疲劳与磨损分析评估钼棒在循环载荷和摩擦条件下的耐久性，适用于高温炉支撑杆和模具材料。疲劳测试通过施加循环应力，记录裂纹萌生和扩展；磨损测试使用摩擦磨损试验机，测

量质量损失和表面形貌。掺杂钼棒由于较高的硬度和强度，表现出更好的抗疲劳和耐磨性。影响疲劳和磨损的因素包括表面状态、环境和载荷条件。抛光表面能显著延长疲劳寿命，润滑剂减少磨损。技术进展包括纳米涂层（如 SiC）的应用，提高耐磨性；原位摩擦测试技术，实时监测磨损过程。

5.5.3 钼棒的寿命预测模型

寿命预测模型通过整合力学、高温和化学测试数据，预测钼棒在特定工况下的使用寿命。模型基于蠕变、疲劳和腐蚀数据，结合数学方法（如 Arrhenius 模型）进行预测。测试数据通过试验机和显微分析获得，模型考虑温度、应力和环境的影响。

高纯钼棒的寿命受氧化和蠕变限制，掺杂钼棒通过强化微观结构显著延长寿命。技术进展包括数字孪生技术的应用，实时模拟钼棒性能；机器学习模型通过大数据分析，提高预测精度。



中钨智造钼钨棒

第六章 钼棒的生产设备

钼棒的生产涉及从原料处理到最终成品的多个复杂工艺，每一环节都需要专用设备以确保产品质量和性能。本章详细探讨钼棒生产中使用的设备，涵盖原料处理、粉末冶金、热加工、表面处理、检测以及自动化与智能化生产设备。这些设备共同构成了高效、精密的生产链，能够满足航空航天、电子、玻璃工业等领域对高性能钼棒的需求。通过优化设备设计和工艺控制，可以显著提高生产效率、产品质量及一致性，同时降低能耗和环境影响。

6.1 钼棒的原料处理设备

原料处理是钼棒生产的第一步，涉及将钼矿石或钼化合物转化为高纯度钼粉，为后续粉末冶金工艺奠定基础。原料处理设备主要包括破碎与研磨设备以及提纯设备，需确保原料粒度均匀、纯度高且杂质含量低。

版权与免责声明

6.1.1 破碎与研磨设备

破碎与研磨设备用于将钨矿石（如辉钨矿）或钨化合物（如氧化钨）加工成细小颗粒，为后续提纯和粉末制备创造条件。破碎设备通常包括颚式破碎机和圆锥破碎机，用于将大块原料破碎成小颗粒。颚式破碎机通过挤压和剪切作用，将原料尺寸从几十厘米减小到几毫米，适合处理硬度较高的辉钨矿。圆锥破碎机则进一步细化颗粒，适用于中碎和细碎工序，确保颗粒尺寸均匀。

研磨设备主要包括球磨机和气流磨，用于将破碎后的颗粒研磨成微米级粉末。球磨机通过钢球与原料的碰撞和摩擦，将颗粒研磨至较细粒度，适用于大规模生产。气流磨利用高速气流冲击原料，生产超细粉末，特别适合高纯钨粉的制备。研磨过程中需控制气氛（如氮气）以防止氧化，设备内衬采用耐磨材料（如氧化铝或碳化钨）以减少污染。

影响设备性能的因素包括原料硬度、进料粒度和研磨时间。硬度较高的原料可能导致设备磨损，需定期更换内衬；过长的研磨时间可能引入杂质，需优化工艺参数。技术进展包括高效振动球磨机的应用，显著提高了研磨效率；智能控制系统通过实时监测颗粒尺寸，自动调整研磨参数，确保粉末质量稳定。

6.1.2 提纯设备（焙烧炉、还原炉）

提纯设备用于将破碎研磨后的钨化合物（如氧化钨）转化为高纯钨粉，主要包括焙烧炉和还原炉。焙烧炉通过高温处理，将辉钨矿中的硫化物转化为氧化钨，同时去除挥发性杂质。焙烧炉通常采用回转炉或流化床炉设计，能够连续处理大量原料。炉内气氛严格控制，通常在空气或氧气环境中进行，以确保硫化物完全氧化。设备配备废气处理系统（如湿法洗涤器），以去除硫氧化物，符合环保要求。

还原炉用于将氧化钨还原为金属钨粉，通常在氢气气氛下进行。管式还原炉是常见设备，通过多级加热区逐步还原氧化钨，生成高纯钨粉。炉体采用耐高温材料（如石英或钨合金），确保长期稳定运行。还原过程中需精确控制氢气流量和温度梯度，以避免粉末颗粒团聚或杂质残留。设备还配备尾气回收系统，回收未反应的氢气，提高资源利用率。

影响提纯效果的因素包括原料纯度、气氛控制和设备密封性。原料中的微量杂质（如铁、硅）可能影响钨粉质量，需通过预处理去除；气氛中的氧气或水分会导致粉末氧化，需保持高纯氢气环境。技术进展包括真空还原炉的开发，显著提高了钨粉纯度；在线监测系统通过红外光谱分析气氛成分，优化还原工艺。

6.2 钨棒的粉末冶金设备

粉末冶金是钨棒生产的核心工艺，通过将钨粉压制成型并烧结成高密度坯料，为后续加工提供基础。粉末冶金设备包括混料与压制设备以及烧结炉，需确保坯料的密度、均匀性和力学性能。

6.2.1 混料与压制设备

混料与压制设备用于将钨粉与掺杂元素（如 Ti、La）均匀混合，并压制成棒状坯料。混料设备主要包括行星球磨机和 V 型混料机，用于混合钨粉和掺杂剂（如 La_2O_3 、TiC）。行星球磨

机通过高速旋转和碰撞实现均匀混合，适合掺杂钼棒的制备；V型混料机通过低速翻转混合，适用于高纯钼粉，避免引入杂质。混料过程中需控制气氛（如氮气），防止粉末氧化，设备内壁采用不锈钢或陶瓷材料以减少污染。

压制设备包括冷等静压机和液压机，用于将混合好的粉末压制成药料。冷等静压机通过液体介质（如水或油）施加均匀压力，制备高密度药料，特别适合大型或复杂形状的钼棒药料。液压机则通过模具压制，适合小批量生产，模具设计需考虑药料的几何精度。压制过程中需控制压力分布，避免药料出现裂纹或密度不均。

影响混料与压制效果的因素包括粉末粒度、掺杂均匀性和压制工艺。过细的粉末可能导致流动性差，影响压制质量；掺杂剂分布不均会降低药料性能。技术进展包括液相掺杂技术的应用，提高了掺杂均匀性；自动化压制系统通过传感器监控压力和密度，优化成型过程。

6.2.2 烧结炉（真空炉、气氛炉）

烧结炉用于将压制药料加热至高温，使粉末颗粒结合形成高密度钼棒药料。真空烧结炉是主要设备，通过真空环境（低压）防止氧化，确保药料的高纯度和致密性。炉体采用钼或石墨加热元件，耐高温并具有良好的热均匀性。烧结过程分阶段进行，先低温排胶去除粘结剂，再高温烧结促进颗粒结合，最终形成密度接近理论值的药料。

气氛烧结炉通常使用氢气或惰性气体（如氩气）作为保护气氛，适用于掺杂钼棒的烧结。氢气具有还原性，能有效去除微量氧化物，提高药料质量。炉内配备气氛循环系统，确保气体均匀分布，避免局部氧化。烧结炉还需配备精确的温控系统，保持温度梯度均匀，防止药料变形或开裂。

影响烧结效果的因素包括烧结气氛、温度控制和药料密度。气氛中的微量氧气可能导致氧化，需严格控制露点；初始药料密度过低会延长烧结时间。技术进展包括中频感应烧结炉的开发，提高了加热效率；在线监测系统通过红外测温仪实时控制温度，优化烧结质量。

6.3 钼棒的热加工设备

热加工设备用于将烧结药料加工成最终钼棒形状，涉及锻造、轧制和拉拔工艺，以改善材料密度和力学性能。

6.3.1 锻造设备

锻造设备用于将烧结药料在高温下塑性变形，制备高密度、细晶粒的钼棒。常用设备包括液压锻造机和空气锤，能够施加高吨位压力，确保药料充分变形。锻造在高温下进行，需配备感应加热炉，将药料加热至适宜温度，以提高延展性并降低变形抗力。锻造过程中需控制变形速率和方向，避免产生裂纹或内部应力。

锻造设备通常配备水冷系统，保护模具和工件，延长设备寿命。模具材料需选用耐高温合金（如钨合金），以承受高温和高压。影响锻造质量的因素包括加热温度、变形量和模具设计。温度过低可能导致开裂，过高则可能引发晶粒长大。技术进展包括等温锻造技术的应用，通过精确控温提高晶粒均匀性；伺服控制锻造机通过实时调整压力，提高加工精度。

6.3.2 轧机与拉拔机

轧机和拉拔机用于将锻造后的坯料进一步加工成精确尺寸的钨棒。轧机包括热轧机和冷轧机，热轧机通过多道次轧制，将坯料加工成圆形或方形棒材，适合大直径钨棒的生产。轧制过程中需配备加热装置，保持坯料在适宜温度，防止冷加工裂纹。冷轧机用于精加工，提高尺寸精度和表面光洁度。

拉拔机用于生产小直径或微型钨棒，通过拉拔模具将棒材拉伸成型。拉拔需在高温下进行，使用润滑剂（如 MoS_2 ）减少摩擦和磨损。拉拔模具通常采用金刚石或碳化钨材料，确保高精度和耐用性。影响轧制和拉拔效果的因素包括温度、变形速率和模具状态。温度控制不当可能导致表面缺陷，模具磨损会影响尺寸精度。

技术进展包括连轧生产线的开发，提高了生产效率；激光测径仪的应用，实时监测棒材尺寸，确保公差控制。此外，自动化拉拔系统通过伺服电机控制拉拔速度，优化了加工一致性。

6.4 钨棒的表面处理设备

表面处理设备用于改善钨棒的表面质量，提高其耐腐蚀性和美观性，满足电子、航空航天等领域的严格要求。

6.4.1 抛光机

抛光机用于将钨棒表面加工至高光洁度，减少表面缺陷，提高性能。机械抛光机通过砂轮或抛光膏对棒材进行研磨，逐步提高表面光滑度。设备配备多级砂轮，从粗磨到精磨，适合不同表面要求的钨棒。电解抛光机通过电化学反应去除表面微小缺陷，获得镜面效果，特别适用于高纯钨棒的加工。

抛光过程中需控制转速和抛光剂种类，避免引入新的表面应力。抛光机通常配备冷却系统，防止工件过热导致氧化。影响抛光效果的因素包括抛光剂粒度、压力和表面初始状态。技术进展包括自动化抛光系统的开发，通过机器人控制抛光路径，提高一致性；纳米级抛光剂的应用，显著提高了表面光洁度。

6.4.2 清洗设备

清洗设备用于去除钨棒表面的氧化物、油污和抛光残留物，确保表面清洁。超声波清洗机是主要设备，通过高频振动（几十千赫兹）在清洗液中产生微小气泡，清除表面污染物。清洗液通常为去离子水或中性清洗剂，避免对钨棒造成腐蚀。酸洗设备使用稀酸溶液（如硝酸或硫酸）去除氧化层，需配备废液处理系统以符合环保要求。

清洗过程中需控制清洗时间和液温，防止过度腐蚀或残留污染物。影响清洗效果的因素包括清洗液成分、表面状态和设备密封性。技术进展包括绿色清洗技术的应用，使用环保清洗剂减少污染；在线清洗系统通过实时监测液体的 pH 值和污染物浓度，优化清洗效率。

6.5 钨棒的检测设备

检测设备用于评估钨棒的质量，确保其满足力学性能、尺寸精度和表面质量要求，涵盖无损检测和尺寸表面检测。

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆

半导体行业扩散管、晶圆载体

真空镀膜设备电极、靶材

核反应堆与航空发动机高温部件

玻璃工业电极棒与耐热夹具

医疗设备、X射线靶材

科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

6.5.1 无损检测设备（超声、X 射线）

无损检测设备用于检测钨棒内部和表面的缺陷，如气孔、夹杂物和裂纹，不破坏样品。超声检测设备通过高频超声波（几兆赫兹）扫描棒材，检测内部缺陷。设备配备换能器和信号分析系统，能够识别微小缺陷并定位其深度。X 射线检测设备通过 X 射线穿透棒材，生成内部结构图像，特别适合检测大型钨棒的内部气孔或夹杂物。

检测过程中需校准设备灵敏度，确保缺陷检测的准确性。影响检测效果的因素包括棒材尺寸、表面状态和设备分辨率。技术进展包括相控阵超声技术的应用，提高了缺陷定位精度；高分辨率 X 射线 CT 系统能够重构三维缺陷分布，提供更详细的分析。

6.5.2 尺寸与表面质量检测设备

尺寸与表面质量检测设备用于测量钨棒的直径、长度和表面粗糙度，确保符合标准要求。激光测径仪通过激光束扫描棒材，实时测量直径和圆度，适合在线检测。表面粗糙度仪通过探针扫描表面，评估光洁度和缺陷，适用于抛光钨棒的检测。光学显微镜用于观察表面微观形貌，识别划痕或腐蚀痕迹。

检测过程中需确保设备校准和环境稳定，避免测量误差。影响检测结果的因素包括设备精度、样品表面状态和操作技术。技术进展包括自动化检测系统的应用，通过机器人控制测头，提高检测效率；三维轮廓仪的开发，能够全面分析表面形貌。

6.6 钨棒的自动化与智能化生产设备

自动化与智能化生产设备通过集成控制系统和数据分析技术，提高钨棒生产的效率、一致性和可追溯性。

6.6.1 生产线的自动化控制

自动化控制系统通过 PLC（可编程逻辑控制器）或 DCS（分布式控制系统）实现生产线的集成管理，涵盖原料处理、粉末冶金、热加工和表面处理等环节。系统通过传感器实时监测温度、压力、尺寸等参数，自动调整设备运行状态。例如，烧结炉的温度控制系统能够根据坯料特性调整加热曲线，确保烧结质量；轧机的自动化控制系统通过伺服电机调节轧制速度，优化棒材尺寸精度。

自动化生产线的优势在于减少人工干预，提高生产一致性。影响自动化效果的因素包括传感器精度、控制算法和设备兼容性。技术进展包括工业互联网的应用，通过云平台实现设备互联；柔性生产线的开发，能够快速切换不同规格钨棒的生产。

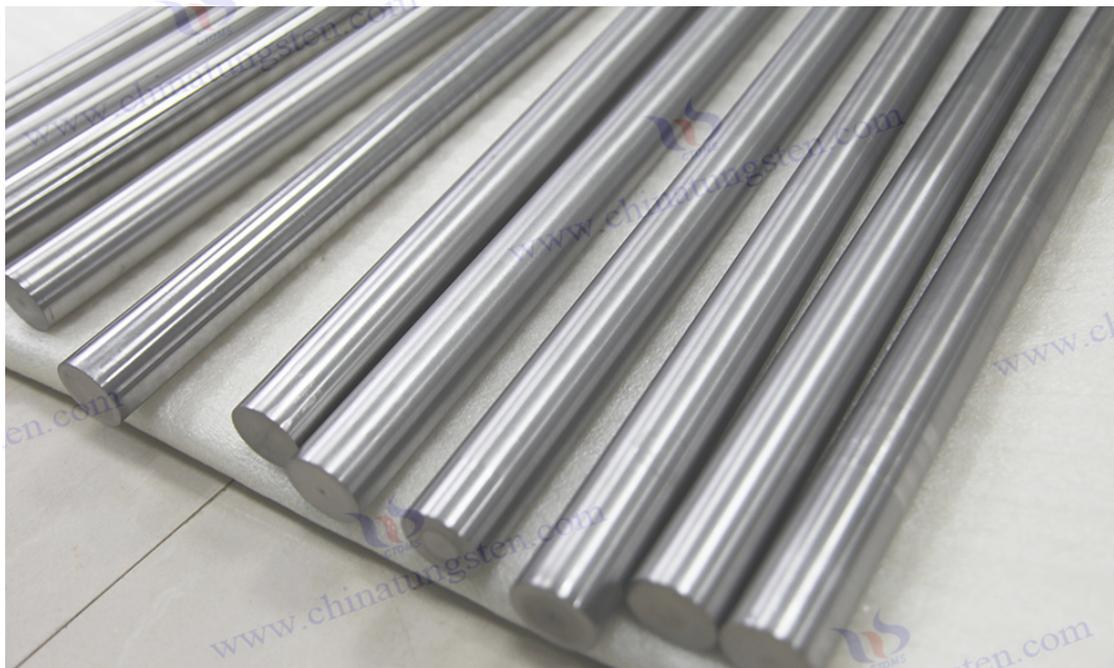
6.6.2 智能监测与数据分析

智能监测与数据分析系统通过传感器、物联网和人工智能技术，实时收集和分析生产数据，优化工艺和质量控制。监测系统包括红外测温仪、激光测径仪和在线光谱仪，用于实时检测温度、尺寸和成分。数据分析通过机器学习算法，识别生产中的异常模式，预测设备故障或质量问题。例如，烧结过程中的温度波动可以通过 AI 模型分析，提前调整工艺参数。

智能系统的优势在于提高生产效率和可追溯性，减少废品率。影响系统效果的因素包括数据

版权与法律责任声明

采集频率、算法准确性和网络稳定性。技术进展包括数字孪生技术的应用，通过虚拟模型模拟生产过程，优化设备运行；区块链技术的引入，确保生产数据的可信性和安全性。



中钨智造钨钼棒

第七章 钨棒的应用领域

钨棒凭借其高熔点、优异的力学性能、良好的导电性和耐腐蚀性，在多个高技术领域展现出广泛的应用潜力。本章详细探讨钨棒在高温炉与热工设备、电子与半导体行业、航空航天、玻璃与陶瓷工业、医疗与科研以及新兴领域的应用，分析其功能特性、工艺要求及技术进展。钨棒的高性能使其成为关键部件的理想材料，能够满足极端环境下的苛刻要求，同时随着技术进步，其应用范围不断扩展，为工业和科研提供了创新解决方案。

7.1 高温炉与热工设备

钨棒在高温炉和热工设备中广泛应用，特别是在需要耐高温、真空或惰性气氛的环境中，其高熔点和优异的热稳定性使其成为不可或缺的材料。钨棒主要用于加热元件和支撑固定部件，满足高温加工和热处理的需求。

7.1.1 钨棒作为加热元件

钨棒作为加热元件在高温炉中发挥核心作用，广泛应用于真空炉、氢气保护炉和惰性气氛炉，用于材料烧结、热处理和晶体生长等工艺。钨棒的高熔点和良好的导电性使其能够承受极端高温，同时保持稳定的热输出。加热元件通常加工成细长棒状或特定几何形状，以优化热场分布。掺杂钨棒（如 Mo-La）因其优异的抗蠕变性和抗氧化性，常用于长期高温运行的炉内环境。

生产过程中，钨棒需经过精密加工，确保表面光滑以减少热应力集中，同时需在真空或还原气氛中运行，以防止高温氧化。影响加热元件性能的因素包括材料纯度、表面状态和运行环

版权与免责声明

境。微量杂质可能降低导电性，高温氧化会导致材料挥发，需通过涂层（如 MoSi_2 ）或气氛控制解决。

技术进展包括复合加热元件的开发，通过在钼棒表面施加抗氧化涂层，延长使用寿命；智能温控系统的应用，实时调节加热功率，优化能效。此外，新型掺杂钼棒（如 Mo-La）通过细化晶粒结构，提高了高温稳定性，为更苛刻的热工应用提供了可能。

7.1.2 支撑与固定部件

钼棒在高温炉中还用作支撑和固定部件，如支撑杆、夹具和热屏，用于固定工件或屏蔽热辐射。这些部件需要承受高温和机械载荷，同时保持几何稳定性。掺杂钼棒（如 TZM）因其高强度和抗蠕变性，成为首选材料，能够在高温下长期维持结构完整性。高纯钼棒则因其优异的导热性，适用于需要快速热传导的支撑结构。

支撑部件的制造需确保尺寸精度和表面质量，防止在高温下发生变形或开裂。运行环境通常为真空或惰性气氛，以避免氧化。影响性能的因素包括材料成分、加工工艺和热循环频率。掺杂元素能显著提高抗蠕变性，而热循环可能引发热疲劳，需优化设计。

技术进展包括精密加工技术的应用，如 CNC 加工确保复杂形状的支撑部件；表面涂层技术（如 SiC 涂层）提高了抗氧化性和耐磨性。此外，模块化设计的支撑部件能够快速拆装，提高了炉内维护效率。

7.2 电子与半导体行业

钼棒在电子与半导体行业中因其高导电性、低热膨胀系数和高纯度而得到广泛应用，主要用于电极材料、溅射靶材和真空管部件。

7.2.1 电极材料

钼棒作为电极材料广泛应用于电子设备的制造，如等离子体刻蚀设备和电真空器件。高纯钼棒因其低电阻率和优异的化学稳定性，能够在高电压和高温环境下稳定运行。电极通常加工成细长棒状或定制形状，表面需抛光至高光洁度以减少电弧放电和杂质污染。

生产过程中，钼棒需经过严格的纯度控制，杂质含量需降至最低以确保电性能稳定。运行环境通常为真空或惰性气体，防止氧化和表面污染。影响电极性能的因素包括材料纯度、表面质量和运行温度。微量氧气可能引发电极腐蚀，需通过高纯气氛保护。

技术进展包括超高纯钼棒的开发，通过多级提纯工艺进一步降低杂质；电解抛光技术的应用提高了表面光洁度，减少电弧风险。此外，电极设计的优化通过模拟电场分布，提高了电极的均匀性和寿命。

7.2.2 溅射靶材

钼棒作为溅射靶材用于生产集成电路、太阳能电池和平板显示器的薄膜材料。高纯钼棒因其高密度和均匀微观结构，能够在溅射过程中提供稳定的原子流，确保薄膜质量。靶材通常加工成圆形或矩形棒状，表面抛光至镜面状态，以减少缺陷和颗粒污染。

版权与法律责任声明

生产靶材的钨棒需通过粉末冶金和热加工工艺，确保内部无气孔和夹杂物。溅射过程中，靶材需在高真空环境中运行，防止氧化和杂质引入。影响靶材性能的因素包括材料纯度、晶粒尺寸和表面状态。细小晶粒能够提高溅射均匀性，抛光表面减少颗粒喷射。

技术进展包括大尺寸靶材的开发，满足大面积薄膜沉积需求；高纯钨粉的制备技术提高了靶材质量。此外，靶材回收技术的进步通过化学提纯和再加工，降低了生产成本和环境影响。

7.2.3 真空管与离子源部件

钨棒在真空管和离子源中用作电极、支撑件或发射体，应用于电子显微镜、质谱仪等设备。高纯钨棒因其低电子逸出功和高导电性，适合作为发射体材料；掺杂钨棒则因其高温稳定性，用于支撑结构。部件需加工成复杂形状，表面抛光以减少电子散射。

生产过程中，钨棒需经过精密加工和清洗，确保无污染物。运行环境为超高真空，防止电极氧化或放电。影响性能的因素包括表面光洁度、材料纯度和运行电压。表面缺陷可能引发电弧放电，需通过电解抛光消除。

技术进展包括微型钨棒的加工技术，满足微电子设备需求；表面纳米涂层提高了抗电弧性能。此外，自动化装配技术通过机器人操作，提高了部件的制造精度和一致性。

7.3 航空航天

钨棒在航空航天领域因其高强度、高熔点和低密度而备受青睐，主要用于高温结构件和推进系统部件。

7.3.1 高温结构件

钨棒在航空航天中用作高温结构件，如喷气发动机涡轮叶片、热屏和连接件。掺杂钨棒（如TZM）因其优异的高温强度和抗蠕变性，能够在极端高温下保持结构稳定性。结构件需通过锻造和精密加工，确保尺寸精度和高力学性能。

生产过程中，钨棒需在真空或惰性气氛中加工和使用，防止高温氧化。影响性能的因素包括材料成分、加工工艺和运行环境。掺杂元素显著提高了抗蠕变性，但高温氧化需通过涂层保护解决。

技术进展包括等温锻造技术的应用，提高了结构件的晶粒均匀性；抗氧化涂层（如 MoSi_2 ）延长了部件寿命。此外，复合材料与钨棒的结合通过层状设计，提高了综合性能。

7.3.2 推进系统部件

钨棒在推进系统中用于制造喷嘴、燃烧室衬里和推力室部件，需承受高温燃气和机械载荷。TZM和Mo-La钨棒因其高熔点和抗热冲击性，成为理想选择。部件需通过热加工和精密机加工，确保复杂形状和高精度。

生产过程中，钨棒需在高温下加工，并施加抗氧化涂层以延长使用寿命。影响性能的因素包括热循环、燃气腐蚀和机械应力。技术进展包括增材制造技术的应用，通过3D打印钨合金

部件，提高设计自由度；高温涂层技术的开发，提高了抗腐蚀性。

7.4 玻璃与陶瓷工业

钨棒在玻璃与陶瓷工业中因其耐高温腐蚀和化学稳定性而广泛应用，主要用于玻璃熔化电极和陶瓷烧结支撑。

7.4.1 玻璃熔化电极

钨棒作为玻璃熔化电极用于玻璃熔炉，能够在高温熔融玻璃中稳定运行。高纯钨棒因其优异的导电性和耐腐蚀性，适合作为电极材料。电极需加工成特定形状，表面清洗以去除氧化物，防止污染玻璃熔体。

生产过程中，钨棒需在还原气氛中运行，避免氧化和挥发。影响性能的因素包括玻璃成分、运行温度和电极表面状态。碱性玻璃可能引发电极腐蚀，需优化材料选择。技术进展包括 Mo-La 电极的开发，提高了抗腐蚀性；自动化电极安装系统提高了生产效率。

7.4.2 陶瓷烧结支撑

钨棒在陶瓷烧结炉中用作支撑杆或夹具，支持陶瓷坯体在高温下的烧结过程。掺杂钨棒因其高强度和抗蠕变性，能够在高温下保持稳定。支撑件需加工成复杂形状，表面抛光以减少与陶瓷的粘附。

生产过程中，钨棒需在真空或氢气气氛中运行，防止氧化。影响性能的因素包括烧结温度、气氛和支撑件设计。技术进展包括陶瓷涂层的应用，减少了钨棒与陶瓷的反应；模块化支撑设计提高了炉内装载效率。

7.5 医疗与科研

钨棒在医疗与科研领域因其高纯度和优异性能而得到应用，主要用于 X 射线管靶材和实验室高温设备。

7.5.1 X 射线管靶材

钨棒在 X 射线管中用作靶材或支撑结构，因其高熔点和低热膨胀系数，能够承受电子轰击产生的高温。高纯钨棒通过精密加工制成靶材，表面抛光至镜面状态以减少散射。生产过程中需严格控制杂质，确保成像质量。

运行环境中，靶材需承受快速热循环，防止热疲劳失效。影响性能的因素包括表面质量、热导率和运行功率。技术进展包括钨基复合靶材的开发，提高了热疲劳寿命；激光加工技术提高了靶材的几何精度。

7.5.2 实验室高温实验设备

钨棒在实验室高温设备中用作加热元件、支撑杆或电极，应用于材料测试和晶体生长。高纯钨棒因其化学稳定性，适合高精度实验；掺杂钨棒则用于需要高强度的场景。部件需通过精密加工和清洗，确保无污染。

版权与法律责任声明

运行环境通常为真空或惰性气氛，防止氧化。影响性能的因素包括温度控制、部件设计和材料纯度。技术进展包括微型钼棒的开发，满足小型实验装置需求；智能温控系统的应用，提高了实验精度。

7.6 新兴应用

钼棒在新兴领域的应用不断扩展，特别是在 3D 打印和核工业中，展现出巨大的潜力。

7.6.1 3D 打印与增材制造

钼棒在 3D 打印和增材制造中用作原材料或支撑结构，应用于高性能部件的快速成型。钼粉通过激光或电子束熔融沉积，制备复杂形状的钼合金部件，适合航空航天和医疗领域。钼棒还可作为支撑材料，承受高温打印环境。

生产过程中需控制粉末质量和打印气氛，防止氧化和缺陷。影响性能的因素包括打印参数、粉末粒度和后处理工艺。技术进展包括高纯钼粉的制备，提高了打印质量；多材料打印技术的应用，实现了钼与其他金属的复合成型。

7.6.2 核工业应用

钼棒在核工业中用于反应堆高温部件和辐射屏蔽材料，因其高熔点和抗辐射性。Mo-W 钼棒因其优异的抗腐蚀性和高温强度，适合核反应堆环境。部件需通过精密加工和涂层处理，确保长期稳定运行。

运行环境涉及高温和强辐射，需严格控制材料性能。影响性能的因素包括辐射损伤、温度和材料成分。技术进展包括抗辐射钼合金的开发，提高了部件寿命；增材制造技术的应用，优化了复杂部件的制造。



中钨智造钼棒

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

第八章 钨棒的国内外标准与规范

钨棒作为一种高性能难熔金属材料，其生产、测试和应用需遵循严格的标准与规范，以确保质量一致性、性能可靠性和使用安全性。本章详细探讨钨棒的国际标准、国内标准、认证与合规性要求，以及国内外标准的对比与适用场景分析。这些标准为钨棒在航空航天、电子、玻璃工业等领域的应用提供了技术保障，同时促进了全球贸易和技术交流的规范化。通过深入理解和实施这些标准，生产商能够优化工艺流程，满足客户需求，确保产品在国内外市场的竞争力。

8.1 钨棒的国际标准

国际标准为钨棒的生产、测试和应用提供了统一的技术框架，广泛应用于全球供应链和跨国合作。主要由美国材料与试验协会（ASTM）和国际标准化组织（ISO）制定，国际标准涵盖钨棒的化学成分、力学性能、尺寸公差和测试方法，为全球市场提供了质量基准。

8.1.1 ASTM 标准（ASTM B387 等）

ASTM 标准是钨棒生产和测试的全球权威规范，广泛应用于北美、欧洲和亚洲的高技术行业。其中，ASTM B387-18 是钨及钨合金棒、条、线材的核心标准，详细规定了高纯钨棒和掺杂钨棒（如 TZM、Mo-La）的技术要求。标准要求高纯钨棒的钨含量 $\geq 99.95\%$ ，杂质（如 Fe $< 0.01\%$ 、C $< 0.005\%$ 、O $< 0.003\%$ ）需严格控制，以确保高温和腐蚀环境下的性能稳定性。力学性能方面，标准要求高纯钨棒的室温抗拉强度为 600 - 800 MPa，TZM 棒为 900 - 1100 MPa，测试需依据 ASTM E8/E8M（拉伸测试）在 $20 \pm 5^\circ \text{C}$ 下进行。表面质量分为黑棒（ $R_a < 3.2 \mu\text{m}$ ）、抛光棒（ $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ ）和清洗棒，满足航空航天、电子等领域的不同需求。尺寸公差要求直径偏差 $\pm 0.05 \text{ mm}$ ，长度偏差 $\pm 1 \text{ mm}$ ，确保精密加工和装配。

ASTM 标准还包括配套规范，如 ASTM E9-19（压缩测试）、ASTM E139-11（蠕变测试）和 ASTM G54-14（抗氧化测试），为钨棒的性能评估提供系统化指导。生产商需通过化学分析（如 ICP-MS，检测精度 0.001%）、显微结构观察（晶粒尺寸 10 - 50 μm ）和无损检测（如超声，5 MHz）验证产品合规性。ASTM 标准的优势在于其全面性和国际化适用性，适用于高温炉、半导体和航空航天领域。影响标准实施的因素包括测试设备精度（如万能试验机负荷分辨率 0.01 kN）、样品制备规范性（如表面抛光 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ ）和环境控制（如真空度 $< 10^{-3} \text{ Pa}$ ）。技术进步包括 ASTM 标准的定期更新，新增对 Mo-W 合金和微型钨棒（直径 $< 1 \text{ mm}$ ）的规范，以及原位测试技术（如 SEM 实时裂纹分析）的支持。

8.1.2 ISO 标准

ISO 标准为钨棒的国际贸易和应用提供了通用规范，注重材料的可追溯性和全球一致性。虽然 ISO 尚未针对钨棒制定专用标准，但其相关标准广泛应用于钨棒的性能测试。例如，ISO 6892-1:2019 规定了金属拉伸测试方法，要求测试速率 0.5 - 5 mm/min，适用于评估钨棒的抗拉强度和延伸率；ISO 6506-1:2014 规范了布氏硬度测试，适用于钨棒硬度评估（HB 200 - 300）。ISO 标准要求生产商提供化学成分分析报告，确保杂质含量（如 O $< 0.005\%$ ）符合要求，并通过标准化测试流程保证结果的国际可比性。

ISO 标准的实施需通过第三方认证机构（如 SGS、TÜV）验证，涉及化学分析、力学测试和表

版权与免责声明

面质量检测。标准强调生产过程中的环境控制，如真空或惰性气氛（露点 $<-40^{\circ}\text{C}$ ），以防止氧化和污染。影响 ISO 标准实施的因素包括测试实验室资质（如 ISO/IEC 17025 认证）、检测方法标准化和国际协调性。技术进展包括 ISO 标准与 ASTM、GB/T 的互认，简化跨国认证流程；数字化认证平台通过在线数据提交和审核，提高效率。此外，ISO 标准逐步融入环保要求，如减少废气排放（ $\text{SO}_2<10\text{ ppm}$ ），指导生产商优化工艺。

8.2 钼棒的国内标准

中国作为全球最大的钼产品生产国，制定了一系列国内标准，涵盖钼棒的生产、测试和应用。这些标准包括国家标准（GB/T）和行业标准，确保满足国内市场需求并支持国际合作。

8.2.1 GB/T 标准（GB/T 3462 等）

GB/T 标准是中国钼棒生产和应用的核心规范，GB/T 3462-2017 是钼棒和钼条的主要标准，规定了高纯钼棒和掺杂钼棒的技术要求。标准要求钼含量 $\geq 99.95\%$ ，杂质控制在 $\text{Fe}<0.01\%$ 、 $\text{C}<0.005\%$ 、 $\text{O}<0.003\%$ ，以确保高温性能。力学性能测试包括拉伸强度（高纯钼棒 600 - 800 MPa，TZM 棒 900 - 1100 MPa）、屈服强度和延伸率（高纯钼棒 10 - 20%），需依据 GB/T 228.1-2021 在室温或高温（800 - 1200 $^{\circ}\text{C}$ ）下进行。表面状态分为黑棒（ $\text{Ra}<3.2\ \mu\text{m}$ ）、抛光棒（ $\text{Ra}<0.8\ \mu\text{m}$ ）和清洗棒，尺寸公差要求直径偏差 $\pm 0.05\text{ mm}$ ，长度偏差 $\pm 1\text{ mm}$ ，适应精密加工。

GB/T 标准还包括配套规范，如 GB/T 2039-2012（蠕变测试，1200 - 1800 $^{\circ}\text{C}$ ）、GB/T 13303-1991（抗氧化测试，600 - 1200 $^{\circ}\text{C}$ ）和 GB/T 7314-2017（压缩测试），为性能评估提供指导。生产商需通过化学分析（ICP-MS，精度 0.001%）、无损检测（超声，5 MHz）和显微结构观察（晶粒尺寸 10 - 50 μm ）验证合规性。GB/T 标准的优势在于适应中国工业体系，与 ASTM 标准高度兼容，便于出口。影响标准实施的因素包括设备精度（如液压试验机负荷分辨率 0.01 kN）、测试环境控制（如真空度 $<10^{-3}\text{ Pa}$ ）和企业质量管理水平。技术进展包括 GB/T 标准的修订，新增 Mo-La 和微型钼棒（直径 $<1\text{ mm}$ ）的规范；自动化检测系统（如激光测径仪，精度 0.01 mm）提高了执行效率。

8.2.2 行业标准与企业标准

行业标准由中国有色金属工业协会或技术委员会制定，针对特定应用场景提出细化要求。例如，YS/T 495-2005（有色金属行业标准）规定了钼棒在玻璃熔化炉中的抗腐蚀性能，要求在高温熔盐中氧化速率 $<0.2\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$ ；半导体行业标准可能要求表面粗糙度 $\text{Ra}<0.4\ \mu\text{m}$ 。这些标准补充 GB/T 标准，覆盖玻璃工业、航空航天等领域的技术细节。

企业标准由大型生产商制定，通常比国家标准更严格。例如，企业标准可能要求钼含量 $\geq 99.97\%$ ，尺寸公差 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，以满足高端客户需求。企业标准还包括内部质量控制流程，如原料筛选（杂质 $<0.005\%$ ）、烧结工艺优化（密度 $>99\%$ 理论密度）和表面处理规范（ $\text{Ra}<0.4\ \mu\text{m}$ ）。影响标准实施的因素包括市场需求、技术能力和客户要求。技术进展包括企业标准与国际标准的对接，简化出口认证；数字化质量管理体系通过实时数据采集（频率 1 kHz），提高标准执行效率。

版权与法律声明

8.3 钨棒的认证与合规性

认证与合规性是确保钨棒质量和安全性的关键环节，涉及材料认证流程和环境与安全合规性要求，确保产品满足国内外标准和法律法规。

8.3.1 材料认证流程

材料认证流程用于验证钨棒是否符合标准要求，确保其在航空航天、电子等领域的可靠性。认证由第三方机构（如 SGS、TÜV）或国家认证实验室（如中国国家有色金属质量监督检验中心）执行，涵盖化学成分、力学性能、表面质量和尺寸精度的检测。流程包括：生产商提交样品和生产记录（包括原料批次、工艺参数、质量控制数据）；认证机构进行化学分析（如 ICP-MS，检测 Fe、C、O，精度 0.001%）、力学测试（如拉伸，速率 0.5 - 5 mm/min）、无损检测（如超声，5 MHz）和尺寸测量（激光测径仪，精度 0.01 mm）；最后出具认证报告，证明符合 ASTM B387、GB/T 3462 或客户标准。

认证需确保样品代表性和测试可重复性。影响结果的因素包括样品制备质量（如抛光 $Ra < 0.8 \mu m$ ）、设备精度和机构资质。技术进展包括在线认证系统的开发，实时上传测试数据，缩短认证周期；区块链技术的应用，确保数据可追溯性和防篡改。

8.3.2 环境与安全合规性

环境与安全合规性要求钨棒生产符合环保法规和安全标准，减少对环境 and 人体的影响。环保合规性涉及生产过程中的废气、废水和固废处理。例如，焙烧过程中需控制 SO_2 排放（ $< 10 ppm$ ），废水需经中和处理（pH 6 - 9）后排放，符合《环境保护法》和 GB 25466-2010（有色金属工业污染物排放标准）。安全合规性要求生产设备配备防护装置（如高温炉防爆系统），操作人员需接受安全培训。

影响合规性的因素包括生产工艺、废物处理技术和监管力度。技术进展包括绿色生产技术的应用，如湿法提纯减少废气排放；智能监控系统通过传感器（频率 1 kHz）实时监测排放和安全参数。此外，ISO 14001 环境管理体系的实施帮助企业优化合规流程。

8.4 钨棒的标准对比与适用场景分析

国内外标准的对比分析有助于生产商选择适合的标准，满足不同应用场景的需求。ASTM B387 和 GB/T 3462 在化学成分（钨含量 $\geq 99.95\%$ ）、力学性能（抗拉强度 600 - 1100 MPa）和尺寸公差（ $\pm 0.05 mm$ ）要求上高度一致，但 ASTM B387 更注重国际化应用，涵盖更多掺杂钨棒（如 Mo-W），而 GB/T 3462 更适应中国工业体系，强调成本效益。ISO 标准（如 ISO 6892-1）侧重测试方法标准化，适用于跨国认证，但缺乏钨棒专用规范。

适用场景分析如下：

航空航天：ASTM B387 因其严格的高温性能要求（蠕变速率 $< 10^{-5}/h$ ， $1500^\circ C$ ）和尺寸精度（ $\pm 0.02 mm$ ）更适合，用于高温结构件和推进系统部件。

电子与半导体：ASTM B387 和 GB/T 3462 均适用，要求高纯度（ $\geq 99.97\%$ ）和表面光洁度（ $Ra < 0.4 \mu m$ ），ISO 6892-1 用于拉伸测试验证。

玻璃工业：GB/T 3462 更常见，因其抗腐蚀要求（氧化速率 $< 0.2 mg/cm^2 \cdot h$ ）适合熔化电极，

版权与免责声明

成本较低。

新兴领域（如 3D 打印）：ASTM B387 更适用，支持新型钼合金和微型棒材（直径<1 mm）。

影响标准选择的因素包括应用环境、客户要求和成本。技术进展包括标准互认机制的建立，减少重复认证；数字化标准数据库的开发，便于快速查询和对比。



中钨智造黑钼棒

第九章 钼棒的加工、使用与维护

钼棒因其高熔点、优异的力学性能和化学稳定性，广泛应用于航空航天、电子、玻璃工业等高要求领域。其加工、使用与维护涉及复杂的技术和工艺，直接影响其性能和寿命。本章详细探讨钼棒的加工技术、使用环境要求、安装与固定方法、维护与清洁流程以及安全操作规范。通过科学的加工工艺、合理的使用环境设计、规范的安装与维护以及严格的安全操作，可以最大限度地发挥钼棒的性能，延长使用寿命，并确保操作安全。这些内容为生产商和用户提供了全面的技术指导，助力钼棒在各种苛刻环境中的可靠应用。

9.1 钼棒的加工技术

钼棒的加工技术是确保其满足特定应用需求的关键，涉及切割、机加工以及焊接与连接等工艺。这些工艺需在高精度设备上进行，并严格控制加工条件，以避免材料损伤或性能劣化。

9.1.1 切割（线切割、激光切割）

切割是钼棒加工的首道工序，用于将棒材加工成所需长度或形状。电火花线切割（EDM）是常用的切割方法，利用高频电火花在钼棒表面产生局部高温熔化材料，通过金属丝（如铜丝或钼丝）精确切割。线切割适合加工复杂形状或小直径钼棒，能够实现高精度（公差±0.01

mm)且表面光滑($Ra < 1.6 \mu m$)。加工过程中需使用去离子水作为冷却介质,避免高温氧化,设备需配备高精度数控系统以控制切割路径。

激光切割是另一种高效方法,利用高能激光束(如YAG或CO₂激光)熔化或汽化钨棒表面,适合快速切割大型或厚壁钨棒。激光切割具有非接触性和高速度优势,但可能在切割区域产生热影响区(HAZ),需通过后续抛光处理消除。切割过程中需在惰性气体(如氮气或氩气)保护下进行,防止氧化。

影响切割质量的因素包括切割速度、工件表面状态和冷却条件。过快的切割速度可能导致裂纹或表面粗糙,表面氧化层需预先去除以提高精度。技术进展包括超快激光切割技术的应用,减少热影响区;自动化切割系统通过实时监控切割路径,提高加工一致性。

9.1.2 机加工(车削、铣削、钻孔)

机加工用于进一步精加工钨棒,满足复杂形状和尺寸要求,包括车削、铣削和钻孔。车削通过数控车床将钨棒加工成精确直径或特定几何形状,使用硬质合金刀具(如WC-Co)以应对钨的高硬度。加工需在低速、高进给条件下进行,配合冷却液(如水基乳化液)降低切削温度,避免刀具磨损和工件表面损伤。车削后表面粗糙度可达 $Ra < 0.8 \mu m$,适合电子和航空航天应用。

铣削用于加工钨棒的平面、槽或复杂轮廓,采用数控铣床和金刚石涂层刀具,确保高精度和表面质量。铣削过程中需控制振动,避免微裂纹产生。钻孔用于在钨棒上加工通孔或盲孔,常用于制造电极或连接件,需使用高速钢或硬质合金钻头,并配合高精度夹具确保孔位精度。影响机加工质量的因素包括刀具材料、切削参数和工件固定方式。钨的脆性要求低切削速度,刀具磨损需定期检查以维持加工精度。技术进展包括超精密加工技术的应用,如五轴数控机床提高复杂形状加工能力;干式切削技术的开发,通过惰性气体冷却减少环境污染。

9.1.3 焊接与连接技术

焊接与连接技术用于将钨棒与其他部件或钨棒连接,常见于高温炉和电子设备。电子束焊接(EBW)是主要方法,利用高能电子束在真空环境中熔化钨棒,形成高强度焊缝。真空环境($< 10^{-3} Pa$)防止氧化,焊缝质量高,适合航空航天部件。钨极惰性气体保护焊(TIG)也常用于钨棒焊接,使用氩气或氦气保护,适合非真空环境,但需控制焊接温度以避免晶粒长大。

连接技术还包括机械连接(如螺纹连接、铆接)和钎焊。机械连接要求钨棒表面加工螺纹或孔,需高精度加工以确保连接强度。钎焊使用高温钎料(如Ni基或Ag基合金),在真空或氢气气氛中进行,适合连接钨棒与异种材料(如陶瓷)。影响焊接与连接质量的因素包括气氛控制、焊接温度和接头设计。微量氧气可能导致焊缝氧化,需严格控制气氛露点($< -40^{\circ} C$)。

技术进展包括激光焊接技术的应用,精确控制热输入,减少热影响区;超声检测技术的引入,实时监测焊缝质量。此外,新型钎料的开发提高了钨棒与陶瓷的连接强度,满足高温复杂组件需求。

9.2 钼棒的使用环境要求

钼棒的使用环境对其性能和寿命有重要影响，需根据应用场景选择适当的气氛和防护措施，以确保其在高温或腐蚀环境下的稳定性。

9.2.1 真空与惰性气氛

钼棒在高温下易氧化，因此多在真空或惰性气氛（如氩气、氮气、氢气）中使用，以防止表面氧化和性能劣化。真空环境（ $<10^{-3}$ Pa）广泛用于高温炉、真空管和半导体设备，适合钼棒作为加热元件或电极。真空系统需配备高效泵组（如涡轮分子泵）以维持低压，防止微量氧气引发氧化。惰性气氛使用高纯气体（纯度 $\geq 99.999\%$ ），通过气流循环系统保持均匀气氛，防止局部氧化。

影响使用效果的因素包括气氛纯度、密封性和温度控制。微量水分（露点 $>-40^{\circ}\text{C}$ ）可能导致钼棒表面氧化，需使用干燥系统去除。技术进展包括超高真空系统（ $<10^{-6}$ Pa）的开发，提高了钼棒在极端环境下的稳定性；在线气氛监测技术通过光谱分析仪实时检测氧气和水分含量，优化环境控制。

9.2.2 高温氧化环境保护

在高温氧化环境（如空气或氧气气氛）中，钼棒易生成挥发性氧化物（ MoO_3 ），导致质量损失。因此，需施加抗氧化涂层（如 MoSi_2 、 SiC ）或使用保护气氛。 MoSi_2 涂层通过化学气相沉积（CVD）或等离子喷涂形成致密保护层，能在 $1200 - 1600^{\circ}\text{C}$ 下有效防止氧化。涂层需均匀、无裂纹，厚度控制在几十至几百微米以平衡保护效果和成本。

防护措施还包括设计气密性炉体，结合惰性气体冲洗，减少氧气接触。影响防护效果的因素包括涂层质量、运行温度和环境气氛。涂层缺陷可能引发局部氧化，需通过超声检测验证质量。技术进展包括纳米涂层技术的应用，提高了涂层致密性和附着力；动态氧化测试设备通过实时监测氧化速率，优化防护方案。

9.3 钼棒的安装与固定

钼棒的安装与固定直接影响其使用性能和寿命，需通过科学的工艺和设计确保稳定性，特别是在高温和复杂应力环境下。

9.3.1 安装工艺与夹具设计

钼棒的安装需确保其在高温环境下的几何稳定性和受力均匀，常见于高温炉和电极应用。安装工艺包括夹紧、悬挂和嵌套固定。夹紧使用耐高温夹具（如钼合金或陶瓷），通过螺栓或弹簧施加均匀压力，避免局部应力集中。悬挂固定通过钼丝或钼钩悬挂棒材，适合加热元件，需确保悬挂点强度。嵌套固定将钼棒嵌入耐火材料槽内，适用于玻璃熔化电极，需精确加工槽口以匹配棒材尺寸。

夹具设计需考虑高温强度和耐腐蚀性，材料如TZM合金或氧化铝陶瓷常用于夹具制造。夹具表面需抛光（ $R_a < 1.6 \mu\text{m}$ ）以减少与钼棒的摩擦损伤。影响安装效果的因素包括夹具材料、固定力和安装精度。固定力过大可能导致钼棒变形，需通过力学模拟优化设计。技术进展包括自动化安装设备的开发，通过机器人精确控制夹具位置；模块化夹具设计提高了安装效率。

版权与法律声明

和灵活性。

9.3.2 热膨胀匹配设计

钨棒的热膨胀系数（约 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）较低，与其他材料（如陶瓷、钢）在高温下可能产生热应力，因此需进行热膨胀匹配设计。设计包括选择热膨胀系数相近的连接材料（如 Mo-La 合金与氧化铝陶瓷），或通过柔性连接（如弹簧夹具）吸收热膨胀差。安装时需预留膨胀间隙（通常 0.1 - 0.5 mm），避免高温下挤压变形。

影响热膨胀匹配的因素包括材料选择、温度梯度和连接方式。温度梯度过大可能引发应力集中，需通过热场模拟优化设计。技术进展包括有限元分析（FEA）技术的应用，预测热应力分布；复合材料夹具的开发，平衡热膨胀和强度需求。

9.4 钨棒的维护与清洁

钨棒的维护与清洁是延长其使用寿命、保持性能的关键，涉及表面清洁和定期检查，确保其在苛刻环境下的可靠性。

9.4.1 表面清洁方法

表面清洁用于去除钨棒表面的氧化物、油污和污染物，恢复其性能。超声波清洗是常用方法，利用高频振动（20 - 40 kHz）在去离子水或中性清洗液中产生气泡，清除表面污染物。清洗液温度控制在 40 - 60 $^{\circ}\text{C}$ ，避免腐蚀钨棒。酸洗使用稀酸溶液（如 10%硝酸或 5%盐酸）去除氧化层，需在通风橱中进行，配备废液处理系统以符合环保要求。

机械抛光通过砂纸或抛光膏（粒度 1 - 5 μm ）去除顽固氧化物，适用于局部清洁。清洗后需用高纯氮气吹干，防止二次污染。影响清洁效果的因素包括清洗液成分、时间和表面状态。酸洗时间过长可能导致表面腐蚀，需精确控制。技术进展包括绿色清洗技术的应用，使用环保清洗剂（如柠檬酸）减少污染；自动化清洗设备通过传感器监控清洗液 pH 值（6 - 8），提高清洁效率。

9.4.2 定期检查与维护

定期检查与维护用于监测钨棒的性能和状态，防止失效。检查包括表面质量观察（用光学显微镜，放大倍数 50 - 100 倍）、尺寸测量（激光测径仪，精度 0.01 mm）和无损检测（如超声，5 MHz）以发现裂纹或内部缺陷。维护包括重新抛光表面（ $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ ）、更换抗氧化涂层或修复机械损伤。

维护频率根据使用环境确定，高温氧化环境需每月检查，真空环境可每季度检查。影响维护效果的因素包括检查频率、设备精度和操作规范。技术进展包括在线监测系统的开发，通过红外相机实时检测表面温度和氧化状态；智能维护平台通过数据分析预测维护周期，降低停机时间。

9.5 钨棒的安全操作规范

钨棒的安全操作规范确保加工和使用过程中的人身安全和设备保护，特别是在高温和化学处理环境中。

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司

钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆
半导体行业扩散管、晶圆载体
真空镀膜设备电极、靶材
核反应堆与航空发动机高温部件
玻璃工业电极棒与耐热夹具
医疗设备、X射线靶材
科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

9.5.1 高温操作注意事项

钨棒在高温操作（如高温炉、焊接）中需严格遵守安全规范。操作人员需佩戴耐高温防护服、手套和面罩，防止热辐射和飞溅物伤害。高温炉需配备自动断电系统，防止过热（ $>1800^{\circ}\text{C}$ ）引发事故。钨棒安装和拆卸需在冷却至室温后进行，避免热应力导致断裂。

影响高温操作安全的因素包括设备密封性、温度控制和操作培训。密封不良可能导致氧气泄漏引发氧化，需定期检查真空度（ $<10^{-3}\text{ Pa}$ ）。技术进展包括智能温控系统的应用，实时监控炉内温度（精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）；远程操作技术通过机器人完成高温作业，降低人员风险。

9.5.2 化学处理安全规范

化学处理（如酸洗、涂层制备）需遵守严格安全规范，以防止化学伤害。操作需在通风橱中进行，配备废气处理装置（如活性炭吸附）以吸收酸性气体。操作人员需佩戴防酸手套、护目镜和呼吸器，防止皮肤接触和吸入有害气体。酸洗液需储存在专用容器中，标明浓度（如10%硝酸）并定期检查泄漏。

影响化学处理安全的因素包括化学品储存、废液处理和操作规范。废液需中和（ $\text{pH } 6-9$ ）后排放，符合 GB 25466-2010 标准。技术进展包括自动化化学处理设备的开发，减少人工接触；实时监测系统通过传感器检测气体浓度（ $<1\text{ ppm}$ ），提高安全性。



中钨智造钨棒

第十章 钨棒的回收与可持续发展

钨棒作为一种高价值难熔金属材料，其生产和使用对资源和环境有重要影响。随着全球对可持续发展的重视，钨棒的回收和绿色生产成为行业发展的关键方向。本章详细探讨钨棒的回收工艺、环境影响与绿色生产改进，以及循环经济与可持续发展策略。通过高效的回收技术、环保工艺优化和循环经济模式的实施，可以显著降低资源消耗和环境污染，推动钨棒产业的可持续发展。

10.1 钨棒的回收工艺

钨棒的回收工艺旨在从废料中提取高纯度钨，重新用于生产，降低对原生矿产的依赖。回收工艺包括废料收集与分类以及回收提纯技术，需确保高效回收的同时维持钨的质量。

10.1.1 废料收集与分类

废料收集与分类是钨棒回收的首要步骤，涉及从生产和使用环节中回收废钨棒、加工切屑和报废部件。废料来源包括钨棒生产过程中的边角料（如切割、车削产生的碎屑）、使用失效的钨棒（如高温炉加热元件、玻璃熔化电极）以及报废的钨基部件（如航空航天结构件）。收集过程需建立完善的回收体系，确保废料从工厂、用户和回收站有效汇集。

分类根据废料的形态、成分和污染程度进行。固体钨棒（如废电极）通过外观检查和化学分析区分高纯钨和掺杂钨（如TZM、Mo-La）。粉末状废料（如切屑）需通过筛分和磁选去除金属杂质（如铁屑）。污染严重的废料（如表面氧化或沾染油污的部件）需预先清洗，去除氧化物或有机物。分类设备包括振动筛、磁选机和光学分选系统，确保废料按类型和纯度分组。影响废料收集与分类效果的因素包括回收体系的覆盖范围、废料污染程度和分类精度。污染严重的废料可能增加后续提纯成本，需优化预处理工艺。技术进展包括自动化分选技术的应用，通过机器视觉和人工智能识别废料类型，提高分类效率；区块链技术的引入，确保废料来源可追溯，优化供应链管理。

10.1.2 回收提纯技术

回收提纯技术用于将分类后的废钨棒转化为高纯钨粉或可重用的钨棒，涉及化学提纯和冶金处理。化学提纯主要通过湿法冶金工艺，将废料溶解在酸性或碱性溶液中（如氨水或硝酸），提取钨酸盐或氧化钨。溶液需经过过滤和沉淀，去除杂质（如铁、铜）。随后，通过结晶或焙烧工艺生成高纯氧化钨，再在氢气气氛下还原为钨粉（纯度 $\geq 99.95\%$ ）。设备包括反应釜、过滤器和管式还原炉，需严格控制气氛（露点 $< -40^{\circ}\text{C}$ ）以避免氧化。

冶金处理适用于固体钨棒，通过真空熔炼或电子束熔炼去除挥发性杂质（如碳、氧），生成高纯钨锭。真空熔炼炉需维持高真空度（ $< 10^{-3}\text{ Pa}$ ），确保熔炼过程无污染。提纯后的钨锭可通过粉末冶金或热加工重新制成钨棒。影响提纯效果的因素包括废料初始纯度、提纯工艺参数和设备密封性。污染严重的废料可能需要多级提纯，增加能耗。

技术进展包括绿色提纯技术的开发，如使用环保溶剂（柠檬酸）代替强酸，减少废液污染；离子交换技术的应用，提高了杂质去除效率。此外，自动化提纯系统通过实时监控溶液成分和气氛参数，优化提纯效率和钨回收率。

版权与免责声明

10.2 钨棒的环境影响与绿色生产

钨棒的生产过程涉及高能耗和潜在的环境污染，绿色生产技术的应用能够显著降低环境影响，符合可持续发展目标。

10.2.1 生产过程中的能耗与排放

钨棒生产包括原料提纯、粉末冶金、热加工和表面处理，每一环节均消耗大量能源并产生排放。原料提纯（如焙烧和还原）需在高温（600 - 1000° C）下进行，耗电量大，焙烧过程可能释放硫氧化物（如 SO₂）。粉末冶金中的烧结过程使用真空炉或氢气炉，需维持高温（1500 - 1800° C）和高纯气氛，增加能耗。热加工（如锻造、轧制）需反复加热，消耗大量电能。表面处理（如酸洗）产生酸性废液和废气，需妥善处理以符合环保法规（如 GB 25466-2010）。

排放主要包括废气（如 SO₂、NO_x）、废水（含酸或重金属）和固废（如炉渣）。废气需通过湿法洗涤或活性炭吸附处理，废水需中和（pH 6 - 9）后排放，固废需分类回收或安全填埋。影响环境影响的因素包括生产规模、设备效率和废物处理能力。技术进展包括能耗监测系统的应用，通过传感器实时记录电耗和排放数据；余热回收技术的开发，将高温炉废热用于预热原料，降低能耗。

10.2.2 环保工艺改进

环保工艺改进旨在减少钨棒生产中的能耗和排放，提高资源利用率。改进措施包括优化焙烧工艺，采用流化床焙烧炉代替传统回转炉，通过循环气流提高热效率，减少 SO₂ 排放。还原工艺使用绿色还原剂（如生物质衍生的氢气）替代传统化石燃料，降低碳足迹。烧结过程采用中频感应加热炉，精确控制温度（±1° C），缩短加热时间，降低能耗。

废物处理方面，废水循环系统通过离子交换和反渗透技术回收酸液和水，减少排放。废气处理采用高效催化剂（如 SCR 技术）将 NO_x 转化为无害气体。固废通过高温熔炼回收残余钨，减少填埋量。影响改进效果的因素包括设备投资、工艺稳定性和技术成熟度。技术进展包括智能控制系统的应用，通过 AI 优化工艺参数，降低能耗；绿色认证体系（如 ISO 14001）的实施，指导企业实现环保生产。

10.3 钨棒的循环经济与可持续发展策略

循环经济与可持续发展策略通过资源循环利用和产业协同，推动钨棒行业的绿色发展，减少对原生资源的依赖。

循环经济模式强调钨棒的全生命周期管理，从生产到回收再利用。废钨棒通过回收提纯重新进入生产链，制成新钨棒或钨基产品，减少对辉钨矿的开采。循环模式包括建立废料回收网络，与用户和回收站合作，确保废料高效收集；优化提纯工艺，提高回收率（目标>95%）；开发再制造技术，将回收钨加工成高附加值产品，如溅射靶材或 3D 打印粉末。

可持续发展策略包括资源节约、环境友好和社会责任。资源节约通过高效生产工艺（如等温锻造）减少原材料浪费；环境友好通过绿色技术和废物循环降低排放；社会责任包括提高员工环保意识和支持社区可持续发展项目。影响循环经济实施的因素包括回收体系完善程度、技术成本 and 市场需求。技术进展包括数字孪生技术的应用，通过虚拟模型优化回收和生产流

版权与法律责任声明

程：区块链技术确保回收链透明性。此外，政策支持（如中国《循环经济促进法》）为钨棒行业提供了激励措施，推动可持续发展。



中钨智造钨棒

第十一章 钨棒的最新技术与未来趋势

钨棒作为高性能难熔金属材料，在航空航天、电子、新能源等领域的应用不断扩展，其技术研发和产业升级正推动行业向更高效、绿色和智能化的方向发展。本章详细探讨钨基合金的研发进展、纳米结构钨棒的开发、智能化生产与检测技术、钨棒在新能源领域的潜力，以及未来的研究方向与挑战。这些内容反映了钨棒技术的最新前沿，旨在为生产商、研究人员和用户提供技术洞察，助力行业在全球竞争中保持领先地位，同时应对可持续发展和技术创新的挑战。

11.1 钨基合金的研发进展

钨基合金通过优化成分和微观结构，显著提高了钨棒的高温性能、抗蠕变性和耐腐蚀性，满足航空航天、核工业等苛刻应用需求。研发重点集中在 TZM 和 Mo-La 合金的优化以及新型掺杂技术。

11.1.1 TZM 与 Mo-La 合金的优化

TZM（钛钨钼）合金通过添加少量钛、钼和碳元素，显著提高了钨的强度、抗蠕变性和高温稳定性，广泛用于高温炉、航空航天结构件等领域。最新研发通过精确控制掺杂元素比例和热处理工艺，进一步优化 TZM 合金的性能。例如，采用等温锻造和控制冷却技术，细化晶粒尺寸，增强抗热疲劳性能。热处理过程中通过精确调控气氛和温度梯度，减少晶界氧化，提高合金在高温下的长期稳定性。

Mo-La（钨镧）合金通过掺杂氧化镧（ La_2O_3 ），提高了抗蠕变性和抗氧化性，特别适合玻璃熔

版权与法律声明

化电极和高温加热元件。研发进展包括优化氧化钨颗粒的分布和尺寸，通过液相掺杂和高温烧结技术，使氧化物颗粒均匀分散在钨基体中，增强界面结合强度。Mo-La 合金的抗氧化涂层技术也在改进，如通过化学气相沉积（CVD）施加 MoSi₂ 涂层，提升其在氧化环境下的耐久性。

影响 TZM 和 Mo-La 合金优化的因素包括掺杂均匀性、热处理工艺和生产成本。掺杂不均可能导致性能不稳定，需通过高精度混料设备解决。技术进展包括同步辐射技术的应用，实时分析掺杂元素分布；新型热处理炉通过感应加热提高温度均匀性，优化合金性能。

11.1.2 新型掺杂技术

新型掺杂技术通过引入稀土元素（如铈、钇）或其他金属元素（如钨、铼），进一步提升钨棒的综合性能。稀土掺杂通过形成纳米级氧化物颗粒，增强钨的抗蠕变性和高温强度，适合核反应堆和高温超导应用。例如，Mo-Ce 合金通过添加氧化铈，显著提高了抗辐射性能。钨或铼掺杂则通过固溶强化提高钨棒的硬度和耐腐蚀性，适用于航空航天推进系统部件。掺杂过程需通过粉末冶金或熔炼技术实现，液相掺杂和等离子体掺杂成为新兴方法，能够实现纳米级均匀分布。影响掺杂效果的因素包括掺杂剂选择、颗粒尺寸和工艺控制。技术进展包括纳米掺杂技术的开发，通过球磨或气相沉积制备超细掺杂颗粒；原位分析技术（如 X 射线衍射）实时监测掺杂过程，提高一致性。此外，绿色掺杂剂（如生物基还原剂）的应用减少了环境污染。

11.2 纳米结构钨棒的开发

纳米结构钨棒通过控制微观结构到纳米级（晶粒尺寸 < 100 nm），显著提高强度、韧性和耐腐蚀性，适用于微电子、3D 打印等前沿领域。开发过程包括纳米粉末制备、烧结和成型技术。纳米钨粉通过高能球磨或气相沉积制备，颗粒尺寸精确控制以确保均匀性。烧结采用火花等离子烧结（SPS）技术，通过短时间高温高压（1500 - 1800° C，50 - 100 MPa）实现高密度成型，同时保留纳米结构。

纳米结构钨棒的挑战在于保持纳米晶粒的稳定性，高温下晶粒易长大，需通过掺杂或涂层抑制。氧化钨或氧化钇掺杂能够钉扎晶界，防止晶粒长大；SiC 或 Al₂O₃ 涂层则提高表面耐腐蚀性。影响开发效果的因素包括粉末质量、烧结参数和成本控制。技术进展包括超快激光烧结技术的应用，精确控制加热速率，减少晶粒长大；同步辐射显微镜用于分析纳米结构演变。此外，纳米结构钨棒的 3D 打印技术通过激光熔融沉积，实现了复杂形状的直接成型。

11.3 智能化生产与检测技术

智能化生产与检测技术通过自动化、数据分析和人工智能，显著提高了钨棒生产的效率、质量和可追溯性，适应工业 4.0 的发展趋势。

11.3.1 在线监测与大数据分析

在线监测系统通过传感器实时采集生产过程中的关键参数，如温度、压力、尺寸和气氛成分，用于优化工艺和质量控制。例如，烧结炉中的红外测温仪（精度 ± 1° C）实时监控温度分布，激光测径仪（精度 ± 0.01 mm）检测钨棒尺寸，红外光谱仪分析气氛中的氧气和水分含量（露点 < -40° C）。大数据分析通过收集海量生产数据，识别工艺异常，优化参数设置。例如，通

通过分析烧结温度与密度的关系，可缩短烧结时间，降低能耗。

影响在线监测效果的因素包括传感器精度、数据采集频率和系统集成性。技术进展包括物联网（IoT）技术的应用，实现设备互联和数据共享；云平台通过大数据算法预测设备故障，减少停机时间。此外，数字孪生技术通过虚拟模型模拟生产过程，优化工艺参数。

11.3.2 人工智能在钼棒生产中的应用

人工智能（AI）在钼棒生产中用于工艺优化、质量预测和故障诊断。机器学习算法通过分析历史数据，优化粉末冶金和热加工参数。例如，神经网络模型可预测烧结过程中钼棒的密度和晶粒尺寸，指导温度和压力设置。AI 还用于图像识别，通过分析显微镜图像（放大倍数 50 - 100 倍）检测微观缺陷，如气孔或夹杂物。故障诊断系统通过 AI 分析传感器数据，预测设备磨损或故障，提前安排维护。

影响 AI 应用效果的因素包括数据质量、算法准确性和计算能力。技术进展包括生成对抗网络（GAN）的应用，模拟钼棒微观结构演变；边缘计算技术的引入，在生产现场实时处理数据，降低延迟。此外，AI 与区块链结合，确保生产数据的安全性和可追溯性。

11.4 钼棒在新能源领域的潜力

钼棒在新能源领域的应用潜力不断显现，特别是在氢能、储能和高温超导领域，凭借其高温性能和化学稳定性，展现出独特优势。

11.4.1 氢能与储能应用

钼棒在氢能领域用于电解水制氢设备的电极和高温部件，因其优异的导电性和耐腐蚀性。Mo-La 合金棒作为电极材料，能够在高温碱性电解液中稳定运行，延长电极寿命。储能领域中，钼棒用于高温液态金属电池的电极或集流体，承受高温（ $>600^{\circ}\text{C}$ ）和腐蚀环境。生产需通过精密加工和表面涂层（如 MoSi_2 ）提高耐腐蚀性。

影响应用效果的因素包括电极表面状态、电解液成分和运行温度。技术进展包括纳米涂层技术的应用，提高电极的催化效率；增材制造技术的开发，制备复杂形状的钼基电极。此外，钼棒在固态电池中的应用研究，通过掺杂提高导电性，展现出潜力。

11.4.2 高温超导材料支持

钼棒在高温超导领域用于支撑结构或电极，应用于超导磁体和电力传输设备。TZM 或 Mo-W 合金棒因其高强度和低热膨胀系数，能够在液氮或液氦环境中（ -196°C 至 -269°C ）保持稳定。生产需通过超精密加工确保尺寸精度（ $\pm 0.01\text{ mm}$ ），表面抛光（ $\text{Ra} < 0.4\ \mu\text{m}$ ）以减少电阻。运行环境需严格控制氧气和水分，防止超导材料污染。

影响应用效果的因素包括材料纯度、加工精度和低温性能。技术进展包括 Mo-Re 合金的开发，提高低温韧性；原位测试技术通过低温拉伸试验评估钼棒性能。此外，钼棒在核聚变反应堆中的应用研究，如托卡马克装置的支撑部件，展现出长期潜力。

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司
钨棒产品介绍

一、钨棒概述

钨棒是一种以高纯度钨粉为原料，经压制、烧结、锻造、拉拔等工艺加工而成的高性能金属材料。具有优异的高温性能、热传导性和化学稳定性，广泛应用于冶金、电子、玻璃、航天、核能等高端技术领域，是现代工业高温环境中的关键功能材料之一。

二、钨棒主要应用领域

高温电炉加热元件、支撑杆

半导体行业扩散管、晶圆载体

真空镀膜设备电极、靶材

核反应堆与航空发动机高温部件

玻璃工业电极棒与耐热夹具

医疗设备、X射线靶材

科研高温实验材料与部件

三、钨棒的分类（按纯度）

类别	描述	典型用途
高纯钨棒	纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质含量极低	电子、半导体、科研设备
工业级钨棒	纯度约 99.90%，经济性强	电热、玻璃、冶金设备
掺杂钨棒	掺杂 La、Ti、Zr 等，改善性能	高温结构件、TZM 合金应用

三、中钨智造典型钨棒规格参数表

项目	数值范围	说明
密度	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$	理论密度约为 10.28 g/cm^3
硬度/HV30	160 - 250 HV	视表面处理及冷加工程度
抗拉强度 R_m/MPa	$\geq 590 \text{ MPa}$	常温下测试
屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	$\geq 490 \text{ MPa}$	视材料状态及工艺而变化
断后伸长率 A/%	10 - 25%	退火态更高，冷加工态更低
直径范围	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$	可定制
长度范围	10 mm - 2000 mm	可定制

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨棒资讯，请访问中钨在线网站 (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

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

11.5 钼棒的未来研究方向与挑战

钼棒的未来研究方向包括以下几个方面：

高性能合金开发：研发新型钼基合金（如 Mo-Re、Mo-Nb），提高抗辐射性和高温强度，满足核工业和航空航天需求。

纳米技术应用：开发稳定纳米结构钼棒，探索其在微电子和生物学中的应用，如纳米电极或植入式传感器。

绿色生产技术：推广低能耗提纯和回收技术，减少废气废水排放，符合碳中和目标。

智能化制造：深化 AI 和数字孪生技术在生产中的应用，实现全流程自动化和优化。

新能源拓展：探索钼棒在核聚变、钙钛矿太阳能电池和高性能储能中的新应用。

主要挑战包括：

成本控制：新型掺杂和纳米技术成本较高，需优化工艺降低生产费用。

环境压力：严格的环保法规要求改进废物处理和能耗管理，增加技术投入。

技术稳定性：纳米结构和智能化技术的长期稳定性需进一步验证。

市场竞争：钼棒需与钨、铌等替代材料竞争，需提升性能价格比。

技术进展包括跨学科合作，通过材料科学、人工智能和新能源技术的融合，加速创新；国际合作项目的增加，促进技术共享和标准统一。



中钨智造钼棒

附录

A. 术语表

钼棒：由高纯钼或钼合金制成的棒状材料，常用于高温或高性能应用。

TZM 钼合金：钛-锆-钼合金，具有优异的高温强度和抗蠕变性能。

Mo-La 合金：钼-镧合金，改善高温抗氧化性和延展性。

粉末冶金：通过压制和烧结金属粉末制备材料的工艺。

烧结：将金属粉末加热至低于熔点的温度以形成固体材料的工艺。

热加工：在高温下对金属进行塑性变形的加工工艺。

无损检测：不破坏材料结构的情况下检测内部缺陷的方法，如超声检测、X 射线检测。

抗氧化涂层：用于保护钼棒在高温氧化环境下的表面涂层。

蠕变：材料在高温和持续应力下缓慢变形的现象。

溅射靶材：用于物理气相沉积（PVD）制备薄膜的材料。

B. 参考资料

- [1] 中钨在线. 钼棒生产与标准规范.
- [2] GB/T 3462-2017. 钼棒和钼条国家标准.
- [3] 材料科学与工程杂志. 钼棒回收与环保生产研究.
- [4] YS/T 495-2005. 钼及钼合金化学分析方法.
- [5] GB 25466-2010. 有色金属工业污染物排放标准.
- [6] GB/T 4188-2015. TZM 钼合金棒材标准.
- [7] 材料科学与工程杂志. 钼基合金棒材的性能与制备研究.
- [8] 钼工业发展报告. 中国有色金属工业协会.
- [8] 材料科学与工程杂志. 钼基合金的微观结构与性能研究.
- [9] Nature Materials. High-Performance Molybdenum Alloys for Energy Applications.
- [10] Advanced Materials. AI in Materials Manufacturing.
- [11] Renewable Energy. Molybdenum in Hydrogen and Energy Storage.
- [12] International Molybdenum Association (IMOA). Molybdenum Recycling and Sustainability.
- [13] ASTM B387-18. Standard Specification for Molybdenum and Molybdenum Alloy Bar, Rod, and Wire.
- [14] ISO 6892-1:2019. Metallic Materials - Tensile Testing.
- [15] ASTM E8/E8M-21. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [16] ASTM E9-19. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials.
- [17] ASTM E290-14. Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.
- [18] International Molybdenum Association (IMOA). Molybdenum Testing and Analysis.
- [19] International Molybdenum Association (IMOA). Global Molybdenum Market Overview.

版权与法律责任声明