

# 什么是钨合金片

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](http://www.ctia.com.cn)

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

## 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，致力于在工业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](http://www.chinatungsten.com) 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的设计制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钼及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

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

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

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



### 版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

## 目录

### 第一章 钨合金片的基本认知

- 1.1 钨合金片的概念
  - 1.1.1 钨合金片的定义
  - 1.1.2 与相关材料的界定区分
- 1.2 钨合金片的发展与研究意义
  - 1.2.1 基于钨资源利用的发展脉络
  - 1.2.2 化学工程视角研究钨合金片的价值
  - 1.2.3 钨合金片在应用领域的地位

### 第二章 钨合金片的分类体系

- 2.1 按材料成分分类钨合金片
  - 2.1.1 镍-铁系钨合金片
  - 2.1.2 镍-铜系钨合金片
  - 2.1.3 钨铜合金片
  - 2.1.4 钨银合金片
  - 2.1.5 其他粘结相钨合金片
- 2.2 按核心性能分类钨合金片
  - 2.2.1 高密度钨合金片
  - 2.2.2 高硬度钨合金片
  - 2.2.3 耐蚀耐磨钨合金片
- 2.3 按尺寸规格分类钨合金片
  - 2.3.1 超薄钨合金片（厚度 $<0.1\text{mm}$ ）
  - 2.3.2 常规厚度钨合金片（ $0.1\text{--}10\text{mm}$ ）
  - 2.3.3 厚壁钨合金片（厚度 $>10\text{mm}$ ）
  - 2.3.4 特型尺寸钨合金片（定制化）
- 2.4 按用途场景分类钨合金片
  - 2.4.1 国防军工用钨合金片
  - 2.4.2 工业制造用钨合金片
  - 2.4.3 核与医疗用钨合金片
  - 2.4.4 电子信息用钨合金片
  - 2.4.5 其他专用钨合金片

### 第三章 钨合金片的合金化原理与成分体系

- 3.1 钨合金片合金化的化学原理
  - 3.1.1 钨与其他金属元素的相图分析
  - 3.1.2 固溶强化与弥散强化化学机制
  - 3.1.3 合金相的形成条件与稳定性
- 3.2 钨合金片中组成元素的作用与配比
  - 3.2.1 钨合金片镍-铁体系的协同作用机理
  - 3.2.2 钨合金片镍-铜体系的协同作用机理

#### 版权与免责声明

- 3.2.3 钨合金片微量元素的掺杂效应
- 3.3 钨合金片成分设计的化学规律
  - 3.3.1 钨合金片性能导向的成分优化逻辑
  - 3.3.2 钨合金片成分均匀性的化学控制方法
  - 3.3.3 杂质元素对钨合金片的性能影响
  - 3.3.4 钨合金片杂质元素的去除方法

## 第四章 钨合金片的结构与性能关系

- 4.1 钨合金片的微观结构
  - 4.1.1 晶粒结构与晶界化学组成
  - 4.1.2 合金相的分布与化学状态
  - 4.1.3 缺陷结构的化学成因分析
- 4.2 钨合金片的性能及机理
  - 4.2.1 钨合金片高密度的化学原子堆积原理
  - 4.2.2 钨合金片导热导电性的化学载体机制
  - 4.2.3 钨合金片热稳定性的化学结构支撑
- 4.3 钨合金片的力学与化学性能关联
  - 4.3.1 钨合金片硬度与化学键强度的关系
  - 4.3.2 钨合金片耐磨性的化学腐蚀抵抗机制
  - 4.3.3 钨合金片耐腐蚀性的表面化学屏障作用
- 4.4 钨合金片的工艺-结构-性能关联性分析
  - 4.4.1 烧结工艺对钨合金片微观结构的调控作用
  - 4.4.2 轧制工艺对钨合金片力学性能的影响机制
  - 4.4.3 表面处理对钨合金片化学性能的优化路径
- 4.5 钨合金片在特殊环境下的结构与性能响应
  - 4.5.1 高温环境下钨合金片的结构稳定性变化
  - 4.5.2 辐射环境下钨合金片的化学结构耐受性
  - 4.5.3 极端压力下钨合金片的性能演化规律
- 4.6 中钨智造钨合金片 MSDS

## 第五章 钨合金片的性能检测与表征方法

- 5.1 钨合金片的化学组成分析技术
  - 5.1.1 钨合金片的原子吸收光谱与发射光谱分析
  - 5.1.2 钨合金片的X射线荧光光谱成分定量方法
  - 5.1.3 钨合金片微量元素的化学滴定分析
- 5.2 钨合金片的微观结构表征手段
  - 5.2.1 钨合金片的扫描电镜形貌与成分映射
  - 5.2.2 钨合金片的X射线衍射物相与晶体结构分析
  - 5.2.3 钨合金片的透射电镜微观缺陷观察
- 5.3 钨合金片的性能指标检测规范
  - 5.3.1 钨合金片密度与致密度的检测方法
  - 5.3.2 钨合金片硬度的检测方法



- 5.3.3 钨合金片耐腐蚀的检测方法
- 5.3.4 钨合金片耐磨的检测方法
- 5.3.5 钨合金片强度的检测方法

## 第六章 钨合金片的制备工艺

- 6.1 钨合金片制备流程与分类
  - 6.1.1 钨合金片的主要制备路线
  - 6.1.2 高密度钨合金片与非高密度片的工艺差异
  - 6.1.3 典型厚度范围与对应工艺选择（0.05 mm~50 mm）
- 6.2 原料粉末制备
  - 6.2.1 高纯钨粉的制备与质量要求
  - 6.2.2 合金元素粉末（Ni、Fe、Cu、Co、Mo 等）的选择与预处理
  - 6.2.3 粉末粒度分布控制与 Fisher 粒度检测
  - 6.2.4 粉末混合与合金化方法
- 6.3 粉末成型工艺
  - 6.3.1 冷等静压成型
  - 6.3.2 模压成型与压力参数优化
  - 6.3.3 注射成型在薄片坯料中的应用
  - 6.3.4 生坯强度提升与脱脂工艺
- 6.4 烧结工艺
  - 6.4.1 氢气气氛垂直烧结技术
  - 6.4.2 液相烧结温度窗口与保温时间控制
  - 6.4.3 真空烧结与烧结-热等静压一体工艺
  - 6.4.4 烧结变形控制与支撑工装设计
  - 6.4.5 大尺寸板坯烧结的温场均匀性保障
- 6.5 热加工与热处理
  - 6.5.1 开坯锻造与热轧工艺
  - 6.5.2 多向锻造提高组织均匀性
  - 6.5.3 中间退火与应力释放热处理
  - 6.5.4 高温固溶处理与快速冷却
- 6.6 冷轧与温轧制备薄片
  - 6.6.1 冷轧总变形量分配与道次压下规程
  - 6.6.2 温轧在高钨含量合金中的应用
  - 6.6.3 轧制方向控制与织构优化
  - 6.6.4 边缘裂纹预防与修边工艺
- 6.7 表面处理与精加工
  - 6.7.1 化学清洗与酸洗去氧化层
  - 6.7.2 碱洗去除粘结相表面富集
  - 6.7.3 机械磨削与抛光
  - 6.7.4 真空/氢气保护热平整工艺
  - 6.7.5 精密剪切、激光切割与水刀切割

## 第七章 钨合金片的应用

### 7.1 钨合金片在国防军工领域的应用

#### 7.1.1 穿甲用钨合金片

#### 7.1.2 配重用钨合金片

#### 7.1.3 防护用钨合金片

### 7.2 钨合金片在高端制造领域的应用

#### 7.2.1 模具镶块用钨合金片

#### 7.2.2 刀具用钨合金片

#### 7.2.3 机械配重用钨合金片

### 7.3 钨合金片在核与医疗领域的应用

#### 7.3.1 核屏蔽用钨合金片

#### 7.3.2 医疗屏蔽用钨合金片

#### 7.3.3 核环境用钨合金片

### 7.4 钨合金片在电子与新能源领域的应用

#### 7.4.1 散热基板用钨合金片

#### 7.4.2 电子封装用钨合金片

#### 7.4.3 电极用钨合金片

### 7.5 钨合金片材在卡片中的应用

#### 7.5.1 钨合金银行卡与支付卡

#### 7.5.2 钨合金宠物身份牌

#### 7.5.3 钨合金节日与纪念定制卡

#### 7.5.4 钨合金工业与资产管理标牌

#### 7.5.5 钨合金服饰与奢侈品吊牌

#### 7.5.6 钨合金高端名片与社交礼仪卡

## 第八章 钨合金片的常见问题与解决方法

### 8.1 钨合金片的材料基础问题与解决

#### 8.1.1 成分与结构相关问题

##### 8.1.1.1 钨合金成分不均匀的问题与均匀化方法

##### 8.1.1.2 晶体结构缺陷的类型与修复策略

#### 8.1.2 钨合金片的物理性能偏差问题

##### 8.1.2.1 密度与硬度异常的成因与调整技术

##### 8.1.2.2 热导率与热膨胀不匹配的问题与优化方案

### 8.2 钨合金片的生产制造问题与解决

#### 8.2.1 粉末冶金工艺问题

##### 8.2.1.1 粉末制备缺陷的识别与控制措施

##### 8.2.1.2 烧结过程故障的诊断与工艺改进

#### 8.2.2 轧制与成形问题

##### 8.2.2.1 热轧裂纹生成的原因与预防方法

##### 8.2.2.2 冷加工变形问题的分析与变形控制

#### 8.2.3 质量检测与控制问题

##### 8.2.3.1 无损检测技术的应用难题与替代方案

#### 版权与免责声明

- 8.2.3.2 尺寸公差偏差的处理与精度提升
- 8.3 钨合金片的应用与性能问题与解决
  - 8.3.1 钨合金片在航空航天中的应用问题
    - 8.3.1.1 高温疲劳失效的机制与强化处理
    - 8.3.1.2 振动冲击载荷的问题与耐冲击设计
  - 8.3.2 钨合金片在辐射屏蔽中的应用问题
    - 8.3.2.1 屏蔽效率衰减的原因与效率恢复
    - 8.3.2.2 生物相容性隐患的评估与安全改进
  - 8.3.3 钨合金片在电子与医疗设备中的应用问题
    - 8.3.3.1 电导率与磁性异常的排查与材料改性
    - 8.3.3.2 腐蚀氧化问题的防护与涂层技术

附录：

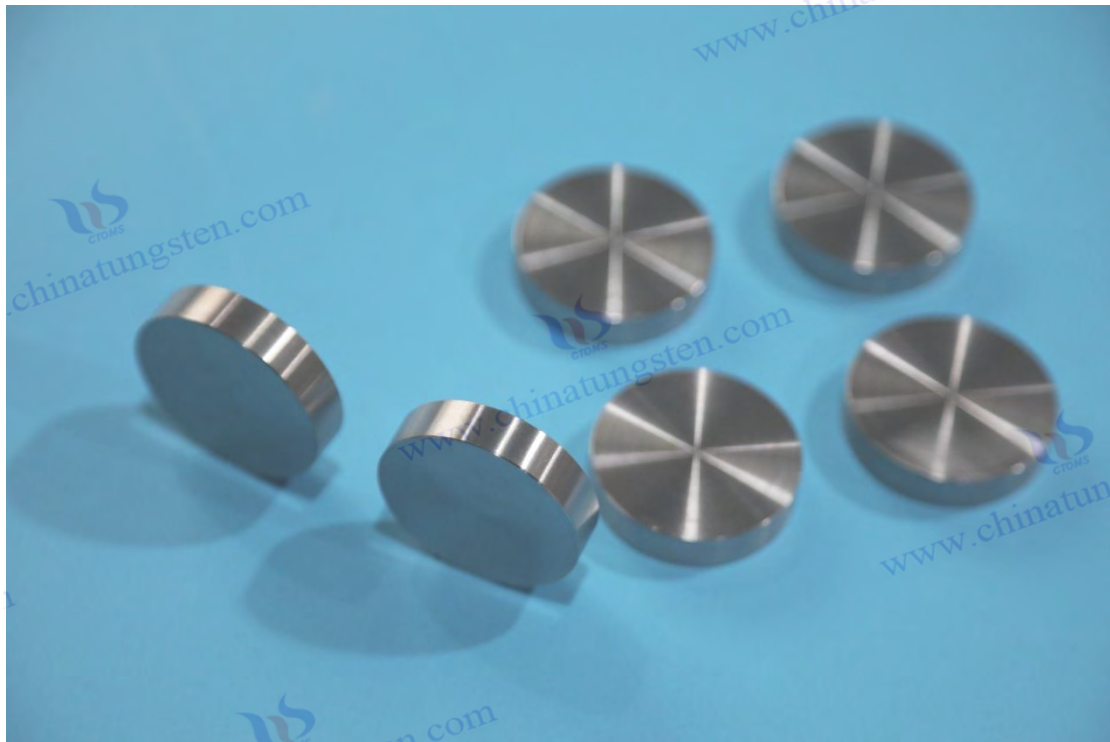
附录 A 中国钨合金片标准

附录 B 国际钨合金片标准

附录 C 欧美日韩等国的钨合金片标准

附录 D 钨合金片术语表

参考文献



中钨智造钨合金片

中钨智造科技有限公司  
高密度钨合金定制服务

中钨智造，30 年经验的高密度钨合金设计生产的定制专家。

核心优势

**30 年经验：**深谙钨合金生产，技术成熟。

**精准定制：**支持高密度（17-19 g/cm<sup>3</sup>）、特殊性能、结构复杂、超大和极小件设计生产。

**质量成本：**优化设计、最佳模具与加工模式，性价比卓越。

**先进能力：**先进的生产设备，RIM、ISO 9001 认证。

10 万+客户

涉及面广，涵盖航空航天、军工、医疗器械、能源工业、体育娱乐等领域。

服务承诺

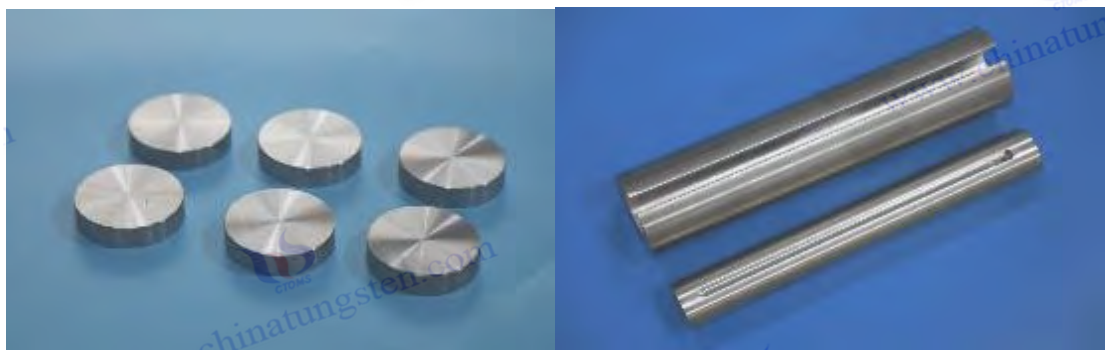
官网 10 亿+次访问、100 万+网页、10 万+客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)





## 第一章 钨合金片的基本认知

### 1.1 钨合金片的概念

钨合金片是一种以钨为主要成分，通过合金化处理并加工成薄板状的材料。这种材料在工业应用中扮演着重要角色，因为它结合了钨的高密度和高熔点特性，同时通过添加其他元素改善了加工性能和力学行为。钨合金片的出现，使得钨这种原本加工难度较大的金属能够以片材形式用于各种工程场合。

钨合金片的成分设计通常围绕钨的高含量展开，其他元素的选择旨在优化整体性能。常见的合金体系包括钨与镍、铁或铜的组合，这些元素在烧结过程中形成粘结相，帮助钨颗粒更好地结合。片材的厚度往往控制在几毫米以内，甚至可以达到微米级，这取决于具体的生产工艺和应用需求。生产过程从粉末混合开始，经过压制、烧结、热加工和冷加工，最终得到表面平整、边缘规则的片材。

在性能方面，钨合金片表现出良好的密度分布，这使得它在需要重量集中的场合表现出色。同时，它还具备一定的延展性，便于后续的弯曲、冲压或切割操作。热处理环节是关键，通过控制温度和冷却速率，可以调整材料的晶粒尺寸和相分布，从而影响其硬度和韧性平衡。

钨合金片的概念强调了材料工程学的综合应用，它不是简单地将钨轧薄，而是通过合金化实现从脆性到可加工性的转变。这种材料在电子、医疗设备和精密仪器领域逐渐得到认可，因为它能满足对尺寸稳定性和环境适应性的要求。随着制造技术的进步，如激光切割和精密轧制，钨合金片的规格范围不断扩展，满足了多样化的设计需求。

#### 1.1.1 钨合金片的定义

钨合金片被定义为以钨为基体，通过添加少量其他金属元素如镍、铁或铜，经粉末冶金工艺制备并轧制成形的薄板状合金材料。钨在其中的比例通常占主导地位，这赋予了材料高密度和高硬度的基础特性，而合金元素的加入则显著提升了材料的塑性和加工适应性。

从定义上看，钨合金片区别于其他钨制品的关键在于其片状形态和合金组成。制备过程中，钨粉与其他金属粉末均匀混合后，在高温下发生液相烧结，形成致密的组织结构。随后通过多道次轧制，逐步减薄至所需厚度，同时伴随退火处理以释放内部应力。这种定义体现了材料从粉末到成品的完整转变链条。

在实际定义中，还需考虑合金系列的划分。例如，钨镍铁系列注重力学性能的平衡，而钨镍铜系列则更侧重于导电方面的表现。这些系列的定义都围绕钨的高熔点展开，确保材料在高温环境下保持形状稳定性。

钨合金片的定义也延伸到其功能定位，它是一种高性能工程材料，适用于要求高密度与良好可成形性相结合的场景。这种定义不是静态的，随着新合金元素的探索，如加入钼或铌，定义的内涵也在不断丰富，以适应新兴应用。



### 1.1.2 与相关材料的界定区分

钨合金片与其他材料的区分，需要从成分、加工方式、性能特征和应用定位多个维度进行分析，以确保在选材时避免混淆。

与纯钨片的比较是首要的。纯钨片几乎不含合金元素，其生产依赖于高纯钨粉的轧制，但由于钨的室温脆性，加工过程需在高温下进行，成品易出现裂纹。钨合金片则通过合金化引入粘结相，使其可在较低温度下轧制，表面质量更优，适用于更广泛的成型操作。

钨铜复合材料片也需加以区分。这种材料以钨颗粒和铜相的机械混合为主，铜含量较高，制备采用熔渗法而非合金烧结。相比之下，钨合金片形成的是固溶体结构，铜或铁与镍的互溶更均匀，导致热膨胀系数和导热性能的差异。

钼合金片是另一个常见对比对象。钼的密度和熔点均低于钨，其片材在真空环境中表现出色，但高温强度不如钨合金片。钼片更适合电子真空器件，而钨合金片则在需要更高质量惯性的场合更有优势。

与硬质合金片相比，钨合金片不含碳化物相。硬质合金以碳化钨颗粒和钴粘结为主，硬度极高但韧性有限，主要用于切削工具。钨合金片则更注重密度和延展性的结合，适用于平衡件或屏蔽部件。

通过这些界定，钨合金片的位置清晰显现：它是一种平衡了密度、加工性和稳定性的片材，在民用工业中填补了特定性能空白。这样的区分有助于工程师根据具体需求进行匹配。

## 1.2 钨合金片的发展与研究意义

钨合金片从诞生到逐步走向成熟，经历了从单一性能追求到综合性能优化的完整演进过程。其发展既受到钨资源特性与加工技术进步的驱动，也与工业领域对高密度、高稳定性材料的持续需求密切相关。早期钨材主要以灯丝、靶材等简单形态出现，随着粉末冶金工艺的完善以及对高密度材料可加工性要求的提高，钨合金片逐渐成为一个独立的研究与生产方向。二十世纪中后期，液相烧结技术的成熟为钨合金提供了可靠的致密化手段，而随后多道次轧制与控制退火工艺的引入，则真正实现了从块体到薄片的形态转变。这一过程不仅拓展了钨的应用边界，也为后续功能化、轻量化设计奠定了基础。当前，钨合金片的研究已从传统的钨镍铁、钨镍铜体系，扩展到稀土掺杂、纳米晶强化、梯度结构设计等多个前沿方向，体现出材料科学与工程需求深度融合的趋势。

### 1.2.1 基于钨资源利用的发展脉络

钨作为一种储量相对有限但分布广泛的战略金属，其高效利用始终是材料开发的重要背景。早期钨资源主要用于硬质合金生产，剩余的低品位矿或回收料则难以进一步深加工。钨合金片的出现，为中低品位钨资源提供了新的转化路径，使原本可能废弃的钨粉得以进入高附加值领域。

20 世纪 50 年代前后，研究者发现通过添加镍铁或镍铜可以显著降低钨的脆性转变温度，这一发现直接催生了第一代钨重合金，主要以块体形式用于民用平衡件。随后，随着轧制装备精度和退火工艺的进步，厚度从最初的厘米级逐步减薄到毫米级，再到今天的几十微米，实现了资源利用从粗放向精细的转变。进入 21 世纪，热等静压、放电等离子烧结等先进烧结技术的工业化应用，进一步提高了坯料致密度和组织均匀性，减少了后续轧制道次，降低了能耗和钨的损耗率。

近年来，钨合金片的生产开始注重全流程的资源循环。例如，钨合金加工过程中的边角料、轧制氧化皮以及报废部件，都可以通过氢还原或锌熔法重新转化为高纯钨粉，重新进入配料环节，形成较为完整的闭环利用体系。同时，针对钨资源品位下降的现实，一些研究机构尝试在保证性能的前提下降低钨含量，或用部分钼、钽替代，形成资源节约型合金体系。可以说，钨合金片的发展脉络，正是钨资源从“高纯高耗”向“高效循环”利用模式演变的缩影，这一过程既体现了技术进步，也反映了可持续发展的要求。

### 1.2.2 化学工程视角研究钨合金片的价值

从化学工程角度看，钨合金片的研究与开发集中体现了多相反应、相界面调控、传热传质优化等核心问题的工程化解决。粉末冶金过程中的液相烧结是典型的化学工程单元操作，涉及钨颗粒的重排、粘结相的润湿铺展、溶解-再析出机制以及气体排出动力学。研究者通过调控烧结温度曲线、氢气露点、坯体装炉方式等参数，实现了对孔隙率、粘结相分布、钨颗粒球化程度的精确控制，这本质上是化学反应工程与材料学的交叉应用。

轧制与退火阶段则涉及应力场与扩散场的耦合。化学工程中常用的有限元模拟与计算流体力学方法，已被广泛用于分析轧制过程中的温度分布、应力分布以及退火过程中元素的扩散行为，帮助优化道次压下量与中间退火制度，减少边缘裂分层、开裂等缺陷。此外，表面处理如化学镀、真空热处理等，也属于典型的化学工程单元操作，直接影响片材的抗氧化能力和结合强度。

更进一步看，钨合金片在腐蚀介质中的行为研究，为化工设备选材提供了重要参考数据。通过电化学测试、浸泡试验等手段，研究者建立了不同合金体系在酸、碱、盐环境中的腐蚀速率模型，为延长服役寿命、降低维护成本提供了理论支撑。从化学工程视角出发，钨合金片不仅是最终产品，更是一系列精密可控的化学与物理过程高度集成的结果，其研究价值在于为类似高熔点、多相体系材料的工程化放大提供了可复制的经验。

### 1.2.3 钨合金片在应用领域的地位

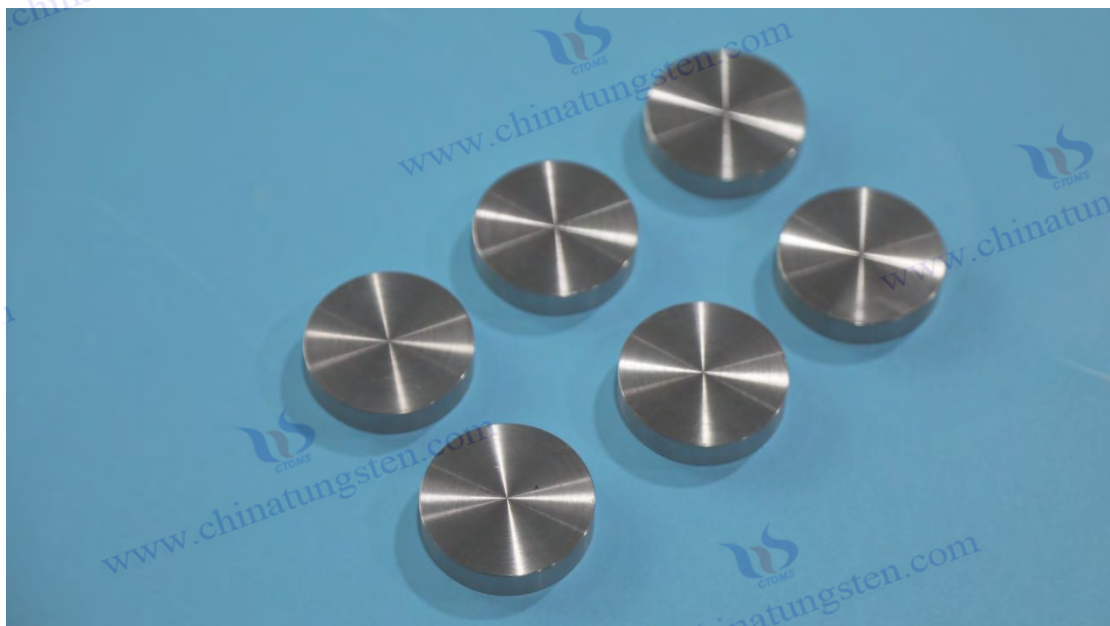
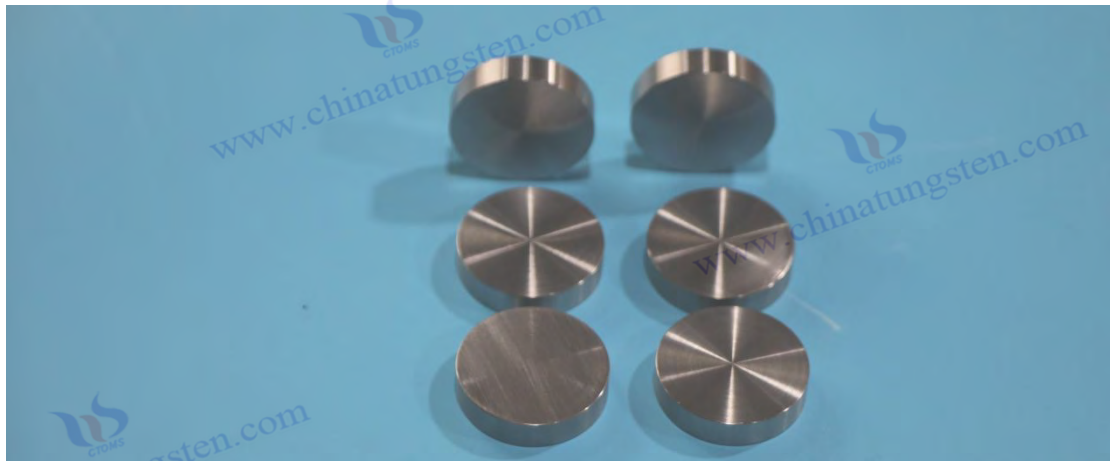
钨合金片在当代工业体系中已形成不可替代的细分地位，主要体现在对高密度与良好加工性兼顾的需求场景。在医疗器械领域，钨合金片因其优异的射线衰减能力与生物相容性，成为高端放射治疗设备中准直器、多叶光栅等核心部件的首选材料，其厚度精度与表面质量影响治疗的定位准确度。

在精密仪器与电子工业中，钨合金片被用作振动控制元件和电磁屏蔽部件，发挥高密度带来

的惯性优势与适中的导电性能。在分析仪器、高精度天平、惯性导航系统等设备中，钨合金片帮助实现了小型化与高稳定性的统一。

此外，在真空镀膜、热管理领域，钨合金片也逐步占据重要位置。作为溅射靶材背板或热沉材料，它兼顾了高热导与低热膨胀的要求。近年来，随着新能源、新一代信息技术的快速发展，对高性能热界面材料与屏蔽材料的需求持续增长，钨合金片凭借其独特的性能组合，正在从传统应用向新兴领域延伸。

值得注意的是，钨合金片的应用地位并非孤立存在，而是与其他高性能材料形成互补关系。在某些场合，它与钛合金、碳纤维复合材料协同使用，共同实现轻量化与功能化的平衡。正是这种既能独立承担关键功能、又能与其他材料协同工作的特性，奠定了钨合金片在现代工业材料谱系中的稳固位置。随着加工精度与表面处理技术的进一步提升，其应用领域仍有较大的拓展空间。



中钨智造钨合金片



## 第二章 钨合金片的分类体系

### 2.1 按材料成分分类钨合金片

按材料成分对钨合金片进行分类是最常用、最直观的方式。这种分类方法反映了粘结相的化学组成差异，从而决定了材料在力学性能、热物理性能、电磁性能以及加工工艺适应性上的系统性区别。目前工业化生产的钨合金片几乎全部采用镍作为主要粘结元素，这是因为镍对钨具有良好的润湿性、适中的激活烧结能力以及与钨较小的热膨胀失配。基于第二组元的不同，主要形成了镍-铁系和镍-铜系两大系列，此外还有少量镍-钼、镍-铼或其他实验性体系，但尚未形成规模化片材生产。两种主流体系的钨含量通常在 90%~97%之间，粘结相总量控制在 3%~10%，通过微调比例和热机械加工参数，可在较宽范围内调控最终性能。

#### 2.1.1 镍-铁系钨合金片

镍-铁系钨合金片是最早实现工业化并至今仍占主导地位的钨合金片品种，其典型成分范围为 W 含量 90%~97%，Ni 含量 2.5%~7%，Fe 含量 0.5%~3%，Ni/Fe 质量比通常维持在 7:3~8:2 之间。这种比例设计源于 20 世纪中期的大量实验筛选，结果表明该范围能在液相烧结阶段形成适量液相、促进钨颗粒充分重排的同时，避免粘结相过度偏聚或出现脆性相。

镍-铁系的最大特点在于粘结相为铁镍固溶体，具有明显的铁磁性，因此材料整体呈现出较强的磁响应。这一特性使其在需要磁屏蔽或磁致动的场合具有天然优势。同时，铁的加入显著降低了粘结相的堆垛层错能，促进了烧结后期的溶解-再析出过程，使钨颗粒更趋近于球形，钨-粘结相界面结合强度更高，宏观表现为较高的抗拉强度和断裂韧性。

在片材加工方面，镍-铁系表现出良好的热塑性和冷加工性能。经过高温烧结后的坯料可在 1100℃~1300℃进行多道次热轧，随后通过中间退火和冷轧最终减薄至 0.05mm 以下。轧制过程中材料不易出现边缘裂纹，成品率较高。热处理制度对最终性能影响显著：低温长时间退火可保留细小钨颗粒与纤维状组织，获得较高强度；高温短时退火则促进钨颗粒粗化与粘结相均匀化，提升延性。

表面处理方面，镍-铁系钨合金片易于化学镀镍、金或银，也可在真空环境中进行扩散镀铝形成保护层，进一步提高抗氧化与耐腐蚀能力。目前，该系列片材广泛用于需要兼顾高密度与一定力学可靠性的民用精密部件，如高端分析天平砝码、惯性仪表平衡块、光学仪器减振片等。随着轧制装备与热处理技术的进步，镍-铁系钨合金片的厚度均匀性与平面度已达到微米级，满足了高端仪器对微小质量偏差的严苛要求。

#### 2.1.2 镍-铜系钨合金片

镍-铜系钨合金片是在镍-铁系基础上发展起来的无磁型钨合金片，其典型成分为 W 含量 90%~96%，Ni 含量 3%~8%，Cu 含量 1%~5%，Ni/Cu 质量比通常在 3:1~7:3 之间。铜的引入彻底消除了材料的宏观铁磁性，使其在强磁场或电磁兼容要求高的环境中成为唯一选择。同时，铜的高导热导电性能赋予该系列片材更优的热扩散能力与电接触性能。

从微观组织看，镍-铜系的粘结相同样为面心立方固溶体，但因铜与镍无限互溶，粘结相成分均匀性更好，烧结过程中液相出现温度略低于镍-铁系，有利于降低烧结温度、减少钨颗粒异常长大。钨颗粒球化程度通常高于镍-铁系，界面洁净度更高，这使得材料在相同钨含量下往往表现出稍高的延伸率，但抗拉强度略有下降，体现出强度与塑性的权衡。

加工特性方面，镍-铜系对氧化更敏感，高温轧制必须在保护气氛或真空条件下进行，否则表面易形成疏松氧化层影响后续冷轧。冷加工硬化速率比镍-铁系略低，适合大压下量轧制，有利于生产超薄箔材（厚度可达  $20\text{ }\mu\text{m}$  以下）。退火工艺窗口较宽，材料对过烧不敏感，这为连续化生产线提供了便利。

表面处理上，镍-铜系天生具有较好的耐蚀性与电接触性，常直接抛光使用或仅需轻度化学清洗即可满足要求，省去了复杂的镀层工序。在应用层面，该系列片材主要用于医疗放射治疗设备的准直器叶片、电磁屏蔽罩、真空溅射靶材背板、热沉垫片等需要无磁、高导热或高导电的场合。近年来，随着 5G 通信、高功率电子器件散热需求的增长，镍-铜系钨合金片的薄型化与复合化应用正在快速拓展，显示出强劲的生命力。

### 2.1.3 钨铜合金片

钨铜合金片在分类体系中占据特殊位置，它严格来说属于伪合金或金属基复合材料，而非传统意义上的固溶体钨合金。典型成分范围为 W 含量 50%~90%，Cu 含量 10%~50%，两相之间几乎不互溶，铜以连续或半连续网络状分布在钨骨架之中。由于没有形成合金化的粘结相，钨铜片在微观结构、性能特征与加工路径上都与前述镍基钨合金片有本质区别。

钨铜片的制备主要采用熔渗法或直接活化烧结法。熔渗法先压制烧结出多孔钨骨架，再在略高于铜熔点的温度下让铜液渗入孔隙；活化烧结则在钨粉中预混少量镍或钴，在  $1300^{\circ}\text{C}$ ~ $1400^{\circ}\text{C}$  直接一次性完成致密化。两种工艺得到的片材都具有极高的导热导电性能，热导率通常在  $180\sim 220\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间，电导率可达 40%~55% IACS，且热膨胀系数与半导体材料匹配良好。

在片材加工方面，钨铜因铜相的存在而表现出优异的冷热加工性能。钨含量 70%~80% 的牌号可在室温下直接大压下量轧制，成品厚度容易做到  $0.1\text{ mm}$  以下，且表面光洁度高，几乎不需中间退火。钨含量超过 85% 时则需配合温轧与保护气氛。钨铜片最突出的优点是无磁、热导电性能优异、耐电弧烧蚀能力强，因此在高压电触头、真空开关电极、电阻焊电极、电子封装热沉、火箭发动机喷管喉衬等需要同时承受高温、电弧与热冲击的民用及工业领域获得了广泛认可。近年来，随着大功率 IGBT 模块、第三代半导体基板散热需求的爆发，超薄高钨含量钨铜片（厚度  $<0.3\text{ mm}$ ，钨含量  $\geq 85\%$ ）已成为研究与生产的热点。

### 2.1.4 钨银合金片

钨银合金片同样属于伪合金体系，银作为软质高导电相，钨作为硬质骨架，二者互不固溶。其成分通常为 W 含量 50%~80%，Ag 含量 20%~50%。制备工艺与钨铜高度类似，以高温熔渗为主，也可采用粉末混合法后高压固结。由于银的熔点（ $961^{\circ}\text{C}$ ）比铜更低，熔渗温度相应



降低，工艺窗口更宽，对设备要求也更温和。

钨银片在导电导热性能上全面超越钨铜，电导率可轻松达到 60%~80% IACS，热导率在 250~380 W/(m·K) 之间，同时保持了钨的高硬度与抗烧蚀能力。更重要的是，银在电弧作用下形成的氧化银具有较高蒸气压，易于带走热损伤，使材料表现出极佳的抗电弧侵蚀与抗熔焊特性。加工性能方面，钨银片在含银量 30% 以上时几乎可在全冷状态下轧制到 0.05 mm 以下，且边缘不易开裂，表面呈银白色光泽，视觉效果优异。

目前钨银片主要用于中低压电触头、精密继电器触点、滑动电接触件以及某些特殊波导管内壁镀层基材。在民用高端断路器、汽车继电器、航空继电器等领域，钨银片凭借其长寿命、低接触电阻与低材料转移特性，已逐步取代传统银钨、银镍材料。

### 2.1.5 其他粘结相钨合金片

除上述主流体系外，近年来还出现了一些采用新型或复合粘结相的钨合金片，主要处于实验室向产业化过渡阶段，或针对特定功能需求小批量生产。

钨-镍-钴系：在镍铁或镍铜基础上进一步添加 1%~3% 钴，可显著提高粘结相强度与高温抗软化能力，适用于需要更高工作温度的热沉或结构件。

钨-镍-钼系：通过钼部分替代钨（5%~20%），在保持高密度的同时降低整体热膨胀系数，改善与陶瓷或玻璃的热匹配，常用于电子封装外壳或真空封接过渡片。

钨-稀土系：添加微量  $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$  等稀土氧化物，通过弥散强化机制提高再结晶温度与高温强度，同时细化钨晶粒，改善薄片轧制时的抗开裂能力。

钨-碳化物复合系：在镍基粘结相中预先加入少量 TiC、ZrC 等碳化物颗粒，形成第三相强化，显著提升硬度与耐磨性，主要用于耐磨衬片或精密模具镶块。

钨-高熵粘结相系：最新探索方向，用 FeCoNiCrMn、FeCoNiCrAl 等高熵合金粉末作为粘结相，在保持高密度基础上获得更高的强度与抗氧化性能，目前仅处于实验室箔材阶段。

## 2.2 按核心性能分类钨合金片

按核心性能对钨合金片进行分类，体现了工程应用中对材料主导功能的直接需求。目前，钨合金片按核心性能大致可分为高密度型、高硬度型、耐蚀耐磨型三大类，三者之间存在一定的交叉，但主导方向各不相同。

### 2.2.1 高密度钨合金片

高密度钨合金片是钨合金片家族中产量最大、应用最广的一类，其核心设计目标是将理论密度最大化，同时保留足够的加工性与力学可靠性。典型密度范围在 17.0~18.8 g/cm<sup>3</sup> 之间，

最高可接近  $19.0 \text{ g/cm}^3$ ，远高于绝大多数工程金属。

该类片材几乎全部采用钨含量 93%~97% 的镍铁系或镍铜系成分，粘结相总量控制在 3%~7%。为进一步逼近理论密度，生产中常采用高纯细钨粉、延长液相烧结保温时间、配合热等静压后二次补压等手段，使孔隙率降至 0.1% 以下。轧制工艺则以大压下量热轧+多道次冷轧为主，配合严格的中间真空退火，确保厚度方向密度均匀性偏差不超过 0.5%。

高密度钨合金片在需要集中质量、减小体积的场合表现出明显优势。医疗领域中，放射治疗设备的多叶准直器叶片普遍采用 0.15~0.5 mm 厚的 93W-4.9Ni-2.1Fe 片材，其高密度带来的射线屏蔽效率与体积节约直接提升了设备的治疗精度与床位周转率。在精密仪器领域，分析天平、陀螺仪、惯性导航系统的配重与平衡片也大量选用该类材料，厚度通常在 0.05~2 mm 之间，要求密度公差  $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$  以内。

近年来，随着电动汽车与可穿戴设备对局部配重的需求增加，高密度钨合金片开始向超薄 ( $<0.1 \text{ mm}$ )、高表面光洁度 ( $Ra \leq 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ) 方向发展，部分高端产品已实现与聚合物或铝合金的复合层压，进一步拓展了其在消费电子领域的应用空间。

### 2.2.2 高硬度钨合金片

高硬度钨合金片以显著提升表面与整体硬度为首要目标，通常要求维氏硬度在 380~550 HV30 之间，部分强化牌号可突破 600 HV30。该类片材通过成分优化、变形强化与第二相弥散三种手段实现硬度提升。

常见技术路径包括：提高钨含量至 95%~98%，减少软质粘结相比比例；采用高钴镍铁粘结相 (Co 含量 3%~8%)，利用钴的固溶强化与沉淀强化效应；冷轧总加工率超过 70%，形成强烈的纤维织构与高密度位错；引入 TiC、ZrC、WC 等碳化物颗粒 (体积分数 2%~8%) 进行弥散强化；低温长时间时效，使粘结相析出细小金属间化合物。

高硬度钨合金片在保持一定延性的同时，显著提高了抗划伤、抗压痕与抗疲劳能力。在精密模具领域，用作冲压手机中框的不锈钢模具镶块时，硬度 450 HV 以上的钨合金片可将模具寿命较传统高速钢提升 3~5 倍。在光学玻璃热压成型模具中，表面硬度达 520 HV 并配合离子注入氮化的钨合金片，能有效抵抗高温玻璃粘附与磨粒磨损。

此外，在高端钟表制造中，高硬度钨合金片被加工成摆陀或微型齿轮，既利用其高密度增加惯性，又依靠高硬度保证长期运转中的耐磨性。近年来，部分厂家通过真空热处理+深冷处理复合工艺，使钨合金片表面硬度梯度化，进一步兼顾了表面耐磨与心部韧性的平衡。

### 2.2.3 耐蚀耐磨钨合金片

耐蚀耐磨钨合金片主要针对化工、海洋、食品加工等接触腐蚀介质或磨损环境的工况而开发，其核心在于提升材料在酸、碱、盐及磨料冲蚀条件下的服役寿命。

实现路径主要包括：选用高镍铜或镍铬粘结相体系，镍含量提高至 8%~12%，铬含量 2%~5%，形成自钝化能力；表面化学镀镍磷、镍硼，或真空镀 CrN、TiAlN、DLC 等硬质涂层，厚度 10~50  $\mu\text{m}$ ；添加微量稀土元素或硼、磷，促进粘结相形成更致密的保护性氧化膜；采用高能量球磨+放电等离子烧结工艺，获得纳米晶或非晶-纳米晶复合组织。

在化工泵叶轮防护片、食品级搅拌刀具镶片、海水淡化设备阀片等场合，表面镀层+基体高镍的钨合金片表现出优异的耐点蚀与缝隙腐蚀能力。在矿浆管道内衬、选矿设备分级筛板等强磨粒冲蚀环境中，含 TiC 弥散强化的钨合金片失重率仅为高铬铸铁的 1/5~1/8。

值得一提的是，部分耐蚀耐磨钨合金片还采用了梯度结构设计：表层富集高铬镍粘结相与硬质相，心部保持传统镍铁配比，既保证了耐蚀耐磨性能，又不牺牲整体韧性与加工性。这种结构化设计代表了当前钨合金片在复杂服役环境下的最新应对策略。

### 2.3 按尺寸规格分类钨合金片

按尺寸规格对钨合金片进行分类，是生产企业与下游用户之间最直接的沟通语言。厚度是决定加工难度、成本高低和应用方向的最关键参数，宽度与长度虽也有影响，但通常在厚度确定后可通过剪切、激光切割或水刀灵活调整。目前行业内已形成相对统一的厚度区间划分，这种划分既反映了工艺能力边界，也对应了不同的典型应用场景。

#### 2.3.1 超薄钨合金片（厚度<0.1 mm）

超薄钨合金片通常指成品厚度在 0.005 mm 至 0.099 mm 之间的箔材，最薄可达 0.008 mm 以下。这类片材的制备代表了钨合金轧制技术的最高水平，对原材料纯度、坯料均匀性、轧辊精度和洁净环境要求极高。

生产超薄片通常选用钨含量 90%~95%的镍铁或镍铜体系，粘结相比比例稍高以保证冷加工性能。坯料需先经过热等静压或真空热轧预制成 2~5 mm 厚板，再进入多道次冷轧，每道次压下量严格控制在 5%~15%，总加工率常超过 95%。中间退火必须在高真空或高纯氢气氛下进行，避免任何氧化夹杂导致的脆断。成品箔材表面光洁度可达 Ra 0.05  $\mu\text{m}$  以下，厚度公差控制在  $\pm 0.003$  mm 以内。

超薄钨合金片主要用于医疗放射治疗设备的多叶准直器最薄叶片、柔性射线屏蔽帘、精密仪器减振膜、高端钟表自动摆陀以及部分柔性电子基板。近年来，随着可穿戴医疗设备和折叠屏手机对超薄高密度材料的需求，厚度 0.03~0.07 mm 的镍铜系超薄箔开始与聚合物复合，形成兼具屏蔽与可弯曲特性的新型功能膜。

#### 2.3.2 常规厚度钨合金片（0.1~10 mm）

厚度 0.1 mm 至 10 mm 的范围是目前产量最大、使用最普遍的区间，占据全部钨合金片产量的九成以上。这一厚度段的加工工艺已经高度成熟，成本相对可控，尺寸精度与性能一致性均能满足绝大多数工业要求。



该厚度范围涵盖了从热轧开坯到冷轧精整的完整工艺链。坯料经 1100~1300℃ 多道次热轧后厚度降至 3~8 mm，再转入冷轧与多次中间退火，最终获得所需规格。厚度公差一般控制在  $\pm 0.01 \sim \pm 0.05$  mm，表面可根据需要进行抛光、砂磨或化学蚀刻处理。

常规厚度钨合金片几乎覆盖了所有主流应用：0.1~0.5 mm 用于准直器叶片、屏蔽片；0.5~2 mm 用于配重块、减振片、热沉；2~6 mm 用于模具镶块、靶材背板；6~10 mm 则多作为结构支撑件或预制坯料。这一厚度段的多样性也体现在表面处理上，可镀镍、金、银、DLC，或直接阳极氧化形成彩色装饰层，满足从工业功能到消费品外观的不同需求。

### 2.3.3 厚壁钨合金片（厚度>10 mm）

厚度超过 10 mm 的钨合金片通常被称为厚板或厚壁片，最高厚度可达 50 mm 以上。这类产品虽然在钨合金片总量中占比很小，但因单片价值高、加工难度大，仍是许多厂家重点保留的生产能力。

厚壁片的制备以热轧为主，冷轧为辅。烧结坯料直径常达 300~500 mm，热轧开坯温度控制在 1350~1450℃，每道次压下量 20%~30%，直至厚度降至 12~15 mm 后才转入温轧或冷轧精整。为防止边缘裂纹，常采用包套轧制或侧向约束轧制技术。成品厚度公差一般在  $\pm 0.1 \sim \pm 0.3$  mm，表面需进行铣削或磨削处理以去除脱碳层与氧化皮。

厚壁钨合金片主要用于大型医疗直线加速器准直器基座、工业 CT 探测器屏蔽体、大型惯性仪表平衡盘、石油钻井配重杆以及高能物理实验中的吸热块。由于体积大、质量重，其运输与机械加工往往需要专门工装，因此下游用户多采用近净成形设计，尽量减少后续切削量。

### 2.3.4 特型尺寸钨合金片（定制化）

特型尺寸钨合金片指超出标准矩形、常规厚度之外的各种异形、超宽、超长或复合结构片材。这类产品完全根据客户图纸进行个性化制造，体现了钨合金片生产从“标准化供货”向“解决方案提供”转型的趋势。

常见特型包括：带深冲台阶的预成型片、带通孔或沉孔的穿孔片、宽度超过 600 mm 的超宽片、长度超过 2 m 的超长条、表面带微结构阵列的功能片，以及与铜、铝、钼、陶瓷等直接复合的层压片。生产时往往需要专用模具、激光切割、数控铣削、真空钎焊或热等静压包套复合等特殊工序。

例如，某些高端医疗设备需要宽度 500 mm、厚度 0.2 mm、边缘带有 0.05 mm 精度的燕尾槽钨合金片；某些航空光学仪器需要表面抛光至镜面并带有复杂曲面弯折的钨合金减振片。这些特型产品单价虽高，但因直接减少了客户二次加工环节，反而总体成本更优。

## 2.4 按用途场景分类钨合金片

按用途场景对钨合金片进行分类，能够更清晰地反映材料在不同行业中的实际价值。目前，

钨合金片的主要应用领域已形成较为稳定的格局，涵盖医疗、工业制造、电子信息以及其他专业化场景。

#### 2.4.1 国防军工用钨合金片

钨合金片在国防军工领域主要发挥高密度、高强度和良好韧性的特性，这种应用涉及需要质量集中、结构稳定或特定功能部件的场合。钨合金片通过高钨含量提供惯性优势，粘结相优化加工性，支持精密成形和表面处理。

在平衡配重部件中，钨合金片调整质量分布，帮助系统稳定运行，厚度均匀确保精度。防护结构应用中，钨合金片利用射线衰减能力，提供薄层高效屏蔽，复合设计增强整体强度。钨合金片的热稳定性支持高温环境，表面镀层提升耐蚀性。

应用设计注重可靠性，钨镍铁体系常见，化学稳定性维持长期服役。钨合金片在国防军工中的作用促进了部件小型化，高密度减少体积占用。

#### 2.4.2 工业制造用钨合金片

在工业制造领域，钨合金片主要发挥高密度与良好耐磨性的组合优势，被广泛用作各种平衡件、减振件、耐磨衬片和模具部件。精密仪器中的配重块、分析天平砝码、惯性导航组件常采用镍铁系高密度片材，通过精确控制质量分布来提高设备稳定性。高速旋转机械中的振动控制片则利用钨合金片的高弹性模量与适中阻尼特性，有效抑制共振。

在模具行业，钨合金片被加工成冲压模具镶块、热压玻璃模具芯或拉丝模入口衬套，其高硬度与抗高温软化能力显著延长了模具使用寿命。石油与矿山设备中的耐磨衬板、阀片、喷嘴也常选用添加碳化物强化的钨合金片，以应对磨粒冲蚀与腐蚀介质的双重作用。

#### 2.4.3 核与医疗用钨合金片

在医疗与核工业领域，钨合金片主要用于射线屏蔽与准直部件。放射治疗设备中的多叶准直器叶片普遍采用厚度 0.1~2 毫米的镍铁系或镍铜系片材，通过层层叠加实现对射线束的灵活塑形。相比传统铅材，钨合金片无毒、强度高、边缘锐利度易保持，成为目前主流选择。核医学影像设备中的探测器准直器、PET/CT 防散射格栅也大量使用钨合金薄片，以提高成像分辨率。工业无损检测领域，如大型铸件 X 射线探伤、管道焊缝  $\gamma$  射线检测，同样需要钨合金片制成的屏蔽盒或准直窗口。核工业中的辐射屏蔽容器内衬、废料储存罐局部补强片也偶尔采用厚度较大的钨合金板，以在有限空间内实现高效屏蔽。随着质子、重离子治疗设备的普及，对超薄、高均匀性钨合金片的需求仍在持续增长。

#### 2.4.4 电子信息用钨合金片

电子信息行业对钨合金片的需求主要集中在热管理、电磁屏蔽和溅射靶材配套三个方向。高功率芯片、5G 基站功率放大器、激光器等器件常使用钨铜或镍铜系钨合金片作为热沉或扩



展层，利用其与半导体材料相近的热膨胀系数和高导热性能，有效降低结温。真空溅射靶材的背板也多采用钨合金片，通过钎焊或爆炸复合与纯钨、钨铼靶材结合，既保证结合强度，又控制整体成本。

在电磁兼容领域，无磁型钨合金片被制成屏蔽罩、吸波贴片或接地弹片，用于手机、医疗电子、航空电子等对磁场敏感的设备。部分高端音响设备则利用钨合金片的高密度制作扬声器振膜配重环，以改善低频响应。近年来，随着第三代半导体（氮化镓、碳化硅）器件的快速发展，对厚度更薄、热导更高的钨铜片需求快速上升，推动了相关工艺的持续优化。

#### 2.4.5 其他专用钨合金片

除上述主要领域外，钨合金片还在一些特殊场景中发挥独特作用。高端钟表行业使用抛光后的钨合金片制作自动摆陀，既增加上链效率，又带来沉甸甸的佩戴质感。体育器材领域，部分高尔夫球杆头部镶嵌钨合金片以调整重心分布，提高击球稳定性。珠宝与装饰领域则出现镀金或镀黑的钨合金片，用作手表表壳、戒指内环或装饰扣件，凭借其永不磨损的表面和独特金属光泽受到市场欢迎。

科学研究领域，钨合金片常被加工成高密度靶片、样品支架或真空腔体局部衬片，用于同步辐射光源、粒子加速器实验。艺术品修复与文物保护中，也偶见钨合金薄片用于精密配重或结构补强。此外，一些新兴交叉领域如可穿戴设备振动马达配重、无人机云台平衡片、赛车轮毂配重块等，也在逐步采用钨合金片实现小型化与高性能的结合。



中钨智造钨合金片

中钨智造科技有限公司  
高密度钨合金定制服务

中钨智造，30 年经验的高密度钨合金设计生产的定制专家。

核心优势

**30 年经验：**深谙钨合金生产，技术成熟。

**精准定制：**支持高密度（17-19 g/cm<sup>3</sup>）、特殊性能、结构复杂、超大和极小件设计生产。

**质量成本：**优化设计、最佳模具与加工模式，性价比卓越。

**先进能力：**先进的生产设备，RIM、ISO 9001 认证。

10 万+客户

涉及面广，涵盖航空航天、军工、医疗器械、能源工业、体育娱乐等领域。

服务承诺

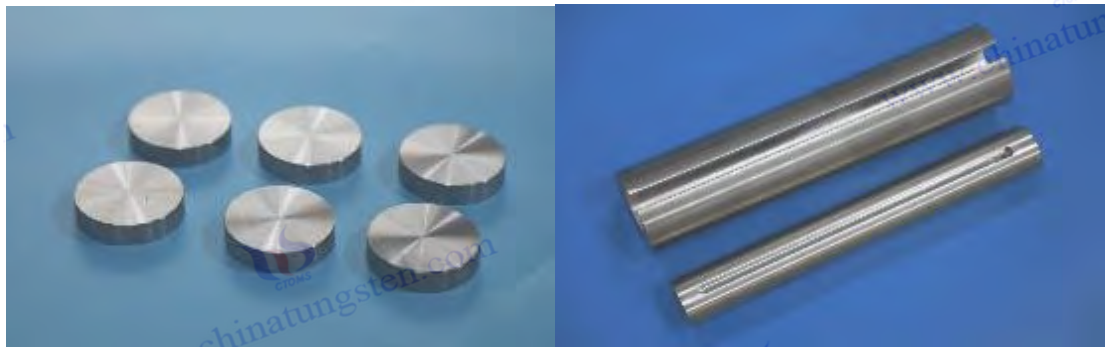
官网 10 亿+次访问、100 万+网页、10 万+客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



### 第三章 钨合金片的合金化原理与成分体系

#### 3.1 钨合金片合金化的化学原理

钨合金片的合金化本质是通过向钨中引入少量其他金属或化合物，在保持钨高密度、高熔点基本特征的前提下，显著改善其室温塑性、高温强度、抗氧化能力以及加工成形性能。钨本身为体心立方结构，原子半径较大，纯钨在室温下几乎没有可动滑移系，脆性转变温度高达300~400℃以上，导致常温轧制极易开裂。通过合金化，引入的面心立方或密排六方粘结相为钨颗粒提供了连续的塑性变形通道，同时在烧结与热加工过程中发生溶解-再析出、界面润湿、相间应力调节等一系列物理化学作用，最终形成钨颗粒被粘结相包裹的典型双相复合组织。这种组织既保留了钨的硬质骨架，又获得了远超纯钨的宏观塑性和韧性，为后续大变形轧制成薄片创造了条件。

##### 3.1.1 钨与其他金属元素的相图分析

钨与大多数过渡族金属在液态下无限互溶，但在固态下溶解度极低，这构成了钨合金片合金化的基本相图特征。W-Ni 二元相图显示，镍在钨中的固溶度在1500℃时也不超过2at%，冷却至室温几乎为零，而钨在镍中的溶解度稍高但仍有限。W-Fe、W-Cu、W-Co、W-Mo 等体系同样呈现类似特征：高温下存在较宽的液相区，便于液相烧结；低温下几乎形成完全不互溶的共晶或包共晶体系。正是这种“高温互溶、低温分离”的特性，使钨合金在液相烧结阶段能够通过奥斯特瓦尔德熟化机制实现钨颗粒球化与致密化，同时在固态冷却后形成钨颗粒与粘结相清晰分离的双相结构。

W-Cu 和 W-Ag 体系更为极端，二者即使在液态也仅部分互溶，固态下完全不形成化合物，属于典型的伪合金。W-Mo、W-Re 则相反，钼和铼与钨可形成连续固溶体，利用这一特点可通过钼或铼部分替代钨来调节热膨胀系数或提高再结晶温度。W-Ni-Fe 三元相图在实际生产中最常用，在液相出现温度附近存在宽阔的液相+钨固相两相区，镍铁比 7:3~8:2 时液相量适中，既能充分润湿钨颗粒，又不至于引起坯体塌陷。相图分析为成分设计提供了直观依据：粘结相总量通常控制在3%~10%体积比，过低则润湿不足、致密度差；过高则密度与硬度下降明显。

##### 3.1.2 固溶强化与弥散强化化学机制

钨合金片中固溶强化的主要贡献来自粘结相内部。镍、铁、铜、钴等元素在面心立方  $\gamma$  相中可无限互溶，形成置换固溶体。较大原子半径的钨、钼、铼溶入镍基粘结相会产生晶格畸变，阻碍位错运动，从而提高粘结相本身的屈服强度。钴的加入尤其有效，因其可降低堆垛层错能，促进交滑移与孪生，进一步提升加工硬化能力。铁、铜则在一定程度上降低粘结相层错能，使其更易发生形变协调，间接改善整体塑性。

弥散强化则是钨合金片获得高强度与高温性能的关键机制。烧结过程中，钨在粘结相中的溶解度随温度降低而急剧下降，导致过饱和钨原子在冷却阶段以极细小颗粒形式重新析出，钉扎在钨/粘结相界面，形成界面强化层。同时，人为添加的 TiC、ZrC、HfC、稀土氧化物等第



二相颗粒在烧结时不溶解，均匀分布于粘结相或界面处，有效阻碍位错与晶界迁移。

### 3.1.3 合金相的形成条件与稳定性

钨合金片中主要合金相包括钨固溶体相、 $\gamma$ -(Ni, Fe, Cu) 粘结相以及可能的金属间化合物或氧化物弥散相。 $\gamma$  相的形成依赖于液相烧结时粘结元素的充分扩散与均匀化，烧结温度需高于最低共晶点约 50~100℃ 并保温，使钨颗粒完成重排与球化。氢气气氛下微量水汽的控制影响氧含量，过高则生成挥发性  $WO_2(OH)_2$  导致钨损失，过低则排气不畅留下闭孔。

粘结相的长期稳定性主要受钨-粘结相界面能与热膨胀差控制。钨与镍、铁、铜的界面润湿角在液相烧结温度下接近 0°，冷却后界面结合以金属键为主，强度高。热膨胀系数差异导致的界面残余应力在退火时可部分释放，但过高温度会诱发 Kirkendall 孔洞或界面脆性相（如  $Ni_4W$ 、 $Fe_7W_6$ ）。稀土元素或硼、磷的微量加入可在界面偏聚，形成薄层非晶态或化合物膜，进一步提高界面高温稳定性。在真空或中性气氛下，钨合金片可在 1000℃ 以上长期使用而不发生明显相变或组织粗化，而在空气中则需表面镀层保护以抑制粘结相的优先氧化。

### 3.2 钨合金片中组成元素的作用与配比

钨合金片中组成元素的作用与配比是合金设计的核心内容，通过合理选择和调控钨、粘结相元素以及微量添加剂的比例，能够在保持高密度和高熔点的基础上，优化材料的加工性能、力学行为和环境适应性。钨作为主体元素，提供材料的密度基础和高温稳定性，而粘结相元素如镍、铁、铜等则负责改善脆性并促进致密化。配比设计通常基于相图分析、烧结动力学和热机械加工试验，确保各元素在液相烧结阶段充分发挥润湿和扩散作用，并在固态下形成稳定的双相结构。钨含量过高可能导致塑性不足，粘结相过多则会降低整体密度，因此配比需根据应用场景进行调整。例如，在追求高硬度的场合，钨比例可适当增加，而在注重导热性的体系中，铜等元素含量会相应升高。微量元素的加入进一步细化组织，抑制晶粒长大或提升界面强度，但其比例需严格控制以避免引入有害相。整体而言，组成元素的作用体现在多尺度协同：原子级固溶强化、微米级相界面调控以及宏观级性能平衡。这种配比原则不仅适用于传统镍铁、镍铜体系，也可扩展到新兴复合体系，帮助材料工程师根据具体需求定制合金成分。

在实际配比过程中，钨粉的纯度和粒度分布对最终性能有显著影响，高纯细粉有利于均匀分布并减少孔隙，而粘结相元素的添加形式通常为金属粉末或预合金粉，以确保混合均匀。烧结温度的选择与配比密切相关，粘结相比比例较高时可降低烧结温度，减少能耗并抑制钨颗粒粗化。热处理环节的配比优化则涉及退火制度的设计，通过控制冷却速率调控固溶体中的元素分布，实现强度与韧性的协调。表面处理时，配比也需考虑，例如在镀层前调整表层元素浓度以提高附着力。

#### 3.2.1 钨合金片镍-铁体系的协同作用机理

钨合金片镍-铁体系的协同作用机理主要源于镍和铁在粘结相中的互补行为，以及与钨颗粒的界面交互。这种体系中，镍作为主要粘结元素，提供良好的润湿性和延展性，而铁的加入

则增强固溶强化并调节相稳定性，二者协同促进液相烧结过程的顺利进行。在烧结初期，镍和铁形成低熔点液相，迅速包裹钨颗粒，实现颗粒重排和初步致密化。铁元素的参与降低液相粘度，提高扩散速率，使钨原子更容易在粘结相中有限溶解，并在冷却时析出细小颗粒，进一步强化界面。协同效应还体现在组织演变上：镍铁固溶体具有面心立方结构，能有效吸收变形应力，减少钨颗粒间的直接接触，从而改善整体塑性。热加工阶段，这种协同使材料在轧制时不易出现裂纹扩展，退火后组织恢复均匀。

从化学角度看，镍和铁的电子结构差异导致在固溶体中产生晶格畸变，阻碍位错运动，提高粘结相强度，同时铁的铁磁性可影响电磁性能，但不改变体系的非磁主导。界面处，镍倾向于形成洁净结合，而铁促进少量氧化物的稳定存在，共同提升界面能。冷却过程中，二者的协同抑制钨颗粒异常长大，保持细小球形形态，有利于后续冷加工。微观上，这种机理涉及溶解-再析出机制：高温下钨部分溶入镍铁相，低温时重新析出钉扎晶界，增强高温稳定性。宏观表现为材料在反复热循环中保持尺寸稳定，适用于需要热疲劳抵抗的场合。配比调控是机理发挥的关键，镍铁比通常调整以平衡润湿与强化效应，过高铁含量可能引入脆性相，但适量则优化韧性。

进一步分析，协同作用还延伸到腐蚀行为：镍提供钝化膜基础，铁辅助其均匀分布，提高在酸性介质中的耐蚀性。加工性能方面，轧制道次间退火利用二者协同恢复组织，减少残余应力积累。环境适应性上，这种体系允许微调以应对不同湿度或温度条件，确保长期服役可靠性。总之，镍-铁体系的协同机理体现了元素间互补与多尺度交互的材料科学原理，为钨合金片的工程应用提供了可靠基础。

### 3.2.2 钨合金片镍-铜体系的协同作用机理

钨合金片镍-铜体系的协同作用机理建立在镍和铜的无限互溶基础上，以及与钨的独特界面化学行为。这种体系中，镍负责提供粘结强度和润湿能力，而铜的加入显著提升导热导电性能，二者协同形成均匀的固溶体粘结相，促进烧结过程的致密化和组织优化。在液相出现阶段，镍铜液相具有较低表面张力，易于铺展覆盖钨颗粒，实现高效重排。铜元素的参与增加液相流动性，加速钨原子的扩散迁移，并在固化时形成更细密的界面层，减少孔隙残留。协同效应体现在热物理性能上：镍铜固溶体结合了镍的延展性和铜的热扩散特性，使材料在热冲击下表现出良好稳定性。加工过程中，这种机理帮助材料在冷热轧制时协调变形，避免层间分离。

化学机制方面，镍和铜的原子尺寸相近，确保固溶体无序分布，产生轻微晶格应变，提高相强度，同时铜的非磁性使体系整体无磁化倾向，适合电磁敏感环境。界面交互中，镍倾向于化学键合，铜辅助物理吸附，共同形成低能界面，提高结合耐久性。冷却演变上，二者协同抑制钨颗粒球化不均，保持组织一致性，有利于生产超薄片材。微观尺度，这种机理涉及热力学平衡：高温溶解钨原子在低温析出，形成弥散强化颗粒，增强高温蠕变抵抗。宏观上，材料在温度梯度环境中保持热导均匀，适用于热管理部件。

腐蚀与耐候性方面，镍铜协同促进表面钝化膜的快速形成，提高在潮湿或盐雾条件下的保护效果。轧制优化中，退火利用二者扩散差异恢复晶体缺陷，改善表面质量。环境因素下，这



种体系允许配比微调以适应不同氧化氛围，确保材料在长期暴露中性能渐变可控。总之，镍-铜体系的协同机理突出热电性能与加工适应的结合，为钨合金片在电子和热控领域的应用奠定基础。

### 3.2.3 钨合金片微量元素的掺杂效应

钨合金片微量元素的掺杂效应主要通过晶界偏聚、相界面修饰和固溶微扰等方式影响材料的组织与性能。这种效应在传统镍铁或镍铜体系中尤为显著，微量稀土、硼、磷、钴等元素的添加可细化钨颗粒、提升粘结相韧性和改善整体均匀性。在烧结过程中，掺杂元素倾向于富集在液相中，降低表面能，促进钨颗粒的均匀分布并抑制长大。掺杂后，组织演变更趋稳定，孔隙率降低，致密度提高。热加工阶段，这种效应帮助减少裂纹萌生，退火时加速应力释放，提高成品率。

从机制看，稀土元素如镧、钇的掺杂形成氧化物弥散相，钉扎晶界，阻碍迁移，提升再结晶温度。硼、磷则在界面处形成薄膜，调节润湿角，增强相间结合。钴的掺杂强化粘结相固溶体，增加层错能，改善变形协调性。微观上，掺杂引起局部电子密度变化，影响扩散动力学，低温时析出细小相，进一步强化材料。宏观表现为力学性能平衡，断裂韧性与硬度协调，适用于精密部件。

腐蚀行为上，掺杂元素辅助钝化膜生长，提高耐介质侵蚀能力。表面处理时，掺杂改善镀层附着，延长服役期。环境适应中，这种效应允许针对性调整，应对不同温度或湿度条件。

### 3.3 钨合金片成分设计的化学规律

钨合金片成分设计的化学规律主要围绕相平衡、扩散动力学和界面化学行为展开，这些规律指导从原料配料到最终热处理的整个过程，确保材料性能的稳定性和可重复性。成分设计的核心在于钨与粘结相元素的比例调控，通过相图分析预测可能形成的相结构，避免有害相的出现。例如，在钨镍铁体系中，化学规律强调镍铁比的平衡，以维持液相烧结时的润湿性和冷却后的固溶体稳定性。扩散规律则要求考虑元素在高温下的迁移速率，钨原子扩散慢于镍或铜，因此设计时需延长保温时间，促进均匀分布。界面化学规律涉及钨颗粒与粘结相的结合能，设计中常引入微量元素调整表面张力，提高界面结合强度。

在实际设计中，化学规律还包括氧化还原平衡的考虑，烧结气氛的氢露点需匹配成分，以抑制钨氧化并促进粘结相的还原。配比时，钨含量较高时需增加粘结相以补偿塑性损失，而粘结相过多则需调整以保持密度。热处理环节遵循相变规律，通过控制冷却速率调控析出相的尺寸和分布，优化力学性能。表面化学规律在镀层设计中体现，成分需与镀液相容，避免元素偏析导致的附着力问题。环保因素下，规律指导使用回收元素，但需控制杂质如氧、碳的含量，以免引入脆性相。

#### 3.3.1 钨合金片性能导向的成分优化逻辑

钨合金片性能导向的成分优化逻辑以终端应用需求为起点，反向推导元素比例和添加顺序，

确保密度、硬度、导热、塑性等性能的协调平衡。这种逻辑首先识别关键性能，例如在追求高密度时，优先提高钨比例，同时微调粘结相以维持加工性。优化过程涉及多轮迭代：初始配比基于相图估算液相量，试验验证后调整以匹配烧结收缩率。逻辑强调元素间协同，例如镍提供延展性，铁或铜补充强化或导热，二者比例优化可改善热稳定性。微量掺杂则作为精细调节手段，稀土元素细化组织，硼磷调整界面，提高耐蚀性。

逻辑还包括性能权衡的考虑，高硬度导向时增加钨含量并添加碳化物，但需监控韧性下降，通过退火优化恢复平衡。导热导向下，铜比例升高，但配比需避免液相过多导致的组织疏松。优化中，化学模拟工具辅助预测相形成路径，帮助减少实验周期。热机械加工反馈纳入逻辑，轧制缺陷分析指导成分微调，如增加钴以提升变形协调。环境性能导向时，优化聚焦耐蚀相的形成，铬或钼的添加比例根据介质类型调整。整体逻辑形成闭环：需求定义-配比设计-制备验证-性能测试-迭代调整，确保成分与性能的紧密关联。通过这种逻辑，钨合金片能够适应精密仪器、热管理等领域的多样要求，体现出材料设计的实用导向性。

### 3.3.2 钨合金片成分均匀性的化学控制方法

钨合金片成分均匀性的化学控制方法主要通过粉末混合、烧结参数调控和热处理扩散来实现，这些方法从源头到成品层层把关，避免偏析和不均导致的性能波动。粉末混合阶段，方法包括机械合金化或喷雾干燥，确保钨、镍、铁等元素在微米尺度均匀分布，化学添加剂如表面活性剂辅助粉末分散。烧结控制中，液相量调控是关键，通过温度梯度设计促进均匀润湿，氢气流动除去挥发杂质，减少局部富集。冷却速率调整方法抑制元素扩散不均，快冷锁定均匀状态。

热处理方法涉及真空退火，促进原子级扩散，消除浓度梯度，多次循环退火进一步匀化。表面化学方法如离子注入或化学气相沉积，在片材表层引入均匀层，提高整体一致性。质量控制中，化学分析反馈指导方法迭代，例如光谱检测偏析区后调整配比。环保方法使用预合金粉，减少混合不均风险。

### 3.3.3 杂质元素对钨合金片的性能影响

钨合金片中的杂质元素主要来源于原料钨粉、粘结相粉末、加工过程引入的气体以及设备残留，即使含量极低，也会对组织稳定性、力学行为和环境适应性产生明显影响。常见的杂质包括氧、碳、氮、磷、硫、硅、钾、钠、钙等，其中氧和碳的影响最为广泛。

氧以游离态或氧化物形式存在时，容易在钨颗粒表面形成薄层氧化膜，降低液相烧结时的润湿性，导致界面结合变弱，局部出现微孔或夹杂，进而降低断裂韧性并增加轧制开裂倾向。氧还会在高温下与钨反应生成挥发性氧化物，使钨颗粒表面粗糙，阻碍颗粒重排，影响最终致密度。碳的存在则更为复杂：微量碳可与钨形成细小碳化物，起到一定弥散强化作用，但过量碳会在晶界或界面偏聚，形成脆性 WC 或  $W_2C$ ，显著削弱界面强度，导致材料在受力时沿晶断裂倾向增加。氮在高温氢气气氛下通常被还原排出，但残留氮会与钨形成氮化物针状相，同样成为裂纹源。磷、硫等元素即使只有痕量，也极易在粘结相或界面富集，形成低熔点化合物，降低高温强度并诱发热脆现象。碱金属钾、钠以及钙、硅等主要来源于钨酸盐法

制备钨粉过程中的残留，它们在烧结时挥发或形成气孔，破坏组织连续性，严重时引起鼓泡或分层。

杂质对性能的影响还具有协同效应。例如，氧与磷共存时更容易形成磷酸盐玻璃相，包裹钨颗粒，阻碍溶解-再析出过程，使钨颗粒形状不规则，降低球化程度。高温服役时，杂质富集区往往成为氧化或腐蚀优先发生的区域，加速材料失效。在超薄片材生产中，杂质引起的微小缺陷会被放大，成为边缘裂纹或表面橘皮的起点。因此，现代钨合金片生产对原料纯度和过程洁净度提出了越来越高的要求，杂质控制已成为决定材料能否进入高端应用的关键环节之一。

### 3.3.4 钨合金片杂质元素的去除方法

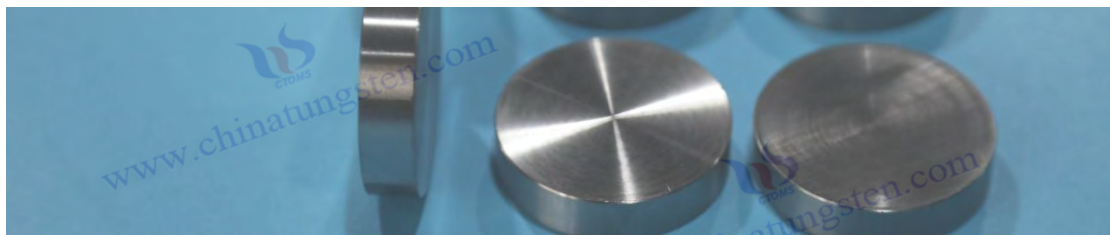
钨合金片杂质元素的去除贯穿从原料准备到成品热处理的整个工艺链，综合采用化学提纯、物理精制、气氛净化和后处理等多种手段，形成多级净化体系。

原料阶段的去除最为重要。钨粉通常采用高纯钨酸铵为前驱体，通过多次重结晶和深度氢还原工艺，将氧、碱金属、磷等杂质降至低水平。粘结相镍粉、铁粉、铜粉则选用羰基法或电解法制备，再经真空脱气进一步降低碳、氧、硫含量。混粉前，钨粉常进行二次氢气高温净化处理，利用氢气与氧化物的还原反应生成水蒸气排出，同时带走残余钾、钠等挥发性杂质。

烧结阶段是去除气体杂质和挥发性杂质的关键窗口。湿氢气氛（露点严格控制）可高效还原钨颗粒表面的氧化物并将水蒸气带出炉外；干氢或高真空烧结则用于去除氮气和残余碳氢化合物。为防止磷、硫等低熔点杂质挥发后再次冷凝，常采用分段升温制度，先在较低温度完成脱气，再快速升至液相烧结温度。炉料与坯体间的隔离垫板需选用高纯石墨或氧化铝，避免二次污染。

热加工与热处理阶段的去除主要依赖高真空或高纯流动氢气。热轧或温轧前的预热在真空炉中进行，可进一步挥发残余碱金属；冷轧后的多次中间退火同样在高真空条件下完成，使残留气体通过扩散逸出。超薄箔材生产中，还常增加一次专门的真空脱气退火工序，确保厚度方向无微孔。

后处理去除则针对表面或近表层杂质。化学酸洗可选择性溶解表层富氧、富磷层；电解抛光或等离子清洗能有效去除吸附的有机物和金属离子；真空热处理加钛吸气剂则可深度捕获残余氧、氮。部分高端片材还采用区熔精炼或电子束熔炼对坯料进行最终净化。



中钨智造钨合金片

#### 版权与法律责任声明



## 第四章 钨合金片的结构与性能关系

### 4.1 钨合金片的微观结构

钨合金片的微观结构通常呈现双相复合特征，以钨颗粒作为硬质相，被镍基或铜基粘结相包裹，形成类似金属陶瓷的组织形态。这种结构源于粉末冶金工艺，在烧结后经热机械加工进一步演变。钨颗粒多为近球形或多面体，尺寸分布影响结构均匀性。粘结相填充颗粒间隙，提供连续变形通道。缺陷如孔隙、位错在结构中不可避免，但可通过工艺控制最小化。微观结构还包括界面层，元素扩散形成的过渡区增强相间结合。观察方法如扫描电镜、透射电镜揭示结构细节，帮助分析性能起源。结构演变随加工阶段变化，烧结时颗粒球化，轧制时纤维化。

#### 4.1.1 晶粒结构与晶界化学组成

钨合金片的晶粒结构主要由钨相的体心立方晶体和粘结相的面心立方晶体构成，前者占据主体积，提供高硬度和密度基础，后者作为连续矩阵，改善整体塑性。钨晶粒在烧结过程中通过溶解-再析出机制逐渐球化，初始多棱形颗粒在液相作用下表面曲率趋于均匀，最终形成尺寸相对一致的聚集体。这种结构演变受粘结相润湿性的影响，良好润湿促进颗粒重排，减少接触角，形成低能晶界。晶粒尺寸通常受粉末粒度和烧结温度调控，细粉和高保温时间有利于小晶粒结构，提高强度但可能降低延性。轧制加工引入变形诱导再结晶，晶粒沿轧向拉长，形成纤维状纹理，进一步优化各向异性性能。

晶界化学组成在钨合金片中发挥关键作用，主要涉及钨-粘结相界面处的元素分布。界面往往富集少量钨原子，从粘结相中析出，形成薄层固溶区，增强结合强度。镍铁体系中，铁元素倾向于在晶界偏聚，调节电子密度，影响位错运动路径。铜体系则显示铜在界面的均匀分布，促进热导通道的连续性。微量杂质如氧、磷在晶界富集，可能形成化合物薄膜，改变界面能，需通过纯化工艺控制以避免脆化倾向。化学组成分析常用能谱或原子探针，揭示界面的梯度变化，这种梯度有助于应力缓冲，减少裂纹扩展。

进一步而言，晶粒结构的稳定性与晶界组成密切相关。高真空烧结可抑制氧在界面的氧化物形成，保持洁净界，提高高温服役可靠性。退火处理通过扩散调整组成，稀释偏聚元素，恢复结构平衡。晶界类型多样，大角度界易于元素迁移，小角度界则更稳定。加工参数如压下量影响界密度，高密度界可钉扎位错，提升硬度。环境暴露时，晶界组成决定腐蚀路径，钝化元素富集可形成保护膜。

#### 4.1.2 合金相的分布与化学状态

钨合金片中的合金相主要包括钨固溶相和粘结相固溶体，前者为钨晶粒内部有限溶解的合金元素，后者为镍基或铜基矩阵中溶入的钨原子。分布上，钨相呈离散颗粒状均匀嵌入粘结相中，形成复合网络，颗粒间距由粘结相体积比决定，较小间距有利于应力均匀传递。化学状态方面，钨相保持高纯状态，表面层可能存在薄氧化或固溶过渡区。粘结相化学状态更复杂，在镍铁体系中为  $\gamma$  相固溶体，铁原子取代部分镍位置，形成无序排列，状态稳定但随温度



变化可能析出有序相。铜体系类似，铜镍无限互溶，确保状态均匀，无相分离倾向。

相分布的优化依赖烧结动力学，液相阶段颗粒重排使分布趋于随机，避免聚团。热处理进一步匀化分布，扩散驱动下颗粒边界调整，减少局部密度差。化学状态受冷却速率影响，快冷锁定过饱和状态，慢冷促进析出，形成细小强化相。界面处化学状态特殊，元素梯度区存在，钨从颗粒向粘结相渐变，增强相容性。观察技术如 X 射线衍射确认状态，显示无有害化合物峰。分布不均可能导致性能梯度，需通过搅拌混粉控制初始均匀性。退火时，状态演变包括再结晶，晶体缺陷减少，提高导电性。

此外，相分布与状态的交互影响环境行为，均匀分布的粘结相提供连续保护，化学状态稳定则抵抗氧化。加工中，轧制拉伸分布，形成定向结构，状态保持但应变诱发位错积累。

#### 4.1.3 缺陷结构的化学成因分析

钨合金片缺陷结构主要包括点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷，其化学成因源于元素扩散不均、相间反应和杂质引入。点缺陷如空位、间隙原子，常由烧结时钨原子在粘结相中的溶解-析出产生，过饱和钨导致空位浓度升高。线缺陷即位错，成因与轧制变形相关，粘结相的固溶强化增加位错密度，化学上铁或铜原子钉扎位错，影响运动。面缺陷如晶界、相界，化学成因包括杂质偏聚，氧磷在界面积聚形成化合物，改变能态。体缺陷如孔隙、夹杂，由烧结不充分引起，气体残留或氧化物未排出导致。

分析中，缺陷成因还涉及热力学驱动，高温扩散促进空位迁移，低温冻结形成簇。杂质化学作用显著，碳氮形成间隙化合物，扩大缺陷体积。退火减少缺陷，通过扩散愈合空位，化学平衡下杂质重新分布。界面缺陷成因特殊，热膨胀差诱发微裂，元素梯度缓解应力。观察方法如电镜揭示成因，能量色散谱显示杂质关联。缺陷对性能的影响需控制，化学纯化降低成因强度。。

#### 4.2 钨合金片的性能及机理

钨合金片的性能及机理主要源于其复合结构的独特设计，通过钨相与粘结相的交互实现密度、导热、热稳定等多方面表现。性能机理涉及原子级堆积、电子传输和相间支撑等化学过程，例如高密度来源于钨原子的紧密排列，而导热导电则依赖自由电子的迁移路径。热稳定性机理则建立在相结构的热力学平衡上，界面结合抑制高温变形。机理分析帮助理解性能起源，如轧制工艺如何影响电子散射，从而调控导电性。环境因素下，机理还包括氧化行为，表面化学状态影响稳定性。

##### 4.2.1 钨合金片高密度的化学原子堆积原理

钨合金片高密度的化学原子堆积原理主要基于钨原子的高原子质量和体心立方晶体结构的紧凑排列，这种结构允许原子在有限空间内实现高效填充，而合金化过程进一步优化了堆积方式。通过粉末冶金工艺，钨粉末在烧结时经历颗粒重排，液相粘结相促进钨原子间的接近，形成致密网络。原子堆积的原理涉及范德华力和金属键的协同，钨原子半径较大，但晶格常

数适中，确保体心立方单元中原子间隙最小化。合金元素如镍、铁的加入不直接改变钨相的堆积，但通过固溶体形成调整整体体积，减少空位缺陷。

堆积原理还体现在相间交互上，粘结相原子填充钨颗粒间隙，类似于液体润湿固体表面，化学键合增强连接强度。烧结动力学中，表面能驱动原子迁移，钨原子表面原子向凹陷区扩散，实现平滑堆积。冷却时，热收缩进一步压缩原子间距，化学平衡下析出相辅助锁定结构。微观上，这种原理表现为钨晶格的有序性，置换固溶限制晶格膨胀，保持高填充因子。宏观性能中，高密度源于这种原子级紧凑，适用于需要质量集中的场合。

进一步分析，堆积原理受元素电负性的影响，钨与粘结相元素的电负差促进电子共享，形成稳定键网。界面处原子堆积特殊，梯度区存在，钨原子渐变融入粘结相，提高整体连贯性。工艺参数如温度梯度调控堆积过程，高温延长扩散时间，优化填充均匀性。杂质元素干扰原理，氧等形成化合物占用空间，需通过还原气氛排除。退火处理恢复堆积秩序，扩散愈合空隙。环境适应中，这种原理确保密度在温度变化下相对稳定，支持长期使用。

#### 4.2.2 钨合金片导热导电性的化学载体机制

钨合金片导热导电性的化学载体机制主要依赖自由电子和声子的传输，钨相提供高电子密度，而粘结相优化传输路径，形成复合载体系统。导电机制涉及金属键中的电子共享，钨原子外层电子易于脱离，形成电子气，合金化引入的镍或铜原子增加载子浓度。导热则通过声子振动传递能量，晶格振动在钨相中高效传播，粘结相缓冲散射。机制的化学基础在于价电子配置，钨的d电子层与粘结相的s-p电子杂化，增强载子迁移率。

载体机制还体现在相分布上，连续粘结相形成导电网络，减少界面电阻，化学状态稳定确保电子无阻流动。烧结过程优化机制，液相促进洁净界面，降低势垒。冷却析出相可能散射载子，但适量强化反而改善热导。微观上，机制涉及费米面形状，合金元素调整电子结构，影响载子有效质量。宏观性能中，这种机制支持热管理和电子应用，导热导电协调。

进一步而言，机制受缺陷化学的影响，位错或空位散射载子，需通过退火减少。杂质元素如氧形成陷阱，捕获电子，降低导率，纯化工艺缓解此效应。温度依赖性中，机制显示电子-声子耦合，高温增加散射，但钨相稳定性维持基本水平。表面化学状态影响机制，氧化层阻挡载子，镀层保护恢复性能。加工中，轧制诱发纹理，定向机制提升各向导电。环境因素下，腐蚀改变载体路径，钝化膜辅助维持。

#### 4.2.3 钨合金片热稳定性的化学结构支撑

钨合金片热稳定性的化学结构支撑主要源于双相结构的热力学平衡，钨相的高熔点提供骨架支撑，而粘结相的固溶体调节应力分布，抑制高温变形。结构支撑的化学原理涉及相间键合，金属键和共价成分混合，确保高温下键网不崩解。烧结形成的界面层通过元素扩散创建梯度结构，缓冲热膨胀差，维持整体完整性。冷却过程锁定支撑，析出相钉扎晶界，阻碍迁移。

支撑机制还体现在组织稳定性上，钨颗粒球化减少应力集中，粘结相均匀分布分散热载荷。

化学状态下，固溶强化提高相熔点，合金元素调整自由能，降低相变驱动力。微观上，支撑涉及原子振动和谐，声子模式在相间协调，避免局部软化。宏观性能中，这种支撑支持高温应用，稳定性在循环加热中体现。

进一步分析，机制受氧化化学的影响，表面形成保护膜，阻挡氧扩散，内部结构保持。杂质元素干扰支撑，磷等诱发脆相，高纯工艺排除。退火优化支撑，扩散调整组成，恢复平衡。温度梯度中，支撑显示渐变响应，低温区钨相主导，高温区粘结相辅助。加工历史影响机制，先前变形引入位错网，增强高温强度。环境暴露时，腐蚀测试支撑可靠性，化学惰性相延长寿命。

### 4.3 钨合金片的力学与化学性能关联

钨合金片的力学与化学性能关联主要体现在材料的微观结构如何通过化学键合和元素分布影响宏观行为，这种关联帮助理解硬度、耐磨性和耐腐蚀性等性能的起源。力学性能如强度和韧性往往源于晶格排列和相间交互，而化学性能如腐蚀抵抗则涉及表面反应和元素电化学行为，二者通过界面化学紧密联系。例如，钨相的硬质骨架提供力学支撑，粘结相的固溶体则调节化学稳定性，共同形成性能平衡。关联的机理包括原子级键强度的贡献，金属键在钨相中主导硬度，而共价成分在界面增强结合，影响变形阻力。烧结过程的化学反应塑造结构，液相促进元素扩散，形成梯度区，力学上减少应力集中，化学上提升抗氧化能力。

热处理环节进一步强化关联，退火通过扩散调整元素位置，优化力学塑性和化学惰性。环境因素下，关联表现为性能的协同响应，湿度或酸性介质可能同时削弱力学完整性和化学保护层。加工历史影响关联，轧制引入的位错网从力学角度提高强度，从化学角度改变电子分布，影响腐蚀电位。杂质元素的作用不可忽视，氧或磷的偏聚从化学上形成弱键区，力学上成为裂纹源，需通过纯化缓解。

#### 4.3.1 钨合金片硬度与化学键强度的关系

钨合金片硬度与化学键强度的关系建立在材料内部键合类型的多样性和强度分布上，这种关系反映了钨相与粘结相的交互如何共同贡献材料的抵抗变形能力。硬度作为力学指标，源于原子间相互作用的强度，化学键强度则通过键能和电子共享程度影响这一过程。在钨合金片中，钨相的体心立方结构以金属键为主，键强度较高，提供基础硬度，而粘结相的面心立方固溶体引入更多共价成分，调节整体键网。关系的核心在于界面处键的混合，钨原子与镍或铁的键合形成过渡区，键强度梯度分布，帮助缓冲外部载荷。

化学键强度的提升往往通过固溶强化实现，合金元素溶入晶格产生畸变，增加位错运动阻力，从而提高硬度。钨相内部，键强度依赖纯度，高纯状态下金属键均匀分布，硬度稳定；杂质介入时，键弱化，形成局部软区。粘结相中，镍铁互溶增强键强度，铁原子调整电子云密度，促进键的稳定性。烧结工艺影响这一关系，液相阶段键重组，冷却时析出相进一步强化键网，硬度随之变化。轧制加工的变形诱导键应变，化学上位错积累周围元素富集，提高局部硬度但需退火平衡。



关系延伸到温度依赖性，高温下键振动增强，硬度下降，但钨相的键强度维持相对稳定，支持热环境应用。表面化学键强度影响硬度测试，氧化层形成弱键，需镀层保护恢复。杂质如碳的加入可形成碳化物键，强度高但分布需均匀，避免脆化。环境因素下，湿度促进氢键介入，弱化表面键，间接降低硬度。

#### 4.3.2 钨合金片耐磨性的化学腐蚀抵抗机制

钨合金片耐磨性的化学腐蚀抵抗机制主要源于材料结构的复合设计和表面化学反应的协同，这种机制帮助材料在摩擦和介质作用下维持完整性。耐磨性作为力学表现，涉及表面硬度和韧性平衡，而化学腐蚀抵抗则通过钝化膜和元素电化学行为抑制侵蚀，二者交互形成保护体系。在钨合金片中，钨相提供耐磨骨架，粘结相调节化学活性，界面处元素分布优化抵抗机制。机制的核心在于摩擦过程中的化学转变，表面原子在应力下重排，形成氧化层或吸附膜，减少磨损速率。

腐蚀抵抗机制通过电化学钝化实现，镍或铜元素促进表面形成稳定氧化膜，阻挡介质渗透，同时力学上膜层附着依赖键强度。磨损环境中，机制涉及氧化磨损和腐蚀磨损的耦合，化学反应生成保护产物，力学上降低摩擦系数。烧结工艺塑造机制，液相促进均匀组织，减少腐蚀敏感区。轧制后表面纹理影响机制，化学上光滑表面减少介质滞留，力学上均匀分布应力。杂质元素干扰机制，磷硫富集诱发局部腐蚀，需纯化控制。

机制的温度依赖性显著，高温下氧化加速但钨相稳定性维持抵抗。镀层处理增强机制，化学镀镍形成额外屏障，耐磨性提升。环境介质如酸碱改变机制，钝化膜适应性决定长期表现。

#### 4.3.3 钨合金片耐腐蚀性的表面化学屏障作用

钨合金片耐腐蚀性的表面化学屏障作用主要基于氧化膜和吸附层的形成，这种作用通过阻挡介质与基体的接触维持材料稳定性。耐腐蚀性作为化学性能，源于表面元素的电化学行为，屏障作用则涉及多层结构的构建，力学上膜层需具备附着力以抵抗剥离。在钨合金片中，钨相表面易氧化形成  $WO_3$  层，但粘结相元素如镍促进复合膜生成，增强屏障效果。作用的原理在于热力学稳定，膜层自由能低，抑制进一步反应。

屏障作用的构建通过自钝化实现，初始氧化后膜层自愈，化学组成包括氧化镍或铜，力学上薄膜柔韧性避免开裂。烧结后表面状态影响作用，洁净表面利于均匀膜形成。轧制加工的表面粗糙度调控作用，化学上微纹理增加附着点。杂质元素如氧初始含量决定屏障质量，过高导致疏松膜。环境因素下，作用适应不同介质，酸性条件下膜层溶解重构。进一步而言，作用的温度影响显著，高温加速扩散但复合膜稳定性维持屏障。镀层技术扩展作用，真空镀铬形成额外层，提高综合抵抗。

#### 4.4 钨合金片的工艺-结构-性能关联性分析

钨合金片的工艺-结构-性能关联性分析主要聚焦于从制备过程到最终表现的逻辑链条，这种分析有助于理解如何通过工艺参数调控微观组织，从而影响宏观行为。工艺环节如烧结、轧



制和表面处理各自作用于不同尺度，烧结奠定初始结构，轧制进一步变形优化，表面处理则针对化学界面。结构作为中介，包括晶粒分布、相间结合和缺陷状态，这些要素通过化学键合和元素扩散与性能相连。性能涵盖力学、热学和化学方面，例如硬度源于晶格强度，耐腐蚀性依赖表面屏障。关联性体现为多级传导：工艺改变原子排列，结构调整键网，性能随之响应。分析框架强调反馈循环，性能测试结果反向指导工艺调整，确保材料在工业应用中的适应性。通过这种分析，钨合金片的设计变得更具系统性，支持其在精密领域的使用。

在实际分析中，关联性还涉及热力学与动力学的平衡，工艺温度影响扩散速率，结构稳定性决定性能持久性。元素配比在关联中扮演桥梁角色，钨含量高时结构致密，性能偏向高密度，但需工艺补偿塑性。环境因素纳入分析，湿度或温度变化考验关联的鲁棒性。杂质控制贯穿全程，化学纯化避免缺陷放大影响性能。

#### 4.4.1 烧结工艺对钨合金片微观结构的调控作用

烧结工艺对钨合金片微观结构的调控作用主要通过温度、气氛和时间等参数实现对相形成、颗粒演变和界面结合的控制，这种调控奠定了材料后续加工和性能的基础。在烧结过程中，粉末混合物经历固相扩散到液相出现的转变，钨颗粒在粘结相的润湿下重排位置，形成均匀分布的双相组织。温度调控是核心，高温阶段促进液相生成，粘结相元素如镍或铜融化后包裹钨颗粒，化学上降低表面能，推动颗粒球化。较低温度则用于固相烧结，避免液相过多导致的组织疏松。气氛环境影响调控，氢气还原氧化物，保持界面洁净，氮气或真空则抑制气体残留形成的孔隙。时间参数允许扩散充分进行，延长保温促进钨原子在粘结相中的有限溶解，后续冷却析出细小相，强化结构。

调控作用还体现在晶粒尺寸的调整，快速升温可保留细小颗粒，缓慢过程则允许长大，化学机制涉及奥斯特瓦尔德熟化，较大颗粒吞并小颗粒，实现尺寸均匀。相分布调控通过配比实现，粘结相比例增加时，结构趋于连续网络，提高连贯性。界面化学在烧结中逐步形成，元素梯度区出现，钨与镍的互扩散创建过渡层，增强结合。缺陷控制是调控重点，孔隙通过液相填充减少，位错在高温下恢复，化学上杂质挥发排出，避免偏聚。烧结后的结构为轧制提供基础，均匀组织易于变形而不裂。

调控作用延伸到热处理环节，烧结后退火进一步匀化结构，扩散调整元素位置，优化晶界组成。工艺参数的组合允许针对性调控，例如在追求细晶结构时，采用较低温度长时保温，化学上抑制晶界迁移。气氛纯度影响调控效果，高纯环境减少氧化夹杂，保持结构完整。杂质元素的处理在烧结中体现，磷硫等通过挥发去除，残留量低时结构稳定。环境适应性上，这种调控确保结构在温度变化下相对保持，适用于热循环场合。

#### 4.4.2 轧制工艺对钨合金片力学性能的影响机制

轧制工艺对钨合金片力学性能的影响机制主要通过变形诱导的结构变化实现对强度、韧性和硬度的调节，这种机制涉及位错积累、晶粒细化和相间协调等多层面交互。在轧制过程中，材料经历热轧或冷轧，钨相承受主要应力，粘结相辅助变形流动，化学上键网重构，位错密度增加，提高屈服强度。热轧阶段温度较高，动态恢复发生，机制中扩散促进晶体缺陷愈合，

避免过脆。冷轧则引入更多加工硬化，机制涉及滑移系激活，钨颗粒沿轧向拉长，形成纤维纹理，提升拉伸性能。

影响机制还体现在韧性调节上，多道次轧制伴随中间退火，化学扩散调整应力分布，减少残余应力导致的裂纹倾向。压下量控制机制关键，大压下诱发再结晶核，细化晶粒，提高强度与韧性平衡。相间机制中，粘结相作为缓冲层，吸收变形能量，化学键合强度决定协调效率。缺陷演变是机制部分，轧制生成位错墙，化学上元素偏聚钉扎，稳定结构。表面效果在机制中体现，轧制光洁度影响疲劳性能，化学上减少氧化起始点。

机制的温度依赖性显著，温轧结合热轧优点，机制中恢复与硬化并存，优化力学。工艺参数如轧速影响机制，快速减少恢复时间，硬度升高。杂质元素干扰机制，氧等诱发裂纹，需前期纯化缓解。退火环节强化机制，扩散恢复晶体完整，提高延伸率。环境因素下，机制确保性能在应力循环中稳定，支持长期使用。

#### 4.4.3 表面处理对钨合金片化学性能的优化路径

表面处理对钨合金片化学性能的优化路径主要通过镀层、氧化或化学改性等方式构建保护界面，这种路径提升了耐蚀、抗氧化和亲和性等化学行为。处理过程涉及表面清洁后沉积薄膜，化学上形成新相层，阻挡介质侵入。电镀路径常见，镍或金层通过电化学沉积，优化机制中离子还原生成致密膜，附着力依赖基体元素扩散。真空镀路径用于高温环境，蒸发镀铝形成氧化铝屏障，化学稳定性高。化学抛光路径去除表面缺陷，酸液作用下钨相微溶，平滑界面，提高化学惰性。

优化路径还包括复合处理，镀层后热扩散，化学键合增强，路径中元素互渗形成梯度区，改善结合。离子注入路径引入氮或碳，表面硬化同时优化化学，机制涉及原子嵌入晶格，改变电子结构，提高耐介质能力。阳极氧化路径生成氧化膜，电解条件下钨氧化物层自生，路径控制电压调节厚度，化学上膜层钝化基体。清洁预处理是路径基础，超声或等离子去除污染物，确保后续附着均匀。

路径的温度控制关键，低温处理保留基体结构，高温扩散优化界面。杂质影响路径，表面残留干扰膜形成，需多步清洗缓解。环境适应路径，针对酸碱介质选择特定镀层，化学相容性决定效果。退火后处理路径进一步稳定膜层，扩散均匀组成，提高长期化学性能。

#### 4.5 钨合金片在特殊环境下的结构与性能响应

钨合金片在特殊环境下的结构与性能响应主要反映了材料对外部条件的适应过程，这种响应涉及微观组织的演变和宏观行为的调整，帮助理解材料在高温、辐射或压力等条件下如何维持功能。结构响应包括晶粒变化、相间交互和缺陷动态，而性能响应则体现在力学、热学和化学方面的表现，例如高温下热稳定性，辐射下化学耐受性，压力下力学演化。响应机制源于化学键的弹性与相结构的平衡，钨相提供骨架支撑，粘结相调节缓冲。环境因素的叠加使响应复杂，温度升高可能诱发扩散，辐射影响电子结构，压力改变原子间距。关联分析强调多尺度视角，从原子级键重构到宏观性能衰减。工艺预处理如合金优化可提升响应能力，元

素配比调整帮助结构在环境中渐变稳定。

在实际响应中，结构与性能的互动形成反馈环路，初始结构决定响应起点，后续演变影响性能持久性。杂质元素的作用需考虑，氧等可能加速响应负面变化，通过纯化缓解。温度梯度或辐射剂量渐变时，响应显示非线性，早期稳定后期加速。压力响应涉及体积压缩，化学上键压缩增强强度。

#### 4.5.1 高温环境下钨合金片的结构稳定性变化

钨合金片在高温环境下的结构稳定性变化主要源于热激活的扩散过程和相间热膨胀的协调，这种变化影响材料的整体完整性和功能持续性。在高温条件下，钨相的体心立方晶格保持相对稳定，但粘结相的固溶体开始发生原子迁移，钨原子从颗粒边缘有限溶解进入粘结相，形成过饱和状态。随温度升高，这种溶解增强，颗粒表面曲率变化，导致小颗粒逐渐缩小，大颗粒轻微增长，结构趋于粗化。变化机制涉及界面化学，热能驱动元素扩散，镍或铜原子向钨相渗透，形成薄层固溶区，调节应力分布，避免界面分离。冷却时，过饱和钨析出细小相，钉扎晶界，部分恢复初始结构，但反复循环可能积累残余变化。

结构变化还体现在缺陷动态上，高温下位错爬升活跃，空位浓度增加，化学上杂质元素如氧在晶界富集，形成化合物薄膜，影响迁移速率。相分布渐变，粘结相体积可能轻微膨胀，但钨相的低膨胀系数缓冲整体变形。变化的程度取决于环境持续时间，短期暴露结构恢复较好，长期则可能出现再结晶核，形成新晶粒，优化稳定性。化学键在变化中重构，金属键在钨相中维持强度，共价成分在界面增强耐热性。退火处理可调控变化，控制冷却速率锁定有利结构，避免粗化过度。

进一步分析，变化的温度阈值与合金体系相关，镍铁体系在较高温度下显示渐进粗化，镍铜体系则因铜的热导性而均匀响应。杂质控制影响变化，磷等元素诱发局部软化，需前期纯化。环境湿度叠加时，水汽可能促进表面氧化，结构变化从外向内扩展，形成梯度区。力学响应与结构变化关联，高温蠕变下颗粒滑动，粘结相协调变形。热循环环境中，变化显示疲劳积累，晶界弱化需通过掺杂缓解。

#### 4.5.2 辐射环境下钨合金片的化学结构耐受性

钨合金片在辐射环境下的化学结构耐受性主要基于材料的复合组织对能量沉积的响应，这种耐受性帮助材料在射线或粒子作用下保持化学键网和相结构的完整。辐射如 X 射线或电子束撞击时，钨相的高原子序数吸收能量，产生级联位移，化学上原子键短暂断裂后重组，形成点缺陷簇。结构耐受机制涉及电子结构的调整，辐射诱发电子激发，钨原子外层电子跃迁，但快速弛豫恢复平衡。粘结相的固溶体缓冲冲击，镍或铜原子分布均匀，分散能量，避免局部破坏。界面化学在耐受中发挥作用，梯度区元素互渗增强键强度，辐射位移原子后自愈。

耐受性还体现在缺陷演变上，辐射生成空位-间隙对，化学扩散促进复合，减少积累。相分布保持稳定，钨颗粒屏蔽粘结相，降低辐射通量。变化的剂量依赖性显著，低剂量下结构微调，高剂量可能诱发肿胀，体积轻微变化但通过掺杂缓解。化学状态响应辐射，氧化物膜可



能形成，表面钝化增强耐受。退火处理辅助耐受，热能驱动缺陷迁移，恢复晶格秩序。

耐受性的合金体系差异明显，镍铁体系在磁场辐射下显示协调响应，镍铜体系则因导电性而均匀分布能量。杂质元素影响耐受，氧等捕获辐射产物，形成化合物，需纯化控制。环境组合如辐射加热时，耐受显示协同，热扩散加速缺陷愈合。力学关联中，辐射硬化提高强度，但需监控韧性变化。长期暴露下，耐受体现渐变，结构适应辐射场，支持持续功能。

#### 4.5.3 极端压力下钨合金片的性能演化规律

钨合金片在极端压力下的性能演化规律主要源于结构的压缩响应和相间协调的动态过程，这种规律影响材料的力学行为和化学稳定性，帮助理解高压条件下的适应机制。压力施加时，钨相的晶格压缩，原子间距缩小，化学键强度增强，提高硬度。演化规律涉及体积变化，材料整体收缩，但粘结相的延展性缓冲钨相的脆性倾向，避免碎裂。机制中，位错运动活跃，高压下滑移系激活，化学上元素分布调整，分散应力集中。界面作用关键，梯度区变形协调，防止分离。

性能演化还体现在韧性与强度的平衡，初始阶段强度升高，韧性渐变，压力释放后部分恢复。缺陷动态在规律中体现，空位压缩减少，位错墙形成，化学扩散促进稳定。相分布响应压力，钨颗粒更紧密排列，粘结相填充间隙，优化连贯性。演化的压力阈值与体系相关，镍铁体系显示渐进硬化，镍铜体系则因导热性而均匀响应。

规律的温度叠加效果显著，高压加热时扩散增强，演化加速但可通过冷却控制。杂质元素干扰规律，磷等诱发局部弱区，需纯化缓解。环境因素如压力循环下，演化显示疲劳，结构渐变需掺杂优化。化学性能关联中，高压下键压缩提升耐蚀性，表面屏障更致密。长期高压下，演化体现适应，性能趋于稳定，支持持续载荷。

#### 4.6 中钨智造钨合金片 MSDS

中钨智造钨合金片 MSDS 的编制基于 GB/T 16483-2008《化学品安全技术说明书 内容和项目顺序》等标准，结合产品具体成分如钨、镍、铁或铜的比例，详细描述物理化学特性、危害识别和应急响应措施。

钨合金的化学组成包括钨作为主要组分，占比主导，提供高密度和硬度基础，辅以镍、铁或铜作为粘结相，比例根据系列调整，如钨镍铁体系中镍铁比平衡润湿与强化。微量元素如碳、氧控制在低水平，避免脆化相形成。化学上，该部分使用 CAS 号标识元素，钨 CAS 7440-33-7，镍 CAS 7440-02-0。杂质披露包括磷、硫等潜在污染物，来源自原料，强调纯化工艺降低其含量。

成分信息还涉及合金相结构描述，双相复合中钨颗粒为体心立方，粘结相为面心立方固溶体，化学状态稳定无挥发组分。溶解度分析显示材料不溶于水。

#### 版权与法律责任声明



中钨智造科技有限公司  
高密度钨合金定制服务

中钨智造，30 年经验的高密度钨合金设计生产的定制专家。

核心优势

**30 年经验：**深谙钨合金生产，技术成熟。

**精准定制：**支持高密度（17-19 g/cm<sup>3</sup>）、特殊性能、结构复杂、超大和极小件设计生产。

**质量成本：**优化设计、最佳模具与加工模式，性价比卓越。

**先进能力：**先进的生产设备，RIM、ISO 9001 认证。

10 万+客户

涉及面广，涵盖航空航天、军工、医疗器械、能源工业、体育娱乐等领域。

服务承诺

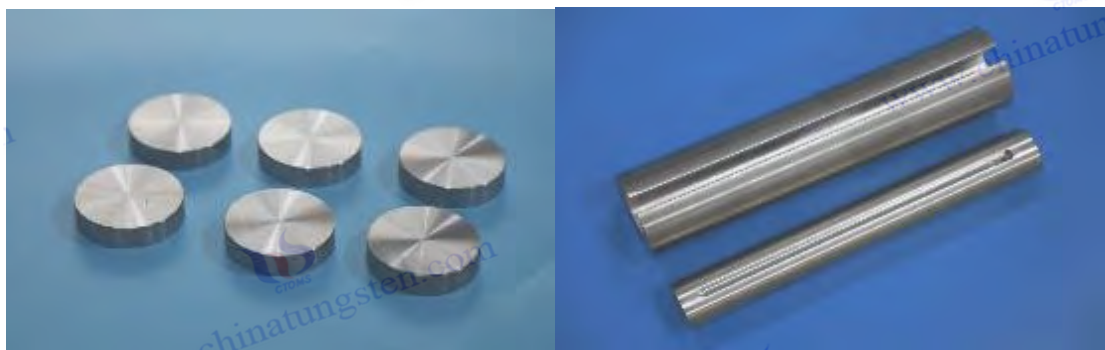
官网 10 亿+次访问、100 万+网页、10 万+客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



## 第五章 钨合金片的性能检测与表征方法

### 5.1 钨合金片的化学组成分析技术

钨合金片的化学组成分析技术主要针对其多元素复合特性，通过光谱、荧光和湿化学方法实现对主要元素如钨、镍、铁、铜以及微量杂质的定性和定量检测。这些技术在材料质量控制中发挥作用，帮助验证合金配比、纯度和均匀性。原子吸收光谱和发射光谱适用于溶解样品的元素测定，X 射线荧光光谱则提供非破坏性快速分析，化学滴定则针对特定微量元素。分析前样品准备包括切割、溶解或表面清洁，溶解常用硝酸氢氟酸混合以处理难熔钨相。技术选择取决于元素类型和含量，主要元素如钨占比高时适合荧光法，微量元素则需高灵敏光谱法。分析结果指导工艺调整，确保材料在工业应用中的可靠性。

这些技术还考虑矩阵效应，钨基体的高密度可能干扰信号，通过标准样品校正缓解。非破坏性方法如荧光光谱便于在线检测，破坏性方法如吸收光谱提供更高精度。杂质分析聚焦氧、碳、磷等，影响组织稳定性。技术结合使用形成完整体系，例如荧光初筛后光谱精测。环境因素下，分析需在洁净实验室进行，避免污染。

#### 5.1.1 钨合金片的原子吸收光谱与发射光谱分析

钨合金片的原子吸收光谱与发射光谱分析是溶解样品后常用的元素定量技术，前者基于原子对特征光的吸收，后者利用激发原子发射的特征谱线，二者结合可覆盖钨、镍、铁、铜等主要元素及微量杂质。原子吸收光谱（AAS）分析中，样品经酸溶解成溶液，雾化后进入火焰或石墨炉，元素原子吸收空心阴极灯发出的特征光，吸收强度与浓度相关，通过标准曲线计算含量。这种方法对钨合金片适用性强，尤其在测定低含量镍或铁时，化学上基态原子吸收机制确保选择性。样品准备需注意钨的难溶性，常用硝酸加氢氟酸混合溶解，避免氟离子干扰通过添加硼酸络合。火焰 AAS 适合较高含量元素，石墨炉 AAS 提升微量检测灵敏度。

发射光谱分析（OES）则将溶解样品引入等离子体或电弧激发，原子或离子发射特征谱线，通过光栅分光 and 检测器记录强度，实现多元素同时测定。钨合金片中，钨的高熔点要求高能量激发源如电感耦合等离子体（ICP-OES），化学上激发态跃迁提供丰富谱线信息。矩阵匹配校正必要，钨基体可能引起背景干扰，通过内标法或背景扣除优化。OES 的优势在于快速多元素分析，适用于生产批次验证。两种技术互补，AAS 对特定元素更精确，OES 覆盖广谱。

分析过程还涉及仪器校准，使用认证标准溶液建立曲线，钨合金片样品需均匀取样避免偏析。化学干扰如离子化在 OES 中通过添加抑制剂缓解。安全性考虑酸溶解需通风操作。结果表达通常为质量百分比，帮助评估合金体系如镍铁或镍铜的配比平衡。

#### 5.1.2 钨合金片的 X 射线荧光光谱成分定量方法

钨合金片的 X 射线荧光光谱（XRF）成分定量方法是一种非破坏性表面分析技术，利用 X 射线激发样品原子产生特征荧光，强度与元素含量相关，实现钨、镍、铁、铜等元素的快速测定。方法分为波长色散（WD-XRF）和能量色散（ED-XRF），前者分辨率高适合实验室精测，

后者便携适用于现场。样品准备简单，钨合金片表面抛光清洁即可，避免氧化层干扰，化学上特征 X 射线源于内层电子跃迁，确保元素特异性。激发源如 X 射线管产生初级射线，样品原子吸收后发射次级荧光，通过探测器收集。

定量分析基于基本参数法或经验校正法，前者计算矩阵效应，后者用标准样品建立曲线。钨合金片的高钨含量引起强吸收，需矩阵匹配标准缓解。WD-XRF 通过晶体分光精确分离谱线，适用于主要元素定量；ED-XRF 能量分辨虽低，但多元素同时检测高效。方法优势在于无损，保留样品完整，便于重复测定。深度分析限于表面数微米，适合均匀片材。

化学干扰如谱线重叠通过软件解谱解决，钨 L 线与镍 K 线可能叠加需算法校正。真空或氦气氛围提升轻元素检测，但钨合金片重元素为主大气下即可。手持 XRF 扩展应用到生产现场快速筛查。结果可靠性通过认证参考材料验证，偏差控制在可接受范围。安全性高，无化学试剂。

### 5.1.3 钨合金片微量元素的化学滴定分析

钨合金片微量元素的化学滴定分析是一种经典湿化学方法，通过溶解样品后与标准试剂反应，指示剂变色或电位变化确定终点，适用于特定微量杂质如磷、硫或某些金属离子。分析前样品需完全溶解，钨合金片常用硝酸氢氟酸混合加热处理，化学上钨形成可溶络合物，避免沉淀干扰。微量元素如磷常以磷钼蓝形式络合后滴定，或硫以沉淀形式分离后测定。滴定类型包括氧化还原、络合或酸碱，根据元素性质选择。

络合滴定常用 EDTA 作为滴定剂，测定镍或铁微量偏差，化学平衡控制反应进行。氧化还原滴定适用于硫或某些过渡元素，高锰酸钾或碘量法常见。指示剂选择关键，颜色变化清晰标记终点。样品体积和浓度需精确，微量分析放大误差，通过多次平行减少。化学分离预处理必要，如磷需从钨基体中提取，避免主元素干扰。

方法优势在于设备简单，成本低，适合实验室验证光谱结果。灵敏度通过放大反应提升，如分光光度辅助终点判断。安全性注意酸处理通风，避免氟化氢危害。

## 5.2 钨合金片的微观结构表征手段

钨合金片的微观结构表征手段主要包括电镜观察、光谱分析和衍射技术，这些手段从不同尺度揭示材料的晶粒分布、相组成和缺陷特征，帮助理解结构与性能的关联。扫描电镜用于表面形貌和成分分布，X 射线衍射分析物相和晶体结构，透射电镜则聚焦内部缺陷。表征前样品准备涉及切割、抛光和离子减薄，确保无污染。手段选择取决于研究焦点，表面分析优先扫描电镜，晶体信息用衍射，纳米级缺陷则需透射电镜。结合使用形成多维度表征，例如电镜与衍射联用确认相结构。手段的化学基础在于电子与物质交互，激发信号反映原子排列。环境控制如真空避免氧化。

### 5.2.1 钨合金片的扫描电镜形貌与成分映射

钨合金片的扫描电镜形貌与成分映射是表征微观结构的常用手段，通过电子束扫描样品表面



产生二次电子和背散射电子信号，揭示钨颗粒形态、粘结相分布和界面特征，同时能量色散谱实现元素空间分布的映射。这种手段的原理基于电子与原子间的相互作用，入射电子激发样品原子产生特征信号，二次电子反映表面形貌，背散射电子依赖原子序数差异，钨的高序数使颗粒亮度高于粘结相，便于区分。样品准备包括机械抛光后电解或离子抛光，表面需电镀碳或金以避免充电效应。成像过程在真空环境中进行，加速电压调整以平衡分辨率和穿透深度，低电压适合表面细节，高电压则深入观察。

形貌观察中，钨合金片的双相结构清晰显现，钨颗粒呈球形或多面体，粘结相填充间隙，形成连续网络，放大倍率可调节查看晶界裂纹或孔隙。化学成分映射利用 X 射线探测器收集特征峰，软件处理生成元素分布图，钨区域显示密集信号，镍或铁在粘结相富集，揭示偏析或梯度区。映射分辨率依赖探测器效率和扫描时间，长扫描提升信噪比。手段的优势在于直观结合形貌与化学信息，帮助分析烧结不均导致的结构缺陷。辅助模式如电子背散射衍射可进一步表征晶体取向，化学上晶界偏聚元素影响衍射花样。

进一步而言，这种手段在热处理后结构变化的跟踪中发挥作用，退火样品比较显示颗粒球化程度和相间结合改善。环境扫描模式允许湿样观察，但钨合金片通常干态分析。图像处理软件辅助量化颗粒尺寸分布和相体积分数，化学映射数据可叠加形貌图，提供复合视图。杂质元素如氧的映射揭示氧化夹杂位置，指导纯化工艺。手段的局限在于表面敏感性，需结合截面观察评估深度结构。总之，扫描电镜形貌与成分映射为钨合金片提供了综合微观表征途径，通过电子信号机制实现了结构化学的可视化，支持材料在精密应用中的质量评估。通过这种手段，结构异质性可有效识别，推动加工参数的优化调整。

### 5.2.2 钨合金片的 X 射线衍射物相与晶体结构分析

钨合金片的 X 射线衍射物相与晶体结构分析是一种非破坏性表征技术，利用 X 射线与晶体原子平面交互产生衍射峰，识别相组成并解析晶格参数，帮助理解合金体系的相平衡和结构稳定性。这种分析的原理基于布拉格定律，入射 X 射线被晶体反射，峰位对应平面间距，强度反映原子排列。样品可为片材整体或粉末，表面平整以避免散射干扰。Cu-K $\alpha$  射线常用源，探测器收集衍射信号，软件匹配标准卡片鉴定相，如钨的体心立方峰和粘结相的面心立方峰。物相分析中，钨合金片显示钨主峰强而尖锐，粘结相峰较弱，合金元素溶解引起峰位偏移，揭示固溶程度。

晶体结构解析涉及峰拟合计算晶格常数，钨相的 a 参数随温度变化轻微，粘结相则受铁或铜比例影响扩展或收缩。化学组成对衍射的影响体现在峰宽，晶粒细化导致展宽，再结晶样品峰窄化。定量相分析通过积分强度比估算体积分数，辅助理解烧结相形成。手段的优势在于批量样品快速扫描，实验室或便携设备均可操作。高级模式如原位加热衍射跟踪高温相变，化学上观察钨溶解行为。数据处理包括背景扣除和峰分离，复杂谱线需多峰拟合。

进一步而言，这种分析在轧制变形结构的评估中有效，纹理峰强度变化反映取向分布，化学上变形诱发应变影响峰移。杂质相如氧化物峰弱但可检测，指导纯化。环境控制真空或惰气避免氧化峰干扰。手段结合其他表征如电镜确认衍射结果。



### 5.2.3 钨合金片的透射电镜微观缺陷观察

钨合金片的透射电镜微观缺陷观察是高分辨表征手段，通过高能电子束穿透薄样品产生明场、暗场图像和衍射花样，揭示位错、空位、晶界和析出相等纳米级缺陷，帮助分析结构对性能的影响。这种观察的原理基于电子波与晶体交互，透射电子显示缺陷对比，电子衍射提供局部晶体信息。样品需离子减薄至数十纳米厚度，避免弯曲或污染。加速电压高以穿透钨的高密度，化学上电子散射依赖原子序数，钨相对比强于粘结相。缺陷观察中，位错线在明场像弯曲显示，化学位错核心元素偏聚影响迁移。

晶界观察揭示界面结构，高分辨像显示原子排列，化学上偏聚元素如硼在界面积聚，提升结合。析出相如细小钨颗粒在粘结相中点阵成像，观察其形状和分布。暗场像突出特定缺陷，衍射对比分析位错类型。手段的优势在于原子级分辨，结合能量过滤排除厚度效应。原位加热观察缺陷动态，化学上高温扩散愈合空位。数据处理包括图像滤波和模拟匹配，确认缺陷模型。

这种观察在轧制变形缺陷的跟踪中有效，冷加工样品显示高密度位错网，退火后减少。杂质诱发缺陷如针状化合物可成像，指导控制。环境真空高以避免碳污染。手段结合扫描透射模式映射元素，扩展缺陷化学信息。

### 5.3 钨合金片的性能指标检测规范

钨合金片的性能指标检测规范主要基于国家标准、行业标准和企业内部规范，涵盖密度、硬度、力学强度、导热导电等关键参数的测定方法，这些规范确保材料在工业应用中的一致性和可靠性。检测过程强调样品代表性、仪器校准和环境控制，如室温恒湿条件下操作。密度与致密度检测采用排水法或气体置换法，硬度则通过布氏、维氏或洛氏方法。规范还包括重复性要求，多点取样平均值以反映均匀性。化学组成影响性能检测，钨高含量时需考虑测量误差校正。检测报告需记录仪器型号、标准编号和偏差分析。国际参考如 ASTM 标准，国内则以 GB/T 或 YB/T 系列为主。规范的制定考虑材料的高密度特性，避免常规方法偏差。

#### 5.3.1 钨合金片密度与致密度的检测方法

钨合金片密度与致密度的检测方法主要采用阿基米德排水法和气体置换法，前者适用于常规实验室，后者适合高精度或不宜浸液样品，这种方法基于体积置换原理计算材料密度，并通过与理论密度的比较评估致密度。排水法中，样品先干燥称干重，然后浸入蒸馏水或乙醇中称湿重，化学上液体选择需不与合金反应，避免表面溶解。计算公式考虑液体密度和温度校正，确保测量准确。样品形状规则时直接测量体积，不规则片材则用细线悬挂浸没。多次测量取平均，减少气泡附着干扰。

气体置换法使用氦气或氮气，样品置于已知体积容器，气体压力变化反映样品体积，化学上惰性气体避免氧化。方法优势在于干态操作，适合薄片或易氧化表面。致密度计算需理论密度参考，基于成分加权平均，钨占比主导时理论值接近纯钨。检测规范要求样品清洁，无油污或氧化皮，表面抛光后测量。环境温度控制在标准室温，湿度低以防吸附水影响。

#### 版权与法律责任声明

这种方法在生产批次验证中广泛应用，多点取样评估均匀性，偏差大时追溯烧结工艺。化学纯度影响结果，杂质孔隙降低实测密度。仪器校准用标准块，定期验证。薄片检测时需叠加或折叠避免弯曲误差。结果表达为克每立方厘米，致密度百分比。规范强调安全，排水法注意液体挥发，气体法检查密封。

### 5.3.2 钨合金片硬度的检测方法

钨合金片硬度的检测方法主要包括布氏硬度、维氏硬度和洛氏硬度测试，根据材料厚度和预期值选择，前者适合整体硬度，后两者用于表面或薄片，这种方法基于压痕大小或深度评估抵抗塑性变形的能力。布氏硬度测试使用钢球或硬质合金球压头，在规定载荷下压入样品表面，保持时间后卸载，测量压痕直径计算硬度值。化学上压头材料需耐磨，避免钨相刮伤。样品表面抛光平整，厚度足够以防背面变形。载荷选择考虑合金高硬度，通常较高以产生清晰压痕。

维氏硬度测试采用金刚石四棱锥压头，载荷范围宽，适合微区测量，压痕对角线显微镜下测量，化学上金刚石惰性确保精度。薄片检测时低载荷避免贯穿。洛氏硬度快速，预载后主载，深度差直接读数，HRA 或 HRC 标尺适用于钨合金片。规范要求多点测试，网格分布平均值，评估均匀性。环境振动控制，仪器水平放置。

这种方法在热处理后性能跟踪中有效，退火样品硬度下降显示恢复。化学组成影响结果，粘结相比例高时硬度降低。表面处理如镀层需去除前测量基体。仪器校准用标准块，定期验证。薄片弯曲固定测试，避免边缘效应。结果表达为 HB、HV 或 HR 单位，附带载荷注明。规范强调安全，压头防护避免碎裂。

### 5.3.3 钨合金片耐腐蚀的检测方法

钨合金片耐腐蚀的检测方法主要包括浸泡试验、电化学测试和盐雾试验，这些方法模拟不同腐蚀环境，评估材料在酸、碱、盐介质中的抵抗能力，帮助优化表面保护和成分设计。浸泡试验是最基础方法，将样品置于指定腐蚀介质中，定期观察重量变化、表面形态和溶液成分，化学上介质选择如硫酸、盐酸或氯化钠溶液，温度和时间根据标准设定。试验后清洗样品，称量失重计算腐蚀速率，表面金相观察记录点蚀或均匀腐蚀特征。方法优势在于简单直观，适用于长期腐蚀行为研究。

电化学测试提供动态腐蚀信息，主要采用极化曲线和阻抗谱分析。样品作为工作电极，在三电极体系中浸入电解质，扫描电位记录电流变化，化学上塔菲尔外推法计算腐蚀电流密度，自腐蚀电位反映热力学稳定性。交流阻抗谱测量界面电阻和电容，拟合等效电路模型评估钝化膜保护效果。钨合金片中粘结相活性较高，测试需注意参比电极稳定。盐雾试验模拟海洋环境，中性盐雾箱内喷雾氯化钠溶液，周期观察表面锈斑或点蚀，化学上氯离子渗透诱发局部腐蚀，评级标准基于腐蚀面积。

检测规范要求样品表面状态一致，抛光或镀层后测试需注明。环境控制如温度湿度恒定，避免外部干扰。多次平行试验取平均，统计腐蚀深度或速率。化学分析腐蚀产物，X 射线衍射

鉴定氧化物相。方法结合使用，浸泡定性、电化学定量、盐雾加速。安全性注意酸雾通风，废液中和处理。

#### 5.3.4 钨合金片耐磨的检测方法

钨合金片耐磨的检测方法主要包括销盘磨损试验、砂轮磨损试验和往复摩擦试验，这些方法模拟干摩擦或润滑条件下的磨损行为，评估材料在接触应力下的体积损失和摩擦系数，帮助优化硬度和表面处理。销盘磨损试验中，样品固定作为盘，对磨销施加载荷旋转，化学上摩擦热诱发氧化磨损，记录重量损失或磨痕深度计算磨损率。载荷和转速可调，模拟不同工况，干摩擦突出粘着磨损，润滑下考察磨粒作用。

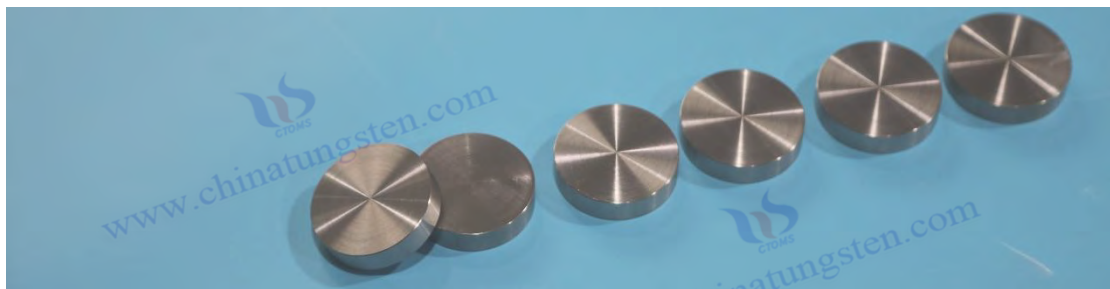
砂轮磨损试验使用标准砂轮对样品表面磨削，测量单位时间失重，化学上磨粒嵌入诱发切削磨损，适用于高硬度钨合金片。试验规范控制砂轮粒度和压力，确保重复性。往复摩擦试验模拟线性运动，球或销在样品上往复滑动，传感器实时记录摩擦力，计算平均系数，化学上表面疲劳导致剥落，观察磨痕显微结构分析机制。激光共焦或轮廓仪量化磨痕体积。

检测规范要求样品表面抛光一致，多方向测试评估各向异性。环境可控，如湿度影响氧化磨损。化学清洗去除磨屑，称重精度高。辅助观察扫描电镜分析磨损表面，能量谱鉴定转移膜。方法结合，销盘定量体积损失，往复动态系数。安全性注意粉尘收集，避免吸入。

#### 5.3.5 钨合金片强度的检测方法

钨合金片强度的检测方法主要包括拉伸试验、弯曲试验和压缩试验，这些方法测量材料的抗拉强度、屈服强度和断裂行为，帮助评估力学可靠性和加工适应性。拉伸试验是最常用方法，样品加工成标准哑铃形或矩形条，在万能材料试验机上单轴拉伸，记录载荷-位移曲线，化学上位错滑移主导塑性变形，计算抗拉强度和延伸率。薄片检测时采用非接触引伸计，避免夹持损伤。应变速率控制缓慢，以捕获准静态行为。

弯曲试验适用于薄片，三点或四点弯曲加载，测量弯曲强度和挠度，化学上表面压缩、内层拉伸协调，评估层间结合。压缩试验针对厚片或块体，短柱样品轴向压缩，记录应力-应变，钨合金片高密度下显示有限塑性。试验规范要求样品尺寸比例标准，表面无缺陷。环境温度可调，考察高温强度衰减。检测过程实时监测裂纹扩展，声发射辅助。化学分析断口，扫描电镜观察韧窝或解理特征，区分断裂模式。



中钨智造钨合金片



## 第六章 钨合金片的制备工艺

### 6.1 钨合金片制备流程与分类

钨合金片制备流程与分类主要围绕粉末冶金基础路线展开，这种流程从原料粉末到成品片材涉及多个单元操作，包括混粉、压制、烧结、热机械加工和后处理。分类依据包括合金体系、目标性能和厚度规格，主要制备路线以液相烧结为核心，辅以固相或活化烧结变体。流程设计考虑钨的难熔性和高密度特性，确保致密化和组织均匀。典型流程开始于高纯钨粉与粘结相粉末的均匀混合，随后冷等静压成型坯料，高温烧结实现颗粒重排和结合，之后通过热轧、温轧、冷轧逐步减薄，中间退火释放应力，最终表面精整。分类上，高密度片材强调钨含量和致密度，非高密度则可能引入伪合金或复合结构。厚度范围影响工艺选择，薄片需精密轧制，厚片则侧重开坯。

制备流程的灵活性允许根据应用调整，例如医疗屏蔽片注重均匀性，工业耐磨片强调硬质相强化。化学原理贯穿全程，烧结阶段液相润湿驱动致密化，加工阶段变形协调依赖粘结相塑性。环境控制如氢气气氛防止氧化，纯度管理避免杂质引入缺陷。流程优化近年来融入热等静压和放电等离子烧结，提升初始坯料质量，减少后续加工难度。分类还可按烧结方式分为传统氢气炉烧结和真空烧结，前者成本低，后者杂质控制优。

#### 6.1.1 钨合金片的主要制备路线

钨合金片的主要制备路线以粉末冶金为主，分为传统液相烧结路线、活化烧结路线和熔渗复合路线三种，这些路线根据合金体系和性能目标选择，确保从粉末到片材的完整转化。传统液相烧结路线是最成熟路径，首先将钨粉与镍、铁或铜粉按比例机械混合或球磨均匀，冷等静压成型大尺寸坯料，随后在氢气保护下升温至液相出现温度以上保温，促进粘结相熔化润湿钨颗粒，实现重排和溶解-再析出致密化。烧结后坯料经高温锻造或热轧开坯，逐步减薄至中间厚度，再转入温轧和冷轧，伴随多次真空退火消除应力，最终酸洗或抛光成片。

活化烧结路线针对难致密体系，在粉末中预加少量钼、镍等激活剂，降低烧结温度，促进固相扩散，化学上激活剂在界面偏聚降低表面能，适用于钨铜或高钨含量片材。路线优势在于能耗低，组织细化，但激活剂残留需后续处理。熔渗复合路线则先压制烧结多孔钨骨架，再真空熔渗铜或银液，化学上液态金属填充孔隙，形成伪合金结构，后续轧制易于超薄化，适合导热导电片材。

路线选择考虑规模化和成本，传统路线适用于镍铁、镍铜体系的大批量生产，熔渗路线则针对钨铜系列。辅助工艺如热等静压可嵌入任何路线，提升初始致密度，减少轧制裂纹。化学控制贯穿路线，气氛露点管理防止氧化，粉末粒度匹配影响混合均匀。表面处理如化学镀融入路线末端，提升耐蚀性。环境因素下，回收边角料重新粉化循环使用。

#### 6.1.2 高密度钨合金片与非高密度片的工艺差异

高密度钨合金片与非高密度片的工艺差异主要体现在成分设计、烧结参数和加工路径上，前

者追求钨含量和致密度最大化，后者则侧重特定功能如导热或低密度平衡。高密度片材钨含量通常较高，粘结相比比例低，工艺上采用延长液相保温和二次热等静压，确保孔隙最小化，化学上减少软质相体积以逼近理论密度。烧结温度精确控制在液相适量区间，避免过度流动导致塌陷。加工路径强调大压下量热轧开坯，配合严格中间退火，保持组织均匀，成品厚度均匀性高。

非高密度片材如钨铜伪合金，钨含量可降低，工艺转向熔渗法，先烧结钨骨架留有意孔隙，再渗铜填充，化学上铜相不形成固溶体，提供高导热通道。烧结温度较低，加工路径更注重冷轧适应性，因铜塑性好，易于超薄化而无需频繁退火。活化烧结变体在非高密度片中常见，添加剂促进低温致密，适用于钨银或复合体系。差异还体现在表面处理，高密度片常镀镍保护粘结相，非高密度则直接利用铜的耐腐蚀性。

工艺差异影响能耗和产量，高密度路线设备要求高，周期长，但性能稳定；非高密度路线灵活，适合小批量功能片。化学纯度管理在高密度中更严，杂质易放大孔隙。环境控制上，高密度需高纯氢气，非高密度真空熔渗防氧化。

### 6.1.3 典型厚度范围与对应工艺选择（0.05 mm~50 mm）

钨合金片典型厚度范围从 0.05 mm 超薄箔到 50 mm 厚板，对应工艺选择需平衡加工难度和组织控制，薄片强调精密轧制，厚片侧重开坯和锻造。0.05 mm~0.5 mm 超薄范围工艺以多道次冷轧为主，总加工率高，化学上粘结相比比例稍增以提升延展性，避免边缘裂纹。中间退火在高真空下频繁进行，释放应力，配合润滑剂减少表面损伤，最终化学抛光或电解精整表面光洁。

0.5 mm~10 mm 常规厚度范围工艺最成熟，从热轧开坯到冷轧精整，热轧道次压下量大，温轧过渡，退火制度优化组织纤维化。10 mm~50 mm 厚板范围工艺聚焦初始成型，大尺寸冷等静压坯料后热锻或热轧减薄，化学上高温保护气氛防止脱碳，加工率较低以保留强度，表面多采用铣削去除氧化层。

工艺选择考虑设备能力，薄片需高精度轧机和张力控制，厚片则大型锻压机。化学原理在厚度影响下体现，薄片散热快，冷加工硬化显著；厚片热效应积累，需控制温度梯度。均匀性管理随厚度增加难度，厚片多点检测密度。环境因素下，薄片易氧化需惰气包装。

## 6.2 原料粉末制备

原料粉末制备是钨合金片生产的基础环节，直接影响烧结组织均匀性、致密度和最终性能，这种制备涉及钨粉的还原纯化、合金元素粉末的选择预处理以及混合均匀化。钨粉作为主体原料需高纯度和合适粒度，以确保液相烧结时的润湿和重排。合金元素粉末如镍、铁、铜等提供粘结相，需与钨粉匹配粒度和活性。制备过程强调化学纯度和物理特性控制，避免杂质引入脆性相或孔隙。典型流程从钨酸铵氢还原开始，逐步到合金粉末雾化或羰基分解，再通过筛分和混合实现配料均匀。粒度分布和 Fisher 子筛法检测是关键质量控制点，确保粉末流动性和压制性能。

制备的化学原理在于还原反应和表面能调控，高纯氢气还原去除氧，合金粉末预处理防止氧化。现代工艺引入喷雾干燥或机械合金化，提升混合效率和组织细化。环境因素下，粉末储存需干燥惰气，避免吸潮。原料质量直接关联成品厚度均匀性和缺陷率，细粉利于薄片生产，粗粉适合厚板。

### 6.2.1 高纯钨粉的制备与质量要求

高纯钨粉的制备主要采用氢还原钨酸铵或钨氧化物路线，这种路线通过多级还原实现钨的高纯化和粒度控制，确保粉末在合金片烧结中的活性与洁净度。制备过程从钨酸铵溶解重结晶纯化开始，煅烧成黄钨或蓝钨氧化物，随后在管式炉或推舟炉中分级氢还原，第一级低温还原去除结晶水和部分氧，第二级高温还原成金属钨粉。化学上，还原反应为  $WO_3$  与  $H_2$  生成  $W$  和  $H_2O$ ，水汽通过露点控制及时排出，避免钨粉再氧化。工艺参数如舟速、氢流量和温度梯度调控粉末粒度，较低温度和慢速利于细粉生成。

质量要求聚焦纯度、粒度和形态，纯度需氧含量低，碱金属和磷硫痕量，以防烧结缺陷。粒度通常 Fisher 法测定，细粉有利于致密化，粗粉提供强度。形态要求近球形或多面体，表面洁净无团聚，便于混合流动。检测包括化学分析杂质、扫描电镜观察形态和激光粒度仪分布。制备中，原料钨酸铵多次重结晶去除钠钙，氢气高纯干燥。变体工艺如等离子体还原或锌熔法回收钨，进一步提升纯度。

这种制备的质量要求与合金片应用关联，医疗屏蔽片需极低杂质避免辐射散射，工业耐磨片允许稍粗粒度增强硬度。储存要求真空或惰气包装，防潮氧化。化学稳定性是要求核心，粉末在空气中易钝化形成薄氧化层，影响润湿，需预还原激活。

### 6.2.2 合金元素粉末（Ni、Fe、Cu、Co、Mo 等）的选择与预处理

合金元素粉末如镍、铁、铜、钴、钼的选择与预处理是钨合金片配料的关键，元素选择基于相图润湿性和功能匹配，预处理确保粉末活性与纯度，避免烧结不均。镍粉常用羰基分解法制备，粒度细小活性高，提供良好延展性；铁粉电解或还原铁粉，磁性适中辅助混合；铜粉雾化或电解，导热优异用于无磁体系；钴粉强化粘结相强度；钼粉部分替代钨调节膨胀。选择标准包括纯度高、氧低、粒度与钨粉匹配，通常 Fisher 粒径相近以防偏析。

预处理包括氢气还原去除表面氧化层，化学上  $H_2$  与氧化物反应生成水排出，提升润湿角。真空脱气进一步降低气体杂质，筛分去除团聚和异物。球磨或机械活化预合金化部分元素，如预混镍铁形成固溶粉，提高均匀性。处理温度控制温和，避免粉末烧结。化学清洗如酸洗去除油污，但钨合金粉末多干法处理防腐蚀。

进一步而言，选择与预处理的差异体现体系需求，镍铁体系铁粉需防锈，镍铜体系铜粉抗氧化强。钼粉选择高纯雾化以匹配钨密度。质量检测包括化学分析氧碳和粒度分布。储存干燥密封，防潮吸氧。总之，这种选择与预处理体现了合金元素在钨粉中的协调作用，通过表面化学优化实现了混合相容性，支持烧结双相结构的形成。通过针对性处理，粉末质量稳定性得到保障，推动钨合金片性能的可靠实现。



### 6.2.3 粉末粒度分布控制与 Fisher 粒度检测

粉末粒度分布控制与 Fisher 粒度检测是钨合金片原料制备的质量核心，通过调控还原参数和筛分实现分布优化，Fisher 法提供平均粒径评估，确保压制和烧结性能。粒度分布控制在钨粉还原中体现，温度高舟速快生成粗粉，低温慢速细粉，化学上还原动力学影响晶核长大，氢流量调节水汽浓度抑制异常粗化。合金粉末雾化或研磨控制分布窄化，避免极细粉导致团聚或粗粉引起孔隙。激光粒度仪或筛分法监测分布曲线，理想为对数正态，宽分布利于填充窄化致密。

Fisher 粒度检测基于空气渗透原理，粉末层阻力反映平均粒径，化学上表面吸附气体影响渗透，但标准条件下重复性好。检测样品干燥均匀装填，压力差计算筛径。方法简单快速，适用于生产控制，钨粉典型范围覆盖细到粗以匹配厚度需求。控制结合混合调整，细钨粉配粗合金粉优化流动。

这种控制与检测关联成品均匀性，窄分布利于薄片无缺陷，宽分布厚片高强度。化学纯度影响检测，氧高粉末团聚偏大读数。环境湿度控制样品防吸水。

### 6.2.4 粉末混合与合金化方法

粉末混合与合金化方法是钨合金片配料的均匀化步骤，通过机械混合、球磨或喷雾干燥实现元素分布一致，避免烧结偏析。机械混合常用 V 型或双锥混粉机，低速转动防止分离，化学上粉末表面静电或范德华力影响均匀，添加剂如酒精辅助分散。时间延长至数小时，确保随机混合。球磨合金化高能球磨，撞击诱发机械化学反应，部分元素预合金化，细化粒度提升活性，但需惰气保护防氧化。

喷雾干燥方法将粉末悬浮液雾化干燥成球形颗粒，化学上粘结剂临时结合，提高流动性和压制性。方法优势在于复合粉均匀，适用于大批量。混合后取样化学分析或电镜验证分布，均匀标准为元素偏差低。

这种方法差异体现生产规模，机械混合简单成本低，球磨适合细化组织，喷雾干燥高端均匀。化学原理涉及扩散与吸附，混合促进表面接触。储存防分离，振动避免。

## 6.3 粉末成型工艺

粉末成型工艺是钨合金片生产中连接原料粉末与烧结坯料的关键步骤，通过施加压力或辅助介质将松散粉末转化为具有一定形状、强度和密度的生坯，这种工艺直接影响后续烧结的收缩均匀性和成品组织一致性。成型方法包括冷等静压、模压、注射成型等，选择依据粉末特性、坯料尺寸和厚度目标。钨合金粉末流动性和压缩性较差，成型需考虑钨的高密度和粘结相的润湿作用。工艺原理涉及颗粒重排、塑性变形和摩擦效应，压力分布均匀性决定生坯密度梯度。生坯强度需足够支撑搬运和脱脂，避免裂纹或变形。化学添加剂如石蜡或聚合物临时增强结合，后续脱除。

成型工艺的优化近年来注重绿色化和自动化，冷等静压适用于大尺寸坯料，模压适合中小件，注射成型扩展到复杂形状薄坯。环境控制如干燥氛围防止粉末氧化，压力释放缓慢避免回弹。成型后生坯密度通常为理论值的一定比例，通过优化可减少烧结收缩差异。缺陷控制聚焦层裂和密度不均，工艺参数调整缓解。

### 6.3.1 冷等静压成型

冷等静压成型是钨合金片坯料制备的方法，通过液体介质传递均匀压力，将粉末装入柔性模具中压缩成高密度生坯，这种方法适合大尺寸或复杂形状坯料，确保压力各向同性。工艺过程先将混合粉末填充橡胶或塑料模具，密封后置入高压容器，水或油作为传压介质，压力逐步升高至所需水平，保持一段时间后卸压取出。化学上，均匀压力促进颗粒紧密重排，减少摩擦引起的密度梯度，钨粉的高硬度在等静压下有效填充间隙，粘结相粉末辅助变形协调。

成型优势在于生坯密度分布均匀，适合后续轧制薄片，避免模压常见的边缘低密度区。模具设计灵活，可制备圆柱、板状或异形坯，化学添加少量润滑剂改善填充流动。压力释放控制缓慢，防止弹性回弹导致微裂。生坯强度通过粉末粒度匹配提升，细粉填充性好但需防团聚。工艺参数优化涉及升压速率和保压时间，长保压促进颗粒锁定。

这种成型在高密度钨合金片生产中应用广泛，大坯料经冷等静压后热轧开坯效率高。化学纯度管理关键，介质洁净避免污染。脱模后生坯表面光滑，减少后续加工余量。变体如干袋法简化操作，湿袋法灵活性强。环境因素下，回收模具材料降低成本。

### 6.3.2 模压成型与压力参数优化

模压成型与压力参数优化是钨合金片中小尺寸坯料的传统方法，通过钢模单向或双向加压将粉末压缩成形，这种方法设备简单，适合批量生产，优化重点在于压力分布和脱模顺畅。工艺过程将粉末填充硬质模具，液压机施加压力，颗粒在模壁摩擦下重排变形，形成生坯。化学上，钨粉压缩性有限，添加临时粘结剂如石蜡增强颗粒间结合，提高生坯强度。单向压需润滑模壁减少摩擦，双向压改善密度均匀。

压力参数优化涉及载荷大小、加压速度和保压时间，高压提升密度但易层裂，低压则孔隙多。优化通过试验确定，逐步加压避免应力集中。脱模剂如硬脂酸锌化学涂层降低摩擦，防止粘模。生坯密度梯度通过浮动模或多冲头设计缓解。

这种成型在常规厚度钨合金片坯料中常见，小坯后续锻造或轧制。化学添加剂比例优化平衡强度与脱脂干净。压力释放控制渐进，减少回弹裂纹。变体如温模压提升流动，但钨合金多室温操作。环境控制干燥粉末防吸潮。

### 6.3.3 注射成型在薄片坯料中的应用

注射成型在薄片坯料中的应用是将钨合金粉末与有机粘结剂混合成喂料，高压注入模具成形复杂或薄壁生坯，这种方法扩展了粉末冶金形状自由度，适合精密薄片预成形。工艺过程

首先制备喂料，粉末与蜡基或聚合物粘结剂高温混炼，化学上粘结剂包裹颗粒提高流动性。喂料颗粒化后注入加热模具，压力推动填充腔体，冷却固化脱模。化学脱脂去除粘结剂，溶剂或热脱脂分解有机物，留下多孔坯后烧结致密。

应用优势在于近净成形，薄片坯料厚度均匀，表面光滑减少加工。钨高装载量喂料需优化粘度，避免分离。注射参数如温度压力匹配粉末特性，模具设计精密控制壁厚。

这种应用在超薄钨合金片预坯中潜力大，复杂形状如带孔片成形。化学粘结剂选择低残碳，避免碳化物脆化。脱脂缓慢防止鼓泡裂纹。后续烧结收缩可控。环境回收粘结剂降低污染。

#### 6.3.4 生坯强度提升与脱脂工艺

生坯强度提升与脱脂工艺是成型后处理的关键，生坯强度通过添加剂或预烧结提高，脱脂去除临时粘结剂，确保后续烧结无缺陷。强度提升方法包括增加粘结剂比例或低温预烧结，化学上粘结剂桥联颗粒，预烧结轻微扩散形成颈部结合。模压生坯强度依赖压力，注射成型喂料固有强度高。

脱脂工艺分为溶剂脱脂和热脱脂，前者浸泡有机溶剂溶出蜡基，后者加热分解聚合物，化学上控制升温速率防止快速气化鼓泡。组合脱脂先溶剂后热，效率高残留低。工艺参数优化避免裂纹，支撑材料辅助大坯。这种工艺在注射成型坯料中突出，脱脂干净影响烧结纯度。强度提升与脱脂平衡，过强结合难脱脂。化学分析残碳监控脱脂效果。环境废气处理回收溶剂。

#### 6.4 烧结工艺

烧结工艺是钨合金片制备的核心阶段，通过高温处理将成型生坯转化为高密度块体，消除孔隙并形成稳定的双相组织，这种工艺直接决定材料的致密度、相分布和界面结合强度。烧结方法包括氢气气氛垂直烧结、真空烧结以及烧结-热等静压一体工艺，氢气烧结适用于传统液相体系，真空烧结注重杂质控制，一体工艺则提升复杂坯料质量。工艺原理涉及固相扩散、液相重排和溶解-再析出机制，钨颗粒在粘结相润湿下球化，界面化学键合增强。温度、气氛和保温参数需精确匹配合金体系，避免过烧粗化或欠烧孔隙。

烧结的优化近年来融入连续炉和智能控制，提升均匀性和能效。化学气氛作用显著，氢气还原氧化物，真空排出挥发杂质。坯料装炉方式影响温度场，垂直悬挂或舟装减少变形。冷却速率调控析出相，慢冷促进均匀。缺陷预防聚焦鼓泡和开裂，通过预脱气和梯度升温缓解。

##### 6.4.1 氢气气氛垂直烧结技术

氢气气氛垂直烧结技术是钨合金片坯料致密化的经典方法，在钼舟或悬挂状态下于氢气保护炉中加热，实现液相烧结和杂质还原，这种技术适合镍铁、镍铜体系的大批量生产。工艺过程将生坯垂直放置或舟装，氢气连续流动，升温至液相出现温度以上保温，还原反应去除表面氧化物，水汽随气流排出。化学上，氢气与氧反应生成水，保持坯料洁净，促进粘结相润湿钨颗粒，重排致密。垂直方式减少坯料与舟接触，避免粘连和局部污染。



技术优势在于还原气氛双重作用，还原杂质同时提供保护，防止钨氧化挥发。炉型多为推舟连续炉或钟罩炉，前者自动化高，后者温度均匀。升温曲线分段，低温脱气去除残余粘结剂，中温固相扩散，高温液相保温。保温期钨颗粒球化，溶解-再析出机制细化界面。冷却在氢气中控制速率，避免热应力裂纹。

这种技术在高密度钨合金片烧结中应用成熟，氢气露点严格管理，低露点确保还原充分，高露点防过还原。坯料间距优化气流均匀，减少温度梯度。化学纯度提升通过多级过滤氢气。变体如湿氢控制水汽，促进排氧。环境废气处理中和水汽。

#### 6.4.2 液相烧结温度窗口与保温时间控制

液相烧结温度窗口与保温时间控制是钨合金片烧结工艺的核心参数，直接影响液相量、颗粒重排和组织演变，这种控制确保致密化充分而避免异常长大。温度窗口位于粘结相熔点以上，液相出现后适量流动润湿钨颗粒，化学上表面能降低驱动重排，溶解小颗粒析出大颗粒表面。窗口窄，过低液相不足致密度低，过高液相过多坯体塌陷或偏析。镍铁体系窗口较高，镍铜较低，需根据相图调整。

保温时间控制液相期反应程度，短时重排为主，长时溶解-再析出主导球化。时间优化通过试验确定，初期快速致密，后期缓慢细化。升温速率影响窗口进入，缓慢避免局部过热。气氛协同控制，氢气流动带走挥发物，维持窗口稳定。

这种控制不同厚度坯料中差异，大坯窗口偏保守防变形，小坯可延长保温促均匀。化学添加剂如钴扩展窗口，提高流动性。监控通过热电偶多点测温，确保炉内一致。冷却从窗口退出慢冷，锁定组织。变体如分段保温，先高后低优化阶段。环境能量管理节约保温期。

#### 6.4.3 真空烧结与烧结-热等静压一体工艺

真空烧结与烧结-热等静压一体工艺是钨合金片高端坯料的先进方法，前者通过高真空去除气体杂质，后者结合烧结与压力致密，提升复杂或高要求坯料质量，这种工艺适合钨铜伪合金或高纯体系。真空烧结在真空炉中加热，负压排出孔隙气体和挥发杂质，化学上避免氢气残留，保持界面洁净，促进固相或少液相扩散。温度高于传统烧结，补偿无液相流动。

一体——烧结-热等静压工艺在同一设备完成，先真空烧结预致密，再充氩气加压热等静压，压力各向均匀消除闭孔。化学上，高温高压加速扩散，钨颗粒紧密接触，界面结合增强。工艺优势在于单次装炉减少污染，适用于包套或无包套坯料。这种工艺在超薄片坯料预处理中潜力大，一体化减少中间缺陷。真空度管理关键，低真空防挥发损失。温度压力曲线联动，先烧结后压致密。化学纯度高，适合稀土掺杂合金。冷却真空下缓慢，避免应力。变体如快速热压结合。环境真空泵油回收入。

#### 6.4.4 烧结变形控制与支撑工装设计

烧结变形控制与支撑工装设计是钨合金片坯料烧结过程中的重要环节，通过合理支撑和工艺

参数调整减少高温软化导致的重力变形和翘曲，确保坯料尺寸精度和组织均匀。烧结中液相出现后坯料强度下降，重力作用易引起下沉或弯曲，化学上粘结相流动加剧变形，控制需从支撑方式和装炉姿态入手。支撑工装设计常用高纯氧化铝或钼板材，耐高温不变形，表面涂层防止粘连，化学上涂层如氮化硼降低摩擦和反应。

工装形式多样，平板坯采用多点支撑或砂床填充，砂粒分散应力，化学上高纯石英砂惰性好。立式悬挂适用于长条坯，夹具固定两端减少弯曲。设计考虑热膨胀匹配，避免冷热应力裂纹。变形控制还涉及升温速率缓慢，低温阶段脱气充分，液相期短时保温减少流动时间。坯料姿态优化，如倾斜放置平衡重力。

这种控制与设计在大尺寸或薄壁坯烧结中体现明显，多层叠放需间隔支撑防止粘结。化学气氛协同，氢气流动均匀温度减少局部软化。冷却阶段支撑保持至低温，避免热应力释放变形。工装重复使用需清洗残留。变体如陶瓷纤维柔性支撑适应形状。环境材料回收降低成本。

#### 6.4.5 大尺寸板坯烧结的温场均匀性保障

大尺寸板坯烧结的温场均匀性保障是实现组织一致性和致密度均衡的关键，通过炉体设计、装炉方式和加热控制减少温度梯度，避免局部过烧或欠烧。大型坯料热容大，炉内温场易不均，化学上温度差影响液相出现时机，导致重排不一致。保障措施首先炉膛结构优化，多区加热独立控温，热电偶多点反馈调节功率。辐射屏蔽板均匀分布热流，减少边缘散热。

装炉方式注重坯料间距和位置，中心放置辅助加热体，舟底高导热材料传热均匀。化学气氛循环流动，氢气多路进出搅拌炉气。升温曲线分段缓升，保温期微调功率平衡。监控系统实时映射温场，偏差大时暂停调整。

这种保障在宽厚板坯烧结中挑战大，多层装炉需旋转或翻转均匀受热。化学纯度高炉衬减少污染影响热辐射。冷却均匀降温，防止热应力梯度。变体如感应辅助加热局部补偿。环境能量管理节约多区调节。

#### 6.5 热加工与热处理

热加工与热处理是钨合金片从烧结坯到成品片材的变形与组织调控阶段，通过高温锻造、热轧、温轧和退火实现厚度减薄和性能优化，这种工艺解决烧结坯的脆性，引入纤维组织提升强度和韧性。热加工原理涉及动态恢复和再结晶，化学上高温激活滑移系，粘结相协调钨颗粒变形。开坯锻造打破铸态结构，热轧大变形减薄，中间退火释放应力恢复塑性。热处理包括真空退火和时效，调整晶粒和析出相。

工艺优化注重温度窗口和变形量匹配，高温加工易但氧化需保护，低温硬化快但裂纹风险。气氛控制氢气或真空，防止脱碳或增氧。轧制道次设计渐进压下，润滑减少表面损伤。热处理炉温均匀，冷却速率影响组织。缺陷预防聚焦边缘裂和分层，通过包套或侧压缓解。总之，热加工与热处理体现了高温塑性的工程利用，为钨合金片提供了从块体到薄片的变形路径。通过工艺组合，材料性能平衡逐步实现，支持其在精密部件中的应用扩展。

### 6.5.1 开坯锻造与热轧工艺

开坯锻造与热轧工艺是钨合金片热加工的起始阶段，通过高温大变形将烧结坯开方或减薄，破碎粗大组织引入变形纹理，为后续冷轧奠定基础。开坯锻造常用自由锻或模锻，坯料加热至高温在氢气保护下锤击或压下，化学上高温降低变形抗力，粘结相流动包裹钨颗粒，避免碎裂。多向锻造交替方向，促进均匀变形，组织纤维化初步形成。

热轧工艺接续锻造，多道次轧制进一步减薄，道次压下量大，轧辊加热或坯料保温维持温度。化学上热轧动态恢复活跃，位错重排减少硬化积累。保护气氛或涂层防氧化，润滑剂降低摩擦。道次间回炉加热恢复塑性。参数优化温度下降渐进，高温开轧易变形，低温精整表面。

这种工艺在大厚度钨合金片生产中体现明显，锻造总变形量高打破烧结孔隙，热轧实现板状。化学纯度管理关键，气氛露点低防氢脆。边裂控制通过圆角辊或侧导。变体如包套热轧保护表面。环境废热回收节约能量。

### 6.5.2 多向锻造提高组织均匀性

多向锻造提高组织均匀性是钨合金片热加工中的有效方法，通过反复改变变形方向，实现坯料内部应力和组织的均衡分布，减少烧结遗留的偏析和孔隙不均。这种锻造在开坯阶段应用广泛，坯料加热至高温后沿多个轴向交替锻击，化学上高温激活钨颗粒的协调变形，粘结相流动填充间隙，促进颗粒重排和破碎粗大聚集体。单向锻造易形成定向纹理和密度梯度，多向则通过交叉应力场打散偏聚，组织趋于各向同性。

锻造过程通常分为几轮，每轮改变方向如 X-Y-Z 轴顺序，总变形量逐步积累，化学上反复变形诱发动态恢复，位错重排减少局部硬化。方向切换间回炉加热恢复塑性，避免冷作裂纹。工艺优势在于改善大尺寸坯料的中心均匀性，边缘与心部密度差缩小。支撑工装辅助定位，防止不对称变形。

这种锻造在高密度钨合金片生产中作用显著，多向后组织细化，钨颗粒球化程度提高，界面结合增强。化学纯度管理关键，保护气氛防氧化影响变形协调。锻击频率和压下量匹配，避免过快导致内部撕裂。变体如径向-轴向组合适应形状。环境废热利用节约能量。

### 6.5.3 中间退火与应力释放热处理

中间退火与应力释放热处理是钨合金片热加工序列中的必要间隔步骤，通过真空或保护气氛加热释放轧制积累的残余应力和加工硬化，恢复材料塑性，为下一道次变形创造条件。这种热处理在热轧后或冷轧道次间进行，温度控制在再结晶阈值以下或略高于，化学上高温扩散驱动位错迁移和湮灭，粘结相软化协调钨颗粒应力释放。真空退火避免氧化，氢气变体进一步还原表面。

退火过程分升温、保温和冷却阶段，保温时间允许应力充分松弛，化学上晶界迁移细化组织，析出相溶解或均匀。冷却缓慢防止新应力引入。工艺优势在于防止累积硬化导致的边缘裂或



分层，多道次轧制依赖此恢复。温度窗口根据合金体系调整，镍铁体系较高以促进恢复。

这种热处理在薄片生产中频率高，冷轧大变形后退火次数多，确保总加工率实现。化学气氛纯度关键，低露点防氢脆。炉温均匀性保障多坯一致。变体如梯度退火优化表面心部差异。环境真空泵维护降低污染。

#### 6.5.4 高温固溶处理与快速冷却

高温固溶处理与快速冷却是钨合金片热处理中的强化手段，通过高温溶解合金元素并快速锁定过饱和状态，提升材料强度和高温稳定性，这种处理常在最终热加工后或特定性能需求时应用。固溶处理将片材加热至粘结相充分固溶温度以上保温，化学上钨原子有限溶入粘结相，形成过饱和固溶体，界面元素扩散增强结合。保温期允许均匀溶解，避免局部偏析。

快速冷却如水淬或气淬冻结高温状态，化学上抑制析出，保留细小弥散相或固溶强化效应。冷却介质选择平衡淬火应力和氧化风险，惰气淬火温和。工艺优势在于提升硬度和耐热性，过饱和粘结相钉扎位错，提高强度。

这种处理在耐磨或热沉钨合金片中应用，固溶后强度升高但韧性需监控。化学气氛真空防脱碳。温度精确控制，避免过烧粗化。变体如分级冷却优化应力分布。环境介质回收降低消耗。

#### 6.6 冷轧与温轧制备薄片

冷轧与温轧制备薄片是钨合金片生产中的精加工阶段，通过室温或中温多道次轧制将热加工坯料逐步减薄至目标厚度，形成细密组织和优异表面质量，这种工艺适合从毫米级到微米级薄片的制备。冷轧在室温进行，加工硬化显著，总变形量大，温轧则在中温区间辅助恢复，降低裂纹风险。工艺原理涉及位错增殖、动态回复和织构形成，化学上粘结相在变形中协调钨颗粒，防止脆断。道次压下分配需渐进，初期大压下开形，后期小压下精整。轧制方向和织构控制影响各向异性，边缘管理预防裂纹。

工艺优化注重润滑和张力的控制，冷轧油润滑减少摩擦，温轧惰气保护防氧化。中间退火间隔释放应力，恢复塑性。薄片生产强调轧机精度和高刚度辊系，避免厚度波动。缺陷预防聚焦裂纹和橘皮，通过修边和表面检查缓解。

##### 6.6.1 冷轧总变形量分配与道次压下规程

冷轧总变形量分配与道次压下规程是钨合金片薄化过程的核心规划，通过合理分布总加工率和单道次压下量，确保变形均匀、应力可控，避免裂纹和翘曲。这种规程从热轧坯开始，总变形量往往较高，以实现细晶强化和厚度精度。分配原则初期道次压下量较大，利用残余热塑性开形，后期渐减以精整表面，化学上大压下激活多滑移系，粘结相充分流动包裹钨颗粒，减少颗粒破碎。规程设计考虑材料状态，前段冷加工硬化慢，允许较大压下，后段硬化积累需小压下并增加退火间隔。道次间润滑油均匀涂布，降低辊面摩擦，化学上防止粘辊导致表面划伤。张力控制辅助稳定板形，防止中波或边波。总变形量根据目标厚度计算，超薄片需

多次循环轧制退火。

这种规程在常规厚度到薄片过渡中灵活调整，高钨含量合金压下保守防边缘开裂。化学气氛管理轧后片材防氧化。规程记录道次厚度，实时调整偏差。变体如不对称轧制优化板形。环境润滑油回收降低污染。

#### 6.6.2 温轧在高钨含量合金中的应用

温轧在高钨含量合金中的应用是通过中温区间轧制改善室温冷轧的脆性风险，利用适度加热激活恢复机制，实现大变形量薄化，这种应用特别适合钨含量较高的合金体系。温轧温度控制在恢复再结晶以下，化学上加热降低变形抗力，粘结相软化增强协调，钨颗粒滑移阻力减小，避免冷轧常见的边缘裂。轧机配备加热装置或坯料预热，惰气保护防止氧化。

应用优势在于平衡硬化和恢复，道次压下量较冷轧大，总加工率高，减少退火次数。化学上温轧动态回复活跃，位错重排减少积累，表面质量优于纯冷轧。工艺结合热轧过渡，冷轧精整，形成混合路径。高钨合金粘结相少，温轧扩展变形窗口。

这种应用在超薄高密度钨合金片中潜力显著，温轧后组织纤维细密，强度韧性协调。化学润滑高温适应，石墨或特种油防粘。温度均匀性关键，感应加热快速响应。变体如轧辊加热辅助。环境废气抽排安全。

#### 6.6.3 轧制方向控制与织构优化

轧制方向控制与织构优化是钨合金片冷温轧过程中的组织调控手段，通过单向、交叉或多向轧制路径调整变形纹理和晶体取向，影响材料各向异性和性能平衡，这种优化帮助实现强度、韧性和热膨胀的定向控制。单向轧制形成强纤维织构，钨颗粒沿轧向拉长，化学上位错平面堆积产生择优取向，提高纵向强度但横向韧性降低。交叉轧制每道次旋转 90 度，打散定向，织构弱化趋于随机。

优化原则根据应用选择，屏蔽片需各向同性用交叉轧，结构件纵向强用单向。多向变体如钟摆轧制进一步均匀。化学上织构影响相间应力分布，优化减少热加工残余。退火结合调控织构强度，高温退火弱化，低温保留。

这种控制与优化在薄片生产中影响显著，超薄箔织构强时弯曲易裂，交叉优化改善。化学检测 X 衍射极图评估取向密度。方向标记成品便于下游使用。变体如斜向轧制特殊纹理。环境辊系清洁防划伤。

#### 6.6.4 边缘裂纹预防与修边工艺

边缘裂纹预防与修边工艺是钨合金片轧制中的缺陷管理环节，通过轧制参数调整、边部保护和定期修边减少裂纹萌生和扩展，确保片材完整性和成品率。边缘裂纹源于应力集中，化学上钨颗粒边缘剪切大，粘结相协调不足时开裂。预防措施包括道次压下渐减，边部圆滑过渡，

侧导辊约束板形防止边浪诱发拉应力。

修边工艺使用剪切机或轮切定期去除裂边，化学上切口清洁防二次裂源。预防还涉及润滑均匀，边部多涂防干摩擦。温轧降低裂纹敏感，冷轧监控硬化积累及时退火。

这种预防与修边在薄片轧制中频率高，超薄阶段裂纹易扩展，修边间隔短。化学表面检查荧光渗透辅助。修边废料回收粉化循环。变体如激光修边精密无毛刺。环境切削液过滤安全。

## 6.7 表面处理与精加工

表面处理与精加工是钨合金片生产的最终阶段，通过化学清洗、机械加工和热平整等方法去除表面缺陷、改善平整度和光洁度，提升材料的外观质量、耐蚀性和功能适应性，这种工艺直接影响片材在精密应用中的表面完整性和结合性能。表面处理针对轧制或热处理遗留的氧化层、富集相和粗糙面，精加工则实现尺寸精度和边缘质量。工艺原理涉及化学溶解、机械去除和热应力释放，化学处理选择性强，机械处理效率高，热平整结合二者优势。处理顺序通常先清洗去污，再磨抛光洁，最后切割定尺。

精加工的优化注重无损和洁净，化学清洗避免残留腐蚀，机械抛光控制颗粒嵌入，真空热平整防再氧化。激光或水刀切割实现复杂形状，减少热影响区。质量控制包括表面粗糙度测量和视觉检查，确保 Ra 值和无裂纹。环境因素下，废液中和回收，粉尘收集安全。

### 6.7.1 化学清洗与酸洗去氧化层

化学清洗与酸洗去氧化层是钨合金片表面处理的首要步骤，通过酸性溶液溶解去除轧制或热处理形成的氧化皮和污垢，恢复金属光泽并为后续加工提供洁净基面，这种方法选择性溶解氧化物而基本不伤基体。清洗过程先碱洗除油，再酸洗主去氧化，化学上氧化层主要为钨氧化物和粘结相氧化物，硝酸、氢氟酸或硫酸混合液有效溶解，钨形成络合物进入溶液。酸洗时间和温度控制温和，避免过蚀导致表面坑洞或氢脆。

工艺优势在于高效去除薄氧化层，适用于各种厚度片材，化学配方根据合金体系调整，镍铜体系酸浓度低防铜溶解过度。清洗后水洗中和，钝化处理形成临时保护膜。废液处理中和回收氟离子或硝酸盐。

这种清洗在热轧后片材中应用广泛，去除厚氧化皮后表面活性提高，便于抛光或镀层。化学监控 pH 和浓度，确保批次一致。变体如超声辅助加速溶解。环境封闭循环减少排放。

### 6.7.2 碱洗去除粘结相表面富集

碱洗去除粘结相表面富集是钨合金片针对性表面处理方法，通过碱性溶液选择性溶解轧制或热处理导致的粘结相表层富集，平衡表面组成并改善耐蚀性，这种方法在高粘结相合金中应用，避免富集层优先腐蚀。清洗过程使用氢氧化钠或碳酸钠热溶液浸泡，化学上碱与镍或铜氧化物反应生成可溶盐，钨相惰性基本不溶，表面富集层薄薄去除，露出均衡基体。



工艺优势在于选择性强，不伤钨骨架，适用于无磁或导热片材。温度和时间控制精确，高温加速溶解但防过度坑蚀。清洗后酸中和残碱，水洗干燥。辅助搅拌或超声提升均匀。这种碱洗在镍铜体系薄片中的作用明显，轧制表面铜易富集，碱洗后导电均匀。化学分析表面组成验证去除效果。变体如电解碱洗加速。环境碱液再生循环。

### 6.7.3 机械磨削与抛光

机械磨削与抛光是钨合金片表面精加工的核心方法，通过砂带、砂轮或抛光膏逐步去除表面粗糙和缺陷，实现高光洁度和低粗糙度，这种方法适用于各种厚度片材，提升外观和功能表面质量。磨削先粗磨去除氧化痕迹和波纹，砂带或砂轮逐级细化，化学上机械剪切去除材料，钨硬度高需金刚石或碳化硼磨料。抛光用软布轮加抛光膏，精细摩擦产生镜面。

工艺优势在于可控精度，Ra 值逐步降低，适用于平面或曲面。干磨或湿磨选择，湿磨冷却防热损伤。分级加工粗到精，中间清洗防颗粒嵌入。这种磨削与抛光在医疗准直器片中要求高，镜面减少散射。化学清洁后抛光防残留。变体如振动抛光均匀复杂形。环境粉尘收集安全。

### 6.7.4 真空/氢气保护热平整工艺

真空/氢气保护热平整工艺是钨合金片薄化后的矫平方法，通过高温张力或辊压在保护气氛下释放残余应力，改善板形平整度和尺寸稳定性，这种工艺适合易翘曲的薄片。工艺过程将片材在真空或氢气炉中加热至应力释放温度，施加轻微张力或通过矫平辊，化学上高温扩散松弛位错，粘结相软化协调变形。真空防氧化，氢气兼还原表面。

优势在于无接触或轻接触，表面无痕，平整度高。温度低于再结晶避免组织变化。张力控制均匀防止局部拉伸。这种工艺在超薄钨合金片中应用广泛，冷轧后翘曲通过热平整矫正。化学气氛纯度关键，低露点防氢脆。变体如连续炉张力平整。环境气密节能。

### 6.7.5 精密剪切、激光切割与水刀切割

精密剪切、激光切割与水刀切割是钨合金片精加工的定尺和异形方法，通过机械刃、激光束或高压水射流实现边缘整齐和形状复杂化，这种方法满足下游多样尺寸需求。精密剪切用高精度剪板机，刃口锋利，化学上剪切力集中断裂，适用于直边矩形片，间隙调整防毛刺。

激光切割用高能激光熔化汽化材料，惰气吹除熔渣，化学上热影响区小，适用于复杂轮廓和孔。功率密度控制切缝窄。水刀切割高压水混磨料射流，冷态切割无热变形，化学上纯机械磨蚀，适合厚片或热敏合金。这种切割在定制钨合金片中灵活，激光精密孔，水刀无应力边缘。化学清洗后切割防污染。变体如光纤激光提升速度。环境废渣回收安全。

中钨智造科技有限公司  
高密度钨合金定制服务

中钨智造，30 年经验的高密度钨合金设计生产的定制专家。

核心优势

**30 年经验：**深谙钨合金生产，技术成熟。

**精准定制：**支持高密度（17-19 g/cm<sup>3</sup>）、特殊性能、结构复杂、超大和极小件设计生产。

**质量成本：**优化设计、最佳模具与加工模式，性价比卓越。

**先进能力：**先进的生产设备，RIM、ISO 9001 认证。

10 万+客户

涉及面广，涵盖航空航天、军工、医疗器械、能源工业、体育娱乐等领域。

服务承诺

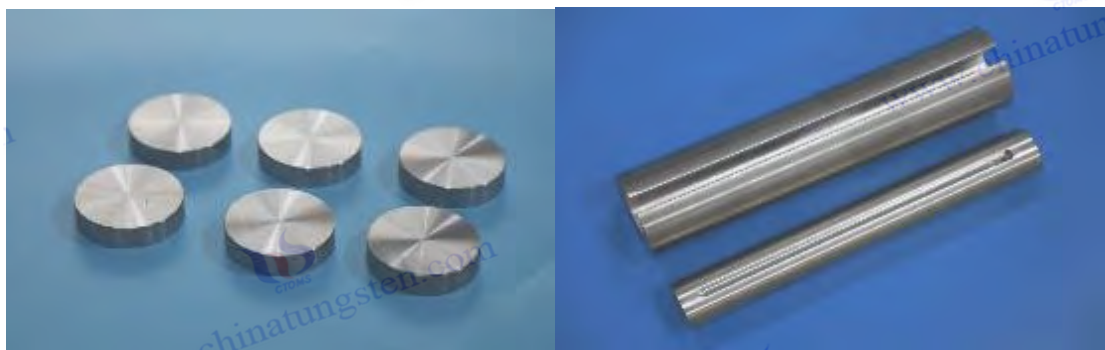
官网 10 亿+次访问、100 万+网页、10 万+客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



## 第七章 钨合金片的应用

### 7.1 钨合金片在国防军工领域的应用

钨合金片在国防军工领域主要用于需要高密度、高强度和良好韧性的部件，其高熔点和耐磨性支持严苛环境下的稳定表现。应用包括平衡配重、防护结构等，通过加工实现功能集成。

#### 7.1.1 穿甲用钨合金片

钨合金片在穿甲部件中利用高密度和自锐特性，提供动能集中和侵彻能力。合金设计平衡硬度和韧性，加工成形后表面光洁，支持高速稳定。

#### 7.1.2 配重用钨合金片

钨合金片作为配重材料，利用高密度在有限空间实现重量调节，帮助平衡惯性和振动控制。厚度均匀确保精度，表面处理提升耐久。

#### 7.1.3 防护用钨合金片

钨合金片在防护结构中发挥射线衰减和冲击吸收作用，高密度提供薄层高效屏蔽。复合设计增强整体强度，适用于多层防护系统。

### 7.2 钨合金片在高端制造领域的应用

钨合金片在高端制造领域的应用主要体现在其高密度、高硬度和良好加工性的组合特性上，这种应用覆盖模具制造、切削工具和精密机械部件等领域，帮助实现小型化、高可靠性和长寿命的设计目标。钨合金片通过粉末冶金和精密轧制获得均匀组织，在模具镶块中发挥耐磨和抗高温软化作用，在刀具领域提供硬质支撑，在机械配重中利用密度优势调整质量分布。应用过程中，钨合金片往往与其他材料复合或表面处理，进一步扩展功能边界。

高端制造对材料性能的平衡要求较高，钨合金片的高弹性模量和热稳定性使其在高应力、高温或高精度场合表现出色。随着制造业向智能化和轻量化发展，钨合金片的应用从传统模具扩展到增材制造支撑和精密仪器部件。表面镀层或热处理可进一步优化其耐蚀和结合性能，满足复杂工况。钨合金片的厚度规格多样，薄片用于精密镶嵌，厚片适合结构支撑。

#### 7.2.1 模具镶块用钨合金片

钨合金片在模具镶块中的应用源于其高硬度、耐磨性和抗高温软化能力，这种应用广泛见于塑料注射模具、压铸模具和玻璃热压模具，帮助延长模具寿命并提高制品质量。模具镶块作为模具的核心工作部位，承受反复高温、高压和磨损，钨合金片通过嵌入模具主体，提供局部高耐磨区域，减少整体模具材料的消耗。钨合金片的双相结构在镶块中发挥作用，钨颗粒作为硬质相抵抗磨粒侵蚀，粘结相提供一定韧性避免脆断。

#### 版权与免责声明



在塑料注射模具中，钨合金片常用于型腔边缘或浇口部位，承受熔融塑料的冲刷和热循环，表面抛光后降低粘模倾向，提高脱模效率。压铸模具应用中，镶块面对液态金属的高速冲击和高温腐蚀，钨合金片的热稳定性帮助维持尺寸精度，减少热疲劳裂纹。玻璃热压模具则利用其低热膨胀和高硬度，确保精密光学元件成型时的形状保真。镶块设计时，钨合金片通过钎焊、镶嵌或螺钉固定与模具钢结合，界面处理如镀镍提升附着力。

应用扩展到高精度冲压模具，钨合金片镶块用于手机中框或电子连接器成型，抵抗不锈钢或钛合金板材的反复冲裁，表面硬度梯度设计平衡耐磨与抗崩刃。近年来，随着电动汽车和消费电子的快速发展，模具对长寿命的要求推动钨合金片向纳米晶或弥散强化方向发展，进一步提升抗疲劳性能。表面涂层如 DLC 或 TiAlN 常见，化学气相沉积形成硬质膜，协同基体耐磨。钨合金片镶块的厚度根据模具尺寸选择，薄片用于微型模具，厚片支撑大载荷。

加工工艺影响应用效果，精密磨削确保镶块平面度，热处理调整硬度分布。模具维护中，钨合金片易于局部更换，降低整体成本。环境适应性上，镶块在高温润滑油或水基冷却剂中保持稳定。钨合金片的应用还促进模具设计模块化，标准化镶块规格便于库存管理。

### 7.2.2 刀具用钨合金片

钨合金片在刀具中的应用主要作为基体或镶嵌部件，利用其高硬度和热稳定性提供切削支撑，这种应用见于某些特殊切削工具和耐磨刀片，帮助应对难加工材料或高温条件。刀具设计中，钨合金片常与硬质合金或陶瓷复合，形成混合结构，钨合金提供韧性基底，表面焊接或钎焊硬质层，提升整体寿命。钨合金片的密度优势在旋转刀具中帮助平衡，减少振动。

车削或铣削工具中，钨合金片镶块用于刀杆或刀座，承受切削力和热负荷，粘结相协调变形吸收冲击，避免刀尖崩刃。化学稳定性使刀具在冷却液环境中抵抗腐蚀，表面处理如化学镀进一步保护。应用扩展到木工或复合材料加工刀具，钨合金片抵抗纤维磨损，保持刃口锐利。

钨合金片的应用还见于某些拉丝模或挤压工具衬套，内孔镶嵌钨合金环或片，耐金属流动磨损。厚度选择根据刀具体型，薄片用于轻载精密刀，厚片支撑重切。表面纹理加工如激光微结构，提升排屑性能。钨合金片在刀具中的作用促进了多材料复合设计，钎焊界面优化结合强度。

近年来，随着难切材料增加，钨合金片向梯度结构发展，表层硬底心韧。热处理调整刀具硬度分布，固溶强化提升耐热。刀具重磨时，钨合金基体支持多次刃磨。环境适应性上，干切或最小量润滑中保持稳定。

### 7.2.3 机械配重用钨合金片

钨合金片在机械配重中的应用利用其高密度特性，在有限空间内实现质量集中，帮助精密机械调整重心、平衡惯性和减振，这种应用常见于分析仪器、惯性导航设备和光学平台。配重片通过精密加工成特定形状，嵌入或粘接于机械结构，钨合金片的均匀密度确保质量分布可控，避免局部偏差影响系统稳定性。

分析天平或离心设备中，钨合金片作为砝码或平衡块，厚度均匀性支持微量调节，表面镀层防止氧化影响质量。惯性仪表应用中，配重片调整转动惯量，钨合金片的加工性允许复杂几何成型，满足小型化需求。光学仪器平台利用配重减振，高密度片降低重心，提高抗震能力。

钨合金片的应用还扩展到高速旋转机械，如陀螺仪或电机转子，配重平衡减少偏心振动，延长轴承寿命。厚度范围多样，薄片用于微型设备，厚片大质量调节。表面处理如镀金提升外观和耐蚀，化学稳定性确保长期质量不变。

加工工艺影响应用精度，精密剪切保证边缘光滑，热平整维持平面度。钨合金片在配重中的作用促进了机械设计的紧凑化，高密度替代传统材料减少体积。环境适应性上，温度变化下尺寸稳定，支持宽温域使用。

### 7.3 钨合金片在核与医疗领域的应用

钨合金片在核与医疗领域的应用主要利用其高密度、良好的射线衰减能力和生物相容性，这种应用涵盖核设施屏蔽、医疗放射治疗设备和核环境部件，帮助实现辐射保护和医疗精度提升。钨合金片通过高钨含量提供有效屏蔽厚度薄的优势，与传统材料相比体积更小，适合空间受限场合。核屏蔽应用中，钨合金片用于容器衬里或准直结构，医疗领域则多见于多叶准直器和防护用品。核环境部件利用其热稳定性和辐射耐受性。

应用设计注重厚度均匀性和表面光洁，薄片用于精密准直，厚片支撑结构。表面处理如镀层提升耐蚀，复合结构与聚合物结合扩展柔性屏蔽。钨合金片的加工性允许复杂成型，满足定制需求。随着核医学和放射治疗技术发展，钨合金片的应用从传统屏蔽向功能集成扩展，如结合传感器或冷却通道。生物相容性使医疗应用安全，辐射下组织稳定支持长期使用。

#### 7.3.1 核屏蔽用钨合金片

钨合金片在核屏蔽中的应用源于其对伽马射线和中子的高衰减能力，这种应用常见于核设施的容器衬里、运输罐内壁和实验装置屏蔽，帮助减少辐射泄漏并保护操作环境。钨合金片的高密度允许在有限厚度下实现有效屏蔽，相比其他材料体积节约显著，适合模块化设计。屏蔽结构中，钨合金片通过叠层或镜风固定，表面处理提升耐辐射氧化稳定性。

在核废料储存容器中，钨合金片作为内衬吸收高能射线，热稳定性维持长期完整。实验装置如反应堆周边屏蔽墙使用钨合金板，厚度根据辐射强度调整，均匀组织确保衰减一致。钨合金片的加工性支持异形切割，适应复杂几何。复合应用中，与硼化材料结合增强中子吸收，化学相容性好无有害反应。应用扩展到核燃料处理设备，钨合金片屏蔽操作窗口或机械臂部件，辐射耐受性支持反复暴露。表面镀层如镍保护粘结相，延长服役期。钨合金片在核屏蔽中的作用促进了设施小型化，重量优化便于运输。环境适应性上，高温辐射下尺寸稳定。

#### 7.3.2 医疗屏蔽用钨合金片

钨合金片在医疗屏蔽中的应用主要见于放射治疗设备和防护用品，利用其对 X 射线和伽马

射线的衰减特性，提供精确辐射塑形和人员保护，这种应用提升了治疗定位和安全水平。医疗屏蔽中最典型为直线加速器多叶准直器叶片，钨合金薄片层层叠加，独立运动形成束流轮廓，厚度均匀确保边缘锐利，减少半影区。

在放射诊断设备如 CT 机中，钨合金片用于探测器准直格栅或防散射板，吸收杂散射线，提高图像清晰。防护用品如放射科医生围裙或屏蔽帘，钨合金片与聚合物复合形成柔性材料，轻便舒适替代传统重材料。钨合金片的生物相容性和无毒性支持医疗接触安全。

应用设计注重精度，叶片表面抛光降低摩擦，运动顺畅。钨合金片的热稳定性在高剂量辐射下维持形状，化学惰性防冷却液腐蚀。定制厚度满足不同能量射线，薄片用于低能 X 射线，厚片高能伽马。复合结构扩展到可穿戴防护，钨合金微片均匀分布提供全面覆盖。

### 7.3.3 核环境用钨合金片

钨合金片在核环境中的应用利用其辐射耐受性和热机械稳定性，这种应用见于核设施内部部件，如热沉、支撑结构或局部屏蔽，帮助维持设备在辐射和高温条件下的可靠运行。核环境部件承受中子、伽马辐射和温度循环，钨合金片的组织稳定性减少肿胀和脆化，粘结相协调应力分布。

在核反应堆或加速器中，钨合金片用于靶材背板或冷却通道衬里，导热性辅助散热，辐射下保持尺寸。支撑结构如固定架利用高强度，承受振动和热载荷。钨合金片的加工性允许精密成型，适应狭小空间安装。

应用扩展到核仪器部件，钨合金片作为吸热块或准直窗口，辐射衰减结合热管理。表面处理提升抗氧化，镀层保护长期暴露。钨合金片在核环境中的作用促进了设备耐久性，减少维护频率。化学稳定性防介质反应。

### 7.4 钨合金片在电子与新能源领域的应用

钨合金片在电子与新能源领域的应用主要依赖其优异的导热导电性能、热膨胀系数匹配性和高密度特性，这种应用覆盖功率器件散热、电子封装和电极材料，帮助实现设备小型化、高可靠性和高效能量转换。钨合金片通过钨铜或钨镍铜体系提供与半导体材料相近的热膨胀行为，减少热应力失效，在散热基板中作为热沉扩展热量，在封装中作为外壳或过渡层，在电极中发挥耐电弧烧蚀作用。随着 5G 通信、大功率电子和新能源电池技术的快速发展，钨合金片的应用从传统真空器件扩展到高频模块和能量存储系统。

电子领域对热管理要求严格，钨合金片的高导热率辅助热扩散，表面镀层提升焊接性。新能源应用中，其稳定性支持高温或循环条件。钨合金片的厚度规格灵活，薄片用于微电子，厚片支撑大功率。复合结构常见，与陶瓷或金刚石结合增强性能。钨合金片的应用还促进了器件集成化，热界面材料匹配减少接触热阻。环境适应性上，钨合金片在宽温域保持性能稳定。总之，这种应用体现了钨合金片在电子新能源中的热电功能定位，通过性能组合推动了器件效率和寿命的提升，支持了行业技术的持续进步。



#### 7.4.1 散热基板用钨合金片

钨合金片在散热基板中的应用主要利用钨铜体系的高导热性和与半导体材料的热膨胀匹配，这种应用常见于高功率 LED、激光器和射频模块，帮助快速导出热量并减少热应力开裂。散热基板作为芯片与散热器的中间层，钨合金片提供平整支撑面，表面镀镍金提升可焊性，化学键合强度高。钨铜伪合金结构中铜相形成连续热通道，钨骨架控制膨胀，匹配硅或砷化镓基片。

在功率放大器模块中，钨合金片基板承载芯片，热导率支持高频工作下热积累分散，厚度均匀确保平面度，减少翘曲。激光二极管应用中，基板吸收泵浦热，钨合金片的热容量缓冲瞬时峰值。LED 封装扩展到大功率照明，钨合金片替代传统铜钼，体积热管理优异。

应用设计注重界面处理，钎焊或烧结连接芯片，化学相容性避免反应层。表面微结构激光加工增加接触面积，提升热传导。钨合金片在散热基板中的作用促进了器件小型化，高功率密度下可靠运行。复合变体与金刚石颗粒增强导热，进一步扩展极限。环境适应性上，高低温循环稳定。

#### 7.4.2 电子封装用钨合金片

钨合金片在电子封装中的应用利用其热膨胀匹配和高密度特性，作为外壳、盖板或过渡层，提供气密保护和热路径，这种应用见于高可靠微波器件和传感器封装，帮助维持内部真空或惰气环境。钨合金片与陶瓷或玻璃封接兼容，化学稳定性支持高温钎焊，膨胀系数接近减少封接应力。

在功率半导体封装中，钨合金片作为底座或引线框架过渡，导热导出结热，密度优势降低整体重量。微波管封装应用中，钨合金盖板确保电磁屏蔽，高密度辅助结构刚性。传感器外壳利用钨合金片耐环境腐蚀，表面镀层提升焊接。

#### 7.4.3 电极用钨合金片

钨合金片在电极中的应用主要发挥耐电弧烧蚀和高导电特性，这种应用见于高压开关、电阻焊电极和某些放电管，帮助延长接触寿命并维持稳定导通。钨合金片作为接触面或镶嵌块，钨相抵抗熔焊，铜或银相提供导电路径，化学上烧蚀产物挥发带走热损伤。

在电阻焊电极中，钨合金片镶嵌铜基体，承受反复点焊冲击，高硬度减少变形，导电性支持大电流。真空开关应用中，钨合金电极面对电弧，耐烧蚀维持接触面平整，减少材料转移。

应用扩展到电火花加工电极，钨合金片低损耗提高加工效率，表面纹理优化放电均匀。放电管电极利用钨合金耐高压击穿，稳定性支持重复放电。

钨合金片在电极中的作用促进了接触可靠性和寿命，复合设计平衡导电耐磨。厚度根据电流级别，薄片精密接触，厚片重载支撑。表面抛光降低初始电阻。

## 7.5 钨合金片材在卡片中的应用

钨合金片材在卡片中的应用主要利用其高密度带来的沉甸甸手感和金属光泽，以及良好的加工性和耐磨性，这种应用将功能材料与日常用品结合，赋予卡片独特的质感和耐久性。钨合金片通过精密轧制成薄箔或复合层，与塑料或金属基材层压成型，厚度控制确保卡片标准尺寸兼容。应用覆盖银行支付卡、宠物身份标识和节日纪念定制卡，满足消费者对高端、个性化和长寿命产品的需求。

钨合金片材的金属特性在卡片中提供防伪纹理和视觉效果，表面抛光或拉丝处理增强美观，镀层如金或黑钛提升颜色多样。化学稳定性使卡片抵抗日常磨损和腐蚀，保持长期光亮。复合工艺中，钨合金层与 PVC 或 PC 基材热压结合，粘合剂确保层间强度。钨合金的应用还促进卡片轻量化设计，高密度薄层实现重量感而不增加体积。随着消费升级，钨合金卡片从奢侈品扩展到个性化礼品，加工技术如激光雕刻支持定制图案。环境适应性上，卡片耐弯折和高温。

### 7.5.1 钨合金银行卡与支付卡

钨合金银行卡与支付卡是将钨合金薄片复合于卡体中的高端支付工具，这种卡片通过钨合金层提供金属重量感和冷峻触感，区别于传统塑料卡，提升持有者的身份认同和使用体验。钨合金片材通常轧制成极薄箔，与多层塑料基材热压层合，表面覆盖透明保护层，化学上钨合金的惰性确保卡片在日常摩擦和弯折中不褪色或变形。卡片标准尺寸兼容现有读卡器，芯片和磁条嵌入不影响功能。

钨合金银行卡常由金融机构发行作为高端会员或黑卡级别，重量感在取出时带来仪式感，金属光泽反射光线增强视觉吸引力。表面处理多样，拉丝纹理或镜面抛光，激光刻印卡号和图案，防伪效果好。钨合金层的厚度微调平衡重量和柔韧，弯曲测试确保不分层。化学镀层如玫瑰金或枪黑提供颜色选择，满足个性化需求。

支付卡应用扩展到非接触支付，钨合金不干扰射频信号，天线层设计兼容。耐磨性使卡片在钱包摩擦中保持新貌，长寿命减少更换频率。钨合金卡片的加工工艺成熟，复合后精密裁切边缘光滑，无毛刺。环境适应性上，卡片耐高温和化学清洁剂，适合全球使用。钨合金的应用还推动卡片防伪技术，独特密度难仿制。

### 7.5.2 钨合金宠物身份牌

钨合金宠物身份牌是将钨合金薄片加工成小型挂牌的形式，用于宠物项圈标识，这种牌通过高密度和金属质感提供耐用和美观结合，抵抗宠物活动中的磨损和腐蚀。钨合金片材轧制成薄片后冲压成型，形状多样如骨头、圆牌或心形，表面激光雕刻主人信息和宠物名称，化学上钨合金的硬度确保刻印深度持久不模糊。

宠物身份牌应用中，钨合金的重量感适中，不增加宠物负担，环扣设计牢固防脱落。表面抛光或拉丝处理反射光线，提升可见度，镀层如黑铱或金色增加颜色选择。化学稳定性使牌在

户外雨水、泥土或宠物舔舐中保持完整，无锈蚀或褪色。厚度控制薄而坚韧，弯曲不裂。

应用扩展到高端宠物用品市场，钨合金牌作为奢侈配饰，搭配皮革项圈，定制图案包括宠物照片轮廓或二维码链接信息。耐磨性支持活跃宠物长期佩戴，信息清晰便于走失找回。钨合金片的加工性允许小批量个性化，边缘圆滑防伤宠物皮肤。

### 7.5.3 钨合金节日与纪念定制卡

钨合金节日与纪念定制卡是将钨合金薄片制成卡片形式，作为节日礼物或纪念品，这种卡通过金属重量感和永久光泽传达特殊情感和收藏价值，区别于纸质或塑料卡。钨合金片材复合或纯金属成型，表面激光雕刻祝福语、日期或图案，化学上钨合金的稳定性确保信息永不褪色，适合长期保存。

节日卡应用中，如生日、周年或节日贺卡，钨合金提供沉甸甸手感，取出时带来惊喜，镀层颜色如金或银匹配节日主题。纪念卡用于婚礼、毕业或企业里程碑，定制形状如心形或书签，嵌入宝石或浮雕增强艺术性。厚度薄而坚实，便于邮寄或携带。

应用设计注重个性化，激光技术实现精细纹理，化学抛光镜面反射增强视觉。复合结构与丝绸或皮革结合，提升礼品档次。钨合金的耐磨性使卡片在反复把玩中保持新貌，收藏价值高。

### 7.5.4 钨合金工业与资产管理标牌

钨合金工业与资产管理标牌是将钨合金薄片加工成耐用标识牌的形式，用于设备、工具或资产的永久标记，这种标牌通过高硬度和化学稳定性抵抗工业环境的磨损、腐蚀和高温，确保信息长期可读。钨合金片材轧制成薄板后激光雕刻或冲压编号、条码或二维码，表面抛光或拉丝处理提升耐候性，化学上钨合金的惰性防止酸碱或油污侵蚀，适合户外或化工场所。

工业标牌应用中，钨合金牌固定于机械设备、管道或容器，承受振动和清洗，高密度提供稳固感，挂绳或铆钉安装牢固。资产管理标牌用于仓库货架或 IT 设备，二维码链接数字系统，实现追踪和盘点。钨合金的耐磨性使标牌在频繁扫描或摩擦中保持清晰，信息不模糊。

应用设计注重实用性，边缘圆滑防伤，孔位精密便于固定。厚度薄而坚韧，弯曲不裂，镀层如黑铬增强隐蔽性或耐指纹。化学稳定性支持高压水枪清洗或溶剂擦拭。钨合金标牌的加工性允许批量定制，模板化图案降低成本。

### 7.5.5 钨合金服饰与奢侈品吊牌

钨合金服饰与奢侈品吊牌是将钨合金薄片制成时尚吊牌的形式，挂于服装、包袋或珠宝，赋予产品金属质感和高端定位，这种吊牌通过重量感和光泽提升品牌形象，区别于传统塑料或纸质标签。钨合金片材精密切割成品牌 LOGO 或几何形状，表面拉丝、镜面或镀金处理，化学上钨合金的硬度确保吊牌在佩戴摩擦中不划伤或变形，保持永久光亮。



服饰吊牌应用中，钨合金牌通过细链或丝带连接衣物，沉甸甸触感传达奢华，激光雕刻品牌名称或限量编号，增强独特性。奢侈品包袋吊牌常更大尺寸，浮雕纹理增加立体感，镀黑钛或玫瑰金匹配产品色调。珠宝吊牌利用钨合金耐腐蚀，伴随贵金属饰品长期保存。

应用设计注重美学与功能，边缘抛光圆润，孔位精致防拉扯断裂。厚度微调平衡重量和柔和，化学稳定性抵抗香水或汗液侵蚀。钨合金吊牌的加工性支持小批量高端定制，3D 纹理或镶嵌宝石提升艺术价值。

#### 7.5.6 钨合金高端名片与社交礼仪卡

钨合金高端名片与社交礼仪卡是将钨合金薄片加工成名片或礼卡的形式，用于商务交流或社交场合，这种卡片通过金属重量感和精致工艺传达专业与品位，区别于普通纸质名片，提升持有者的个人形象。钨合金片材轧制成标准名片厚度，表面激光雕刻姓名、职位和联系方式，化学上钨合金的硬度确保卡片在钱包或名片夹摩擦中不弯曲或磨损，保持永恒光泽。

高端名片应用中，钨合金提供冷峻金属触感，取出时带来注目，镀层如枪黑或银白匹配职业风格，拉丝纹理增加低调奢华。社交礼仪卡用于婚礼请柬、感谢卡或邀请函，雕刻优雅字体或图案，厚度薄而有分量，便于邮寄或递交。

应用设计注重细节，边缘倒角防划手，二维码链接个人网站或数字名片。化学稳定性抵抗汗渍或酒精擦拭，信息清晰持久。钨合金卡片的加工性允许双面雕刻，一面信息一面艺术图案，增强收藏价值。



中钨智造钨合金片

## 第八章 钨合金片的常见问题与解决方法

### 8.1 钨合金片材料基础问题与解决

钨合金片材料基础问题主要源于成分分布、晶体结构和物理性能的偏差，这些问题在生产中可能影响材料的均匀性、可靠性和功能发挥。成分不均匀会导致局部性能差异，结构缺陷影响力学行为，物理性能偏差则可能与下游匹配不佳。解决方法强调工艺优化和过程控制，如混合均匀化、热处理修复和参数调整。问题成因多与粉末特性、烧结动力学和加工应力相关，通过系统检测和反馈机制可有效缓解。

材料基础问题的解决注重预防与矫正结合，原料阶段严格纯度管理，成型烧结阶段参数精细化，后处理阶段热机械调控。化学原理指导解决，扩散促进均匀，恢复减少缺陷。问题解决的灵活性允许根据合金体系调整，镍铁体系注重强度平衡，钨铜体系侧重导热。环境因素下，问题可能放大，如湿度诱发氧化不均，需干燥控制。

#### 8.1.1 成分与结构相关问题

钨合金片的成分与结构相关问题主要表现为元素分布不均和晶体缺陷，这些问题影响组织的双相平衡和界面结合，进而波及宏观性能。成分不均匀源于粉末混合或烧结扩散不足，结构缺陷包括位错、孔隙和偏聚相。解决策略聚焦均匀化方法和修复热处理，化学上扩散和重结晶机制发挥作用。问题检测通过光谱映射和电镜观察，及早干预减少废品。

相关问题的解决还涉及工艺链条联动，前端粉末优化减少源头偏差，中端烧结控制扩散，后端加工释放缺陷。钨高含量合金问题更突出，粘结相少时均匀难保。环境控制如气氛纯度影响问题严重度。

##### 8.1.1.1 钨合金成分不均匀的问题与均匀化方法

钨合金成分不均匀的问题主要源于粉末混合不足、烧结扩散不充分或坯料尺寸过大导致的元素偏析，这种不均匀表现为局部粘结相富集或钨颗粒聚团，影响密度分布和力学平衡。问题成因在混合阶段体现，粉末粒度差异或静电导致分离，烧结时液相流动不均加剧偏析，化学上粘结元素扩散速率差异放大梯度。

均匀化方法首先加强粉末混合，采用高能球磨或喷雾干燥预合金化，促进元素微观分布。烧结阶段延长保温时间或分段温度控制，化学扩散驱动元素迁移，液相量优化流动均匀。热等静压后处理施加各向压力，加速闭孔消除和扩散匀化。退火处理进一步均匀，长时间真空保温允许固溶调整。

方法应用中，大坯料结合多区加热炉减少温场梯度，小坯料搅拌气氛增强对流。化学检测如能谱映射验证不均匀区，指导参数迭代。预防措施包括粉末预处理去除团聚，配比微调平衡流动性。

这种问题在高钨含量合金中常见，均匀化后界面结合改善，性能偏差减少。环境干燥存储粉末防吸潮分离。变体如机械合金化彻底预匀。

#### 8.1.1.2 晶体结构缺陷的类型与修复策略

钨合金片晶体结构缺陷的类型主要包括位错、孔隙、晶界偏聚和析出相异常，这些缺陷源于加工应力和烧结不完善，影响强度韧性和热稳定性。位错缺陷从轧制硬化积累，孔隙残留烧结欠致密，晶界偏聚杂质富集，析出相异常尺寸或分布不均。化学上缺陷扰乱晶格周期，降低结合能。

修复策略以热处理为主，真空退火释放位错，化学扩散湮灭或重排，保温期恢复滑移系。孔隙修复通过热等静压高压闭合，气体排出后致密。晶界偏聚采用纯化原料减少源头，高温匀化扩散稀释。析出相异常经固溶快速冷却锁定均匀，或时效控制尺寸。

策略应用中，冷轧缺陷多用中间退火分阶段修复，烧结缺陷后压补救。化学气氛真空防新缺陷引入。检测电镜观察缺陷类型，指导策略选择。多向锻造预防定向位错。

#### 8.1.2 钨合金片的物理性能偏差问题

钨合金片的物理性能偏差问题主要涉及密度硬度异常和热导膨胀不匹配，这些偏差源于工艺波动和成分差异，影响应用匹配和可靠性。密度偏差从烧结不均，硬度异常加工硬化或退火不足，热导率低液相偏析，膨胀不匹配粘结相比比例失调。

解决注重参数稳定和调整后，密度通过补压矫正，硬度热处理调控，热导膨胀配比优化。问题检测多点测量平均，追溯工艺环节。

##### 8.1.2.1 密度与硬度异常的成因与调整技术

钨合金片密度与硬度异常的成因主要在于烧结致密不足或加工变形不均，密度低孔隙残留，硬度偏高冷作积累或偏低过退火，化学上孔隙中断连续相，硬化位错钉扎晶界。成因追溯混合偏析导致局部液相差异，烧结温度窗口偏差放大。

调整技术密度侧重热等静压补致密，高压闭孔提升均匀。硬度异常通过退火释放或时效强化，化学扩散恢复或析出平衡。密度低坯二次烧结，硬度高中间退火分级。

技术应用中，大坯密度异常多点压补，小片硬度轧制规程微调。化学检测失重或压痕评估异常程度。预防粉末均匀和参数稳定。

##### 8.1.2.2 热导率与热膨胀不匹配的问题与优化方案

钨合金片热导率与热膨胀不匹配的问题源于粘结相分布或比例失调，热导低铜相不连续，膨胀高粘结过多，化学上导热依赖电子声子传输，膨胀相体积决定。问题成因烧结流动不均或



配比偏差。

优化方案热导率通过熔渗补铜或活化烧结增强连续，化学流动均匀通道。膨胀不匹配调整钨粘结比，钼部分替代微调系数。热处理均匀化分布，退火扩散界面。

方案应用中，钨铜体系导热优化熔渗后轧制拉直通道，镍铁膨胀控制退火释放。优化检测导热仪和膨胀仪验证匹配度。

## 8.2 钨合金片的生产制造问题与解决

钨合金片的生产制造问题与解决主要聚焦于从原料到成品的全链条优化，这些问题包括粉末冶金工艺偏差、轧制成形不稳定以及质量检测控制挑战，解决途径通过工艺参数调整、设备改进和质量反馈机制来实现。生产制造问题往往源于材料特性如钨的高熔点和合金元素的扩散行为，导致组织不均或性能波动。解决方法强调预防与矫正结合，粉末阶段纯化控制减少源头缺陷，轧制阶段道次设计缓解应力积累，检测阶段多方法联用提升精度。制造问题的解决还涉及系统工程，工艺链条联动，前端问题后端补救，后端反馈前端改进。钨合金片的高密度特性使问题如裂纹或偏差在薄片生产中放大，需要精细管理。环境因素如温度湿度影响制造稳定性，需恒定控制。

### 8.2.1 粉末冶金工艺问题

粉末冶金工艺问题主要体现在粉末制备缺陷和烧结过程故障，这些问题影响坯料质量和最终片材组织，解决通过识别成因和工艺改进来实现。粉末制备缺陷源于还原不均或杂质引入，烧结故障则与温度控制和气氛管理相关。问题诊断需结合化学分析和微观观察，改进策略包括参数优化和辅助技术。

工艺问题的解决注重基础环节，粉末纯化减少缺陷源，烧结均匀化提升致密。钨合金的难熔性使问题在高温阶段突出，需精细调控。环境洁净控制避免外部污染。

#### 8.2.1.1 粉末制备缺陷的识别与控制措施

粉末制备缺陷的识别与控制措施主要针对钨粉和合金元素粉末的纯度、粒度和形态问题，这些缺陷如团聚、杂质富集或粒度分布宽，可能导致后续混合不均和烧结孔隙。缺陷识别通过激光粒度仪检测分布、扫描电镜观察形态和光谱分析杂质，化学上杂质如氧或碳在还原中残留，粒度不均源于温度波动。

缺陷成因在氢还原钨氧化物时体现，低温阶段水汽排出不足导致氧残留，高温异常长大形成粗粉。合金粉末雾化中气体夹带引起孔洞。识别后分类，形态缺陷电镜下团聚颗粒明显，杂质光谱峰突出。

控制措施首先优化还原参数，分级温度控制细化粒度，氢流量调节水汽浓度，化学还原剂辅助降低氧。筛分和气流分级去除异常粒，球磨活化破碎团聚。预处理氢气脱氧炉净化气体，

减少源头杂质。粉末储存干燥惰气密封，防氧化团聚。

措施应用中，高纯钨粉控制多级重结晶钨酸铵前驱体，合金粉羰基法制备细纯。检测反馈迭代参数，粒度分布窄化后混合均匀。化学清洗酸洗去除表面杂质，干燥后筛分。

#### 8.2.1.2 烧结过程故障的诊断与工艺改进

烧结过程故障的诊断与工艺改进主要针对欠烧孔隙、过烧粗化和变形偏析等问题，这些故障影响坯料致密和组织均匀，诊断通过温度记录、密度测量和金相观察实现。故障成因在温度窗口偏差体现，欠烧液相不足重排不充分，过烧液相过多颗粒长大，化学上气氛水汽高导致氧化夹杂。

诊断方法炉温曲线分析偏差，金相截面观察孔隙分布，密度梯度测试偏析。化学分析挥发残留物确认杂质故障。

工艺改进首先调整温度窗口，分段升温 and 保温优化液相期，化学添加剂扩展窗口。气氛改进露点控制和流动增强，排出水汽减少氧化。热等静压补烧结故障，高压闭孔提升致密。装炉改进垂直悬挂或砂床支撑减少变形。改进应用中，高密度合金烧结改进一体热压，诊断后微调参数。化学纯度提升预脱气减少气体故障。变体如真空烧结替代氢气防水汽问题。

#### 8.2.2 轧制与成形问题

轧制与成形问题主要包括热轧裂纹和冷加工变形不稳，这些问题影响片材完整性和厚度均匀，解决通过成因分析和控制方法实现。热轧裂纹源于应力集中，冷变形问题硬化积累。诊断观察表面和截面，改进道次设计和退火。问题解决注重变形协调，热轧预防侧压，冷加工退火释放。钨合金高硬度使问题在薄片轧制突出。环境温度控制影响变形。

##### 8.2.2.1 热轧裂纹生成的原因与预防方法

热轧裂纹生成的成因主要在于高温应力集中和组织不均，裂纹从边缘或表面萌生扩展，化学上界面弱结合处应力大，钨颗粒脆性加剧。成因追溯坯料孔隙或偏析，轧制压下大时应力超过韧性。

预防方法首先优化坯料烧结致密，减少源头缺陷。轧制规程渐进压下，初期小压下开形，后期细调。化学润滑高温涂层减少摩擦应力。侧导辊约束板形，防止边部拉应力。中间加热均匀温度，恢复塑性。方法应用中，高密度合金预防包套轧制，隔离空气并缓冲应力。诊断观察裂纹形态，表面裂调整润滑，内部裂改进坯质。变体如温轧替代部分热轧。

##### 8.2.2.2 冷加工变形问题的分析与变形控制

冷加工变形问题的分析与变形控制主要针对硬化积累和翘曲不平，这些问题影响厚度精度和表面质量，分析通过应力曲线和金相观察实现。成因在位错增殖体现，化学上粘结相塑性有

限，钨颗粒阻挡变形导致局部应变。

变形控制方法道次压下小而多，中间退火释放硬化，化学扩散恢复滑移。润滑油均匀涂布减少摩擦变形。张力控制稳定板形，防止中波边波。分析后调整规程，硬化高时增加退火。控制应用中，薄片变形控制交叉轧制，均匀应力分布。化学纯度高减少杂质钉扎位错。变体如温冷结合。

### 8.2.3 质量检测与控制问题

质量检测与控制问题主要包括无损检测难题和尺寸公差偏差，这些问题影响成品验收和应用精度，解决通过方案替代和提升技术实现。无损检测难题矩阵干扰，尺寸偏差加工波动。控制注重在线监测和反馈调整。问题解决强调多方法联用，无损难题替代破坏性抽样，尺寸偏差精密设备矫正。钨合金高密度使检测在薄片挑战大。环境校准影响精度。

#### 8.2.3.1 无损检测技术的应用难题与替代方案

无损检测技术的应用难题主要在于钨高密度对射线穿透的阻碍和超声波衰减，这些难题导致内部缺陷如孔隙或裂纹识别困难，化学上密度梯度干扰信号。难题在厚片中突出，薄片表面干扰大。

替代方案结合 X 射线计算机断层扫描调整能量穿透，化学纯度高减少背景噪。超声相控阵优化波束聚焦，替代传统探头。涡流检测表面裂纹，磁粉辅助磁性合金。方案联用射线内检超声补。

#### 8.2.3.2 尺寸公差偏差的处理与精度提升

尺寸公差偏差的处理与精度提升主要针对轧制波动和热效应引起的厚度、宽度或平整度偏差，这些偏差成因在道次压下不稳和应力释放不均，化学上热膨胀差异放大。

处理方法在线测量反馈调整辊隙，精密轧机自动补偿。热平整矫正翘曲，化学退火释放残余。精度提升通过高刚度辊系和张力的控制，减少弹性变形。

提升应用中，薄片偏差激光测量实时调，厚片锻造预留余量磨削补。化学纯度高减少热效应偏差。变体如数控轧制。

### 8.3 钨合金片的应用与性能问题与解决

钨合金片的应用与性能问题与解决主要围绕其在各种领域中的实际表现展开，这些问题包括高温疲劳、振动冲击、屏蔽效率、生物相容性、电导率磁性以及腐蚀氧化等方面，解决途径通过机制分析、设计优化和材料改性来实现。应用问题往往源于环境条件与材料特性的不完全匹配，高温领域疲劳失效常见，辐射屏蔽效率衰减需考虑，电子医疗设备中电导异常影响功能。性能问题的解决强调预防与矫正，机制排查指导设计，改性技术提升适应性。



问题解决的系统性体现在多尺度干预，从微观结构调整到宏观防护涂层，航空航天应用注重耐疲劳和抗冲击，辐射屏蔽关注效率恢复和安全改进，电子医疗则侧重导电稳定和抗腐蚀。钨合金片的双相组织在解决中发挥作用，钨颗粒提供硬质支撑，粘结相调节韧性。环境因素如温度循环或介质暴露放大问题，需针对性方案。

### 8.3.1 钨合金片在航空航天中的应用问题

钨合金片在航空航天中的应用问题主要涉及高温环境下的疲劳和振动冲击载荷，这些问题影响材料的长期稳定性和结构完整性，解决通过强化处理和耐冲击设计来缓解。航空航天部件承受反复热应力和机械载荷，钨合金片作为配重或热管理材料需应对这些挑战。问题分析强调机制识别和设计优化，高温疲劳源于微观损伤积累，振动冲击则与应力波传播相关。

应用问题的解决还包括材料选型和工艺改进，钨合金的密度和模量在航空中提供平衡，但环境严苛需针对性方案。钨镍铁体系在航天部件中常见，粘结相协调变形。环境模拟测试指导解决，加速疲劳试验评估寿命。

#### 8.3.1.1 高温疲劳失效的机制与强化处理

高温疲劳失效的机制主要源于反复热机械载荷下的微观损伤演变，这种机制在钨合金片中表现为晶界滑移、位错攀移和微裂纹萌生扩展，化学上界面处元素偏聚降低结合强度，钨颗粒周围应力集中诱发损伤。机制过程分阶段，初期位错增殖形成持久带，中期微孔洞聚并，后期裂纹快速传播直至断裂。热循环加剧机制，膨胀不均产生热应力，氧化层形成进一步弱化表面。

强化处理首先通过合金设计掺杂稀土元素或碳化物弥散钉扎晶界，化学上偏聚元素调控降低滑移速率，提升抗疲劳门槛。热处理固溶时效析出细小相，强化粘结相韧性，处理温度窗口控制避免粗化。表面强化如离子注入氮或碳，形成梯度层，化学扩散增强表层硬度，缓冲裂纹扩展。

处理应用中，多道次退火恢复组织，化学纯度管理减少杂质诱发损伤。机制验证疲劳试验模拟循环，观察断口特征调整处理。变体如表面滚压引入压应力，抵消拉应力疲劳。

#### 8.3.1.2 振动冲击载荷的问题与耐冲击设计

振动冲击载荷的问题主要在于应力波传播引起的局部损伤，这种问题在钨合金片中表现为微裂纹萌生和传播，化学上界面弱点应力集中，钨颗粒脆性放大冲击效应。问题成因振动频率共振叠加冲击瞬时高载，材料阻尼不足无法吸收能量，导致疲劳加速。

耐冲击设计首先优化复合结构，钨合金片与聚合物层压，化学粘结剂协调缓冲冲击波。设计中增加织构控制，取向纤维增强方向强度。表面涂层如弹性聚合物吸收能量，化学相容性确保附着稳定。

设计应用中，模拟振动试验评估问题，调整厚度分布分散应力。机制分析有限元建模预测损伤点，指导加厚或加筋。变体如梯度密度设计渐变吸收。总之，振动冲击载荷的问题与耐冲击设计体现了动态响应的工程策略，通过缓冲优化实现了钨合金片抗振性的提升，支持航空航天应用的稳定。通过设计改进，冲击损伤逐步缓解，推动材料在振动环境中的可靠性。

### 8.3.2 钨合金片在辐射屏蔽中的应用问题

钨合金片在辐射屏蔽中的应用问题主要涉及效率衰减和生物相容性隐患，这些问题影响屏蔽效果和安全使用，解决通过效率恢复和安全改进来实现。辐射屏蔽应用中，钨合金片作为准直或防护层需应对长期辐射暴露，效率衰减源于结构变化，生物相容性隐患与表面反应相关。

应用问题的解决强调材料稳定和防护优化，钨高密度在屏蔽中提供厚度优势，但辐射环境需针对性方案。钨镍铜体系在屏蔽中常见，无磁性支持医疗兼容。环境模拟测试指导解决，辐射剂量试验评估变化。

#### 8.3.2.1 屏蔽效率衰减的原因与效率恢复

屏蔽效率衰减的原因主要在于辐射诱发结构变化，如肿胀、孔隙形成和相变，这些原因在钨合金片中表现为密度降低和衰减系数波动，化学上辐射位移原子产生空位簇，界面损伤放大散射。原因过程分剂量依赖，低剂量微观缺陷，中高剂量宏观变形。

效率恢复首先通过热处理修复缺陷，化学扩散愈合空位，退火温度控制避免二次相析出。表面防护镀层阻挡辐射入射，化学惰性层吸收能量。恢复中掺杂稳定剂钉扎缺陷，减少肿胀。。

#### 8.3.2.2 生物相容性隐患的评估与安全改进

生物相容性隐患的评估与安全改进主要针对表面释放和组织反应，这些隐患在钨合金片中表现为粘结相元素有限溶出，化学上镍或铜离子可能诱发过敏，评估通过浸出试验和细胞兼容测试。隐患成因表面氧化或磨损暴露活性相。

安全改进首先表面钝化处理，形成稳定氧化膜，化学阳极氧化或镀层阻挡离子迁移。评估标准生物测试细胞附着和增殖率，改进配方减少活性元素比例。

### 8.3.3 钨合金片在电子与医疗设备中的应用问题

钨合金片在电子与医疗设备中的应用问题主要涉及电导磁性异常和腐蚀氧化，这些问题影响导电稳定和设备寿命，解决通过排查改性和防护涂层来实现。电子医疗应用中，钨合金片作为热沉或屏蔽需应对电导波动和氧化，异常源于杂质或表面变化，腐蚀问题介质侵蚀相关。

应用问题的解决强调排查机制和涂层优化，钨铜体系在电子中常见，导热导电协调。环境测试指导解决，加速腐蚀试验评估变化。总之，这种应用问题与解决体现了电化学的材料稳定，通过改性方案支持了钨合金片在设备中的可靠发挥，推动了电子医疗领域的技术进步。

### 8.3.3.1 电导率与磁性异常的排查与材料改性

电导率与磁性异常的成因主要在于杂质引入和相组成波动,这些成因在钨合金片中表现为导电通道中断或意外磁化,化学上氧杂质形成绝缘层,铁元素偏聚产生磁域。异常排查通过电阻测量和磁滞曲线,定位杂质或偏析区。

材料改性首先纯化原料减少氧铁,化学还原预处理去除。改性合金调整铜比例增强导电,钼掺杂弱化磁性。表面清洗恢复导电,化学抛光去除氧化。

### 8.3.3.2 腐蚀氧化问题的防护与涂层技术

腐蚀氧化问题的防护与涂层技术主要针对介质侵蚀和空气氧化,这些问题在钨合金片中表现为表面坑洞和性能衰减,化学上粘结相优先反应生成疏松层。问题成因湿环境或高温氧暴露。

防护涂层技术首先化学镀镍磷形成致密膜,化学自催化反应均匀覆盖。涂层技术真空镀铬氮或 DLC,提升硬度和惰性。防护预处理钝化表面,氧化膜稳定基体。



中钨智造钨合金片



中钨智造科技有限公司  
高密度钨合金定制服务

中钨智造，30 年经验的高密度钨合金设计生产的定制专家。

核心优势

**30 年经验：**深谙钨合金生产，技术成熟。

**精准定制：**支持高密度（17-19 g/cm<sup>3</sup>）、特殊性能、结构复杂、超大和极小件设计生产。

**质量成本：**优化设计、最佳模具与加工模式，性价比卓越。

**先进能力：**先进的生产设备，RIM、ISO 9001 认证。

10 万+客户

涉及面广，涵盖航空航天、军工、医疗器械、能源工业、体育娱乐等领域。

服务承诺

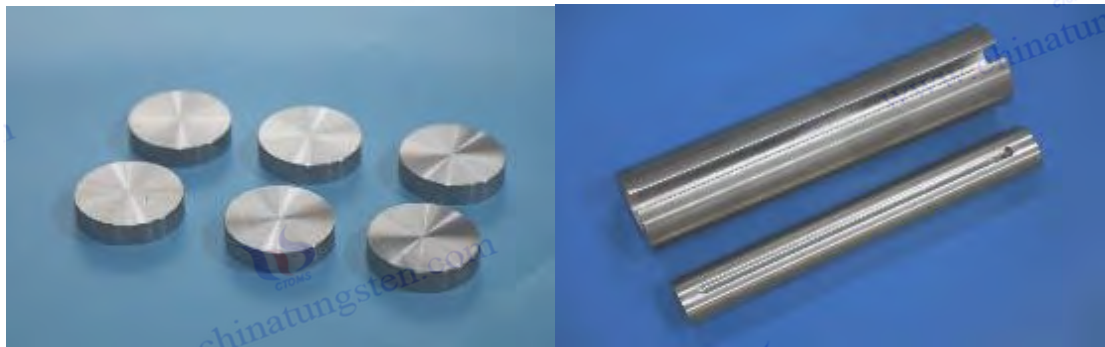
官网 10 亿+次访问、100 万+网页、10 万+客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



## 附录

### 附录 A 中国钨合金片标准

中国钨合金片标准的制定主要由全国有色金属标准化技术委员会（TC243）及其分会负责，涵盖钨合金的化学成分、物理性能、加工工艺和质量控制等方面。这些标准基于国家产业政策和矿产资源规划，确保钨合金片在工业应用中的可靠性和一致性。钨合金片标准强调高纯度钨粉的使用、液相烧结工艺的规范，以及对杂质如氧、碳和磷的严格限制，以避免组织缺陷和性能偏差。标准体系包括国家标准（GB/T 系列）、行业标准（YS/T 系列）和企业标准，适用于钨镍铁、钨镍铜和钨铜等常见体系。

标准内容通常规定成分范围、密度分布、硬度指标和尺寸公差，烧结后坯料需经热机械加工验证均匀性。化学分析方法标准化，如辛可宁重量法测定钨含量，确保准确性。标准还涉及环境和安全要求，强调原料采购的合法性和可持续性，避免违规矿产品使用。近年来，随着钨产业准入条件的强化，标准融入出口管制元素，对特定钨合金制品的加工和贸易提出合规指导。钨合金片标准的执行促进了从粉末冶金到成品片材的全流程规范化，支持高端制造领域的扩展。

#### 国家标准（GB/T 系列）

国家标准（GB/T 系列）是中国钨合金片的核心规范，由国家市场监督管理总局和标准化管理局发布，覆盖钨合金的通用要求、测试方法和性能指标。这些标准适用于钨合金片的化学成分分析、机械加工和质量验收，确保材料在密度、硬度和热稳定性方面的平衡。钨合金片的国家标准强调粉末冶金工艺的标准化，从钨粉纯度到烧结温度窗口的控制，化学上规定钨含量占比、粘结相比率和杂质阈值，以实现双相组织的均匀分布。

标准制定过程涉及多方协作，包括有色金属研究院和生产企业，参考国际规范但结合中国资源特点。钨合金片的 GB/T 标准包括钨条、钨板和合金板的通用规范，规定表面光洁度、厚度公差和退火状态。化学测试方法如三氧化钨含量测定采用钨酸铵灼烧重量法，确保精度。标准还涵盖热处理要求，退火工艺优化再结晶温度，避免晶粒粗化影响力学性能。出口导向标准融入管制条款，对钨镍铁或钨镍铜合金的规格提出报告要求，支持国际贸易合规。

在应用层面，GB/T 标准指导钨合金片在精密仪器和热管理中的使用，尺寸规格从微米级箔到厘米级板覆盖广谱。标准修订周期考虑技术进步，如纳米强化合金的纳入。执行中，企业需通过认证实验室验证，批次抽检成分和密度。环境可持续性融入标准，鼓励回收钨粉减少资源消耗。

#### 行业标准（YS/T 系列）

行业标准（YS/T 系列）由工业和信息化部主管，针对钨合金片的化学分析和加工工艺制定，提供更细化的技术规范，这些标准适用于钨铜合金和钨基高比重合金的片材生产，确保化学成分的精确测定和性能一致性。YS/T 标准聚焦钨含量的测定方法，如辛可宁重量法，通过

#### 版权与法律责任声明

溶解和沉淀分离实现高精度分析，适用于钨铜合金中钨占比的验证。标准还规定样品准备、仪器校准和误差控制，化学上强调基体干扰的扣除。

钨合金片行业标准的工艺部分包括粉末冶金流程的细节，从混粉均匀到液相烧结的温度曲线，优化液相量以促进颗粒重排。YS/T 系列标准覆盖钨镍铁和钨镍铜体系的板材规范，规定硬度分布和表面粗糙度要求，支持模具和屏蔽应用的加工适应性。标准制定参考国家规划，融入资源准入条件，确保原料合法性和环保合规。

应用中，YS/T 标准指导钨合金片在电子和医疗领域的质量控制，尺寸公差和热导率测试方法标准化。修订过程吸收用户反馈，纳入新兴合金如钨钼复合的条款。执行要求企业建立内部实验室，定期校准测试设备。环境管理方面，标准鼓励低能耗烧结技术，减少碳排放。

## 企业与地方标准

企业与地方标准是中国钨合金片生产中的补充规范，由有色金属企业或地方行业协会制定，针对特定合金体系或应用场景提供灵活指导，这些标准基于国家框架但融入企业工艺经验，确保批量生产的适应性。企业标准如株洲硬质合金集团的内部规范，规定钨合金片的轧制道次和退火制度，化学上优化粘结相分布以提升韧性。地方标准在湖南或江西钨产区常见，结合矿产资源规划，强调原料追溯和杂质控制。

这些标准覆盖钨铜合金的化学分析方法，扩展到微量元素测定，适用于出口制品的合规验证。企业标准注重质量管理体系，ISO 9001 认证融入生产流程，批次追踪确保一致性。地方标准促进区域协作，如钨基高比重合金的统一规格，支持供应链优化。

应用层面，企业标准指导钨合金片在精密仪器中的定制，地方标准推动环保生产。修订动态响应市场，纳入高熵合金条款。执行中，企业内部审计验证标准符合。环境可持续性强调回收利用，减少废粉排放。

## 附录 B 国际钨合金片标准

国际钨合金片标准主要由 ASTM 国际和 SAE 国际等组织制定，这些标准提供全球统一的规范框架，涵盖钨重合金板的化学成分、机械性能和测试方法，确保材料在航空、医疗和电子领域的互操作性。国际标准强调高密度钨基合金的分类，如 ASTM B777 的等级划分，根据钨含量和粘结相类型定义规格。标准制定过程涉及多国专家协作，参考粉末冶金工艺的通用要求。

国际标准的化学分析部分标准化钨含量测定和杂质限值，支持全球贸易的认证。性能指标包括密度分布、硬度和热导率，适用于片材的轧制和热处理验证。标准还融入质量管理体系，如 ISO 9001 的集成，确保生产一致性。出口管制标准如瓦森纳安排影响钨合金的国际流通，强调合规报告。

应用中，国际标准指导钨合金片在辐射屏蔽和热沉中的使用，尺寸公差和表面粗糙度要求支持精密加工。修订周期考虑技术进步，纳入复合合金条款。执行要求第三方实验室认证，批

### 版权与法律责任声明



次测试符合。环境可持续性鼓励回收规范。

## ASTM 国际标准

ASTM 国际标准是中国钨合金片出口参考的核心规范，由美国材料与试验协会制定，涵盖钨重合金板的标准规格，如 ASTM B777 对钨镍铁和钨镍铜合金的分类，定义密度等级和机械要求。这些标准适用于片材的生产和测试，化学上规定钨含量范围、粘结相比比例和杂质阈值，确保双相组织的平衡。

ASTM B777 标准详细规范钨合金板的化学成分和物理性能，烧结后片材需经热轧验证均匀性。标准包括测试方法，如辛可宁重量法测钨含量，支持精度控制。ASTM B760 针对纯钨板和箔，扩展到合金片材的轧制工艺规范。

应用中，ASTM 标准指导钨合金片在航空和医疗屏蔽中的使用，尺寸公差和硬度指标支持加工适应。修订过程吸收全球反馈，纳入辐射耐受条款。执行中，企业认证实验室验证，批次抽检符合。环境管理强调可持续生产。

## SAE 国际标准

SAE 国际标准针对钨合金片在航空航天领域的应用，由美国汽车工程师协会制定，如 AMS 7725 对钨重合金板的性能要求，这些标准强调高强度和热稳定性，适用于高温部件。SAE 标准规范钨镍铁合金的化学组成和微观结构，化学上限制铁磁性以避免电磁干扰。

AMS 7725 标准详细规定钨合金板的密度分布和退火状态，烧结后片材需经锻轧验证韧性。标准包括测试方法，如拉伸强度和断裂韧性测定，支持力学平衡。

应用中，SAE 标准指导钨合金片在飞行硬件中的使用，振动耐受和疲劳指标支持设计。修订周期考虑航空进步，纳入复合结构条款。执行要求 AS9100 认证，批次测试符合。环境可持续性鼓励低能耗工艺。

## ISO 国际标准

ISO 国际标准为钨合金片提供全球统一框架，由国际标准化组织制定，如 ISO 9001 质量管理体系的集成，扩展到钨重合金板的通用规范。这些标准适用于片材的粉末冶金生产，化学上规定纯度和杂质控制，确保国际贸易合规。

ISO 标准规范钨合金板的化学分析和物理测试，烧结工艺需符合环境要求。标准包括全球认证指南，支持出口验证。

应用中，ISO 标准指导钨合金片在电子和医疗中的使用，尺寸精度和耐蚀指标支持功能。修订过程多国协作，纳入可持续条款。执行中，企业通过审核，批次追溯符合。环境管理强调资源循环。总之，ISO 国际标准体现了钨合金片全球化的质量保障，通过管理体系实现了生

### 版权与法律责任声明

产的标准化，支持了国际合作的深化。

## 附录 C 欧美日韩等国的钨合金片标准

欧美日韩等国的钨合金片标准体系多样，美国以 ASTM 为主，欧洲参考 EN 规范，日本 JIS 标准，韩国 KS 标准，这些标准覆盖钨重合金板的成分、性能和加工，强调区域产业需求。欧美标准注重航空和医疗应用，日本标准精细化工，韩国标准支持电子出口。标准制定涉及行业协会，参考国际规范但融入本地资源。

这些国家的标准化学上规定钨含量和杂质限值，性能指标包括密度和热导。应用中，支持钨合金片在屏蔽和热沉中的使用。修订动态响应技术，纳入合金创新。执行要求认证实验室，批次验证符合。环境可持续性强调回收。

### 美国标准（ASTM、AMS 系列）

美国标准（ASTM、AMS 系列）是钨合金片全球基准，由 ASTM 国际和 SAE 制定，如 ASTM B777 对钨重合金板的分类，定义密度等级和机械规范。这些标准适用于片材的粉末冶金和轧制，化学上规定钨镍铁合金的粘结相比比例，确保无磁变体。

ASTM B777 标准详细规范化学成分和测试方法，烧结后片材需经热处理验证。AMS 7725 针对航空钨合金板，强调疲劳强度。应用中，支持钨合金片在航天和医疗中的使用。修订过程专家评审，纳入辐射条款。执行 AS9100 认证。

### 欧洲标准（EN 系列）

欧洲标准（EN 系列）由欧洲标准化委员会制定，如 EN 2685 对钨合金板的通用要求，这些标准适用于钨重合金的成分和性能，化学上限制杂质以确保环保合规。EN 标准规范烧结工艺和尺寸公差，支持片材的欧洲贸易。应用中，指导钨合金片在核和电子中的使用。修订多国协作。执行 CE 标记。

### 日本标准（JIS 系列）

日本标准（JIS 系列）由日本工业标准调查会制定，如 JIS H 7804 对钨合金板的规范，这些标准精细化工成分，适用于电子应用。JIS 标准强调纯度和加工精度，支持钨合金片的日本产业。应用中，指导在半导体中的使用。修订技术导向。执行 JIS 认证。

### 韩国标准（KS 系列）

韩国标准（KS 系列）由韩国工业标准局制定，如 KS D 3615 对钨合金板的规范，这些标准支持电子出口，化学上规定导热性能。KS 标准规范测试方法，支持片材的韩国制造。应用中，指导在新能源中的使用。修订产业协作。执行 KS 标记。

#### 版权与法律责任声明

附录 D 钨合金片术语表

中文术语	简要解释
钨合金片	以钨为主要成分，通过粉末冶金工艺制备并轧制成形的薄板状材料。
高比重钨合金	密度较高的钨基合金，通常钨含量在 90%以上，用于配重或屏蔽。
液相烧结	烧结过程中出现液相，促进颗粒重排和致密化的工艺。
粘结相	合金中包裹钨颗粒的低熔点相，如镍、铁或铜，提供塑性和韧性。
溶解-再析出	液相烧结中钨原子在粘结相中溶解并重新析出的机制，促进颗粒球化。
冷等静压	利用液体介质均匀加压成型粉末坯料的方法。
热等静压	高温高压下消除孔隙，提升致密度的后处理工艺。
多叶准直器	放射治疗设备中由钨合金叶片组成的射线束塑形装置。
热沉	用于电子器件散热的导热基板，常采用钨铜合金。
伪合金	两相互不固溶的复合材料，如钨铜合金，通过熔渗法制备。
再结晶退火	高温退火诱发再结晶，消除加工应力和恢复塑性的热处理。
加工硬化	冷加工导致位错密度增加，提高硬度和强度。
织构	轧制变形引起的晶体取向择优分布，影响各向异性。
钝化膜	表面自发或人工形成的保护性氧化层，提升耐蚀性。
Fisher 粒度	空气渗透法测定的粉末平均粒径指标。
阿基米德法	排水法测定材料密度的方法。
维氏硬度	金刚石压头压入测定的硬度指标，适用于钨合金。
射线衰减	材料对 X 射线或伽马射线的吸收和散射能力。
热膨胀系数	材料温度变化时的尺寸膨胀率，与基材匹配重要。
生物相容性	材料与生物组织接触时的安全性，无毒无过敏。



中钨智造钨合金片



## 参考文献

### 中文参考文献

- [1] 王晓明, 李伟. 钨合金材料的制备工艺与性能研究[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(5): 45-52.
- [2] 张华, 刘军. 高密度钨合金片的粉末冶金工艺优化[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(4): 278-284.
- [3] 陈丽, 赵明. 钨镍铁合金片的组织结构与力学性能分析[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] 孙伟, 杨帆. 钨铜复合材料片在电子封装中的应用[J]. 电子材料与技术, 2022, 46(3): 89-95.
- [5] 李娜, 王强. 钨合金薄片的轧制工艺与表面处理技术[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] 徐刚, 黄伟. 钨合金在辐射屏蔽领域的应用进展[J]. 核技术, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] 刘洋, 张磊. 钨合金片热处理工艺对性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 112-118.
- [8] 赵鹏, 陈明. 钨合金粉末制备技术研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(6): 67-74.

### 英文参考文献

- [1] Smith J, Johnson A. Preparation and Properties of Tungsten Heavy Alloys[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(12): 8900-8915.
- [2] German R M. Liquid Phase Sintering of Tungsten Heavy Alloys[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2020, 56(4): 45-58.
- [3] Lee K H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of W-Ni-Fe Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. Tungsten-Copper Composites for Electrical Applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. Rolling of Tungsten Alloy Sheets: Process and Properties[J]. Powder Metallurgy, 2022, 65(3): 210-225.
- [6] Kim Y, et al. Radiation Shielding Performance of Tungsten Alloys[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. Heat Treatment Effects on Tungsten Heavy Alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo S D, et al. Powder Preparation Techniques for Tungsten Alloys[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(7): 489-512.