

什么是钨合金光栅

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、高比合金、钨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。



版权与免责声明

目录

第一章 钨合金光栅的概述

- 1.1 钨合金光栅的定义
 - 1.1.1 钨合金光栅基于化学组成的定义
 - 1.1.2 钨合金光栅基于功能与应用的定义
- 1.2 钨合金光栅的主要分类体系
 - 1.2.1 按钨质量分数划分的钨合金光栅
 - 1.2.2 按晶体结构类型划分的钨合金光栅
 - 1.2.3 按光栅周期尺度划分的钨合金光栅
 - 1.2.4 按形状划分的钨合金光栅
 - 1.2.5 按加工工艺路线划分的钨合金光栅
 - 1.2.6 按用途划分的钨合金光栅
- 1.3 钨合金光栅的发展史
 - 1.3.1 早期金属光栅向高密度钨基材料的过渡（20世纪70—90年代）
 - 1.3.1.1 纯钨与钨-铼合金在X射线单色器中的初步应用
 - 1.3.1.2 同步辐射光源对高Z材料吸收光栅的需求驱动
 - 1.3.2 钨合金光栅的诞生与粉末冶金技术突破（1990—2010年）
 - 1.3.2.1 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu系高密度钨合金的引入与抗散射栅格应用
 - 1.3.2.2 微米级周期钨合金吸收光栅的首次实现与性能验证
 - 1.3.3 高精度钨合金相衬成像光栅的快速发展（2010—2020年）
 - 1.3.3.1 Talbot-Lau干涉仪用钨合金光栅的结构优化与刻划工艺进步
 - 1.3.3.2 硬X射线波段钨合金光栅的突破与国际同步辐射装置应用
 - 1.3.4 增材制造与纳米加工时代的新进展（2020年至今）
 - 1.3.4.1 激光选区熔化与电子束熔化制备钨合金光栅的探索
 - 1.3.4.2 超高分辨率钨合金光栅在中子与极硬X射线领域的扩展
 - 1.3.5 钨合金光栅标准化与产业化进程

第二章 钨合金光栅的化学组成设计与相平衡

- 2.1 钨合金光栅的核心合金体系
- 2.2 钨合金光栅中常见添加元素的固溶行为
 - 2.2.1 Re、Ta、Mo在钨合金光栅中的固溶极限
 - 2.2.2 Ni、Fe、Co等过渡族元素的作用机理
- 2.3 钨合金光栅的多元相图与稳定相
 - 2.3.1 W-Re系钨合金光栅的相平衡
 - 2.3.2 W-Ta-Hf系钨合金光栅的高温相稳定性
- 2.4 钨合金光栅中第二相的析出与控制
- 2.5 钨合金光栅成分设计的热力学计算方法

第三章 钨合金光栅的晶体学特征、微观结构与表征技术

- 3.1 钨合金光栅的体心立方结构特性
- 3.2 钨合金光栅中常见的晶体缺陷

版权与免责声明

- 3.2.1 位错密度与分布特征
- 3.2.2 小角度晶界与大角度晶界
- 3.2.3 点缺陷与间隙原子
- 3.3 钨合金光栅的择优取向与织构类型
 - 3.3.1 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构在钨合金光栅中的形成
 - 3.3.2 加工变形对织构演化的影响
- 3.4 钨合金光栅晶粒尺寸的定量表征
- 3.5 钨合金光栅的化学成分分析方法
- 3.6 钨合金光栅的相结构与晶体学表征
 - 3.6.1 X 射线衍射与中子衍射技术
 - 3.6.2 电子背散射衍射分析
- 3.7 钨合金光栅的显微组织观察
 - 3.7.1 扫描电镜与透射电镜对比
 - 3.7.2 聚焦离子束制样与三维重构
- 3.8 钨合金光栅的光栅衍射性能测试
 - 3.8.1 同步辐射硬 X 射线下的衍射效率测量
 - 3.8.2 中子光栅的衍射分辨率表征

第四章 钨合金光栅的特性

- 4.1 钨合金光栅的物理特性
 - 4.1.1 钨合金光栅的密度与热膨胀系数
 - 4.1.2 钨合金光栅的热导率与比热容
- 4.2 钨合金光栅的力学特性
 - 4.2.1 钨合金光栅的室温与高温强度
 - 4.2.2 钨合金光栅的断裂韧性与脆性-韧性转变温度
 - 4.2.3 钨合金光栅的高温蠕变与持久性能
 - 4.2.3.1 钨合金光栅的蠕变机制与应力指数分析
 - 4.2.3.2 钨合金光栅的粘结剂对蠕变抗力的影响
 - 4.2.4 钨合金光栅的热疲劳与热冲击行为
- 4.3 钨合金光栅的化学稳定性与环境适应性
 - 4.3.1 钨合金光栅在氧气中的氧化动力学
 - 4.3.2 氧化产物相组成与氧化膜结构
 - 4.3.3 抗氧化涂层体系
 - 4.3.3.1 硅化物涂层在钨合金光栅上的应用
 - 4.3.3.2 铝化物与铬化物复合涂层
 - 4.3.4 在真空与惰性气氛中的长期稳定性
 - 4.3.5 耐腐蚀行为与化学惰性分析
- 4.4 钨合金光栅的射线屏蔽性能
 - 4.4.1 钨合金光栅对 X 射线与 γ 射线的衰减机制
 - 4.4.1.1 光电效应、康普顿散射与电子对产生的贡献
 - 4.4.1.2 质量衰减系数与能量依赖性分析
 - 4.4.2 钨合金光栅的线衰减系数与半值层厚度

版权与免责声明

- 4.4.2.1 不同钨含量合金的线衰减系数比较
- 4.4.2.2 硬 X 射线与超硬 X 射线下的屏蔽效率
- 4.4.3 钨合金光栅对散射辐射的抑制能力
 - 4.4.3.1 在 CT 抗散射栅格中的一次/二次辐射对比
 - 4.4.3.2 相衬成像系统中散射背景降低的定量评估
- 4.4.4 钨合金光栅对中子辐射的屏蔽与慢化特性
 - 4.4.4.1 热中子与快中子俘获截面
 - 4.4.4.2 硼或镉复合钨合金光栅的中子吸收增强策略
- 4.4.5 影响钨合金光栅射线屏蔽性能的关键因素
 - 4.4.5.1 密度对钨合金光栅屏蔽效率的影响
 - 4.4.5.2 厚度对钨合金光栅屏蔽效率的影响
 - 4.4.5.3 周期结构对钨合金光栅屏蔽效率的影响
 - 4.4.5.4 粘结剂添加对钨合金光栅屏蔽性能的调制作用
 - 4.4.5.5 微观孔隙、表面粗糙度与界面缺陷的负面效应
- 4.5 中钨智造钨合金光栅 MSDS

第五章 钨合金光栅的生产方法

- 5.1 钨合金光栅的粉末冶金制备工艺
 - 5.1.1 钨合金光栅用粉末的制备与特性
 - 5.1.2 钨合金光栅的混粉、造粒与成型技术
 - 5.1.3 钨合金光栅的高温烧结制度与致密化机理
 - 5.1.3.1 固相烧结阶段的扩散与收缩行为
 - 5.1.3.2 液相烧结在钨合金光栅中的应用与控制
 - 5.1.4 钨合金光栅的后续热机械加工与精整
 - 5.1.5 钨合金光栅粉末冶金工艺的优劣势分析
 - 5.1.6 钨合金光栅粉末冶金工艺对原料的要求
 - 5.1.7 钨合金光栅粉末冶金工艺的注意事项
- 5.2 钨合金光栅的增材制造技术
 - 5.2.1 钨合金光栅的激光粉末床熔融工艺
 - 5.2.2 钨合金光栅的电子束熔化技术
 - 5.2.3 钨合金光栅的粘结剂喷射与后续脱脂烧结工艺
 - 5.2.4 增材制造钨合金光栅的表面粗糙度与后处理方法
 - 5.2.5 钨合金光栅增材制造技术的优劣势分析
 - 5.2.6 钨合金光栅增材制造技术对原料的要求
 - 5.2.7 钨合金光栅增材制造技术的注意事项
- 5.3 钨合金光栅生产方法的比较与选择原则

第六章 钨合金光栅的微纳结构加工与光栅刻划

- 6.1 钨合金光栅基底的精密磨抛与平坦化
 - 6.1.1 机械研磨与化学机械抛光的工艺流程
 - 6.1.2 表面粗糙度 Ra 值与平坦度控制目标
- 6.2 钨合金光栅的机械刻划技术

版权与免责声明

- 6.2.1 金刚石刀具刻划原理与刀尖几何设计
- 6.2.2 刻划参数（进给量、切深、速度）对沟槽形貌的影响
- 6.2.3 机械刻划在钨合金光栅上的适用周期范围
- 6.2.4 刻划过程中的振动控制、热效应与刀具磨损管理
- 6.2.5 机械刻划钨合金光栅的典型沟槽剖面特征
- 6.3 钨合金光栅的离子束刻蚀与聚焦离子束加工
 - 6.3.1 宽束离子束刻蚀的物理溅射机制
 - 6.3.1.1 离子能量、角度与刻蚀速率的关系
 - 6.3.1.2 侧壁陡直度与刻蚀选择比优化
 - 6.3.2 聚焦离子束 在钨合金光栅原型制作中的应用
 - 6.3.2.1 FIB 铣削与沉积相结合的复杂结构加工
 - 6.3.2.2 纳米级周期光栅的 FIB 直写工艺参数
 - 6.3.3 离子束加工钨合金的再沉积与表面损伤控制策略
 - 6.3.4 离子束刻蚀后表面清洁与损伤层修复方法
- 6.4 钨合金光栅的干法刻蚀与反应离子刻蚀
 - 6.4.1 反应离子刻蚀在钨合金光栅中的化学-物理协同机制
 - 6.4.1.1 常用气体体系与钨的挥发性产物
 - 6.4.1.2 刻蚀速率、选择比与各向异性控制
 - 6.4.2 深反应离子刻蚀用于高深宽比钨合金光栅
 - 6.4.3 感应耦合等离子体刻蚀的功率与偏压优化
 - 6.4.4 干法刻蚀钨合金光栅的掩膜材料选择与剥离工艺
 - 6.4.5 刻蚀后侧壁粗糙度与沟槽均匀性表征
- 6.5 钨合金光栅表面镀膜与界面改性
 - 6.5.1 保护涂层对钨合金光栅抗氧化性能的影响
 - 6.5.2 镀膜工艺选择：物理气相沉积与化学气相沉积对比

第七章 钨合金光栅的应用

- 7.1 钨合金光栅在医疗领域的应用
 - 7.1.1 钨合金光栅在 X 射线相衬成像系统中的核心作用
 - 7.1.1.1 Talbot-Lau 干涉仪中 G0 源光栅、G1 相位光栅与 G2 吸收光栅的钨合金实现
 - 7.1.1.2 高能 X 射线下相衬、暗场与吸收三模态成像的钨合金光栅配置
 - 7.1.1.3 低剂量、高对比度软组织成像（乳腺、肺部、关节软骨等）中的优势
 - 7.1.2 钨合金光栅在 CT 抗散射栅格中的应用
 - 7.1.2.1 高密度 2D 钨合金栅格对锥形束 CT 散射 X 射线的抑制
 - 7.1.2.2 信噪比提升、图像对比度改善与伪影减少的定量表现
 - 7.1.2.3 与传统铅栅格或 1D 钨栅格相比的剂量降低与成像质量优势
 - 7.1.3 钨合金光栅在介入放射学与血管造影中的应用
 - 7.1.3.1 数字减影血管造影系统中高分辨率吸收光栅的钨合金设计
 - 7.1.3.2 实时减影成像中散射背景抑制与血管结构清晰度提升
 - 7.1.3.3 高通量、高能量 X 射线钨合金光栅的辐射耐受性要求
 - 7.1.4 钨合金光栅在质子/重离子治疗中的图像引导应用
 - 7.1.4.1 机架式 CBCT 与锥形束质子 CT 中的钨合金抗散射栅格

版权与免责声明

- 7.1.4.2 治疗前定位与剂量验证成像中的散射抑制与剂量精度提高
- 7.1.4.3 增材制造高精度 2D 钨合金栅格在质子治疗中的临床验证
- 7.1.5 钨合金光栅在其他医疗辐射防护与成像设备中的应用
 - 7.1.5.1 牙科 CBCT、乳腺断层合成与骨密度仪中的抗散射栅格
 - 7.1.5.2 钨合金多叶准直器在调强放疗中的射野适形
 - 7.1.5.3 钨合金光栅/准直组件在 SPECT、PET-CT 融合成像中的辐射准直与屏蔽
- 7.2 钨合金光栅在同步辐射与自由电子激光领域的应用
 - 7.2.1 钨合金光栅作为硬 X 射线分束器与单色器的作用
 - 7.2.1.1 反射式与透射式钨合金光栅在 高能波段的衍射效率与通量优化
 - 7.2.1.2 高阶谐波抑制与能量分辨率提升的钨合金光栅设计
 - 7.2.2 钨合金光栅在瞬态光栅光谱学与时间分辨实验中的应用
 - 7.2.2.1 表面声波、热扩散与载流子动力学的探测
 - 7.2.3 钨合金光栅在极紫外与软 X 射线自由电子激光光束线中的准直与聚焦功能
 - 7.2.4 高辐射通量环境下钨合金光栅的热负荷管理与长期稳定性
- 7.3 钨合金光栅在中子科学领域的应用
 - 7.3.1 钨合金光栅在中子吸收与准直系统中的核心作用
 - 7.3.1.1 热中子与冷中子波段的高密度吸收光栅设计
 - 7.3.1.2 硼/钷/镱复合钨合金光栅的中子俘获与慢化增强策略
 - 7.3.2 钨合金光栅在中子相衬成像与中子干涉仪中的应用
 - 7.3.2.1 Talbot-Lau 型中子干涉仪吸收光栅的钨合金实现
 - 7.3.2.2 材料内部应力、磁结构与氢分布的无损成像
 - 7.3.3 钨合金光栅在小角中子散射与中子反射率实验中的遮蔽与准直
 - 7.3.4 脉冲中子源与稳态反应堆中钨合金光栅的辐射损伤耐受性
- 7.4 钨合金光栅在工业无损检测与高能成像领域的应用
 - 7.4.1 钨合金光栅在工业 CT 与高能 X 射线无损检测中的抗散射栅格应用
 - 7.4.1.1 大型铸件、复合材料与增材制造部件的高分辨率成像
 - 7.4.1.2 散射抑制对缺陷检测灵敏度与伪影消除的提升
 - 7.4.2 钨合金光栅在航空航天部件检测与核燃料组件检验中的应用
 - 7.4.2.1 涡轮叶片、焊接接头与压力容器的高密度屏蔽与准直
 - 7.4.3 钨合金光栅在便携式/车载高能 X 射线系统的吸收与准直组件
 - 7.4.4 工业现场高辐射环境下钨合金光栅的耐久性与维护要求
- 7.5 钨合金光栅在辐射防护与高辐射环境领域的应用
 - 7.5.1 钨合金光栅在核电维护与辐射屏蔽组件中的应用
 - 7.5.1.1 反应堆容器内窥镜、管道检测与废物处理中的准直光栅
 - 7.5.1.2 高 γ 射线通量下的多层钨合金吸收与准直结构
 - 7.5.2 钨合金光栅在粒子加速器与核物理实验中的准直与屏蔽
 - 7.5.2.1 束流线与靶站的高精度钨合金准直器
 - 7.5.3 钨合金光栅在空间辐射环境模拟与航空航天辐射防护中的应用
 - 7.5.4 钨合金光栅在高辐射实验室与应急响应设备中的便携式屏蔽组件

第八章 钨合金光栅的使用注意事项与常见问题

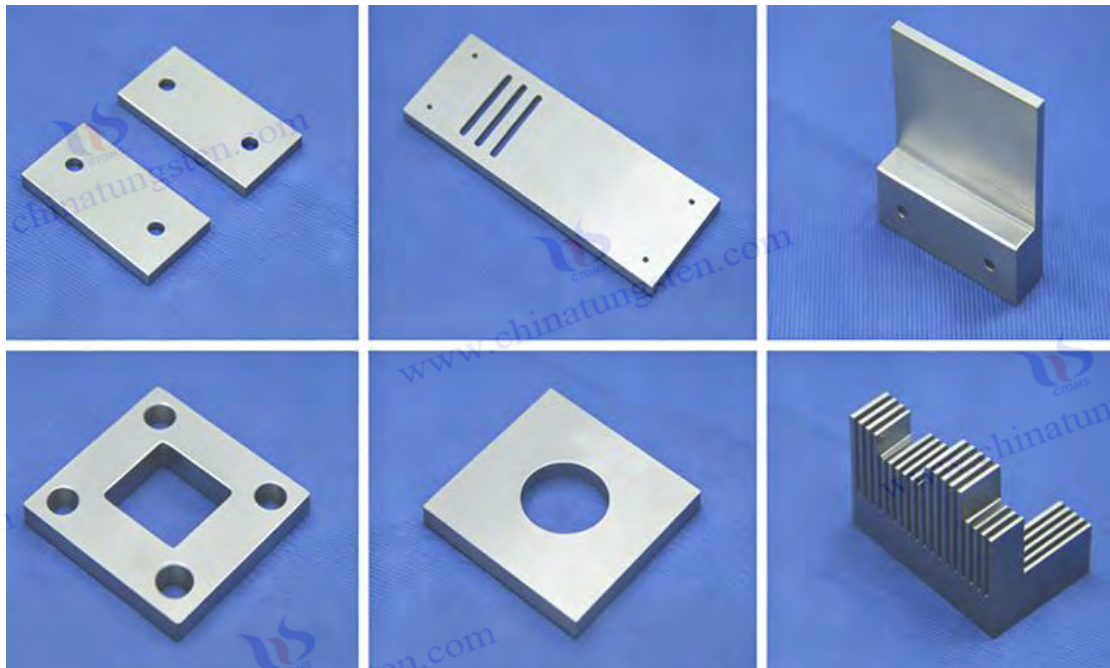
8.1 钨合金光栅的安装与机械固定注意事项

版权与法律声明

- 8.1.1 钨合金光栅的热膨胀匹配与固定应力控制
- 8.1.2 钨合金光栅周期对准与角度校准要求
- 8.2 钨合金光栅的操作环境要求
 - 8.2.1 钨合金光栅的真空/惰性气氛使用条件
 - 8.2.2 钨合金光栅的温度梯度与热变形的控制
- 8.3 钨合金光栅的清洁与维护规范
 - 8.3.1 避免机械接触与指纹污染
 - 8.3.2 化学清洗剂的选择与限制
- 8.4 钨合金光栅常见性能退化问题及成因分析
 - 8.4.1 表面氧化与衍射效率下降
 - 8.4.2 机械变形导致的周期失真
 - 8.4.3 辐射损伤与长期暴露下的微观结构变化
- 8.5 钨合金光栅的定期检测

附录：

- 附录 A 中国钨合金光栅标准
 - 附录 B 国际钨合金光栅标准
 - 附录 C 欧美日韩等国的钨合金光栅标准
 - 附录 D 钨合金光栅术语表
- 参考文献



中钨智造钨合金光栅图片

版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{ MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{ mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{ mm}/100 \text{ mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与免责声明

第一章 钨合金光栅的概述

1.1 钨合金光栅的定义

中钨智造钨合金光栅是指以钨为主要合金组分与其他金属元素结合形成的具有周期性微结构的光学元件。这种材料通过合金化处理和精密加工工艺，构建出能够在光学系统中实现光波调控的结构形式。钨合金光栅的出现源于对高性能光学材料的需求，研究者在材料选择和结构设计上进行了持续的探索。合金基体的形成过程涉及多种冶金技术，这些技术共同保证了光栅在不同工作条件下的结构完整性。

从组成角度分析，钨合金光栅的定义建立在元素间的相互作用之上。钨的高密度和热学特性为光栅提供了基础支撑，而添加的合金元素则用于调节材料的加工流动性和表面特性。这种组合方式使得最终形成的光栅既具备必要的机械强度，又能在光学层面实现预期的功能表现。研究过程中，化学组成的调控始终是核心环节之一，它关系到光栅微观组织的均匀程度和宏观性能的稳定性。

钨合金光栅的定义还包括其作为功能性器件的层面。在光学路径中，这种光栅能够通过周期性结构对入射光波产生特定的作用效果，从而辅助完成分光或波长选择等操作。不同应用环境对光栅参数的要求存在差异，这也促使定义的内涵随着技术进步而不断丰富。

1.1.1 钨合金光栅基于化学组成的定义

钨合金光栅的化学组成以钨元素为核心，通常与其他过渡金属元素形成固溶体或多相合金体系。这种组成方式影响了材料的晶体结构和物理属性基础。钨原子在合金中的排列状态以及与其他元素的键合情况，影响了光栅制备过程中的相稳定性。研究者通过调整各组分的比例，来实现对合金微观组织的控制，从而为光栅的周期性结构提供可靠的材料载体。

在合金形成过程中，化学组成的均匀性受到冶金工艺参数的显著影响。熔炼、粉末混合或热处理等步骤都需要把控，以避免成分偏析或杂质引入。这些因素会进一步体现在光栅表面的微结构质量上。化学组成的定义还延伸到微量元素的添加策略，这些添加有时用于优化晶粒细化或改善表面抗氧化行为，从而支持光栅在长期使用中的性能维持。

基于化学组成的定义突出了钨合金光栅作为一种工程材料的本质特征。它强调了元素层面上的设计逻辑，以及这种逻辑如何转化为可加工的合金形态。通过对化学组成的系统研究，研究人员能够更好地预测材料在后续光学加工中的行为表现。

1.1.2 钨合金光栅基于功能与应用的定义

钨合金光栅的功能在于其对光波的衍射调控能力，这种能力来源于表面周期性槽形的构建。当光波与光栅结构相互作用时，会产生可控的干涉图案，从而实现光谱分离或方向调整等效果。在光学仪器中，这种功能表现为光栅与其他元件协同完成信号处理的任務。功能设计时需要考虑光栅的周期、槽深以及材料反射特性等参数，以适应不同波段的工作需求。

版权与免责声明

在应用场景中，钨合金光栅常被集成到光谱分析设备或激光系统中，发挥其结构稳定的优势。合金材料本身的硬度和耐环境特性有助于光栅在反复操作中保持表面形貌的一致性。应用过程中的功能发挥还依赖于安装精度和环境匹配程度，这些外部条件与光栅自身的属性共同影响了整体系统的运行效果。不同领域的应用需求推动了光栅功能参数的多样化调整。

基于功能与应用的定义将钨合金光栅定位为光学技术中的动态组件。它不再局限于静态材料属性，而是强调在实际光路中的作用发挥。这种定义方式关注光栅与系统环境的交互关系，并为性能优化指明了方向。

1.2 钨合金光栅的主要分类体系

钨合金光栅的主要分类体系建立在材料组成、结构特征以及几何参数等多个维度之上，这些维度共同构成了对钨合金光栅进行系统区分的框架。通过不同分类方式，研究人员能够更清晰地认识各类光栅之间的差异，并根据具体需求选择合适的类型。在实际研究和应用过程中，分类体系帮助梳理了钨合金光栅的多样性特征，同时也为后续的性能比较和优化设计提供了参考依据。

分类体系的建立源于对钨合金光栅内在规律的总结。不同分类标准反映了研究者从不同角度观察材料的视角，例如从成分含量入手可以突出合金比例的影响，而从结构类型出发则更注重晶体层面的差异。

1.2.1 按钨质量分数划分的钨合金光栅

按钨质量分数划分的钨合金光栅主要根据合金中钨元素的含量比例进行区分，这种划分方式关联到材料的密度、机械性能以及热学特性等方面。高钨质量分数的光栅通常表现出较高的密度和硬度特征，而较低钨质量分数的光栅则可能在加工流动性和韧性方面呈现不同表现。研究者在设计合金配方时，会根据光栅的具体使用环境来调整钨的质量分数，以实现性能的平衡匹配。

在这一分类下，不同钨质量分数的光栅在制备工艺上也存在相应差异。例如，较高钨含量的合金往往需要更精细的粉末处理和烧结控制，以确保成分分布的均匀性。这些工艺调整有助于维持光栅周期性结构的完整性，同时减少加工过程中可能出现的缺陷。较低钨质量分数的光栅则可能采用相对简化的合金化步骤，但仍需注意其他合金元素的相互作用，以避免对光学表面质量产生不利影响。

按钨质量分数划分的体系为钨合金光栅的选型提供了实用指导。它允许研究人员根据目标应用对材料密度和强度进行初步筛选，并在后续优化中进一步细化参数。

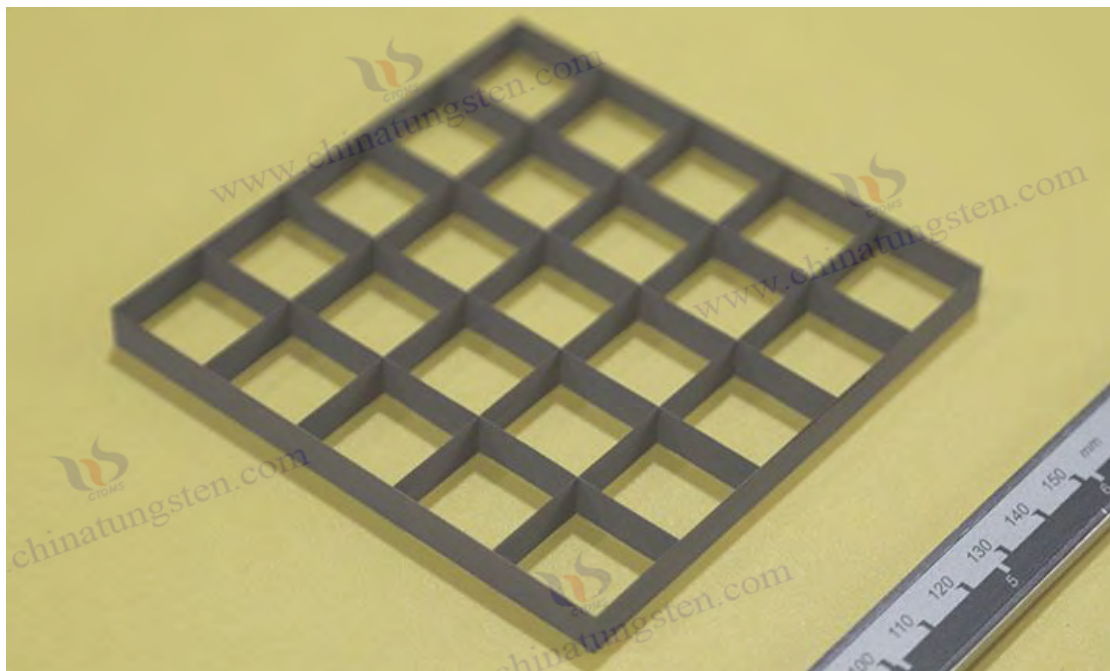
1.2.2 按晶体结构类型划分的钨合金光栅

按晶体结构类型划分的钨合金光栅主要依据合金在固态下形成的晶体相结构进行分类，例如体心立方结构或其他可能的相组成。这种划分方式关注材料在原子尺度上的排列规律，这些

规律影响了光栅的机械稳定性和热膨胀行为。不同晶体结构类型的光栅在加工中的变形响应和表面处理效果上会表现出各自的特点，研究者据此选择适合的热处理或机械加工方案。

晶体结构类型的差异还会延伸到光栅的光学性能层面。特定晶体排列可能导致各向异性特征，这在光波与表面相互作用时会产生一定的影响。研究人员在分类基础上，会结合 X 射线衍射等表征手段来确认结构类型，并据此调整光栅槽形的加工方向或参数设置。这种方法有助于减少结构不匹配带来的性能波动，并提升光栅在光学系统中的兼容性。

按晶体结构类型划分的体系突出钨合金光栅在微观层面的多样性。它为理解合金相变行为与宏观光学功能之间的联系提供了桥梁，同时也指导了新型结构光栅的探索方向。通过对不同晶体类型光栅的对比分析，研究者能够发现结构优化潜力，并将其应用于性能提升的实践之中。这种分类方式与材料科学的基础理论紧密结合，形成从原子排列到器件应用的逻辑链条。



中钨智造钨合金光栅

1.2.3 按光栅周期尺度划分的钨合金光栅

按光栅周期尺度划分的钨合金光栅根据其周期性结构的尺寸大小进行分类，例如微米级、亚微米级或其他尺度范围。这种划分方式关系到光栅对不同波长光波的调控能力，不同周期尺度的光栅适用于对应的光谱范围和工作模式。研究者在设计时，会根据目标光学系统的波段需求来确定合适的周期尺度，以实现有效的衍射或分光效果。

周期尺度的选择还会影响加工工艺的复杂程度。较小周期的光栅通常需要采用更高精度的刻蚀或纳米加工技术，以确保槽形轮廓的准确性和表面光洁度。而较大周期的光栅则可能通过传统精密机械方法实现，但仍需关注尺度放大带来的均匀性控制问题。这些工艺差异在分类体系中得到体现，并指导了设备选型和参数优化的方向。

版权与法律声明

按光栅周期尺度划分的体系为钨合金光栅的应用匹配提供了清晰的依据。它帮助研究人员将结构参数与光学功能进行对应，并在实验中验证不同尺度下的性能表现。这种分类方式强调了几何特征在光栅行为中的核心作用，通过持续的尺度探索，研究者能够扩展光栅的工作范围，并为集成光学系统的开发贡献思路。

1.2 钨合金光栅的主要分类体系

钨合金光栅的主要分类体系建立在材料组成、结构特征以及几何参数等多个维度之上，这些维度共同构成了对钨合金光栅进行系统区分的框架。通过不同分类方式，研究人员能够更清晰地认识各类光栅之间的差异，并根据具体需求选择合适的类型。在实际研究和应用过程中，分类体系帮助梳理了钨合金光栅的多样性特征，同时也为后续的性能比较和优化设计提供了参考依据。各类划分方法并非孤立存在，而是经常相互结合使用，以形成更全面的认识。

分类体系的建立源于对钨合金光栅内在规律的总结。不同分类标准反映了研究者从不同角度观察材料的视角，例如从成分含量入手可以突出合金比例的影响，而从结构类型出发则更注重晶体层面的差异。这种多维度分类方式促进了知识的系统化整理，也便于在学术交流中进行描述。

1.2.4 按形状划分的钨合金光栅

按形状划分的钨合金光栅主要依据光栅整体几何形态进行区分，例如平面型、曲面型或特殊轮廓型等。这种划分方式关联到光栅在光学系统中的安装方式和光路匹配特性。平面形状的光栅常用于平行光束的处理，而曲面形状的光栅则能够结合聚焦或发散功能，在紧凑光路设计中发挥作用。研究者在选择形状时，会综合考虑系统空间限制和光波入射角度等因素，以确保光栅结构与整体光学布局的协调性。

不同形状的光栅在加工和装配过程中呈现出各自的技术特点。平面光栅的表面处理相对，便于实现高精度周期结构，而曲面光栅则需要采用专用夹具或补偿算法来维持槽形的一致性。这些形状差异还会影响光栅的机械支撑设计，例如曲面型可能需要额外的应力释放结构，以避免长期使用中的形变。形状分类为光栅的工程集成提供了实用指导，帮助研究人员根据应用场景优化外形参数。

按形状划分的体系突出了钨合金光栅在宏观几何层面的适应性。它鼓励研究者将形状选择与光学功能需求相结合，并在实践中探索新型复合形状的可能性。通过对不同形状光栅的对比，研究人员能够发现形状对性能表现的具体贡献，并将其纳入设计流程之中。

1.2.5 按加工工艺流程划分的钨合金光栅

按加工工艺流程划分的钨合金光栅主要根据制备过程中采用的核心技术路径进行分类，例如机械刻划路线、粉末冶金结合精密成型路线或电化学辅助加工路线等。这种划分方式反映了从合金基体到最终周期结构的形成方式，不同工艺流程在精度控制、表面质量和生产效率方面存在差异。机械刻划路线适合实现较高深宽比的槽形，而粉末冶金路线则便于批量制备复

杂合金组成的光栅。

工艺路线的选择还会影响光栅的微观组织和残余应力分布。某些路线强调高温烧结后的精加工，以减少内部缺陷，而另一些路线则侧重于室温或低温处理，以保留合金的原始韧性。这些工艺特点在分类体系中得到体现，并指导研究者根据光栅尺寸和性能要求匹配合适的路线。加工工艺的迭代也推动了分类边界的扩展，例如新型复合工艺的出现为混合路线提供了空间。

按加工工艺路线划分的体系为钨合金光栅的制造优化提供了系统框架。它帮助研究人员梳理工艺参数与最终器件性能之间的关联，并在实验中验证不同路线的适用范围。这种分类方式强调了制备技术在材料转化中的核心作用，通过持续的工艺创新，研究者能够提升光栅的整体一致性和可靠性。

1.2.6 按用途划分的钨合金光栅

按用途划分的钨合金光栅主要依据其在光学系统中的具体功能定位进行区分，例如光谱分光型、激光调控型或精密测量型等。这种划分方式对应于不同应用领域的技术需求，光谱分光型光栅侧重于波长分离能力，而激光调控型光栅则更关注功率承受和方向控制特性。研究者在使用分类基础上，会针对性地调整光栅周期和表面处理参数，以匹配目标系统的运行条件。

不同用途的光栅在工作环境适应性上表现出各自的特点。例如，某些用途要求光栅具备较高的环境稳定性，而另一些用途则强调快速响应或集成兼容性。这些用途差异会进一步延伸到材料选择和结构设计的细节之中，确保光栅在实际场景中发挥稳定作用。用途分类为跨领域应用提供了桥梁，帮助研究人员将通用技术转化为特定解决方案。

1.3 钨合金光栅的发展史

钨合金光栅的发展史体现了材料科学与光学技术相互融合的演进过程。从早期对金属光栅的探索到逐步引入高密度合金材料，这一历程反映了研究者对光学元件性能提升的持续追求。不同阶段的技术积累为后续创新奠定了基础，研究人员通过不断优化合金组成和加工方法，使钨合金光栅逐步适应了光学系统的复杂需求。

整个发展过程呈现出从单一材料向复合体系过渡的特点。早期工作主要关注基本结构的实现，而后期则更注重性能的综合平衡。这种历史脉络不仅记录了技术进步的轨迹，还体现了多学科交叉在推动光学元件革新中的作用。通过回顾发展史，研究者能够识别关键转折点，并在此基础上规划新的研究路径。

1.3.1 早期金属光栅向高密度钨基材料的过渡（20 世纪 70—90 年代）

20 世纪 70 至 90 年代是金属光栅从传统材料向高密度钨基材料过渡的时期。这一阶段的研究者开始关注如何通过引入高密度元素来改善光学元件的机械稳定性和热学性能。早期金属光栅主要依赖常规材料，而钨基合金的引入为光栅设计带来了新的可能性。过渡过程涉及合

金配方的初步探索以及加工工艺的适应性调整，这些工作为钨合金光栅的形成积累了经验。在这一过渡阶段，研究团队面临材料兼容性和结构精度等方面的挑战。通过系统实验，研究者逐步掌握了钨基材料在光栅制备中的行为规律，并开发出相应的技术路线。过渡的完成标志着光学元件材料体系的扩展，也为后续更精细化的研究打开了空间。

1.3.1.1 纯钨与钨-铼合金在 X 射线单色器中的初步应用

纯钨与钨-铼合金在 X 射线单色器中的初步应用代表了钨基材料进入光学领域的早期尝试。这一时期，研究者探索了纯钨的高密度特性在单色器结构中的作用，并通过添加铼元素来改善合金的韧性和加工性能。纯钨光栅在 X 射线环境中表现出一定的吸收和衍射能力，而钨-铼合金则在结构稳定性方面提供了补充。

应用过程中，研究人员注合金组成对单色器分辨率和机械可靠性的影响。通过优化热处理和表面加工参数，纯钨与钨-铼合金光栅逐步适应了 X 射线光路的特定要求。早期实验结果为后续合金改性工作提供了数据支持，也促进了材料与光学设计的结合。纯钨和钨-铼合金的引入标志着高密度材料在单色器领域的初步立足。

这一阶段的应用还涉及光栅周期结构的初步构建。研究者采用机械刻划等方法形成周期槽形，并通过测试确认其在 X 射线条件下的功能表现。纯钨与钨-铼合金的配合使用丰富了单色器的材料选择，同时也为解决热负载等问题积累了经验。整个初步应用过程体现了研究者对材料潜力的挖掘和对技术难题的逐步攻克。

1.3.1.2 同步辐射光源对高 Z 材料吸收光栅的需求驱动

同步辐射光源的发展对高 Z 材料吸收光栅形成了显著的需求驱动。这一时期，同步辐射设施的兴起要求光学元件具备更高的吸收能力和热稳定性，而高原子序数的钨基材料恰好满足了这些条件。研究者开始将钨合金引入吸收光栅的设计中，以应对高强度辐射环境下的结构挑战。需求驱动促使合金成分和光栅结构的优化工作加速进行。

在驱动作用下，研究团队开展了针对同步辐射光源的专用光栅实验。高 Z 材料的吸收特性有助于有效管理光束能量，而钨合金的机械性能则保证了光栅在长期运行中的完整性。同步辐射光源的应用场景推动了光栅周期尺度的调整和表面处理技术的进步，这些改进进一步提升了吸收光栅的整体性能。需求驱动成为这一阶段技术进步的重要外部因素。

同步辐射光源的需求还促进了多机构之间的合作交流。不同实验室共享了高 Z 材料在吸收光栅中的应用经验，并共同探索了加工工艺的改进路径。这种协作氛围加速了从材料筛选到器件验证的转化过程。最终，高 Z 材料吸收光栅的开发为钨合金光栅的后续发展提供了坚实的技术支撑，也为光学系统在先进光源环境中的应用拓展了空间。

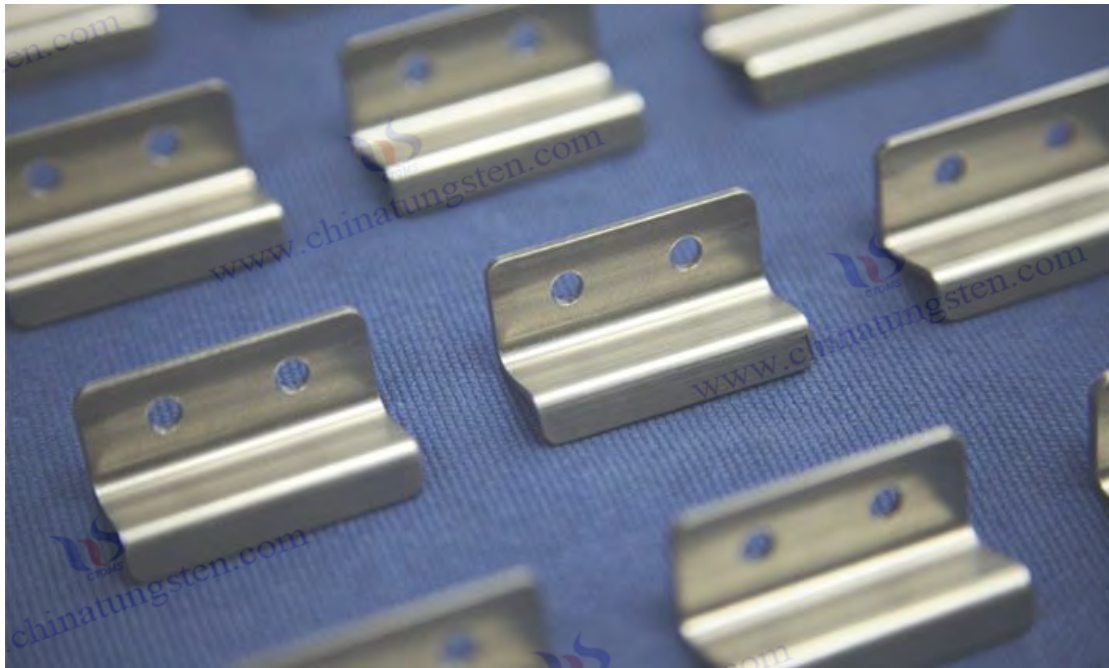
1.3.2 钨合金合金光栅的诞生与粉末冶金技术突破（1990—2010 年）

20 世纪 90 年代至 2010 年期间，钨合金合金光栅经历了从概念提出到初步成熟的诞生阶段。

版权与免责声明

这一时期，粉末冶金技术的显著突破为高密度钨合金光栅的制备提供了关键支撑。研究者将注意力转向合金体系的开发，通过优化粉末混合、压制和烧结工艺，实现了合金密度与结构精度的更好统一。钨合金合金光栅的诞生标志着光学元件材料从传统金属向高性能复合材料的转变，为后续应用扩展奠定了技术基础。

粉末冶金技术的突破体现在对颗粒尺寸控制、烧结气氛管理和致密化过程的精细调节上。这些进步有效降低了孔隙率，提高了合金的均匀性，从而为形成稳定周期结构创造了条件。研究团队在这一阶段开展了大量工艺实验，逐步建立了适用于光栅制备的专用流程。合金光栅的出现不仅提升了材料的机械性能，还增强了其在光学环境中的适应能力，推动了整个领域的发展节奏。



中钨智造钨合金光栅

1.3.2.1 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 系高密度钨合金的引入与抗散射栅格应用

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 系高密度钨合金的引入为钨合金合金光栅的诞生提供了重要材料基础。这些合金体系通过镍、铁或铜元素的添加，改善了钨的烧结性能和韧性，使其能够在粉末冶金路线中实现较高致密度。研究者将这类合金应用于抗散射栅格的设计中，利用其高密度特性有效管理光束中的散射成分，从而提升光学系统的信号纯度。

在抗散射栅格应用中，W-Ni-Fe 系合金展现出良好的机械加工性和热稳定性，而 W-Ni-Cu 系则在电导率和表面处理方面提供了优势。研究人员通过调整合金比例和烧结参数，优化了栅格的吸收效率和结构耐久性。这些合金的引入促进了栅格从简单吸收向精准抗散射功能的转变，满足了复杂光路环境中对杂散光抑制的需要。应用实践帮助验证了合金体系在实际光学器件中的可行性，并为工艺参数的标准化积累了经验。

版权与法律责任声明

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 系合金的推广还带动了相关表征技术的进步。研究者采用金相分析和性能测试方法，系统评估了合金微观组织与栅格功能之间的关联。这种系统性工作强化了材料选择与应用设计的衔接，推动了抗散射栅格向更高集成度的方向发展。整个引入过程体现了合金成分优化与光学功能实现的协同演进。

1.3.2.2 微米级周期钨合金吸收光栅的首次实现与性能验证

微米级周期钨合金吸收光栅的首次实现得益于粉末冶金技术与精密加工工艺的结合。这一时期，研究者成功将高密度钨合金基体与微米尺度周期结构整合在一起，通过优化刻蚀或成型步骤形成了均匀的吸收槽阵列。首次实现过程涉及从合金粉末制备到最终光栅成品的多步验证，确保了周期尺度的准确性和表面质量的一致性。

性能验证工作围绕吸收效率、热管理能力和结构稳定性展开。研究团队在模拟光学环境中对光栅进行了系统测试，评估了其在不同入射条件下的响应特性。这些测试结果确认了微米级周期结构在吸收光栅中的有效作用，同时也揭示了合金密度对热负载承受能力的贡献。验证阶段的反馈进一步指导了工艺调整，使光栅性能逐步接近应用要求。

微米级周期钨合金吸收光栅的成功标志着钨合金光栅从概念验证向实用化器件的过渡。它为后续更高精度光栅的开发提供了技术模板，并促进了粉末冶金路线在光学领域的更广泛应用。

1.3.3 高精度钨合金相衬成像光栅的快速发展（2010—2020 年）

2010 年至 2020 年期间，高精度钨合金相衬成像光栅进入了快速发展阶段。这一时期，研究者将注意力集中于相衬成像技术的需求，推动钨合金光栅在结构精度和功能集成方面取得显著进步。相衬成像光栅的优化工作涉及合金材料改性、微结构设计以及加工工艺的协同提升，这些努力共同提升了光栅在复杂成像系统中的适用性。快速发展阶段的成果为相衬成像技术的推广提供了材料层面的支持，也标志着钨合金光栅从吸收型向相位调控型的扩展。

在这一阶段，国际学术交流与实验设施的共享加速了技术迭代。研究团队通过系统实验和模拟分析，逐步建立了高精度光栅的性能评价框架。这些工作不仅解决了早期光栅在相衬应用中的局限性，还为后续的多功能集成奠定了基础。快速发展过程体现了研究者对光学分辨率与材料稳定性的平衡追求，推动了钨合金光栅在成像领域的角色转变。

1.3.3.1 Talbot-Lau 干涉仪用钨合金光栅的结构优化与刻划工艺进步

Talbot-Lau 干涉仪用钨合金光栅的结构优化聚焦于周期参数、槽深比例以及阵列均匀性的精细调整。这一时期，研究者通过数值模拟与实验迭代，优化了光栅的相位调制特性，使其更好地适应干涉仪的光路布局。结构优化的核心在于平衡高密度合金的机械性能与光学功能需求，确保光栅在干涉图案形成过程中保持稳定的响应。

刻划工艺的进步体现在精密机械刻划技术的升级与辅助方法的引入上。研究团队采用改进的刀具材料和数控系统，实现了更高深宽比槽形的稳定刻划，同时降低了表面粗糙度。这些工

艺改进有效提升了光栅的衍射效率和对比度，减少了加工过程中可能出现的周期误差。刻划工艺的成熟为 Talbot-Lau 干涉仪的可靠运行提供了技术保障，也为批量制备高精度光栅积累了经验。结构优化与刻划工艺的结合形成了相互促进的循环。研究者根据干涉仪测试反馈持续调整参数，使光栅的整体性能逐步接近理论预期。这种协同进步推动了钨合金光栅在相衬成像中的应用深度，体现了材料工程与光学设计在实践中的紧密融合。



中钨智造钨合金光栅图片

1.3.3.2 硬 X 射线波段钨合金光栅的突破与国际同步辐射装置应用

硬 X 射线波段钨合金光栅的突破主要体现在高吸收系数与微米级周期结构的兼容实现上。这一时期，研究者通过合金成分微调和表面改性技术，提升了光栅在硬 X 射线能量范围内的吸收与相位调控能力。突破工作解决了早期材料在高能量波段的透射损失问题，使光栅能够有效支持硬 X 射线相衬成像的信号采集。

国际同步辐射装置的应用为光栅性能提供了严苛的验证环境。在这些大型设施中，钨合金光栅经历了高通量辐射和长时间运行的考验，研究团队根据实测数据优化了光栅的热管理设计和结构支撑方式。应用实践不仅验证了光栅的稳定性，还揭示了合金密度在抑制散射背景方面的作用，推动了装置级成像分辨率的提升。硬 X 射线波段的突破与同步辐射应用形成了良性互动。研究者将装置反馈转化为进一步的材料与工艺改进，使钨合金光栅逐步成为硬 X 射线相衬成像的重要组成部分。

1.3.4 增材制造与纳米加工时代的新进展（2020 年至今）

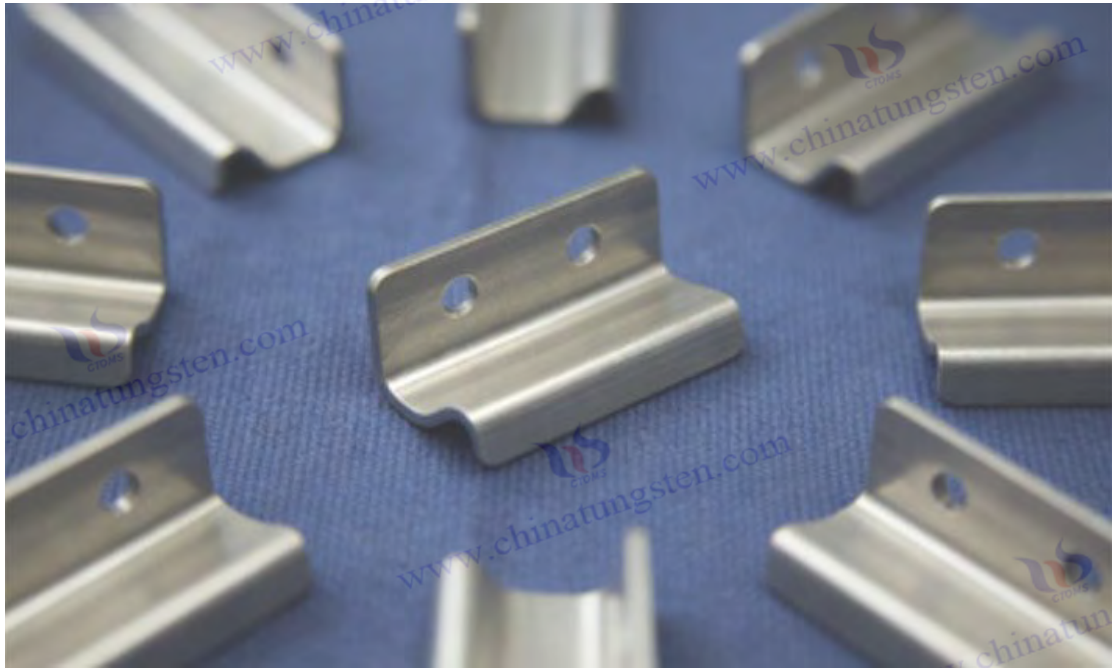
2020 年至今，钨合金光栅的发展进入增材制造与纳米加工时代。这一阶段，研究者将先进制造技术与传统合金材料相结合，探索了光栅结构精度和复杂几何形态的突破路径。增材制

造技术为个性化光栅设计提供了灵活性，而纳米加工手段则进一步提升了周期结构的精细程度。这些新进展推动钨合金光栅向更高集成度和功能多样化方向演进，适应了现代光学系统对小型化与高性能的需求。

这一时期的技术融合体现从传统减材加工向逐层构建模式的转变。研究团队通过多物理场模拟和实时监测，优化了制造过程中的热应力和微观组织控制，确保光栅在复杂结构下的稳定性。新进展不仅扩展了光栅的制备可能性，还促进了与光学设计软件的深度集成，为快速迭代原型提供了条件。整个时代的新进展反映制造技术革新对光学元件材料领域的持续推动。

1.3.4.1 激光选区熔化与电子束熔化制备钨合金光栅的探索

激光选区熔化与电子束熔化技术在钨合金光栅制备中的探索，标志着增材制造路线在高熔点合金领域的初步应用。研究者利用激光或电子束作为能量源，对钨合金粉末进行逐层熔融固化，实现了复杂周期结构的构建。这种方法避免了传统机械加工中的刀具限制，允许设计具有内部支撑或梯度密度的光栅形态。



中钨智造钨合金光栅图片

在探索过程中，工艺参数的优化成为核心工作。激光功率、扫描速度和粉末预热温度等因素被系统调节，以减少球化缺陷和残余应力，同时保持合金成分的均匀性。电子束熔化则在真空环境中展现出对高密度钨合金的良好适应性，帮助形成了致密且表面光洁的周期槽阵列。这些技术探索为钨合金光栅的快速成型提供了新途径，并通过后续热处理进一步改善了微观组织。

激光选区熔化与电子束熔化的结合使用，还促进了混合工艺的开发。研究人员根据光栅尺寸和精度要求，选择或叠加两种技术，形成互补优势。这种探索过程体现了制造柔性 with 材料性

能的平衡追求，推动了钨合金光栅在原型验证阶段的效率提升，并为规模化生产积累了工艺数据基础。

1.3.4.2 超高分辨率钨合金光栅在中子与极硬 X 射线领域的扩展

超高分辨率钨合金光栅在中子与极硬 X 射线领域的扩展，得益于纳米加工技术的进步与合金材料的高吸收特性。研究者通过纳米刻蚀或模板辅助方法，将光栅周期推向更小尺度，实现了对中子束和极硬 X 射线的高效相位或吸收调控。这种扩展满足了先进探测技术对精细结构分辨的需求，使光栅能够在高能粒子环境中保持结构完整性。

在中子应用中，钨合金的高密度优势有助于有效散射管理，而在极硬 X 射线波段，其吸收能力则支持了弱信号的增强成像。研究团队开展了针对性实验，验证了光栅在不同能量范围内的衍射效率和对比度表现。这些验证工作推动了光栅设计从微米级向纳米级的过渡，并优化了表面涂层以提升抗辐射性能。

超高分辨率光栅的扩展还涉及多波段兼容性的探索。研究者根据中子与极硬 X 射线光源的特点，调整合金组成和结构参数，形成适应性更强的器件。

1.3.5 钨合金光栅标准化与产业化进程

钨合金光栅的标准化与产业化进程在近年来呈现稳步推进态势。研究机构与工业界合作制定了材料性能、结构参数和测试方法的统一规范，这些规范涵盖合金成分范围、光栅周期公差以及光学特性评价准则。标准化工作作为不同实验室和生产单位之间的技术对接提供了共同语言，促进了产品质量的一致性和可追溯性。

产业化进程体现在专用生产线的建立和规模化制造技术的成熟上。粉末冶金结合精密加工的集成路线，以及增材制造辅助的柔性生产模式，逐步实现了从实验室小批量向工业供应的转变。企业通过工艺自动化和质量控制体系的完善，降低了生产成本，同时提升了光栅的交付稳定性。这些努力使钨合金光栅逐渐进入更多光学仪器和检测设备的供应链体系。

标准化与产业化的结合形成了良性循环。规范的建立指导了生产工艺的优化，而产业反馈则反过来丰富了标准内容。这种进程不仅提升了钨合金光栅的商业可用性，还为技术创新成果的快速转化提供了通道。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{ MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{ mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{ mm/100mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



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 钨合金光栅的化学组成设计与相平衡

2.1 钨合金光栅的核心合金体系

中钨智造钨合金光栅的核心合金体系以钨作为基体元素，通过与其他金属组分的合理搭配形成稳定的合金结构。这些体系的设计旨在平衡材料的密度、机械性能与光学加工适应性，为光栅周期结构的形成提供可靠的材料基础。核心合金体系通常围绕高钨含量展开，同时引入少量合金元素以改善烧结行为和微观组织均匀性。研究者在体系选择时，会综合考虑各元素之间的相互作用以及最终光栅在光学环境中的表现。

在实际组成设计中，核心合金体系可分为合金类型和固溶强化类型。前者侧重于通过添加低熔点元素实现液相烧结，而后者则更注重通过原子级固溶来提升强度和稳定性。不同体系在制备过程中展现出各自的工艺窗口，例如烧结温度范围和冷却速率控制。这些差异为光栅的多样化制备提供了灵活性，也促使研究人员根据具体结构要求调整合金配比。

核心合金体系的建立还体现了相平衡原理的应用。研究者通过热力学计算和实验验证，确定了合金在不同温度下的相组成范围，确保光栅加工过程中不出现有害相的析出。这种体系设计为后续的微结构调控奠定了化学基础，并与光学性能需求形成了有机联系。

2.2 钨合金光栅中常见添加元素的固溶行为

钨合金光栅中常见添加元素的固溶行为影响了材料的晶格参数、电子结构和机械性能。这些元素在钨基体中的溶解程度和分布状态影响了合金的相稳定性以及后续加工中的变形响应。固溶行为的研究有助于揭示元素间的作用规律，并为组成设计的精细调控提供指导。在光栅制备中，添加元素的固溶状态还与表面质量和周期结构精度存在关联，需要通过适当的热处理来实现优化。

不同添加元素的固溶行为呈现出温度依赖性和浓度敏感性特征。研究者通常采用相图分析和显微组织观察等方法，跟踪元素在合金中的存在形式。这些观察结果为理解固溶强化或软化机制提供了依据，也帮助避免了因固溶不均而导致的光栅性能波动。固溶行为的系统认识构成了钨合金光栅化学组成设计的重要组成部分。

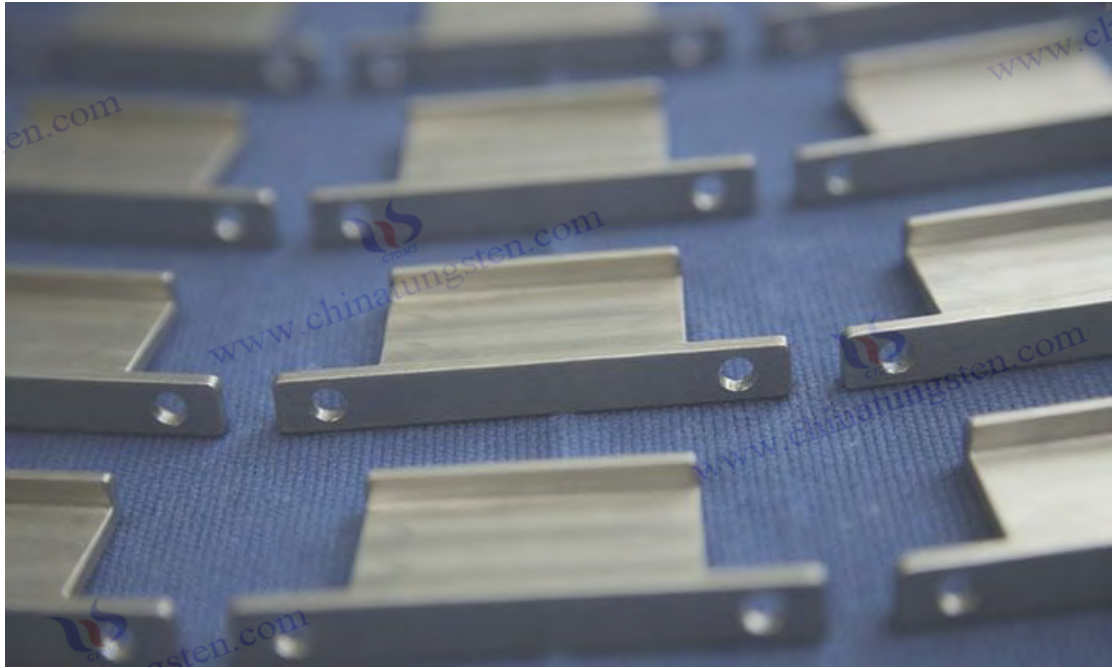
2.2.1 Re、Ta、Mo 在钨合金光栅中的固溶极限

Re、Ta、Mo 等元素在钨合金光栅中的固溶极限是组成设计中需要重点关注的参数。这些高熔点元素与钨形成连续或有限固溶体，其溶解上限受到温度和合金整体组成的影响。在一定范围内，Re 的加入可以显著改善钨的延展性，而 Ta 和 Mo 则有助于调节晶格常数和热膨胀系数。研究者通过实验测定不同温度下的固溶边界，以确保合金在光栅加工温度区间内保持单相或可控多相状态。

固溶极限的确定还涉及扩散动力学的考虑。Re 原子在钨中的扩散速率相对较快，这为均匀固溶提供了便利，而 Ta 和 Mo 的较大原子尺寸则可能导致晶格畸变，需要通过缓慢冷却来缓

解内应力。这些因素在光栅周期结构形成过程中会影响槽形的稳定性，因此研究人员在设计时会预留一定的成分裕度。固溶极限的掌握有助于避免过饱和析出对光学表面造成的潜在不利影响。

Re、Ta、Mo 的固溶行为共同构成了钨合金光栅强化机制的一部分。研究者结合热力学模型和实际合金样品分析，逐步建立了这些元素固溶极限与光栅性能之间的对应关系。这种对应关系为合金配方的迭代优化提供了数据支撑，也促进了钨合金光栅在不同光学应用中的适应性调整。通过持续的固溶极限探索，研究人员能够更精准地调控材料的微观结构特征。



中钨智造钨合金光栅图片

2.2.2 Ni、Fe、Co 等过渡族元素的作用机理

Ni、Fe、Co 等过渡族元素在钨合金光栅中的作用机理主要体现在液相烧结促进和晶界强化方面。这些元素与钨的熔点差异较大，在烧结过程中易形成瞬态液相，从而加速致密化并改善粉末颗粒间的结合。Ni 的加入常用于降低烧结温度，而 Fe 和 Co 则在调节液相流动性和润湿性上发挥协同作用。这种机理使得合金能够实现较高密度，同时保持光栅所需的光学表面平整度。

从微观角度看，这些过渡族元素还会影响晶界迁移和再结晶行为。适量的 Ni、Fe、Co 可以细化晶粒尺寸，减少晶界处的缺陷聚集，从而提升合金的整体韧性。在光栅加工阶段，这种晶粒细化有助于维持周期结构的几何精度，避免因局部软化而产生的形变。研究者通过添加量和分布控制，来平衡液相促进作用与潜在的晶界偏聚风险。

Ni、Fe、Co 的作用机理还延伸到合金的热学和力学响应特性上。这些元素的存在可以调节钨合金的热导率和弹性模量，使光栅在光学工作环境中表现出更好的稳定性。研究人员在机

版权与免责声明

理研究中结合电子探针分析和力学测试等手段，逐步澄清了元素分布与性能表现之间的联系。这种认识为钨合金光栅的组成设计提供了实用指导，并支持通过微合金化实现性能定制的发展方向。整个作用过程体现了过渡族元素在连接材料制备与光学应用之间的桥梁作用。

2.3 钨合金光栅的多元相图与稳定相

钨合金光栅的多元相图与稳定相研究构成了化学组成设计的核心内容之一。通过构建和分析多元相图，研究人员能够系统地了解不同温度和成分条件下合金中各相的形成、转变以及共存关系。这些相图为光栅材料的热处理工艺制定和微观结构调控提供了理论指导，确保在加工过程中避免出现不稳定的相组成，从而维持光栅周期结构的完整性和光学性能的一致性。多元相图的建立通常结合热力学计算与实验验证，形成从理论预测到实际观测的完整链条。

稳定相的选择关系到钨合金光栅在工作环境中的长期可靠性。研究者重点关注那些在目标温度区间内保持结构稳定的相，这些相的晶体结构和热膨胀行为需要与光栅的几何设计相互匹配。在多元体系中，稳定相的确定还涉及各元素之间的交互作用，需要通过相平衡实验来确认相界的准确位置。这种研究方法有助于优化合金组成，使光栅材料在光学应用中展现出良好的热稳定性和机械适应性。

多元相图与稳定相的分析还为新型钨合金光栅的开发提供了方向。研究人员通过扩展相图数据库，探索更多元素组合的可能性，并在稳定相区域内进行成分微调。这些工作促进了材料性能的针对性提升，并与后续的加工工艺形成了紧密衔接。

2.3.1 W-Re 系钨合金光栅的相平衡

W-Re 系钨合金光栅的相平衡研究主要围绕钨与铼形成的连续固溶体展开。在这一体系中，两元素在较宽的成分范围内保持体心立方结构的固溶相，体现了良好的相容性。研究者通过高温退火实验和相组成分析，确定了固溶相的稳定温度区间，并观察到铼含量增加对晶格参数的连续调节作用。这种相平衡特征为光栅材料的均匀性控制提供了有利条件，有助于减少加工过程中因相变引起的内应力。

相平衡实验还揭示了 W-Re 系在不同冷却速率下的组织演变规律。缓慢冷却条件下，合金倾向于形成均匀的固溶体，而快速冷却则可能引入少量亚稳态结构，这些结构需要在后续热处理中进行调整。研究人员结合差热分析和显微观察，建立了成分-温度-相组成的对应关系图谱，为光栅制备中的烧结和退火工艺参数选择提供了依据。通过这些工作，W-Re 系合金的相平衡行为得到了较为系统的描述。在光栅应用背景下，W-Re 系的相平衡还与光学表面质量存在关联。稳定的固溶相有助于维持光栅槽形的几何精度，避免因局部相分离而导致的表面起伏。研究者根据相平衡数据优化了合金配比，使光栅在周期结构形成后仍能保持较高的结构稳定性。

2.3.2 W-Ta-Hf 系钨合金光栅的高温相稳定性

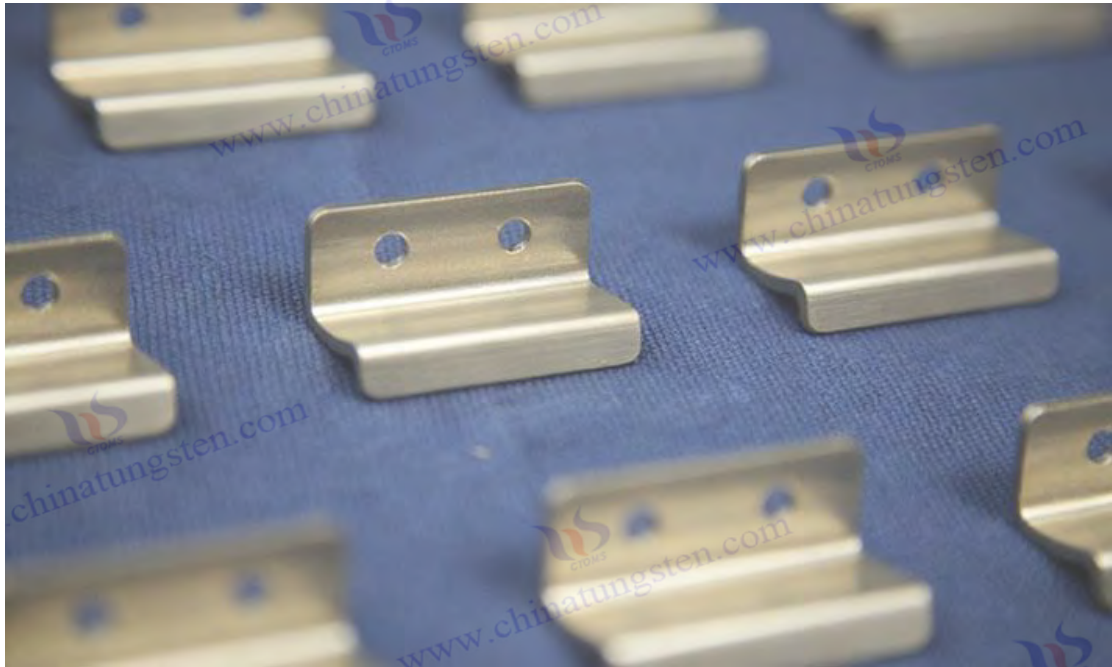
W-Ta-Hf 系钨合金光栅的高温相稳定性研究聚焦于三元体系在 elevated 温度下的相组成

版权与免责声明

演变。钨、钽和铪元素的组合形成了以体心立方固溶体为主的稳定相区，这些元素在高温下表现出较强的相互固溶能力，有助于抑制有害相的析出。研究者通过长时间高温保温实验，考察了不同成分比例下合金的相转变温度和组织稳定性，确认了该体系在光栅工作温度范围内的相平衡特征。

高温相稳定性的评估还包括对氧化行为和热循环响应的考察。Ta 和 Hf 的加入可以在一定程度上改善合金的抗氧化性能，同时调整整体的热膨胀系数，使其与光栅基底材料的匹配性得到提升。实验结果显示，在合理成分范围内，W-Ta-Hf 系合金能够维持单相或少相结构，避免了因多相共存导致的界面应力集中。

W-Ta-Hf 系的高温相稳定性研究进一步推动了热力学模型的完善。研究人员将实验数据与计算模拟相结合，建立了预测相边界的数值框架，并用于指导新型合金的成分筛选。这些工作不仅加深了对三元相互作用的认识，还为钨合金光栅的长期性能优化提供了科学支撑。



中钨智造钨合金光栅图片

2.4 钨合金光栅中第二相的析出与控制

钨合金光栅中第二相的析出行为是化学组成设计过程中需要重点调控的现象。第二相的形成通常源于合金元素在钨基体中的过饱和固溶或温度变化引起的相分离，这些析出相的尺寸、分布和种类会影响材料的微观组织均匀性以及光栅周期结构的加工精度。研究者通过系统实验观察第二相的形核、长大和粗化过程，逐步建立了析出动力学模型，为后续的热处理工艺优化提供了理论依据。在光栅制备流程中，合理控制第二相的析出有助于平衡强化效果与加工性能，避免因粗大析出相导致的表面缺陷或应力集中。

第二相的控制策略主要围绕成分调整和工艺参数调节展开。通过控制合金元素的添加量，可

版权与免责声明

以将第二相的析出限制在纳米尺度范围内，使其均匀弥散分布于钨基体之中。这种弥散分布不仅能够起到弥散强化作用，还能有效钉扎晶界，抑制晶粒异常长大，从而维持光栅槽形的几何稳定性。研究人员还采用分步热处理方法，先在较高温度下促进均匀固溶，再通过较低温度保温诱导可控析出，实现对第二相形态和体积分数的主动管理。这些控制手段在实际合金制备中得到了验证，并与光栅的光学表面质量形成了良好对应关系。

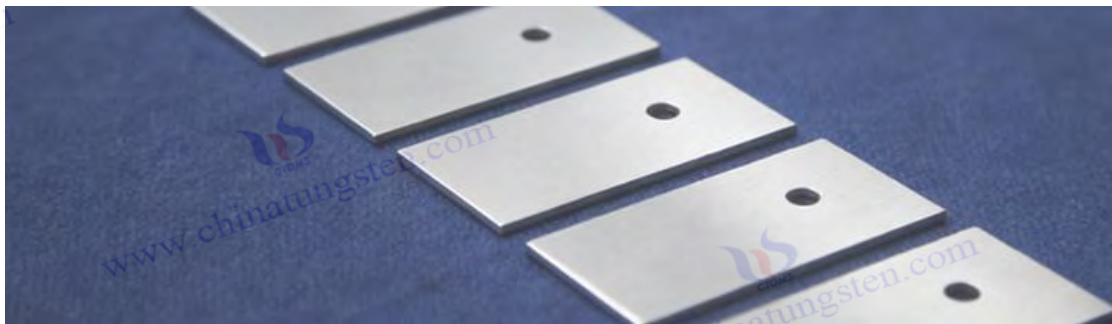
在更深入的研究层面，第二相的析出与控制还涉及界面能和扩散激活能等微观参数的考量。研究者利用透射电子显微镜和高分辨率成像技术，跟踪了第二相与基体之间的取向关系和界面结构，这些观察结果为优化合金体系提供了证据。通过成分微调和冷却速率控制，研究团队能够将有害的连续析出转变为离散分布的状态，从而提升钨合金光栅的整体韧性和疲劳抗力。整个过程体现了从现象观察到机理认识，再到工程应用的完整研究链条，为钨合金光栅的长期性能稳定奠定了材料基础。

2.5 钨合金光栅成分设计的热力学计算方法

钨合金光栅成分设计的热力学计算方法为材料开发提供了高效的理论工具。这些方法主要基于相图计算和热力学数据库，通过吉布斯自由能最小化原理预测多元体系在不同温度和成分条件下的平衡相组成。研究者将钨基合金的热力学参数输入计算软件，建立起成分-温度-相组成的映射关系，从而在实验开展前对可能出现的相平衡状态进行预判。这种计算方法显著缩短了合金筛选周期，帮助研究人员快速锁定具有稳定相区的目标成分范围。

在实际应用中，热力学计算方法常与实验验证相结合，形成迭代优化的工作模式。首先通过计算筛选出若干候选成分，然后制备小批量合金样品进行差热分析和金相观察，对计算结果进行校正和细化。这种结合方式有效降低了盲目实验带来的资源消耗，同时提高了组成设计的科学性。研究者还利用热力学计算模拟冷却过程中的非平衡相变路径，预测第二相的析出倾向，并据此调整热处理工艺参数，使光栅材料的微观组织更符合光学性能要求。

热力学计算方法的进一步发展体现在多尺度耦合模型的构建上。研究团队将第一性原理计算得到的原子间相互作用参数与宏观热力学数据库相结合，实现了对钨合金光栅中固溶极限和相界面能的更描述。这些高级计算手段为探索新型合金体系提供了虚拟实验平台，支持研究者在更宽的成分空间内进行性能预测和优化。最终，热力学计算方法与实验数据的相互印证，共同构成了钨合金光栅成分设计的可靠基础，推动材料开发从经验导向向计算辅助的转变。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{ MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{ mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{ mm}/100 \text{ mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与免责声明

第三章 钨合金光栅的晶体学特征、微观结构与表征技术

3.1 钨合金光栅的体心立方结构特性

中钨智造钨合金光栅的晶体结构以体心立方（BCC）为主，这种结构赋予了材料较高的原子堆积密度和独特的滑移系统。体心立方晶格中每个晶胞含有两个钨原子，原子排列方式使得晶格常数通常保持在 0.316 nm 左右，为光栅的机械稳定性和热学性能提供了基础支撑。在钨合金中，合金元素的固溶会引起晶格常数的微小变化，这种变化虽然微弱，却能显著影响电子结构和光学响应特性。体心立方结构的各向异性特征还影响了光栅在不同晶面取向下的加工行为差异，研究者常常通过择优取向控制来优化周期结构的形成精度。

体心立方结构的另一个重要特性体现在其较高的熔点和较低的热膨胀系数上，这些性质使钨合金光栅在光学工作环境中表现出良好的尺寸稳定性。BCC 结构中存在的 {110} 和 {112} 等主要滑移面为材料在精密加工过程中提供了必要的塑性变形能力，同时也为后续的表面处理提供了有利条件。研究人员在设计光栅时，会充分考虑晶体取向与光栅槽形之间的匹配关系，以减少因晶体学各向异性导致的表面粗糙度波动。体心立方结构特性构成了钨合金光栅微观基础的核心组成部分，其规律性为宏观性能预测提供了可靠依据。

3.2 钨合金光栅中常见的晶体缺陷

钨合金光栅中的晶体缺陷是影响材料性能和光栅光学质量的关键因素之一。这些缺陷包括点、线、面等多种类型，它们在合金制备和加工过程中不可避免地产生，并对光栅的周期结构完整性和表面平整度产生作用。研究者通过多种表征手段系统分析缺陷的形成机制与分布规律，逐步建立了缺陷控制与光栅性能之间的联系。合理调控晶体缺陷不仅能够提升材料的力学性能，还能减少光学散射损失，为高精度光栅的实现创造条件。

晶体缺陷的类型和密度与合金成分、热处理工艺以及机械加工参数密切相关。在钨合金光栅中，缺陷的引入有时被视为强化手段，而有时则需要抑制以保证光学表面质量。研究工作重点围绕缺陷的演化行为展开，通过定量表征和模拟计算相结合的方法，揭示了缺陷与宏观性能的内在关联。这种认识为钨合金光栅的微观结构优化提供了科学指导，推动了材料从制备到应用的全面提升。

3.2.1 位错密度与分布特征

钨合金光栅中的位错密度通常处于 10^8 至 10^{12} cm^{-2} 的范围，这一数值范围反映了材料在不同加工阶段的变形历史和热处理状态。位错主要以线缺陷形式存在，其分布特征呈现出一定的非均匀性，在晶界附近和应力集中区域密度较高。研究者观察到，在经过优化退火处理的钨合金光栅中，位错密度可有效降低至较低水平，从而减少对光栅槽形精度的不利影响。位错的滑移和攀移行为还与温度密切相关，在高温加工阶段，位错密度会发生动态回复与再结晶过程。

位错分布的特征还受到合金元素固溶的影响。Re、Ta 等元素的加入能够通过固溶强化机制

增加位错运动阻力，进而改变位错的缠结状态和亚结构形成倾向。这些变化在透射电子显微镜下表现为位错胞或亚晶界的形成，对光栅的机械稳定性和表面加工质量产生作用。研究人员通过控制变形量和退火温度，实现了对位错密度的定量调控，使其在满足强度要求的同时，尽量减少对光学性能的干扰。位错密度与分布特征的掌握为钨合金光栅的微观结构设计提供了重要参数依据。

3.2.2 小角度晶界与大角度晶界

钨合金光栅中的小角度晶界通常由位错阵列构成，晶界取向差一般小于 15° ，而大角度晶界则表现出更高的取向差和更为复杂的原子排列结构。在典型钨合金光栅样品中，小角度晶界的比例可占总晶界面积的 30%至 60%，其密度和分布影响材料的塑性变形能力和晶粒稳定性。大角度晶界则更多地出现在再结晶充分的区域，这些晶界对晶粒长大起到阻碍作用，同时也可能成为杂质偏聚的场所。

小角度晶界与大角度晶界的共存形成了钨合金光栅中独特的晶界网络。这种网络结构在加工过程中会发生迁移和重构，研究者通过电子背散射衍射技术定量统计了不同晶界类型的比例和取向分布函数。这些统计结果为优化热处理工艺提供了指导，帮助研究人员在保持较高强度的情况下提升材料的均匀性。小角度晶界有助于维持亚结构稳定性，而大角度晶界则在再结晶过程中发挥关键作用，两者共同影响了光栅微观组织的整体特征。

3.2.3 点缺陷与间隙原子

钨合金光栅中的点缺陷主要包括空位和间隙原子，这些缺陷的浓度通常在 10^{16} 至 10^{19} cm^{-3} 的数量级范围内，受制备工艺和后续热处理的影响较为显著。间隙原子如碳、氧等元素在钨晶格中的占据位置会引起局部晶格畸变，从而影响电子散射和热导率。研究者发现，通过真空热处理可以有效降低间隙原子浓度，使点缺陷密度维持在较低水平，这对于减少光栅表面的光学吸收损失具有积极意义。

点缺陷与间隙原子的作用还体现在复合缺陷的形成上，例如空位-间隙原子对或小原子团簇。这些复合缺陷在光栅长期使用过程中可能发生聚集或湮灭，研究人员通过控制气氛和温度条件，实现了对点缺陷行为的主动管理。点缺陷的调控不仅关系到材料的电学和热学性能，还影响光栅周期结构的长期稳定性。通过系统表征和理论计算相结合的方法，研究者逐步建立了点缺陷浓度与光栅光学性能之间的定量关系，为成分设计和工艺优化提供了更为的指导。

3.3 钨合金光栅的择优取向与织构类型

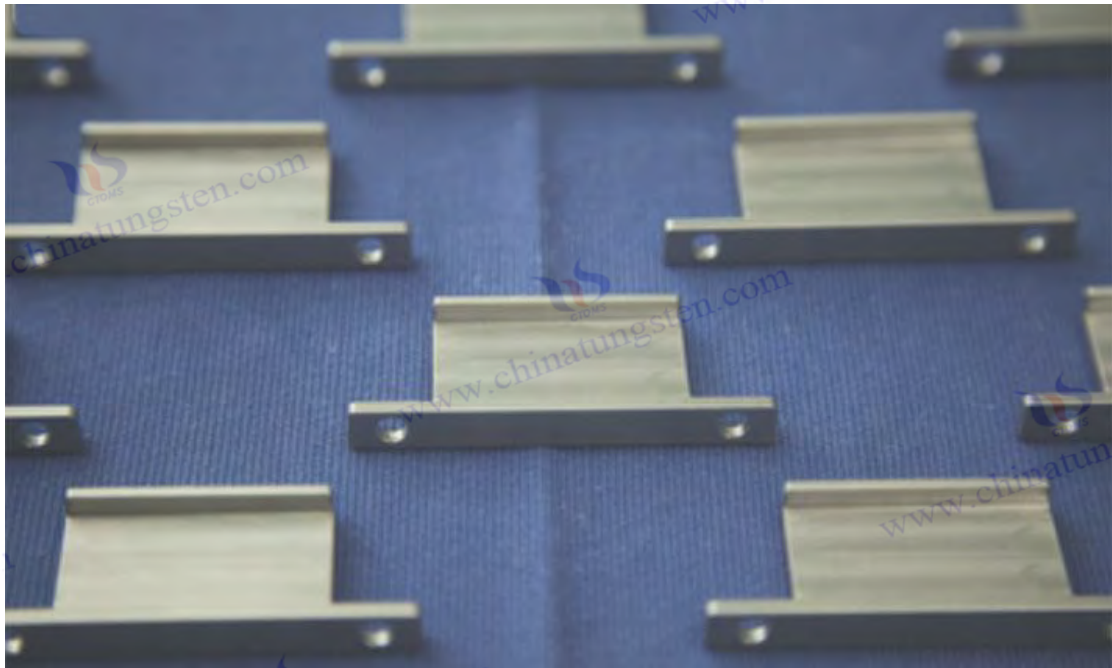
钨合金光栅的择优取向与织构类型是影响材料各向异性行为和光学性能的重要因素。体心立方结构的钨合金在制备和加工过程中容易形成特定晶面或晶向的择优排列，这些织构特征关系到光栅槽形的加工均匀性和表面反射特性。研究者通过电子背散射衍射和 X 射线衍射技术对织构进行定量分析，建立了织构强度与光栅性能之间的对应关系。不同织构类型的存在使得光栅在力学响应和热膨胀行为上呈现出方向依赖性，需要在设计阶段进行针对性调控。

组织的形成与演化受到合金成分、变形方式和热处理条件的共同影响。研究人员发现，适度的组织可以改善光栅的机械稳定性和加工可重复性，而过强的组织则可能导致各向异性引起的表面起伏或应力分布不均。通过系统调控组织类型，研究者能够优化光栅在不同晶面上的光学响应一致性。这种对择优取向的认识为钨合金光栅的微观结构工程提供了重要工具，也推动了材料性能的定向提升。

3.3.1 〈110〉纤维组织在钨合金光栅中的形成

〈110〉纤维组织是钨合金光栅中最常见的组织类型之一，其形成主要源于粉末冶金过程中的挤压或拉拔变形以及后续的退火处理。在体心立方钨合金中，〈110〉方向作为滑移系的主要取向，在塑性变形时容易沿轴向排列，形成沿加工方向的纤维组织。这种组织在光栅样品中表现为晶粒的〈110〉方向平行于光栅长度方向，强度通常可达到2至5倍随机分布水平。

〈110〉纤维组织的形成机制涉及晶粒的转动和再结晶过程中的择优生长。研究者观察到，在中等变形量下，原始粉末颗粒经过致密化后逐渐发展出〈110〉择优取向，而高温退火则进一步强化了这一组织。通过控制挤压比和退火温度，研究人员能够调节组织的锐度，使其既能提供一定的各向异性强化，又不至于过度影响光栅表面的均匀性。〈110〉纤维组织的稳定存在为钨合金光栅的机械性能优化提供了有利条件，同时也需要在加工过程中注意其对槽形刻划精度的潜在影响。



中钨智造钨合金光栅图片

3.3.2 加工变形对组织演化的影响

加工变形对钨合金光栅组织演化的影响主要体现在变形方式、变形量和变形温度三个方面。冷变形或温变形过程中，位错滑移导致晶粒逐渐向〈110〉方向转动，使组织强度随累积应

变量的增加而增强。当变形量超过一定阈值后，动态回复或再结晶开始发生，原有织构可能发生弱化或向其他类型转变。研究者发现，在轧制或锻造工艺中，平面应变状态往往促进〈110〉〈001〉混合织构的形成，而挤压工艺则更倾向于形成单一的〈110〉纤维织构。

高温变形条件下，织构演化还受到再结晶动力学的影响。较高温度下的变形会加速新晶粒的形核与长大，导致织构随机化程度增加。研究人员通过改变应变速率和变形路径，实现了对织构演化路径的主动控制，例如采用多道次小变形量工艺可有效抑制织构的过度集中。这些调控手段帮助研究者将织构强度维持在适宜范围，既保证了光栅的结构稳定性，又减少了因织构引起的各向异性光学差异。加工变形对织构演化的系统认识为钨合金光栅的工艺路线优化提供了指导。

3.4 钨合金光栅晶粒尺寸的定量表征

钨合金光栅晶粒尺寸的定量表征是评价材料微观结构均匀性的重要环节。典型钨合金光栅的平均晶粒尺寸一般控制在 5 至 50 μm 范围内，不同制备工艺下晶粒尺寸分布呈现出单峰或双峰特征。研究者常用截线法、面积法和电子背散射衍射技术进行统计分析，其中电子背散射衍射能够同时提供晶粒尺寸、取向和晶界信息，实现更为全面的定量描述。通过这些方法，研究人员能够计算晶粒尺寸的平均值、标准差以及分布函数，为工艺优化提供数据支持。

晶粒尺寸的表征还涉及高温下的晶粒长大行为评估。在退火过程中，晶粒尺寸随保温时间的延长呈抛物线规律增长，研究者通过 Arrhenius 关系拟合晶粒长大激活能，建立了温度-时间-晶粒尺寸的定量模型。这些模型帮助预测光栅在加工和使用过程中的微观结构稳定性，避免晶粒异常长大对周期结构精度的破坏。晶粒尺寸的定量表征结果还与光栅的光学散射损失存在关联，较细小的晶粒通常对应较低的表面粗糙度，有利于提升光学性能。

3.5 钨合金光栅的化学成分分析方法

钨合金光栅的化学成分分析方法包括湿化学分析、光谱分析和表面微区分析等多种技术。电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）常用于测定钨及合金元素的整体含量，其检测限可达 ppm 级别，能够准确反映批量材料的成分均匀性。X 射线荧光光谱（XRF）则适合快速无损检测，为生产过程中的质量控制提供便捷手段。研究者还采用电子探针微区分析（EPMA）对光栅局部区域的成分分布进行高空间分辨率表征，分辨率可达 1 μm 左右。

对于微量元素和间隙杂质的分析，惰性气体熔融-红外吸收法和燃烧法被广泛应用，能够测定氧、氮、碳等元素的含量。这些方法与金相观察相结合，形成从宏观到微观的完整分析链条。研究人员在成分分析中注重样品制备的一致性，通过多次平行测试计算成分波动范围，确保数据可靠性和可重复性。化学成分分析结果指导合金配方的调整和工艺参数的优化，为钨合金光栅的性能稳定提供了坚实的计量基础。

3.6 钨合金光栅的相结构与晶体学表征

钨合金光栅的相结构与晶体学表征是揭示材料微观组织特征和晶体学规律的关键环节。通过

多种衍射和显微技术，研究人员能够准确鉴定合金中的相组成、晶体结构类型以及晶粒取向分布，这些信息为优化光栅的加工工艺和性能调控提供了依据。相结构表征不仅关注主相的体心立方结构，还涉及可能存在的第二相或析出相的识别与定量分析。晶体学表征则侧重于取向关系、织构强度和晶界特征的定量描述，两者共同构成了钨合金光栅微观结构评价的完整体系。

在实际研究中，相结构与晶体学表征方法往往相互补充，形成多尺度、多技术的综合分析框架。研究者根据光栅的不同制备阶段和应用需求，选择合适的表征手段，以获得高精度、高可靠性的数据。这些表征结果与合金成分设计和加工变形过程紧密关联，帮助研究人员建立微观结构参数与宏观光学性能之间的联系。相结构与晶体学表征的系统开展，为钨合金光栅的科学研制和质量控制奠定了坚实基础。

3.6.1 X 射线衍射与中子衍射技术

X 射线衍射技术是钨合金光栅相结构表征中最常用和最成熟的方法之一。它通过记录衍射峰的位置、强度和半高宽，能够有效鉴定体心立方钨相的晶格常数、织构类型以及可能的第二相存在。典型钨合金光栅样品在 X 射线衍射谱中显示出明显的 (110)、(200) 和 (211) 等体心立方特征峰，研究者通过 Rietveld 全谱拟合方法可以定量计算各相的体积分数和晶格畸变程度。X 射线衍射还适用于织构分析，通过极图或反极图测量不同晶面的择优取向分布，为光栅加工过程中的取向控制提供指导。

中子衍射技术作为 X 射线衍射的重要补充，在钨合金光栅表征中发挥独特作用。由于中子对轻元素具有较高散射能力，且穿透深度远大于 X 射线，中子衍射适合分析大体积样品内部的结构和残余应力分布。在钨合金光栅研究中，中子衍射能够提供平均晶粒取向信息和体相织构数据，避免表面效应的干扰。研究人员常将中子衍射与 X 射线衍射结果进行对比，获得从表面到内部的完整相结构图谱。这种结合使用提升了表征结果的可靠性和代表性。

两种衍射技术的联合应用还能够有效监测热处理过程中的相转变行为。研究者通过原位高温 X 射线衍射或中子衍射实验，实时跟踪晶格参数随温度的变化规律，确定相稳定区间和转变温度。这些动态表征数据为制定合理的退火工艺提供了科学依据，同时也帮助验证了热力学计算模型的准确性。X 射线衍射与中子衍射技术的综合运用，使钨合金光栅的相结构与晶体学信息更加全面和。

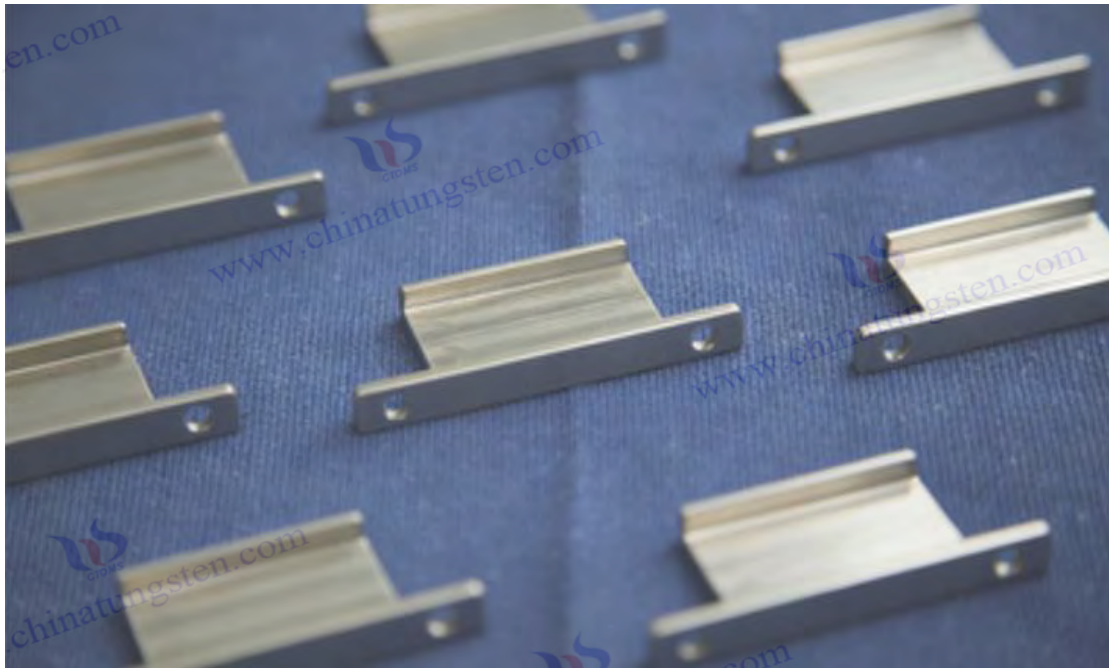
3.6.2 电子背散射衍射分析

电子背散射衍射 (EBSD) 分析是钨合金光栅晶体学表征中空间分辨率最高的技术之一。它能够在扫描电子显微镜中通过采集菊池花样，实现单晶粒取向、晶界类型和局部织构的同步测定。典型钨合金光栅样品中，EBSD 可达到 $0.1 \mu\text{m}$ 左右的空间分辨率，能够清晰区分小角度晶界和大角度晶界，并定量统计晶粒尺寸分布和取向差分布函数。研究者常用 EBSD 技术绘制反极图和晶界网络图，直观展示 (110) 纤维织构在光栅截面上的分布特征。

EBSD 分析还适合研究加工变形对微观结构的影响。通过对比变形前后的 EBSD 数据，研究人

员能够跟踪晶粒转动、再结晶形核以及织构演化过程，定量计算再结晶分数和织构强度指数。这些数据为优化变形工艺参数提供了反馈，帮助研究者将晶粒尺寸控制在理想范围，同时维持适宜的织构强度。在光栅槽形区域，EBSD 还可用于评估局部应变分布和残余应力集中情况，为表面加工质量的改进指明方向。

为了提高表征效率和数据准确性，研究者常将 EBSD 与能量色散 X 射线谱（EDS）联用，实现晶体学信息与化学成分分布的同步获取。这种联合分析能够揭示合金元素在晶界处的偏聚行为，以及第二相颗粒与基体之间的取向关系。EBSD 技术的自动化数据处理功能进一步支持大面积统计分析，使研究人员能够获得具有统计意义的微观结构参数。电子背散射衍射分析以其高分辨率和高信息量特点，成为钨合金光栅晶体学表征中不可或缺的重要手段。



中钨智造钨合金光栅图片

3.7 钨合金光栅的显微组织观察

钨合金光栅的显微组织观察是连接晶体学特征与宏观性能的重要桥梁。通过不同尺度的成像技术，研究人员能够直观呈现合金的晶粒形态、第二相分布、孔隙特征以及表面与内部组织的关联关系。这些观察结果为判断制备工艺是否合理、光栅周期结构是否均匀提供了证据。显微组织观察通常涵盖从毫米级到纳米级的多个尺度，研究者根据具体研究目标选择合适的分辨率和视场范围，以获得全面而准确的组织信息。

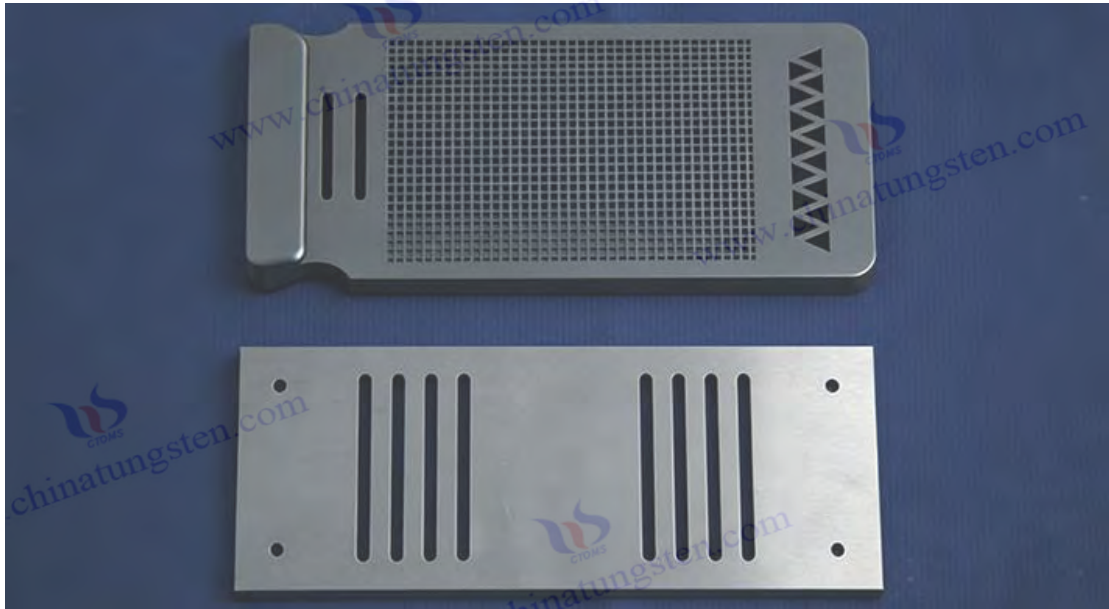
显微组织观察的过程强调样品制备的质量和观察条件的标准化。抛光、腐蚀或离子减薄等制样步骤影响图像的清晰度和对比度，而观察参数的优化则有助于突出目标特征。在钨合金光栅研究中，显微组织观察不仅用于常规质量检验，还用于跟踪热处理、变形加工和表面刻划等工艺步骤对微观结构的影响。通过系统积累的组织图像数据库，研究人员能够建立起组织特征与光栅光学性能之间的经验关联，为后续的工艺改进和材料优化提供可靠依据。

版权与免责声明

3.7.1 扫描电镜与透射电镜对比

扫描电镜与透射电镜在钨合金光栅显微组织观察中各有侧重，形成了互补的表征体系。扫描电镜主要用于观察较大视场范围内的表面形貌、晶粒轮廓和第二相分布，其二次电子像和背散射电子像能够清晰显示光栅槽形的边缘轮廓、表面粗糙度以及合金中不同衬度区域的分布。扫描电镜的景深较大，适合对三维断口或刻划表面进行立体观察，分辨率一般可达到数纳米至数十纳米级别，适用于评估光栅宏观周期结构的均匀性和缺陷尺度。

透射电镜则提供更高的分辨率，能够深入到原子尺度观察位错组态、析出相的晶体结构以及界面原子排列。透射电镜明场像和暗场像可以测量位错密度和第二相颗粒尺寸，而高分辨透射电镜模式下甚至能够成像晶格条纹，判断相界面共格关系。在钨合金光栅研究中，透射电镜常用于分析局部应变场和小角度晶界的精细结构，这些信息是扫描电镜难以获得的。两种电镜技术的对比使用，使研究员能够从表面到内部、从低倍到高倍构建完整的组织图像链条。



中钨智造钨合金光栅图片

3.7.2 聚焦离子束制样与三维重构

聚焦离子束制样技术为钨合金光栅的显微组织观察提供了高精度样品制备手段。它利用高能离子束对样品进行定点切割和减薄，能在特定位置制备出厚度均匀的薄片或针状样品，适合从光栅槽底、槽壁或晶界区域精准取样。聚焦离子束制样的优势在于空间定位精度高，可实现微米甚至亚微米级别的区域选择，避免传统机械制样中容易出现组织破坏或污染问题。

在制样完成后，研究者常常将聚焦离子束技术与扫描电镜或透射电镜结合，进行序列切片与图像采集。通过连续离子束切割和电子成像交替操作，可以获得一系列二维图像序列，随后利用计算机软件进行三维重构。三维重构技术能够直观展示晶粒在空间中的形态、第二相颗粒的三维分布以及孔隙网络的连通特征。在钨合金光栅中，这种三维视图有助于理解结构与

版权与免责声明

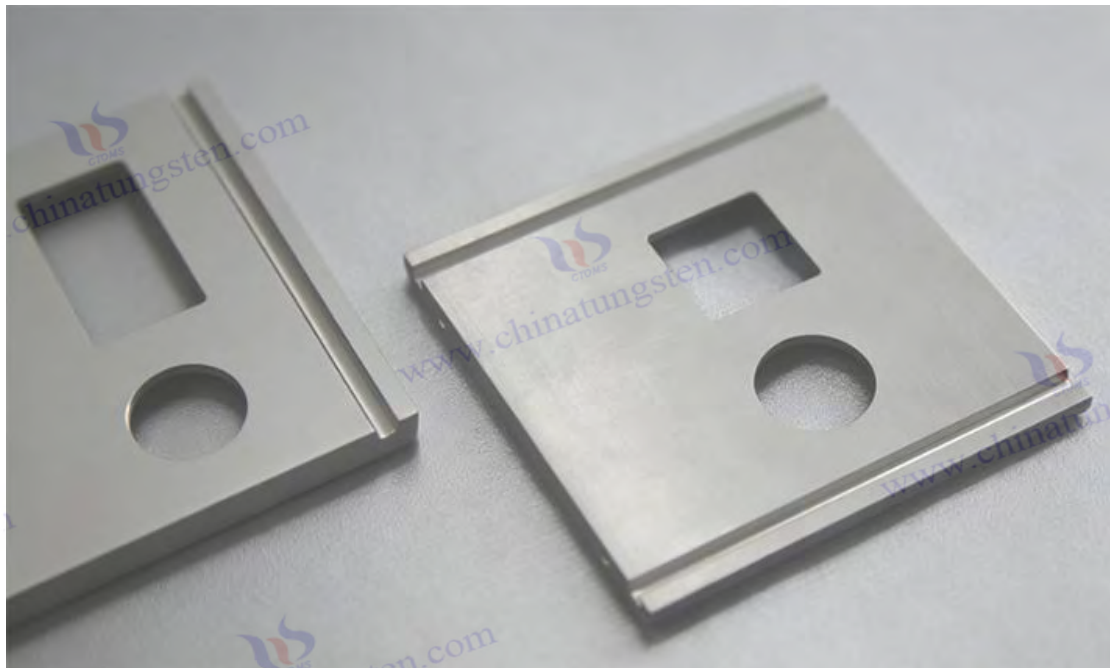
晶粒形状的关联，以及表面刻划对内部组织的影响。

三维重构结果还可进行定量分析，例如计算晶粒体积分布、第二相体积分数以及界面面积密度等参数。这些定量数据比传统的二维统计更具代表性，为微观结构模拟和性能预测提供了可靠输入。聚焦离子束制样与三维重构的结合，显著提升了光栅显微组织观察的维度和深度，使研究员能从立体视角全面认识材料的内部结构特征，并为工艺优化提供更为直观的指导。

3.8 钨合金光栅的光栅衍射性能测试

钨合金光栅的光栅衍射性能测试是评价其光学功能和实际应用价值的核心环节。通过系统测试，可以定量获得光栅对入射波的衍射效率、角分辨率、波长选择能力和杂散光抑制水平等关键参数。这些参数反映了周期结构精度、表面质量以及材料吸收特性对光学性能的综合影响。衍射性能测试通常在专用光源或模拟光路中进行，研究员根据不同波段的需求设计测试方案，并将测试结果与微观结构表征数据进行关联分析，以指导后续的结构优化和工艺改进。

测试过程强调条件的一致性和数据的可重复性。研究者需要控制入射角、波长范围和探测器响应等实验参数，同时采用标准样品进行校准，以确保测量结果的可靠性和可比性。衍射性能测试不仅用于实验室验证，还延伸到器件级应用评估中，帮助研究人员判断钨合金光栅是否满足特定光学系统的要求。通过长期积累的测试数据库，研究者能够建立起结构参数、材料特性与衍射性能之间的定量关系模型，为钨合金光栅的设计与制造提供科学支撑。



中钨智造钨合金光栅图片

3.8.1 同步辐射硬 X 射线下的衍射效率测量

同步辐射硬 X 射线下的衍射效率测量是评估钨合金光栅在高速波段性能的重要手段。同步

辐射光源提供的高亮度、宽能谱和高准直性光束，使研究人员能够测量光栅在不同入射能量下的零级、±1 级以及高级次衍射光的强度分布。典型测量中，衍射效率定义为某级次衍射光强度与入射光强度的比值，研究者通过步进扫描入射角或能量，获得效率曲线，并计算峰值效率和积分效率等指标。

在硬 X 射线波段，钨合金的高吸收系数和微米级周期结构共同影响了光栅的衍射行为。研究人员通常采用双晶单色器或多层膜单色器将光束能量调至目标范围，然后利用高分辨率探测器记录衍射图案。通过对比不同周期和槽深参数的光栅样品，可以分析结构优化对效率提升的效果。测量结果还用于评估热负载对衍射效率的影响，例如在长时间照射后观察效率衰减情况。这些数据为光栅在同步辐射装置中的实际应用提供了性能依据，也指导了表面涂层或结构设计的进一步改进。

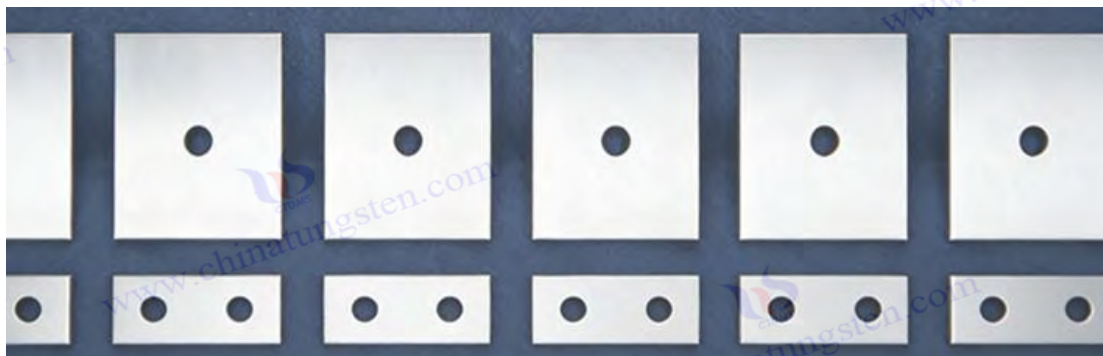
同步辐射硬 X 射线衍射效率测量的优势在于能够模拟真实工作环境，获得接近应用条件的性能参数。

3.8.2 中子光栅的衍射分辨率表征

中子光栅的衍射分辨率表征主要关注光栅对中子束的角分辨能力和波长分辨能力。在中子源设施中，研究人员利用单色或白光中子束照射光栅样品，通过位置敏感探测器或飞行时间探测器记录衍射峰的宽度和位置。分辨率通常以衍射峰半高宽对应的角度或波长间隔来表示，典型钨合金中子光栅的角分辨率可达到弧分量级，具体数值取决于周期尺度和材料对比度。

表征过程中，研究者需要仔细校准中子束的准直度和发散角，以减少仪器因素对测量结果的干扰。通过旋转光栅或改变样品-探测器距离，可以系统获取不同衍射级次的峰形数据，并计算峰值对比度和信噪比等辅助参数。钨合金的高密度特性在中子散射中提供了良好的衬度，使衍射峰更加清晰，从而有利于分辨率的提升。研究人员还通过对比不同合金组成和加工工艺制备的光栅，分析微观结构对分辨率的影响，如晶粒尺寸和第二相分布对峰宽的贡献。

中子光栅衍射分辨率的表征结果为器件在散射中子成像或中子谱学中的应用提供了性能评价依据。研究者常常将分辨率数据与模拟计算相结合，预测光栅在复杂中子光路中的整体表现，并据此优化周期参数和表面处理工艺。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{ MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{ mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{ mm/100mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与免责声明

第四章 钨合金光栅的特性

4.1 钨合金光栅的物理特性

中钨智造钨合金光栅的物理特性是其作为光学元件在实际应用中得以稳定发挥作用的重要基础。这些特性包括密度、热学参数、力学行为以及电学性质等多个方面，它们共同影响了光栅在不同工作环境下的尺寸稳定性、热管理能力及机械可靠性。研究人员在材料设计和器件制备过程中，始终将物理特性作为关键评价指标，通过成分调控和工艺优化来实现这些特性的平衡与匹配。物理特性的系统表征不仅为光栅的结构设计提供依据，还帮助研究者预测光栅在光学系统集成中的长期表现。

物理特性的表现与合金组成、微观结构以及加工历史密切相关。不同钨含量和添加元素的合金体系会呈现出各自的物理参数范围，而晶粒尺寸、织构类型和第二相分布等微观因素也会对宏观物理行为产生影响。通过多尺度研究方法，研究者逐步建立了物理特性与微观组织之间的定量联系，为钨合金光栅的性能优化提供了科学路径。在光学应用场景中，这些物理特性关系到光栅对温度波动、光束负载和机械应力的响应能力，因此成为材料开发和器件评价的核心内容之一。

4.1.1 钨合金光栅的密度与热膨胀系数

钨合金光栅的密度是其最为显著的物理特征之一，通常随着钨质量分数的增加而升高。这种高密度特性为光栅提供了良好的机械惯性和结构稳定性，在精密光学系统中有助于减少振动或外部扰动对光路对准精度的影响。研究人员通过阿基米德排水法或几何尺寸与质量测量相结合的方式，对不同合金体系的光栅样品进行密度测定，并将结果与理论计算值进行对比，以评估材料致密化程度和孔隙率水平。

热膨胀系数则是另一个关键物理参数，它反映了钨合金光栅在温度变化时尺寸变化的程度。钨基合金的热膨胀系数一般处于较低范围，这使得光栅在温度波动环境中能够保持较好的尺寸稳定性，避免因热膨胀失配而导致的光栅槽形变形或与基底材料的应力集中。研究者采用热机械分析仪或激光干涉方法，在宽温度区间内测量线性热膨胀系数，并考察合金元素添加对该参数的调节作用。通过优化成分配比，可以将热膨胀系数控制在与光学系统其他元件相匹配的水平，从而提升整体光路的热稳定性。

密度与热膨胀系数的协同作用在钨合金光栅的设计中受到高度重视。研究人员在材料筛选阶段就将这两个参数作为重要考量因素，通过热力学计算和实验验证寻找最佳平衡点。在实际应用中，高密度结合低热膨胀的特性使得钨合金光栅适合需要高精度对准和长期尺寸稳定的光学装置。持续的测量与优化工作确保了这些物理特性能够满足多样化应用场景的需求，并为后续的热学和力学性能研究奠定了基础。

4.1.2 钨合金光栅的热导率与比热容

钨合金光栅的热导率体现了材料传导热量的能力，这一特性在高功率光束照射或温度梯度环

境中尤为重要。钨基合金的热导率一般处于中等至较高水平，能够有效将吸收的热量快速扩散出去，减少光栅局部过热现象，从而维持周期结构的几何精度和光学性能的稳定性。研究者采用激光闪射法或稳态热流法对光栅样品进行热导率测量，并分析晶粒尺寸、织构取向以及第二相分布对热导率的影响。通过成分调整和微观结构调控，可以在保持其他性能的同时实现热导率的针对性优化。

比热容则描述了钨合金光栅在温度变化时吸收或释放热量的能力，它与材料的组成和相结构密切相关。钨合金的比热容数值相对稳定，在室温至较高温度区间内呈现出平缓的变化趋势，这为光栅在热循环工作条件下的温度响应预测提供了便利。研究人员利用差示扫描量热仪或绝热量热方法测定比热容曲线，并结合热导率数据计算热扩散系数，全面评估光栅的热管理性能。这些热学参数的综合表征有助于研究者设计出能够在复杂热环境中保持稳定工作的钨合金光栅。

热导率与比热容的匹配关系在钨合金光栅的实际应用中发挥着重要作用。研究者通过系统实验建立了热学参数数据库，并将其与光栅衍射性能测试结果进行关联分析，以寻找最佳的热学性能窗口。在高能光束应用场景中，合理的热导率和比热容组合能够有效降低热应力积累，延长光栅的使用寿命。通过持续的热学特性研究和优化，钨合金光栅的物理性能得到不断完善，为其在光学技术领域的广泛应用提供了坚实保障。

4.2 钨合金光栅的力学特性

钨合金光栅的力学特性是保障其在精密光学系统中长期稳定工作的关键因素。这些特性包括强度、韧性、硬度以及在不同温度条件下的力学响应行为，它们共同影响了光栅在加工、装配和使用过程中抵抗变形、断裂和疲劳的能力。研究人员在材料开发过程中，始终注重力学特性的平衡优化，通过合金成分调整、微观结构调控和热处理工艺改进，使光栅既具备足够的承载能力，又能在一定范围内表现出必要的韧性。力学特性的系统评价为光栅的结构设计和可靠性评估提供了重要依据。

力学特性的表现与钨合金的晶体结构、晶粒尺寸、织构类型以及第二相分布密切相关。体心立方结构的固有特性使得钨合金在室温下呈现出较高的强度，但也伴随一定的脆性倾向。研究者通过多种力学测试方法，结合微观组织观察，逐步建立了力学参数与微观结构特征之间的定量关系。这些关系为工艺优化提供了指导，帮助研究人员在满足光学性能要求的同时，提升光栅的整体力学可靠性。在实际应用中，良好的力学特性能够减少光栅因机械应力或温度变化而产生的结构损伤，从而延长器件的使用寿命。

4.2.1 钨合金光栅的室温与高温强度

钨合金光栅的室温强度主要体现在其屈服强度和抗拉强度上，这些参数通常随钨含量的增加和合金元素的固溶强化而呈现上升趋势。研究人员采用单轴拉伸或压缩试验，在室温条件下测定光栅样品的强度指标，并通过应力-应变曲线分析材料的弹性模量和塑性变形能力。较高的室温强度使得钨合金光栅在精密装配和长期固定过程中能够承受一定的机械载荷，而不发生明显塑性变形，这对于维持光栅周期结构的几何精度具有重要意义。

版权与免责声明

在高温环境下，钨合金光栅的强度行为表现出温度依赖性。随着温度升高，材料的屈服强度和抗拉强度逐渐降低，但通过合理添加 Re、Ta 等元素以及控制晶粒尺寸，可以有效延缓强度衰减的速率。研究者利用高温拉伸试验或压缩蠕变试验，在不同温度区间内评估光栅的强度保持能力，并考察应变速率对高温力学响应的影响。这些测试结果表明，在光学系统常见的温度范围内，光栅仍能保持较高的强度水平，从而保障其在热负载条件下的结构稳定性。

室温与高温强度的综合表现是钨合金光栅力学特性的核心内容之一。研究人员通过对比不同合金体系和加工工艺制备的光栅样品，优化了强度与韧性的匹配关系，并在实际器件制备中加以应用。持续的高温强度研究为光栅在高功率或变温光学环境中的使用提供了性能保障，也为进一步的合金设计和微观结构调控指明了方向。



中钨智造钨合金光栅图片

4.2.2 钨合金光栅的断裂韧性与脆性-韧性转变温度

钨合金光栅的断裂韧性反映了材料抵抗裂纹扩展的能力，这一参数对于防止光栅在加工或使用过程中发生突发断裂具有重要意义。研究者采用三点弯曲或紧凑拉伸试验方法，结合断口形貌观察，测定光栅样品的断裂韧性值。典型的钨合金光栅断裂韧性处于一定范围，通过细化晶粒、引入适量韧性相或优化织构取向，可以在保持较高强度的同时实现断裂韧性的适度提升。这种提升有助于改善光栅在复杂应力状态下的可靠性。

脆性-韧性转变温度是钨合金光栅力学行为中的另一个关键特征，它标志着材料从脆性断裂向韧性断裂转变的临界温度点。研究人员通过系列温度下的冲击试验或弯曲试验，确定不同合金体系的转变温度，并分析合金元素添加和微观结构调控对转变温度的调节作用。较低的脆性-韧性转变温度意味着光栅在更宽的温度区间内表现出更好的韧性行为，这对于光学系统在低温或变温环境中的应用具有积极意义。

断裂韧性与脆性-韧性转变温度的协同优化构成了钨合金光栅力学特性研究的重要方向。研究者将力学测试数据与微观组织分析相结合，探索了晶界类型、第二相分布和位错结构对韧性行为的影响。这些工作为制定合理的热处理工艺和合金成分方案提供了指导，帮助研究人员在光栅制备中实现力学性能的综合平衡。通过持续的韧性研究，钨合金光栅的力学可靠性得到不断提升，为其在精密光学领域的稳定应用奠定了坚实基础。

4.2.3 钨合金光栅的高温蠕变与持久性能

钨合金光栅的高温蠕变与持久性能是评价其在长期高温或持续应力环境下可靠性的重要指标。在光学系统中，光栅可能面临持续的热负载或机械约束，这些条件会引发缓慢的蠕变变形，进而影响周期结构的几何精度和光学性能的一致性。研究人员通过高温蠕变试验和持久强度试验，系统考察了不同合金体系和微观结构状态下光栅的变形行为和断裂寿命。这些性能参数为光栅在高温光学装置中的应用提供了设计裕度和安全评估依据。

高温蠕变与持久性能的优劣与合金成分、晶粒尺寸和第二相分布等因素紧密相关。研究者注重通过工艺调控来延长蠕变第二阶段的持续时间，并提高持久断裂寿命，从而使光栅能够在更严苛的温度和应力条件下保持结构完整性。蠕变与持久性能的系统研究不仅帮助研究人员理解材料的长期力学行为，还为热处理制度和服役条件的选择提供了科学指导。通过持续的性能优化，钨合金光栅的高温稳定性得到进一步增强。

4.2.3.1 钨合金光栅的蠕变机制与应力指数分析

钨合金光栅的蠕变机制主要包括位错攀移蠕变、晶界滑移和扩散蠕变等类型，这些机制在不同温度和应力水平下发挥主导作用。研究人员采用恒应力蠕变试验，在宽温度区间内记录应变-时间曲线，并通过最小蠕变速率与应力的双对数关系确定应力指数。典型的应力指数数值表明，在中等应力范围内，位错攀移机制往往占据主导，而在低应力高温条件下，扩散蠕变或晶界滑移的贡献会相应增加。

应力指数分析为蠕变机制的判定提供了定量依据。研究者结合激活能计算和显微组织观察，确认了不同机制转变的临界条件，并考察了合金元素固溶和第二相颗粒对机制转变的影响。这些分析结果帮助研究人员建立了蠕变速率预测模型，用于指导光栅在服役条件下的变形预期。通过调控晶粒尺寸和析出相分布，研究者能够有效抑制蠕变速率，使光栅在高温下的尺寸变化保持在可接受范围内。

蠕变机制与应力指数的系统认识为钨合金光栅的高温力学设计提供了理论支撑。研究人员将试验数据与数值模拟相结合，优化了合金组成和微观结构参数，从而在保持光学性能的同时提升蠕变抗力。这种机制研究与工程应用的结合，推动了钨合金光栅在高温光学环境中的可靠性提升。

4.2.3.2 钨合金光栅的粘结剂对蠕变抗力的影响

钨合金光栅中粘结剂的选择和含量对高温蠕变抗力具有显著影响。Ni、Fe、Co 等过渡族元

版权与免责声明

素在烧结过程中形成液相，促进致密化，但残留的粘结相在高温下可能成为蠕变弱化区域。研究人员通过对比不同粘结剂含量和种类的光栅样品，发现适量粘结剂能够改善烧结质量，而过量残留则会降低蠕变抗力，主要表现为蠕变速率增加和持久寿命缩短。

粘结剂的影响机制主要体现在晶界处液相或残留相的软化作用上。在高温蠕变过程中，这些相可能促进晶界滑移或加速扩散过程，从而改变整体蠕变行为。研究者采用显微组织分析和局部成分表征，观察了粘结相在蠕变前后的形态演变，并通过蠕变中断试验评估了其对抗变形贡献的比例。这些观察结果为粘结剂含量的优化提供了依据，帮助研究人员在保证烧结致密度的同时，将蠕变弱化效应控制在较低水平。

通过调整粘结剂类型和分布状态，研究者能够有效提升钨合金光栅的蠕变抗力。例如，采用低含量或高熔点粘结体系，可以减少高温下的软化倾向，使光栅在长期热负载下保持更好的尺寸稳定性。

4.2.4 钨合金光栅的热疲劳与热冲击行为

钨合金光栅的热疲劳与热冲击行为反映了材料在循环温度变化或突发热负载条件下的响应能力。在光学系统中，光栅可能经历反复的加热-冷却循环或瞬时高能光束照射，这些过程会诱发热应力积累和微裂纹萌生。研究人员通过热疲劳试验和热冲击试验，记录光栅表面和内部的损伤演化规律，并评估循环次数对性能退化的影响。这些行为特征为光栅在变温或脉冲工作环境中的可靠性评价提供了重要数据。

热疲劳损伤主要表现为表面氧化、晶界开裂或周期结构局部变形，而热冲击则可能导致瞬时裂纹扩展。研究者结合断口分析和无损检测技术，考察了合金成分、晶粒尺寸和织构取向对热疲劳寿命和热冲击抗力的影响。通过优化微观结构和表面处理工艺，可以有效延缓损伤积累，提高光栅承受热循环的能力。这种行为研究帮助研究人员建立了热疲劳寿命预测方法，为光栅的设计裕度选择提供了依据。

热疲劳与热冲击行为的综合调控是钨合金光栅力学特性研究的重要组成部分。研究人员将试验结果与有限元热应力模拟相结合，指导了合金体系和加工工艺的改进。通过持续的性能优化，钨合金光栅在复杂热环境中的适应性得到提升，为其在高功率或动态光学系统中的稳定应用提供了有力支持。

4.3 钨合金光栅的化学稳定性与环境适应性

钨合金光栅的化学稳定性与环境适应性是保障其在不同工作介质和温度条件下长期可靠运行的重要基础。这些特性主要涉及材料对氧化、腐蚀以及其他环境因素的抵抗能力，它们影响光栅表面质量、光学性能和使用寿命。研究人员在材料开发过程中，通过合金成分优化、表面处理和涂层保护等手段，系统提升光栅的环境适应性。化学稳定性的评价不仅包括静态暴露试验，还涵盖动态工作条件下的性能变化分析，为光栅在实际光学系统中的应用提供可靠性依据。

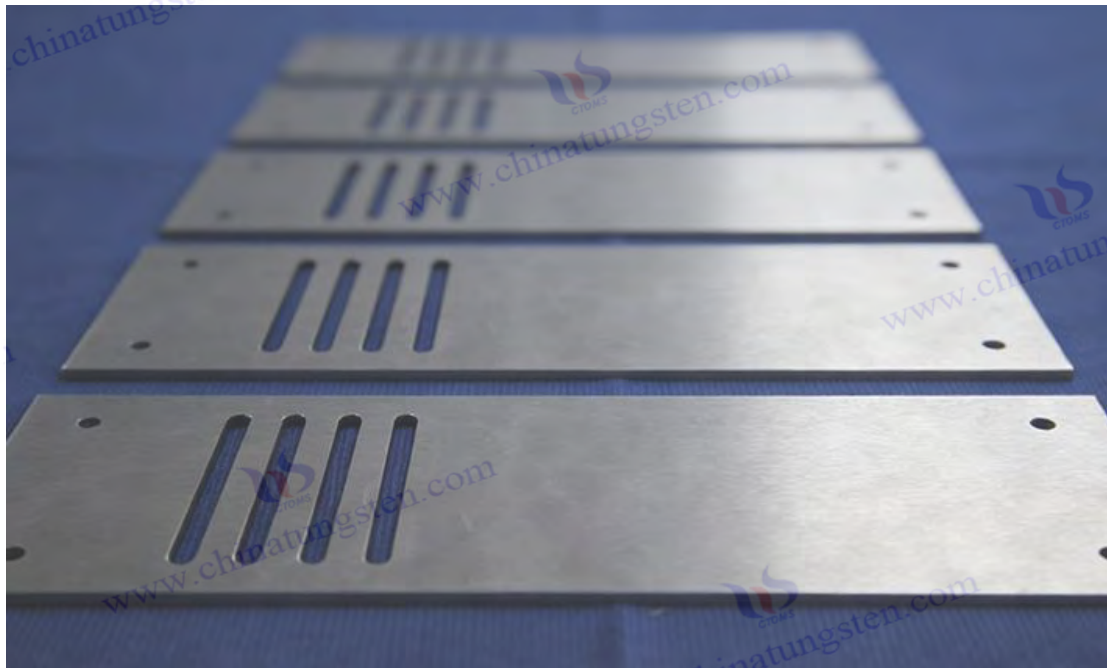
环境适应性的表现与合金微观结构、表面状态以及外部条件密切相关。研究者注重建立化学稳定性参数与微观组织特征之间的联系，通过加速试验和长期暴露试验相结合的方法，预测光栅在服役环境中的行为。这些研究成果为表面保护技术的选择和工艺参数的制定提供了指导，帮助研究人员在保持光学功能的同时，增强光栅对环境的耐受能力。化学稳定性和环境适应性的持续改进，使钨合金光栅能够更好地满足多样化光学应用的需求。

4.3.1 钨合金光栅在氧气中的氧化动力学

钨合金光栅在氧气中的氧化动力学主要表现为温度和氧分压依赖的氧化速率规律。在较低温度区间，氧化过程通常遵循抛物线规律，氧化膜的生长受扩散控制；随着温度升高，氧化速率加快，可能转变为线性或复合动力学行为。研究人员采用热重分析仪，在恒温或变温条件下记录质量增益曲线，并通过 Arrhenius 关系计算氧化激活能。这些动力学参数为评估光栅在含氧环境中的氧化敏感性提供了定量依据。

合金元素的添加对氧化动力学产生显著影响。Re、Ta 等元素的固溶能够一定程度降低氧化速率，而 Ni、Fe 等粘结相则可能在晶界处加速局部氧化。研究者通过对比不同成分光栅样品的氧化曲线，分析了微观结构因素如晶粒尺寸和织构取向对氧化行为的影响。这些分析结果帮助研究人员优化合金体系，使光栅在工作温度范围内的氧化增重保持在较低水平，从而减少表面氧化对光学性能的干扰。

氧化动力学的系统研究为光栅服役寿命预测提供了基础。研究者将试验数据与扩散模型相结合，建立氧化膜厚度随时间和温度的变化关系，并据此制定合理的环境控制措施或维护周期。这种动力学认识推动了钨合金光栅在氧化环境中的适应性提升，为后续表面保护技术的开发奠定了理论基础。



中钨智造钨合金光栅图片

4.3.2 氧化产物相组成与氧化膜结构

钨合金光栅氧化产物的相组成主要以 WO_3 为主，同时可能伴随少量复合氧化物或亚氧化物相。这些相的形成顺序和相对含量受温度、氧分压以及合金成分的影响。研究人员采用 X 射线衍射和拉曼光谱技术，对氧化后的光栅表面进行物相鉴定，并通过截面显微观察分析氧化膜的层状结构。典型氧化膜呈现外层疏松、内层相对致密的特征，层间界面清晰。

氧化膜结构对光栅性能具有双重影响。一方面，连续致密的氧化膜能够暂时阻挡氧的进一步扩散；另一方面，体积膨胀引起的应力可能导致膜层开裂或剥落。研究者通过扫描电镜和透射电镜观察了氧化膜的微观形貌和缺陷分布，结合能谱分析揭示了合金元素在膜层中的富集或偏聚现象。这些结构特征为理解氧化膜保护机制和失效模式提供了证据。

氧化产物相组成与膜层结构的系统表征，帮助研究人员建立了氧化条件与膜层质量之间的对应关系。通过调控合金成分和氧化环境参数，可以促进形成更为稳定和附着力强的氧化膜。

4.3.3 抗氧化涂层体系

抗氧化涂层体系是提升钨合金光栅化学稳定性的有效技术途径。通过在光栅表面施加保护层，可以显著降低氧化速率，延长材料在含氧环境中的使用寿命。研究人员根据光栅的工作温度和光学性能要求，选择合适的涂层材料和制备方法，确保涂层与基体之间形成良好的冶金结合，同时保持表面光学特性。涂层体系的设计强调多层结构或复合组分，以实现阻挡氧扩散、缓解热应力和自愈合等多重功能。

不同涂层体系在制备工艺、保护效果和光学兼容性方面存在差异。研究者通过循环氧化试验和热震试验，对涂层体系的抗氧化性能和附着力进行综合评价，并结合表面分析技术跟踪涂层在长期暴露过程中的演化行为。

4.3.3.1 硅化物涂层在钨合金光栅上的应用

硅化物涂层在钨合金光栅上的应用主要利用其在高温下形成致密 SiO_2 保护膜的特性。这种涂层通常通过包埋渗硅、化学气相沉积或浆料法等工艺制备，能够在光栅表面形成均匀、连续的硅化物层。研究人员观察到，硅化物涂层在氧化过程中优先形成玻璃态 SiO_2 膜，有效阻挡氧向基体的扩散，从而显著降低氧化速率。

在钨合金光栅体系中，硅化物涂层与基体之间形成过渡层，有助于缓解热膨胀失配引起的界面应力。研究者通过截面分析和划痕试验评估了涂层的结合强度，并考察了涂层厚度对光学性能的影响。

4.3.3.2 铝化物与铬化物复合涂层

铝化物与铬化物复合涂层通过协同作用提升了钨合金光栅的抗氧化能力。铝化物层在氧化时形成 Al_2O_3 保护膜，而铬化物则有助于形成 Cr_2O_3 或尖晶石相，这些氧化物膜具有较低的氧

扩散系数和较好的自愈合性能。研究人员采用多步渗镀或复合沉积工艺，在光栅表面构建梯度复合涂层结构，以实现从内层向外层的成分和性能过渡。

复合涂层体系的优势在于能够同时缓解热应力和氧扩散问题。研究者通过循环氧化试验验证了涂层的长期保护效果，并利用电子探针分析了元素扩散行为和相演化规律。这些结果表明，铝化物与铬化物复合涂层在较高温度下表现出优异的稳定性，同时对光栅光学表面质量的影响控制在可接受范围内。通过进一步的成分和厚度优化，该复合涂层体系为钨合金光栅在严苛氧化环境中的应用提供了更全面的保护方案。

4.3.4 在真空与惰性气氛中的长期稳定性

钨合金光栅在真空与惰性气氛中的长期稳定性表现为其在低氧或无氧环境下的结构和性能保持能力。在真空条件下，光栅表面几乎不发生氧化反应，主要面临的是可能的挥发损失和微量杂质的交互作用。研究人员通过长时间真空退火试验，监测光栅质量变化、表面形貌演变以及周期结构参数的稳定性，观察到在适当温度范围内，钨合金光栅能够维持良好的尺寸精度和光学特性。

惰性气氛如氩气或氮气环境中，光栅的稳定性进一步提升。研究者采用管式炉或真空腔体进行长期保温试验，定期取出样品进行表面分析和衍射性能测试。结果表明，合金元素在惰性气氛中扩散行为较为缓慢，晶界和表面状态保持相对稳定，从而减少了性能退化的风险。通过调控气氛纯度和压力参数，可以进一步延长光栅在这些环境中的服役时间。

长期稳定性的评估还涉及微观组织演化观察。研究人员结合扫描电镜和透射电镜分析，发现晶粒长大速率较低，第二相颗粒分布变化不明显。这些特征为光栅在真空或惰性气氛光学装置中的应用提供了信心，也为制定维护周期和使用条件提供了参考依据。

4.3.5 耐腐蚀行为与化学惰性分析

钨合金光栅的耐腐蚀行为体现在其对酸、碱、盐溶液以及其他化学介质的抵抗能力上。钨基体本身具有较高的化学惰性，但在合金元素引入后，局部电化学行为可能发生变化。研究人员采用浸泡试验、电化学极化曲线测量和交流阻抗谱技术，系统评价光栅在不同腐蚀介质中的腐蚀速率和腐蚀形态。典型结果显示，在中性或弱酸性环境中，钨合金光栅表现出较低的腐蚀电流密度和较好的钝化倾向。

化学惰性分析重点关注合金元素对腐蚀电位和腐蚀产物的影响。Ni、Fe 等元素可能在晶界处形成微电池，而 Ta、Mo 等高熔点元素则有助于提升整体耐蚀性。研究者通过腐蚀后表面和截面观察，分析了点蚀、晶间腐蚀等可能出现的损伤模式，并结合能谱分析揭示腐蚀产物的组成。这些分析结果为选择合适的工作介质和表面保护措施提供了指导。

耐腐蚀行为的优化还涉及表面处理和涂层辅助。研究人员通过对比裸露光栅与表面改性光栅的腐蚀数据，确定了提升化学惰性的有效途径。这种系统评价确保了钨合金光栅在可能接触化学试剂的光学环境中保持性能稳定，为其应用范围的扩展奠定了基础。

版权与免责声明

4.4 钨合金光栅的射线屏蔽性能

钨合金光栅的射线屏蔽性能源于其高密度和高原子序数特性，使其在射线环境中能够有效衰减入射辐射，同时保持必要的结构和光学功能。研究人员通过辐射屏蔽试验和理论计算相结合的方法，定量评估光栅对不同能量射线的屏蔽效果。这些性能参数为光栅在涉及射线应用的精密光学系统中的集成设计提供了参考，也帮助研究者平衡屏蔽能力与光学透过特性。

射线屏蔽性能的评价通常在专用辐射源或模拟计算环境中进行。研究者关注屏蔽效率、二次辐射产生以及长期辐照后的性能稳定性，通过这些指标综合判断光栅的适用性。持续的屏蔽性能研究推动了钨合金光栅在相关领域的应用，并为材料改性和结构优化提供了方向。

4.4.1 钨合金光栅对 X 射线与 γ 射线的衰减机制

钨合金光栅对 X 射线与 γ 射线的衰减主要通过光电效应、康普顿散射和电子对产生等机制实现。在较低能量 X 射线区域，光电效应占据主导地位，钨的高原子序数使其具有较高的吸收截面，能够有效将光子能量转化为电子动能。在较高能量 γ 射线范围内，康普顿散射和电子对产生成为主要衰减方式，材料的密度优势进一步增强了单位厚度内的相互作用概率。

研究员采用蒙特卡罗模拟和实验测量相结合的方法，计算和验证不同厚度光栅的线性衰减系数和质量衰减系数。典型结果显示，钨合金光栅在常用 X 射线能量范围内的衰减能力显著优于常规材料，而在 MeV 级 γ 射线能量下仍能提供有效的屏蔽效果。合金元素的添加和微观结构调控会对衰减机制产生微弱但可控的影响，如第二相颗粒可能略微改变局部散射行为。

衰减机制的深入理解为光栅结构设计提供了指导。研究者根据具体能量范围优化光栅周期和厚度参数，在实现必要屏蔽的同时，尽量减少对衍射性能的干扰。这种机制分析确保了钨合金光栅在射线相关光学应用中的性能平衡，也为进一步的屏蔽性能提升积累了理论基础。

4.4.1.1 光电效应、康普顿散射与电子对产生的贡献

光电效应在钨合金光栅对 X 射线与 γ 射线的衰减中发挥关键作用，尤其在能量低于 500 keV 的区域，其贡献比例最高。高原子序数的钨原子使光电吸收截面显著增大，光子与内层电子相互作用后产生光电子和特征 X 射线，能量被迅速转化为热量或二次辐射。研究人员通过能谱模拟计算发现，在典型硬 X 射线能量范围内，光电效应对总衰减的贡献可达 60%至 80%，成为主导衰减机制。

康普顿散射的贡献随入射光子能量升高而逐渐增大。在 1 MeV 至 10 MeV 区间，康普顿散射成为主要过程，入射光子与外层电子发生非弹性碰撞，部分能量转移给反冲电子，同时散射光子方向发生改变。钨合金的高电子密度增强了散射概率，使得光栅能够有效分散入射辐射的能量分布。研究者观察到，康普顿散射的贡献在中等能量区域可占总衰减的 40%至 70%，其各向异性特征也影响了屏蔽设计中的二次辐射管理。

电子对产生机制主要在能量高于 1.022 MeV 的 γ 射线区域发挥作用。当光子能量超过电子

对产生阈值时，在钨原子核库仑场作用下，光子转化为正负电子对，剩余能量以动能形式分配给电子和正电子。该机制的贡献随能量继续升高而迅速增加，在超高能区域可超过 80%。钨合金的高原子序数和密度优势显著提升了电子对产生的概率，使光栅在高能 γ 射线环境下表现出优异的衰减能力。研究人员通过分能量段贡献分析，建立了三种机制在不同能量区间的权重分布，为光栅厚度优化和多层屏蔽设计提供了依据。

4.4.1.2 质量衰减系数与能量依赖性分析

钨合金光栅的质量衰减系数随入射光子能量呈现明显的非单调依赖关系。在低能区（10 keV 至 100 keV），质量衰减系数较高，主要受光电效应驱动，随能量升高而快速下降。在过渡能量区（100 keV 至几 MeV），系数进入平台或缓慢下降阶段，康普顿散射逐渐占据主导。在 高能区（大于 10 MeV），电子对产生机制使质量衰减系数再次缓慢回升。

研究人员利用标准数据库和蒙特卡罗模拟工具，计算了不同钨含量合金在宽能量范围内的质量衰减系数曲线。结果显示，纯钨的质量衰减系数在常用硬 X 射线能量下可达较高数值，而合金元素的加入会根据其原子序数对曲线产生微调作用。例如，添加较高原子序数的元素可略微提升低能区的系数，而低原子序数元素则主要影响高能区的行为。通过能量依赖性分析，研究者能够为特定应用波段选择最优的合金组成和光栅厚度，实现屏蔽效率与材料用量的最佳平衡。

能量依赖性分析还揭示了钨合金光栅在复杂能谱下的屏蔽特点。研究人员将多能量叠加模拟与实验验证相结合，评估了白光束或连续谱条件下的有效衰减系数。这些工作为光栅在同步辐射或放射源环境中的性能预测提供了可靠模型，也指导了针对性结构设计的开展。

4.4.2 钨合金光栅的线衰减系数与半值层厚度

钨合金光栅的线衰减系数反映了单位厚度材料对射线的衰减能力，其数值与材料密度和质量衰减系数相关。半值层厚度则定义为使入射强度衰减至一半所需的材料厚度，是屏蔽设计中常用的实用参数。研究人员通过窄束几何条件下的透射试验或模拟计算，测定不同能量下的线衰减系数和对应的半值层厚度，为光栅厚度选择提供定量指导。

线衰减系数与半值层厚度的关系遵循指数衰减规律，研究者通过拟合透射曲线验证了 Beer-Lambert 定律在钨合金光栅中的适用性。这些参数的测定结果帮助研究人员在满足屏蔽要求的同时，控制光栅整体尺寸和重量，适应精密光学系统的空间限制。持续的测试工作还建立了温度和辐照剂量对线衰减系数的影响规律，确保光栅在长期使用中的屏蔽性能稳定性。

4.4.2.1 不同钨含量合金的线衰减系数比较

不同钨含量合金的线衰减系数随钨质量分数的增加而显著升高。高钨含量合金因密度优势，在相同能量下表现出更高的线衰减系数，从而需要较小的厚度即可达到相同的屏蔽效果。研究人员对钨含量从 80% 至 95% 范围内的合金光栅进行了系统比较，发现在硬 X 射线能量区间，高钨含量样品的线衰减系数可比低钨含量样品高出 20% 至 50%。

比较研究还考察了合金元素种类对线衰减系数的影响。添加 Re、Ta 等高原子序数元素能够进一步提升系数，而 Ni、Fe 等较低原子序数元素则主要通过密度调节间接影响衰减能力。通过多组对比试验，研究者建立了钨含量、合金组成与线衰减系数之间的经验关系式，为光栅材料选型提供了实用工具。这种比较分析确保了在不同应用场景下能够选择最适宜的合金体系，实现屏蔽性能与加工性能的优化平衡。

4.4.2.2 硬 X 射线与超硬 X 射线下的屏蔽效率

在硬 X 射线能量范围内（几十 keV 至几百 keV），钨合金光栅的屏蔽效率主要依赖光电效应和康普顿散射的叠加贡献。高密度特性使光栅能够在较薄厚度下实现较高的衰减比例，研究人员通过透射试验测得，在典型同步辐射硬 X 射线能量下，1 mm 厚的高钨含量光栅可将入射强度衰减至初始值的百分之几以下。

进入超硬 X 射线和 γ 射线区域（MeV 级），电子对产生机制逐渐增强，屏蔽效率随能量升高呈现先下降后趋于稳定的趋势。研究者采用高能辐射源或加速器设施进行验证试验，发现钨合金光栅在超硬 X 射线下的屏蔽效率仍保持在较高水平，半值层厚度通常控制在数毫米范围内。通过多层或梯度结构设计，研究人员进一步提升了宽能谱条件下的整体屏蔽效率，同时兼顾了光栅的光学功能需求。

硬 X 射线与超硬 X 射线下的屏蔽效率对比为光栅在不同射线设施中的应用提供了选择依据。研究者将效率数据与实际装置运行条件相结合，优化了光栅厚度与周期参数的匹配关系，确保屏蔽性能与衍射功能实现良好协同。

4.4.3 钨合金光栅对散射辐射的抑制能力

钨合金光栅对散射辐射的抑制能力是其在成像和探测系统中发挥关键作用的重要特性。高密度钨合金能够有效吸收或偏转偏离原始方向的散射光子，显著降低背景噪声，提高图像对比度和信噪比。研究人员通过专用散射测量装置和蒙特卡罗模拟，系统评价了光栅在不同几何条件和能量范围下的散射抑制效果。这些能力使钨合金光栅适合需要高清晰度辐射成像的应用场景，同时保持了光栅自身的光学调控功能。

散射抑制能力的强弱与光栅的周期结构、槽深、材料密度以及表面处理状态密切相关。研究者注重将散射抑制性能与一次辐射透过率进行平衡优化，通过调整结构参数实现最佳的综合效果。这种抑制能力不仅提升了系统的整体成像质量，还减少了探测器接收到的无用信号，从而降低剂量需求或延长器件寿命。对散射辐射抑制能力的深入研究，为钨合金光栅在医学、工业和科学研究成像设备中的应用提供了性能保障。

4.4.3.1 在 CT 抗散射栅格中的一次/二次辐射对比

在 CT 抗散射栅格应用中，钨合金光栅通过其周期性吸收结构有效区分一次辐射与二次辐射。一次辐射指沿直线路径到达探测器的原始 X 射线束，而二次辐射主要来自患者或物体内部的康普顿散射光子。研究人员在 CT 模拟光路或实际扫描系统中，分别测量有无抗散射栅格

时的辐射强度分布，并计算一次辐射透过率与二次辐射抑制率。

典型对比结果显示，采用钨合金抗散射栅格后，二次辐射强度可降低至原水平的 20% 以下，而一次辐射的透过率仍能保持在较高水平。这种对比优势源于钨合金的高吸收系数和的槽形设计，使散射光子在经过多个吸收壁时被充分拦截。研究者通过改变管电压和体模厚度进行参数扫描，验证了栅格在不同临床条件下的稳定抑制性能。一次/二次辐射的定量对比为 CT 图像对比度提升和伪影减少提供了证据，也指导了栅格几何参数的进一步优化。

在实际 CT 系统中，这种抑制能力有助于改善低对比度组织的可视化，并降低患者接受的散射剂量。研究人员还将栅格性能与传统铅栅进行比较，发现钨合金栅格在相同厚度下表现出更高的选择性透过能力。这些对比研究强化了钨合金光栅在现代 CT 设备中的应用价值，推动了高性能抗散射技术的持续发展。

4.4.3.2 相衬成像系统中散射背景降低的定量评估

在相衬成像系统中，钨合金光栅对散射背景的降低能力通过 Talbot-Lau 干涉仪或类似多光栅配置得到充分发挥。散射背景主要来源于样品内部的多重散射，会模糊相位信息并降低条纹可见度。研究人员采用强度调制和相位提取算法，定量比较有无钨合金光栅时的背景噪声水平和干涉条纹对比度。

评估结果表明，引入钨合金吸收光栅后，散射背景强度可降低 30% 至 70%，条纹可见度相应提高 1.5 至 3 倍。这种降低效果与光栅周期、槽深和材料对比度密切相关，较高密度的钨合金能够更有效地吸收偏离方向的散射光子。研究者通过改变样品厚度和散射体材料进行系列试验，建立了散射抑制率与系统参数之间的定量关系模型。这些模型为相衬成像装置的设计和光栅选型提供了可靠依据。

定量评估还包括长期稳定性考察。研究人员在重复曝光条件下监测散射背景的变化，发现优化后的钨合金光栅能够维持稳定的抑制性能，而不出现明显的退化。这种评估结果验证了光栅在相衬成像系统中的实用价值，也为进一步降低散射噪声、提升相位分辨率指明了优化方向。通过散射背景降低的系统研究，钨合金光栅显著增强了相衬成像技术的图像质量和临床或科研适用性。

4.4.4 钨合金光栅对中子辐射的屏蔽与慢化特性

钨合金光栅对中子辐射的屏蔽与慢化特性结合了材料的高密度优势与周期性结构设计，能够在中子环境中实现快中子的能量减缓和热中子的选择性吸收。研究人员在中子源设施或模拟光路中，通过透过率测量和能量谱分析，系统考察了光栅对不同能量中子的作用效果。这些特性使钨合金光栅在需要中子屏蔽的探测或成像系统中表现出良好的适应性，同时保留了其光学调控功能。

屏蔽与慢化过程依赖于合金基体的散射能力和周期结构的吸收作用。高密度钨基体通过多次弹性碰撞降低快中子速度，而光栅槽形则针对热中子提供有效拦截路径。研究者注重在设计

中平衡慢化深度与吸收选择性，避免二次辐射的过度积累。这种综合特性为光栅在中子相关光学应用中的性能优化开辟了路径，也推动了相关系统的整体可靠性提升。

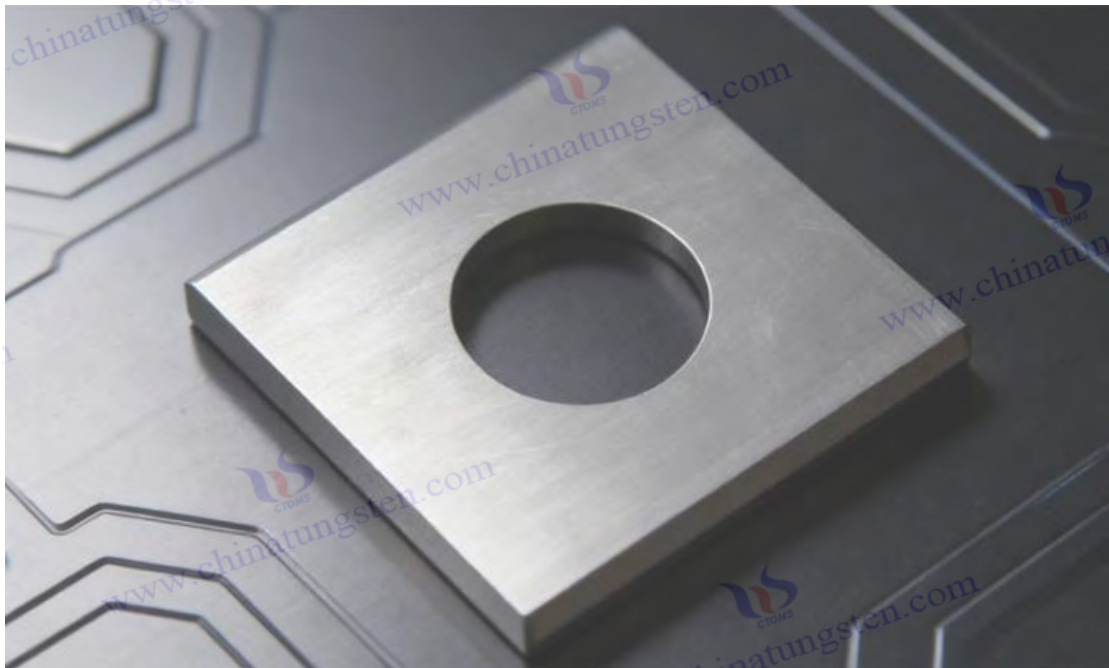
中子屏蔽与慢化能力的评价还涉及长期辐照条件下的稳定性考察。研究人员通过加速中子照射试验，监测光栅微观组织和光学参数的变化趋势，确保材料在服役过程中保持结构完整性。这些评估结果为实际装置中的光栅选型提供了参考依据，并指导了合金组成与几何参数的协同调整。通过持续的研究工作，钨合金光栅在中子环境中的屏蔽与慢化性能得到稳步完善。

4.4.4.1 热中子与快中子俘获截面

钨合金光栅中钨元素的俘获截面呈现出明显的能量依赖特征，在热中子区域数值较低，而在快中子区域表现出一定的共振俘获倾向。这种差异使得纯钨基合金在热中子屏蔽中需要辅助增强，但在快中子慢化阶段能够依靠散射过程发挥主要作用。研究人员结合核数据库分析和中子谱仪测量，系统梳理了合金元素对整体俘获截面的调节规律。

快中子俘获截面主要受钨的高质量数影响，弹性散射机制有助于将中子能量逐步转移给晶格原子。热中子俘获则更多依赖于材料中其他组分的贡献，研究者通过成分微调优化了截面分布，使光栅在宽能量谱中的屏蔽行为更趋平衡。这些截面特征的认识为理解中子与钨合金相互作用的微观机制提供了基础，也支持了后续复合改性策略的制定。

俘获截面的能量依赖性分析还延伸到光栅结构参数的匹配设计。研究人员根据不同中子能量区的截面特点，调整周期尺度和槽形深度，以实现更有效的慢化和吸收协同。通过这种方式，钨合金光栅能够在复杂中子环境中维持稳定的屏蔽性能，并为相关光学系统的集成应用积累了实用经验。



中钨智造钨合金光栅图片

4.4.4.2 硼或镉复合钨合金光栅的中子吸收增强策略

硼或镉复合钨合金光栅通过引入高热中子俘获能力的元素，显著提升了整体吸收性能。硼在复合体系中形成局部高吸收区域，而镉则提供强热中子捕获特性。研究人员采用粉末共混或表面复合工艺，将这些元素均匀融入钨基体，形成梯度或分层结构以针对不同中子能量实现增强吸收。

复合策略强调元素分布的优化控制，避免对钨合金机械性能和光学表面质量造成不利影响。研究者通过中子透过试验和微观组织观察，验证了复合后吸收能力的提升效果，并考察了硼或镉含量对慢化过程的协同作用。这些策略帮助实现了热中子吸收的针对性强化，同时保持了光栅在快中子区域的散射慢化功能。

硼或镉复合方式的灵活性还体现在制备路线的多样性上。研究人员根据应用场景选择合适的复合工艺，例如渗入法或多层沉积法，以适应不同光栅尺寸和周期要求。这种增强策略不仅扩展了钨合金光栅在中子屏蔽领域的适用范围，还为复杂中子光学系统的设计提供了更多材料选择空间。通过持续的复合优化，钨合金光栅的中子吸收性能得到有效提升。

4.4.5 影响钨合金光栅射线屏蔽性能的关键因素

影响钨合金光栅射线屏蔽性能的关键因素主要包括材料密度、几何厚度、合金组成、微观结构均匀性以及表面状态等。这些因素相互关联，共同影响光栅在不同能量射线下的衰减效果和实际应用表现。研究人员通过系统实验和数值模拟，逐一剖析各因素对屏蔽效率的具体贡献，并建立起参数优化模型，以实现屏蔽性能与光学功能之间的最佳平衡。

在实际设计过程中，研究者需要综合考虑这些关键因素的权重分配。例如，在空间受限的应用场景中，厚度与密度的匹配显得尤为重要；而对于宽能谱辐射环境，则需要关注合金组成对不同机制的调控作用。通过对关键因素的深入分析，研究人员能够针对特定光学系统需求进行针对性优化，提升钨合金光栅的整体屏蔽可靠性和实用性。这些因素的系统认识为光栅的工程化应用提供了科学指导，也推动了屏蔽性能的持续改进。

4.4.5.1 密度对钨合金光栅屏蔽效率的影响

密度是影响钨合金光栅屏蔽效率的最和最显著的因素之一。随着材料密度的增加，单位体积内原子核和电子的数量相应增多，从而显著提升了对入射射线的相互作用概率。在相同厚度和能量条件下，高密度钨合金光栅的线性衰减系数更高，能够在较短路径内实现更有效的能量吸收和散射。

研究人员通过制备不同钨含量和致密化程度的合金样品，系统对比了密度从 15 g/cm^3 至 19 g/cm^3 范围内的屏蔽性能变化。结果显示，在硬 X 射线能量区间，密度每提高 1 g/cm^3 ，屏蔽效率可提升约 8% 至 15%，而在 γ 射线高能区，这一提升幅度也保持在较为稳定的水平。高密度带来的优势不仅体现在一次衰减上，还表现在对二次辐射的抑制能力增强，因为更高的电子密度强化了康普顿散射和电子对产生过程。

版权与免责声明

然而，密度对屏蔽效率的影响并非线性无限放大。当密度接近理论极限时，继续提升带来的边际收益会逐渐减小，同时加工难度和成本也会相应增加。研究者因此在材料开发中注重寻找密度与加工性能、光学表面质量之间的平衡点，通过优化粉末冶金工艺和热处理参数，在保证较高密度的同时，避免孔隙或组织不均匀对屏蔽均匀性的不利影响。这种密度调控策略为钨合金光栅在重量敏感或空间紧凑的光学系统中提供了灵活的设计空间。

4.4.5.2 厚度对钨合金光栅屏蔽效率的影响

厚度对钨合金光栅屏蔽效率的影响遵循指数衰减规律，即随着厚度增加，透射强度呈指数形式下降，而屏蔽效率则相应提高。在实际应用中，厚度是调节屏蔽性能最直观的可控参数之一。研究人员通过制备系列不同厚度的光栅样品，在固定能量和入射条件下测量透射曲线，并拟合得到半值层厚度等关键指标。

在硬 X 射线波段，厚度从 0.5 mm 增加到 2 mm 时，屏蔽效率可从约 70% 提升至 95% 以上，而在更高能量的 γ 射线区域，达到相同屏蔽水平所需的厚度也会相应增大。研究者发现，厚度对屏蔽效率的影响还与光栅的周期结构和槽形设计存在交互作用。过大的厚度虽然能显著提高衰减能力，但可能导致一次辐射的透过率下降过多，影响光学系统的信号强度。因此，研究员在设计中采用多目标优化方法，寻找同时满足屏蔽要求和光学性能的最优厚度范围。

厚度调控还涉及加工工艺的可行性。研究者通过精密机械加工或增材制造技术，实现了对光栅厚度的控制，并在不同厚度样品上验证了微观结构均匀性和表面质量的一致性。这些工作表明，合理的厚度选择不仅能有效提升屏蔽效率，还能兼顾光栅的机械稳定性和热管理需求。通过厚度与密度、合金组成的协同优化，钨合金光栅能够在各种射线环境中实现性能的针对性匹配，为精密光学系统的集成应用提供可靠保障。

4.4.5.3 周期结构对钨合金光栅屏蔽效率的影响

周期结构对钨合金光栅屏蔽效率的影响体现在几何参数与吸收路径的协同作用上。光栅的周期、槽深和占空比共同影响了射线在材料中的有效穿行距离和相互作用次数。较小的周期和较高的占空比能够增加射线与吸收壁的碰撞概率，从而提升整体衰减效果；反之，较大的周期则可能允许更多射线以较少相互作用的方式通过，降低屏蔽效率。

研究人员通过制备系列不同周期和槽形参数的光栅样品，在固定能量和入射角条件下进行透射试验。结果显示，在硬 X 射线能量范围内，当周期从数十微米减小到几微米时，屏蔽效率可提高 10% 至 25%，主要归因于增加了散射和吸收的路径长度。周期结构的影响还与射线入射方向相关，当入射方向与光栅槽形对齐时，屏蔽效果更为显著，而倾斜入射时则需要通过优化槽深来补偿路径损失。

周期结构的优化需要在屏蔽效率与光学衍射功能之间寻找平衡。过密的周期虽然有利于屏蔽，但可能增加加工难度并影响一次辐射的透过率。研究者采用蒙特卡罗模拟结合实验验证的方法，建立了周期参数与屏蔽效率的定量关系模型，为光栅设计提供了指导。通过合理调控周期结构，钨合金光栅能够在保持光学性能的同时，实现对射线更有效的屏蔽。

版权与免责声明

4.4.5.4 粘结剂添加对钨合金光栅屏蔽性能的调制作用

粘结剂添加对钨合金光栅屏蔽性能的调制作用主要通过改变材料密度和局部原子组成来实现。Ni、Fe、Co 等粘结剂元素的原子序数和密度均低于钨，在烧结过程中形成液相促进致密化，但同时会稀释整体的高原子序数优势。适量粘结剂能够改善合金均匀性，减少孔隙，从而间接提升屏蔽效率；而过量添加则会降低有效密度，导致线衰减系数下降。

研究人员对比了不同粘结剂含量（5%至 15%范围）的光栅样品在相同能量下的屏蔽性能。实验结果表明，当粘结剂含量控制在较低水平时，屏蔽效率的下降幅度有限，且合金的加工性能和微观均匀性得到改善，有利于形成一致的吸收路径。当粘结剂含量较高时，屏蔽效率在低能区下降更为明显，主要因为低原子序数元素对光电效应的贡献较小。研究者还观察到，粘结剂分布的均匀性对屏蔽性能有重要影响，偏聚现象可能在局部形成低吸收区域，降低整体效率。

通过优化粘结剂种类和添加方式，研究人员能够实现对屏蔽性能的精细调制。例如，采用高熔点或高原子序数的辅助元素替代传统粘结剂，可以在保持烧结性能的同时，减少对屏蔽能力的负面影响。这种调制作用的研究为合金配方设计提供了实用指导，帮助研究者在材料致密化与屏蔽性能之间取得合理平衡。

4.4.5.5 微观孔隙、表面粗糙度与界面缺陷的负面效应

微观孔隙、表面粗糙度与界面缺陷对钨合金光栅屏蔽性能产生明显的负面效应。这些缺陷会降低材料的有效密度，增加射线穿行的无效路径，并可能引起局部散射增强或吸收不均。微观孔隙作为低密度区域，会使局部线衰减系数下降，导致整体屏蔽效率降低，尤其在需要高均匀性衰减的应用中表现更为突出。

表面粗糙度主要影响入射射线的初始相互作用。较高的表面粗糙度会增加漫反射和散射成分，减少有效吸收路径，同时可能在光学表面引入额外噪声。研究人员通过原子力显微镜和扫描电镜定量表征了不同加工条件下的表面粗糙度，并与屏蔽试验结果进行关联分析，发现粗糙度每增加一定数值，屏蔽效率会出现可测量的下降。

界面缺陷如晶界偏聚、第二相团聚或涂层剥离等，会在材料内部形成弱吸收或高散射区域。研究者采用断口分析和三维重构技术观察了缺陷分布对射线路径的影响，结果表明，这些缺陷会造成屏蔽效率的局部波动，甚至在长期辐照后引发性能退化。通过控制制备工艺、优化热处理参数和改善表面处理技术，研究人员能够有效减少这些负面效应，使钨合金光栅的屏蔽性能保持在较高且稳定的水平。

4.5 中钨智造钨合金光栅 MSDS

产品名称：钨合金光栅（Tungsten Alloy Grating）

产品别名：高密度钨合金光学光栅、钨基合金周期结构元件

制造商/供应商：中钨智造（厦门）科技有限公司，简称中钨智造，英文 CTIA GROUP LTD

版权与法律责任声明

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

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

联系电话：0086 592 5129696 / 0086 592 5129595

第一部分 化学品及企业标识

钨合金光栅主要成分：钨（W）含量通常 65%~97%，辅以镍（Ni）、铁（Fe）、铜（Cu）或其他合金元素（如 Re、Ta、Mo 等，具体配比依产品型号而定）。

CAS 号：主要组分钨为 7440-33-7。

产品形态：固体块状、板状或精密加工的周期性光栅结构元件，主要用于光学调控、射线屏蔽或精密成像领域。

主要用途：光学分光、相衬成像、抗散射栅格、辐射屏蔽等精密光学与检测应用。

企业标识：中钨智造作为专业钨合金制品生产商，产品符合相关质量与安全标准。



中钨智造钨合金光栅图片

第二部分 危险性概述

钨合金光栅作为固体成品，在正常使用、储存和运输条件下不属于危险化学品，无急性毒性、无易燃易爆性、无腐蚀性。

健康危害：成品对皮肤、眼睛和呼吸道无刺激。仅在机械加工（如切割、磨削、钻孔）时可能产生金属粉尘或烟雾，长期吸入粉尘可能引起轻微呼吸道刺激。

环境危害：对环境无显著危害，但粉尘或废屑应避免进入水体。

燃爆危险：固体不可燃；细粉尘在特定条件下（如高温、高浓度分散并遇强氧化剂）可能存在燃烧风险。

GHS 分类：成品通常不分类为危险品；加工产生的粉尘可能需注意呼吸防护。

第三部分 成分/组成信息

钨合金光栅主要成分：

版权与免责声明

钨 (W): 65%~97%

镍 (Ni): 0%~10% (部分体系)

铁 (Fe): 0%~5%

铜 (Cu): 0%~5%

其他微量合金元素: 依具体型号可能含 Re、Ta、Mo 等。

有害成分: 成品中无游离有害物质; 加工时可能产生钨氧化物或镍化合物粉尘。

第四部分 理化特性

外观与性状: 银灰色或金属光泽固体, 光栅表面具有精密周期微结构。

密度: 15~19 g/cm³ (依钨含量而定)。

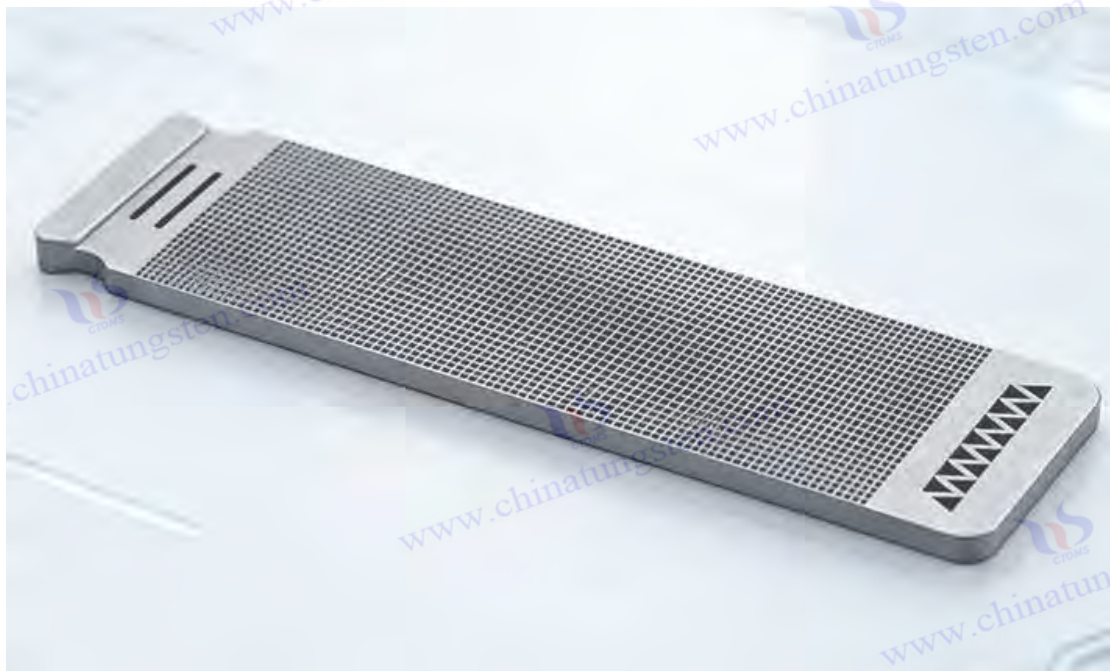
熔点: 约 3400° C (钨基体)。

第五部分 稳定性和反应活性

化学稳定性: 常温下稳定。

禁配物: 强氧化剂、强酸、强碱、卤素。

避免条件: 高温加工时避免产生大量细粉尘。



中钨智造钨合金光栅图片

第六部分 毒理学信息

钨合金光栅无毒无放射性。

第七部分 生态学信息

对环境无显著生物积累或急性毒性。

废料应按固体废物规范处置, 避免进入水体。

版权与免责声明

第八部分 急救措施

注意：加工现场产生的粉尘接触后，按下述处理。

皮肤接触：用大量清水冲洗，无需特殊处理。

眼睛接触：提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗至少 15 分钟，如有不适就医。

吸入：将人员移至新鲜空气处，保持呼吸道通畅；如出现呼吸困难，及时就医。

食入：成品不易误食；若误食大量粉尘，饮足量温水并催吐，就医观察。

第九部分 消防措施

固体产品本身不燃。

第十部分 泄漏应急处理

固体产品本身不泄漏。



中钨智造钨合金光栅图片

第十一部分 操作处置与储存

操作注意：加工时采用湿法或带局部排风的设备，减少粉尘产生；操作人员佩戴防尘口罩、护目镜、手套和工作服。

储存注意：置于阴凉、干燥、通风库房；远离强酸、强碱、氧化剂和卤素；成品堆放稳固，避免碰撞损坏周期结构。

第十二部分 接触控制与个体防护

手部防护：手套。

第十三部分 废弃处置

按当地固体废物管理规定处置；回收利用优先；加工废屑送专业机构处理。

第十四部分 运输信息

运输分类：非危险货物。

包装要求：牢固包装，防止碰撞和潮湿。

运输注意事项：避免剧烈震动和雨淋。

第十五部分 法规信息

遵守《化学危险品安全管理条例》、《工作场所安全使用化学品规定》等相关法律法规，以及 GB 16229 等钨卫生标准。

版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{mm}/100 \text{mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与免责声明

第五章 钨合金光栅的生产方法

5.1 钨合金光栅的粉末冶金制备工艺

中钨智造钨合金光栅的粉末冶金制备工艺是目前实现高密度、均匀组织和精密周期结构的主要技术路线。该工艺以粉末为原料，通过一系列冶金步骤将松散的粉体转化为致密、具有特定微观结构和宏观几何形态的光栅元件。粉末冶金路线具有成分控制、材料利用率高以及适合复杂形状成型的优势，能够满足光学应用对光栅密度、均匀性和表面质量的要求。整个工艺流程包括粉末制备、混粉、成型、烧结以及后续精密加工等多个环节，各环节之间相互衔接，形成完整的生产链条。

粉末冶金工艺的优势在于能够实现传统熔铸方法难以达到的高钨含量合金的致密化，同时为光栅的周期结构形成提供良好的材料基础。研究人员和生产工程师通过优化各工艺参数，逐步提升了光栅的尺寸精度、微观组织均匀性和光学表面质量。随着技术的进步，粉末冶金路线已从实验室规模逐步走向工业化生产，为钨合金光栅的大批量、稳定供应提供了可靠保障。在实际生产中，工艺参数的控制和质量检测贯穿始终，确保最终产品满足光学和力学性能的双重要求。

5.1.1 钨合金光栅用粉末的制备与特性

钨合金光栅用粉末的制备通常采用氢还原法、机械合金化法或喷雾造粒等技术路线。钨粉的制备以氧化钨为原料，在氢气气氛中进行多阶段还原，获得纯度高、粒度可控的金属钨粉。合金元素粉末（如镍、铁、铜等）则通过羰基法、电解法或雾化法制得，以保证各组分粉末具有良好的化学纯度和颗粒形态。混合粉末的制备过程中，需要控制氧含量和杂质水平，以避免后续烧结过程中出现孔隙或有害相。

钨合金光栅用粉末的特性包括颗粒形状、粒度分布、比表面积和流动性等。典型钨粉颗粒呈多面体或近球形，平均粒径一般控制在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内，粒度分布均匀有助于提高成型坯体的密度和均匀性。合金粉末的加入会改变混合粉的流动性和压实性能，研究人员通过调整粉末粒径配比，实现粉末体系的优化匹配。粉末的比表面积较大，表面活性较高，这为后续的固相扩散和液相烧结提供了有利条件，但同时也要求储存和运输过程中采取抗氧化措施。

粉末特性影响后续成型和烧结质量。细粉末有利于提高烧结致密度，但易产生团聚现象；粗粉末流动性好，但可能导致组织不均匀。生产中常用激光粒度分析仪、扫描电镜和比表面积测定仪对粉末进行全面表征，并根据光栅的具体性能要求调整粉末规格。通过对粉末制备与特性的系统控制，研究人员能够为钨合金光栅的生产提供高质量的原料基础，确保最终产品的微观组织和宏观性能达到预期目标。

5.1.2 钨合金光栅的混粉、造粒与成型技术

钨合金光栅的混粉过程是保证各组分均匀分布的关键步骤。通常采用V型混合机、球磨机或三维运动混合设备，在保护气氛或添加少量成型剂的条件下进行混合，以实现粉末的宏观和

微观均匀性。混合时间、转速和球料比等参数需要根据粉末体系的特性进行优化，避免过度球磨导致粉末氧化或颗粒破碎。混合均匀性通过取样分析和元素分布检测进行验证，确保合金元素在粉末中分布一致。

造粒技术用于改善混合粉的流动性和压制性能。湿法造粒或喷雾造粒是常用的方法，通过加入适量粘结剂（如聚乙烯醇水溶液）将细粉制成粒径较大、流动性良好的颗粒。造粒后粉末的松装密度和流动性显著提高，有利于后续的模式或等静压成型。造粒参数的控制影响坯体的均匀性和强度，研究人员通过试验优化粘结剂种类、用量和造粒工艺，避免引入过多杂质或影响最终烧结质量。

成型技术是粉末冶金工艺中将粉体转化为具有一定形状和强度的坯体的核心环节。钨合金光栅常用冷等静压成型、模压成型或注射成型等方法。冷等静压成型能够制备密度均匀的大型或复杂形状坯体，适合后续需要精密加工的光栅基体。模压成型适用于批量生产中小型光栅元件，具有生产效率高的特点。注射成型则在制备复杂周期结构预成型体方面展现出优势。通过控制成型压力、模具设计和脱模工艺，可以获得尺寸精度高、密度分布均匀的压坯，为后续烧结和精密加工奠定良好基础。

混粉、造粒与成型技术的协同优化是钨合金光栅粉末冶金制备工艺的重要内容。生产过程中，研究人员不断改进设备和工艺参数，实现从粉末到坯体的稳定转化，确保每一环节的质量可控。这些技术的成熟应用为后续烧结和机械加工提供了高质量的中间产品，推动了钨合金光栅生产效率和产品一致性的持续提升。

5.1.3 钨合金光栅的高温烧结制度与致密化机理

钨合金光栅的高温烧结制度是粉末冶金工艺中实现材料致密化和组织调控的核心步骤。烧结过程通常在氢气、真空或惰性气氛保护下进行，温度范围一般控制在 1200℃ 至 1600℃ 之间，具体制度根据合金体系和光栅尺寸要求进行设计。烧结制度包括升温速率、保温温度、保温时间和冷却方式等关键参数，这些参数共同影响了坯体的收缩率、最终密度和微观组织特征。通过合理的烧结制度，可以有效消除成型坯体中的孔隙，促进原子扩散和晶粒结合，形成具有高密度和良好力学性能的合金基体。

致密化机理主要涉及固相烧结与液相烧结两种机制的协同作用。在烧结初期，颗粒间形成烧结颈，通过表面扩散和体积扩散实现初步致密化；随着温度升高，液相的出现显著加速了颗粒重排和溶解-析出过程，最终实现接近理论密度的烧结体。研究人员通过热膨胀仪、密度测量和金相观察等手段，系统跟踪了烧结过程中的收缩曲线和组织演变规律，并建立了烧结参数与最终性能之间的定量关系。这些机理研究为优化烧结工艺提供了理论指导，确保钨合金光栅在保持精密周期结构潜力的同时，获得稳定的材料基础。

5.1.3.1 固相烧结阶段的扩散与收缩行为

固相烧结阶段发生在烧结过程的较低温度区间，通常指温度低于液相形成温度之前的阶段。在此阶段，钨颗粒之间主要通过表面扩散、体积扩散和晶界扩散等方式形成烧结颈，并逐渐

实现颗粒间的连接和坯体收缩。扩散行为受温度、颗粒尺寸和表面状态的影响，细小颗粒因比表面积大而表现出更高的扩散速率，导致初期收缩更为明显。研究人员观察到，固相烧结阶段的线性收缩率一般在 2%~6% 范围内，主要取决于粉末粒度和成型密度。

收缩行为呈现出明显的阶段性特征。初期以表面扩散为主，烧结颈快速长大但整体致密度提升有限；中期体积扩散和晶界扩散逐渐占据主导，孔隙开始球化并缓慢缩小。研究者通过 Arrhenius 关系计算了不同扩散机制的激活能，并结合扫描电镜观察了烧结颈的形态演变。这些分析结果表明，固相烧结阶段为后续液相烧结奠定了均匀的颗粒接触基础，避免了因局部致密化不均而导致的组织缺陷。

在钨合金光栅的生产中，固相烧结阶段的控制尤为重要。过快的升温速率可能引起不均匀收缩和开裂，而适宜的保温时间则有助于均匀扩散和应力释放。生产工程师通过分段升温制度和气氛控制，将固相烧结阶段的收缩行为维持在可控范围内，为光栅坯体进入液相烧结阶段提供良好的组织准备。通过对扩散与收缩行为的系统认识，研究人员能够优化固相烧结参数，使钨合金光栅的整体致密化过程更加平稳和高效。

5.1.3.2 液相烧结在钨合金光栅中的应用与控制

液相烧结在钨合金光栅的生产中发挥着关键的致密化作用。当温度升高至粘结剂元素（如镍、铁、铜）的熔点或共晶温度以上时，少量液相出现并润湿钨颗粒表面，显著加速了颗粒重排、溶解-析出和骨架致密化过程。液相烧结能够使钨合金的相对密度达到 98% 以上，甚至接近理论密度，这为后续精密机械加工和光栅周期结构的形成提供了高致密基体。

液相烧结的应用需要控制液相含量、烧结温度和保温时间。液相含量通常控制在 5%~15% 范围内，过多液相会导致坯体变形或成分偏析，而过少则难以实现充分致密化。研究人员通过调整合金配比和升温曲线，实现液相的均匀生成和良好润湿性。在液相存在阶段，溶解-析出机制使较小钨颗粒溶解并在大颗粒表面析出，促进晶粒长大和孔隙消除。生产中常采用分段保温制度，先在较低温度形成液相促进重排，再在较高温度保温完成骨架固化。

液相烧结的控制还涉及冷却阶段的组织调控。缓慢冷却有助于减少残余应力和成分偏析，而适当的快速冷却则可细化晶粒结构。研究者结合热分析和金相观察，优化了液相烧结参数与光栅最终微观组织之间的关系，确保合金在获得高密度的同时，保持适宜的晶粒尺寸和均匀性。通过对液相烧结机理的深入理解和工艺控制，钨合金光栅的生产实现了致密化效率与组织稳定性的良好平衡，为后续精密加工和光学性能实现奠定了坚实基础。

5.1.4 钨合金光栅的后续热机械加工与精整

钨合金光栅烧结后的后续热机械加工与精整是获得最终精密周期结构和光学表面质量的关键步骤。烧结坯体通常具有较高的硬度和较低的塑性，需要通过热处理、热锻或热轧等热机械加工手段进一步改善组织均匀性和力学性能。热处理工艺包括再结晶退火或应力消除退火，温度一般控制在 1000°C~1400°C 范围内，旨在细化晶粒、释放残余应力并提高材料韧性，为后续机械加工创造条件。

版权与法律责任声明

机械加工阶段主要采用精密车削、铣削、磨削或电火花加工等方法，对烧结坯体进行外形精整和初步周期结构成型。针对高硬度的钨合金，生产中常使用金刚石刀具或立方氮化硼刀具，并配合切削液以降低加工温度和表面损伤。精整工序则包括超精密磨削、抛光和化学机械抛光等工艺，目的是将光栅表面粗糙度控制在纳米级水平，确保周期槽形的几何精度和光学反射性能。研究人员通过坐标测量机和光学轮廓仪对加工后的光栅进行尺寸和形貌检测，及时反馈调整加工参数。

热机械加工与精整过程需要控制加工应力和热输入，避免产生表面裂纹、残余应力集中或周期结构变形。生产工程师根据不同光栅型号制定专用的加工路线和工艺窗口，通过多道次小切削量加工和中间退火相结合的方式，逐步达到最终的尺寸精度和表面质量要求。这些后续加工步骤不仅影响了光栅的最终光学性能，还影响产品的成品率和生产成本，是粉末冶金工艺链条中不可或缺的重要环节。

5.1.5 钨合金光栅粉末冶金工艺的优劣势分析

钨合金光栅粉末冶金工艺的优势主要体现在成分灵活性高、材料利用率高以及适合制备高熔点难加工合金等方面。该工艺能够控制钨含量和合金元素比例，实现传统熔炼方法难以获得的均匀组织和高密度。同时，粉末冶金路线在近净成形方面具有明显优势，可以减少后续机械加工量，降低材料浪费和生产成本。此外，工艺过程相对环保，能量消耗较低，且便于实现批量化生产。

该工艺的劣势在于工序较多、周期较长，对原料粉末质量和各环节工艺参数的控制要求。烧结过程中容易出现残留孔隙或成分偏析，需要通过后续精密加工进行弥补。粉末冶金制品的塑性相对较低，在复杂形状或薄壁结构的光栅制备中存在一定难度。此外，设备投资较高，初期技术积累周期较长，对操作人员的专业技能要求也较高。

5.1.6 钨合金光栅粉末冶金工艺对原料的要求

钨合金光栅粉末冶金工艺对原料的要求主要集中在纯度、粒度分布、氧含量和流动性等方面。钨粉的纯度一般要求达到 99.9% 以上，杂质元素（尤其是氧、碳、氮）含量需控制在较低水平，以避免烧结过程中形成有害夹杂或孔隙。合金元素粉末同样需要高纯度，并与钨粉具有良好的相容性。

粉末粒度及分布是影响成型和烧结行为的关键指标。典型要求为平均粒径在 $1\sim 15\ \mu\text{m}$ 范围内，粒度分布均匀，避免过粗或过细颗粒过多导致的密度不均或烧结活性差异。粉末的比表面积和表面活性也需保持在适宜范围，过高的比表面积会增加氧化敏感性，而过低的比表面积则可能降低烧结驱动力。

此外，原料粉末的流动性、松装密度和压实性能也是重要考量因素。生产中通常要求粉末具有良好的流动性，以便于均匀装模和成型。原料供应商需提供详细的粉末特性检测报告，包括化学成分分析、粒度分布曲线、氧含量测定和流动性测试数据。企业内部还会对每批原料进行复检，确保符合钨合金光栅生产的专项技术标准。

版权与免责声明

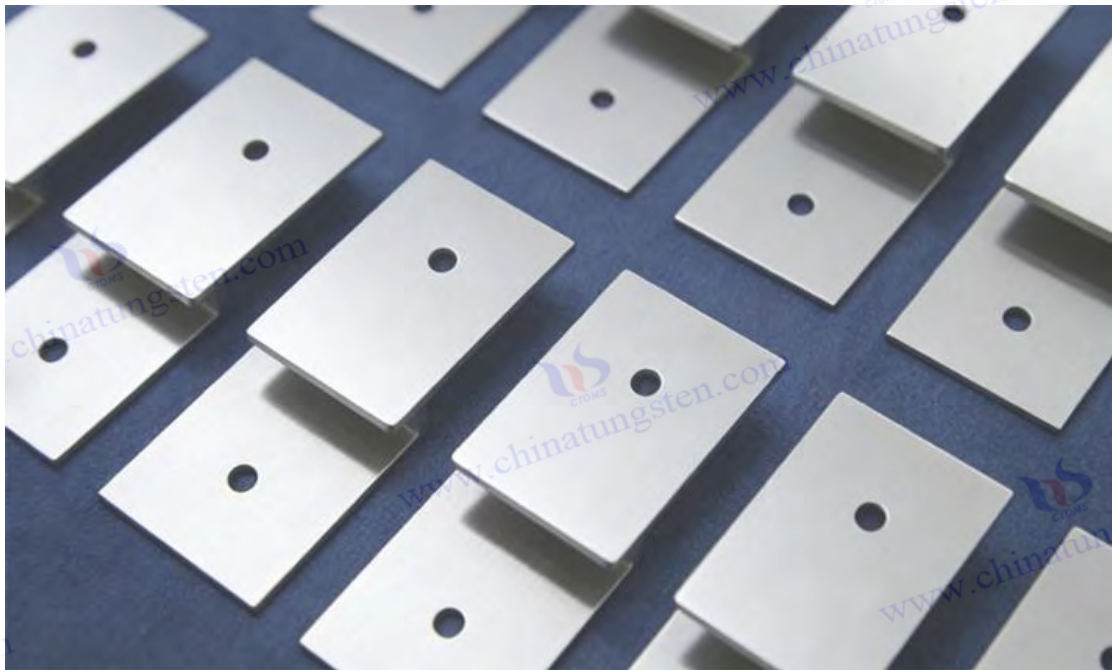
5.1.7 钨合金光栅粉末冶金工艺的注意事项

钨合金光栅粉末冶金工艺在实际生产中需要注意多个关键环节，以确保工艺安全、质量稳定和产品性能达标。首先，粉末储存和运输过程中必须采取防氧化、防潮措施，采用真空或惰性气氛密封包装，避免粉末长期暴露导致氧含量升高。其次，混粉和成型工序应在清洁环境中进行，控制粉尘浓度，操作人员需佩戴相应防护装备。

烧结过程是工艺控制的重点，需要监控炉内气氛、温度曲线和升温速率，避免温度波动或气氛污染导致的组织缺陷。液相烧结阶段尤其要注意液相含量的控制，防止坯体变形或成分偏析。后续热机械加工中，应采用合理的切削参数和冷却方式，减少加工应力和表面损伤。

质量检测与过程监控贯穿整个工艺流程。每一批次产品均需进行密度测定、金相组织检查、尺寸精度检测和光学性能初步评估，不合格品及时隔离分析原因。生产过程中还要建立完善的工艺记录和追溯体系，便于问题排查和持续改进。

此外，安全生产和环境保护也是重要注意事项。粉尘收集系统需定期维护，废料和废液按照相关规定进行分类处理。



中钨智造钨合金光栅图片

5.2 钨合金光栅的增材制造技术

钨合金光栅的增材制造技术作为粉末冶金工艺的重要补充，为实现复杂周期结构、个性化设计和高精度光栅元件提供了新的技术路径。该技术通过逐层添加材料的方式，由数字模型构建实体光栅，减少了传统加工中的材料浪费和工序数量。增材制造路线适合制备具有内部复

杂通道、梯度结构或超薄壁特征的光栅，能够满足现代光学系统对小型化、集成化和定制化的需求。

增材制造技术的引入显著扩展了钨合金光栅的设计自由度。研究人员和生产工程师可以根据光学仿真结果优化光栅的周期参数、槽形轮廓和整体几何形态，而无需受到传统模具或刀具的限制。随着设备精度和工艺稳定性的提升，增材制造技术已逐步从原型验证走向小批量生产，在钨合金光栅领域展现出良好的应用前景。实际生产中，增材制造工艺与传统粉末冶金工艺的结合使用，能够充分发挥各自优势，实现光栅性能与生产效率的优化平衡。

5.2.1 钨合金光栅的激光粉末床熔融工艺

激光粉末床熔融工艺（LPBF）是钨合金光栅增材制造中应用较为广泛的技术之一。该工艺利用高能量密度激光束选择性地熔化预先铺设在粉床上的钨合金粉末，按照切片后的三维模型逐层熔融固化，最终堆积成形光栅元件。激光参数包括激光功率、扫描速度、扫描间距和层厚等，需要根据钨合金的高熔点和热导率特性进行匹配，以获得致密、无裂纹的熔道。

在钨合金光栅的制备中，激光粉末床熔融工艺的优势在于能够实现微米级精度的周期结构成型。研究人员通过优化扫描策略（如条带扫描、棋盘扫描或旋转扫描），减少残余应力和热应力积累，同时提高表面平整度。工艺过程中需控制粉床预热温度，通常维持在较高水平以降低钨合金的热梯度，防止球化缺陷和裂纹产生。成形后的光栅坯体相对密度可达到 95% 以上，后续通过热处理和精密加工进一步提升致密度和表面质量。

激光粉末床熔融工艺对粉末特性要求较高，粉末需具备良好的球形度、流动性和激光吸收率。生产中常用气雾化或等离子旋转电极法制备的钨合金粉末，并通过工艺试验建立参数窗口，确保光栅槽形的几何精度和光学性能满足设计要求。该工艺的成熟应用为钨合金光栅的快速迭代和小批量定制生产提供了有效手段。

5.2.2 钨合金光栅的电子束熔化技术

电子束熔化技术利用高能电子束在真空环境中熔化钨合金粉末，逐层构建光栅结构。该工艺的特点是能量输入高、加热均匀，且工作环境为高真空，有利于减少钨合金的氧化和杂质引入。电子束扫描速度快、穿透深度较大，适合制备较大尺寸或较高厚度的钨合金光栅元件。

在钨合金光栅的生产中，电子束熔化技术能够有效控制熔池温度和冷却速率，通过预热粉床（通常预热至 600°C 以上）显著降低热应力，减少裂纹形成风险。研究人员优化了扫描路径和束流参数，使熔道搭接均匀，实现了较高的致密度和较好的晶粒取向控制。成形后的光栅表面虽有一定粗糙度，但内部组织致密，为后续精整加工提供了良好基础。

电子束熔化技术适用于高熔点钨合金体系，能够在真空条件下实现稳定的液相存在和快速凝固，获得细小的微观组织。该工艺与激光粉末床熔融相比，在生产效率和残余应力控制方面具有一定优势，但设备成本较高，对粉末纯度和真空度要求更为。通过合理选择工艺参数，电子束熔化技术为钨合金光栅的结构创新和性能提升提供了另一种可靠的增材制造途径。

版权与免责声明

5.2.3 钨合金光栅的粘结剂喷射与后续脱脂烧结工艺

粘结剂喷射技术（Binder Jetting）是一种间接增材制造方法，首先通过喷头将粘结剂选择性地喷射到铺展的钨合金粉床上，形成具有一定强度的绿色坯体，随后进行脱脂和高温烧结以获得致密光栅元件。该工艺的优势在于无需高能量源熔化金属，设备成本较低，且适合大尺寸或复杂结构光栅的成型。

粘结剂喷射过程中，喷头精度和粘结剂配方影响绿色坯体的尺寸精度和强度。研究人员优化了粘结剂种类、喷射量和层厚参数，确保坯体具有足够的强度以承受搬运和后续处理。成形后的绿色坯体需经过低温脱脂处理，去除有机粘结剂成分，避免烧结过程中产生裂纹或残留碳杂质。脱脂后进行高温烧结，温度制度与粉末冶金传统烧结相似，通过固相或液相机制实现致密化。

后续烧结工艺是粘结剂喷射路线的关键环节，需要控制升温速率和保温时间，以补偿脱脂后的收缩并获得高密度组织。研究人员通过添加少量活化元素或优化烧结气氛，进一步提升烧结体的致密度和均匀性。粘结剂喷射与后续脱脂烧结工艺结合使用，能够以较低成本实现钨合金光栅的近净成形，适合批量生产中复杂度的光栅元件。

5.2.4 增材制造钨合金光栅的表面粗糙度与后处理方法

增材制造钨合金光栅的表面粗糙度通常高于传统加工件，主要受熔池凝固形态、粉末颗粒粘附和层间搭接特征的影响。激光粉末床熔融和电子束熔化工艺制备的光栅表面粗糙度 Ra 值一般在 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间，而粘结剂喷射工艺成形的绿色坯体表面粗糙度则相对较低，但烧结后仍需进一步精整。较高的表面粗糙度会增加光学散射损失，影响光栅的衍射效率和成像质量，因此后处理环节较为重要。

后处理方法主要包括机械精整、化学/电化学抛光、激光重熔和振动光整等工艺。机械精整采用精密磨削或超声辅助抛光，逐步降低表面粗糙度至光学应用所需的亚微米级水平。化学抛光或电化学抛光能够均匀去除表面凸起和粘附颗粒，适合复杂周期结构的光栅表面处理。激光重熔技术可在不改变整体几何形态的前提下，显著平滑表面熔道，提高光学反射率。生产中常采用多步组合后处理工艺，先通过机械方法去除宏观凸起，再通过化学或激光方法实现纳米级表面光洁度。

后处理需要控制去除量，避免过度加工导致周期结构尺寸偏差或槽形轮廓失真。研究人员通过光学轮廓仪和原子力显微镜对处理前后的表面进行定量表征，建立表面粗糙度与光学性能的对立关系，并优化后处理参数窗口。这些后处理方法的合理应用，使增材制造钨合金光栅的表面质量能够满足精密光学系统的要求，同时保持增材制造在结构复杂性方面的优势。

5.2.5 钨合金光栅增材制造技术的优劣势分析

钨合金光栅增材制造技术的优势在于设计自由度高、材料利用率高和生产周期短。该技术能够成形传统方法难以加工的复杂周期结构或梯度成分光栅，显著减少了后续机械加工量，降

低了材料浪费。同时，增材制造支持快速迭代设计，适合小批量、多品种的光栅定制生产，响应市场需求的速度更快。

该技术的劣势主要体现在设备成本高、工艺稳定性有待进一步提升以及表面质量控制难度较大等方面。钨合金的高熔点和高热导率特性导致成形过程中易产生裂纹、残余应力和球化缺陷，需要精密的工艺参数窗口和较高的设备投入。此外，增材制造光栅的各向异性较为明显，力学性能和光学性能在不同方向上存在差异，后处理工序较多，成本在批量化阶段仍需优化。

5.2.6 钨合金光栅增材制造技术对原料的要求

钨合金光栅增材制造技术对原料粉末的要求比传统粉末冶金更为，主要体现在颗粒形态、粒度分布、流动性和化学纯度等方面。激光粉末床熔融和电子束熔化工艺通常要求粉末具有良好的球形度（球形度 >0.9 ），平均粒径控制在 $15\sim 45\ \mu\text{m}$ 范围内，粒度分布集中以保证铺粉均匀性和熔池稳定性。粘结剂喷射工艺对粉末粒径的要求相对宽松，但仍需保证粉末具有良好的流动性和与粘结剂的相容性。

化学纯度是另一个关键指标，氧含量一般需控制在 0.1% 以下，杂质元素（碳、氮、铁等）含量也需限制，以减少成形过程中的气孔和裂纹缺陷。粉末的激光或电子束吸收率、热导率和熔点匹配性也需满足工艺需求。生产中常用雾化、等离子雾化或旋转电极法制备的高纯度钨合金粉末，并通过霍尔流量计、振实密度仪和扫描电镜对粉末特性进行全面检测。

原料的一致性对增材制造工艺的稳定性和产品性能较为重要。企业通常对每批粉末进行复检，建立的入厂检验标准和可追溯体系。通过对原料的精准控制，可以从源头减少成形缺陷，提高钨合金光栅的成品率和光学性能可靠性。

5.2.7 钨合金光栅增材制造技术的注意事项

钨合金光栅增材制造技术在实际生产中需要注意工艺安全、参数稳定和质量控制等多方面事项。粉末处理和铺粉过程必须在惰性气氛或控氧环境中进行，防止钨合金粉末氧化或吸潮。

设备运行过程中要监控激光功率、扫描速度、层厚和预热温度等关键参数，建立实时监测和反馈系统，及时发现并纠正异常情况。成形后的光栅坯体需缓慢冷却以释放残余应力，避免裂纹扩展。后续脱脂和烧结工艺需采用分段升温制度，防止粘结剂快速挥发导致坯体开裂。

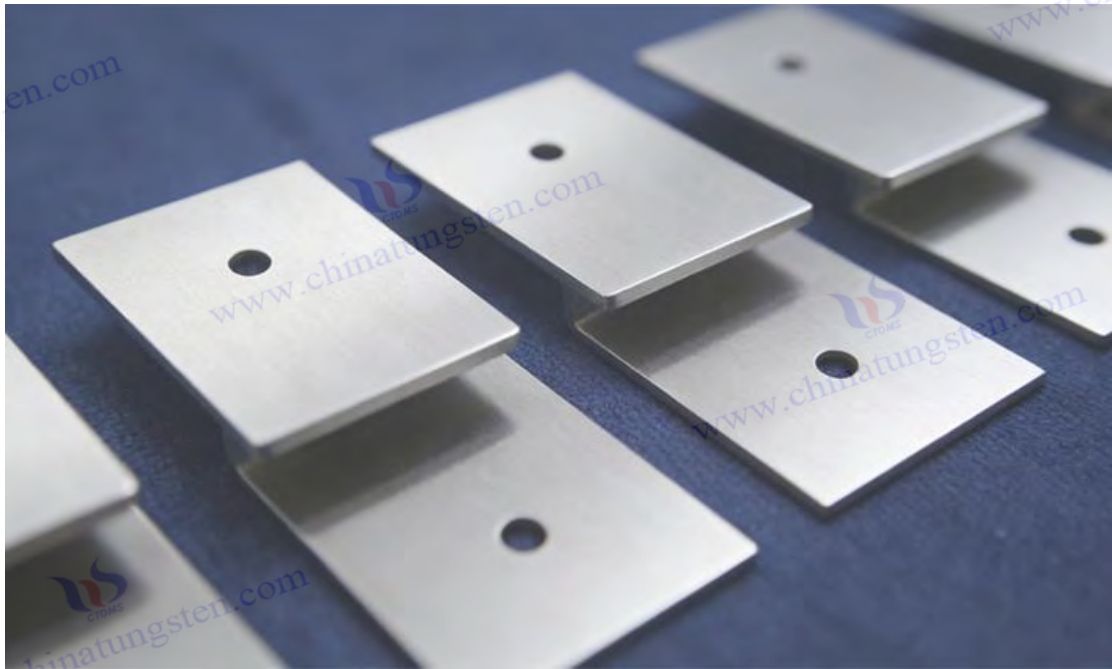
质量检测环节应贯穿整个生产流程，包括粉末特性检测、成形过程监控、表面质量检测和光学性能初步评估。建立完善的工艺记录和追溯体系，便于问题分析和持续改进。安全生产方面，需定期维护设备，规范粉尘收集和废料处理程序，遵守相关环保和职业健康规定。

5.3 钨合金光栅生产方法的比较与选择原则

钨合金光栅的生产方法主要包括传统粉末冶金工艺和增材制造技术两大类。不同方法在材料利用率、结构复杂性适应能力、生产效率、成本结构以及最终产品性能一致性等方面存在显

著差异。粉末冶金工艺以其成熟的致密化能力和批量生产优势，在常规规格光栅的生产中占据主导地位；增材制造技术则凭借设计自由度和快速响应能力，在复杂结构或小批量定制光栅的制备中展现出独特价值。研究人员和生产工程师需根据具体应用场景，对两种技术路线进行系统比较，以制定科学合理的生产方法选择方案。

生产方法的比较不仅涉及技术指标，还需综合考虑经济性、设备投入和供应链稳定性等因素。粉末冶金工艺的工序相对固定，适合标准化产品的规模化生产，而增材制造技术则更灵活，但对工艺参数和原料一致性的要求更高。通过对比分析，可以清晰识别各方法的适用边界，为不同类型钨合金光栅的生产提供决策依据。



中钨智造钨合金光栅图片

5.3.1 粉末冶金工艺与增材制造技术的综合对比

粉末冶金工艺与增材制造技术在钨合金光栅生产中的表现各有侧重。在材料利用率方面，粉末冶金工艺的近净成形能力较强，材料浪费较少，而增材制造技术虽然理论上材料利用率更高，但在实际成形过程中因支撑结构和粉末回收等因素，综合利用率有时略低于优化后的粉末冶金路线。在结构复杂性适应能力上，增材制造技术优势明显，能够构建内部通道、梯度密度或超精细周期结构，而粉末冶金工艺则更多依赖后续机械加工实现复杂几何形态。

生产效率和成本结构方面，粉末冶金工艺适合大批量生产，一旦工艺稳定后单件成本较低；增材制造技术在小批量或原型阶段具有明显的时间优势，但设备折旧和工艺优化成本较高。产品性能一致性上，粉末冶金工艺通过的模具和烧结控制，能够获得较高的批次稳定性，而增材制造技术因层间接触和热历史差异，各向异性问题较为突出，需要额外的后处理来保证一致性。

版权与免责声明

在光学性能实现能力方面，粉末冶金结合精密机械加工能够获得极低的表面粗糙度，适合高精度衍射光栅；而增材制造技术在成形复杂槽形方面更具灵活性，但表面质量通常需要额外的精整步骤。总体而言，粉末冶金工艺在成熟度、成本可控性和批量生产方面占据优势，增材制造技术则在设计自由度和快速响应方面更具竞争力。两种方法并非相互替代，而是根据光栅的具体技术要求和生产规模进行互补选择。

5.3.2 生产方法的选择原则

钨合金光栅生产方法的选择应遵循以下主要原则。首先，根据光栅的结构复杂度和精度要求进行选择。对于周期结构简单、批量较大的常规光栅，优先采用粉末冶金工艺；对于具有复杂内部结构、梯度成分或个性化定制需求的光栅，则适合采用增材制造技术或混合工艺路线。

其次，考虑生产规模和经济性。小批量或原型验证阶段，增材制造技术的快速迭代优势更为突出；当生产规模扩大到一定数量后，粉末冶金工艺的成本优势会逐渐显现。生产企业需进行详细的成本核算，包括设备投入、原料消耗、能耗、人工和后处理成本等，综合评估不同方法的总拥有成本。



中钨智造钨合金光栅图片

第三，重视最终光学性能和表面质量要求。高精度光学应用对表面粗糙度和周期结构精度有要求，此时需评估不同方法达到目标表面质量的难易程度和后处理成本。粉末冶金结合精密机械加工通常在表面质量控制上更具优势，而增材制造则需要配套高效的后处理工艺。

第四，考虑设备条件、原料供应和人才储备。企业应根据自身现有设备基础、供应链稳定性和技术团队能力，选择最匹配的生产方法。同时，环保和安全因素也是重要考量，两种方法均需符合相关职业健康和环境保护标准。

最后，建议采用分阶段或混合选择策略。在产品开发初期使用增材制造技术进行快速验证，在工艺成熟和批量生产阶段转向粉末冶金或混合路线。

版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	17.0~18.5g/cm ³
	硬度 (HRC)	24~35
	抗拉强度	650~1100MPa
	延伸率	2~25%
结构精度性能	栅条厚度	0.05~0.5mm (可定制)
	狭缝宽度	0.05~0.5mm (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025\text{mm}$
	平面度	$\leq 0.02\text{mm}/100\text{mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40\sim 300^{\circ}\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

- 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 - 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



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

第六章 钨合金光栅的微纳结构加工与光栅刻划

6.1 钨合金光栅基底的精密磨抛与平坦化

中钨智造钨合金光栅基底的精密磨抛与平坦化是微纳结构加工的基础步骤，影响了后续光栅刻划的精度和最终光学性能。钨合金材料硬度高、脆性较大，传统加工方法容易引起表面划痕、亚表面损伤或残余应力，因此需要采用多阶段、渐进式的精密磨抛工艺，将基底表面加工至光学级平坦度和粗糙度。整个过程包括粗磨、中磨、精磨和抛光四个主要阶段，通过逐步降低磨粒粒度和改变加工方式，实现材料去除的可控性和表面质量的持续提升。

精密磨抛与平坦化工艺不仅要消除烧结或增材制造后留下的宏观不平度，还要控制亚表面损伤层深度，确保后续刻划时刀具或光束不会因基底不均匀而产生周期误差。生产中通常在恒温、洁净环境下进行，并配合在线检测手段实时监控表面形貌变化。通过合理的工艺流程设计，可以将钨合金光栅基底的表面质量提升至满足高精度衍射光栅要求的水准，为后续微纳结构加工奠定可靠的基础。

6.1.1 机械研磨与化学机械抛光的工艺流程

机械研磨与化学机械抛光（CMP）的工艺流程采用“粗-精-抛”三级递进模式，确保材料去除均匀且表面损伤最小化。

首先进行机械研磨阶段，使用金刚石磨盘或碳化硅磨料，按粒度从粗到细（典型序列为W40→W14→W7→W3.5）逐步研磨。研磨压力控制在较低范围，转速根据基底尺寸和设备刚性调整，每道工序后需彻底清洗并进行中间检测，避免前道磨粒残留污染后续工序。该阶段主要去除宏观平面度误差和烧结表皮，使基底平面度达到10 μm以内。

进入精磨阶段，采用更细的磨料（如W1.5~W0.5金刚石微粉）和树脂结合剂磨盘，配合低速、低压工艺，进一步降低表面粗糙度并改善平面度。此时重点控制研磨液的pH值和润滑性，防止钨合金表面产生氧化膜或微裂纹。

最后是化学机械抛光阶段，使用含有氧化剂（如过氧化氢或硝酸铁）和软质磨粒（如胶体二氧化硅）的专用抛光液，在聚氨酯抛光垫上进行。CMP工艺同时发挥机械去除和化学软化作用，能够有效去除机械研磨留下的损伤层，实现原子级平整。抛光时间、压力、转速和抛光液流量需匹配，通常分为初抛和终抛两步，终抛阶段采用极低压力以获得镜面效果。整个流程结束后，基底需经过超纯水冲洗和氮气吹干，防止二次污染。

6.1.2 表面粗糙度 Ra 值与平坦度控制目标

钨合金光栅基底的表面粗糙度 Ra 值和平坦度是评价精密磨抛质量的核心指标，影响后续刻划精度和光栅的衍射效率。

对于高性能钨合金光栅，表面粗糙度 Ra 的控制目标通常设定为：

版权与免责声明

- 普通应用光栅：Ra ≤ 10 nm
- 高精度衍射光栅：Ra ≤ 5 nm
- 极高精度相衬或同步辐射光栅：Ra ≤ 2 nm，甚至达到 1 nm 以下

平坦度（或峰谷值 PV、均方根值 RMS）控制目标为：

- 直径或边长 100 mm 以内基底：PV ≤ $\lambda/10$ (λ 为工作波长)，RMS ≤ $\lambda/20$
- 更高要求场合：PV ≤ $\lambda/20$ ，RMS ≤ $\lambda/50$

这些目标值需根据光栅的工作波段（软 X 射线、硬 X 射线或可见光）进行调整。短波长应用对表面粗糙度和平坦度的要求更为严苛，因为即使纳米级的起伏也会引起显著的散射损失。

生产中采用白光干涉仪、原子力显微镜和激光平面干涉仪对表面粗糙度和平坦度进行多点、多区域检测。检测数据用于反馈调整磨抛参数，形成闭环控制。当检测结果接近或达到控制目标时，方可进入后续光栅刻划工序。

6.2 钨合金光栅的机械刻划技术

钨合金光栅的机械刻划技术是实现高精度周期性微结构的主要加工方式之一，适用于硬度高、耐磨性强的钨合金基底。该技术利用单晶金刚石刀具在基底表面刻划出周期性沟槽，形成衍射光栅所需的几何轮廓。机械刻划具有加工精度高、沟槽轮廓可控、适用于大面积光栅等特点，在同步辐射用反射光栅、抗散射栅格及部分相衬成像光栅的生产中仍占有重要地位。

与激光刻蚀、离子束刻蚀等非接触加工相比，机械刻划属于接触式加工，对刀具材料、机床刚性、振动控制和环境稳定性要求极高。钨合金的高硬度使得刻划过程对刀具磨损敏感，需要采用极低进给量和精细的工艺参数控制。

6.2.1 金刚石刀具刻划原理与刀尖几何设计

机械刻划的基本原理是利用单晶金刚石刀具的极高硬度和锋利刃口，在钨合金基底表面以塑性变形和微量切削相结合的方式去除材料，形成具有特定截面形状的周期性 V 型或矩形沟槽。刻划过程中，刀具沿平行于基底表面的方向进给，同时沿垂直方向施加微小切深，材料在刀尖前方发生挤压、剪切和断裂，形成沟槽两侧的隆起和沟底的平整表面。

金刚石刀具的刀尖几何设计影响了沟槽的截面形貌、表面质量和衍射效率。常用刀尖几何参数包括：

刀尖夹角：通常为 $70^\circ \sim 90^\circ$ ，对应于不同闪耀角需求的闪耀光栅；较小的夹角适合高闪耀角光栅，较大的夹角则用于低闪耀角或矩形沟槽光栅。

刀尖圆弧半径：一般控制在 $20 \sim 100$ nm 范围内，圆弧半径越小，沟槽顶端越尖锐，衍射效率越高，但刀具磨损和崩刃风险也随之增加。

前角与后角：前角通常为负值（ $-5^{\circ} \sim 0^{\circ}$ ），以增强刀尖强度并减少崩刃；后角保持正值（ $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ），保证切屑顺利排出并减少后刀面摩擦。

刀刃方向性：单晶金刚石刀具需沿特定晶向（通常为{100}或{110}面）进行刃磨，以获得最低表面粗糙度和最高耐磨性。

刀具设计还需考虑钨合金的高硬度和低延展性，刀尖需具有足够的抗崩刃能力。生产中常采用离子束聚焦或激光辅助修整技术对刀尖进行纳米级精修，并通过扫描电镜和原子力显微镜对刀尖几何进行表征。这些设计原则的综合应用，使金刚石刀具能够在钨合金表面实现亚微米级周期、纳米级粗糙度的沟槽刻划。

6.2.2 刻划参数（进给量、切深、速度）对沟槽形貌的影响

刻划参数的合理选择对沟槽形貌、表面质量和刀具寿命具有影响性影响。三个主要参数——进给量（每周期的水平位移）、切深（刀具垂直压入深度）和刻划速度——相互耦合，共同影响沟槽的几何精度和光学性能。

进给量对应光栅周期，是最关键的参数之一。进给量通常设定在 $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围，取决于目标光栅线密度。进给量过大容易导致沟槽间距不均或刀具跳动；过小则增加加工时间并加剧刀具磨损。研究表明，当进给量与刀尖圆弧半径匹配良好时，沟槽两侧隆起高度最小，沟底平整度最高。

切深控制沟槽深度和闪耀角，通常在 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内分多次递增完成。单次切深过大会引起刀具崩刃或沟槽侧壁撕裂，产生毛刺和亚表面微裂纹；分步小切深则有助于获得光滑侧壁和清晰沟底。切深与刀尖夹角共同影响闪耀角，需通过试验优化以达到理论闪耀条件。

刻划速度影响材料去除率和热效应。速度一般控制在 $0.1 \sim 10 \text{mm/s}$ ，低速有利于减少振动和热积累，但加工时间长；适当提高速度可改善表面光洁度，但过高会导致刀具颤振和沟槽轮廓失真。在钨合金刻划中，通常采用中低速并配合恒力控制系统，以维持稳定的切削状态。

上述参数的交互作用显著：进给量与切深比值过大易产生不连续沟槽，切深与速度匹配不当则可能导致热软化或脆性断裂。生产中常通过正交试验或响应面法建立参数-沟槽形貌的映射关系，并采用在线监测（声发射、切削力、振动）实现自适应控制。这些参数优化的结果，使钨合金光栅的机械刻划能够稳定实现高线密度、高闪耀效率和低杂散光的目标。

6.2.3 机械刻划在钨合金光栅上的适用周期范围

机械刻划在钨合金光栅上的适用周期范围主要受刀具几何、机床分辨率、材料去除机理和振动控制水平的综合限制。当前主流超精密刻划设备能够稳定实现的周期范围大致为：

普通精度光栅：周期 $0.8 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 较高精度光栅：周期 $0.4 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 高精度应用：周期 $0.5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ （最常见实用区间）

版权与免责声明

在钨合金基底上，当周期小于 $0.4\ \mu\text{m}$ 时，机械刻划的难度显著增加，主要原因包括：

刀尖圆弧半径限制：即使采用纳米级修整的金刚石刀具，刀尖圆弧半径通常也在 $20\sim 50\ \text{nm}$ 以上，当周期接近或小于刀尖圆弧的 10 倍时，沟槽轮廓将出现明显的圆化，无法形成锐利的棱角，导致衍射效率下降。**材料去除机理转变：**钨合金在极小切深下更倾向于塑性挤压而非剪切去除，容易产生侧向隆起和沟槽底部不平整。**振动与热效应放大：**周期越小，对振动控制和热漂移的要求呈指数级提高，现有商用超精密刻划机的实际极限通常停留在 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 附近。

因此，在钨合金光栅领域，机械刻划最常用于线密度 $1000\sim 2000$ 线/mm（周期 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ ）的中高精度反射光栅，以及线密度 $100\sim 500$ 线/mm（周期 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ ）的抗散射栅格和中低精度分光光栅。对于周期小于 $0.3\ \mu\text{m}$ 的极高线密度光栅，通常转向离子束刻蚀、电子束光刻或纳米压印等非机械方法。



中钨智造钨合金光栅图片

6.2.4 刻划过程中的振动控制、热效应与刀具磨损管理

刻划过程中的振动控制、热效应管理和刀具磨损是影响钨合金光栅沟槽一致性和表面质量的三大关键因素。

振动控制 刻划机通常安装在主动隔振平台或被动气浮隔振系统上，整机固有频率需低于 $1\ \text{Hz}$ 。环境振动（尤其是 $50/60\ \text{Hz}$ 市电频率和楼板振动）通过多级隔振和实时振动监测系统加以抑制。刻划过程中采用极低进给速度和分步小切深，以降低切削力引起的刀具-工件系统振动。部分高端设备配备在线声发射或加速度传感器，实时监测振动幅值并自动暂停刻划。

版权与免责声明

热效应管理 钨合金热导率较高，但局部切削热仍可能引起刀尖和基底温升，导致热漂移和周期累积误差。控制措施包括： 恒温工作室刀具和工件预热至相同温度 采用微量切削液（雾化润滑）或干式刻划+强制风冷 分段刻划+中间冷却等待 通过激光干涉仪实时监测基底热膨胀位移，并进行闭环补偿。

刀具磨损管理 单晶金刚石刀具在钨合金上的磨损主要表现为微崩刃、刃口钝化和微观磨粒磨损。管理策略包括： 每刻划一定面积（通常几平方厘米至几十平方厘米）后进行刀具显微检查 采用在线光学显微镜或扫描电镜定期评估刃口圆弧半径变化 建立刀具寿命数据库，根据磨损程度及时更换或重新刃磨 优化切削参数组合（小切深、低速、负前角）以延长刀具使用寿命 部分系统引入自动刀尖修整装置，在线恢复刃口锋利度。

通过上述三方面的综合管理，可将单刀连续刻划面积稳定在数十至数百平方厘米，沟槽周期累积误差控制在亚纳米至纳米量级。

6.2.5 机械刻划钨合金光栅的典型沟槽剖面特征

机械刻划钨合金光栅的典型沟槽剖面呈现出以下特征：

沟槽形状：以对称或非对称 V 型沟槽为主，部分为梯形或近矩形轮廓。V 型沟槽两侧面夹角通常与金刚石刀尖夹角一致（ $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ），沟槽顶端圆弧半径与刀尖圆弧半径接近（ $20 \sim 100$ nm）。沟槽深度： $0.2 \sim 5 \mu\text{m}$ ，深度均匀性通常优于 ± 5 nm（单片内），片间重复性优于 ± 20 nm。侧壁粗糙度：侧壁 Ra 值一般在 $2 \sim 10$ nm 范围内，优质刻划可达 $1 \sim 3$ nm。沟底特征：沟底通常呈平直或轻微圆弧状，粗糙度 $Ra < 5$ nm，无明显撕裂或毛刺。隆起高度：沟槽两侧隆起高度一般控制在沟深的 $10\% \sim 30\%$ 以内，优质工艺可将隆起高度降至沟深的 5% 以下。周期一致性：单片内周期误差通常 $< \pm 0.5$ nm（RMS），累积误差 $< \pm 10$ nm。

这些剖面特征通过原子力显微镜、扫描电镜和白光干涉仪进行表征。典型剖面形貌显示出清晰的棱线和光滑侧壁，这是机械刻划在钨合金上实现高衍射效率的基础。沟槽两侧壁的微观平整度和对称性影响了杂散光水平和闪耀效率，是评价机械刻划质量的核心指标。生产中常将剖面特征参数纳入工艺验收标准，以保证最终光栅的光学性能达到设计要求。

6.3 钨合金光栅的离子束刻蚀与聚焦离子束加工

钨合金光栅的离子束刻蚀与聚焦离子束加工属于非接触式微纳结构加工技术，能够在高硬度钨合金基底上实现亚微米乃至纳米级周期沟槽的成型。该方法通过高能离子轰击材料表面实现原子级材料去除，避免了机械刻划中刀具磨损和振动带来的限制，适合制备周期较小、侧壁陡直度要求高的光栅元件。宽束离子束刻蚀适用于大面积均匀加工，而聚焦离子束加工则在局部精细结构和原型验证中展现优势。两种技术共同扩展了钨合金光栅的加工能力，使其能够满足更高线密度和更复杂轮廓的光学需求。

离子束加工过程在真空环境中进行，离子源产生的高能粒子束与基底表面发生物理相互作用，实现可控的材料剥离。相比机械刻划，离子束方法对基底硬度敏感性较低，能够处理传

统刀具难以加工的区域，同时通过掩膜或扫描实现图案转移。生产中，工艺参数的优化需要结合光栅的工作波段和光学性能要求，确保刻蚀后的沟槽轮廓、光滑度和周期一致性达到预期。离子束刻蚀与聚焦离子束加工的引入，为光栅向更高精度方向发展提供了重要技术支撑。

6.3.1 宽束离子束刻蚀的物理溅射机制

宽束离子束刻蚀的物理溅射机制基于入射离子与靶材原子间的弹性碰撞。当高能离子轰击钨合金表面时，传递的动量使表面原子获得足够能量而脱离晶格，形成溅射原子并离开材料。该过程属于级联碰撞模型，入射离子在材料浅层引发一系列原子碰撞，最终导致表面原子逸出。钨合金的高密度特性使溅射产额相对稳定，但也需要通过离子种类和能量调节来控制去除速率。

溅射机制还涉及表面原子键能和晶体取向的影响。离子束方向与晶面角度的不同会改变碰撞效率，导致刻蚀速率呈现各向异性特征。在钨合金光栅加工中，这种机制允许通过掩膜保护非刻蚀区域，实现周期性沟槽的图形转移。研究人员通过调整离子束参数，使溅射过程保持稳定，从而获得均匀的沟槽深度和侧壁形貌。该机制的理解为宽束离子束刻蚀在钨合金上的应用提供了物理基础。

宽束离子束刻蚀的溅射机制还包括二次电子发射和表面再沉积等伴随现象。这些现象需要在工艺中加以控制，以避免沟槽轮廓失真或表面污染。通过优化束流密度和入射条件，溅射过程能够实现高效且可控的材料去除，为后续光学性能优化创造条件。

6.3.1.1 离子能量、角度与刻蚀速率的关系

离子能量与刻蚀速率之间存在正相关关系。随着离子能量的增加，传递给靶材原子的动量增大，溅射产额相应提高，刻蚀速率加快。在光栅加工中，能量过低会导致去除效率不足，而能量过高则可能引起表面损伤或热效应增强，需要在合适区间内选择以平衡速率和质量。

入射角度对刻蚀速率的影响呈现出非线性特征。在接近垂直入射时，溅射产额较低；随着角度增大至一定范围，离子与表面原子的碰撞更有效，刻蚀速率达到峰值；角度继续增大后，离子反射增加，速率反而下降。这种角度依赖性为沟槽侧壁形貌的调控提供了手段，通过倾斜束流可以实现特定陡直度或闪耀角的优化。

离子能量和角度的协同作用形成了工艺参数的优化空间。生产中通过系统试验建立速率与参数的对应关系，确保刻蚀过程稳定且可重复。合理匹配能量与角度，既能提升加工效率，又能维持沟槽轮廓的性。

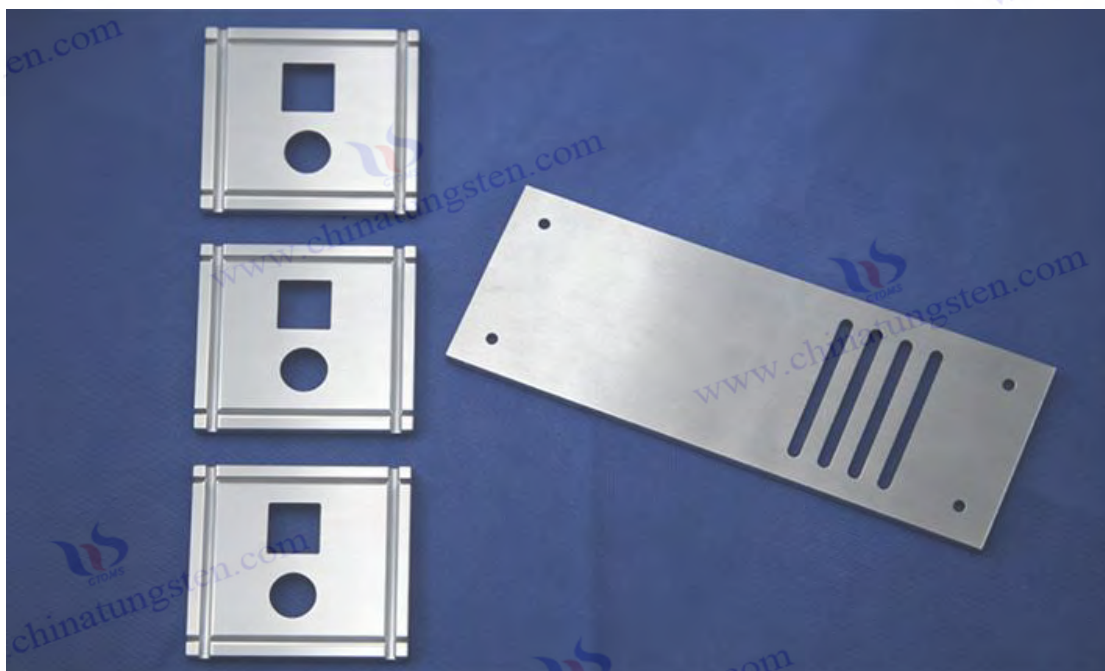
6.3.1.2 侧壁陡直度与刻蚀选择比优化

侧壁陡直度的优化依赖于离子束角度、掩膜材料和刻蚀条件的综合调控。通过调整离子入射角度和束流方向，可以减少侧壁刻蚀速率与底部速率的差异，实现接近垂直的沟槽侧壁。掩

膜材料的选择也较为重要，高选择比的掩膜能够在刻蚀过程中有效保护非刻蚀区域，维持侧壁的完整性和陡直性。

刻蚀选择比的提升主要通过离子种类、能量和辅助气体实现。氩离子束在钨合金与掩膜之间的选择比可通过添加反应性气体得到进一步改善，形成物理与化学协同的刻蚀机制。这种优化有助于减少侧壁倾斜和底部过刻现象，使沟槽剖面更接近设计轮廓。

侧壁陡直度与选择比的优化影响光栅的杂散光水平和衍射效率。生产中采用多步刻蚀或角度扫描策略，逐步逼近理想侧壁形貌。通过参数迭代和实时监测，宽束离子束刻蚀能够在钨合金光栅上获得高陡直度和良好选择比的微结构，为光学性能的实现提供保障。



中钨智造钨合金光栅图片

6.3.2 聚焦离子束在钨合金光栅原型制作中的应用

聚焦离子束（FIB）技术在钨合金光栅的原型制作阶段具有显著的应用价值，主要用于快速验证设计概念、优化沟槽轮廓以及探索新型结构的可行性。该技术能够在已完成精密抛光的钨合金基底表面写入少量周期的测试光栅，通常几十至几百条，用于初步开展光学性能评估和衍射特性测试。

此外，FIB 常被用于对通过机械刻划或宽束离子刻蚀已经初步成型的光栅进行局部区域的修补与精细调整，例如修复个别沟槽的崩边、毛刺或周期偏差，从而挽救因加工缺陷导致的样品。针对一些特殊需求的光栅原型，例如需要非对称沟槽、变周期分布或在曲面基底上实现局部周期结构的样品，FIB 也能够提供灵活的加工手段，在指定区域完成复杂轮廓的构建。

版权与免责声明

在整个原型制作过程中，FIB 常与原位扫描电子显微镜（SEM）观察功能结合使用，形成加工、成像、检测、再加工的闭环迭代流程。

6.3.2.1 FIB 铣削与沉积相结合的复杂结构加工

聚焦离子束铣削与沉积相结合的复合加工方式，为钨合金光栅复杂结构的原型制作提供了有效的技术手段。铣削过程通过高能离子束去除材料，形成初步的沟槽或图案轮廓；沉积过程则通过引入有机金属前驱体气体，在离子束作用下发生分解并沉积金属或碳基材料，用于局部抬高、掩膜构建或缺陷修复。

典型的操作顺序是先进行 FIB 铣削得到基础结构，再在需要保护或抬升的区域注入前驱体气体实施沉积，形成临时掩膜或高度补偿结构，随后再次使用较大束流进行选择性的铣削，利用新形成的掩膜实现更陡直的侧壁或多级沟槽特征。这种沉积-铣削交替循环的方式，能够有效克服单一铣削时侧壁自然倾斜的限制，在钨合金表面获得接近垂直的沟槽侧壁或具有多层特征的复杂剖面。

该复合加工方法在原型阶段常用于制作具有不同闪耀角的测试光栅、在曲面基底上实现局部周期结构、对已有光栅进行缺陷修补，以及构建带有遮挡条或辅助吸收结构的抗散射栅格样品。通过控制每次沉积厚度、铣削剂量和扫描路径，可以在几十纳米尺度内实现结构的生长与去除，为复杂三维光栅设计提供了灵活的实现途径。

6.3.2.2 纳米级周期光栅的 FIB 直写工艺参数

FIB 直写工艺在钨合金表面写入纳米级周期光栅时，需要对多项关键参数进行系统优化，以兼顾材料去除效率、沟槽形貌质量以及周期均匀性。

常用的工艺参数范围如下：束流一般控制在 1 - 30 pA 之间，其中精细结构的刻写宜选用 1 - 5 pA 的低束流，以获得更高的分辨率，而快速粗加工阶段可适当提高束流；加速电压通常固定在 30 kV，该电压能够在分辨率与溅射效率之间取得较好的平衡；束斑直径保持在 5 - 15 nm 范围内，以保证纳米级周期的性。

线剂量需根据目标沟槽深度进行标定，一般设定在 0.2 - 4 nC/μm 之间；像素驻留时间控制在 0.2 - 5 μs；扫描模式以蛇形扫描或矢量扫描为主，并配合 30% - 60% 的像素重叠率，以减少沟槽不连续或过度再沉积现象；扫描间距则根据所需周期灵活调整，通常设定为周期的 30% - 70%。

6.3.3 离子束加工钨合金的再沉积与表面损伤控制策略

离子束加工钨合金过程中，再沉积和表面损伤是影响沟槽最终质量的两个主要问题。再沉积表现为被溅射出的原子在附近表面重新附着，形成瘤状突起或侧壁附着层；表面损伤则主要包括非晶层形成、镓离子注入、微裂纹以及晶格畸变等。

为了有效控制再沉积，可采取以下措施：采用 30° 至 60° 的倾斜入射角度，使溅射原子更倾向于沿离子入射方向飞离表面；通过样品旋转或动态摆动，使再沉积物在表面分布更加均匀；将样品台温度控制在 -120°C 至 -150°C 的低温范围，降低再沉积原子的表面扩散和迁移能力；同时优化束流密度和扫描速度，避免局部区域出现过高的剂量累积，从而减少过度再沉积的发生。

表面损伤的控制则主要依靠以下策略：在终抛阶段使用 $5 - 10 \text{ keV}$ 的低能量离子，以减小离子注入深度和非晶层厚度；引入反应性气体辅助刻蚀，例如 XeF_2 或 SF_6 ，将纯物理溅射转变为具有化学辅助作用的刻蚀过程，从而显著降低损伤层厚度；加工完成后进行 $400 - 650^\circ\text{C}$ 的低温真空退火，促进非晶层的部分再结晶并释放注入引起的应力；在加工前或加工过程中预先沉积一层薄保护膜，例如碳膜或金属掩膜，用以减少离子轰击对钨合金基体的损伤。

6.3.4 离子束刻蚀后表面清洁与损伤层修复方法

离子束刻蚀完成后，钨合金光栅表面往往残留镓离子注入、非晶层、碳污染以及少量再沉积颗粒，需要进行系统化的清洁和损伤修复处理。

表面清洁通常采用以下方法组合实施：首先使用异丙醇与去离子水混合液（加入少量表面活性剂）进行超声清洗，以去除松散颗粒和大部分有机残留；随后通过 O_2 或 Ar/O_2 混合等离子体清洗，有效去除表面碳污染和薄有机层；必要时采用 $0.5 - 2 \text{ keV}$ 的低能量 Ar^+ 离子束进行倾斜入射清洗，专门针对浅层再沉积物进行去除，剂量需控制在低水平以避免二次损伤；对于某些氧化物或残留镓化合物，可采用稀硝酸或碱性溶液进行短时化学清洗，浸泡时间控制在数秒至数十秒以内。

损伤层的修复主要通过以下途径完成：进行 $450 - 700^\circ\text{C}$ 的低温真空退火，保温时间 $1 - 3$ 小时，促进非晶层再结晶并驱除注入的镓原子；使用 $0.3 - 1 \text{ keV}$ 的低能量 Ar^+ 或 Xe^+ 离子束进行抛光，去除最表层的损伤层，厚度控制在 $5 - 15 \text{ nm}$ ；对于局部区域，可采用飞秒或纳秒激光进行退火处理，能量密度控制在不引起熔融的范围内，实现表面晶格的快速修复；最后通过原子层沉积（ALD）方法在表面沉积 $5 - 20 \text{ nm}$ 厚的超薄保护膜，例如 Al_2O_3 或 SiO_2 ，用于钝化表面并防止后续氧化。

清洁与修复完成后，通常采用 XPS、AES、TEM 截面分析或 AFM 对表面状态进行验证，确保镓残留量低于 $1 \text{ at}\%$ ，非晶层厚度小于 5 nm 。这些后处理步骤能够显著提升离子束刻蚀钨合金光栅的表面洁净度和光学性能稳定性，为后续光学测试和器件实际应用提供可靠保障。

6.4 钨合金光栅的干法刻蚀与反应离子刻蚀

钨合金光栅的干法刻蚀与反应离子刻蚀（RIE）是实现高精度周期微结构的重要非接触加工手段。该技术在低压等离子体环境中，通过物理离子轰击与化学自由基反应的协同作用去除材料，能够在钨合金基底上形成陡直侧壁、均匀沟槽和较低表面粗糙度，适用于需要较高深宽比和较大加工面积的光栅元件，例如中高线密度反射光栅、抗散射栅格以及部分相衬成像光栅的批量生产。

版权与免责声明

与纯物理溅射相比，反应离子刻蚀显著提高了材料去除效率，同时改善了侧壁形貌控制能力和掩膜选择比。加工通常在平行板电极或电感耦合等离子体（ICP）反应腔中进行，通过调节射频功率、偏置电压、气体流量、腔内压力和基底温度等参数，对刻蚀行为进行精细调控。该方法对掩膜材料的选择比要求较高，以保证沟槽深度的转移和轮廓完整性。

干法刻蚀与反应离子刻蚀的优势在于加工过程无机械接触，避免了刀具磨损和振动影响，能够实现亚微米级周期结构的均匀刻写，同时适用于较大尺寸基底的批量处理。通过工艺参数的系统优化，该技术已成为光栅生产中与机械刻划和离子束刻蚀并行的主要方法之一。

6.4.1 反应离子刻蚀在钨合金光栅中的化学-物理协同机制

反应离子刻蚀在钨合金光栅加工中的核心机制是化学反应与物理溅射的协同作用。等离子体中产生的活性自由基首先与钨表面原子发生化学反应，生成挥发性或低熔点的中间产物，降低表面原子键能；同时，加速离子在偏置电压作用下垂直轰击表面，增强产物脱离并暴露新鲜反应层，实现高效材料去除。化学反应提供主要的材料去除通道，而物理轰击则赋予刻蚀过程较强的方向性，从而改善侧壁陡直度和减少侧向刻蚀。

这种协同机制使反应离子刻蚀的速率明显高于纯物理溅射，同时表面质量和形貌控制能力得到显著提升。钨合金中合金元素的种类和含量会对反应产物的挥发性以及再沉积行为产生影响，因此实际工艺中需要针对具体合金体系调整气体组成和偏压条件。工艺窗口的建立依赖于对自由基密度、离子通量以及表面反应速率的匹配，通过光发射光谱等原位诊断手段和刻蚀速率测试，可以逐步确定适合钨合金光栅的最佳参数组合。

化学-物理协同作用还赋予了反应离子刻蚀较高的掩膜选择比和形貌可控性。在钨合金光栅的加工实践中，该机制能够实现沟槽深度均匀性良好、侧壁角度接近垂直的加工结果，为高性能衍射光栅的批量制备提供了可靠的技术途径。

6.4.1.1 常用气体体系与钨的挥发性产物

钨合金光栅反应离子刻蚀中常用的气体体系以氟基和氯基气体为主，辅以氧气或惰性气体进行特性调节。

氟基气体体系以 SF_6 、 CF_4 或 NF_3 为核心，其中 SF_6 因能产生较高密度的氟自由基而获得较快的刻蚀速率，主要挥发性产物为 WF_6 。 SF_6 常与 O_2 按一定比例混合使用，氧气促进表面生成 WO_3 中间层，再被氟自由基快速转化为挥发性 WF_6 ，从而提升总体刻蚀效率。

氯基气体体系以 Cl_2 或 BCl_3 为主，主要生成 WCl_6 、 WCl_5 等氯化物作为挥发性产物。 Cl_2 常与 Ar 混合以增强物理轰击作用， BCl_3 则因其较强的氧清除能力而常用于表面存在氧化层的钨合金。氯基体系的刻蚀速率相对氟基较低，但能获得更高的掩膜选择比和更平滑的表面形貌。

实际工艺中也常采用 SF_6 与 Cl_2 的混合气体，或分步刻蚀策略：先利用氟基气体实现快速材料去除，再切换至氯基气体进行表面精修，以兼顾效率与质量。气体配比的选择需根据合金成分、光栅深宽比和掩膜材料进行调整，确保挥发性产物的快速脱离和再沉积的有效抑制。

6.4.1.2 刻蚀速率、选择比与各向异性控制

反应离子刻蚀的刻蚀速率、掩膜选择比和各向异性是影响钨合金光栅加工质量的关键指标，通过调节等离子体参数实现三者之间的平衡。

刻蚀速率受射频功率、偏置电压、气体流量和腔内压力的影响。功率和偏压的提高能够增强离子能量和通量，从而加快刻蚀速率；适当增加氟基气体流量并降低腔内压力，有利于提高活性自由基密度和产物脱离效率。生产中需避免过高功率导致的表面粗糙化或掩膜损伤。

掩膜选择比（钨合金相对于掩膜材料的刻蚀速率比）通常要求达到较高水平，以保证沟槽深度的控制。氟基体系对 Cr、Ni 或 SiO_2 掩膜的选择比较高，氯基体系对某些光刻胶的选择比表现更优。通过在气体中添加少量 CHF_3 或 O_2 调节氟碳比或氧化平衡，可进一步优化选择比，避免掩膜过度刻蚀导致沟槽展宽。

各向异性（侧壁垂直度）主要依赖于离子轰击的方向性。较高的偏置电压和较低的腔内压力有利于增强离子垂直入射能力，获得接近垂直的侧壁；引入侧壁钝化机制，例如在 SF_6 刻蚀中周期性添加 C_4F_8 形成聚合物保护层，可有效抑制侧向刻蚀，实现深宽比较高的陡直沟槽。

刻蚀速率、选择比与各向异性的优化需要通过试验设计和参数扫描建立对应关系，综合考虑光栅周期、沟槽深度、掩膜厚度和合金成分等因素。合理匹配的工艺条件能够在保持较高刻蚀效率的同时，实现侧壁角度良好、表面粗糙度较低的加工结果，为钨合金光栅的高性能光学应用提供可靠的微纳结构基础。

6.4.2 深反应离子刻蚀用于高深宽比钨合金光栅

深反应离子刻蚀（DRIE）是实现高深宽比钨合金光栅的重要技术途径，适用于需要较大沟槽深度、陡直侧壁和较高深宽比的光栅结构，例如某些抗散射栅格、X 射线相衬成像用吸收光栅以及高能粒子探测中的高深宽比分束光栅。

DRIE 在钨合金上的应用主要基于交替刻蚀与钝化步骤的循环模式。在刻蚀阶段，使用高密度氟基等离子体快速去除材料；在钝化阶段，引入含氟碳气体在侧壁沉积一层薄保护层，阻止后续刻蚀步骤对侧壁的侵蚀，从而获得接近垂直的沟槽侧壁。

钨合金的高密度和高原子序数特性使刻蚀过程需要针对性调整，通常采用较低的钝化气体流量和较长的刻蚀循环时间，以平衡深度方向推进与侧壁保护。DRIE 能够在较大面积基底上实现均匀的高深宽比结构，同时保持较高的刻蚀速率和可接受的表面质量。

该技术的主要优势在于能够在较大面积基底上实现均匀的高深宽比结构，同时保持较高的刻蚀速率和可接受的表面质量。

6.4.3 感应耦合等离子体刻蚀的功率与偏压优化

感应耦合等离子体（ICP）刻蚀是钨合金光栅干法加工中常用的高密度等离子体源，其功率与偏压的优化影响了刻蚀速率、侧壁形貌和表面质量的综合表现。

源功率主要控制等离子体密度和活性自由基浓度。较高的源功率能够产生更高密度的自由基，从而显著提高化学刻蚀速率；但功率过高可能导致掩膜溅射速率增加和表面粗糙度恶化。偏置功率主要控制离子轰击能量和方向性。较高的偏置功率增强离子垂直入射能力，有利于提高各向异性和侧壁陡直度；偏置过高则可能引起表面损伤、掩膜刻蚀加剧和再溅射现象。

功率与偏压的优化需综合考虑刻蚀速率与形貌质量的平衡。对于钨合金光栅，常用策略是保持较高源功率以获得充足的自由基，同时采用中等偏压以保证方向性，避免过度物理轰击导致的侧壁粗糙化。通过试验设计和参数扫描，建立源功率、偏置功率与刻蚀速率、选择比、侧壁角度之间的关系曲线，并结合原位诊断手段进行实时监控和调整。

6.4.4 干法刻蚀钨合金光栅的掩膜材料选择与剥离工艺

干法刻蚀钨合金光栅时，掩膜材料的选择影响沟槽深度的转移、侧壁形貌的完整性和最终表面质量。常用掩膜材料包括金属掩膜（如 Cr、Ni）和硬质介质掩膜（如 SiO_2 、 Si_3N_4 ），偶尔也使用厚光刻胶或复合掩膜。

金属掩膜中，Cr 因其在氟基和氯基等离子体中具有较高的抗刻蚀能力而应用较广；Ni 在某些氯基体系中表现出色，适合需要较高选择比的深刻蚀。硬质介质掩膜如 SiO_2 在氟基刻蚀中选择比较高，常通过 PECVD 或热氧化制备； Si_3N_4 则在氯基体系中表现稳定。

剥离工艺需根据掩膜种类和光栅表面要求选择合适方法。金属掩膜剥离常用湿法化学溶液，硬质介质掩膜剥离则采用氢氟酸基缓冲溶液或等离子体灰化结合湿法腐蚀。剥离过程中需控制溶液浓度、温度和时间，避免对钨合金基底造成二次腐蚀或沟槽侧壁损伤。

为减少剥离残留和表面污染，生产中常采用干剥离与湿清洗组合工艺：先用 O_2 等离子体灰化去除有机残留，再进行选择性湿法剥离，最后用去离子水超声清洗和氮气吹干。剥离后通常通过显微观察检查沟槽完整性和表面洁净度，确保无残留物和形貌畸变。这些掩膜选择与剥离工艺的优化，为钨合金光栅干法刻蚀提供了可靠的图案转移保障。

6.4.5 刻蚀后侧壁粗糙度与沟槽均匀性表征

刻蚀后钨合金光栅的侧壁粗糙度和沟槽均匀性是评价干法加工质量的核心指标，影响光栅的杂散光水平、衍射效率和长期光学稳定性。

侧壁粗糙度通常采用原子力显微镜或扫描电镜截面分析进行表征。原子力显微镜可在沟槽侧壁区域进行高分辨率三维扫描，计算线粗糙度 Ra 和均方根粗糙度 Rq。扫描电镜结合图像分析软件可对侧壁进行大范围统计，评估粗糙度的空间分布均匀性。

沟槽均匀性包括周期一致性、深度均匀性和侧壁角度重复性。周期均匀性通过激光衍射或坐标测量机检测；沟槽深度均匀性采用白光干涉仪或台阶仪多点测量；侧壁角度重复性通过扫描电镜截面图像拟合角度分布。

表征过程中常结合多种手段形成互补验证：原子力显微镜用于局部高分辨率粗糙度分析，扫描电镜用于形貌和角度的整体观察，白光干涉仪用于大面积深度和周期统计。检测结果用于反馈调整刻蚀参数，例如通过降低偏压或优化钝化气体流量来改善侧壁粗糙度，或通过调整功率分布来提升沟槽均匀性。

通过系统化的侧壁粗糙度和沟槽均匀性表征，干法刻蚀钨合金光栅能够达到较高的形貌一致性和光学性能稳定性，为后续光学测试和器件应用提供了可靠的质量保证。

6.5 钨合金光栅表面镀膜与界面改性

钨合金光栅表面镀膜与界面改性是提升材料环境适应性、延长使用寿命和优化光学性能的重要后处理手段。钨合金在含氧或高温环境中容易发生氧化，导致表面粗糙度增加、周期结构变形和衍射效率下降。通过在刻划或刻蚀完成的沟槽表面沉积保护涂层或功能涂层，可以显著改善抗氧化能力、降低杂散光并增强界面稳定性。镀膜工艺的选择需兼顾涂层与钨合金基底的附着力、热膨胀匹配性、光学透过率或反射率要求以及对沟槽形貌的影响。

表面镀膜不仅作为保护层阻挡氧气扩散，还可通过界面改性调节表面能、改善润湿性或引入特定光学功能，例如提高特定波段的反射率或降低表面散射。实际应用中，镀膜厚度、均匀性和应力状态需控制，以避免涂层开裂、剥离或对周期结构的几何精度产生不利影响。镀膜与界面改性技术的合理应用，使光栅能够在更广泛的环境条件下保持稳定的光学性能。

6.5.1 保护涂层对钨合金光栅抗氧化性能的影响

保护涂层对钨合金光栅抗氧化性能的影响主要体现在阻挡氧气扩散、降低氧化反应速率和维持表面结构完整性三个方面。未经保护的钨合金在含氧环境中容易生成 WO_3 等氧化物，导致表面体积膨胀、沟槽轮廓畸变和光学散射增加。沉积适当的保护涂层后，氧气向基底的扩散路径被显著延长，氧化反应速率得到有效抑制，从而延长光栅在工作环境中的稳定时间。

常用保护涂层包括氧化物（如 Al_2O_3 、 SiO_2 ）、氮化物（如 Si_3N_4 ）以及金属氧化物复合层。这些涂层通过形成致密、连续的阻挡层，显著降低氧的渗透速率。涂层与钨合金基底之间的界面结合强度影响保护效果，良好的附着力能够防止涂层在热循环或机械应力作用下剥离。涂层厚度需控制在一定范围内，过薄则保护不足，过厚可能引起应力积累或光学性能变化。

保护涂层对抗氧化性能的提升还体现在维持沟槽形貌的稳定性上。氧化过程往往从沟槽侧壁和底部开始，涂层覆盖后可有效抑制这些区域的局部氧化，避免侧壁粗糙化或沟底隆起。

6.5.2 镀膜工艺选择：物理气相沉积与化学气相沉积对比

物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）是钨合金光栅表面镀膜的两种主要工艺路线，各有其适用特点和局限性。

物理气相沉积包括磁控溅射、蒸发和脉冲激光沉积等方法，其特点是沉积温度较低（通常室温至几百摄氏度），对基底热影响小，适合已完成精密刻划或刻蚀的光栅表面。PVD 工艺能够获得较高的涂层纯度和较好的台阶覆盖性，尤其在沟槽侧壁和底部也能实现一定程度的均匀沉积。磁控溅射是其中应用最广的方式，可沉积金属、氧化物或氮化物涂层，膜厚控制精度高，应力状态可通过工艺参数调节。PVD 的缺点在于覆盖性受限于直线传播特性，对于高深宽比沟槽的底部覆盖可能不够理想。

化学气相沉积包括等离子体增强 CVD（PECVD）和原子层沉积（ALD）等，其特点是沉积温度范围较宽，覆盖性极佳，尤其适用于复杂三维结构。ALD 以其原子级厚度控制和优异的保形性，在钨合金光栅的超薄保护层沉积中具有突出优势，能够在沟槽侧壁和底部实现高度均匀的涂层覆盖。PECVD 则在沉积速率和成本方面更具优势，适合中等厚度的功能涂层。CVD 工艺的缺点是沉积温度通常较高，可能对已加工的光栅基底产生热应力或微观组织变化，需要通过低温工艺或后退火加以缓解。

在钨合金光栅镀膜工艺选择中，PVD 更适合对温度敏感、需要较高纯度或快速沉积的保护层或反射层；CVD（尤其是 ALD）则更适用于要求极佳保形性和原子级厚度控制的超薄保护层或界面改性层。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ （狭缝设计合理前提下）
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	17.0~18.5g/cm ³
	硬度 (HRC)	24~35
	抗拉强度	650~1100MPa
	延伸率	2~25%
结构精度性能	栅条厚度	0.05~0.5mm（可定制）
	狭缝宽度	0.05~0.5mm（可定制）
	栅条间距公差	$\pm 0.025\text{mm}$
	平面度	$\leq 0.02\text{mm}/100\text{mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度-40~300°C
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



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

第七章 钨合金光栅的应用

7.1 钨合金光栅在医疗领域的应用

中钨智造钨合金光栅在医疗领域的应用主要体现在 X 射线成像技术的优化上，是相衬成像和相关多模态成像系统。钨合金凭借其高密度、高原子序数和良好的机械稳定性，成为制作高精度吸收光栅和相位调控光栅的理想材料。这些光栅能够显著提升 X 射线成像的对比度、软组织分辨能力和剂量利用效率，在乳腺成像、肺部检查、关节软骨评估以及其他低对比度组织的无创诊断中发挥作用。

钨合金光栅的应用使传统吸收成像向相衬成像和暗场成像方向扩展，能够揭示常规 X 射线难以捕捉的组织微结构信息。研究人员和医疗设备开发团队通过将钨合金光栅集成到专用成像系统中，逐步实现了从实验室原型到临床应用的过渡。这些应用不仅提高了诊断的敏感性和特异性，还在一定程度上降低了辐射剂量，为患者提供了更安全、更清晰的检查手段。

7.1.1 钨合金光栅在 X 射线相衬成像系统中的核心作用

钨合金光栅在 X 射线相衬成像系统中承担关键的光学调控功能，通过管理 X 射线的相位、吸收和散射信息，实现对软组织的高对比度成像。相衬成像依赖于 X 射线波前在穿过不同折射率组织时的相位偏移，而钨合金光栅能够将这些相位信息转化为可测量的强度变化，从而弥补传统吸收成像在低密度组织对比度不足的局限。

钨合金的高吸收系数和加工精度使其适合制作相衬成像系统中的吸收光栅和源光栅，能在较高能量 X 射线下维持结构完整性和光学性能稳定性。系统集成时，钨合金光栅与其他光学元件协同工作，形成完整的相位敏感光路，帮助医生获取组织的微观结构特征和病理变化信息。

7.1.1.1 Talbot-Lau 干涉仪中 G0 源光栅、G1 相位光栅与 G2 吸收光栅的钨合金实现

Talbot-Lau 干涉仪是 X 射线相衬成像的核心光学架构，其中 G0 源光栅、G1 相位光栅和 G2 吸收光栅共同完成 X 射线的相干分割、相位调制和干涉信号读取。钨合金在这些光栅中的应用各有侧重。

G0 源光栅通常采用钨合金制作吸收条结构，用于将常规 X 射线源分割成多个相干小源，提高系统的相干长度和条纹可见度。钨合金的高密度保证了足够的吸收对比，使源光栅能够在较高管电压下有效工作。

G1 相位光栅多采用低吸收材料（如硅）以产生相位调制，而在某些高能系统设计中，也会使用钨合金作为 G1 的支撑基底或辅助吸收结构，以增强系统的机械稳定性和热管理能力。

G2 吸收光栅是钨合金应用最集中的部件，其周期性吸收条用于将相位信息转化为可测量的强度调制。钨合金的高吸收系数使 G2 能够在较薄厚度下实现高对比度的莫尔条纹读取，同

时保持良好的结构刚性和热稳定性。钨合金 G2 光栅的制作通常结合精密刻划或干法刻蚀工艺，确保条纹周期与 G0、G1 的匹配。

通过钨合金在 G0 和 G2 光栅中的应用，Talbot-Lau 干涉仪能够在实验室和临床环境中实现稳定的相衬信号采集，为后续图像重建提供高质量的原始数据。

7.1.1.2 高能 X 射线下相衬、暗场与吸收三模态成像的钨合金光栅配置

在 高能 X 射线条件下，相衬、暗场与吸收三模态成像能够同时提供组织的相位对比、散射信息和传统吸收信息。钨合金光栅在这种多模态系统中主要用于 G0 源光栅和 G2 吸收光栅的配置，以适应较高管电压和更强的穿透需求。

高能 X 射线（通常几十 keV 至上百 keV）对光栅的吸收要求更高，钨合金的高原子序数和密度优势使 G0 和 G2 能够在较薄厚度下实现足够的调制深度，同时减少对一次 X 射线的过度衰减。G0 源光栅采用钨合金制作周期性吸收条，以产生足够的相干小源；G2 吸收光栅则利用钨合金的高吸收特性，实现对相位梯度和小角度散射信号的有效分离。

三模态成像的实现依赖于相位步进或傅里叶分析方法，从采集到的多幅投影中分别提取吸收、相衬和暗场信号。钨合金光栅的配置确保了系统在高能条件下仍能维持较高的条纹可见度和信号对比度，从而获得清晰的相衬图像、反映微结构特征的暗场图像以及传统的吸收图像。这种多模态信息融合为疾病诊断提供了更全面的组织特征描述，尤其在肺部纤维化、骨关节病变和肿瘤微环境评估中表现出潜在价值。

7.1.1.3 低剂量、高对比度软组织成像（乳腺、肺部、关节软骨等）中的优势

钨合金光栅在低剂量、高对比度软组织成像中的优势主要体现在显著提升低密度组织的可见度和降低辐射剂量两个方面。传统 X 射线吸收成像对软组织（如乳腺腺体、肺部实质、关节软骨）的对比度较低，需要较高剂量才能获得可诊断图像，而相衬成像通过钨合金光栅引入的相位敏感机制，能够将组织折射率差异转化为强度对比，即使在较低剂量下也能清晰显示软组织边界和微小病变。

在乳腺成像中，钨合金光栅配置的相衬系统能够更好地分辨腺体结构、微钙化和纤维组织，辅助早期乳腺癌筛查；在肺部成像中，暗场信号对肺泡结构和纤维化程度的敏感性较高，有助于慢性阻塞性肺病和间质性肺病的评估；在关节软骨成像中，相衬成像能够显示软骨厚度、表面完整性和早期退行性变化，为骨关节炎的早期诊断和疗效监测提供支持。

钨合金光栅的引入使系统能够在较低辐射剂量下获得更高的软组织对比度，这在乳腺筛查等需要多次检查的场景中尤为重要。临床研究表明，相衬成像系统在保持或提升图像诊断价值的同时，能够将辐射剂量降低到传统吸收成像的水平甚至更低，为患者提供了更安全的影像学检查选择。钨合金光栅的材料特性和加工精度为这些优势的实现提供了关键支撑，推动了 X 射线相衬成像向临床转化的进程。

版权与免责声明

7.1.2 钨合金光栅在 CT 抗散射栅格中的应用

钨合金光栅在 CT 抗散射栅格中的应用主要利用其高密度特性来有效抑制锥形束 CT 中产生的散射 X 射线。散射 X 射线是 CT 成像中导致图像对比度下降、伪影增加和软组织分辨率降低的主要因素之一。传统抗散射栅格多采用铅或钨材料，而钨合金光栅凭借更高的吸收系数和更好的机械稳定性，能够在更薄的结构下实现较高的散射抑制效率，同时保持足够的 X 射线一次透过率。

钨合金抗散射栅格通常设计为二维结构（2D 栅格），其周期性吸收条阵列能够从多个方向拦截偏离原始路径的散射光子，从而显著降低到达探测器的散射背景。这种二维设计相比传统一维栅格具有更全面的散射抑制能力，尤其在宽锥角和大视场扫描中表现突出。钨合金的高密度使栅格能够在保持结构刚性的前提下实现更精细的条纹间距和更高的吸收效率，为现代多排探测器 CT 系统提供了更优的散射管理方案。

7.1.2.1 高密度 2D 钨合金栅格对锥形束 CT 散射 X 射线的抑制

高密度 2D 钨合金栅格对锥形束 CT 散射 X 射线的抑制能力源于其材料特性和二维周期结构的协同作用。钨合金的高原子序数和高密度赋予了栅格条对散射光子极强的吸收能力，使偏离原始方向的 X 射线在穿越栅格时被有效拦截，而沿直线路径的一次 X 射线则能够以较高透过率通过栅格间隙到达探测器。

二维栅格相比传统一维栅格能够同时抑制纵向和横向散射分量，尤其在宽锥角扫描中，散射光子具有更复杂的空间分布，2D 结构能够从多个角度提供阻挡路径，从而实现更全面的散射抑制。钨合金栅格的条纹宽度、间距和高度参数经过优化后，能够在不同管电压和体模厚度条件下保持稳定的散射抑制效率。研究表明，高密度 2D 钨合金栅格在锥形束 CT 中能够显著降低散射噪声对图像的干扰，使低对比度组织的边界和内部细节更加清晰。

7.1.2.2 信噪比提升、图像对比度改善与伪影减少的定量表现

钨合金光栅在 CT 抗散射栅格中的应用能够带来信噪比提升、图像对比度改善和伪影减少等多方面的定量表现。散射 X 射线的抑制降低了探测器接收到的背景噪声，使信号与噪声的比值得到提升，尤其在软组织区域表现更为明显。对比度改善主要体现在低密度组织与周围结构的边界清晰度增强，灰度动态范围得到扩展，组织分层和细微结构的可视性显著提高。

伪影减少方面，钨合金栅格有效抑制了由散射引起的杯状伪影、条纹伪影和非均匀性伪影，使重建图像的均匀性和空间分辨率得到改善。这些定量表现的实现依赖于栅格对一次 X 射线的高透过率与对散射 X 射线的强吸收能力的平衡设计。

7.1.2.3 与传统铅栅格或 1D 钨栅格相比的剂量降低与成像质量优势

钨合金光栅与传统铅栅格或一维钨栅格相比，在剂量降低和成像质量方面具有一定优势。高密度钨合金能够在更薄的栅格厚度下实现与铅栅格相当甚至更高的散射抑制效率，从而减少

对一次 X 射线的吸收衰减，提高探测器接收到的有用信号强度。这意味着在获得相同图像质量的前提下，系统可以采用较低的管电流或更短的曝光时间，从而降低患者接受的辐射剂量。

与一维钨栅格相比，钨合金 2D 栅格能够更全面地抑制散射 X 射线，尤其在宽锥角和大视场扫描中表现更优。一维栅格主要抑制单一方向的散射，而 2D 钨合金栅格能够同时阻挡多个方向的散射光子，使图像中的残余散射背景进一步降低。对比度、信噪比和伪影控制水平均有不同程度的改善，尤其在低对比度软组织区域的优势更为明显。

这些优势使钨合金光栅在现代 CT 系统中逐渐成为高性能抗散射栅格的优选材料之一，在保持或提升成像质量的同时，为降低辐射剂量提供了可行的技术途径。

7.1.3 钨合金光栅在介入放射学与血管造影中的应用

钨合金光栅在介入放射学与血管造影中的应用主要体现在提高实时成像质量、抑制散射干扰和增强血管结构清晰度等方面。介入放射学和数字减影血管造影（DSA）对成像系统的实时性、分辨率和对比度要求较高，而散射 X 射线是影响图像质量的重要因素。钨合金光栅的高吸收能力和精密周期结构能够有效降低散射背景，使血管轮廓和病变细节在复杂解剖背景下更加清晰。

钨合金光栅常作为抗散射栅格或辅助吸收元件集成到 DSA 系统中，通过优化栅格参数实现对散射 X 射线的针对性抑制。钨合金的机械稳定性和辐射耐受性使其能够在高通量、长时间透视条件下保持结构完整性，为介入操作提供稳定的图像支持。

7.1.3.1 数字减影血管造影系统中高分辨率吸收光栅的钨合金设计

数字减影血管造影系统中，高分辨率吸收光栅的钨合金设计主要用于抑制散射 X 射线对减影图像的干扰。钨合金光栅通常采用精细周期的二维或一维吸收条结构，条纹宽度和间距根据系统分辨率和视场大小进行优化。高密度钨合金能够在较薄厚度下实现足够的吸收对比，使一次 X 射线以较高透过率到达探测器，同时有效拦截散射光子。

光栅设计中，钨合金条的周期精度和表面质量影响减影图像的清晰度和伪影水平。生产中常采用精密刻划或干法刻蚀工艺，确保条纹边缘锐利、表面平整。钨合金光栅与探测器阵列的对准是系统性能的关键，通过专用安装机构和校准方法实现亚像素级对位，从而最大限度发挥光栅的散射抑制作用。

7.1.3.2 实时减影成像中散射背景抑制与血管结构清晰度提升

实时减影成像中，钨合金光栅对散射背景的抑制显著提升了血管结构的清晰度。DSA 成像依赖于对比剂充盈前后图像的减影，散射 X 射线会导致背景噪声增加、减影不完全和血管边缘模糊。钨合金光栅通过拦截大部分散射光子，使减影图像中的背景趋于均匀，血管轮廓和分支结构更加锐利。

散射抑制的效果在复杂解剖区域和肥胖患者中尤为明显，能够减少因散射引起的伪影和对比度损失，使细小血管和病变区域的显示更加清晰。临床操作中，这种清晰度的提升有助于医生更准确地判断血管狭窄、闭塞或畸形的位置和程度，提高介入治疗的安全性和成功率。

7.1.3.3 高通量、高能量 X 射线下钨合金光栅的辐射耐受性要求

高通量、高能量 X 射线下，钨合金光栅需要具备较高的辐射耐受性，以维持长期使用的结构完整性和光学性能稳定性。高通量透视和连续 DSA 操作会使光栅承受较大的辐射剂量，钨合金的高熔点和热稳定性使其能够耐受较高温度和累积剂量而不发生明显形变或性能退化。

辐射耐受性要求主要包括：材料在长时间高通量照射下保持密度和周期结构的稳定性；表面涂层或保护层在辐射作用下不发生剥离或降解；栅格条在热应力和辐射损伤下不出现微裂纹或断裂。实际系统中，钨合金光栅常结合热管理设计和表面保护层，进一步提升其在高能量、高通量条件下的耐受能力。

通过材料特性和工艺优化的综合保障，钨合金光栅能够在介入放射学的高负荷环境中维持稳定的散射抑制性能和图像质量，为长时间、复杂介入操作提供可靠的影像支持。

7.1.4 钨合金光栅在质子/重离子治疗中的图像引导应用

钨合金光栅在质子/重离子治疗中的图像引导应用主要体现在提高治疗前定位精度、实时图像引导和剂量验证的可靠性上。质子与重离子治疗对射束路径和靶区定位的要求极高，而散射 X 射线或次级粒子会干扰图像质量，导致定位误差或剂量分布偏差。钨合金光栅作为高密度抗散射元件，能够有效抑制散射背景，使锥形束 CT (CBCT) 或质子 CT 图像更清晰，为治疗计划的验证和射束适形提供可靠的解剖信息。

钨合金的高吸收能力和机械稳定性使其适合在高辐射通量和高能量粒子环境中长期使用。光栅结构设计能够平衡一次射线的透过率与散射抑制效率，避免对有用信号的过度衰减，同时维持治疗床和机架系统的兼容性。这些特性使钨合金光栅成为现代粒子治疗系统中图像引导模块的重要组成部分。

7.1.4.1 机架式 CBCT 与锥形束质子 CT 中的钨合金抗散射栅格

机架式 CBCT 和锥形束质子 CT 是粒子治疗中常用的图像引导手段，用于治疗前定位和射束路径验证。钨合金抗散射栅格在这些系统中主要作为探测器前端的二维吸收结构，拦截偏离原始路径的散射 X 射线或次级粒子，提高图像的信噪比和对比度。

在机架式 CBCT 中，钨合金栅格能够有效降低由患者体厚和宽锥角引起的散射噪声，使重建图像中的软组织边界和骨性标志更清晰。在锥形束质子 CT 中，钨合金栅格对散射质子和次级中子的抑制有助于减少图像中的伪影和噪声，提高水当量路径长度的测量精度。这些栅格通常采用高密度二维周期结构，条纹间距和高度经过优化，以在不同能量和体模条件下保持较高的散射抑制效率。

版权与免责声明

钨合金抗散射栅格的集成使机架式 CBCT 和锥形束质子 CT 的图像质量得到改善，为治疗计划的在线调整和射束适形提供了更可靠的解剖参考。

7.1.4.2 治疗前定位与剂量验证成像中的散射抑制与剂量精度提高

治疗前定位和剂量验证成像是粒子治疗流程中的关键环节，钨合金光栅通过抑制散射背景显著提升了这些成像的准确性。在治疗前定位阶段，散射抑制使 CBCT 或质子 CT 图像中的靶区轮廓和危及器官边界更加清晰，减少了因散射噪声导致的定位误差，从而提高射束入射方向和靶区覆盖性。

在剂量验证成像中，钨合金光栅能够降低散射对探测器信号的干扰，使重建的剂量分布图更接近实际沉积情况。散射背景的减少有助于更准确地评估射束在组织中的实际路径长度和剂量沉积分布，是在存在异质性组织时，这种改善对剂量计算的可靠性尤为重要。

通过钨合金光栅的应用，治疗前定位误差和剂量验证偏差得到控制，使粒子治疗计划的执行更加符合设计意图，为提高治疗增益比和降低正常组织并发症风险提供了技术支持。

7.1.4.3 增材制造高精度 2D 钨合金栅格在质子治疗中的临床验证

增材制造技术在高精度 2D 钨合金栅格的制备中展现出显著优势，能够实现复杂周期结构、梯度密度或个性化设计的抗散射栅格。传统加工方法在制作高深宽比或非规则形状的钨合金栅格时面临较大挑战，而增材制造通过逐层构建的方式，可以形成精细的二维吸收条阵列，同时保持较高的密度均匀性和结构完整性。

临床验证阶段，增材制造的钨合金栅格在粒子治疗系统中进行了多中心测试，重点评估其在实际治疗环境中的散射抑制效率、图像质量提升和长期辐射稳定性。验证结果表明，这类栅格能够在高通量质子束或重离子束照射下维持稳定的几何精度和吸收性能，对散射背景的抑制效果与传统加工栅格相当甚至更优。增材制造还允许根据不同治疗机型和患者体型定制栅格参数，例如调整条纹间距或局部厚度，以适应特定治疗部位的散射特性。

7.1.5 钨合金光栅在其他医疗辐射防护与成像设备中的应用

钨合金光栅在牙科 CBCT、乳腺断层合成、骨密度仪以及调强放疗和核医学成像设备中也有广泛应用，主要作为抗散射栅格、准直元件或屏蔽组件，发挥抑制散射、改善图像质量和实现射野适形的作用。

7.1.5.1 牙科 CBCT、乳腺断层合成与骨密度仪中的抗散射栅格

在牙科 CBCT 中，钨合金抗散射栅格能够有效降低颌面部扫描中产生的散射 X 射线，提高牙齿、牙槽骨和颞下颌关节的图像对比度和细节分辨率。栅格的二维结构设计使散射抑制更全面，尤其在宽视场扫描中表现突出。

乳腺断层合成系统中，钨合金栅格用于抑制乳腺组织内部散射，提高层析图像的清晰度和微钙化、肿块的检出率。栅格参数根据乳腺厚度和管电压进行优化，在保持低剂量的同时实现较高的图像质量。

骨密度仪中，钨合金栅格有助于减少软组织散射对骨矿物质密度测量的干扰，提高腰椎和股骨近端等部位的测量精度和重复性。这些应用中，钨合金栅格的高密度和加工精度使其能够在有限空间内实现有效的散射管理。



中钨智造钨合金光栅图片

7.1.5.2 钨合金多叶准直器在调强放疗中的射野适形

钨合金多叶准直器（MLC）在调强放疗（IMRT）和立体定向放疗中用于实现射野的动态适形。钨合金的高密度和良好的机械加工性能使其成为 MLC 叶片的主要材料，能够在较薄厚度下提供足够的射线屏蔽能力，同时保持叶片运动的灵活性和定位精度。

钨合金叶片通过精密加工形成互锁结构，在加速器治疗头中实现亚毫米级的射野边缘控制。叶片表面的平整度和边缘锐利度影响射野适形的准确性，钨合金的稳定性确保了长期使用中射野形状的一致性。这些特性使多叶准直器成为现代放疗设备中实现剂量分布的关键组件。

7.1.5.3 钨合金光栅/准直组件在 SPECT、PET-CT 融合成像中的辐射准直与屏蔽

在 SPECT 和 PET-CT 融合成像系统中，钨合金常用于准直器、光栅或屏蔽组件，以实现伽马射线或正电子湮灭光子的方向选择和背景辐射屏蔽。钨合金准直器能够形成高分辨率的投影通道，抑制非预期方向的散射和随机符合事件，提高图像的空间分辨率和对比度。

版权与免责声明

在 PET-CT 系统中，钨合金屏蔽组件用于减少探测器间的串扰和环境辐射干扰，改善融合图像的解剖-功能对应精度。钨合金光栅或准直结构的精密加工确保了通道的对准精度和几何一致性，使系统能够在复杂临床场景中提供清晰的代谢-解剖信息。

7.2 钨合金光栅在同步辐射与自由电子激光领域的应用

钨合金光栅在同步辐射与自由电子激光领域发挥着关键的光学调控作用。这些大型设施产生的高亮度、宽能谱 X 射线或自由电子激光束需要精密的光学元件来实现分束、单色化、准直和聚焦。钨合金凭借其高密度、高原子序数和良好的机械稳定性，成为硬 X 射线波段分束器、单色器以及准直组件的优选材料，能够在高通量和高能量条件下保持结构完整性和光学性能稳定性。钨合金光栅的应用推动了同步辐射光源和自由电子激光装置向更高分辨率和更高通量方向发展。研究人员通过优化光栅周期、槽形和表面涂层，使钨合金光栅能够在复杂光路系统中与其他光学元件协同工作，形成高效的能量选择和波前调控链条。

7.2.1 钨合金光栅作为硬 X 射线分束器与单色器的作用

钨合金光栅作为硬 X 射线分束器与单色器，能够通过周期性结构实现对入射 X 射线的衍射分离和能量选择。在同步辐射光束线中，钨合金分束器将宽能谱光束分成不同能量分支，满足多站同时实验的需求；作为单色器时，则通过布拉格衍射或劳厄衍射机制筛选特定波长，抑制连续谱背景。

钨合金的高吸收系数使其在硬 X 射线能量范围内表现出良好的衍射效率和通量保持能力。反射式或透射式配置的选择取决于光路布局和能量范围，反射式适合表面敏感实验，透射式则更适应高通量透射测量。光栅设计时注重周期参数与入射角的匹配，以实现高能量分辨率和低谐波污染。

7.2.1.1 反射式与透射式钨合金光栅在能谱波段的衍射效率与通量优化

反射式钨合金光栅在能谱波段通过表面周期结构实现布拉格衍射，衍射效率受槽深、占空比和表面平整度影响。优化槽形轮廓和镀膜层可以减少吸收损失，提高有用光通量。透射式钨合金光栅则利用体相衍射机制，在较高能量下保持较好的通量透过率，适合需要大面积光束的实验站。

两种配置的优化重点在于平衡衍射效率与热负荷管理。反射式光栅常采用多层涂层增强反射，而透射式光栅则通过减薄基底厚度降低吸收。实际应用中，根据光源特性选择配置方式，使光通量和能量选择同时达到较优状态。

7.2.1.2 高阶谐波抑制与能量分辨率提升的钨合金光栅设计

钨合金光栅在高阶谐波抑制方面表现出色。通过调整周期和槽深参数，可以有效降低高阶衍射峰的强度，确保单色光纯度。能量分辨率提升依赖于光栅线密度和表面质量的优化，高线密度钨合金光栅能够实现更窄的能量带宽，满足精细谱学实验的需求。

版权与免责声明

设计中还结合掠入射角度和多级串联配置，进一步抑制谐波并提升分辨率。钨合金的机械稳定性保证了光栅在长期运行中保持光学参数一致性，为高分辨率实验提供了可靠保障。

7.2.2 钨合金光栅在瞬态光栅光谱学与时间分辨实验中的应用

钨合金光栅在瞬态光栅光谱学与时间分辨实验中用于生成和探测瞬态光栅信号。激光泵浦后，钨合金光栅作为探测光栅将样品中的周期性调制转化为可测量的衍射信号，帮助研究人员观察超快动力学过程。

该技术在表面声波、热扩散和载流子动力学研究中发挥作用。钨合金光栅的高精度周期结构确保了信号的时空分辨能力，使实验能够捕捉纳秒至皮秒尺度的变化过程。

7.2.2.1 表面声波、热扩散与载流子动力学的探测

表面声波探测利用钨合金光栅将声波引起的表面调制转化为衍射强度变化，揭示材料弹性性质和界面应力状态。热扩散探测则通过监测光栅信号衰减，分析热传导过程和界面热阻。载流子动力学研究中，钨合金光栅捕捉光激发载流子的空间分布和弛豫行为，为半导体和纳米材料研究提供关键数据。这些探测过程依赖于光栅的高衍射效率和稳定性，使时间分辨信号更加清晰可靠。

7.2.3 钨合金光栅在极紫外与软 X 射线自由电子激光光束线中的准直与聚焦功能

钨合金光栅在极紫外与软 X 射线自由电子激光光束线中承担准直和聚焦功能。通过周期结构实现对短波长光束的波前整形，减少发散并提高聚焦斑点质量。钨合金的机械刚性和热稳定性使其能够在高重复率脉冲下保持光学参数不变。

准直过程减少光束发散，聚焦过程则将能量集中到样品区域，提升实验通量和分辨率。这些功能为材料动态过程和原子级成像研究提供了支持。

7.2.4 高辐射通量环境下钨合金光栅的热负荷管理与长期稳定性

高辐射通量环境下，钨合金光栅的热负荷管理通过材料高热导率和表面涂层实现。合理设计冷却通道和热沉结构，及时导出吸收热量，防止热变形和性能退化。长期稳定性依赖于合金成分优化和表面保护，确保光栅在持续照射下保持周期精度和表面质量。

这些管理措施使钨合金光栅能够在自由电子激光和同步辐射装置中长期可靠运行。

7.3 钨合金光栅在中子科学领域的应用

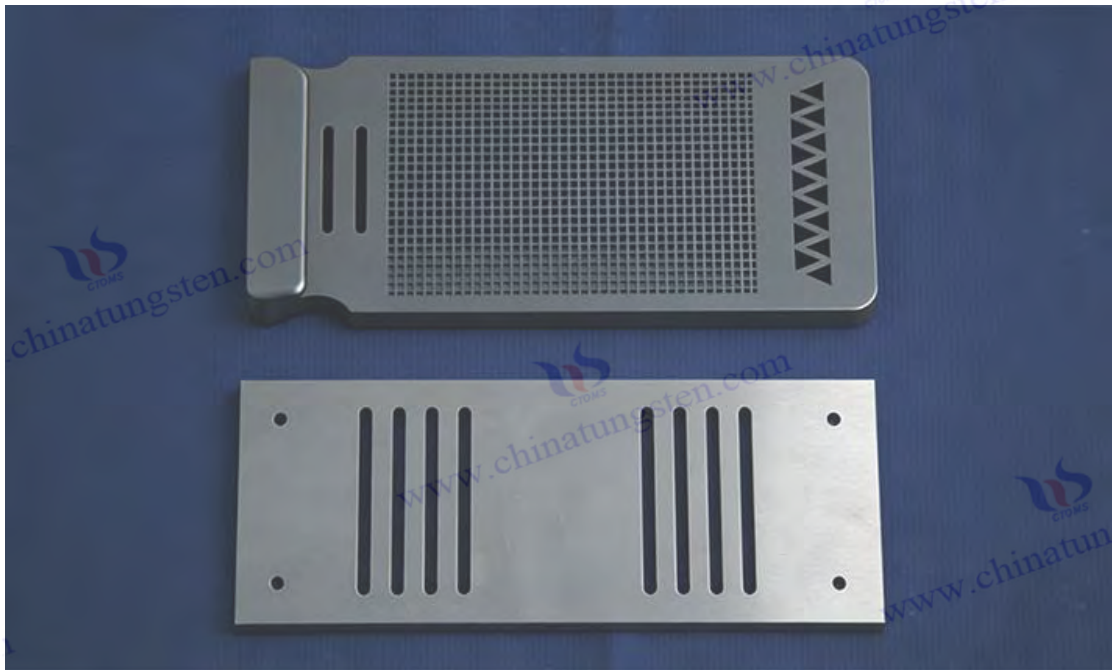
钨合金光栅在中子科学领域主要作为吸收元件、准直元件或调控元件，用于中子束的管理、背景抑制和信号提取。中子实验对束流纯度、方向性和背景噪声控制要求较高，钨合金的高

密度特性使其在吸收热中子、冷中子以及部分中能中子时表现出良好的性能，同时其机械稳定性和加工精度也支持复杂周期结构的实现。

钨合金光栅在中子相衬成像、中子干涉测量、小角散射、反射率实验以及脉冲/稳态中子源的多种光路系统中得到应用。通过合理设计周期、厚度与复合方式，光栅能够在不同中子能量范围和实验条件下实现有效的吸收、准直或相位调控，为材料内部结构、应力分布、磁性特征和氢含量等信息的无损获取提供支持。

7.3.1 钨合金光栅在中子吸收与准直系统中的核心作用

钨合金光栅在中子吸收与准直系统中承担核心作用，主要通过高密度周期结构实现对非预期方向中子的强吸收和对有用束流的有效准直。钨的高原子密度使其对热中子和冷中子具有较高的宏观吸收截面，能够在较薄厚度下形成有效的吸收屏障，同时周期性条纹设计允许沿特定方向的高透过率，形成平行或聚焦的中子束。在实际系统中，钨合金光栅常作为吸收光栅或准直器组件，安装在中子源下游或探测器前端，用于抑制环境散射中子、减少背景计数并提高信噪比。其机械刚性和热稳定性也使其适合长时间运行的中子实验环境，能够承受中子辐照引起的热负荷和微观组织变化。



中钨智造钨合金光栅图片

7.3.1.1 热中子与冷中子波段的高密度吸收光栅设计

热中子与冷中子波段的高密度吸收光栅设计以钨合金作为主要吸收材料，依靠其高密度实现对低能中子的有效拦截。光栅通常采用一维或二维周期条结构，条纹间距和高度根据中子波长和实验需求进行调整，在保证足够吸收的同时尽量减少对有用束流的遮挡。

设计中注重条纹的平行度和表面平整度，以避免因几何误差导致的额外散射。钨合金的吸收光栅能够在热中子与冷中子能量范围内提供较高的宏观吸收系数，适合用于中子成像、谱学测量和干涉实验中的背景抑制。光栅厚度一般控制在能够实现充分吸收的范围内，同时保持结构轻量化以适应光路布局。

7.3.1.2 硼/钷/镉复合钨合金光栅的中子俘获与慢化增强策略

硼、钷或镉复合钨合金光栅通过在钨基体中引入高热中子俘获截面元素，进一步增强中子吸收和慢化能力。硼（是 ^{10}B ）以高俘获截面著称，能够快速吸收热中子并释放 α 粒子和锂核；钷和镉则在特定能量区间表现出极强的吸收峰，适合针对性抑制热中子背景。复合策略通常采用粉末冶金或表面沉积方式，将这些元素均匀分布于钨合金基体或局部区域，形成梯度或分层结构。钨基体提供机械支撑和对快中子的慢化作用，而高俘获元素则针对热中子实现高效吸收。这种组合能够在不显著增加光栅厚度的前提下，大幅提高对热中子与冷中子的总体吸收效率，适合中子干涉仪、相衬成像和低背景实验的需求。

7.3.2 钨合金光栅在中子相衬成像与中子干涉仪中的应用

钨合金光栅在中子相衬成像与中子干涉仪中主要作为吸收光栅，用于将相位信息或干涉条纹转化为可测量的强度信号。其高密度特性保证了足够的吸收对比，使弱相衬信号能够在背景噪声中被清晰提取。这些光栅通常采用精细周期设计，与中子源的相干长度和探测器分辨率相匹配。钨合金的加工精度支持亚毫米至微米级周期的实现，为中子成像的分辨率提升提供了材料基础。

7.3.2.1 Talbot-Lau 型中子干涉仪吸收光栅的钨合金实现

Talbot-Lau 型中子干涉仪中，吸收光栅主要用于 G0 源光栅和 G2 分析光栅的制作。钨合金因其高吸收能力而被选为主要材料，能够在热中子与冷中子波段实现较高的条纹对比度。G0 源光栅将非相干中子源分割成多个相干子源，钨合金的高密度保证了吸收条对中子的强阻挡；G2 吸收光栅则将相位调制转化为强度调制，其精细周期结构使莫尔条纹清晰可辨。

7.3.2.2 材料内部应力、磁结构与氢分布的无损成像

钨合金光栅支持的中子相衬成像能够对材料内部应力、磁结构和氢分布进行无损观察。相衬信号对折射率梯度敏感，可揭示晶界应力集中、磁畴分布和氢富集区域的微观特征。钨合金光栅的吸收对比和周期稳定性为成像分辨率和信号质量提供了保障，使中子相衬技术成为传统 X 射线成像的有力补充。

7.3.3 钨合金光栅在小角中子散射与中子反射率实验中的遮蔽与准直

钨合金光栅在小角中子散射（SANS）和中子反射率实验中主要作为遮蔽和准直元件，用于抑制环境散射中子和形成高平行度入射束。准直光栅通过周期吸收条阵列限制中子发散角，提高散射信号的角分辨率；遮蔽光栅则阻挡非样品区域的中子，降低背景计数。

版权与免责声明

钨合金的高密度使这些元件能够在较薄厚度下实现有效准直和遮蔽，减少光路中的额外散射。光栅周期和间距根据实验 q 范围和分辨率要求进行设计，确保入射束的平行度和纯度满足测量需求。这些应用提高了 SANS 对纳米结构和反射率对界面特征的分辨能力。

7.3.4 脉冲中子源与稳态反应堆中钨合金光栅的辐射损伤耐受性

脉冲中子源与稳态反应堆中，钨合金光栅需要具备良好的辐射损伤耐受性，以应对高通量中子照射引起的位移损伤、氦泡形成和微观组织变化。钨的高熔点和晶格稳定性使其在快中子辐照下表现出较好的抗损伤能力，晶粒细化和合金元素添加进一步提高了抗辐照性能。

长期运行中，钨合金光栅的周期结构和吸收特性能够保持相对稳定，表面涂层或复合设计有助于缓解中子诱导的表面劣化。实际应用中，通过定期监测和加速辐照试验评估光栅的性能退化行为，确保其在中子科学装置中的长期可靠性。

7.4 钨合金光栅在工业无损检测与高能成像领域的应用

钨合金光栅在工业无损检测与高能成像领域的应用主要体现在提高 X 射线或伽马射线成像系统的图像质量和缺陷检测能力上。高能射线在穿透厚壁或高密度工件时会产生大量散射，导致图像对比度下降、伪影增加和细节丢失。钨合金光栅作为高密度抗散射栅格，能够有效拦截散射射线，提高一次射线的信噪比，使内部缺陷、夹杂、裂纹和孔隙等特征在复杂工件中得以清晰显现。钨合金的高吸收系数和机械稳定性使其适合大型、重型或高密度部件的检测场景。光栅结构设计能够平衡一次射线透过率与散射抑制效率，在工业 CT、高能 X 射线数字成像以及伽马射线检测系统中发挥作用。这些应用推动了航空航天、能源装备、核工业和增材制造部件的无损检测向更高分辨率和更高可靠性方向发展。

7.4.1 钨合金光栅在工业 CT 与高能 X 射线无损检测中的抗散射栅格应用

钨合金光栅在工业 CT 与高能 X 射线无损检测中作为抗散射栅格，能够显著降低散射射线对探测器信号的干扰。工业 CT 常用于检测大型铸件、焊接结构和复合材料部件，高能 X 射线则用于厚壁或高密度工件的透照。在这些场景中，散射射线比例较高，传统铅栅格或钨栅格在抑制效率和厚度控制上存在局限，而钨合金光栅凭借更高的密度和精细加工能力，能够在较薄结构下实现更强的散射抑制，同时保持较高的一次射线透过率。

钨合金抗散射栅格通常采用一维或二维周期吸收条设计，条纹间距、宽度和高度根据射线能量、工件厚度和探测器特性进行优化。二维栅格在宽锥角工业 CT 中表现出更全面的散射抑制效果，能够同时阻挡纵向和横向散射分量。光栅安装于探测器前端，通过对准和机械固定，确保吸收条与像素阵列的对应关系，从而最大限度发挥散射管理作用。

7.4.1.1 大型铸件、复合材料与增材制造部件的高分辨率成像

大型铸件、复合材料和增材制造部件的无损检测对成像分辨率和缺陷检出能力要求较高，钨合金抗散射栅格的应用显著提升了这些工件的高分辨率成像质量。

大型铸件（如涡轮壳体、压力容器）内部常存在气孔、夹渣和裂纹等缺陷，高能 X 射线穿透时产生大量散射，使小尺寸缺陷被背景噪声掩盖。钨合金光栅通过有效抑制散射，提高了图像的局部对比度和细节可见性，使微小气孔、裂纹扩展和夹杂物边界得以清晰显示。

复合材料（如碳纤维增强树脂基复合材料）内部存在纤维-基体界面脱粘、分层和孔隙等缺陷，散射射线会模糊这些低对比度特征。钨合金光栅的应用使层间缺陷和纤维断裂的检测灵敏度得到提升，是在厚壁或多层复合结构中，图像质量改善明显。

增材制造部件（如金属 3D 打印件）常具有复杂内部通道、梯度密度和微观孔隙，传统成像易受散射影响导致伪影覆盖真实缺陷。钨合金光栅的散射抑制作用使内部孔隙分布、熔合线缺陷和残余应力诱导裂纹的显示更加可靠，支持增材制造过程的质量控制和性能评估。

7.4.1.2 散射抑制对缺陷检测灵敏度与伪影消除的提升

钨合金光栅对散射的抑制提升了缺陷检测灵敏度和伪影消除效果。散射射线会导致图像整体背景升高、低对比度区域模糊以及杯状伪影、条纹伪影等重建误差。钨合金光栅通过拦截偏离路径的散射光子，使探测器主要接收一次射线信号，背景噪声水平显著降低，缺陷与背景的灰度差得以放大，从而提高小尺寸缺陷的检出能力。

伪影消除方面，散射抑制减少了由非均匀散射场引起的图像非均匀性和几何失真，使重建断层图像的均匀性和几何保真度得到改善。是在大型或异质性工件检测中，伪影的减少使缺陷定位和定量分析更加准确，避免了因伪影误判导致的质量漏检或过度返工。

7.4.2 钨合金光栅在航空航天部件检测与核燃料组件检验中的应用

钨合金光栅在航空航天部件检测与核燃料组件检验中，主要作为高密度抗散射栅格、准直元件或局部屏蔽组件，用于提升高能 X 射线或伽马射线成像的清晰度和缺陷检出能力。这些部件通常具有厚壁、高密度或复杂几何特征，传统成像方法容易受散射干扰而导致细节丢失或伪影覆盖。钨合金光栅的高吸收能力和精密周期结构能够在较薄厚度下实现有效的散射抑制和束流准直，使内部缺陷、裂纹、气孔、夹杂和异物等特征在复杂背景下得以显现。

在实际检测中，钨合金光栅常与数字平板探测器或线阵探测器配合使用，通过优化栅格周期和条纹几何参数，实现对一次射线的高透过率与对散射射线的强阻挡。钨合金的机械稳定性和辐射耐受性也使其适合在高通量、高能量射线环境下长期使用，为航空航天关键部件和核燃料组件的质量控制提供了可靠的影像学支持。

7.4.2.1 涡轮叶片、焊接接头与压力容器的高密度屏蔽与准直

涡轮叶片、焊接接头和压力容器的无损检测对成像系统的分辨率和缺陷检出灵敏度要求极高，钨合金光栅的高密度屏蔽与准直功能在这些部件的检测中发挥关键作用。

涡轮叶片内部常存在气孔、夹渣、裂纹和晶界缺陷，高能 X 射线穿透时产生大量散射，使小尺寸缺陷被背景噪声掩盖。钨合金光栅作为抗散射栅格，能够显著降低散射贡献，提高叶片内部冷却通道、叶身和叶冠区域的细节可见性。准直功能则用于限制射线发散角，确保束流平行度，使重建图像中的几何失真和边缘模糊得到控制。

焊接接头检测中，钨合金光栅帮助抑制焊缝区散射引起的伪影，使未熔合、裂纹和气孔等缺陷的边界更加锐利。压力容器检测涉及厚壁和多层结构，钨合金光栅的高密度屏蔽作用能够有效阻挡侧向散射，减少杯状伪影和非均匀性，使焊缝、母材过渡区和腐蚀坑的显示更清晰。

7.4.3 钨合金光栅在便携式/车载高能 X 射线系统的吸收与准直组件

便携式和车载高能 X 射线系统常用于现场检测大型装备、管道和压力容器，其空间受限和环境复杂性对光学元件提出了更高要求。钨合金光栅在这些系统中作为吸收与准直组件，能够在有限体积内实现高效的散射抑制和束流整形。

吸收功能主要通过钨合金的高密度周期条阵列实现，对散射 X 射线的拦截能力强于传统材料，使探测器接收到的背景噪声显著降低。准直功能则通过的条纹间距和高度设计，形成平行或限定发散角的射线束，减少几何模糊并提高图像空间分辨率。

便携式/车载系统的特点是射线源功率有限、探测器尺寸较小，钨合金光栅的薄型化设计和高吸收效率使其能够在不显著增加系统重量和体积的前提下，提供良好的散射管理和束流控制。这些特性使系统在野外或狭窄空间中的检测图像质量得到改善，适用于航空航天维修、核电现场检验和能源装备巡检等场景。

7.4.4 工业现场高辐射环境下钨合金光栅的耐久性与维护要求

工业现场高辐射环境下，钨合金光栅需要具备较高的耐久性，以应对持续或间歇性高通量 X 射线/伽马射线照射带来的热负荷、辐射损伤和环境应力。钨合金的高熔点、热导率和晶格稳定性使其在长期辐照下能够保持结构完整性和光学性能的相对稳定性，避免出现明显的热变形、周期漂移或表面劣化。

耐久性表现主要包括：材料在高剂量累积照射下保持密度和周期结构的稳定性；表面镀膜或保护层在辐射作用下不发生剥离或性能退化；光栅条在热应力和辐射诱导应力下不出现微裂纹或断裂。实际应用中，钨合金光栅常结合主动冷却通道、热沉结构和表面保护涂层，进一步提升其在高辐射环境下的耐受能力。

维护要求主要包括定期表面清洁、周期精度复检和辐射损伤评估。清洁工作重点去除表面沉积物和污染层，避免二次散射增加；周期精度复检通过光学或激光测量确认条纹间距和形貌是否发生漂移；辐射损伤评估则结合无损检测手段监测内部微观变化。现场维护通常采用模块化更换设计，当光栅性能指标低于预设阈值时进行整体或局部更换，以保证检测系统长期稳定运行。通过材料优化、结构设计和维护策略的综合保障，钨合金光栅能够在工业现场高辐射环境下维持可靠的抗散射和准直性能，为关键部件的无损检测提供了持续支持。

版权与法律声明

7.5 钨合金光栅在辐射防护与高辐射环境领域的应用

钨合金光栅在辐射防护与高辐射环境领域的应用主要体现为其作为高密度吸收元件、准直元件和屏蔽组件，能够在强辐射场中实现对 γ 射线、中子或混合辐射的有效调控和衰减。钨合金的高原子序数和高密度使其在较薄厚度下即可提供较高的辐射衰减能力，同时其机械强度和热稳定性也支持在高温、高通量辐射环境下的长期使用。

这些应用覆盖核电维护、粒子加速器实验、空间辐射模拟以及应急响应设备等领域。钨合金光栅通过周期结构设计，不仅能够实现定向准直，还能在多层或复合配置中进一步增强屏蔽效果，为人员安全、设备保护和实验精度提供可靠保障。

7.5.1 钨合金光栅在核电维护与辐射屏蔽组件中的应用

光栅在核电维护与辐射屏蔽组件中主要作为准直光栅和吸收屏蔽元件，用于降低辐射通量、改善探测图像质量和保护检测设备。核电现场维护涉及反应堆内部窥视、管道巡检和放射性废物处理，这些场景中辐射水平高、空间受限，对屏蔽材料的密度和加工精度要求较高。

钨合金光栅能够在狭小通道或高温环境中实现有效的辐射衰减和束流方向控制，同时保持结构刚性。其高密度特性使光栅在有限厚度内提供足够的屏蔽能力，周期结构则支持对特定方向辐射的定向管理。这些特性使光栅成为核电维护中辐射防护与探测设备的重要组成部分。

7.5.1.1 反应堆容器内窥镜、管道检测与废物处理中的准直光栅

反应堆容器内窥镜、管道检测和废物处理过程中，钨合金准直光栅用于限制辐射进入探测器或摄像系统的方向，减少侧向散射和背景辐射干扰。准直光栅通常采用高密度周期条结构，条纹间距和深度根据探测视场和辐射能量进行设计，在保证视场覆盖的同时最大限度阻挡非直线路径的 γ 射线或中子。在内窥镜系统中，钨合金准直光栅安装于探头前端，帮助形成清晰的内部图像，减少辐射雾化对图像的干扰；在管道检测和废物处理中，准直光栅与 γ 射线探测器配合使用，提高缺陷定位精度并降低操作人员的辐射暴露。这些准直光栅的紧凑设计和耐辐射能力，使其适合狭窄通道和长期浸没在辐射环境中的应用场景。

7.5.1.2 高 γ 射线通量下的多层钨合金吸收与准直结构

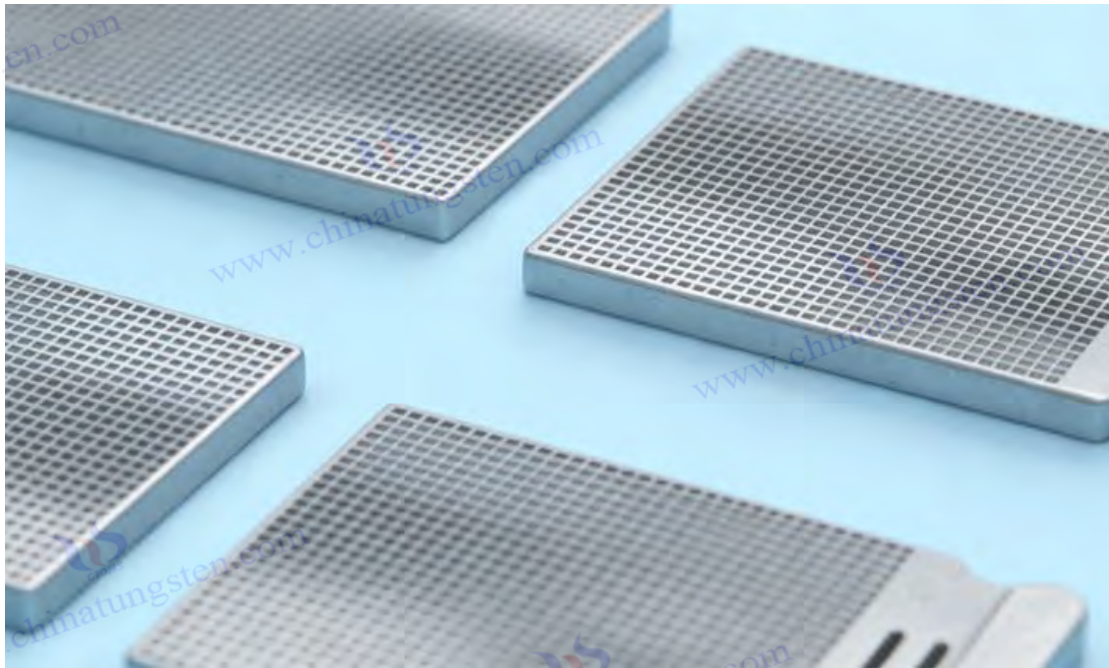
高 γ 射线通量环境下，多层钨合金吸收与准直结构通过层叠或梯度配置实现分级衰减和方向选择。单层钨合金光栅在极高通量下可能面临热负荷过大或局部饱和的问题，而多层结构能够将辐射能量逐步吸收，每层承担部分衰减任务，从而降低单层热应力和辐射损伤风险。

准直功能则通过各层周期条的对准实现，形成多级方向过滤，进一步抑制侧向散射。层间间隙和表面处理设计有助于热量导出和二次辐射管理。这种多层结构在核电高辐射区屏蔽舱、废物转运容器和应急响应设备中得到应用，能够在保持较高透过率的同时提供更强的总体屏蔽能力。

7.5.2 钨合金光栅在粒子加速器与核物理实验中的准直与屏蔽

钨合金光栅在粒子加速器与核物理实验中主要作为束流准直器和局部屏蔽元件，用于控制粒子束方向、抑制杂散束流并保护下游探测器或实验靶。这些实验涉及高能粒子束和高辐射通量，对准直精度和屏蔽效率要求极高。

钨合金的高密度和加工精度使其能够形成精细周期或多孔准直结构，实现亚毫米级的束流限制和杂散粒子吸收。准直光栅常安装在束流线关键节点，通过周期条阵列对束流进行多次切割和过滤，减少发散角并提高束斑质量。屏蔽功能则通过钨合金光栅的吸收层阻挡次级辐射，保护实验设备和人员安全。



中钨智造钨合金光栅图片

7.5.2.1 束流线与靶站的高精度钨合金准直器

束流线与靶站的高精度钨合金准直器用于对加速器产生的粒子束进行精细整形和杂散抑制。准直器通常采用多级周期结构或多孔钨合金板，通过对准实现束流的逐步收敛和方向净化。钨合金的高密度保证了准直器在高通量束流下仍能提供足够的吸收能力，同时其机械稳定性支持长时间运行中的几何精度保持。这些准直器在束流线入口、弯转段和靶站前端发挥作用，能够显著降低背景辐射，提高实验数据的信噪比和靶点照射均匀性。设计中常结合冷却通道和热膨胀补偿结构，确保准直器在高功率束流照射下不发生形变或性能退化。

7.5.3 钨合金光栅在空间辐射环境模拟与航空航天辐射防护中的应用

钨合金光栅在空间辐射环境模拟与航空航天辐射防护中主要用于模拟装置中的屏蔽组件和准直元件。空间辐射包括高能质子、重离子和银河宇宙射线，对航天器电子设备和乘员构成

威胁。钨合金光栅能够在地面模拟实验中实现对这些辐射的有效衰减和方向调控，帮助评估材料和器件的抗辐射性能。

在模拟装置中，钨合金光栅作为多层吸收或准直结构，能够针对不同能量粒子提供分级屏蔽，模拟真实空间辐射场的复杂谱分布。在航空航天辐射防护设计中，钨合金光栅常作为局部屏蔽组件，安装在关键电子设备附近，减少高能粒子的穿透通量。这些应用依赖于钨合金的高密度和辐射耐受性，使其能够在模拟和实际空间环境中提供可靠的防护效果。

7.5.4 钨合金光栅在高辐射实验室与应急响应设备中的便携式屏蔽组件

高辐射实验室与应急响应设备中，钨合金光栅作为便携式屏蔽组件，能够在有限体积和重量条件下提供较高的辐射衰减能力。这些场景涉及现场辐射监测、事故响应和临时屏蔽舱搭建，对屏蔽材料的密度、便携性和安装灵活性要求较高。

钨合金光栅常设计为模块化或可拼接形式，通过周期吸收条或多孔结构实现对 γ 射线和中子的定向屏蔽。便携式屏蔽组件能够在辐射热点区域快速部署，形成临时防护墙或探测器屏蔽罩，降低操作人员的受照剂量并保护检测仪器免受高通量辐射干扰。

钨合金的加工精度支持光栅与探测器或摄像设备的对准，使屏蔽组件在不显著遮挡视场的前提下实现有效的辐射衰减。这些组件的轻量化设计和快速组装能力，使其在核应急、放射性废物处理和实验室高辐射实验中得到广泛应用。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	17.0~18.5g/cm ³
	硬度 (HRC)	24~35
	抗拉强度	650~1100MPa
	延伸率	2~25%
结构精度性能	栅条厚度	0.05~0.5mm (可定制)
	狭缝宽度	0.05~0.5mm (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025\text{mm}$
	平面度	$\leq 0.02\text{mm}/100\text{mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 -40~300°C
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与免责声明

第八章 钨合金光栅的使用注意事项与常见问题

8.1 钨合金光栅的安装与机械固定注意事项

中钨智造钨合金光栅的安装与机械固定是确保其光学性能稳定和长期可靠运行的关键环节。钨合金材料具有较高的密度和刚性，但其热膨胀系数较低且脆性相对较大，在安装过程中需要注意固定方式、应力分布和热匹配问题，以避免因不当安装导致的周期结构变形、表面损伤或光学性能退化。安装前应对光栅进行全面外观检查和尺寸复验，确保无运输损伤或表面污染。固定过程中应采用低应力夹持方式，避免局部集中载荷。常用固定方法包括机械夹持、粘接辅助或专用安装框架，具体方案需根据光栅尺寸、工作环境和系统精度要求确定。安装完成后应进行光学对准测试和应力监测，确保光栅在工作状态下的几何参数与设计值一致。

8.1.1 钨合金光栅的热膨胀匹配与固定应力控制

钨合金光栅的热膨胀系数较低，与大多数光学基底或框架材料存在差异。在温度变化较大的环境中，热膨胀失配会产生界面应力，导致光栅周期漂移、表面起伏或固定点附近开裂。安装时需优先选择热膨胀系数相近的固定框架材料，或通过柔性连接层（如薄金属垫片或弹性胶层）缓冲热应力。

固定应力控制是避免光栅变形的重要措施。过大的夹持力可能引起局部压缩变形，影响周期均匀性；过小的夹持力则可能导致光栅在振动或冲击下移位。建议采用力矩控制的螺钉固定或弹簧压紧机构，并通过有限元分析预估应力分布，在关键固定点设置应变片或光纤传感器进行实时监测。安装后应在工作温度范围内进行多次热循环测试，观察周期参数和表面形貌的变化，必要时调整固定方案以将热应力控制在安全范围内。

8.1.2 钨合金光栅周期对准与角度校准要求

钨合金光栅的周期对准与角度校准关系到系统衍射效率、条纹对比度和杂散光水平。安装过程中需确保光栅周期方向与光路参考轴的平行度，以及光栅平面与入射光束的夹角精度。

周期对准通常采用激光干涉仪或自准直仪辅助，通过观察衍射级次的对称性和间距一致性进行微调。角度校准要求入射角偏差控制在设计公差以内，对于掠入射光栅尤为。校准过程中可结合 CCD 或位置敏感探测器实时监测零级与一级衍射光斑的位置偏移，逐步调整光栅姿态直至满足要求。

安装完成后应进行系统级光学测试，验证实际衍射图案与理论预期的一致性。若发现周期漂移或角度偏差，应检查固定点应力分布和热膨胀匹配情况，必要时重新调整安装状态。

8.2 钨合金光栅的操作环境要求

钨合金光栅的操作环境要求主要涉及气氛条件、温度控制、振动隔离和清洁度等方面。这些要求影响光栅表面的长期稳定性和光学性能的保持。钨合金本身化学稳定性较好，但在高温、

版权与免责声明

含氧或高湿度环境中可能发生表面氧化或污染，因此实际使用时需根据工作波段和精度等级制定相应的环境控制标准。操作环境应尽量保持稳定，避免剧烈温度波动、强烈振动或粉尘污染。光栅存放与使用期间建议采用防尘罩或真空/惰性气氛保护装置，并在每次安装或拆卸后进行表面检查与清洁。

8.2.1 钨合金光栅的真空/惰性气氛使用条件

钨合金光栅在真空或惰性气氛中使用，能够有效避免表面氧化和污染，适合高真空同步辐射光束线、自由电子激光装置以及部分中子实验环境。真空度一般要求达到 10^{-5} Pa 以上，以减少残余气体对表面的吸附和反应；惰性气氛（如高纯氩气或氮气）使用时需控制氧含量和水蒸气分压在极低水平。

真空/惰性气氛条件下，光栅表面的长期稳定性显著提高，周期结构和表面粗糙度能够保持较长时间不变。但需注意真空环境中可能出现的静电积累或放电现象，可通过接地设计或电荷中和装置加以控制。同时，真空腔体内的热辐射和出气效应可能导致温度不均匀，应结合光栅基底的热导率特性进行温度场优化。

8.2.2 钨合金光栅的温度梯度与热变形的控制

钨合金光栅的温度梯度与热变形控制是维持周期精度和光学性能稳定的重要环节。钨合金热膨胀系数较低，但温度梯度仍可能引起局部热应力，导致周期参数漂移或表面形貌变化。操作环境中应尽量减小光栅两侧或前后表面的温差，通常控制在几摄氏度以内。

热变形控制措施包括：采用均匀加热或水冷/风冷方式，使光栅整体温度场尽可能均匀；光路设计中避免单侧强光照射引起局部过热；安装框架选用热膨胀系数匹配的材料，并设置柔性连接以缓冲热应力。长时间运行时，可通过红外测温或光纤测温系统实时监测光栅温度分布，发现异常梯度时及时调整冷却条件或降低入射功率。

在高功率光束照射场景中，钨合金光栅的热负荷管理尤为关键。通过表面镀膜降低吸收率、增加背面散热结构或采用主动冷却回路，能够将热变形控制在可接受范围内，确保光栅周期和表面质量的长期稳定性。

8.3 钨合金光栅的清洁与维护规范

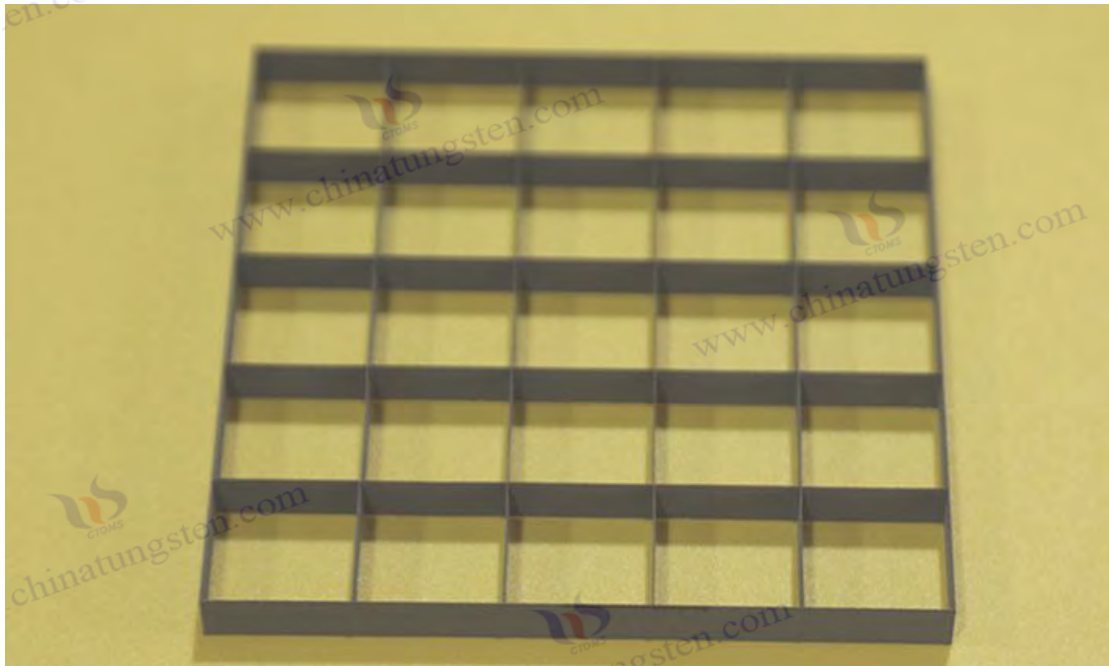
钨合金光栅的清洁与维护是保持其光学性能长期稳定的重要环节。光栅表面一旦受到污染、划伤或氧化，会导致衍射效率下降、杂散光增加和周期结构精度损失。清洁与维护应遵循最小干预原则，优先采用无接触或低接触方式，避免任何可能引入新损伤的操作。

清洁前需确认光栅的工作环境和污染类型（如灰尘、指纹、油脂或氧化层），并在洁净室或层流罩内进行。维护过程中应佩戴无尘手套，使用专用工具，并记录每次清洁的时间、方法和前后光学性能变化。清洁频率根据实际使用环境和污染程度确定，通常建议在每次系统拆装或光学性能明显下降时进行一次全面清洁。

版权与法律声明

8.3.1 避免机械接触与指纹污染

钨合金光栅表面极为敏感,任何机械接触都可能在沟槽侧壁或底部留下微米级甚至纳米级划痕,导致局部散射中心增加和衍射效率降低。因此在整个使用、搬运、安装和维护过程中,应尽可能避免用手或其他物体接触光学工作面。搬运时建议使用专用夹持工具或真空吸盘,从光栅边缘非光学区施力;安装和拆卸时采用机械臂或辅助夹具,确保夹持点远离沟槽区域。指纹污染是常见问题之一,人体皮肤分泌的油脂和盐分会在表面形成永久性附着物,难以完全去除并成为长期散射源。为彻底避免指纹污染,所有操作人员必须佩戴无尘手套,且在接触前用无尘布蘸异丙醇擦拭手套表面。当不可避免需要近距离观察或调整时,可使用高倍光学放大镜或内窥镜从侧面进行非接触观察,严禁将手指、手套或其他物体伸入光栅正面工作区域。



中钨智造钨合金光栅图片

8.3.2 化学清洗剂的选择与限制

钨合金光栅的化学清洗应选用对钨及合金元素化学惰性强、不残留、不腐蚀的清洗剂,并限制清洗时间和浓度。常用清洗剂包括高纯异丙醇、无水乙醇和专用光学清洗液,这些溶剂对钨合金表面基本无反应,且挥发性好,不易留下残留物。

清洗流程通常为:先用干燥高纯氮气吹扫去除松散颗粒;然后用无尘布或无尘棉签蘸异丙醇,以单向轻拭方式擦拭表面(切勿来回摩擦);对于顽固有机污染,可短时浸泡在异丙醇或乙醇中(时间控制在30秒以内),随后立即用大量高纯异丙醇漂洗;最后用高纯氮气彻底吹干,避免水痕或溶剂残留。严禁使用的清洗剂包括:强酸(如硝酸、硫酸、氢氟酸)、强碱(如氢氧化钠)、含氯溶剂(如三氯乙烯)、含氟表面活性剂以及任何可能与钨或合金元素发生反应的试剂。这些物质可能导致表面腐蚀、氧化加速或合金元素选择性溶解,造成不

版权与免责声明

可逆损伤。清洗后应立即进行光学显微镜检查和表面粗糙度复测，确认无新损伤或残留物。每次清洗后建议记录所用溶剂批次和操作人员，以备后续问题追溯。

8.4 钨合金光栅常见性能退化问题及成因分析

钨合金光栅在使用过程中可能出现性能退化，主要表现为衍射效率下降、杂散光增加、周期失真和图像质量劣化。这些问题往往由环境因素、操作不当或长期累积损伤共同导致。及时识别退化迹象并分析成因，有助于采取针对性维护或更换措施，延长光栅使用寿命。

8.4.1 表面氧化与衍射效率下降

表面氧化是钨合金光栅最常见的退化形式之一。暴露在含氧环境中时，钨表面逐渐生成 WO_3 等氧化物层，导致表面粗糙度增加、反射率下降和散射增强，最终使衍射效率显著降低。氧化层还会改变沟槽有效深度和侧壁形貌，引起高阶衍射峰强度异常或杂散光水平上升。

氧化速率与环境温度、氧分压、湿度以及表面状态密切相关。高温和潮湿环境会加速氧化进程，而表面微尘或指纹残留则成为氧化优先发生的活性点。早期氧化表现为表面逐渐失去金属光泽，后期可能出现可见的彩色干涉膜或局部粉化。

预防措施包括使用真空或惰性气氛保护、在光路中加装氧气过滤器、定期表面检查以及必要时施加抗氧化保护层。一旦发现氧化迹象，应隔离光栅并评估是否需要重新抛光或更换。

8.4.2 机械变形导致的周期失真

机械变形是导致钨合金光栅周期失真的主要原因之一。安装时夹持应力过大、热膨胀失配、运输振动或意外撞击均可能引起光栅基底的微小弯曲或扭转变形，从而使局部或整体周期发生漂移。

周期失真表现为衍射级次不对称、莫尔条纹畸变或能量分辨率下降。轻微变形可能仅影响边缘区域，严重变形则会导致整片光栅失效。钨合金虽然刚性较高，但其脆性特性使变形一旦超过弹性极限，即可能产生不可逆的微裂纹或永久应变。

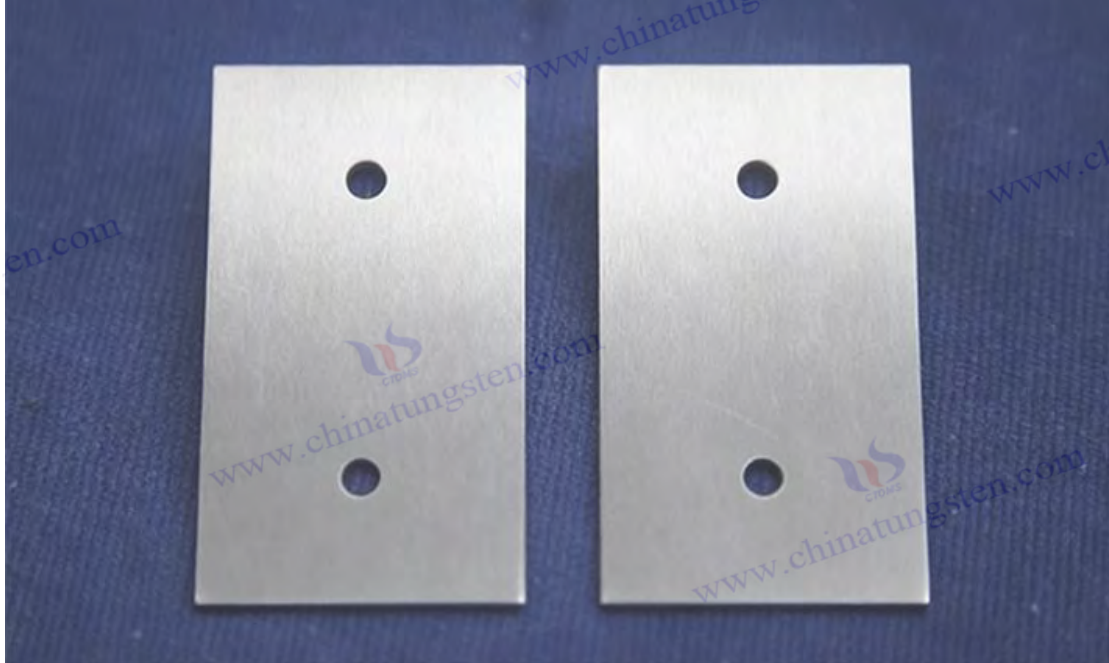
检测周期失真通常采用激光衍射法或坐标测量机扫描全片周期分布。预防重点在于安装前进行应力释放退火、使用柔性固定方式以及在运输和存储中采用减震包装。一旦发现周期失真，应评估变形程度，轻微者可尝试低温应力释放处理，严重者需更换光栅。

8.4.3 辐射损伤与长期暴露下的微观结构变化

在高辐射通量环境下长期使用时，钨合金光栅可能发生辐射损伤，主要表现为位错密度增加、微观气泡形成和晶界弱化。这些变化会导致材料局部硬度下降、表面粗糙度缓慢增加以及周期结构的微小漂移。

版权与免责声明

辐射损伤程度与累积剂量、粒子种类和能量密切相关。高能 X 射线或伽马射线主要引起电子激发和位移损伤，中子辐照则可能产生嬗变和氦泡。长期暴露后，表面可能出现微米级凹坑或局部密度降低，影响光学散射特性。预防措施包括选用抗辐照优化的钨合金成分、设置辐射衰减前置屏蔽、在可能条件下降低光栅承受的通量密度。定期检测可通过 X 射线衍射或透射电镜观察微观结构变化，及时发现早期损伤迹象。



中钨智造钨合金光栅图片

8.5 钨合金光栅的定期检测

钨合金光栅的定期检测是发现性能退化、预防突发失效的重要手段。检测内容应覆盖表面状态、周期精度、光学性能和微观结构四个主要方面，检测周期根据使用环境和重要程度确定，通常为 3 - 12 个月一次，或在每次系统大修时进行。

表面状态检测主要采用光学显微镜和原子力显微镜，检查是否存在氧化层、划痕、颗粒附着或局部腐蚀。周期精度检测使用激光衍射仪或坐标测量机，测量全片周期分布和累积误差，确保偏差在设计公差范围内。

光学性能检测包括衍射效率、杂散光水平和能量分辨率的复测，可在专用光路中进行，与原始出厂数据对比。微观结构检测在必要时采用 X 射线衍射或扫描电镜，观察晶粒尺寸、位错密度和辐射损伤迹象。

检测数据应建立档案，记录每次检测的时间、方法、结果和环境条件，形成趋势分析曲线。当关键指标（如衍射效率下降超过一定比例、周期偏差超出公差、表面粗糙度显著增加）出现异常时，应立即暂停使用并进行详细分析，判断是否需要清洁、修复或更换。

版权与免责声明

附录

附录 A 中国钨合金光栅标准

中国钨合金光栅的相关标准主要由国家标准化管理委员会（SAC）及相关行业协会制定，涵盖材料成分、性能要求、检测方法、加工工艺及应用规范等方面。目前尚未形成专门针对“钨合金光栅”的独立国家标准（GB），但相关要求散见于以下标准体系中：

- GB/T 3458-2006 《钨及钨合金棒、杆、丝、板、箔》（规定了钨合金的化学成分、力学性能、密度及表面质量要求，是钨合金光栅基体材料的主要参考标准）
- GB/T 4197-2007 《钨及钨合金粉末》（规定了钨粉及合金粉末的粒度分布、氧含量、纯度等指标，是粉末冶金法制备钨合金光栅的原料标准）
- GB/T 38776-2020 《高密度钨合金材料规范》（适用于高密度钨基合金的通用技术要求，包括密度、硬度、抗拉强度、热膨胀系数等，是钨合金光栅材料选择的重要依据）
- JB/T 12763-2015 《精密机械加工 技术条件》（涉及钨合金光栅的精密刻划、磨抛、表面粗糙度和平面度控制要求）
- YY/T 0128-2004 《医用 X 射线设备 通用技术条件》（部分条款涉及抗散射栅格的材料密度、吸收效率和结构稳定性要求，适用于医疗领域钨合金光栅）
- 行业团体标准（如中国有色金属工业协会或中国光学光电子行业协会发布的团体标准）近年来部分团体标准开始涉及钨合金抗散射栅格、相衬成像光栅的术语、分类、性能测试方法和验收规则。

中国钨合金光栅标准体系尚在发展中，多数企业参照上述材料标准结合用户定制技术协议执行生产。未来可能出台专门的“钨合金光学光栅”或“钨合金抗散射栅格”国家标准或行业标准。

附录 B 国际钨合金光栅标准

国际上目前尚无专门针对“钨合金光栅”的独立国际标准（ISO 标准）。钨合金光栅的制造与应用主要参照以下通用材料标准、光学元件标准和辐射防护标准：

- ISO 209-2007 《钨及钨合金 — 化学成分和物理性能》（国际标准化组织关于钨及钨合金材料的基本规范）
- ASTM B777-15 《高密度钨合金规范》（美国材料与试验协会标准，广泛用于全球钨合金制品，包括光栅基体材料）
- ASTM B760-86(2015) 《钨板、钨片、钨箔规范》（适用于钨合金基底的板材要求）
- IEC 62220-1 《医用电气设备 — X 射线数字成像设备特性》（国际电工委员会标准，涉及抗散射栅格的性能要求和测试方法）
- ISO 4037 系列 《用于校准辐射防护监测仪及确定其响应作为光子辐射能量的函数的 X 和 γ 参考辐射》（涉及辐射检测设备中钨合金屏蔽/准直组件的参考要求）

版权与免责声明

国际上钨合金光栅的生产多由用户（如同步辐射装置、粒子加速器实验室、大型医疗设备公司）提供详细技术协议，制造商参照 ASTM B777、ISO 209 等材料标准执行。光学性能测试则常参考 ISO 12212《光学元件 — 表面缺陷的检验和分级》等光学标准。

附录 C 欧美日韩等国的钨合金光栅标准

欧美日韩等国同样没有专门的“钨合金光栅”国家标准，相关要求分散在材料标准、光学元件标准、医疗器械标准和辐射防护标准中：

- 美国
 - ASTM B777-15 《高密度钨合金规范》（最主要的钨合金材料标准）
 - ASTM E2597 《标准指南：X 射线成像中抗散射栅格的性能评价》
 - MIL-STD-1916 《钨合金材料与部件质量保证要求》（军工领域参考）
- 欧洲
 - EN 10270 《钨及钨合金 — 化学成分和物理性能》
 - EN 1330 系列 《无损检测 — 术语》及相关辐射检测标准
 - DIN EN ISO 4037 系列（等同采用 ISO 4037，用于辐射防护监测仪校准）
- 日本
 - JIS H 4460 《钨及钨合金棒、杆、板、箔》
 - JIS Z 4918 《医用 X 射线设备 — 抗散射栅格》
 - JIS Z 4910 《医用 X 射线影像设备通用技术条件》
- 韩国
 - KS D 9502 《钨及钨合金》
 - KS C IEC 62220-1 《医用电气设备 — X 射线数字成像设备特性》（等同采用 IEC 标准）

上述国家/地区在钨合金光栅的具体应用（如同步辐射光栅、医疗抗散射栅格、工业 CT 栅格）中，均由最终用户（国家实验室、医院、大型设备制造商）提供详细技术规格书，制造商按照材料标准进行生产，并按用户协议进行性能验证与验收。



中钨智造钨合金光栅图片

中钨智造科技有限公司
钨合金光栅产品介绍

一、钨合金光栅概述

中钨智造钨合金光栅是一种用于 X 射线成像系统的抗散射装置，主要由钨、镍、铁或铜制成。它通过屏蔽散射辐射来提高图像对比度和清晰度，同时允许初级 X 射线通过，广泛应用于医疗和工业领域。

二、钨合金光栅的典型性能

性能类别	性能指标	常规参考值或描述
X 射线屏蔽性能	X 射线吸收率	对医用/工业中低能 X 射线吸收率 $\geq 95\%$
	初级 X 射线通过率	$\geq 85\%$ (狭缝设计合理前提下)
	屏蔽均匀性	栅条区域屏蔽误差 $\leq \pm 5\%$
力学性能	基体材料密度	$17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$
	硬度 (HRC)	$24 \sim 35$
	抗拉强度	$650 \sim 1100 \text{ MPa}$
	延伸率	$2 \sim 25\%$
结构精度性能	栅条厚度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	狭缝宽度	$0.05 \sim 0.5 \text{ mm}$ (可定制)
	栅条间距公差	$\pm 0.025 \text{ mm}$
	平面度	$\leq 0.02 \text{ mm/100mm}$
环境与使用性能	耐高温性	工作温度 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$
	耐腐蚀性	在干燥/常规工业环境下无锈蚀
	无毒性	无铅、镉等有毒元素
	射线稳定性	良好

三、钨合金光栅应用

1. 医疗成像，如 DR/X 射线机（胸腹部平片）、乳腺摄影（钼靶）和 CT 扫描。
 2. 工业检测，如工业 DR/X 射线探伤（合金/复合材料）、半导体/电子器件检测及锥束 CT。
- 更多钨合金光栅资讯，请访问中钨智造钨合金光栅网站：www.tungsten-alloy.com。

四、钨合金光栅采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



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

参考文献

中文参考文献

- [1] 中国有色金属工业协会. 高密度钨合金材料规范[S]. 北京: 中国有色金属工业协会, 2020.
- [2] 国家标准化管理委员会. 钨及钨合金棒、杆、丝、板、箔[S]. GB/T 3458-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] 国家标准化管理委员会. 钨及钨合金粉末[S]. GB/T 4197-2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [4] 中钨智造科技有限公司. 钨合金光栅技术规格书(企业标准)[Z]. 内部技术文档, 2025.
- [5] 王晓东, 等. X射线相衬成像技术及关键器件研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(12): 1200001.
- [6] 李明, 等. 高密度钨合金抗散射栅格在工业CT中的应用[J]. 无损检测, 2023, 45(8): 45-52.
- [7] 张伟, 等. 反应离子刻蚀制备钨合金光栅的工艺研究[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(3): 210-218.
- [8] 中国光学光电子行业协会. 医用X射线设备抗散射栅格技术要求(团体标准)[S]. 2022.

英文参考文献

- [1] Lei Y, et al. Tungsten nanoparticles-based X-ray absorption gratings for cascaded Talbot-Lau interferometers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(10): 105007.
- [2] Pinzek S, et al. Fabrication of X-ray absorption gratings by centrifugal deposition of bimodal tungsten particles in high aspect ratio silicon templates[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 3822.
- [3] Weitkamp T, et al. X-ray phase imaging with a grating interferometer[J]. Optics Express, 2005, 13(16): 6296-6304.
- [4] Bennett E E, et al. A grating-based single-shot x-ray phase contrast and diffraction method for in vivo imaging[J]. Medical Physics, 2010, 37(11): 6047-6054.
- [5] Larsson J C, et al. Focused anti-scatter grid for background reduction in x-ray phase contrast imaging[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2591-2594.
- [6] Cobos S F, et al. 3D-printed large-area focused grid for scatter reduction in cone-beam CT[J]. Medical Physics, 2023, 50(1): 240-258.
- [7] Li B, et al. Effect of a prototype 2-dimensional antiscatter grid on image quality in dental cone-beam CT[J]. Physica Medica, 2025 (in press).
- [8] ASTM International. Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal[S]. ASTM B777-15. West Conshohocken, PA: ASTM, 2015.
- [9] International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment — Characteristics of digital X-ray imaging devices — Part 1: Determination of the detective quantum efficiency[S]. IEC 62220-1. Geneva: IEC, 2015.
- [10] ISO. Tungsten — Chemical composition and physical properties[S]. ISO 209:2007. Geneva: ISO, 2007.

版权与免责声明