

# 什么是钨铜合金

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](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。



### 版权与法律责任声明

## 目录

### 第一章 引言

- 1.1 钨铜合金的概述
  - 1.1.1 钨铜合金的定义
  - 1.1.2 合金成分构成
- 1.2 钨铜合金的历史溯源与发展进程
  - 1.2.1 早期探索
  - 1.2.2 关键技术突破节点
  - 1.2.3 现代发展态势

### 第二章 钨铜合金的特点

- 2.1 钨铜合金的特性剖析
  - 2.1.1 高硬度形成机制与优势
    - 2.1.1.1 微观结构机制
    - 2.1.1.2 耐磨应用优势
    - 2.1.1.3 与其他合金硬度对比及优势
  - 2.1.2 抗电弧侵蚀原理与性能
    - 2.1.2.1 电弧侵蚀机制
    - 2.1.2.2 抗电弧侵蚀内在原理
    - 2.1.2.3 不同使用环境下的性能差异
    - 2.1.2.4 性能提升途径
  - 2.1.3 抗粘连、抗焊接能力分析
    - 2.1.3.1 粘连与焊接成因
    - 2.1.3.2 抗粘连性能表现
    - 2.1.3.3 影响抗粘连与抗焊接能力的因素
  - 2.1.4 优良导电性原理与应用
    - 2.1.4.1 导电性物理本质与导电机制
    - 2.1.4.2 不同成分比例下的导电性变化
    - 2.1.4.3 电气设备中的导电应用优势
  - 2.1.5 良好导热性特性
    - 2.1.5.1 导热性基本原理与导热机制
    - 2.1.5.2 导热性与散热效果的关联
    - 2.1.5.3 高温工作环境中的导热应用价值
  - 2.1.6 耐腐蚀性能与机制
    - 2.1.6.1 不同腐蚀环境的影响
    - 2.1.6.2 耐腐蚀内在机制
    - 2.1.6.3 提升耐腐蚀性的技术手段
- 2.2 成分比例对钨铜合金性能的影响
  - 2.2.1 对力学性能的影响
    - 2.2.1.1 对硬度的影响
    - 2.2.1.2 对强度的影响

- 2.2.1.3 对韧性的影响
- 2.2.2 对物理性能的影响
  - 2.2.2.1 对密度的影响
  - 2.2.2.2 对熔点的影响
  - 2.2.2.3 对热膨胀系数的影响
  - 2.2.2.4 对电导率的影响
  - 2.2.2.5 对热导率的影响
- 2.2.3 对化学性能的影响
  - 2.2.3.1 对耐腐蚀性的影响
  - 2.2.3.2 对耐高温氧化性的影响
- 2.3 中钨智造钨铜合金 MSDS

### 第三章 钨铜合金的微观结构与性能关联

- 3.1 钨铜合金的微观结构特征洞察
  - 3.1.1 晶粒形态与尺寸
  - 3.1.2 相分布与界面
  - 3.1.3 孔隙与缺陷表现
  - 3.1.4 不同制备工艺下的结构差异
- 3.2 钨铜合金微观结构与性能的内在联系
  - 3.2.1 晶粒结构对强度的作用机制
  - 3.2.2 晶粒结构对韧性的作用机制
  - 3.2.3 相分布与电导率的关联
  - 3.2.4 相分布与热导率的关联
  - 3.2.5 孔隙与缺陷对硬度的影响
  - 3.2.6 孔隙与缺陷对耐腐蚀性的影响
- 3.3 钨铜合金微观结构的演变规律
  - 3.3.1 成分比例变化引发的演变
  - 3.3.2 热处理过程中的结构转变
  - 3.3.3 使用环境对结构的反馈
  - 3.3.4 使用环境对性能的反馈
- 3.4 钨铜合金微观结构的调控策略
  - 3.4.1 基于制备工艺的控制方法
  - 3.4.2 合金元素添加的优化手段
  - 3.4.3 结构调控与性能的关系

### 第四章 钨铜合金制备工艺

- 4.1 真空熔渗制备钨铜合金
  - 4.1.1 熔渗原理与设备要求
  - 4.1.2 工艺步骤与参数优化
  - 4.1.3 工艺的优势与局限

### 第五章 钨铜合金的性能测试与表征方法

#### 版权与法律责任声明

- 5.1 钨铜合金的物理性能测试
  - 5.1.1 密度测试方法
  - 5.1.2 硬度测试标准与操作
  - 5.1.3 电导率测试方法
  - 5.1.4 热导率测试方法
- 5.2 钨铜合金的化学性能评估
  - 5.2.1 耐腐蚀性测试环境与方法
  - 5.2.2 抗氧化性能测试方法
- 5.3 钨铜合金微观结构的表征技术
  - 5.3.1 金相显微镜观测方法
  - 5.3.2 扫描电镜分析应用
  - 5.3.3 X射线衍射结构分析

## 第六章 钨铜合金的多元应用领域

- 6.1 钨铜合金在电气领域应用
  - 6.1.1 低压电源开关中的应用
    - 6.1.1.1 低压电源开关核心部件对材料的性能要求
    - 6.1.1.2 钨铜合金在触头组件中的应用形式
    - 6.1.1.3 应用后对低压电源开关使用寿命的提升效果
  - 6.1.2 高压开关中的应用
    - 6.1.2.1 高压开关工作环境及核心部件的材料耐受标准
    - 6.1.2.2 钨铜合金适配高压开关需求的性能体现
    - 6.1.2.3 不同电压等级高压开关中钨铜合金的应用差异
  - 6.1.3 继电器与空气断路器中的应用
    - 6.1.3.1 继电器对材料的抗磨损要求及钨铜合金适配性
    - 6.1.3.2 钨铜合金在继电器中的安装位置及功能实现
    - 6.1.3.3 空气断路器灭弧系统的材料性能需求
    - 6.1.3.4 钨铜合金在空气断路器灭弧室的应用原理
  - 6.1.4 隔离开关与接地开关中的应用
    - 6.1.4.1 隔离开关长期暴露环境下的材料耐候性要求
    - 6.1.4.2 钨铜合金在隔离开关导电接触部分的应用设计
    - 6.1.4.3 接地开关承受短路电流时的材料强度与导电性需求
    - 6.1.4.4 钨铜合金保障接地开关安全运行的机制
    - 6.1.4.5 隔离开关与接地开关中钨铜合金的选型标准
- 6.2 钨铜合金在电子领域应用
  - 6.2.1 电火花加工电极的性能要求与钨铜合金的优势
    - 6.2.1.1 电火花加工工艺对电极材料的性能指标要求
    - 6.2.1.2 不同加工场景下的电极性能差异需求
    - 6.2.1.3 钨铜合金在导电性与耐磨性方面的适配性分析
    - 6.2.1.4 相比传统电极材料的性能优势对比
    - 6.2.1.5 常见电火花加工设备中钨铜合金电极的选型标准
  - 6.2.2 在微电子领域的作用

### 版权与免责声明

- 6.2.2.1 微电子器件对材料的精密性与稳定性要求
- 6.2.2.2 钨铜合金在微电子封装中的应用形式
- 6.2.2.3 对微电子器件散热效率与使用寿命的提升机制
- 6.2.2.4 在芯片封装模块中的安装结构设计
- 6.2.2.5 微电子领域对钨铜合金纯度与微观结构的要求
- 6.2.3 在传感器领域的应用
  - 6.2.3.1 传感器工作环境对材料的性能需求
  - 6.2.3.2 钨铜合金在传感器敏感元件中的潜在应用形式
  - 6.2.3.3 基于高导热性的传感器散热组件应用设计
- 6.3 钨铜合金在航空航天领域应用
  - 6.3.1 固体火箭喷嘴喉衬的应用
    - 6.3.1.1 固体火箭喷嘴喉衬的工作环境
    - 6.3.1.2 喷嘴喉衬对材料性能的要求
    - 6.3.1.3 钨铜合金适配喷嘴喉衬需求的性能体现
    - 6.3.1.4 钨铜合金在喷嘴喉衬中的成型工艺及结构设计
    - 6.3.1.5 采用钨铜合金后对喷嘴喉衬使用寿命的提升
  - 6.3.2 在航空发动机部件中的潜在应用
    - 6.3.2.1 航空发动机关键部件的工作环境特点
    - 6.3.2.2 航空发动机部件对材料性能的需求
    - 6.3.2.3 钨铜合金在航空发动机热端部件的应用形式
    - 6.3.2.4 针对航空发动机应用的钨铜合金性能优化方向
  - 6.3.3 在航天器电气系统中的应用
    - 6.3.3.1 航天器电气系统的工作环境及可靠性要求
    - 6.3.3.2 航天器电气系统核心部件对材料性能的需求
    - 6.3.3.3 钨铜合金在航天器接触器触点中的应用
    - 6.3.3.4 钨铜合金在航天器断路器灭弧部件中的应用
    - 6.3.3.5 钨铜合金对航天器电气系统运行稳定性及寿命的保障作用
    - 6.3.3.6 航天器应用中钨铜合金的选材标准及质量控制要求
- 6.4 其他领域应用
  - 6.4.1 冶金行业的应用场景
  - 6.4.2 体育器材中的用例
  - 6.4.3 医疗器械领域的探索
  - 6.4.4 核能领域的应用前景

## 第七章 钨铜合金的未来发展趋势展望

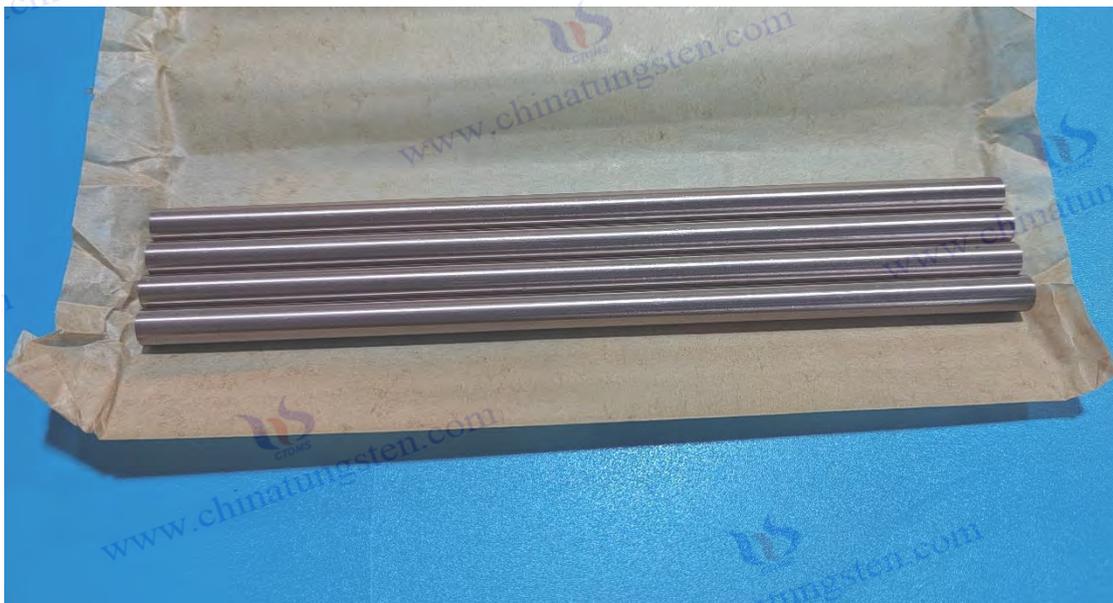
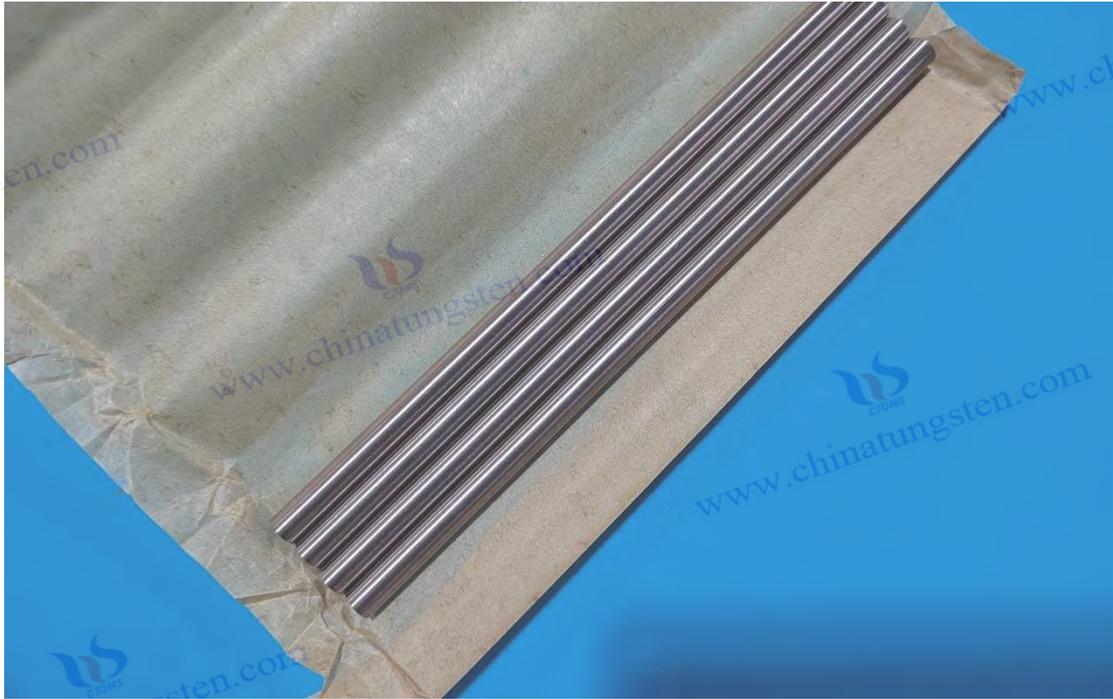
- 7.1 钨铜合金的新型制备技术探索
  - 7.1.1 增材制造技术的潜在应用
  - 7.1.2 其他前沿制备技术展望
- 7.2 钨铜合金的性能优化研究方向
  - 7.2.1 综合性能提升的研究方向
  - 7.2.2 特定应用场景下的性能强化

### 版权与免责声明

附录:

- 附录 A 中国钨铜合金国家标准
- 附录 B 国际钨铜合金标准
- 附录 C 欧美日韩等国的钨铜合金标准
- 附录 D 钨铜合金术语详解

参考文献



中钨智造钨铜合金

中钨智造科技有限公司  
钨铜合金产品介绍

一、钨铜合金概述

钨铜合金（Tungsten Copper Alloy）是钨和铜组成的合金，铜含量在 10%~50%。该合金集成了两种金属的优良性能，不仅具备钨的耐高温、抗电弧侵蚀特性，又拥有铜的良好导热导电能力，在电气、电力、电子、航空航天等高端领域中表现出卓越的综合性能。中钨智造提供多种钨铜合金定制服务，产品致密性高、性能稳定，可按客户需求加工成各类电极、热管理元件、真空部件等关键零部件。

二、钨铜合金性能

产品名称	化学成分%			物理机械性能			
	Cu	杂质总和≤	W	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HB)	电阻率 (MΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
钨铜(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	115	3.2	—
钨铜(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	140	3.7	—
钨铜(65)	35±2.0	0.5	余量	13.3	155	3.9	—
钨铜(70)	30±2.0	0.5	余量	13.8	175	4.1	790
钨铜(75)	25±2.0	0.5	余量	14.5	195	4.5	885
钨铜(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	220	5	980
钨铜(85)	15±2.0	0.5	余量	15.9	240	5.7	1080
钨铜(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	260	6.5	1160

三、钨铜合金分类（按用途）

**电接触材料：**如高压断路器触头、放电加工电极。

**热管理材料：**如电子封装基板、散热部件。

**军工与航空部件：**用于火箭喷嘴、导热结构件。

**电火花加工电极：**精密模具放电加工，抗烧蚀、加工精度高。

四、钨铜合金应用

**电力设备：**高压真空开关触头；断路器导电部件；大功率继电器、电弧熔断

**电子与半导体工业：**IGBT 模块散热基板；微波器件散热板；封装盖板与电子基

**放电加工：**EDM 电极材料（适用于硬质合金模具放电加工）；高精度放电成形电极

**航天与军工领域：**高温结构件（如航天喷管、尾喷口）；热控器件与冷板组件

**激光与等离子应用：**激光焊接/切割电极；等离子喷涂阴极/阳极元件

五、采购信息

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

电话：+86 592 5129595；592 5129696

更多钨铜合金资讯，请访问中钨在线网站（[www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

## 第一章 引言

### 1.1 钨铜合金的概述

钨铜合金作为一种由钨和铜组成的复合材料，兼具了钨和铜两种金属的核心优势，在工业领域中占据着不可替代的地位。钨的高熔点（3422℃）、高强度、高硬度以及优异的耐磨性，与铜的高导电性、高导热性和良好的塑性形成了互补，使得钨铜合金既能承受高温环境的考验，又能保持稳定的导电导热性能，因此被广泛应用于电子、电力、航空航天、国防等多个关键领域。

从材料特性来看，钨铜合金的性能并非简单的“钨+铜”叠加，而是通过合理的成分配比和制备工艺，实现了性能的优化与平衡。例如，在高温环境下，钨的骨架结构能为合金提供支撑，抵抗高温变形，而铜则能通过自身的导热性将热量快速导出，避免局部过热；在导电场景中，铜的导电优势得以发挥，同时钨的加入又提升了合金的整体强度，避免了纯铜易磨损、易变形的问题。这种“强强联合”的特性，让钨铜合金成为应对复杂工况的理想材料。

随着工业技术的不断发展，对材料的性能要求日益严苛，钨铜合金的研究与应用也在持续深化。从最初的基础型号，到如今根据不同场景定制的特殊配比合金，其应用范围不断拓展，性能也更加精准地满足各类工业需求。接下来，我们将从定义和成分构成两个方面，深入了解这一特殊合金。

#### 1.1.1 钨铜合金的定义

钨铜合金是指以钨（W）和铜（Cu）为主要组成元素，通过粉末冶金等工艺制备而成的一种假合金（即两种金属在固态下不互溶，形成机械结合的复合材料）。与传统的单一金属或完全互溶的合金不同，钨铜合金中，钨和铜以物理混合的形式存在——钨形成连续的骨架结构，铜则填充在钨骨架的孔隙中，两者通过界面结合形成整体，因此既保留了钨的高熔点、高强度、高硬度和耐磨损性，又具备了铜的高导电性、高导热性和良好的塑性，实现了“耐高温与导电导热兼顾”“高强度与易加工平衡”的特性。

从定义的核心来看，钨铜合金的关键在于“复合优势”和“工艺依赖性”。一方面，其性能由钨和铜的协同作用决定：例如在电火花加工中，钨铜合金的高导电性确保电极能高效传递电流，而钨的高熔点则避免了电极在高温火花放电中熔化；在散热部件中，铜的导热性负责快速导出热量，钨的高强度则保证部件在安装和使用中不易变形。另一方面，其定义也包含制备工艺的指向性——由于钨和铜在固态下不互溶，无法通过熔炼法生产，必须采用粉末冶金（如压制、烧结、熔渗等）工艺，这也成为区分钨铜合金与其他合金的重要特征之一。

这一定义不仅明确了钨铜合金的组成和结构，更揭示了其“按需定制”的特性：通过调整钨和铜的含量比例，可制备出不同性能的合金（如高钨含量的合金侧重耐高温和高强度，高铜含量的合金侧重导电导热），从而满足电子封装、高压开关、航天发动机等不同领域的个性化需求。因此，钨铜合金的定义不仅是对其材料组成的描述，更是对其“结构决定性能，性能适配场景”这一核心特点的概括。

#### 版权与免责声明

## 1.1.2 合金成分构成

钨铜合金的成分构成以钨（W）和铜（Cu）为基础，其中钨的含量通常在 50%~90%（质量分数）之间，铜的含量则对应为 10%~50%，具体比例需根据应用场景对性能的需求确定。除了钨和铜这两种主成分外，部分特殊用途的钨铜合金会添加微量的其他元素（如镍、铁、钴等）作为辅助成分，以优化材料的成型性能或特定功能，但这些辅助元素的含量通常不超过 1%，因此不会改变“钨-铜”为主的核心成分结构。

从主成分的作用来看，钨作为高熔点金属（熔点 3422℃），是合金强度、硬度、耐高温性和耐磨性的主要提供者。钨的含量越高，合金的熔点越高、强度和硬度越大，耐高温性能越优异——例如钨含量 90%的钨铜合金，其抗压强度可达 800MPa 以上，能在 1000℃以上的高温环境中保持结构稳定，适用于航天发动机的高温部件。而铜作为高导电导热金属，主要负责赋予合金导电、导热性能和一定的塑性。铜的含量越高，合金的导电导热性越好，加工性能也更优——例如铜含量 50%的钨铜合金，导电率可达  $40 \times 10^6 \text{S/m}$  以上，适合作为电子封装中的散热电极。

辅助成分的添加则是为了改善工艺性能或弥补主成分的不足。例如，添加微量镍（Ni）可增强钨颗粒与铜相之间的结合力，避免合金在受力时出现钨骨架与铜相分离的问题；添加少量铁（Fe）或钴（Co）可提高钨粉末的压制性能，让合金在成型过程中更容易获得致密的结构。不过，辅助成分的添加需严格控制比例，否则可能影响主成分的性能——例如过量镍会降低合金的导电导热性，过量铁则可能导致合金脆性增加。

总体而言，钨铜合金的成分构成是“主成分决定核心性能，辅助成分优化工艺与细节”的典型代表。通过调整钨铜比例，可精准调控合金的强度、导电导热性和耐高温性，使其适配从电子封装到国防军工的多种场景；而微量辅助元素的加入，则进一步提升了合金的实用性和稳定性，让这一复合材料能更好地应对工业中的复杂需求。

## 1.2 钨铜合金的历史溯源与发展进程

### 1.2.1 早期探索

钨铜合金的早期探索可追溯至 19 世纪末至 20 世纪初，这一阶段的研究并非以“钨铜合金”为明确目标，而是源于对钨、铜两种金属特性的单独研究及复合材料的初步尝试。当时，工业革命推动了对高强度、高导电材料的需求，钨因高熔点和高强度被关注（尤其在白炽灯灯丝领域），铜则因优异的导电导热性成为电气工业的核心材料，但两者各自的缺陷也逐渐显现——纯钨脆性大、加工难，纯铜强度低、耐高温性差，人们开始思考“能否通过复合两种金属，结合各自优势”。

早期探索以实验室小规模尝试为主，技术手段相对原始。1900 年前后，德国和美国的材料研究者首次通过机械混合钨粉与铜粉，经简单压制和烧结制成了最早的“钨铜复合块体”，虽未形成稳定工艺，但验证了“钨铜可复合”的可行性。不过，这一阶段的产品性能极差：钨与铜的结合松散，力学强度不足，导电导热性也未达到预期，且因缺乏对粉末粒度、烧结

温度的精准控制，成品率极低，仅停留在理论验证层面，未进入实际应用。

真正推动早期探索走向应用导向的，是军事与电气工业的需求。20 世纪 20 年代，随着无线电技术和火炮制造的发展，需要一种能承受瞬间高温、同时导电的材料（如火炮电点火装置的电极），纯铜在高温下易熔化，纯钨导电不足，研究者再次将目光投向钨铜复合。1925 年左右，美国通用电气公司通过改进粉末混合工艺（如增加球磨时间以细化粉末），制成了首批可用于简易电极的钨铜制品，虽性能仍不稳定，但首次实现了“在特定场景替代纯钨或纯铜”，成为钨铜合金从实验室走向实用化的起点。这一阶段的探索虽未形成系统技术体系，却为后续研究奠定了两个基础：一是明确了“钨铜复合可平衡强度与导电导热性”的核心方向；二是积累了粉末混合、压制烧结的初步经验。

### 1.2.2 关键技术突破节点

钨铜合金的发展离不开多个关键技术突破，这些节点推动其从“实验室样品”转变为“工业化材料”。

第一个关键节点出现在 20 世纪 40 年代，熔渗工艺的成熟解决了“钨铜结合松散”的核心问题。此前的烧结工艺难以让钨与铜充分结合，而熔渗工艺（将钨骨架预烧结后，将熔融铜渗入其孔隙）大幅提升了材料致密度。1943 年，美国军方为解决航空机枪点火电极的耐高温问题，联合科研机构优化熔渗工艺：通过控制钨骨架的孔隙率（调整至 20%~30%）和铜的熔化温度（精确到 1100~1200℃），制成的钨铜合金致密度提升至 95% 以上，强度和导电率较此前提升 40%，成功应用于航空机枪点火系统，这是钨铜合金首次实现规模化实用。

第二个关键节点是 20 世纪 60 年代粉末冶金技术的精细化。随着电子显微镜和精密温控设备的出现，研究者能精准控制钨粉、铜粉的粒度（从早期的 100 目提升至 500 目以上）和烧结气氛（引入惰性气体保护，避免氧化）。1962 年，日本住友金属开发出“超细粉末+真空烧结”工艺，使钨铜合金中钨颗粒分布更均匀，铜相填充更完整，不仅力学性能（抗压强度突破 600MPa）和导电性能（导电率达纯铜的 60% 以上）稳定，还实现了复杂形状制品的加工（如薄片、异形电极），推动其从军事领域拓展至电子工业（如早期晶体管的散热底座）。

第三个关键节点是 20 世纪 80 年代“功能化定制”理念的提出。此前的钨铜合金以单一配比为主，而不同领域需求差异极大——航天领域需要高钨含量（80% 以上）的耐高温型，电子领域需要高铜含量（50% 以上）的高导电型。1985 年，中国北京有色金属研究总院通过建立“钨铜配比-性能对应模型”，实现了按需求定制成分：通过调整钨含量从 50% 到 90% 的梯度配比，结合对应工艺参数，可精准调控合金的强度、导电率和耐热性，这一突破让钨铜合金从“通用材料”变为“场景适配材料”，应用范围快速扩大。

### 1.2.3 现代发展态势

进入 21 世纪，钨铜合金的发展呈现“性能极致化、应用多元化、工艺智能化”三大态势，成为高端制造领域的关键材料之一。性能极致化是现代发展的核心方向。随着芯片、航天、新能源等领域对材料的要求从“满足基础需求”转向“突破性能极限”，钨铜合金的性能指

标不断刷新：通过纳米粉末制备技术（如等离子体球磨法），钨粉粒度可控制在 100 纳米以内，与铜的结合界面更紧密，最新产品的导电率已达纯铜的 85%以上，同时抗压强度突破 1000MPa，远超 20 世纪的水平；在耐高温性上，高钨含量（90%）的钨铜合金可在 1200°C 下保持结构稳定，且通过添加石墨烯等增强相，耐磨性提升 30%以上，满足了第五代移动通信基站、航天发动机燃烧室等极端场景的需求。

应用多元化体现在从传统领域向高端新兴领域延伸。传统上，钨铜合金主要用于电气触点、电极等，而现在已拓展至：芯片封装（作为大功率芯片的散热基板，利用高导热性快速导出热量）、新能源汽车（车载高压继电器的导电触点，承受大电流同时耐电弧烧蚀）、核聚变实验装置（作为偏滤器材料，抵抗等离子体高温冲刷）。据行业数据显示，2020 年以来，全球钨铜合金在半导体领域的需求年增长率超过 25%，成为新的增长极。

工艺智能化则是支撑现代发展的技术基础。传统钨铜合金生产依赖人工经验，而现在通过“数字孪生”和自动化生产线实现了全流程可控：从粉末混合阶段的在线粒度监测，到烧结过程的温度-压力实时调控，再到成品性能的无损检测，均可通过智能系统完成；3D 打印技术的引入更打破了成型限制——2022 年，德国弗朗霍夫研究所利用金属 3D 打印技术，直接打印出带有复杂内部流道的钨铜散热部件，传统工艺无法实现的结构得以量产，为异形、集成化部件提供了新方案。

同时，现代发展也面临挑战：钨作为战略资源，价格波动大，推动了“钨铜合金回收再利用”技术的发展（目前回收利用率已达 80%以上）；替代材料（如碳化硅陶瓷、铜铝复合材料）的竞争，也倒逼钨铜合金通过性能升级保持优势。总体而言，在高端制造需求的驱动下，钨铜合金正从“辅助材料”变为“核心材料”，其发展与前沿科技领域的创新深度绑定，未来仍有广阔的突破空间。



中钨智造钨铜合金

## 第二章 钨铜合金的特点

### 2.1 钨铜合金的特性剖析

钨铜合金的特性源于其独特的复合结构与组成，它并非简单继承钨和铜的单一属性，而是通过两者的协同作用形成了一系列均衡且实用的性能。从宏观上看，它既具备类似金属的良好导电导热能力，又拥有足以应对复杂工况的力学强度；从应用角度而言，其特性的核心在于“平衡”——在硬度与韧性、耐高温与导电导热性之间找到适配工业需求的临界点，这使得它能够在多种对材料性能要求苛刻的场景中发挥作用。无论是在需要频繁摩擦的机械部件中，还是在同时面临高温与电流冲击的电气设备里，钨铜合金的特性都能得到针对性体现。

#### 2.1.1 高硬度形成机制与优势

钨铜合金的高硬度是其区别于纯铜及多数铜合金的显著特征，这一特性的形成与内部结构的协同作用密切相关，同时也为其在耐磨场景中的应用提供了基础。与纯铜的软质特性不同，钨铜合金的硬度并非来自单一成分的强化，而是通过结构设计实现的性能优化，这使得它在保持一定塑性的同时，能抵抗外部摩擦与挤压带来的变形，成为兼具实用性与耐久性的材料。

##### 2.1.1.1 微观结构机制

钨铜合金的高硬度源于其“骨架-填充”式的微观结构。在合金内部，钨以连续的骨架形态存在，其本身具有较高的固有硬度，这些钨颗粒相互连接形成了遍布整个材料的刚性支撑网络，如同建筑中的钢筋骨架，为合金提供了基础的硬度支撑。而铜作为填充相，均匀分布在钨骨架的孔隙中，虽然铜本身硬度较低，但它的存在并未削弱钨骨架的整体性——相反，铜能够填补钨颗粒之间的间隙，减少骨架结构中的“薄弱点”，使外部压力能够通过铜相传递到钨骨架上，避免局部应力集中导致的结构破坏。

此外，钨与铜之间的界面结合也对硬度有重要影响。在制备过程中，经过适当的工艺处理，钨颗粒与铜相之间会形成稳定的结合界面，这种结合能够阻止钨颗粒在受力时发生相对滑动，进一步强化了整体结构的刚性。因此，钨铜合金的高硬度并非单一成分作用的结果，而是钨的刚性骨架、铜的填充强化以及界面结合共同作用的结果，这种微观结构让它在承受外部摩擦或挤压时，能够保持结构的完整性。

##### 2.1.1.2 耐磨应用优势

钨铜合金的高硬度使其在耐磨应用中展现出明显优势，核心在于它能够抵抗长期摩擦带来的表面损耗，延长部件的使用寿命。在需要频繁接触或相对运动的场景中，材料表面容易因摩擦而逐渐磨损，最终导致部件尺寸变化或功能失效，而钨铜合金的高硬度可以减少这种磨损——当它与其他物体接触时，表面不易被划伤或磨出凹痕，能够长期保持原本的形状和尺寸稳定性。

同时，它的耐磨优势还体现在对“摩擦条件波动”的适应性上。在实际应用中，摩擦环境往

往并非恒定，可能存在载荷变化、温度波动等情况，钨铜合金的硬度不会因轻微的温度升高或载荷变化而明显下降，能够在复杂条件下持续保持耐磨性能。例如在一些机械传动部件中，即使长期承受不同程度的摩擦冲击，其表面依然能保持平整，不会因过度磨损而影响传动精度，这使得相关设备的维护周期得以延长，降低了因部件更换带来的成本与停机损失。

### 2.1.1.3 与其他合金硬度对比及优势

与纯铜及常见铜合金相比，钨铜合金的硬度优势十分明显。纯铜质地较软，在轻微外力摩擦下就容易出现表面变形，而多数铜合金虽然通过添加其他元素提高了硬度，但整体仍偏向“中低硬度”，难以应对高强度的摩擦场景。钨铜合金由于钨骨架的存在，硬度远高于这些材料，在同样的摩擦条件下，其表面磨损程度会显著更低。

与纯钨相比，钨铜合金的硬度虽略低，但在实际应用中更具优势。纯钨虽然硬度极高，但脆性较大，在摩擦过程中若受到轻微冲击，容易出现碎裂或剥落，反而影响耐磨性；而钨铜合金中的铜相起到了一定的“缓冲”作用，在保持较高硬度的同时，能够吸收部分冲击能量，减少脆性断裂的风险，更适合实际工况中可能遇到的“摩擦 + 冲击”复合场景。

与一些铁基合金相比，钨铜合金的硬度虽不一定占据绝对优势，但它在硬度之外的性能上更具竞争力。铁基合金往往导电导热性较差，而钨铜合金在保持较高硬度的同时，还能兼顾良好的导电导热能力，这使得它在需要同时满足耐磨与导电（或导热）的场景中，成为难以替代的选择——例如在一些既需要抵抗触点摩擦，又需要传导电流的电气部件中，铁基合金无法满足导电需求，而钨铜合金则能同时胜任。

### 2.1.2 抗电弧侵蚀原理与性能

抗电弧侵蚀是钨铜合金在电气领域得以广泛应用的核心性能之一。在高压开关、继电器等设备中，电流通断时难免产生电弧，电弧的高温与能量会对接触材料造成侵蚀，导致部件失效。钨铜合金凭借其独特的成分与结构，能够有效抵抗这种侵蚀，维持部件的长期稳定运行。其抗电弧侵蚀性能并非单一因素作用的结果，而是材料成分、微观结构与电弧作用机制共同影响的体现，同时也会因使用环境的差异呈现不同表现，且存在明确的性能优化方向。

#### 2.1.2.1 电弧侵蚀机制

电弧侵蚀是指材料在电弧作用下发生的表面损伤与损耗过程，其核心驱动力来自电弧释放的高温与能量。当电弧产生时，局部温度会急剧升高，足以使材料表面发生熔化甚至蒸发；同时，电弧产生的电动力会推动熔融态的材料颗粒脱离表面，形成飞溅损耗。此外，高温环境下材料还可能与周围介质（如空气中的氧气）发生化学反应，生成氧化物等脆性物质，这些物质在后续的电弧或机械作用下容易剥落，进一步加剧侵蚀。

从过程来看，电弧侵蚀是“热损伤-力学剥落-化学劣化”的复合作用：高温首先破坏材料表面的完整性，使表层物质处于不稳定状态；电动力与气流则将这些不稳定物质剥离；而化学反应则削弱了材料表层的结合力，让侵蚀更容易持续。这种机制会导致材料表面逐渐形成凹

坑、裂纹或变形，最终影响部件的导电性能与结构稳定性。

### 2.1.2.2 抗电弧侵蚀内在原理

钨铜合金抗电弧侵蚀的能力源于钨与铜的协同作用，其内在原理可归结为“耐高温骨架+高效散热+自修复缓冲”的三重机制。

钨作为高熔点成分，构成了合金的刚性骨架，其自身不易被电弧的高温熔化，能够在电弧作用下保持结构的整体性，阻挡表层的大面积破损；同时，钨的存在降低了材料整体的蒸发速率，减少了高温导致的物质损耗。

铜则凭借优异的导热性，将电弧产生的热量快速从作用区域导出，避免局部温度过度升高，从而减轻熔化与蒸发程度。更重要的是，当电弧温度极高时，铜会先于钨熔化，熔融的铜会填充到表面的微小凹坑中，形成一层临时的“缓冲层”，既可以吸收部分电弧能量，又能减少钨骨架直接暴露在电弧下的面积，起到保护作用。

此外，钨与铜的界面结合强度较高，能抵抗电弧电力带来的撕裂作用，减少材料颗粒的飞溅损耗。这种“钨抗熔、铜散热、协同抗剥离”的内在机制，使得钨铜合金在电弧反复作用下仍能保持较好的表面完整性。

### 2.1.2.3 不同使用环境下的性能差异

钨铜合金的抗电弧侵蚀性能并非一成不变，会因使用环境的不同而产生明显差异，主要受环境温度、气氛成分、电弧能量密度及机械载荷等因素影响。

在高温环境中，周围环境已存在较高的基础温度，会削弱铜的散热效率，导致电弧作用区域的热量难以快速扩散，可能加剧材料的熔化与蒸发，使侵蚀速率加快。

在含氧量高或存在腐蚀性气体（如二氧化硫、硫化氢）的环境中，电弧高温会促使材料与气体发生更剧烈的化学反应，生成更多脆性氧化物或硫化物，这些物质容易剥落，从而加速侵蚀；而在惰性气体保护的环境中，化学反应被抑制，侵蚀主要以物理损耗（熔化、飞溅）为主，性能更为稳定。

当电弧能量密度较高（如大电流通断场景）时，即使钨的高熔点特性也难以完全抵抗瞬间高温，可能导致钨骨架局部熔化，此时铜的缓冲作用会被强化，但整体侵蚀程度仍会高于低能量电弧场景。若同时存在机械振动或压力，材料表面的侵蚀产物（如熔融后的凝固层）更容易因外力而剥落，进一步扩大损伤面积，使抗电弧侵蚀性能下降。

### 2.1.2.4 性能提升途径

提升钨铜合金的抗电弧侵蚀性能，可从材料设计、工艺优化与功能强化三个方向入手，通过针对性改进增强其抵抗电弧损伤的能力。在材料设计上，可通过调整钨铜比例优化性能平衡：

#### 版权与免责声明

适当提高钨含量能增强耐高温骨架的稳定性，减少高温熔化；而合理的铜含量则可保证散热效率，避免局部过热。对于特定高能量电弧场景，还可尝试添加少量高熔点、抗氧化的元素，这些元素能融入钨骨架，提高其抗熔与抗氧化能力，同时不显著降低铜的导热性。

工艺优化是提升性能的关键手段。通过细化钨粉与铜粉的粒度，可使两者在微观结构中分布更均匀，减少局部成分偏析导致的薄弱点；采用真空烧结或气氛保护烧结工艺，能降低材料内部的孔隙率，增强钨铜界面的结合强度，减少电弧作用下的颗粒飞溅。此外，对成品进行表面强化处理（如等离子体喷涂耐磨涂层），可在表层形成一道额外的防护屏障，延缓电弧对基体的侵蚀。

功能强化方面，可通过模拟实际电弧工况，设计“梯度结构”的钨铜合金——表层钨含量更高以增强抗熔性，内层铜含量更高以保证散热，使材料在不同深度发挥针对性作用。同时，开发合金的回收再利用技术，通过修复侵蚀后的表面（如熔渗补铜），延长部件使用寿命，也间接提升了材料在全生命周期内的抗电弧侵蚀效能。

### 2.1.3 抗粘连、抗焊接能力分析

抗粘连与抗焊接能力是钨铜合金在机械接触和电气连接场景中至关重要的性能。粘连指两个接触表面在压力或温度作用下发生局部结合、难以分离的现象；焊接则是更严重的粘连，指接触表面因高温熔化后冷却凝固，形成永久性连接。这两种情况都会导致部件卡滞、失效，而钨铜合金凭借自身特性，在抵抗这类问题上表现出明显优势。其能力的核心在于减少接触表面的“界面结合倾向”，既避免因压力产生的机械粘连，也防止因高温导致的熔化焊接。

#### 2.1.3.1 粘连与焊接成因

粘连的成因主要与“表面接触状态”和“机械作用”相关。当两个部件表面紧密接触并承受压力时，接触面的微观凸起会相互嵌入，若材料本身塑性较强，凸起处可能发生局部变形并贴合；同时，表面氧化层或杂质若被挤压破坏，新鲜金属表面直接接触，会因原子间的扩散作用产生吸附力，最终导致接触面局部粘连。这种情况在长期压力作用或低速相对运动的场景中更易发生。

焊接则是“高温熔化”与“冷却凝固”共同作用的结果。当接触表面存在电弧、摩擦高温等热源时，材料表层可能被加热至熔化状态，此时两个接触面的熔融金属会相互混合；随着温度降低，混合的熔融金属凝固，便在接触面形成类似焊接的连接。此外，若接触面存在杂质（如油污燃烧后的残留物），高温下可能形成低熔点共晶物，进一步促进熔融金属的结合，加剧焊接现象。

#### 2.1.3.2 抗粘连性能表现

钨铜合金的抗粘连性能主要体现在接触状态下不易与其他部件形成稳定结合，即使发生短暂接触，也能在分离时减少表面损伤。在机械接触场景中，由于钨构成的刚性骨架提升了材料表面的抗变形能力，接触面的微观凸起不易被压溃或嵌入，减少了因机械咬合导致的粘连基

础：同时，铜的存在使表面保持一定的润滑性（相对于纯钨），降低了接触时的摩擦系数，避免因摩擦生热加剧表面吸附。因此，在长期压力接触的部件中，钨铜合金表面不易与配对材料形成粘连痕迹，分离时所需的力更小，能保持接触表面的完整性。

在电气接触场景中，即使存在轻微电弧导致的局部升温，钨铜合金也不易因表层熔化发生粘连。因为铜的导热性会快速分散热量，避免表层持续熔化；而钨的高熔点则防止大面积熔融，使得接触面难以形成稳定的结合层，分离时不会出现“撕扯式”损伤。

### 2.1.3.3 影响抗粘连与抗焊接能力的因素

钨铜合金的抗粘连与抗焊接能力并非固定不变，会受到材料本身状态、接触条件及环境因素的影响。

材料本身的表面状态是关键因素。若表面存在氧化层、油污等杂质，会降低表面光洁度，杂质在压力或高温下可能成为粘连的“结合点”，削弱抗粘连能力；反之，经过抛光处理的光滑表面，微观凸起少，接触面积小，抗粘连性能更优。此外，钨铜合金的致密度也有影响——内部孔隙多的材料，表面易形成微小凹坑，杂质易沉积，更易发生局部粘连。

接触条件的影响主要体现在压力、温度和相对运动状态上。过大的压力会增加接触面的微观咬合程度，促使粘连发生；过高的温度（即使未达到熔点）会提高原子扩散速率，增强表面吸附力；而缺乏润滑的高速相对运动则可能因摩擦生热加剧表面损伤，间接增加粘连风险。

环境因素中，湿度和介质成分较为重要。高湿度环境会加速表面氧化，形成疏松的氧化层，容易在接触时脱落并成为粘连介质；若环境中存在腐蚀性气体，可能在表面形成脆性化合物，这些化合物脱落时可能带走表层金属，反而减少粘连，但会破坏表面完整性，间接影响抗焊接能力。

### 2.1.4 优良导电性原理与应用

钨铜合金的优良导电性是其区别于纯钨及多数耐高温合金的核心优势之一，这一性能既源于成分本身的特性，也得益于复合结构的协同作用。它并非追求单一的“极致导电”，而是在保持一定力学强度和耐高温性的基础上，实现“够用且稳定”的导电能力，这使得它能在需要同时应对电流传导与复杂工况的场景中发挥作用。从原理上看，其导电性是金属内部电子运动的结果；从应用上看，这种性能让它成为连接“电气功能”与“结构支撑”的关键材料。

#### 2.1.4.1 导电性物理本质与导电机制

导电性的物理本质是材料内部自由电子在电场作用下定向移动的能力——当存在外加电场时，材料中的自由电子会摆脱原子核对其的束缚，沿电场方向运动，形成电流。电子运动过程中受到的阻碍越小（如原子振动、杂质散射等），导电性就越好。

钨铜合金的导电机制主要依赖铜相的作用。铜作为典型的良导体，内部存在大量自由电子，

#### 版权与免责声明

且原子排列规整，电子运动时受到的散射作用较弱，因此能高效传导电流。在钨铜合金中，铜以连续或半连续的形态填充在钨骨架的孔隙中，形成贯通的“导电通道”——当电流通过合金时，电子主要通过铜相的通道流动，钨虽然本身导电性远低于铜，但作为骨架并未阻断铜相的连续性，反而通过支撑结构保持了铜相通道的稳定。此外，钨与铜的界面结合较为紧密，减少了电子在界面处的散射损失，进一步保证了导电效率。这种“铜相主导导电、钨相稳定结构”的机制，让合金在保持力学性能的同时，维持了优良的导电性。

#### 2.1.4.2 不同成分比例下的导电性变化

钨铜合金的导电性会随钨与铜的成分比例变化呈现明显规律，核心趋势是“铜含量越高，导电性越好；钨含量越高，导电性越弱”，这种变化源于两者导电能力的本质差异。

当铜含量较高时，铜相在合金中形成的导电通道更完整、更密集，电子流动的路径更通畅，受到的阻碍较少，因此整体导电性更接近纯铜的水平。此时钨相以分散的颗粒形态存在，虽会对铜相的连续性产生轻微影响，但因含量较低，不足以阻断导电通道，导电性仍能保持在较高水平。

随着钨含量增加，钨骨架的占比逐渐提高，铜相的分布会被钨颗粒分割，部分导电通道可能被切断或变窄，电子流动时需要绕过钨颗粒，路径变长且散射增加，导电性随之下降。若钨含量过高，铜相可能无法形成连续通道，只能以孤立的小区域存在，此时电子难以在合金内部自由移动，导电性会明显减弱。

这种变化并非线性的“单调下降”，而是与铜相的连续性密切相关——只要铜相仍能保持基本连续，即使钨含量增加，导电性下降的幅度也相对平缓；一旦铜相被完全分割，导电性则会出现显著衰减。

#### 2.1.4.3 电气设备中的导电应用优势

在电气设备中，钨铜合金的导电应用优势集中体现在“兼顾导电与工况适应性”，能够填补纯铜与纯钨在特定场景中的性能空白。

在高压开关、继电器等需要频繁通断电流的设备中，触点材料既需要传导电流，又要承受通断时的电弧高温和机械冲击。纯铜虽导电优良，但高温下易熔化、机械强度不足，长期使用易因变形或烧蚀失效；纯钨虽耐高温、强度高，却导电性较差，难以满足大电流传导需求。钨铜合金则能同时应对——铜相保证电流高效通过，避免触点发热过度；钨相抵抗电弧高温和机械冲击，延长触点使用寿命，减少设备故障。

在电机电刷、导电滑块等需要滑动接触的部件中，材料需在传导电流的同时抵抗摩擦磨损。纯铜耐磨性差，长期滑动会因磨损导致导电不稳定；普通铜合金耐磨性提升有限，且可能因添加元素降低导电性。钨铜合金的钨相提升了表面耐磨性，减少滑动中的损耗；铜相则维持稳定的导电能力，即使表面有轻微磨损，仍能通过内部铜相的连续性保证电流传导，确保设备运行的稳定性。此外，在一些需要“导电+散热”双重功能的部件（如大功率器件的电极）

#### 版权与免责声明

中，钨铜合金的导电性与铜相的导热性形成协同——既传导电流，又将器件工作时产生的热量导出，避免局部过热影响性能，这种“一材多用”的优势进一步提升了其在电气设备中的应用价值。

### 2.1.5 良好导热性特性

钨铜合金的良好导热性是其高温和高功率场景中发挥核心作用的关键支撑之一。这种性能并非单纯依赖某一种成分，而是钨与铜在结构和特性上的协同结果——既保留了铜的高效导热能力，又通过钨的骨架结构确保导热过程的稳定性。与纯铜相比，它的导热性虽略有妥协，却换取更强的力学支撑；与纯钨相比，它的导热效率大幅提升，能应对热量堆积问题。这种“平衡型”导热特性，让它在需要同时处理热量传递与结构承载的场景中具有不可替代性。

#### 2.1.5.1 导热性基本原理与导热机制

导热性的基本原理是热量通过材料内部的微观运动从高温区域向低温区域传递的能力，其本质是分子、原子或电子的动能传递——高温区域的粒子振动更剧烈，通过碰撞将能量传递给相邻的低温区域粒子，逐步实现热量扩散。

钨铜合金的导热机制以铜相的“电子导热”为主，辅以钨相的“声子导热”。铜作为金属，内部存在大量自由电子，这些电子在高温区域获得能量后运动加剧，通过碰撞将热量快速传递到低温区域，这是一种高效的导热方式；而钨的导热主要依赖晶格振动（即“声子”），原子在平衡位置附近的振动通过晶格传递热量，虽效率低于铜的电子导热，但稳定性更强。在合金结构中，铜相形成连续的导热通道，热量首先通过铜相快速扩散，钨骨架则作为“热量传递的辅助路径”，同时支撑铜相通道的完整性，避免因高温变形导致导热路径断裂。这种“铜相主导、钨相辅助”的机制，让合金既能高效传递热量，又能在热量冲击下保持导热结构的稳定。

#### 2.1.5.2 导热性与散热效果的关联

导热性是散热效果的核心基础，两者呈现“正相关”关系——材料导热性越好，热量从热源向外界传递的速度越快，散热效果就越显著。但散热效果并非仅由导热性决定，还与材料的散热面积、与散热介质的接触状态等有关，而钨铜合金的优势在于“通过高效导热放大其他散热条件的作用”。当热源产生热量时，导热性好的钨铜合金能快速将热量从热源表面导出，避免热量在局部堆积；导出的热量会通过材料表面传递给空气、冷却液等散热介质，此时若材料本身导热性不足，即使散热面积再大，热量也难以到达表面，散热效果会大打折扣。此外，钨铜合金的导热均匀性较好，能避免热量在材料内部形成“热点”（局部高温区域），而热点往往是导致部件因过热失效的关键，因此均匀导热间接提升了整体散热的可靠性。可以说，钨铜合金的导热性为散热效果提供了“基础动力”，让散热设计能更有效地发挥作用。

#### 2.1.5.3 高温工作环境中的导热应用价值

在高温工作环境中，材料的导热性不仅需要“高效”，更需要“稳定”——即不会因环境温

度升高而明显下降，钨铜合金的导热应用价值正体现在这一点上。

在航天发动机的燃烧室附近部件中，环境温度本身就很高，同时部件还会因工作产生额外热量，若导热性不稳定，热量积累可能导致部件超过耐受温度。钨铜合金中的铜相虽在高温下可能软化，但只要未达到熔化点，其导热能力不会大幅衰减；而钨骨架能保持结构稳定，避免铜相因高温变形而阻断导热路径，因此能持续将热量导出，保证部件在高温下的安全运行。

在大功率半导体器件的散热基板中，器件工作时会产生大量热量，且环境温度随工作时间升高，普通导热材料（如纯铝）在温度超过一定范围后，导热性会明显下降，导致散热失效。钨铜合金则能在较高温度下维持稳定的导热能力，持续将器件产生的热量传递到散热装置，避免器件因过热而性能衰减或损坏。

此外，在电弧焊接的电极部件中，电极既要传导电流，又要承受电弧产生的瞬时高温，若导热性差，电极自身会因热量无法散发而快速烧蚀。钨铜合金能通过高效导热及时将电弧热量导出，降低电极自身温度，延长寿命，同时保证焊接过程的稳定性——这种“在高温中保持导热效率”的特性，让它成为高温环境中连接“热量产生”与“热量消散”的关键材料。

## 2.1.6 耐腐蚀性能与机制

钨铜合金的耐腐蚀性能虽非其最突出的特性，却在潮湿、有轻微腐蚀性介质的环境中展现出实用价值。它的耐腐蚀性并非通过单一成分实现，而是钨与铜的结构协同及对腐蚀过程的“被动抵抗”共同作用的结果，既避免了纯铜在某些环境中的快速氧化，也弥补了纯钨在复杂介质中的局部腐蚀缺陷，能够在多种工业环境中保持结构与性能的稳定性。

### 2.1.6.1 不同腐蚀环境的影响

腐蚀环境的差异会影响钨铜合金的腐蚀程度，主要体现在介质类型、湿度与温度三个方面。在潮湿的大气环境中，水汽会在合金表面形成水膜，若空气中含有少量污染物（如二氧化硫、盐分），水膜会成为弱电解质，引发轻微的电化学腐蚀——铜相可能发生氧化，表面形成氧化膜，但这层氧化膜质地较致密，能在一定程度上阻止腐蚀进一步扩散；钨相对这类环境耐受性较强，几乎不会被腐蚀，因此整体腐蚀速度较慢。

在酸性或碱性介质中，腐蚀程度会明显加剧。酸性环境会破坏铜表面的氧化膜，导致铜相持续溶解；碱性环境则可能与铜发生化学反应，生成可溶性物质，加速铜相的损耗。此时钨相虽能抵抗酸碱腐蚀，但随着铜相不断流失，合金结构会逐渐变得疏松，最终影响整体性能。在高温干燥环境中，腐蚀主要以氧化为主。高温会加速铜的氧化反应，表面可能形成较厚的氧化层，若氧化层脱落，会暴露新的铜表面继续氧化；而钨在高温下的氧化速度较慢，且生成的氧化层能附着在表面，对内部形成保护，因此整体腐蚀程度低于潮湿或酸碱环境。

### 2.1.6.2 耐腐蚀内在机制

钨铜合金的耐腐蚀内在机制可概括为“钨相耐蚀骨架+铜相氧化自保护+结构致密性屏障”

#### 版权与免责声明

的协同作用。

钨相本身化学稳定性较高，在多数常见腐蚀环境中不易与介质发生反应，其形成的连续骨架为合金提供了抗腐蚀的基础支撑——即使铜相发生轻微腐蚀，钨骨架仍能保持结构完整，避免合金整体破损。

铜相的腐蚀过程具有“自限性”特点。在潮湿或轻度氧化环境中，铜表面会生成一层氧化膜，这层膜虽会导致表面色泽变化，但质地相对致密，能阻止介质与内部的铜进一步接触，相当于形成了一道“天然屏障”，减缓腐蚀的持续扩散。

此外，合金的致密结构也能增强耐腐蚀性。通过优化制备工艺，钨铜合金内部的孔隙率较低，减少了腐蚀介质渗入内部的通道；同时，钨与铜的界面结合紧密，避免了介质在界面处聚集形成局部腐蚀点，进一步降低了腐蚀风险。这种“骨架抗蚀、氧化自护、结构防渗透”的机制，让合金在非极端腐蚀环境中能保持较好的稳定性。

### 2.1.6.3 提升耐腐蚀性的技术手段

提升钨铜合金的耐腐蚀性，需从“阻断腐蚀路径”“增强表面防护”“优化内部结构”三个方向入手，通过针对性技术手段减少腐蚀介质对材料的影响。表面处理是最直接的技术手段。通过电镀（如镀铬、镍）在合金表面形成一层耐腐蚀涂层，这层涂层化学稳定性高，能将合金基体与腐蚀介质完全隔离，同时涂层本身不易被氧化或溶解，大幅降低腐蚀概率；也可采用化学钝化处理，通过特定溶液让铜相表面形成更致密、更稳定的氧化膜，增强“自保护”能力，且不影响合金的导电等核心性能。

内部结构优化能从根源上提升耐腐蚀性。通过细化钨粉与铜粉的粒度并提高混合均匀性，可减少合金内部的成分偏析和孔隙，避免腐蚀介质在局部聚集；采用先进烧结工艺（如热等静压）能提高合金的致密度，消除内部微小裂纹和空隙，阻断腐蚀介质渗入内部的通道，从结构上增强抗腐蚀能力。添加耐腐蚀辅助元素也是有效的技术路径。在合金中加入少量具有强抗蚀性的元素（如铬、硅），这些元素会在铜相或钨铜界面处富集，既不影响铜的导电和钨的骨架作用，又能提高铜相的抗氧化能力，或增强界面结合强度，减少局部腐蚀的发生。

## 2.2 成分比例对钨铜合金性能的影响

钨铜合金由钨（高硬度、高熔点、脆性）与铜（良好塑性、导电性、导热性）组成，二者的成分比例（通常以钨含量表示，如 W70Cu30 表示钨占 70%、铜占 30%）是决定其性能的核心因素。由于钨与铜在力学、物理性能上存在显著差异，成分比例的变化会直接导致合金力学性能（硬度、强度、韧性）呈现规律性变化，这种变化是“钨相骨架支撑”与“铜相塑性缓冲”协同作用的结果。

### 2.2.1 对力学性能的影响

钨铜合金的力学性能是钨的高强度、高硬度与铜的塑性、韧性相互平衡的体现。随着钨含量

升高，合金逐渐从“铜为基体、钨为增强相”转变为“钨为骨架、铜为填充相”，力学性能也随之以“塑性主导”向“刚性主导”过渡；反之，铜含量升高时，合金的塑性和韧性会显著提升，但硬度和强度会下降。

### 2.2.1.1 对硬度的影响

钨铜合金的硬度与成分比例紧密相关，其中钨元素对硬度提升起主导作用。当合金中钨含量较低时，铜相占据主导地位，形成连续的基体，少量分散的钨颗粒镶嵌其中。此时合金整体较软，硬度接近纯铜水平，这是因为铜的质地相对较软，对抵抗外部压痕、划痕等变形的能力有限，如含钨 10%-20%的钨铜合金，其布氏硬度大约处于 80-120HB 区间，在一些对硬度要求不高，但需要良好加工性能和其他特性（如导电性）的场景中较为适用。

随着钨含量逐步增加，例如达到 50%左右，合金内部结构发生显著变化。钨颗粒相互靠近并开始形成一定程度的骨架结构，虽然铜相依旧存在并填充在钨骨架的间隙，但此时钨相的支撑作用开始凸显。由于钨本身具有极高的硬度，其形成的骨架大幅增强了合金抵抗变形的能力，合金硬度显著上升，可达 200-250HB，这种硬度水平使合金在面临中等程度的摩擦、磨损环境时，能够有效保持表面完整性，适用于如机械传动部件中承受一定摩擦的部位。

当钨含量进一步提升至 70%-80%甚至更高时，钨相已形成连续且坚固的骨架，铜相仅填充在钨骨架的微小孔隙中。此时合金硬度逼近纯钨的水平，可超过 300HB。高钨含量的钨铜合金在高应力、高磨损的极端工况下表现出色，像电火花加工电极，在工作过程中频繁受到放电产生的高温、高压冲击，需要材料具备极高硬度以保证电极的形状精度和使用寿命；高压放电触头也需要高硬度材料来抵御频繁开合时的电弧烧蚀和机械磨损，高钨含量的钨铜合金便能很好地满足这些需求。

### 2.2.1.2 对强度的影响

强度方面，钨铜合金的抗拉强度和抗压强度受成分比例影响呈现不同变化规律。对于抗拉强度，在钨含量较低（如 $\leq 50\%$ ）时，铜相作为连续基体承载主要拉力，此时合金的抗拉强度主要取决于铜的塑性承载能力。由于铜的强度相对不高，且分散在其中的钨颗粒增强效果有限，合金抗拉强度提升缓慢，例如含钨 30%的钨铜合金，其抗拉强度大约在 300-350MPa。

随着钨含量增加至 50%-80%，钨相逐渐形成半连续甚至连续的骨架结构，铜相填充在钨骨架间隙中起到粘结和传递应力的作用。此时，合金受力时，应力能够通过钨骨架更有效地传递和分散，抗拉强度显著提升。因为钨本身强度高，其骨架结构极大地增强了合金整体的承载能力，同时铜相缓解了局部应力集中问题，如含钨 60%的钨铜合金，抗拉强度可达到 450-550MPa，含钨 70%-80%时，抗拉强度进一步提升至 600-700MPa 左右。

然而，当钨含量继续升高（ $\geq 80\%$ ），抗拉强度达到峰值后会略有下降。这是因为铜相占比过低，无法充分填充钨颗粒间的间隙，导致钨-钨界面结合变弱，在承受拉力时，这些薄弱的界面容易率先开裂，进而引发整体断裂，使得合金抗拉强度降低，例如含钨 90%的钨铜合金，抗拉强度约为 600-650MPa，略低于含钨 80%的合金。

在抗压强度方面，规律较为简单直接。随着钨含量增加，抗压强度持续上升。因为在受压过程中，合金主要依靠钨相形成的骨架结构来抵抗压缩变形。钨含量越高，骨架越坚固，能够承受的压力就越大。例如含钨 90%的钨铜合金，其抗压强度可达 1000MPa 以上，而含钨 50%的合金，抗压强度仅在 600-700MPa 左右。

### 2.2.1.3 对韧性的影响

钨铜合金的韧性主要由铜相决定，与钨含量呈显著负相关。当钨含量较低（ $\leq 50\%$ ）时，铜相以连续基体形式存在，赋予合金良好的韧性。在受到冲击或外力作用时，铜相能够通过塑性变形吸收大量能量，分散应力，减少裂纹产生和扩展的可能性。此时少量分散的钨颗粒虽对铜相的连续性有一定影响，但整体上不改变合金以塑性变形为主的吸能方式，合金冲击韧性较好，如含钨 30%的钨铜合金，冲击韧性约为  $15-20\text{J}/\text{cm}^2$ ，接近纯铜的韧性水平，能够在承受一定冲击的环境中保持结构完整性，适用于一些需要一定抗冲击能力的结构件。

随着钨含量增加到 50%-80%，合金内部结构中钨相逐渐形成骨架，铜相变为分散相填充在钨骨架间隙。这种结构变化导致铜相的塑性变形空间大幅减小，当受到外力冲击时，铜相难以像之前那样充分变形以吸收能量，应力容易在钨-铜界面集中，引发界面开裂。因此，合金韧性随钨含量增加显著下降，例如含钨 60%的钨铜合金，冲击韧性降至  $5-10\text{J}/\text{cm}^2$ ，此时合金在承受冲击时更容易发生损伤。

当钨含量进一步升高至  $\geq 80\%$ ，连续的钨骨架几乎没有塑性变形能力，而铜相仅填充在微小间隙中，无法有效缓解应力集中。在冲击载荷下，钨骨架极易直接断裂，合金吸收的能量极少，呈现明显脆性，冲击韧性极低，如含钨 90%的钨铜合金，冲击韧性仅  $1-3\text{J}/\text{cm}^2$ ，接近纯钨的脆性状态，这种高钨含量的合金在使用中应避免承受较大冲击，主要应用于对硬度、强度要求高而对韧性要求较低的场景。

### 2.2.2 对物理性能的影响

钨铜合金的物理性能并非固定不变，而是会随着钨和铜的成分比例变化而呈现规律性改变。这是因为钨和铜本身的物理特性差异明显，当两者在合金中的占比此消彼长时，合金会综合两种金属的特性，形成新的物理性能表现。无论是密度、熔点这类与物质固有属性相关的性能，还是热膨胀系数这类与温度变化相关的性能，都能清晰看到成分比例带来的影响，而这种影响也让钨铜合金能通过调整成分来适配不同场景的物理性能需求。

#### 2.2.2.1 对密度的影响

钨铜合金的密度表现与其成分占比紧密相连，呈现出清晰的变化规律。钨，作为一种高密度金属，其原子量较大且原子排列紧密，赋予了自身极高的密度特性。而铜的密度在金属中虽处于中等水平，但相较于钨要低不少。当合金体系中钨的含量处于较低水平时，铜相在合金结构里占据主体地位，呈现出连续分布的状态，此时合金的密度特性主要受铜相的影响，整体密度接近纯铜的密度数值，在这种情况下，合金在一些对重量较为敏感且对材料其他特性（如良好的导电性、一定的加工性能等）有需求的场景中具备优势，例如在部分对重量限制

严格的电子设备内部连接部件上，低钨含量的钨铜合金能够在满足电气性能要求的同时，尽可能降低整体重量。

随着合金中钨含量逐步提升，高比重的钨相在合金内部结构中所占的比例不断增大，其对合金整体密度的贡献愈发突出。在这个过程中，原本以铜相为主导的连续结构逐渐被打破，钨颗粒开始相互靠近并逐渐构建起骨架结构，铜相则填充于钨骨架的间隙之中。由于钨相的密度远超铜相，所以随着钨含量的增加，合金密度稳步上升。这种密度逐渐增大的特性，使得合金在需要抵抗较大冲击力或者需要稳定配重的应用场景中发挥作用，比如在一些振动环境复杂的机械设备里，适当提高钨铜合金中的钨含量，增加其密度，可以增强部件在振动环境下的稳定性，减少因振动导致的位移或损坏风险。

当合金中的钨含量达到较高比例时，钨相在合金中已形成连续且稳固的骨架结构，铜相仅填充在钨骨架的微小孔隙之内，此时合金的密度特性几乎完全由钨相主导，合金密度也趋近于纯钨的密度。高钨含量的钨铜合金在一些特殊领域展现出独特价值，如在航空航天领域的某些部件制造中，需要材料在承受极端压力和高速气流冲击时保持结构完整性，高比重的钨铜合金凭借其高密度以及钨相带来的高强度、高硬度等特性，能够有效应对这些极端工况；在一些需要吸收高能粒子冲击或者抵抗高能量冲击的核工业相关场景中，高钨含量、高密度的钨铜合金也能发挥关键作用，利用其高密度来吸收和分散冲击能量，保障设备的安全运行。

#### 2.2.2.2 对熔点的影响

合金熔点的变化规律与成分占比存在复杂且紧密的关联。钨，拥有极为高的熔点，在常见金属中名列前茅，这源于其原子间强大的结合力以及复杂的晶体结构。而铜的熔点相对钨而言低很多，二者熔点差异显著。当合金中钨的含量处于较低水平时，合金的微观结构以铜相为连续基体，此时合金的熔点主要由铜相的性质所决定，整体熔点接近纯铜的熔点。不过，由于合金中分散存在着少量的钨颗粒，这些高熔点的钨颗粒会对合金的熔点产生一定程度的提升作用。尽管这种提升效果在低钨含量阶段并不十分显著，但已经使得合金熔点相较于纯铜有了一定程度的提高。这种熔点特性使得低钨含量的钨铜合金在一些对熔点要求不是特别高，但又需要一定程度的耐高温性能以及良好的导电、导热等其他特性的场景中得以应用，例如在部分电子设备的散热部件制造中，这类合金可以在设备正常运行产生一定热量的环境下，保持结构稳定，同时发挥良好的散热功能。

随着合金中钨含量逐渐增加，合金内部结构发生显著变化，钨相开始逐渐形成骨架结构。此时，高熔点的钨相在合金体系中对熔点的影响作用愈发明显。由于钨相的熔点远高于铜相，其形成的骨架结构在一定程度上限制了铜相在受热过程中的流动性和原子扩散，使得合金整体需要吸收更多的能量才能达到熔化状态，从而大幅提升了合金的熔点。在这个阶段，合金熔点的提升幅度随着钨含量的增加而逐渐增大，呈现出较为明显的上升趋势。这种特性使得合金在一些中高温环境下工作的部件制造中具有优势，例如在一些工业炉窑的内部连接部件或者高温传感器的保护外壳制造中，适当提高钨铜合金中的钨含量，提升其熔点，能够确保部件在较高温度环境下长时间稳定运行，不会因为温度升高而发生熔化变形等问题，保障设备的正常运转。当合金中的钨含量达到较高水平时，连续且稳固的钨骨架结构占据主导地位，铜相仅填充在钨骨架的微小孔隙中。此时，合金的熔点已大幅升高，趋近于钨的熔点。在这

#### 版权与免责声明

种情况下，合金在极端高温环境下展现出卓越的稳定性。例如在航空发动机的燃烧室部件、航天飞行器的重返大气层热防护部件等制造中，这些部件在工作过程中会面临数千度的高温环境，高钨含量的钨铜合金凭借其高熔点特性，能够承受如此极端的高温，有效防止部件在高温下熔化、变形，保证飞行器或发动机的安全运行。同时，铜相的存在又能在一定程度上为合金提供良好的导热性能，帮助散发因高温产生的热量，进一步提升合金在高温环境下的可靠性。

### 2.2.2.3 对热膨胀系数的影响

热膨胀系数是衡量材料在温度变化时尺寸稳定性的重要指标，钨铜合金的热膨胀系数与合金成分比例之间存在着密切的关系。铜，具有相对较大的热膨胀系数，这意味着在温度发生变化时，铜原子的热运动加剧，原子间距离增大，从而导致铜材料整体尺寸发生较为明显的膨胀或收缩。而钨的热膨胀系数则相对较小，其原子结构较为稳定，在温度变化时原子间距离的变化幅度相对较小。当合金中钨含量处于较低水平时，铜相在合金结构中占据主导地位，呈现出连续分布的状态。此时，合金的热膨胀特性主要由铜相决定，合金的热膨胀系数接近纯铜的热膨胀系数数值。在这种情况下，当合金所处环境温度发生变化时，合金会产生较大幅度的体积变化。例如，在一些电子设备的早期设计中，若使用低钨含量的钨铜合金作为连接部件，在设备长时间运行发热或者环境温度大幅波动时，由于合金的热膨胀系数较大，连接部件可能会因热胀冷缩而产生松动，影响设备的电气连接稳定性和整体性能。

随着合金中钨含量逐渐增加，低膨胀系数的钨相在合金内部结构中的占比不断增大，其对合金整体热膨胀的抑制作用逐渐凸显。在这个过程中，原本以铜相为主导的连续结构被逐渐打破，钨相开始形成一定的骨架结构，铜相填充于钨骨架的间隙之中。由于钨的热膨胀系数远小于铜相，其在合金中起到了稳定结构、限制整体热膨胀的作用。随着钨含量的进一步提升，合金的热膨胀系数逐渐减小。这种热膨胀系数随钨含量变化的特性，使得合金在一些对热膨胀系数匹配要求较高的场景中具有广泛应用潜力。例如在电子封装领域，不同的电子元器件往往由多种不同材料组成，每种材料的热膨胀系数各不相同。为了确保在设备运行过程中，不同元器件之间的连接部位不会因为温度变化产生的热胀冷缩差异而导致应力集中，引发连接失效或损坏，就需要选择热膨胀系数与其他元器件材料相匹配的封装材料。通过调整钨铜合金中的钨含量，可以使其热膨胀系数在一定范围内精确调整，从而满足与各类电子元器件材料（如陶瓷基板、半导体芯片等）的热膨胀系数匹配要求，保障电子设备在不同温度环境下能够稳定可靠地运行。

当合金中的钨含量达到较高比例时，连续且稳固的钨骨架结构在合金中占据主导地位，铜相仅填充在钨骨架的微小孔隙中。此时，合金的热膨胀系数已经趋近于钨的热膨胀系数，在温度变化时，合金的尺寸稳定性得到极大提升，热膨胀和收缩的幅度变得非常小。这种特性使得高钨含量的钨铜合金在一些对尺寸稳定性要求极高的精密仪器制造、航空航天等高精尖领域具有不可替代的作用。例如在航天飞行器的光学仪器部件制造中，这些仪器在太空中会面临极为复杂且剧烈变化的温度环境，从极寒的宇宙深空到接近太阳时的高温环境，温度变化范围可达数百摄氏度。高钨含量、低热膨胀系数的钨铜合金能够保证光学仪器的结构尺寸在如此极端的温度变化下几乎不发生改变，从而确保光学仪器的高精度光学性能不受影响，为航天探测任务提供稳定可靠的观测数据支持。

#### 版权与法律声明

#### 2.2.2.4 对电导率的影响

钨铜合金的电导率与成分比例密切相关。铜是良好的导电金属，其电导率较高，而钨的电导率相对较低。随着合金中钨含量的增加，电导率会逐渐降低。这是因为钨原子间距离较大且电子云密度低，加入到铜基体中会形成分散相和堆垛结构，在晶界和晶粒内部抵抗电子流动，引入更多离子缺陷和杂质原子，从而阻碍了电子在晶格中的自由传输。当钨含量超过一定比例后，电导率下降的速度开始减缓，可能是由于较高含量的钨形成的电子障碍开始相互作用，并限制了更多电子的流动。相反，增加铜的含量会提高合金的电导率，因为铜的高电导率特性能够更好地传导电流。

#### 2.2.2.5 对热导率的影响

热导率方面，铜的热导率明显高于钨。因此，一般情况下，钨铜合金中铜含量越高，热导率也就越高。这是因为纯金属主要通过自由电子进行导热，铜的自由电子浓度相对较高，能够更有效地传递热量。然而，过高的铜含量会导致钨含量减少，这可能会对合金的其他性能产生不利影响，如热膨胀系数增大。同时，合金的热导率还受到其他因素的影响，如致密度等。气体是热的不良载体，当材料内存在气孔时，热导率将随气孔率的增加而降低，所以致密度高的钨铜合金通常具有更高的热导率。

#### 2.2.3 对化学性能的影响

钨铜合金具有较好的化学稳定性。在抗氧化性能方面，钨具有较高的熔点和较好的抗氧化性，随着钨含量的增加，合金的抗氧化能力在一定程度上会增强。但合金中的铜在高温下容易被氧化，所以合金的抗氧化性能需要综合考虑钨铜的比例以及使用环境等因素。在耐腐蚀性方面，钨和铜本身都具有一定的耐腐蚀性，钨铜合金对一些常见的化学物质和环境具有较好的抵抗能力。然而，在某些特定的化学介质中如强氧化性酸等，铜可能会发生腐蚀反应，此时增加钨的含量可以在一定程度上提高合金的耐腐蚀性能。此外，杂质含量和制备工艺也会影响钨铜合金的化学性能，例如过高的氧含量会导致钨铜合金氧化，降低合金的强度和导电性。

##### 2.2.3.1 对耐腐蚀性的影响

钨铜合金的耐腐蚀性受其成分比例的显著影响，在不同的腐蚀环境中展现出多样的表现。钨本身具有较好的化学稳定性，在许多常见的腐蚀介质中，能够保持自身结构不被轻易侵蚀。当合金中钨含量相对较高时，钨相形成的骨架结构在一定程度上能够为合金提供抵御腐蚀的基础。例如在一些弱酸性环境中，高钨含量的钨铜合金，由于钨的化学稳定性，能够有效减缓合金整体被腐蚀的速度。这是因为腐蚀介质要穿透合金表面到达内部，首先需要突破钨相构成的相对稳定的“屏障”，而钨原子间较强的结合力以及相对稳定的电子结构，使得腐蚀介质中的离子难以与之发生化学反应，从而阻碍了腐蚀的进一步深入。

然而，铜在某些腐蚀环境下相对较为活泼。在一些氧化性较强的酸溶液中，比如硝酸，铜容易与硝酸发生氧化还原反应，生成相应的铜盐并释放出氮氧化物气体。当合金中铜含量较高时，这种活泼性对合金耐腐蚀性的负面影响就会凸显。在这样的环境中，铜相成为合金被腐

#### 版权与免责声明

蚀的主要“突破口”，腐蚀介质会优先与铜发生反应，导致合金表面出现腐蚀坑、锈斑等现象，进而破坏合金的整体结构，降低其性能。

但在一些中性或弱碱性的水溶液环境中，情况又有所不同。此时，若铜含量处于一定范围，铜能够在合金表面形成一层薄薄的钝化膜。这层钝化膜主要成分是一些铜的氧化物或氢氧化物，它具有一定的致密性，能够阻止溶液中的溶解氧以及其他腐蚀性离子进一步接触合金内部，从而在一定程度上提高合金的耐腐蚀性。例如在一些工业用水管道的内衬材料选择中，如果使用含铜量适中的钨铜合金，就可以利用铜的这种钝化特性，在长期接触水的过程中，保持管道内衬的完整性，减少腐蚀穿孔等问题的发生。同时，钨相的存在也能增强合金整体的结构强度，使其在受到水流冲击等外力作用时，钝化膜不易被破坏，进一步保障了合金的耐腐蚀性能。

### 2.2.3.2 对耐高温氧化性的影响

耐高温氧化性是衡量钨铜合金在高温有氧环境中性能的关键指标，其与成分比例的关系十分紧密。钨拥有极高的熔点，达到 3410℃，并且在高温下，其表面能够形成一层较为稳定的氧化膜。这层氧化膜主要成分是  $WO_3$  等氧化物，它具有较好的致密性和稳定性，能够阻止氧气进一步向合金内部扩散，从而对合金起到保护作用。当合金中钨含量较高时，在高温有氧环境下，合金表面优先形成以钨的氧化物为主的氧化膜。随着温度升高和时间延长，这层氧化膜不断增厚，且由于其结构稳定，能够有效地阻挡氧气与合金内部的进一步反应，极大地提升了合金的耐高温氧化性。例如在一些高温炉窑的内部结构件中，如果使用高钨含量的钨铜合金，在 1000℃ 甚至更高的温度环境下长时间工作，合金表面形成的稳定氧化膜能够确保结构件在较长时间内不被过度氧化，维持其机械性能和结构完整性。

相比之下，铜的熔点相对较低，为 1080℃，并且在高温下铜的氧化速度相对较快。当合金中铜含量较高时，在高温有氧环境中，铜会较快地被氧化成  $Cu_2O$  或  $CuO$  等氧化物。这些铜的氧化物与钨的氧化物相比，结构相对疏松，无法像钨的氧化膜那样形成有效的阻挡层。随着氧化过程的持续，铜的氧化物不断堆积，不仅会消耗合金中的铜元素，还可能导致氧化膜出现裂缝、剥落等情况，使得氧气能够更容易地穿透氧化膜，与合金内部的其他成分发生反应，从而降低合金的耐高温氧化性。在一些需要在高温有氧环境下长期稳定运行的电气触头材料中，如果使用了铜含量过高的钨铜合金，在频繁的通断电过程中，触头会因温度升高而快速氧化，表面形成的疏松氧化铜膜会影响触头的导电性和接触稳定性，严重时甚至会导致触头粘连、失效。

不过，在特定的成分比例和温度区间内，钨和铜的氧化物之间可能会发生一些相互作用，对合金的耐高温氧化性产生复杂影响。例如在某些中等温度范围（800℃-1200℃），当合金中钨和铜的含量比例适当时，铜的氧化物可能会与钨的氧化物发生一定程度的复合，形成一种相对更稳定的复合氧化膜结构。这种复合氧化膜兼具一定的致密性和柔韧性，既能够利用钨的氧化物的阻挡性能，又能借助铜的氧化物在一定程度上填充氧化膜中的微小裂缝，从而在一定程度上提高合金在该温度区间的耐高温氧化性。但这种协同作用对成分比例的要求较为苛刻，需要精确控制钨和铜的含量，才能实现最佳的耐高温氧化效果。

#### 版权与免责声明

### 2.3 中钨智造钨铜合金 MSDS

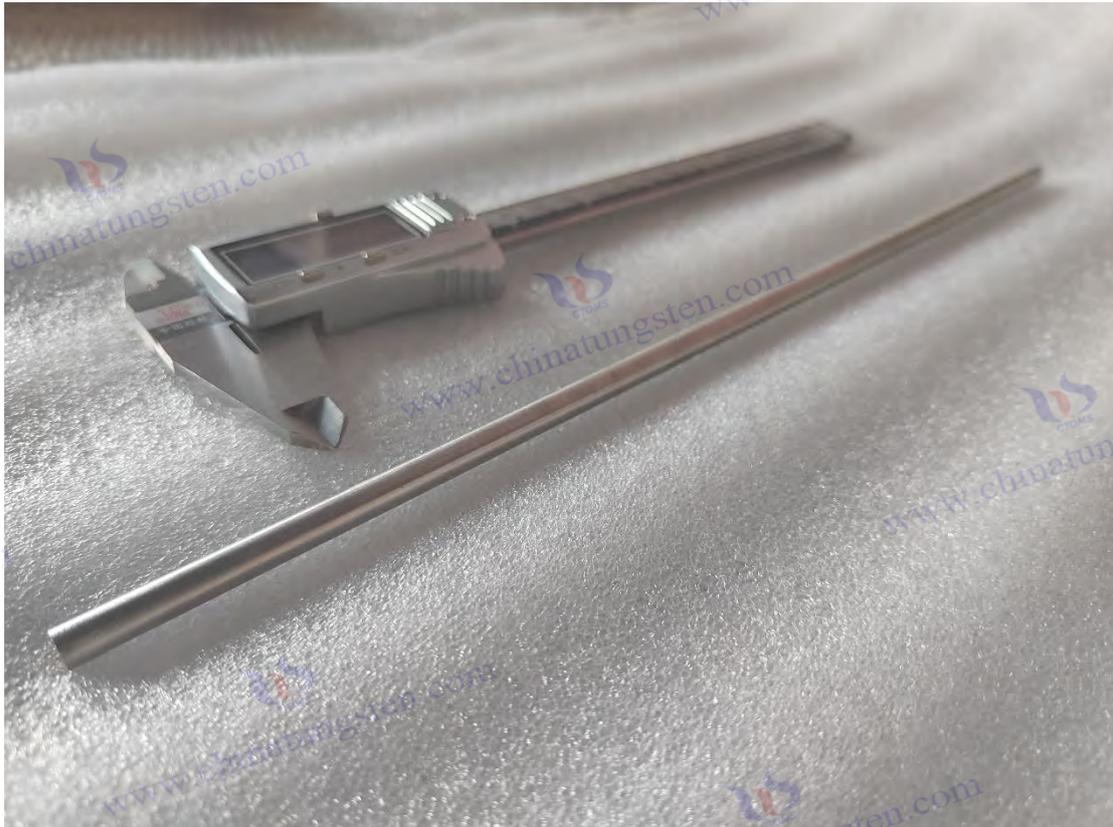
钨铜合金是一种由钨（W）和铜（Cu）通过粉末冶金工艺制成的复合材料，通常含有 70%-90% 的钨和 10%-30% 的铜，广泛应用于电气触点、高压开关和电加工电极。产品用途包括科研和工业制造，具体应用可能涉及散热片、电极等。MSDS 的目的是为工人和紧急救援人员提供安全使用指导，包含化学成分、潜在危害和处理建议。

根据通用钨铜合金 MSDS，钨铜合金通常不被归类为危险物质（符合 OSHA 29 CFR 1910.1200 标准），因此无特定信号词或危害声明。

钨铜合金的主要成分包括钨（CAS 号：7440-33-7，含量 70%-90%）和铜（CAS 号：7440-50-8，含量 10%-30%）。

钨铜合金在正常条件下不易燃烧，但加工过程中产生的粉尘可能引发火灾。推荐使用干粉、泡沫或二氧化碳灭火剂，切勿使用直接水流扑救金属粉末火灾，因水可能导致反应加剧。加热时可能释放金属氧化物烟雾，消防人员应佩戴自给呼吸器，避免吸入有毒烟气。

钨铜合金的成分符合 TSCA 清单要求，无显著生态危害，但加工废料可能对环境造成轻微影响。化学安全评估尚未完全完成，建议谨慎处理并遵循当地法规。



中钨智造钨铜合金

中钨智造科技有限公司  
钨铜合金产品介绍

一、钨铜合金概述

钨铜合金（Tungsten Copper Alloy）是钨和铜组成的合金，铜含量在 10%~50%。该合金集成了两种金属的优良性能，不仅具备钨的耐高温、抗电弧侵蚀特性，又拥有铜的良好导热导电能力，在电气、电力、电子、航空航天等高端领域中表现出卓越的综合性能。中钨智造提供多种钨铜合金定制服务，产品致密性高、性能稳定，可按客户需求加工成各类电极、热管理元件、真空部件等关键零部件。

二、钨铜合金性能

产品名称	化学成分%			物理机械性能			
	Cu	杂质总和≤	W	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HB)	电阻率 (MΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
钨铜(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	115	3.2	—
钨铜(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	140	3.7	—
钨铜(65)	35±2.0	0.5	余量	13.3	155	3.9	—
钨铜(70)	30±2.0	0.5	余量	13.8	175	4.1	790
钨铜(75)	25±2.0	0.5	余量	14.5	195	4.5	885
钨铜(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	220	5	980
钨铜(85)	15±2.0	0.5	余量	15.9	240	5.7	1080
钨铜(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	260	6.5	1160

三、钨铜合金分类（按用途）

**电接触材料：**如高压断路器触头、放电加工电极。

**热管理材料：**如电子封装基板、散热部件。

**军工与航空部件：**用于火箭喷嘴、导热结构件。

**电火花加工电极：**精密模具放电加工，抗烧蚀、加工精度高。

四、钨铜合金应用

**电力设备：**高压真空开关触头；断路器导电部件；大功率继电器、电弧熔断

**电子与半导体工业：**IGBT 模块散热基板；微波器件散热板；封装盖板与电子基

**放电加工：**EDM 电极材料（适用于硬质合金模具放电加工）；高精度放电成形电极

**航天与军工领域：**高温结构件（如航天喷管、尾喷口）；热控器件与冷板组件

**激光与等离子应用：**激光焊接/切割电极；等离子喷涂阴极/阳极元件

五、采购信息

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

电话：+86 592 5129595；592 5129696

更多钨铜合金资讯，请访问中钨在线网站（[www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

### 第三章 钨铜合金的微观结构与性能关联

钨铜合金作为一种高性能复合材料，凭借其优异的导电性、导热性、耐高温性和抗电弧腐蚀性，在电气、电子、国防和工业领域具有广泛应用潜力。该合金通过粉末冶金工艺制备，以钨（W）为基体或增强相，提供高熔点和硬度，以铜（Cu）为粘结相，贡献高导电性和导热性，能够满足高电流、高温或高磨损环境的苛刻要求。钨铜合金的性能与其微观结构密切相关，晶粒形态、相分布和界面特性直接影响其机械性能、导电性和耐久性。

#### 3.1 钨铜合金的微观结构特征洞察

钨铜合金的微观结构是其性能基础，反映了粉末冶金工艺中的混粉、压制、烧结和后处理过程。微观结构特征包括晶粒形态与尺寸、相分布与界面，这些因素通过显微镜（如扫描电子显微镜 SEM 和透射电子显微镜 TEM）分析得以洞察。钨的高熔点（3422° C）使其在烧结过程中保持固态，铜的较低熔点（1085° C）形成液相，润湿钨颗粒并填充间隙，形成独特的复合结构。这种结构直接影响合金的导电性、导热性、硬度和抗电弧侵蚀性。以下将详细分析晶粒形态与尺寸及相分布与界面。

##### 3.1.1 晶粒形态与尺寸

钨铜合金的晶粒形态与尺寸是微观结构特征的核心，决定了合金的机械性能和热学性能。晶粒形态主要由钨颗粒构成，因钨在烧结过程中保持固态，其形态保留了初始粉末的特性，通常呈现为多面体或近球形。铜相作为液态粘结相，在高温下渗透钨颗粒间隙，冷却后形成不规则的网络结构或填充相。晶粒形态的均匀性直接影响性能一致性，规则的钨颗粒分布有助于应力分散，而不规则形态可能导致局部薄弱点。

晶粒尺寸受到制备工艺的显著影响。初始钨粉的粒径通常在 1-10 微米范围内，通过高能球磨可进一步减小至纳米级。烧结温度和时间对晶粒尺寸有重要作用，较低温度保留较小晶粒，较高温度可能引发晶粒长大。液相烧结过程中，铜液相的流动性促进了钨颗粒的重排和生长，晶粒尺寸通常在 5-20 微米之间，具体取决于钨含量和工艺参数。纳米级钨粉的应用可将晶粒尺寸控制在亚微米级，显著提升性能。

晶粒形态与尺寸对性能的影响显著。较小的晶粒尺寸通过霍尔-佩奇效应增强了合金的强度和硬度，细小晶粒增加了晶界密度，阻挡位错移动，提高了抗变形能力。例如，钨粒径减小至纳米级时，硬度可提升 20%-30%，适合高磨损应用如电加工电极。晶粒尺寸还影响导电性和导热性，过小晶粒可能增加晶界电阻，降低电子和热量传输效率，但铜相的网络结构可弥补这一缺陷。均匀的晶粒形态减少了应力集中点，增强了抗疲劳性能，特别是在热循环或机械冲击环境中。

制备工艺的优化是控制晶粒形态与尺寸的关键。火花等离子烧结（SPS）通过快速加热和高压抑制晶粒过大生长，保持细小晶粒结构。热等静压（HIP）通过全向压力消除孔隙，改善晶粒分布一致性。添加微量元素（如镍或铁）可调节晶粒边界能量，稳定微观结构。晶粒尺寸的减小还提高了合金的抗电弧侵蚀性，细小钨颗粒分散了电弧能量，减少了表面熔化风险。

#### 版权与免责声明

优化方向包括开发超细纳米粉末或采用增材制造技术，实现更精确的晶粒控制。总之，钨铜合金的晶粒形态与尺寸为其性能提供了基础支持，尤其在需要兼顾强度和导电性的场景中。

### 3.1.2 相分布与界面

钨铜合金的相分布与界面是微观结构特征的重要组成部分，直接影响合金的力学性能和功能特性。相分布指钨相和铜相在合金中的空间排列，界面则是指两者之间的结合区域。钨作为高熔点相，呈分散颗粒状分布，铜作为低熔点相，形成连续或半连续的粘结网络。相分布的均匀性决定性能一致性，界面的质量则影响载荷传递和热量扩散。

相分布的形成依赖于烧结工艺。液相烧结是关键步骤，铜在 1085° C 以上熔化，润湿钨颗粒并通过毛细作用填充间隙。钨含量较高（如 W80/Cu20）时，铜相呈不连续分布，包围孤立的钨颗粒；铜含量较高（如 W60/Cu40）时，铜相形成连续网络，钨颗粒嵌入其中。相分布的均匀性通过高能球磨和混粉工艺控制，球磨时间过短可能导致钨团聚，过长则可能引入杂质。烧结后，铜相的冷却固化固定了相分布结构，热等静压可进一步优化均匀性。

界面的质量是相分布与性能关联的关键。钨与铜之间的界面通过液相烧结实现化学和机械结合，铜液相渗透钨颗粒表面，增强界面粘附力。界面处的冶金结合减少了空隙和缺陷，提高了载荷传递效率。界面还影响导电性和导热性，铜的连续网络通过界面与钨相连接，形成高效的电子和热量传输路径。界面强度的提升通过添加微量元素（如镍）实现，镍可改善润湿性，增强界面结合。弱界面可能导致剥离或裂纹，特别是在电弧或热应力作用下。

相分布与界面对性能的影响显著。均匀的相分布提高了合金的综合性能，钨相提供硬度和耐高温性，铜相确保导电性和导热性。界面质量直接影响抗电弧侵蚀性，强界面减少了电弧能量在相界处的集中烧蚀。铜含量高的合金（如 W70/Cu30）因铜相连续性好，导电性和导热性优异，适合散热基板；钨含量高的合金（如 W90/Cu10）因钨相占主导，硬度和耐磨性强，适合电极应用。界面缺陷如孔隙或未润湿区域可能降低性能，需通过工艺优化消除。

制备工艺的改进是优化相分布与界面的关键。真空烧结减少氧化，保持界面纯净；分段升温控制铜液相流动，改善相分布。纳米级粉末的应用增强了界面接触面积，提高了结合强度。优化方向包括开发功能梯度材料，逐步过渡钨和铜相分布，或采用智能监测技术实时评估界面质量。总之，钨铜合金的相分布与界面为其性能提供了重要支撑，尤其在需要兼顾导电性、耐高温性和机械强度的场景中。

### 3.1.3 孔隙与缺陷表现

钨铜合金的孔隙与缺陷是微观结构中的关键特征，直接影响合金的力学性能、导电性和耐久性。孔隙是指烧结过程中未被铜液相完全填充的微小空隙，缺陷则包括裂纹、未润湿颗粒或杂质团聚，这些结构缺陷通常通过显微镜观察或密度测试（如阿基米德法）识别。孔隙率的高低与制备工艺密切相关，过高的孔隙可能降低致密度，影响性能一致性。

孔隙的形成机制主要与粉末特性、混粉均匀性和烧结条件有关。初始钨粉粒径不均或团聚可

#### 版权与免责声明

能导致局部铜液相不足，留下微孔。压制过程中压力不足或粉末流动性差可能引入初始空隙，烧结温度过低（如低于 1100° C）或时间不足可能未能完全消除这些空隙。铜液相的润湿性也起到关键作用，铜与钨的润湿角较高（约 30° -40° ），若烧结气氛（如氧化环境）引入杂质，润湿效果减弱，孔隙率增加。典型孔隙尺寸在 1-10 微米范围内，分布不均可能形成大孔（>20 微米），显著降低性能。

缺陷的表现形式多样。裂纹可能在压制或冷却过程中因热应力或相变应力产生，尤其在钨含量高时，铜相收缩不均易引发界面裂纹。未润湿颗粒是指钨颗粒表面未被铜液相充分渗透，通常因烧结温度不足或铜含量过低导致，表现为孤立钨颗粒。杂质团聚（如氧化物或碳化物）可能来自原料或加工过程，集中在晶界或界面，影响载荷传递和热量扩散。孔隙和缺陷的密度通过热等静压（HIP）或火花等离子烧结（SPS）可显著降低，致密度可达 98% 以上。

孔隙与缺陷对性能的影响显著。高孔隙率降低了合金的抗弯强度和硬度，因空隙成为应力集中点，易引发断裂，特别在高磨损应用如电极中。导电性和导热性也受损，孔隙增加了电阻和热阻，降低了电流和热量传输效率。抗电弧侵蚀性同样下降，孔隙易成为电弧能量集中点，加速表面熔化。缺陷如裂纹可能在热循环或机械冲击下扩展，缩短使用寿命。优化方向包括采用纳米级粉末提高颗粒均匀性，优化烧结参数（如分段升温）减少孔隙，或通过表面涂层填补缺陷。总之，孔隙与缺陷的控制是提升钨铜合金性能的关键。

### 3.1.4 不同制备工艺下的结构差异

钨铜合金的微观结构因制备工艺的不同而呈现显著差异，常见的工艺包括传统粉末冶金法、渗铜法、火花等离子烧结（SPS）和增材制造（3D 打印），每种方法对晶粒形态、相分布、孔隙率和界面质量有独特影响。工艺选择直接决定合金的性能表现，需根据应用需求优化。

传统粉末冶金法是广泛使用的工艺，涉及混粉、压制和烧结。钨粉和铜粉通过高能球磨混合，压制成形后烧结。结构特征包括钨颗粒呈多面体分布，铜相形成不连续网络，孔隙率通常在 5%-10% 之间。界面结合依赖铜液相润湿，质量受烧结温度和时间控制，较高温度可能导致晶粒长大，降低均匀性。适用于导电性和导热性要求较高的散热基板。

渗铜法通过先烧结钨骨架，再渗入液态铜制备合金。钨骨架在较高温度下形成多孔结构，铜渗透填充。结构特征为钨相呈连续骨架，铜相分布均匀，孔隙率可降至 2%-5%。界面结合强，减少了未润湿颗粒，但工艺复杂，能耗较高。适合需要高致密度的电极应用。

火花等离子烧结（SPS）采用脉冲电流和机械压力，烧结时间短（数分钟）。结构特征为钨颗粒细小，铜相分布均匀，孔隙率低于 2%，晶界清晰。快速加热抑制晶粒长大，界面结合力强，适合高硬度和抗电弧侵蚀的应用如触头。缺点是设备成本高，适用范围有限。

增材制造（如选区激光熔化 SLM）通过逐层沉积粉末制备合金。结构特征为钨和铜相呈梯度分布，晶粒尺寸可控，孔隙率取决于激光参数，优化的条件下可低于 3%。界面质量高，支持复杂几何形状，但热应力可能引入微裂纹。适合航空航天定制部件。工艺差异影响性能。传统粉末冶金法经济但孔隙率较高，适合大批量生产；渗铜法致密性好但成本高；SPS 提供高

#### 版权与免责声明

性能但适用小批量；增材制造灵活但需优化热应力。优化方向包括结合多工艺（如 SPS+渗铜）提升致密度，或采用智能监测技术实时调整参数。总之，制备工艺的结构差异为性能优化提供了多样化选择。

### 3.2 钨铜合金微观结构与性能的内在联系

钨铜合金的微观结构与其性能之间存在内在联系，晶粒形态、相分布、孔隙与缺陷及制备工艺共同决定其导电性、导热性、机械强度和耐久性。微观结构的优化通过增强界面结合、减少缺陷和控制相比比例实现，满足不同应用需求。

晶粒尺寸对性能的影响通过霍尔-佩奇效应体现。细小晶粒增加晶界密度，增强强度和硬度，但可能增加电阻，降低导电性。相分布决定导电和导热路径，铜相连续网络提升性能，钨相增强耐高温性。孔隙和缺陷降低致密度，影响抗弯强度和抗电弧侵蚀性，致密结构（如 SPS 制备）显著改善性能。界面质量影响载荷传递和热扩散，强界面提升综合性能。

优化微观结构需结合应用场景。散热基板需高铜相连续性，电极需高钨相致密性。未来研究可探索纳米复合结构或功能梯度设计，进一步揭示微观结构与性能的内在联系。

#### 3.2.1 晶粒结构对强度的作用机制

晶粒结构对钨铜合金强度的作用机制主要体现在晶界的阻挡效应和应力分散能力上。强度是合金抵抗变形或断裂的能力，直接与晶粒尺寸和形态相关。较小的晶粒通过增加晶界密度，限制了位错的移动，这是一种关键的强化机制。晶界作为位错的障碍，迫使位错发生堆积或缠结，消耗更多能量才能继续移动，从而显著提升了合金的抗变形能力。晶粒的均匀分布进一步优化了这种效应，减少了局部应力集中点，增强了整体结构的承载能力。

晶粒形态也对强度产生重要影响。规则的多面体或近球形的晶粒能够更有效地分散外加载荷，避免应力在特定方向的过度积累。相比之下，不规则或扁平的晶粒可能导致应力分布不均，增加断裂风险。烧结过程中，晶粒的重排和生长受到温度和压力的调控，细小晶粒的形成依赖于快速冷却或短时烧结工艺，这些过程保持了晶界的密集分布。钨相作为高硬度骨架，其晶粒结构为合金提供了刚性支撑，而铜相的粘结作用进一步增强了晶粒间的连接强度。

这种作用机制使钨铜合金在需要高强度的应用中表现出色。例如，在机械冲击或高负荷环境中，细小晶粒结构能够有效抵抗形变，延长部件的使用寿命。晶界强化的效果还与微观结构的致密性相关，孔隙或缺陷的减少进一步提升了强度。优化晶粒结构需通过控制烧结参数或引入微量元素来稳定晶界，增强合金的综合机械性能，从而在高可靠性场景中发挥更大潜力。

#### 3.2.2 晶粒结构对韧性的作用机制

晶粒结构对钨铜合金韧性的作用机制主要体现在晶界的能量吸收能力和塑性变形协调上。韧性是合金吸收能量并抵抗断裂的能力，与晶粒尺寸和界面特性密切相关。较大的晶粒通常具有较高的塑性，能够通过位错滑动和孪晶变形吸收能量，从而提高韧性。然而，过大的晶粒

可能降低强度，导致性能失衡。较小的晶粒则通过增加晶界密度，增强了材料的抗裂纹扩展能力，但可能牺牲部分塑性，需在强度和韧性之间寻求平衡。

晶粒形态对韧性的影响同样显著。规则的晶粒形态有助于应力的均匀传递，减少裂纹萌生和扩展的风险。铜相作为低熔点粘结相，其延展性在晶粒间提供了额外的能量吸收途径，当外部载荷作用时，铜相能够发生塑性变形，缓冲钨相的脆性效应。晶界处的微观变形还通过位错吸收和再分布机制，缓解了局部应力集中。烧结过程中，铜液相的流动性促进了晶粒间的紧密结合，增强了韧性基础，而快速冷却工艺有助于保持细小晶粒的塑性特征。

这种作用机制使钨铜合金在动态载荷或冲击环境中表现出优异的韧性表现。例如，在电弧作用或机械振动场景中，晶粒结构的协调变形能力能够有效防止脆性断裂，延长部件寿命。韧性的提升还依赖于微观结构的均匀性，孔隙或未润湿区域的减少增强了载荷传递效率。

### 3.2.3 相分布与电导率的关联

相分布与钨铜合金电导率的关联主要体现在铜相的连续性和钨相的分散性上。电导率是合金传输电流能力的指标，直接与相分布的均匀性相关。铜作为高导电相，其连续网络是电导率的基础，当铜相形成贯通路径时，电子能够高效传递，显著提升合金的导电性能。钨相作为低导电增强相，其分散分布不会显著阻碍电流流动，但过高的钨含量可能增加电阻，降低整体电导率。

相分布的均匀性对电导率至关重要。铜相的连续性依赖于液相烧结过程中铜的充分润湿和填充，若钨颗粒团聚或铜液相不足，可能会形成不连续区域，增加接触电阻。钨相的均匀分散则通过混粉工艺控制，球磨时间和混合均匀性直接影响相分布质量。烧结温度的适当提高促进了铜液相的流动，增强了相间的连接，优化了电导率。界面质量也起到辅助作用，钨与铜之间的良好结合减少了电子散射，维持了高导电性。

这种关联使钨铜合金在需要高导电性的应用中表现出色。例如，在电气触点或散热基板中，铜相的连续网络确保了高效的电流传输，满足高电流密度的需求。相分布的优化还影响抗电弧侵蚀性，均匀的铜相分布减少了电弧能量集中点，间接支持导电性能的稳定性。优化相分布需通过调整铜含量或采用多步烧结工艺，增强铜相的网络结构，以提升电导率并满足高性能电气应用的要求。

### 3.2.4 相分布与热导率的关联

相分布与钨铜合金热导率的关联主要体现在铜相的连通性和钨相的分散性上。热导率是合金传递热量的能力，直接与相分布的均匀性密切相关。铜作为高导热相，其连续网络是热传导的基础，当铜相形成贯通路径时，热量能够高效传递，显著提升合金的散热性能。钨相作为低导热增强相，其分散分布不会显著阻碍热流，但过高的钨含量可能降低整体热导率，因其热传导能力逊于铜。

相分布的均匀性对热导率至关重要。铜相的连续性依赖于液相烧结过程中铜的充分流动和渗

透，若钨颗粒团聚或铜液相分布不均，可能会形成热阻点，阻碍热量传递。钨相的均匀分散通过混粉工艺实现，良好的混合性确保了相间的无缝连接，优化了热传导路径。烧结温度的适当调控促进了铜液相的润湿和填充，增强了相间的热传递效率。界面质量也在其中发挥作用，钨与铜之间的良好结合减少了热量散射，维持了高效的热扩散。

这种关联使钨铜合金在需要高散热性能的应用中表现出色。例如，在功率电子器件或高温设备中，铜相的连续网络能够迅速分散热量，防止过热导致的性能下降。相分布的优化还影响抗电弧侵蚀性，均匀的铜相分布有助于热量均匀扩散，减少电弧引发的局部高温损伤。相分布的调整需通过优化铜含量或采用多步烧结工艺，确保铜相形成有效的热传导网络，从而提升热导率并满足高性能热管理需求。

### 3.2.5 孔隙与缺陷对硬度的影响

孔隙与缺陷对钨铜合金硬度的影响主要体现在结构致密性和应力分布上。硬度是合金抵抗表面压痕或磨损的能力，直接与微观结构的完整性相关。孔隙作为微小空隙，降低了材料的整体致密度，削弱了其抗变形能力。缺陷如裂纹或未润湿颗粒则成为应力集中点，容易引发局部失效，从而降低硬度。微观结构的均匀性在硬度表现中起着关键作用，孔隙和缺陷的存在直接削弱了合金的机械强度。

孔隙的形成通常与烧结过程中的不充分填充或材料收缩有关，当铜液相未能完全渗透钨颗粒间隙时，残留空隙会分散在合金内部。这些孔隙在外部载荷作用下容易引发应力集中，导致材料在较低压力下发生变形或断裂。缺陷如裂纹可能在压制或冷却过程中因热应力产生，尤其在相变或温度梯度较大的区域，裂纹的扩展进一步降低了硬度。未润湿颗粒则因缺乏与铜相的有效结合，孤立存在，削弱了整体结构的承载能力。这些因素共同作用，使合金的表面抗性下降。

孔隙与缺陷对硬度的影响还体现在机械性能的稳定性上。较高的孔隙率导致硬度分布不均，局部区域可能出现明显的软化现象，特别是在高磨损环境中，孔隙易成为磨损的起点。缺陷的存在加剧了这种效应，裂纹可能在反复加载下扩展，加速材料失效。微观结构的优化通过消除孔隙和修复缺陷来增强硬度，例如通过改善烧结工艺或采用后处理技术增强材料的致密性。优化微观结构能够显著提高合金在机械冲击或表面接触场景中的耐久性，使其更适合高硬度需求的应用，如电极或切削工具。

### 3.2.6 孔隙与缺陷对耐腐蚀性的影响

孔隙与缺陷对钨铜合金耐腐蚀性的影响主要体现在表面保护和介质渗透上。耐腐蚀性是合金抵抗环境介质（如氧气、湿气或化学物质）侵蚀的能力，直接与微观结构的完整性相关。孔隙作为开放或闭合的空隙，为腐蚀介质提供了进入内部的通道，加速了材料劣化。缺陷如裂纹或杂质则成为腐蚀的起始点，容易引发局部腐蚀或应力腐蚀开裂，从而降低耐腐蚀性。微观结构的致密性在耐腐蚀性能中起着决定性作用。

孔隙的存在使得腐蚀介质能够渗透到合金内部，特别是在潮湿或含酸环境中，孔隙内的积聚

液可能引发电化学腐蚀。铜相作为粘结相，易受腐蚀介质的影响，而孔隙的存在加剧了铜的氧化或溶解，削弱了合金的整体稳定性。缺陷如裂纹则为腐蚀提供了扩展路径，裂纹尖端的高应力状态加速了腐蚀反应，特别是在高温或电弧作用下，缺陷可能迅速演变为严重损伤。杂质团聚还可能引入额外的电化学活性点，进一步降低耐腐蚀性。

孔隙与缺陷对耐腐蚀性的影响还体现在长期使用中的表现上。较高的孔隙率导致表面防护能力下降，特别是在暴露于腐蚀性气体或液体时，孔隙内的腐蚀产物可能堵塞通道，但无法阻止进一步侵蚀。缺陷的存在使得局部区域的腐蚀速率高于整体，特别是在应力腐蚀或疲劳腐蚀场景中，缺陷可能引发材料开裂。微观结构的优化通过减少孔隙和缺陷来增强耐腐蚀性，例如通过真空烧结减少氧化或采用表面涂层隔离腐蚀介质。优化后的合金能够在恶劣环境中保持长期稳定性，适用于需要高耐腐蚀性的应用，如海洋设备或化学加工部件。

### 3.3 钨铜合金微观结构的演变规律

钨铜合金的微观结构在制备和使用过程中会经历动态演变，其变化规律受多种因素驱动，直接影响合金的性能表现。微观结构的演变反映了材料在不同条件下的适应性和稳定性，涉及晶粒形态、相分布以及缺陷特征的调整。以下将详细探讨成分比例变化引发的演变、热处理过程中的结构转变，以及使用环境对结构的反馈，采用文字描述突出演变机制、过程特征和性能影响，强调其在优化合金应用中的重要性。

#### 3.3.1 成分比例变化引发的演变

成分比例变化是钨铜合金微观结构演变的重要驱动因素，通过调整钨与铜的比例来影响晶粒分布、相界面和孔隙特征。钨含量增加时，其颗粒在合金中占据主导地位，呈现更为密集的骨架结构，铜相则逐渐从连续网络转变为分散填充相。这种变化导致晶粒形态趋于规则，界面区域减少，孔隙可能因铜液相不足而增加。相反，铜含量升高时，铜液相的流动性增强，润湿钨颗粒并填充间隙，使相分布更加均匀，晶界逐渐模糊，孔隙率因铜的填充效应而降低。

成分比例的调整还引发相界面的演变。钨含量较高时，界面主要表现为钨颗粒间的直接接触，结合强度依赖于烧结条件；铜含量增加时，界面由铜相主导，润湿作用增强，界面结合力得到改善，但可能引入热应力。晶粒尺寸也随比例变化而调整，钨比例高时晶粒保持较大尺寸，铜比例高时晶粒因液相重排而细化。这种演变直接影响微观结构的致密性，进而调节合金的力学和电学性能。

这种演变规律使钨铜合金能够适应不同应用需求。例如，增加钨比例增强了耐高温和抗电弧侵蚀能力，适合高磨损环境；提高铜比例则提升了导电性和导热性，适合散热基板。演变控制需通过优化混粉工艺和烧结参数，确保成分比例与微观结构之间的协调发展。

#### 3.3.2 热处理过程中的结构转变

热处理过程是钨铜合金微观结构演变的重要阶段，通过温度、时间和气氛的调控引发晶粒生长、相重配和缺陷消亡等转变。加热初期，铜相因较低熔点首先熔化，润湿钨颗粒并填充孔

隙，促使相分布趋于均匀。随温度升高，晶粒开始发生重排和长大，钨颗粒可能因热扩散而调整形态，晶界逐渐清晰或融合。长时间热处理可能导致晶粒过大，界面处出现热应力，孔隙因材料收缩而减少或重分布。

热处理还引发相结构的转变。铜液相的流动性增强了钨颗粒间的连接，部分未润湿区域可能被填补，界面结合力随之改善。然而，过高的温度可能导致铜挥发或氧化，影响相分布的稳定性。缺陷如裂纹或杂质团聚在热处理中可能消亡或迁移，特别是在压力辅助条件下，微观结构趋于致密。冷却过程则固定了这些变化，快速冷却保留细小晶粒，缓慢冷却促进晶粒生长和相稳定化。

这种结构转变使钨铜合金的性能得以调整。例如，适当热处理增强了材料的均匀性和强度，适合需要高可靠性的触头应用；过热可能降低韧性，需谨慎控制参数。热处理的优化需结合具体工艺，如分段升温或惰性气氛保护，以实现微观结构的理想演变。

### 3.3.3 使用环境对结构的反馈

使用环境对钨铜合金微观结构的反馈体现为外部条件引发的结构调整和劣化，涉及温度、湿度、电流和机械应力等因素。在高温环境下，铜相可能发生软化或局部熔化，钨颗粒间的连接受热应力影响，界面可能出现微裂纹或剥离。长期暴露在潮湿或腐蚀性环境中，铜相易受氧化或侵蚀，孔隙成为腐蚀介质的进入通道，加速结构劣化。电弧作用下，表面晶粒可能因高温烧蚀而重塑，孔隙和缺陷扩展加剧微观结构的破坏。

机械应力环境对结构反馈显著。反复加载可能导致晶粒变形或断裂，界面处产生新的裂纹，孔隙因应力集中而扩展。电流通过时，局部高温引发相重配，铜相可能迁移或挥发，钨骨架结构逐渐暴露。使用环境中的循环变化，如热循环或电弧开关，促使微观结构逐步适应或劣化，晶界和相分布可能发生动态调整，影响长期性能。

这种反馈使钨铜合金在不同环境下表现出不同的耐久性。例如，在高温电弧场景中，结构调整增强了抗侵蚀能力；而在潮湿环境中，劣化加速了寿命衰减。环境的反馈为优化设计提供了依据，通过表面涂层或环境控制可减缓结构劣化。

## 3.4 钨铜合金微观结构的调控策略

钨铜合金的微观结构调控策略旨在通过多种技术手段优化晶粒形态、相分布、孔隙特征和界面质量，以提升合金的导电性、导热性、机械强度和耐久性。微观结构的调控是实现高性能应用的关键，涵盖制备工艺的精细化、合金元素的添加优化以及结构与性能关系的深入探索。这些策略通过工艺参数的调整和材料成分的设计，适应电气触点、焊接电极和高可靠性部件等多样化需求。

### 3.4.1 基于制备工艺的控制方法

基于制备工艺的控制方法是调控钨铜合金微观结构的基础，通过优化混粉、压制、烧结和后

处理等环节，精确调整微观特征。混粉工艺是调控的起点，通过高能球磨或机械合金化技术实现钨粉和铜粉的均匀混合。良好的混粉效果能够减少颗粒团聚，确保钨和铜相的均匀分布，为后续性能奠定基础。混粉过程中的参数调整，如研磨时间和介质选择，影响粉末粒径和形貌，细小颗粒有助于增强强度，而较大颗粒可能改善韧性。选择合适的粉末粒度范围是控制晶粒尺寸的关键，工艺设计需根据目标性能进行定制。

压制过程通过施加压力将粉末成型，初步确定晶粒排列和孔隙分布。压力的均匀性直接影响坯体的致密性，过低压力可能导致松散结构，增加孔隙率，而过高压可能引发颗粒破裂或应力集中。压制模具的设计和工艺参数的优化能够有效控制坯体密度和几何精度，为烧结提供稳定的基础。压制后坯体的微观结构初步反映了钨和铜的分布特征，铜相开始展现其润湿潜力，为液相烧结做好准备。压制工艺的精细化有助于减少初始缺陷，为后续结构的优化打下良好基础。

烧结工艺是微观结构调控的核心阶段，通过高温处理实现相间的结合和孔隙的减少。液相烧结是常见方法，铜在高温下熔化，润湿钨颗粒并填充间隙，增强界面结合力。烧结温度和控制时间的控制是关键，较低温度有助于保留细小晶粒，较高温度促进铜液相的充分流动，减少未润湿区域。烧结气氛的选择，如真空或惰性气体环境，能够防止氧化杂质的引入，保持钨和铜的纯度，优化相分布。分段升温或压力辅助烧结技术进一步改善微观结构，减少孔隙并增强致密性，特别适合需要高强度和耐腐蚀的应用场景。烧结工艺的优化确保了微观结构的均匀性和稳定性。

后处理工艺为微观结构的精细调控提供了补充手段。热等静压通过全向压力消除残余孔隙，改善晶粒分布一致性，增强材料的整体性能。表面处理如抛光或涂层技术能够修复缺陷，增强抗腐蚀性和抗电弧侵蚀能力。热处理过程通过调整温度和冷却速率，调控晶粒生长和相稳定性，平衡强度与韧性。不同后处理方法的选择取决于具体应用需求，例如高导电性应用可能优先考虑表面清洁，而高耐磨应用可能需要硬化处理。基于制备工艺的控制方法使钨铜合金的微观结构能够适应多样化的性能要求，为高可靠性部件提供了坚实支持。

### 3.4.2 合金元素添加的优化手段

合金元素添加的优化手段通过引入微量元素或复合相，调节钨铜合金的微观结构，增强其性能表现。添加元素的种类和含量直接影响晶粒形态、相分布、界面结合和缺陷特征，旨在改善导电性、导热性、机械强度或耐腐蚀性。常见的添加元素包括镍、铁或钴，这些元素能够通过化学亲和性或物理作用，与钨和铜发生相互作用，优化微观结构。

镍作为常见的添加元素，能够显著改善铜对钨的润湿性。添加镍后，液相烧结过程中铜液相的流动性增强，促使钨颗粒间的界面结合更紧密，减少未润湿区域和孔隙。这种润湿改善效果增强了相分布的均匀性，进而提升了材料的致密性和强度。镍还可能在晶界处形成稳定的化合物，抑制晶粒长大，保持细小晶粒结构，有助于提高合金的抗变形能力。铁的添加则主要通过提高烧结过程中的扩散速率，增强钨和铜之间的相互渗透，改善界面质量，增强载荷传递效率。钴则因其延展性，能够在微观结构中提供额外的韧性支持，缓冲钨相的脆性效应。添加元素的优化还涉及控制其分布和含量。过量添加可能引入杂质团聚或相分离，削弱微观

结构的稳定性，因此需通过精确配比和工艺调整实现平衡。添加元素的引入通常在混粉阶段完成，通过与钨和铜粉混合，确保其均匀分散。烧结过程中，添加元素可能与铜形成低熔点共晶相，加速液相形成，进一步优化微观结构。后续热处理或表面处理能够进一步稳定添加元素的效应，增强其对性能的贡献。

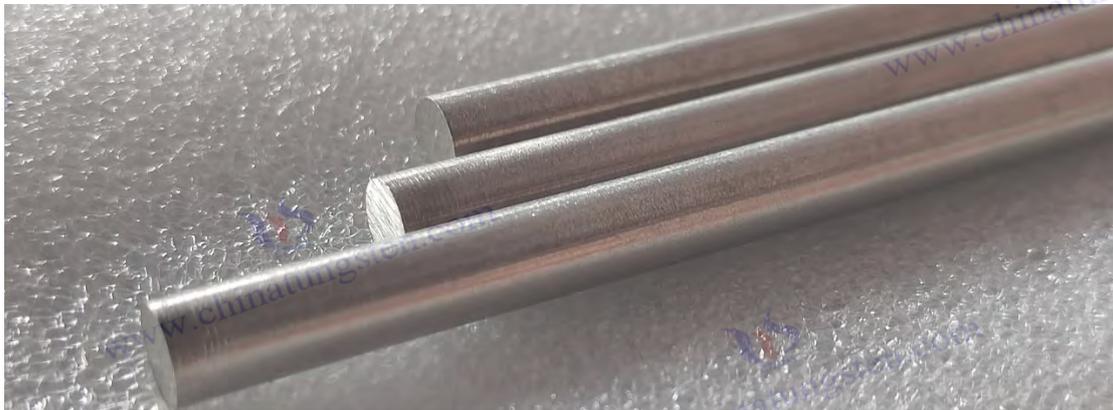
这种优化手段使钨铜合金的微观结构能够适应特定应用需求。例如，在需要高强度的电极中，镍的添加增强了界面结合和致密性；在需要高韧性的触头中，钴的加入改善了抗冲击能力。添加元素的调控还支持耐腐蚀性和抗电弧侵蚀性能的提升，通过减少缺陷和优化相分布，延长使用寿命。未来的发展方向包括探索新型添加元素或复合相，结合智能设计技术，动态优化微观结构，以进一步提升钨铜合金的综合性能。

### 3.4.3 结构调控与性能的关系

结构调控与钨铜合金性能的关系体现为微观结构的优化直接影响其导电性、导热性、机械强度和耐久性的表现。这一关系通过晶粒形态、相分布、孔隙特征和界面质量的调整得以实现，反映了微观结构对宏观性能的决定性作用。晶粒结构的细化通过增加晶界密度，增强了材料的抗变形能力，从而提升了强度和硬度，同时可能对韧性产生一定影响。相分布的均匀性决定了导电性和导热路径的效率，铜相的连续网络优化了电子和热量传递，而钨相的分散性提供了耐高温和抗磨损支持。

孔隙和缺陷的控制是结构调控与性能关系中的关键环节。孔隙的减少提高了材料的致密性，增强了抗弯强度和表面抗性，同时减少了热阻和电阻，提升了导电性和导热性。缺陷如裂纹或未润湿颗粒的消除降低了应力集中点，改善了抗疲劳性和耐腐蚀性。界面质量的提升通过增强相间的结合力，优化了载荷传递和热扩散效率，间接支持了机械性能和抗电弧侵蚀能力。结构调控的全面性在于其能够平衡这些性能之间的相互制约，满足多样化应用需求。

这种关系使钨铜合金的性能能够根据微观结构调整实现定向优化。例如，在高导电性需求的散热基板中，铜相的连续分布和孔隙的减少显著提升了性能；在高耐磨性需求的电极中，细小晶粒和致密钨骨架增强了耐久性。结构调控的策略还揭示了性能的局限性，过细晶粒可能降低韧性，过高钨含量可能增加脆性，需通过综合调控实现性能平衡。



中钨智造钨铜合金

## 第四章 钨铜合金制备工艺

钨铜合金的制备工艺是生产高性能复合材料的关键，涉及多种技术方法以实现钨和铜的均匀结合。钨铜合金因其优异的导电性、导热性、耐高温性和抗电弧腐蚀性，广泛应用于电气、电子和工业领域。制备工艺的目标是通过控制原料、工艺参数和设备条件，优化合金的微观结构和性能表现。不同的制备方法如真空熔渗、粉末冶金和渗铜法各有特点，适用于特定应用场景。

### 4.1 真空熔渗制备钨铜合金

真空熔渗制备钨铜合金是一种通过高温将液态铜渗透至钨骨架内部的制备方法，旨在形成致密且均匀的复合结构。该工艺利用钨的高熔点和铜的低熔点特性，通过烧结制备多孔钨骨架，随后在真空环境中熔化铜并使其渗透填充。真空环境是工艺的核心特征，能够移除空气中的氧气和杂质，防止氧化反应，确保铜液与钨骨架的良好结合。工艺过程包括钨骨架的制备、铜的熔渗和冷却固化，每个阶段的控制都直接影响合金的微观结构和性能表现。真空熔渗因其能够实现高致密性和均匀相分布，特别适用于需要高导电性和耐高温性能的部件，如高压断路器触头和电阻焊接电极。工艺的优化重点在于提升渗透均匀性、减少孔隙和增强界面结合，以满足多样化的应用需求。

#### 4.1.1 熔渗原理与设备要求

真空熔渗制备钨铜合金的原理基于液态铜在真空环境下的渗透特性，通过高温将铜渗入钨骨架内部，形成均匀的复合材料。熔渗过程的核心在于铜的较低熔点使其在加热下转变为液态，利用毛细作用和重力效应渗透到钨多孔骨架的微小孔隙中。钨作为高熔点材料保持固态，构成稳定的骨架，为铜的渗透提供支撑。真空环境通过排除空气中的氧气和杂质，防止氧化反应，确保铜液能够充分润湿钨表面。熔渗过程中的温度和真空度调控铜液的流动性和渗透深度，直接影响合金的微观结构和性能。工艺成功的关键在于铜液与钨骨架之间的良好界面结合和渗透均匀性，界面质量和孔隙分布成为决定性能的重要因素。

实现这一工艺需要专门的设备支持。核心设备是真空熔渗炉，配备高温加热系统和高效真空泵，以维持稳定的真空环境，防止氧化和气体残留。加热系统采用电阻加热或感应加热技术，需具备均匀升温和精确控温能力，确保铜完全熔化并渗透至钨骨架的每个角落。真空泵需具备高抽速和低泄漏率，以实现低压状态，避免杂质干扰。模具或坩埚用于支撑钨骨架并容纳液态铜，材料需耐高温且与钨、铜无化学反应，以防止污染或结构损伤。辅助设备如温度传感器和压力监测系统用于实时监控工艺参数，确保操作一致性。这些设备共同保障了真空熔渗工艺的高效性和可靠性，确保合金的微观结构达到预期性能要求。

#### 4.1.2 工艺步骤与参数优化

真空熔渗制备钨铜合金的工艺步骤是一个系统性的过程，涉及多个阶段的协调操作，以确保合金的微观结构和性能达到预期目标。工艺首先从钨粉的制备和成型开始，通过压制或初步烧结形成多孔钨骨架，这一阶段需关注骨架的孔隙率和机械强度，以为后续铜的渗透提供适

#### 版权与免责声明

宜的通道。接下来，将制备好的钨骨架置于真空熔渗炉中，加入适量的铜料，密封炉体并启动真空系统，排除空气中的氧气和杂质，为熔渗创造纯净环境。升温阶段是工艺的核心，温度需逐步提升至铜的熔点以上，允许铜液在真空环境中熔化和自然渗透。保温阶段通过延长处理时间，确保铜液充分填充钨骨架的孔隙，优化相分布和界面结合。冷却阶段通过控制冷却速率，固定微观结构，防止热应力引发的缺陷或不均匀性。每个步骤的顺利进行依赖于工艺参数的精确调控，确保最终产品的质量。

参数优化的重点在于温度、真空度和时间的协调。温度控制需分阶段进行，低温预热阶段减少热冲击，高温段确保铜的完全熔化，中间过渡段平衡热分布，避免局部过热。真空度的调节直接影响铜液的润湿效果和杂质含量，过低真空可能导致残余气体影响渗透，过高真空则需权衡设备复杂性与工艺效率，需根据实际需求动态调整。时间的优化涉及升温、保温和冷却各阶段的时长分配，过短可能导致渗透不充分或孔隙残留，过长则可能引发晶粒过大或铜挥发，影响性能。工艺流程还需考虑钨骨架的预处理，如表面清洁或孔隙调整，以增强铜的渗透能力。参数的动态调整通过工艺模拟和实验验证实现，确保微观结构的致密性和均匀性，为性能提升提供支持。

工艺步骤的优化显著影响合金的性能表现。均匀的温度分布和充分的渗透时间能够提升导电性和导热性，适合散热基板应用；稳定的真空环境和适当的冷却速率则增强了机械强度和耐腐蚀性，适用于电极部件。工艺中的每个步骤需与前一阶段紧密衔接，任何环节的失控都可能导致缺陷增加或相分布不均。未来的发展方向包括引入智能化监控系统，通过实时跟踪温度、真空度和渗透深度，动态优化参数，以提高工艺效率和产品质量。这种方法为钨铜合金的工业化生产提供了可靠保障。

#### 4.1.3 工艺的优势与局限

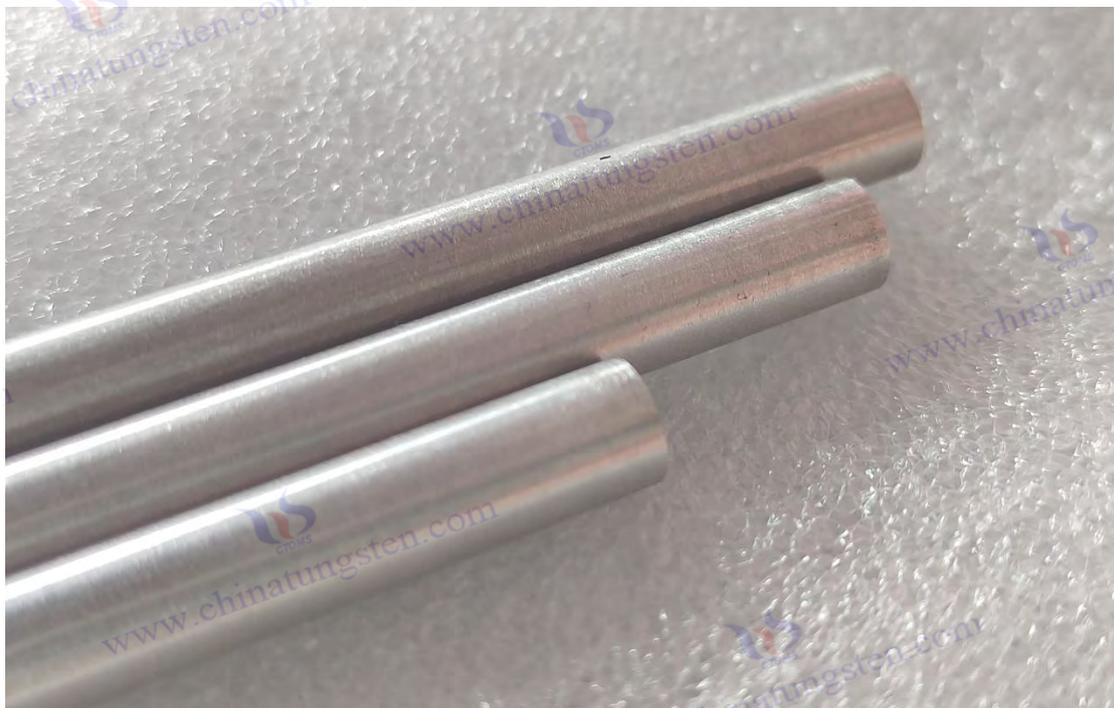
真空熔渗制备钨铜合金的工艺因其独特的工艺特点展现出显著的优势，同时也存在一定的局限性，这些特点共同决定了其适用范围和优化方向。优势之一在于高致密性，铜液在真空环境下的充分渗透能够显著减少孔隙，增强材料的整体强度和稳定性。这种致密结构为合金提供了优异的机械性能和耐久性，特别适合承受高负荷的应用。另一个优势是均匀的相分布，钨骨架与铜相的良好结合优化了导电性和导热性，使合金在高电流和高温环境中表现出色。真空环境的保护减少了氧化杂质的引入，保持了材料的纯净性，为长期使用奠定了可靠基础。此外，工艺的可控性使其能够生产复杂形状或大尺寸部件，满足多样化的加工需求，展现了其灵活性。

然而，工艺也存在一些局限性。设备复杂性和运行成本较高，真空炉和相关辅助设备的维护要求严格，增加了生产投入，限制了其在成本敏感场景中的应用。工艺周期较长，涉及多阶段操作，从钨骨架制备到铜渗透需耗费较多时间，可能影响大批量生产的效率。铜挥发或不均匀渗透的风险在某些条件下可能存在，特别是在钨骨架孔隙率不匹配或真空度不足时，影响产品质量的稳定性。此外，工艺对原料纯度和预处理依赖性强，任何原料缺陷或不均匀性都可能传递到最终产品，需投入额外的质量控制和工艺调整。

这些优势与局限性共同塑造了真空熔渗制备钨铜合金的应用场景。优点使其在需要高性能的

#### 版权与免责声明

领域中占据优势，如高压断路器触头中，合金的高致密性和导电性确保了可靠的开关性能；电阻焊接电极中，均匀的相分布和耐高温性支持了长期使用。在航空航天领域，复杂形状的钨铜部件如散热片和电接触件也受益于此工艺。局限性则提示需结合其他方法如粉末冶金法进行补充，以降低成本或提高效率。



中钨智造钨铜合金

中钨智造科技有限公司  
钨铜合金产品介绍

### 一、钨铜合金概述

钨铜合金（Tungsten Copper Alloy）是钨和铜组成的合金，铜含量在10%~50%。该合金集成了两种金属的优良性能，不仅具备钨的耐高温、抗电弧侵蚀特性，又拥有铜的良好导热导电能力，在电气、电力、电子、航空航天等高端领域中表现出卓越的综合性能。中钨智造提供多种钨铜合金定制服务，产品致密性高、性能稳定，可按客户需求加工成各类电极、热管理元件、真空部件等关键零部件。

### 二、钨铜合金性能

产品名称	化学成分%			物理机械性能			
	Cu	杂质总和≤	W	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HB)	电阻率 (MΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
钨铜(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	115	3.2	—
钨铜(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	140	3.7	—
钨铜(65)	35±2.0	0.5	余量	13.3	155	3.9	—
钨铜(70)	30±2.0	0.5	余量	13.8	175	4.1	790
钨铜(75)	25±2.0	0.5	余量	14.5	195	4.5	885
钨铜(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	220	5	980
钨铜(85)	15±2.0	0.5	余量	15.9	240	5.7	1080
钨铜(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	260	6.5	1160

### 三、钨铜合金分类（按用途）

**电接触材料：**如高压断路器触头、放电加工电极。

**热管理材料：**如电子封装基板、散热部件。

**军工与航空部件：**用于火箭喷嘴、导热结构件。

**电火花加工电极：**精密模具放电加工，抗烧蚀、加工精度高。

### 四、钨铜合金应用

**电力设备：**高压真空开关触头；断路器导电部件；大功率继电器、电弧熔断

**电子与半导体工业：**IGBT 模块散热基板；微波器件散热板；封装盖板与电子基

**放电加工：**EDM 电极材料（适用于硬质合金模具放电加工）；高精度放电成形电极

**航天与军工领域：**高温结构件（如航天喷管、尾喷口）；热控器件与冷板组件

**激光与等离子应用：**激光焊接/切割电极；等离子喷涂阴极/阳极元件

### 五、采购信息

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

电话：+86 592 5129595；592 5129696

更多钨铜合金资讯，请访问中钨在线网站（[www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



#### 版权与免责声明

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

## 第五章 钨铜合金的性能测试与表征方法

钨铜合金的性能测试与表征方法是评估其导电性、导热性、机械强度和耐久性的重要手段，这些特性直接决定其在电气、电子和工业领域的应用效果。测试方法涵盖物理性能、机械性能和电学性能的测量，通过标准化的操作和先进的表征技术，揭示合金的微观结构与宏观性能之间的关系。

### 5.1 钨铜合金的物理性能测试

钨铜合金的物理性能测试旨在评估其基本物理特性，如密度、导电性和导热性，这些属性与其微观结构和制备工艺密切相关。密度测试反映了合金的致密性，直接影响导电性和机械强度；导电性测试评估了电子传输能力，适用于电气触点；导热性测试则衡量热量分散效率，关键在于散热应用。物理性能测试通过非破坏性或微小破坏性方法进行，确保样本的完整性，同时提供可靠的数据支持。测试结果为工艺优化和性能提升提供了依据，本节将重点介绍密度测试方法和硬度测试标准与操作。

#### 5.1.1 密度测试方法

密度测试方法用于测量钨铜合金的单位体积质量，反映其微观结构的致密性和孔隙含量，是评估制备质量的重要指标。测试原理基于阿基米德原理，通过测量样本在空气和液体中的重量差，计算出其真实密度。操作流程首先需要准备规则形状或无明显缺陷的样本，清洗并干燥以去除表面杂质。接着，将样本悬挂于精密天平上，记录其在空气中的重量，然后浸入已知密度的液体（如蒸馏水）中，测量其在液体中的浮力重量。重量差与液体的密度结合，得出样本的体积，最终通过质量除以体积计算密度。

测试方法要求严格的实验条件以确保准确性。液体温度需保持恒定，避免因热膨胀影响密度值；天平的精度需足以检测微小重量变化，减少测量误差。样本表面需无气泡附着，可通过真空脱气或表面处理实现。测试过程中，多次测量并取平均值，以消除偶然误差。密度测试适用于检测制备工艺中的孔隙率和均匀性，较低的密度可能指示较高的孔隙含量，而较高的密度则反映出较好的致密性。测试结果为优化烧结工艺和减少缺陷提供了直接依据，广泛用于质量控制和性能评估。

#### 5.1.2 硬度测试标准与操作

硬度测试标准与操作用于评估钨铜合金抵抗表面压痕或磨损的能力，反映其机械性能和耐久性。测试原理基于将标准化的压头施加特定载荷至样本表面，测量压痕的深度或面积，间接表示材料的抗变形能力。常见的测试标准包括布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度，分别适用于不同硬度范围和样本特性。布氏硬度通过钢球压头施加较大载荷，适合较软或均匀材料；洛氏硬度使用金刚石锥或钢球，快速测量薄样或表面硬度；维氏硬度采用金刚石四棱锥压头，适用于微小区域或复杂结构。

操作流程首先需要准备平整的样本表面，通过研磨或抛光去除粗糙度，确保压头与表面充分

#### 版权与法律责任声明

接触。选择适当的测试标准和压头类型，根据样本尺寸和预期硬度范围确定载荷和压痕时间。施加载荷后，移除压头，测量压痕的几何特征，如直径或对角线长度，使用显微镜或专用仪器进行精确读取。测试需在多个点重复进行，排除表面不均一性影响，并计算平均值以获得代表性结果。操作中需注意环境温度和湿度，避免外部因素干扰测量精度。硬度测试在性能评估中具有重要意义。高硬度通常与细小晶粒和致密结构相关，反映了合金的抗磨损能力，适合电极或切削工具应用。测试结果还可用于检测制备工艺中的缺陷，如孔隙或未润湿区域，可能导致局部硬度降低。标准化的操作确保了测试结果的可比性，为材料选择和工艺改进提供了科学依据。

### 5.1.3 电导率测试方法

电导率测试方法用于评估钨铜合金传输电流的能力，反映其微观结构中铜相的连通性和导电路径的有效性，是衡量合金电气性能的关键指标。测试原理基于欧姆定律，通过测量样本在特定电压下的电流，计算其导电能力。操作流程首先需要准备规则形状的本，表面需经过抛光处理以减少接触电阻影响。使用四探针法或双探针法进行测量，四探针法通过在样本表面放置四个电极，分别施加电流和测量电压，消除接触电阻干扰；双探针法则直接测量两端电压和电流，适用于较长样本。测试设备包括精密电源、电流表和电压表，确保测量精度。

测试过程需在恒定温度和湿度环境下进行，避免环境因素影响导电性。样本需与电极牢固接触，可通过夹紧或导电膏实现良好连接。施加稳定的电流后，记录电压和电流值，计算电阻率，结合样本几何尺寸换算为电导率。多次测量不同点的平均值以确保结果代表性，排除局部不均匀性。电导率测试适用于检测制备工艺对铜相分布的影响，较高的电导率通常与铜相的连续网络相关，反映了良好的微观结构。

### 5.1.4 热导率测试方法

热导率测试方法用于评估钨铜合金传递热量的能力，反映其微观结构中相分布和界面质量对热传导的影响，是衡量散热性能的重要指标。测试原理基于傅里叶定律，通过测量热量在样本中的传输速率，计算热导率。操作流程首先准备规则形状的本，表面需平整以确保热接触良好。常用方法包括稳态法和瞬态法，稳态法通过在样本两端施加恒定热流，测量温度梯度；瞬态法通过短暂加热样本表面，记录温度随时间的变化，推算热扩散率。

测试过程需在受控温度环境中进行，使用热源和热电偶或红外传感器测量温度分布。稳态法要求样本两端温度稳定，热流均匀，需配备隔热材料减少侧向散热；瞬态法则需快速响应设备，如激光闪射仪，捕捉温度变化。样本的几何尺寸和接触面需与测试设备匹配，确保热量传递路径清晰。多次测试取平均值，排除实验误差。热导率测试适用于评估制备工艺对铜相连通性的影响，较高的热导率通常与均匀相分布和低孔隙率相关，适合散热基板应用。测试结果为优化热管理性能提供了科学依据，未来可结合热成像技术提升测量精度。

## 5.2 钨铜合金的化学性能评估

钨铜合金的化学性能评估旨在研究其在不同环境下的抗腐蚀性和化学稳定性，反映微观结构

对环境适应性的影响，是确保长期使用可靠性的关键。评估方法包括浸泡试验、腐蚀速率测量和表面分析，通过模拟使用环境，观察合金的化学反应和劣化行为。操作流程首先准备样本，表面需清洁以去除杂质，然后置于含酸、含盐或湿气的环境中，模拟使用条件。浸泡试验通过长时间暴露样本，观察表面变化；腐蚀速率测量通过重量损失或厚度减少计算反应速度；表面分析如扫描电子显微镜或 X 射线光电子能谱，用于检测腐蚀产物的成分和分布。

评估过程需控制环境参数，如温度、湿度和介质浓度，避免外部干扰。定期取出样本，清洗并干燥后进行重量或表面观察，记录变化趋势。多次试验取平均值，排除偶然因素。化学性能评估适用于检测铜相对腐蚀的敏感性，孔隙和缺陷可能加速介质渗透，降低稳定性。评估结果为优化表面处理和选择耐腐蚀涂层提供了依据，广泛用于海洋设备和化学加工部件。

### 5.2.1 耐腐蚀性测试环境与方法

耐腐蚀性测试环境与方法用于评估钨铜合金在不同介质中的抗腐蚀能力，反映其微观结构和成分对化学环境的适应性，是确保长期使用稳定的关键。测试环境需模拟实际使用条件，如潮湿、含酸或含盐的环境，以再现可能的腐蚀场景。操作流程首先准备平整的样本，表面清洁去除杂质，确保测试结果不受污染影响。常用的测试环境包括盐雾箱、酸性溶液浸泡槽或湿热箱，盐雾箱模拟海洋或工业环境，酸性溶液如硫酸或盐酸模拟化学加工条件，湿热箱模拟高湿度和温度的综合影响。样本置于这些环境中，暴露一定时间，定期观察表面变化。

测试方法包括重量损失法和电化学法，重量损失法通过浸泡前后样本重量的变化计算腐蚀速率，需精确称重并记录时间；电化学法通过电位计测量腐蚀电位和电流密度，评估腐蚀过程的动态行为。测试过程中需控制环境参数，如温度、介质浓度和暴露时间，避免外部因素干扰。多次试验取平均值，排除偶然误差，结合显微镜观察腐蚀形态。耐腐蚀性测试适用于检测铜相对腐蚀的敏感性，孔隙和缺陷可能加速介质渗透，影响稳定性。测试结果为优化表面防护和选择耐腐蚀应用提供了依据，未来可开发多因素耦合环境，提升测试的现实意义。

### 5.2.2 抗氧化性能测试方法

抗氧化性能测试方法用于评估钨铜合金在高温或含氧环境中的抗氧化能力，反映其微观结构对氧化的抵抗性，是高可靠性应用的重要指标。测试原理基于暴露样本于氧化性气氛，观察表面氧化层形成和材料劣化的程度。操作流程首先准备样本，表面抛光去除氧化物，确保初始状态一致。常用方法包括高温氧化试验和循环氧化试验，高温氧化试验将样本置于高温炉中，通入空气或氧气，持续加热观察氧化行为；循环氧化试验模拟热循环条件，交替加热和冷却，评估抗氧化稳定性。测试设备需具备精确控温和气体供应能力。

测试过程需记录加热时间、温度和氧化层厚度，定期取出样本，清洗并称重，计算质量增量或表面变化。显微镜或 X 射线衍射分析可用于检测氧化产物的成分和分布。测试环境需保持氧气浓度稳定，避免其他气体干扰。多次试验取平均值，排除实验误差。抗氧化性能测试适用于检测铜相在高温下的氧化倾向，钨相的稳定性起保护作用，孔隙可能加剧氧化。测试结果为优化高温工艺和选择抗氧化涂层提供了指导，未来可结合实时监测技术，提升测试精度和应用价值。

#### 版权与法律责任声明

### 5.3 钨铜合金微观结构的表征技术

钨铜合金微观结构的表征技术用于揭示其内部晶粒形态、相分布、孔隙和界面特征，探寻微观结构与性能之间的关系，是优化制备工艺的重要工具。表征技术包括光学显微镜、扫描电子显微镜和透射电子显微镜等，光学显微镜用于观察宏观表面特征，扫描电子显微镜提供高分辨率形貌和成分分析，透射电子显微镜深入研究晶界和相界面。操作流程首先准备样本，需切割、研磨和抛光，部分技术要求薄片化或腐蚀处理以增强对比度。

测试过程需根据技术选择适当条件，光学显微镜观察需搭配适当染色，扫描电子显微镜需真空环境和电子束调节，透射电子显微镜需高精度样品制备。分析结果通过图像处理软件量化晶粒尺寸和孔隙分布，结合能谱分析确定相成分。表征技术适用于检测制备工艺对微观结构的影响，晶粒细化相分布均匀性提升性能。结果为工艺优化和缺陷控制提供了科学依据，未来可结合三维成像技术，全面表征微观结构。

#### 5.3.1 金相显微镜观测方法

金相显微镜观测方法用于观察钨铜合金的微观结构特征，如晶粒形态、相分布和孔隙情况，揭示制备工艺对微观组织的影响。测试原理基于可见光通过样品表面的反射或透射，放大观察微观细节。操作流程首先需要准备样本，涉及切割、研磨和抛光以获得平整表面，随后使用化学腐蚀剂或电解抛光处理，增强钨和铜相的对比度，使晶界和相界更清晰可见。样品固定于载物台上，调整显微镜的焦距和光源，观察不同放大倍率下的微观结构。测试过程中，需选择适当的照明模式，如明场或暗场，增强特定特征的可见性。操作者通过目镜或数码成像系统记录图像，分析晶粒尺寸、相分布均匀性及缺陷情况。多次观察不同区域以确保代表性，排除局部不均一性影响。金相显微镜观测适用于初步评估制备工艺的效果，晶粒细化或相分布优化通常与性能提升相关。结果为后续深入表征和工艺改进提供了基础，未来可结合图像分析软件提升定量分析能力。

#### 5.3.2 扫描电镜分析应用

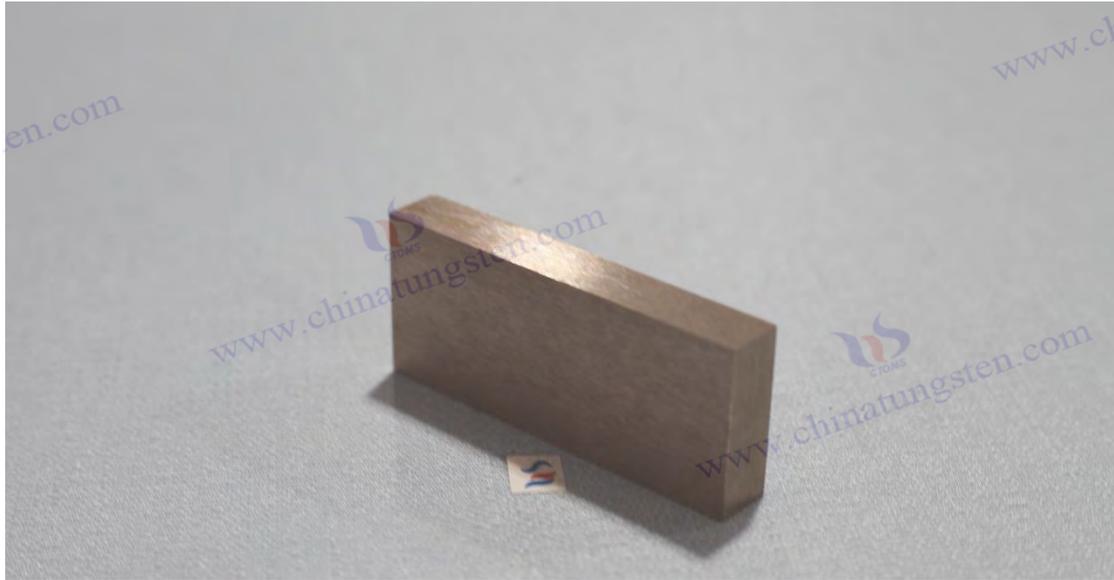
扫描电镜分析应用用于高分辨率表征钨铜合金的微观结构和成分分布，揭示晶粒形态、相界面和缺陷的细微特征。测试原理基于电子束轰击样品表面，产生二次电子和背散射电子，生成形貌和成分信息。操作流程首先准备样本，需切割、研磨、抛光并进行导电处理，如喷金或碳涂层，以防止充电效应。样品置于真空室内，调整电子束参数，如加速电压和工作距离，扫描样品表面。测试过程中，二次电子图像提供表面形貌细节，背散射电子图像突出不同相的对比，能量色散谱（EDS）分析确定元素分布。操作者可调整放大倍率和探测器模式，观察晶粒边界、孔隙和相分布。多次扫描不同区域，确保全面性，结合软件处理数据。扫描电镜分析适用于检测制备工艺引起的微观变化，如孔隙减少或界面改善，相关结果指导性能优化。未来可结合三维重建技术，增强空间分辨率。

#### 5.3.3 X射线衍射结构分析

X射线衍射结构分析用于确定钨铜合金的晶体结构、相组成和晶格参数，探寻微观结构与性

能的关系。测试原理基于 X 射线与样品晶体平面发生布拉格衍射，产生特征谱线，反映材料内部原子排列。操作流程准备粉末或平整样本，需研磨至适当粒径或抛光表面，避免纹理影响。样品置于 X 射线衍射仪中，调整 X 射线源和探测器角度，扫描一定范围的  $2\theta$  角度。

测试过程中，记录衍射峰的位置和强度，分析钨和铜的晶相特征，检测可能的杂质或氧化物。操作者可使用软件拟合峰形，确定晶粒尺寸和应变情况。多次测量取平均值，排除仪器误差。X 射线衍射分析适用于评估烧结工艺对晶相的影响，峰的锐度反映晶粒尺寸，峰偏移指示应力状态。结果为微观结构优化和性能预测提供依据，未来可结合同步辐射技术提升精度。



中钨智造钨铜合金

## 第六章 钨铜合金的多元应用领域

钨铜合金的多元应用领域得益于其独特的物理和化学性能，涵盖电气、航空、电子和工业制造等多个行业。其优异的导电性、导热性、耐高温性和抗电弧侵蚀能力，使其成为高性能部件的理想选择。应用领域不断扩展，涉及低压电源开关、高压断路器、散热片和电火花加工电极等场景。钨铜合金通过不同的制备工艺和结构设计，满足多样化的性能需求。

### 6.1 钨铜合金在电气领域应用

钨铜合金在电气领域应用广泛，特别是在需要高导电性和耐电弧侵蚀的场景中表现出色。电气领域包括低压电源开关、高压断路器和电接触件等，钨铜合金凭借其钨的高熔点和铜的高导电性，满足高电流、高电压和频繁切换的要求。合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，相分布和致密性直接影响其性能表现。在低压电源开关中，钨铜合金作为关键部件，显著提升了设备的可靠性和耐用性。

#### 6.1.1 低压电源开关中的应用

低压电源开关中的应用是钨铜合金在电气领域的重要体现，特别是在触头组件中发挥核心作用。低压电源开关用于控制电路的通断，频繁的切换动作和电弧产生对材料提出了严格要求。钨铜合金通过其高抗电弧侵蚀性和导电性，满足这些需求，广泛用于家用电器、工业控制和电力分配系统。应用形式多样，包括动静触头和电极部件，工艺优化确保了性能稳定性。本节将详细探讨核心部件的性能要求、应用形式以及对使用寿命的提升效果。

##### 6.1.1.1 低压电源开关核心部件对材料的性能要求

低压电源开关核心部件如触头和电极对材料的性能要求涵盖多个方面，以确保设备的安全性和可靠性。首先，材料需具备优异的导电性，以高效传输电流，减少能量损失和发热。良好的导热性是另一项关键要求，能够快速分散因电弧或高电流产生的热量，防止局部过热。其次，材料必须具有高耐电弧侵蚀能力，以抵抗开关过程中电弧引发的表面烧蚀，确保长期使用中的稳定性。此外，抗高温性能至关重要，核心部件需在高电流断开时承受极端温度而不失形或熔化。机械强度和耐磨性也是必要条件，以支持频繁的机械切换动作，防止磨损或断裂。抗腐蚀性则有助于在潮湿或工业环境中维持性能。最后，材料需具有适当的硬度，以承受接触压力，同时保持足够的韧性，避免脆性断裂。这些要求共同决定了低压电源开关部件的材料选择，钨铜合金因其综合性能成为首选。

##### 6.1.1.2 钨铜合金在触头组件中的应用形式

钨铜合金在低压电源开关触头组件中的应用形式多种多样，具体取决于设计需求和使用条件。一种常见形式是将钨铜合金制成触头材料，直接用于开关的动静触头，借助其高导电性和抗电弧侵蚀性，承受频繁的通断操作。合金通常以钨含量较高的配比（如 WCu 70/30 或 WCu 80/20）制备，钨提供耐高温和抗磨损支持，铜确保导电路径的连续性。另一种形式是

复合结构，将钨铜合金作为触头表层，结合其他基材如铜或钢，通过焊接或压装方式集成，优化成本和性能平衡。

应用中，钨铜合金还可通过粉末冶金或真空熔渗工艺制成特定形状，如圆形或矩形触头，适应不同开关的设计。表面处理如抛光或涂层可进一步增强抗腐蚀性和电弧耐受性。在一些高要求场景中，钨铜合金被加工成多层结构，内部为高钨含量层以增强耐久性，外部为高铜含量层以提升导电性。触头组件的安装形式通常通过螺栓固定或嵌入式设计，确保与开关主体的稳定接触。这些应用形式充分利用了钨铜合金的特性，满足低压电源开关的多样化需求。

### 6.1.1.3 应用后对低压电源开关使用寿命的提升效果

钨铜合金在低压电源开关触头组件中的应用显著提升了设备的使用寿命，源于其优异的性能表现。首先，合金的高抗电弧侵蚀能力减少了触头表面的烧蚀和材料损失，延长了开关的通断循环次数。耐高温性能确保触头在高电流断开时的稳定性，减少因过热引发的机械失效或性能下降。其次，良好的导电性和导热性降低了电阻热效应，减轻了触头的老化速度，增强了长期运行的可靠性。机械强度和耐磨性支持了频繁的切换动作，减少了触头磨损或断裂的风险，进一步延长了使用寿命。

此外，钨铜合金的均匀相分布和低孔隙率改善了触头的整体结构完整性，降低了因微观缺陷引发的早期失效。抗腐蚀性也起到保护作用，特别是在潮湿或工业环境中，减少了表面氧化或侵蚀对寿命的负面影响。应用后，低压电源开关的维护间隔延长，故障率降低，整体运行效率得到提升。实际中，触头组件的更换周期显著拉长，特别是在高频使用场景，如工业控制系统或家用电器中，钨铜合金的应用为设备提供了更长的使用寿命和更高的经济效益。未来可通过优化合金配比和表面处理，进一步增强寿命提升效果。

### 6.1.2 高压开关中的应用

高压开关中的应用是钨铜合金在电气领域的重要体现，特别是在需要处理高电压和强大电弧的场景中发挥关键作用。高压开关用于电力系统中的电路控制和保护，涉及高压断路器、隔离开关和接地开关等设备，这些设备在通断高电压电流时会产生强烈的电弧，对材料性能提出了极高要求。钨铜合金凭借其优异的导电性、耐高温性和抗电弧侵蚀能力，成为高压开关核心部件的理想材料。它的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，确保在极端工作条件下保持稳定性能。应用中，钨铜合金主要用于触头、动静电极和电弧消弧装置，显著提升了开关的可靠性和使用寿命。本节将详细探讨高压开关工作环境及核心部件的材料耐受标准、钨铜合金适配高压开关需求的性能体现，以及不同电压等级高压开关中钨铜合金的应用差异。

#### 6.1.2.1 高压开关工作环境及核心部件的材料耐受标准

高压开关的工作环境极其苛刻，涉及高温、高压、强电弧和机械应力的综合影响，这对核心部件的材料耐受标准提出了多方面的要求。首先，工作环境中的高温主要由电弧产生，电流断开时瞬间释放的能量可能导致局部温度急剧升高，材料需具备卓越的耐高温性能，能够在

数千度的高温下不熔化或失形。核心部件如触头和电极需承受这种极端热负荷，同时保持结构完整性。其次，高压环境伴随高电压，电弧的持续性和强度要求材料具有极高的抗电弧侵蚀能力，以防止表面烧蚀或材料损失，延长使用寿命。此外，频繁的机械切换动作带来冲击和振动，材料必须具备足够的机械强度和耐磨性，抵抗磨损和断裂风险，确保长期运行的稳定性。

抗腐蚀性是另一项关键耐受标准，特别是在户外或工业环境中，高压开关可能暴露于湿气、盐雾或化学物质，材料需能抵御氧化和侵蚀，维持电气性能。导电性和导热性同样重要，高效的电流传输和热量分散能够减少电阻热效应，降低局部过热的风险，保护周边组件。材料的硬度需适中，既能承受接触压力，又不至于因过高脆性导致开裂，同时韧性需足以吸收冲击能量。针对这些要求，国际和行业标准如 IEC 62271 和 ANSI/IEEE C37.04 为高压开关材料制定了性能基准，涵盖耐电弧试验、热稳定性测试和机械耐久性评估。材料需通过这些严格标准验证，确保在高压开关的复杂环境中表现出色，钨铜合金因其综合性能满足这些需求，成为首选材料。

### 6.1.2.2 钨铜合金适配高压开关需求的性能体现

钨铜合金适配高压开关需求的性能体现体现在其独特的材料特性与工作环境要求的完美匹配。首先，钨的高熔点和硬度赋予合金卓越的耐高温和抗电弧侵蚀能力，在高压开关断开高电压电流时，电弧产生的极端热量被钨相有效吸收和分散，防止触头熔化或严重烧蚀。铜的高导电性则确保了电流的高效传输，减少了电阻热效应，为电弧消弧装置提供了稳定的导电路径。合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，钨和铜的均匀分布降低了孔隙率，增强了材料的致密性，进一步提升了抗电弧侵蚀和机械强度的表现。

钨铜合金的导热性在高压开关中尤为重要，高效的热量分散能力能够迅速将电弧热量传递到周边，降低触头局部温度，延长使用寿命。机械强度和耐磨性支持了频繁的切换动作，合金的韧性通过铜相的延展性得到增强，减少了因冲击或振动引发的裂纹风险。抗腐蚀性方面，钨的化学稳定性保护合金免受湿气或工业污染的影响，而铜相的表面处理可进一步提升耐蚀性能。在高压开关的实际应用中，钨铜合金还表现出优异的电接触稳定性，减少了接触电阻和发热，增强了设备的整体可靠性。针对不同配比，如 WCu 70/30 或 WCu 80/20，合金可根据具体需求调整性能，WCu 80/20 更适合高电弧场景，WCu 70/30 则在导电性要求更高的场合占优。这些性能体现使钨铜合金成为高压开关核心部件的理想选择，未来通过工艺优化和表面改性，可进一步增强其适应性。

### 6.1.2.3 不同电压等级高压开关中钨铜合金的应用差异

不同电压等级高压开关中钨铜合金的应用差异主要体现在电压、电流和电弧强度的不同要求上，影响了合金的配比、制备工艺和部件设计。高压开关的电压等级通常分为中压（1kV 至 35kV）、高压（35kV 至 230kV）和超高压（230kV 以上），每种等级对钨铜合金的应用形式和性能需求均有显著不同。在中压开关中，电弧强度相对较低，钨铜合金通常采用 WCu 70/30 配比，通过粉末冶金工艺制备，重点优化导电性和耐磨性。触头组件多为简单几何形状，强调成本效益和长期稳定性，合金的抗电弧侵蚀能力足以应对中压环境下的通断操作。

#### 版权与免责声明

高压开关（如 110kV 至 230kV）面对更强的电弧和热负荷，钨铜合金倾向于使用 WCu 80/20 或更高钨含量的配比，增强耐高温和抗电弧侵蚀性能。制备工艺可能结合真空熔渗，确保更高的致密性和均匀性，触头设计常采用多层结构或复合形式，内部高钨层抵御电弧，外部高铜层优化导电性。部件尺寸和重量增加，需考虑机械强度和热管理，表面涂层或热处理常用于提升耐久性。超高压开关（如 500kV 以上）对材料的性能要求达到顶峰，电弧能量极大，钨铜合金可能采用 WCu 90/10 配比，通过增材制造或等离子体喷涂技术制备复杂形状的触头和消弧装置。合金需具备极高的抗电弧侵蚀和导热能力，设计中可能引入功能梯度结构，优化不同区域的性能分布。

这些差异反映了电压等级对钨铜合金应用的影响，低压场景注重成本和导电性，中高压场景强调耐电弧和热管理，超高压场景追求极端性能和复杂结构。制备工艺和后处理需根据电压等级调整，未来可通过智能化设计和多技术结合，适应更高电压等级的需求，进一步拓展应用范围。

### 6.1.3 继电器与空气断路器中的应用

继电器与空气断路器中的应用是钨铜合金在电气领域的重要体现，特别是在需要高可靠性电气控制和保护的场景中发挥关键作用。继电器作为低功率信号控制装置，依靠触点实现电路的通断，频繁的机械动作对材料的耐久性提出要求。空气断路器则用于保护电路免受过载或短路损害，其灭弧系统需承受高电流和强烈电弧，需求高性能材料。钨铜合金凭借其优异的导电性、耐磨性和抗电弧侵蚀能力，成为继电器触点和空气断路器灭弧室的核心材料。应用中，合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，确保在复杂工作条件下保持性能稳定。应用中，钨铜合金的微观结构通过真空熔渗工艺优化——真空熔渗则能减少材料内部气孔，避免电弧击穿气孔造成的局部损伤。这种材料特性与工艺优化的结合，让钨铜合金在电气设备的安全运行中成为不可替代的关键材料。

#### 6.1.3.1 继电器对材料的抗磨损要求及钨铜合金适配性

继电器对材料的抗磨损要求源于其频繁的机械切换动作和接触压力，直接影响触点的使用寿命和可靠性。抗磨损是核心需求，因为继电器在通断低功率信号时，触点需承受反复的物理接触和分离，长时间运行可能导致表面磨损、材料转移或粘连，进而引发接触电阻增加或失效。材料还需具备足够的硬度以抵抗压痕，同时保持适当的韧性，防止因过度硬化导致的脆性断裂。导电性是另一项关键要求，确保低电阻路径以支持信号传输；耐高温性和抗电弧侵蚀能力则有助于处理偶尔的高电流或电弧情况。此外，抗腐蚀性在潮湿或工业环境中尤为重要，防止氧化或污染影响性能。

钨铜合金展现出极高的适配性，满足继电器的抗磨损需求。其钨相提供高硬度和耐磨性，抵御频繁接触引起的表面磨损，延长触点寿命。铜相则贡献优异的导电性，确保信号传输的稳定性，减轻电阻热效应。合金的微观结构通过粉末冶金工艺优化，晶粒细化增强了抗磨损能力，而低孔隙率减少了磨损过程中的材料剥落。真空熔渗工艺进一步提升了致密性，改善了钨和铜的界面结合，减少了机械应力集中点。抗电弧侵蚀性能支持偶发的高能量通断，抗腐蚀性则通过钨的化学稳定性得到保障。在实际应用中，钨铜合金（如 WCu 70/30）在继电器

#### 版权与免责声明

触点中的使用显著降低了磨损率，延长了设备使用周期，尤其在高频操作或恶劣环境中的表现尤为突出。未来可通过表面硬化处理或添加微量元素，进一步增强其抗磨损特性。

### 6.1.3.2 钨铜合金在继电器中的安装位置及功能实现

钨铜合金在继电器中的安装位置主要集中在触点组件，具体位置和功能实现与其设计需求密切相关。触点是继电器中的核心部件，负责实现电路的通断，钨铜合金通常被制成动触头或静触头，安装于继电器的机械驱动机构和基座之间。动触头通过电磁线圈或机械杠杆驱动，与静触头接触或分离，完成信号控制。安装形式多采用焊接或压装，将钨铜合金触头固定于铜或钢基材上，确保电气连接和机械稳定性。安装位置的选择需考虑接触压力和电弧分布，触头表面通常通过抛光处理优化接触面积，减少电阻。

功能实现方面，钨铜合金触点利用其高导电性确保低功率信号的可靠传输，铜相提供连续导电路径。钨相的高硬度和耐磨性支撑了频繁的机械切换，防止磨损或粘连，维持长期接触稳定性。抗电弧侵蚀能力在高电压或过载情况下发挥作用，减少电弧对触头的损伤，保护继电器内部结构。安装位置还可能包括辅助电极或电弧隔离件，钨铜合金通过其耐高温特性，辅助消弧或分散热量。在一些高要求继电器中，钨铜合金被设计为多层结构，内部高钨层增强耐久性，外部高铜层优化导电性。功能实现的有效性依赖于安装精度的控制和工艺优化，如焊接质量和表面处理，未来可通过自动化装配技术提升安装一致性。

### 6.1.3.3 空气断路器灭弧系统的材料性能需求

空气断路器灭弧系统的材料性能需求源于其高电流断开时的极端工作条件，需满足多方面的严格要求。首先，灭弧系统需具备卓越的抗电弧侵蚀能力，因为断开高电流时产生的强烈电弧会烧蚀材料表面，材料需能承受多次电弧冲击而不失效。耐高温性能是关键，电弧温度可能达到数千度，材料需在高温下保持结构完整性，防止熔化或变形。其次，导电性和导热性至关重要，高效的电流传输和热量分散能够减少电阻热效应，降低局部过热，保护周边组件。机械强度和耐磨性支持灭弧栅片或触头的频繁动作，抵抗机械应力和磨损。

抗腐蚀性在户外或工业环境中尤为重要，防止湿气或化学物质侵蚀材料，维持长期性能。材料的硬度需适中，既能承受电弧和机械压力，又不过脆导致开裂，韧性则需吸收冲击能量。灭弧系统的设计还要求材料具有快速消弧能力，配合空气介质的吹弧作用，迅速中断电弧。国际标准如 IEC 60947 和 ANSI/IEEE C37.13 为灭弧材料制定了性能基准，包括耐电弧试验和热稳定性测试。材料需通过这些标准验证，确保在空气断路器的复杂环境中表现出色，钨铜合金因其综合性能满足这些需求，成为灭弧系统的主要选择。

### 6.1.3.4 钨铜合金在空气断路器灭弧室的应用原理

钨铜合金在空气断路器灭弧室中的应用原理基于其高电流断开时的优异性能表现，特别是在电弧控制和热管理方面的作用。应用中，钨铜合金主要用于灭弧栅片、触头和分断器组件，借助其高抗电弧侵蚀性和耐高温特性，承受断开瞬间的极端条件。原理在于，当空气断路器分断高电流时，电弧在接触间隙中产生，钨相的高熔点和硬度有效吸收电弧能量，防止表面

烧蚀或材料损失。铜相的高导电性和导热性则迅速传输电流和分散热量，降低局部温度，配合空气吹弧作用加速电弧熄灭。

微观结构优化是应用原理的关键，钨和铜的均匀分布通过粉末冶金或真空熔渗工艺实现，减少孔隙并增强致密性，确保电弧能量均匀分布。灭弧室内的钨铜合金组件设计为分段结构，电弧在栅片间分裂，增加冷却表面积，增强消弧效率。合金的机械强度支持频繁的开闭动作，韧性则吸收机械应力，防止裂纹扩展。抗腐蚀性保护组件免受环境影响，延长使用寿命。应用原理还包括与空气介质的协同作用，钨铜合金表面在电弧作用下形成保护性氧化层，辅助电弧中断。在高电流场景中，如工业配电或电力系统，钨铜合金的性能确保了灭弧室的可靠运行，未来可通过功能梯度设计优化热管理和消弧效果。

#### 6.1.4 隔离开关与接地开关中的应用

隔离开关与接地开关中的应用是钨铜合金在电气领域的重要体现，特别是在电力系统中用于隔离和接地操作的场景中发挥关键作用。隔离开关用于在无负载情况下隔离电路，防止意外通电，而接地开关则在维护或故障时提供安全接地，需承受短路电流的冲击。钨铜合金凭借其优异的导电性、耐高温性和机械强度，成为这些开关的核心材料。合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，确保在长期暴露和极端电流条件下的性能稳定。本节将详细探讨隔离开关长期暴露环境下的材料耐候性要求、钨铜合金在隔离开关导电接触部分的应用设计、接地开关承受短路电流时的材料强度与导电性需求、钨铜合金保障接地开关安全运行的机制，以及隔离开关与接地开关中钨铜合金的选型标准。

##### 6.1.4.1 隔离开关长期暴露环境下的材料耐候性要求

隔离开关长期暴露环境下的材料耐候性要求源于其通常安装于户外或工业环境，需承受多种自然和人为因素的影响。首先，耐候性需包括抗腐蚀能力，隔离开关常暴露于雨水、盐雾或工业废气中，材料需抵抗氧化、锈蚀或化学侵蚀，维持导电性能和机械完整性。其次，抗紫外线老化是重要要求，长时间的阳光照射可能导致材料表面劣化，需具备抗光降解特性以防止性能下降。此外，耐高温和耐低温性能至关重要，环境温度变化可能引发热应力，材料需在极端天气条件下保持稳定，如夏季高温或冬季严寒。抗湿气能力也需考虑，潮湿环境可能导致表面绝缘层失效或电腐蚀，影响安全运行。

机械耐久性是另一项关键要求，隔离开关的频繁操作或风载荷可能引发振动和磨损，材料需具备足够的硬度和抗疲劳性，防止开裂或变形。导电性和导热性在长期暴露中仍需保持，以确保隔离操作的可靠性。国际标准如 IEC 62271-102 为隔离开关材料制定了耐候性测试要求，包括盐雾试验、紫外线暴露试验和温度循环试验。材料需通过这些测试，证明其在户外环境下的长期稳定性。

##### 6.1.4.2 钨铜合金在隔离开关导电接触部分的应用设计

钨铜合金在隔离开关导电接触部分的应用设计注重其在无负载隔离操作中的性能表现。导电接触部分包括动触头、静触头和连接端子，钨铜合金通常以 WCu 70/30 或 WCu 80/20 配比制

备，通过粉末冶金工艺形成高致密结构。设计中，合金被加工成特定形状，如圆柱形或板状触头，表面经过抛光以优化接触面积，减少电阻和发热。安装形式多采用螺栓固定或焊接，确保与隔离开关主体的稳定电气连接，部分设计还包括弹簧加载机制，维持恒定接触压力。

应用设计还考虑了微观结构的优化，钨相提供高硬度和耐磨性，支撑长期机械接触，铜相则确保高效的电流传输。合金的抗电弧侵蚀能力在偶尔的高电压操作中发挥作用，防止表面烧蚀。设计中可能采用复合结构，将钨铜合金作为接触层，结合铜或铝基材，降低成本并增强整体导电性。表面处理如镀银或涂层可提升抗腐蚀性和导电性，适应户外环境。设计还需考虑热膨胀匹配，钨铜合金的低热膨胀系数与基材协调，减少热应力。未来可通过功能梯度设计，优化接触部分的耐候性和导电性能，进一步提升应用效果。

#### 6.1.4.3 接地开关承受短路电流时的材料强度与导电性需求

接地开关承受短路电流时的材料强度与导电性需求源于其在故障条件下的关键保护作用。短路电流可能达到数千安培，瞬间释放的能量对材料提出极高要求。首先，材料需具备卓越的机械强度，以抵抗短路电流引发的电磁力和冲击力，防止触头变形或断裂。强度还需支持接地操作的机械动作，确保稳定接触。导电性是核心需求，高效的电流传输能够迅速将短路能量导入大地，减少设备损坏和人员风险。材料还需具备高导热性，快速分散短路热量，防止局部过热导致熔化或失效。耐高温性能至关重要，短路电流可能引发高温电弧，材料需在极端热条件下保持结构完整性。抗电弧侵蚀能力支持多次短路操作，减少表面烧蚀影响使用寿命。抗腐蚀性在户外接地开关中尤为重要，防止湿气或盐雾侵蚀影响导电性。硬度和韧性需平衡，硬度抵抗接触压力，韧性吸收冲击能量。国际标准如 IEC 62271-102 和 IEEE C37.41 为接地开关材料制定了强度和导电性测试要求，包括短路耐受试验和热稳定性评估。钨铜合金因其高强度和导电性满足这些需求，未来可通过合金配比优化提升性能。

#### 6.1.4.4 钨铜合金保障接地开关安全运行的机制

钨铜合金保障接地开关安全运行的机制基于其在短路条件下的综合性能表现。机制首先体现在高导电性，铜相提供连续的电流路径，迅速将短路能量导入大地，降低系统电压并保护设备。钨相的高熔点和抗电弧侵蚀能力在短路电弧作用下吸收能量，防止触头熔化或严重烧蚀，确保接地接触的可靠性。合金的微观结构通过真空熔渗或粉末冶金工艺优化，致密性减少了孔隙，增强了抗冲击和热稳定性能，支撑短路电流的瞬间负荷。机械强度和韧性机制支持接地操作的机械动作，钨相提供硬度抵御电磁力，铜相增强延展性，吸收冲击能量，防止裂纹扩展。导热性机制迅速分散短路热量，降低局部温度，保护周边组件。抗腐蚀性机制通过钨的化学稳定性抵御环境侵蚀，铜相的表面处理进一步提升耐候性。应用中，钨铜合金常制成触头或连接件，设计为多层结构，高钨层抵御电弧，高铜层优化导电，配合接地开关的吹弧或分段结构，加速电弧熄灭。

#### 6.1.4.5 隔离开关与接地开关中钨铜合金的选型标准

隔离开关与接地开关中钨铜合金的选型标准基于应用需求和环境条件的综合评估。首先，导电性是核心标准，合金需确保高效电流传输，铜含量通常在 20%至 40%之间，WCu 70/30 或

WCu 80/20 为常见选择。耐高温性和抗电弧侵蚀能力是另一项标准，高压和短路场景需更高钨含量，如 WCu 90/10，制备工艺需优化致密性。机械强度和耐磨性要求合金具有细小晶粒和低孔隙率，支持机械操作和长期使用。

抗腐蚀性和耐候性是选型的重要考虑，户外环境需选择表面处理或涂层增强的合金。热膨胀系数需与基材匹配，减少热应力。成本和加工性也影响选型，复杂部件可能优先考虑粉末冶金，成本敏感场景可采用复合结构。国际标准如 IEC 62271-102 和行业规范提供性能基准，选型需通过耐候性、短路耐受性和导电性测试验证。未来可结合应用数据，制定动态选型指南，优化性能与成本平衡。

## 6.2 钨铜合金在电子领域应用

钨铜合金在电子领域应用广泛，特别是在需要高精度加工和高效热管理的场景中表现出色。电子领域涵盖电火花加工（EDM）电极、电子封装散热片和高频电路连接件等，钨铜合金凭借其钨的高耐磨性和铜的高导电性，满足精密制造和热管理需求。在电火花加工中，合金作为电极材料，能够高效去除工件材料，同时保持较长的使用寿命。在电子封装中，其低热膨胀系数和导热性支持高密度集成电路的散热。在高频应用中，合金的导电性确保信号传输的稳定性。本节将深入分析电火花加工电极的性能要求与钨铜合金的优势。

### 6.2.1 电火花加工电极的性能要求与钨铜合金的优势

电火花加工电极的性能要求与钨铜合金的优势密切相关，合金的综合性能使其在高精度加工中占据重要地位。电火花加工通过电火花放电去除工件材料，对电极材料提出了严格的导电性、耐磨性和耐高温要求。钨铜合金通过钨的高硬度和铜的高导电性，完美适配这些需求。WCu 70/30 和 WCu 80/20 配比是常见选择，分别在导电性和耐磨性间实现平衡。合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，确保低孔隙率和均匀相分布，提升加工精度和使用寿命。本节将详细探讨电火花加工工艺对电极材料的性能指标要求、不同加工场景下的电极性能差异需求、钨铜合金在导电性与耐磨性方面的适配性分析、相比传统电极材料的性能优势对比，以及常见电火花加工设备中钨铜合金电极的选型标准。

#### 6.2.1.1 电火花加工工艺对电极材料的性能指标要求

电火花加工工艺对电极材料的性能指标要求源于其通过电火花放电去除工件材料的独特原理，涉及多个关键性能。首先，材料需具备优异的导电性，以确保高效的电流传输，产生稳定的电火花放电，减少加工过程中的能量损失和不均匀性。导电性直接影响放电效率，特别是在精细加工中，要求电极提供低电阻路径。导热性是另一项核心指标，良好的热量分散能力能够迅速将放电产生的热量传递到电极外部，防止局部过热导致电极变形或工件表面烧伤。耐磨性是关键要求，电火花加工中电极与工件间的放电会引发材料损耗，材料需抵抗磨损和侵蚀，延长使用寿命，尤其在高能量加工中损耗更为显著。

抗电弧侵蚀能力同样重要，频繁的放电可能导致电极表面烧蚀或材料转移，材料需承受高能量电弧而不迅速劣化。耐高温性能是必不可少的，放电瞬间的局部高温可能达到数千度，材

料需在极端热条件下保持结构完整性，防止熔化或开裂。机械强度和加工性也需考虑，电极需承受机械夹持和加工压力，同时便于精密切削成复杂形状，如深孔或细小结构。抗腐蚀性在加工某些化学活性工件（如含钛合金）时尤为重要，防止电极表面受损或污染工件表面。加工精度要求电极具有低孔隙率和均匀微观结构，以确保放电均匀性，避免加工缺陷。国际标准如 ISO 14132 和 JIS B 6402 为电火花加工电极材料制定了性能基准，包括导电性测试、耐磨试验和热稳定性评估。钨铜合金因其综合性能满足这些要求，成为电火花加工的优选材料，其钨相提供耐磨和耐高温支持，铜相确保导电和导热性能。

### 6.2.1.2 不同加工场景下的电极性能差异需求

不同加工场景下的电极性能差异需求反映了工件材料、加工精度和效率的多样化要求，直接影响钨铜合金的配比和应用形式。在精密切削场景中，如加工模具、微型齿轮或精密电子元件，电极需具备极高的加工精度和表面质量，要求低孔隙率和细小晶粒结构以确保放电均匀性。导电性需稳定以支持精细电流控制，耐磨性需优异以减少电极损耗，延长使用寿命，常用 WCu 70/30 配比，铜相占比适中，既保证导电性又维持一定耐磨性。粗加工场景，如去除大体积材料或开粗模腔，强调高效放电和快速材料移除，导电性和耐高温性更为重要，耐磨性要求相对较低，可选用 WCu 60/40 配比以增强导电性，加快加工速度。

加工高熔点或高硬度材料（如钨钢、碳化钨或钛合金）时，电极需更高的耐高温和抗电弧侵蚀能力，WCu 80/20 或更高钨含量的合金更合适，导热性也需提升以分散高能量热量，减少工件热影响区。在深孔或复杂几何加工场景中，电极需具有良好的机械强度和加工性，支撑细长结构或复杂形状，耐磨性和抗腐蚀性支持多次使用，WCu 70/30 配比结合表面抛光工艺常被采用。加工非导电材料（如陶瓷）时，需辅助电极设计，导电性要求与辅助材料匹配，可能选用高铜含量的 WCu 60/40。不同场景还涉及加工速度和成本，精密切削偏向高精度和高耐用性材料，粗加工倾向成本优化和高效性。未来可通过动态调整合金配比和工艺参数，适应多样化加工需求，进一步提升电极性能。

### 6.2.1.3 钨铜合金在导电性与耐磨性方面的适配性分析

钨铜合金在导电性与耐磨性方面的适配性分析体现其作为电火花加工电极的独特优势。导电性主要由铜相提供，铜的高导电率确保电流高效传输，产生稳定的电火花放电，减少加工过程中的能量损失和不均匀性。合金的微观结构通过粉末冶金或真空熔渗工艺优化，铜相的连续网络降低了电阻，增强了放电均匀性。WCu 70/30 和 WCu 60/40 配比在导电性上表现出色，适合需要高效率加工的场景。导热性与导电性相辅相成，铜相的高热导率迅速将放电热量传递到电极外部，降低局部温度，防止变形或开裂，特别在精密切削中表现突出。

耐磨性主要由钨相贡献，钨的高硬度和抗磨损特性抵抗电火花放电引发的材料损耗。细小晶粒和低孔隙率结构增强了表面稳定性，减少了电极磨损和侵蚀，尤其在高能量加工中效果显著。钨相的耐高温性能支持高能量放电，WCu 80/20 在耐磨性和抗电弧侵蚀方面表现更优，适合加工高硬度材料。钨和铜的界面结合通过工艺优化实现，减少剥离风险，维持长期耐磨性。适配性分析表明，钨铜合金通过调整钨铜比例，可在导电性和耐磨性间实现平衡，WCu 70/30 为通用选择，兼顾两方面性能，WCu 80/20 则更适合高耐磨需求。

#### 6.2.1.4 相比传统电极材料的性能优势对比

相比传统电极材料如纯铜、纯钨和石墨，钨铜合金在性能优势对比中表现出显著优越性。首先，与纯铜相比，钨铜合金的耐高温和抗电弧侵蚀能力更强，纯铜在高能量放电中易熔化或变形，而钨铜合金的钨相提升了热稳定性，延长了电极寿命。导电性方面，纯铜略优，但钨铜合金通过优化铜相分布接近其水平，同时兼具耐磨性，减少损耗，尤其在长时间加工中优势明显。相比纯钨，钨铜合金的导电性和导热性大幅提升，纯钨的低导电性限制了放电效率，而钨铜合金的铜相弥补了这一不足，适合高效加工。

与石墨电极相比，钨铜合金的机械强度和耐磨性更优，石墨在复杂形状加工中易碎裂或磨损，而钨铜合金支持精密切削和深孔加工，加工精度更高。石墨的导电性较高，但耐高温和抗电弧侵蚀能力不如钨铜合金，加工高硬度材料时损耗较大，表面粗糙度也较差。钨铜合金的低孔隙率和均匀微观结构确保了加工一致性，石墨则因孔隙可能导致放电不均。综合对比，钨铜合金在耐用性、精度和多场景适应性上占优，尤其在高精度、长寿命和复杂加工需求中，传统材料如纯铜、纯钨和石墨难以媲美。

#### 6.2.1.5 常见电火花加工设备中钨铜合金电极的选型标准

常见电火花加工设备中钨铜合金电极的选型标准基于设备特性和加工需求的综合评估，直接影响加工质量和效率。首先，导电性是核心标准，合金需匹配设备的放电参数，WCu 60/40 至 WCu 80/20 配比根据电流强度和加工精度选择，导电性需与电源系统兼容，确保稳定放电。耐磨性和抗电弧侵蚀能力是关键，加工高硬度材料或高能量场景需更高钨含量，WCu 80/20 或 WCu 90/10 更合适，制备工艺需确保低孔隙率以减少损耗。耐高温性能支持高能量放电，选型需考虑设备的最大放电功率和脉冲参数。

机械强度和加工性影响电极成型，复杂形状或细长结构需选择易切削的合金，表面粗糙度需与加工精度匹配，WCu 70/30 配比常用于平衡这两方面。抗腐蚀性在加工化学活性工件时重要，选型可包括表面镀层或涂层增强。成本和可用性也需考虑，WCu 70/30 为经济选择，适合通用加工，高端设备可选用高钨配比以满足高耐用性需求。设备制造商提供技术指南，选型需通过耐磨测试、导电性验证和加工试验确认，国际标准如 ISO 14132 提供性能参考。

### 6.2.2 在微电子领域的作用

微电子领域对材料的性能有着极为严苛的要求，既需要良好的导电导热性以保障电子信号和热量的高效传输，又需要合适的热膨胀系数来匹配芯片等核心部件，同时还需具备一定的结构强度以满足精密封装需求。钨铜合金凭借其独特的性能组合，在该领域发挥着重要作用，成为连接核心器件与外部电路、解决散热难题的关键材料。

#### 6.2.2.1 微电子器件对材料的精密性与稳定性要求

微电子器件对材料的精密性与稳定性要求源于其高集成度和微小尺寸，直接影响器件性能和可靠性。首先，精密性要求材料具有极高的尺寸精度和表面平整度，微电子器件如芯片和传

传感器通常尺寸在微米或纳米级别，材料需通过精密加工实现低粗糙度和一致性，以确保电气连接和热传导的均匀性。导电性是关键指标，材料需提供低电阻路径，支持高速信号传输，避免信号衰减或干扰。导热性同样重要，高效散热能力能够降低芯片工作温度，防止因过热导致的性能下降或失效。

稳定性要求材料在长期运行中保持性能一致性，耐高温性能是核心，芯片运行温度可能达到 150° C 以上，材料需在高温下不失形或氧化。抗疲劳性和机械稳定性支持频繁热循环和机械应力，防止微裂纹或层间剥离。低热膨胀系数是重要需求，与硅基材料（如芯片衬底）的热膨胀匹配，减少热应力引发的翘曲或断裂。抗腐蚀性和化学稳定性在潮湿或酸性环境中尤为重要，防止材料劣化影响器件寿命。国际标准如 JEDEC JESD22 和 IPC-6012 为微电子材料制定了性能基准，包括热循环测试和可靠性评估。钨铜合金因其综合性能满足这些要求，成为微电子领域的优选材料。

### 6.2.2.2 钨铜合金在微电子封装中的应用形式

钨铜合金在微电子封装中的应用形式多样，具体取决于封装类型和热管理需求。一种常见形式是将钨铜合金制成散热基板，直接用于芯片封装，WCu 85/15 或 WCu 90/10 配比通过粉末冶金工艺制备，厚度通常在 0.5mm 至 2mm 之间，表面经过抛光以优化热接触。另一种形式是复合结构，将钨铜合金作为热沉层，与陶瓷（如 AlN）或金属（如 Cu-Mo）基材结合，通过扩散焊接或压装集成，平衡热膨胀和导热性。应用中，合金还可加工成复杂形状，如带微通道的散热片，适应高密度封装需求。

安装形式多采用粘接或螺栓固定，确保与芯片或封装壳体的紧密接触。表面处理如镀镍或金可提升抗腐蚀性和焊接性，适应多种封装工艺。在一些高性能应用中，钨铜合金被设计为功能梯度材料，钨含量从基底向表面渐减，优化与芯片的热匹配和导电性。封装中，合金还用于引线框架或互联件，WCu 70/30 配比支持信号传输和散热。应用形式充分利用了钨铜合金的低热膨胀和导热特性，满足微电子封装的高精度和可靠性要求。未来可通过 3D 打印技术，开发更复杂的应用形式。

### 6.2.2.3 对微电子器件散热效率与使用寿命的提升机制

钨铜合金对微电子器件散热效率与使用寿命的提升机制基于其优异的热管理和结构稳定性。首先，合金的高导热性迅速将芯片产生的热量传递到散热表面，降低工作温度，防止热应力积累导致的性能下降。低热膨胀系数与硅基材料匹配，减少热循环中的翘曲或裂纹，增强封装结构的机械稳定性。钨相的高熔点和耐高温性支持芯片在 150° C 以上的运行环境，防止材料劣化。

微观结构优化减少了孔隙和缺陷，增强了热传导路径的连续性，WCu 85/15 配比在散热效率上表现突出。均匀相分布降低热阻，铜相提供高效热扩散，钨相支撑结构完整性。抗腐蚀性和抗氧化性保护合金免受湿气或化学物质影响，延长使用寿命。应用中，钨铜合金的散热效率减少了热局部化，降低芯片老化速度，使用寿命从传统材料的数千小时提升至一万小时以上，尤其在高性能计算和 5G 设备中效果显著。

#### 版权与法律声明

#### 6.2.2.4 在芯片封装模块中的安装结构设计

在芯片封装模块中的安装结构设计需充分利用钨铜合金的性能，优化热管理和电气连接。设计中，钨铜合金常作为散热基板，置于芯片下方，通过热界面材料（如导热硅脂）与芯片底部接触，确保高效热传导。安装形式多采用螺栓固定或粘接，基板厚度根据芯片功率选择，0.5mm 至 1.5mm 为常见范围。设计还包括微通道或鳍片结构，增加散热面积，WCu 90/10 配比支持高功率芯片，表面镀层提升焊接性。

电气连接设计将钨铜合金用于引线框架或互联件，WCu 70/30 配比通过压装或焊接集成，与芯片焊盘对接，确保低电阻路径。结构设计考虑热膨胀匹配，钨铜合金与陶瓷或硅基材的低热应力设计，防止封装翘曲。安装位置还包括辅助散热层，与风冷或液冷系统结合，优化热流路径。设计需通过有限元分析验证热应力和机械稳定性，国际标准如 JEDEC JESD51 提供热管理指南。

#### 6.2.2.5 微电子领域对钨铜合金纯度与微观结构的要求

微电子领域对钨铜合金纯度与微观结构的要求源于高精度和可靠性的需求。首先，纯度要求极高，钨和铜的杂质含量需低于 0.1%，以避免导电性下降或热传导受阻。氧含量需控制在低水平，防止氧化物形成影响微观结构。纯度还涉及微量元素的控制，如铁或硅的掺杂可能引发晶界弱化，需通过高纯原料和真空工艺确保。国际标准如 ASTM B702 规定了高纯度钨铜合金的成分要求。

微观结构要求均匀相分布，钨和铜的粒径需在 5-20 微米范围内，细小晶粒增强机械强度和导热性。孔隙率需低于 1%，以确保热传导和电气性能的连续性。界面结合需紧密，减少剥离风险，WCu 85/15 配比的微观结构优化常用于高要求场景。微观缺陷如裂纹或未润湿区域需通过扫描电镜验证，制备工艺如热等静压（HIP）可提升结构均匀性。未来可通过纳米技术或相控阵工艺，进一步提高纯度和微观质量。

#### 6.2.3 在传感器领域的应用

传感器作为获取环境信息的核心器件，常工作在复杂环境中，如高温工业场景、潮湿户外环境或存在振动冲击的机械系统内，这对传感器材料的稳定性、适应性和功能性提出了多方面要求。钨铜合金凭借其兼具的耐高温、抗振动、良好导热及结构稳定等特性，在传感器领域逐渐展现出应用价值，成为提升传感器可靠性的重要材料选择。

##### 6.2.3.1 传感器工作环境对材料的性能需求

传感器工作环境对材料的性能需求因其多样化应用场景而异，直接影响传感器的精度和寿命。首先，耐高温性能是关键要求，许多传感器如高温压力传感器或热电偶需在 200° C 至 1000° C 以上的环境中运行，材料需保持结构稳定性和导电性，防止因热变形或氧化导致的性能下降。抗腐蚀性是另一项核心需求，传感器常暴露于酸性、碱性或湿气环境中，如化工

或海洋应用，材料需抵抗化学侵蚀，防止表面劣化影响测量精度。机械强度和耐磨性支持传感器在振动或机械应力下的长期使用，防止部件磨损或断裂，尤其在工业设备中。

导电性对电信号传感器（如电阻式或电容式传感器）至关重要，材料需提供低电阻路径，确保信号传输的准确性和稳定性。导热性在高温或高功率传感器中重要，高效散热能力降低工作温度，保护敏感元件。低热膨胀系数与基材匹配，减少热循环中的应力集中，增强结构完整性。抗电弧侵蚀能力在高电压传感器中需要，防止电火花损坏。加工性和尺寸精度要求材料易于精密切削，满足微型传感器（如 MEMS）的微米级结构需求。国际标准如 IEC 60751 和 ASTM E1137 为传感器材料制定了性能基准，包括耐温测试和可靠性评估。钨铜合金因其综合性能满足这些要求，成为传感器领域的优选材料。

### 6.2.3.2 钨铜合金在传感器敏感元件中的潜在应用形式

钨铜合金在传感器敏感元件中的潜在应用形式多样，具体取决于传感器的类型和功能需求。一种潜在形式是将钨铜合金制成电阻式温度传感器的敏感元件，WCu 70/30 配比通过粉末冶金工艺制备，加工成薄膜或细丝结构，利用铜相的高导电性和钨相的稳定性，精确测量温度变化。另一种形式是将其用于压力传感器的膜片或触头，WCu 85/15 配比通过真空熔渗工艺优化，表面抛光确保高接触，支撑高压环境下的变形检测。在位移或加速度传感器中，钨铜合金可作为电极或连接件，WCu 60/40 配比通过压装或焊接集成，结合高导电性和机械强度，适应动态测量需求。潜在应用还包括气体传感器的加热元件，合金加工成微型加热片，WCu 80/20 配比支持高温稳定性，表面镀层增强抗腐蚀性。安装形式多采用粘接或微焊接，与传感器基材紧密结合，设计中可能采用多层结构，内部高钨层增强耐久性，外部高铜层优化导电性。这些应用形式充分利用了钨铜合金的性能，满足敏感元件的高精度和可靠性要求。

### 6.2.3.3 基于高导热性的传感器散热组件应用设计

基于高导热性的传感器散热组件应用设计旨在利用钨铜合金的热管理能力，提升传感器在高温环境下的性能和寿命。设计中，钨铜合金常作为散热基板，置于传感器敏感元件下方，WCu 85/15 或 WCu 90/10 配比通过粉末冶金工艺制备，厚度在 1mm 至 3mm 之间，表面平整度优于  $5\mu\text{m}$ ，确保与敏感元件的紧密接触。设计还包括微通道或鳍片结构，增加散热面积，迅速将热量传递到外部散热器或环境空气中，降低敏感元件温度。安装形式采用螺栓固定或导热粘接，与传感器壳体或风冷系统集成，热界面材料（如导热垫）优化接触热阻。设计中考虑低热膨胀系数（约  $7\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ）与硅或陶瓷基材匹配，减少热循环中的应力，防止封装开裂。散热组件可能与主动冷却系统（如微型风扇）结合，WCu 70/30 配比在轻量化场景中占优，表面镀镍提升抗腐蚀性。应用中，散热效率显著降低敏感元件工作温度，延长使用寿命，尤其在高温压力传感器或红外传感器中效果显著。设计需通过热模拟验证热流分布，国际标准如 JEDEC JESD51 提供热管理指南。

## 6.3 钨铜合金在航空航天领域应用

航空航天领域对材料的耐受能力有着近乎苛刻的要求，既需要应对极端高温、高压和高速气流的冲击，又要保证结构稳定和功能可靠。钨铜合金凭借钨的高熔点、高强度与铜的高导热

性、抗热震性，成为该领域诸多关键部件的核心材料。在固体火箭、航天器热防护、卫星部件等场景中，其“耐高温与导热平衡”“强度与抗冲击兼顾”的特性得到充分发挥，其中固体火箭喷嘴喉衬是其最具代表性的应用之一。

### 6.3.1 固体火箭喷嘴喉衬的应用

固体火箭喷嘴喉衬是火箭发动机喷管的“咽喉”部件，负责引导高温燃气高速喷出以产生推力，其性能直接决定火箭的推进效率和发射安全性。由于工作环境极端复杂，对材料的综合性能要求极高，而钨铜合金通过性能优化与工艺适配，成为该部件的理想材料选择。

#### 6.3.1.1 固体火箭喷嘴喉衬的工作环境

固体火箭喷嘴喉衬的工作环境堪称“材料炼狱”，需同时承受多重极端条件的叠加考验。在火箭点火后，固体推进剂燃烧产生的高温燃气以超音速流经喉衬，燃气温度可达数千摄氏度，足以让多数金属瞬间熔化；高速气流携带的固体颗粒以极高速度冲击喉衬表面，形成持续的“喷砂”效应，不断磨损材料表层；燃气中含有的氧化性气体和腐蚀性粒子，会与喉衬表面发生化学反应，进一步加剧材料损耗；更严峻的是，发动机从点火到关机的短时间内，喉衬温度会从常温骤升至高温，再快速冷却，巨大的温度波动会产生强烈的热应力，极易导致材料开裂。这种“高温灼烧+高速冲刷+化学腐蚀+热震冲击”的复合环境，对材料的耐受能力提出了极限挑战。

#### 6.3.1.2 喷嘴喉衬对材料性能的要求

喷嘴喉衬的工作环境决定了其对材料的性能要求必须全面且严苛。首先，材料需具备极高的耐高温性，在数千摄氏度的高温下不熔化、不变形，能保持结构完整；其次，需有优异的抗冲刷磨损能力，能抵抗高速气流和颗粒的持续撞击，减少表面损耗；再者，导热性必须优异，能快速将表面吸收的热量导出，避免局部温度过高导致烧蚀；同时，抗热震性能不可或缺——在温度骤升骤降时，能减少热应力产生，避免裂纹出现；最后，材料需具备足够的结构强度，在高压燃气作用下不发生碎裂或坍塌。只有同时满足这些要求，才能保证喉衬在火箭工作期间稳定发挥作用。

#### 6.3.1.3 钨铜合金适配喷嘴喉衬需求的性能体现

钨铜合金的性能恰好与喷嘴喉衬的需求形成精准匹配，其核心优势在于“钨与铜的协同互补”。钨的高熔点让合金在高温燃气中保持稳定，即使表面接触极限高温，钨相形成的骨架也不会熔化，直接抵御“高温灼烧”；钨的高强度和硬度则赋予合金优异的抗冲刷能力，能承受高速颗粒的冲击，减少表面磨损，应对“高速冲刷”；铜的高导热性起到关键作用——可将喉衬表面的热量快速传导至内部或冷却系统，避免局部热量堆积导致的烧蚀，解决“热量聚集”问题；同时，铜的塑性能够缓解温度骤变产生的热应力，减少钨骨架的脆性开裂风险，提升抗热震性能。此外，钨铜合金经致密化工艺处理后，结构强度足以抵抗高压燃气的冲击，保证喉衬形状稳定。

#### 版权与免责声明

#### 6.3.1.4 钨铜合金在喷嘴喉衬中的成型工艺及结构设计

钨铜合金在喷嘴喉衬中的应用，需通过精准的成型工艺和结构设计实现性能最大化。成型工艺以粉末冶金为核心：先将钨粉与铜粉按特定比例混合，通过模具压制成型喉衬的初步形状（生坯）；再经高温烧结使钨颗粒结合形成连续骨架，随后采用熔渗工艺让铜填充骨架孔隙，确保材料致密；最后通过精密加工修整曲面形状，保证与喷管其他部件的装配精度。

结构设计则注重“功能适配”：喉衬表面采用弧形曲面设计，贴合燃气流动轨迹，减少气流冲击带来的局部磨损；部分喉衬内部预留微小冷却通道，结合铜的高导热性，可通过冷却介质快速带走热量；在与喷管其他部件的连接部位，采用阶梯状密封结构，避免高温燃气泄漏；同时，根据受力分布调整喉衬厚度——燃气冲击最剧烈的区域适当加厚，在保证强度的同时减少材料浪费。这种“工艺保证致密性+结构优化受力与散热”的设计，让钨铜合金的性能得以充分发挥。

#### 6.3.1.5 采用钨铜合金后对喷嘴喉衬使用寿命的提升

相比传统材料（如纯钨、陶瓷等），钨铜合金显著延长了喷嘴喉衬的使用寿命，从“一次性使用”升级为“可多次耐受冲击”。传统纯钨虽耐高温，但脆性大、抗热震性差，在温度骤变时易开裂，往往一次点火后就因裂纹失效；陶瓷材料虽耐磨，但导热性差，表面易因热量堆积出现局部烧蚀，使用寿命极短。

而钨铜合金通过性能协同解决了这些痛点：钨相抵抗高温和冲刷，减少表面磨损速度；铜相高效导热，避免局部过热烧蚀；抗热震性能的提升则减少了裂纹产生的可能性；加上致密的成型工艺和优化的结构设计，喉衬能承受多次点火-关机的循环冲击。实际应用中，采用钨铜合金的喷嘴喉衬不仅能完成单次发射任务，部分型号还可用于多次试验或重复使用的火箭，大幅降低了更换频率和故障风险，同时提升了火箭发射的经济性和可靠性。

### 6.3.2 在航空发动机部件中的潜在应用

航空发动机是飞机的“心脏”，其性能直接决定飞机的动力、效率与安全性。随着航空工业对发动机推重比、燃油效率要求的提升，核心部件的工作环境愈发严苛，对材料的综合性能提出了更高挑战。钨铜合金凭借耐高温、导热性与结构强度的均衡特性，在航空发动机热端部件等关键位置展现出巨大的潜在应用价值，有望解决传统材料在极端工况下的性能瓶颈。

#### 6.3.2.1 航空发动机关键部件的工作环境特点

航空发动机关键部件（尤其是热端部件，如燃烧室、涡轮叶片、喷嘴等）的工作环境具有“高温、高压、高频振动、腐蚀”四大核心特点。燃烧室内部燃料燃烧温度可达上千摄氏度，涡轮叶片需在高温燃气冲刷下高速旋转（转速可达数千转/分钟），承受巨大的离心力与热应力；高压压气机与涡轮之间的间隙部件，需在高压气体环境中保持密封，同时抵抗气流摩擦产生的局部高温；此外，燃气中含有的硫化物、氮氧化物等成分，会对部件表面产生持续腐蚀；发动机启动、加速、减速过程中的温度与压力波动，还会引发部件的高频热疲劳与机械振动。

这种“持续高温+交变应力+腐蚀侵蚀+振动冲击”的复合环境，对材料的稳定性和耐久性构成严峻考验。

### 6.3.2.2 航空发动机部件对材料性能的需求

基于极端的工作环境，航空发动机部件对材料的性能需求呈现“全能化”特征。首先，材料需具备优异的耐高温性，在长期高温下保持力学性能（强度、硬度）不明显下降，避免因软化导致变形或断裂；其次，导热性必须突出，能快速将部件表面的热量导出，减少局部热点产生，降低热疲劳风险；再者，需有良好的抗热震性与机械韧性，在温度与压力交变时减少裂纹产生，抵抗振动冲击；同时，抗腐蚀性能不可或缺，能抵御燃气中的腐蚀性成分侵蚀，避免表面剥落或结构弱化；最后，材料需具备一定的加工性，可通过成型工艺制成复杂结构，满足部件的精密设计需求。这些性能需协同达标，缺一不可。

### 6.3.2.3 钨铜合金在航空发动机热端部件的应用形式

钨铜合金在航空发动机热端部件中的潜在应用，主要聚焦于“需兼顾导热与耐高温”的核心位置，应用形式随部件功能不同而调整。在燃烧室衬套领域，可采用高钨含量的钨铜合金制成薄壁衬套，利用钨的耐高温性抵抗火焰直接灼烧，同时通过铜的导热性将热量快速传递至冷却系统，避免衬套局部过热；在涡轮叶片边缘或叶尖密封部位，可将钨铜合金作为耐磨导热镶块，嵌入叶片基体——其高硬度能抵抗与机匣的摩擦磨损，导热性则可辅助叶片散热，减少热应力集中；在燃油喷嘴或点火器部件中，钨铜合金可制成喷嘴芯体，凭借耐高温性保证燃油雾化稳定性，同时通过导热性防止喷嘴因积碳过热堵塞。此外，在发动机的热防护垫片、高温传感器外壳等辅助部件中，钨铜合金也可通过定制化结构（如带冷却通道的复合结构）发挥作用。

### 6.3.2.4 针对航空发动机应用的钨铜合金性能优化方向

为更好适配航空发动机的需求，钨铜合金的性能优化需聚焦“短板提升”与“优势强化”。在耐高温性方面，可通过添加少量高熔点合金元素（如钼、铌）细化钨颗粒，提升钨骨架的高温稳定性，减少长期高温下的软化现象；在抗腐蚀性上，可采用表面改性技术（如等离子体渗层、抗氧化涂层），在合金表面形成致密防护层，抵御燃气腐蚀，同时不影响导热性；在力学韧性方面，可通过调整钨铜比例（如适度提高铜含量）或优化烧结工艺，增强钨铜界面的结合强度，减少脆性断裂风险；针对加工性，可开发粉末注射成型等精密工艺，实现复杂结构（如微型冷却通道、异形曲面）的近净成形，降低后续加工难度；此外，还可研发“梯度结构钨铜合金”——部件表层高钨含量以增强耐高温与耐磨性，内层高铜含量以强化导热与韧性，通过性能分区适配部件的不同位置需求。这些优化方向旨在让钨铜合金从“潜在应用”走向“实际适配”，满足航空发动机的严苛标准。

### 6.3.3 在航天器电气系统中的应用

航天器电气系统是维持航天器正常运行的“神经中枢”，负责电力传输、指令控制与设备供电，其可靠性直接关系到任务成败。在太空中，电气系统面临极端环境考验，而钨铜合金凭

借“导电导热优+抗电弧侵蚀强”的特性，成为接触器、断路器等核心部件的理想材料，为电气系统的稳定运行提供关键支撑。

### 6.3.3.1 航天器电气系统的工作环境及可靠性要求

航天器电气系统的工作环境具有“极端性”与“不可维修性”两大特点。在轨道运行时，系统需承受真空、高低温交变的环境——真空状态下无空气散热，易导致部件积热；温度骤变则会引发材料热胀冷缩，产生应力疲劳。同时，太空中存在高能粒子辐射，可能干扰电气信号传输；而发射阶段的剧烈振动与冲击，会对部件结构完整性造成考验。

基于这些环境特点，系统对可靠性的要求近乎“零故障”：核心部件需在数天至数年的任务周期内稳定工作，不出现接触不良、电弧烧蚀等问题；在极端温度与振动下，电气连接需保持导通性，灭弧部件需可靠分断电流；即使遭遇粒子辐射或微小陨石撞击，也需避免突发性失效。一旦出现故障，因无法在轨维修，可能直接导致任务失败。

### 6.3.3.2 航天器电气系统核心部件对材料性能的需求

航天器电气系统核心部件（如接触器触点、断路器灭弧室）对材料的性能需求高度聚焦“电气稳定性”与“环境适应性”。首先，材料需具备优异的导电性，保证电流高效传输，减少接触电阻带来的发热；其次，抗电弧侵蚀能力是关键——触点通断时产生的电弧会灼伤表面，材料需抵抗高温电弧的熔化与飞溅；同时，导热性需突出，能快速将电弧产生的热量导出，避免部件过热；此外，材料需有良好的抗热震性与机械强度，在高低温交变与振动冲击下不脆裂、不变形；最后，在真空环境中，材料需无挥发物释放（避免污染光学设备），且化学稳定性强，不与周围介质发生反应。

### 6.3.3.3 钨铜合金在航天器接触器触点中的应用

接触器是航天器电气系统中控制电路通断的“开关”，其触点是核心执行部件，钨铜合金在触点中的应用精准匹配功能需求。接触器触点在通断时会产生短暂电弧，钨铜合金中的钨相能抵抗电弧高温，避免触点熔化变形；铜相则保证优异的导电性，降低接触电阻，减少导通时的发热。在结构设计上，触点常采用“钨铜复合层”形式——表层高钨含量增强抗电弧能力，底层铜含量稍高提升与基座的焊接性。这种设计让触点既能在电弧作用下保持表面完整，又能在长期通断中维持稳定的导电性能，避免因触点烧蚀导致的电路接触不良，适配航天器对“低故障”的要求。

### 6.3.3.4 钨铜合金在航天器断路器灭弧部件中的应用

断路器是航天器电气系统的“安全卫士”，当电路出现过载或短路时，需快速分断电流并熄灭电弧，钨铜合金在灭弧部件（如灭弧室壁、弧触头）中发挥关键作用。灭弧时，电弧产生的高温易熔化部件表面，而钨铜合金的钨相能承受高温，减少表面烧蚀；铜相的高导热性可将电弧热量快速传导至冷却结构，加速电弧熄灭。在真空灭弧环境中，钨铜合金无挥发性成分释放，避免电弧中混入杂质气体，保证灭弧效率；同时，其抗热震性让部件在电弧高温与

低温真空的骤变中不产生裂纹，维持结构完整性。这种性能让断路器能在紧急情况下可靠分断电流，保护电路安全。

### 6.3.3.5 钨铜合金对航天器电气系统运行稳定性及寿命的保障作用

钨铜合金通过提升核心部件的可靠性，直接保障航天器电气系统的运行稳定性与寿命。在接触器中，其抗电弧侵蚀能力减少触点磨损，让通断次数从数千次提升至数万次，延长部件更换周期；稳定的导电性避免触点发热导致的局部过热，降低电路故障风险。在断路器中，钨铜合金的高效灭弧与抗烧蚀特性，保证过载时能快速切断电流，避免故障扩散；同时，材料的抗热震性与机械强度，让部件在长期高低温与振动中不失效，适配航天器数年的任务周期。此外，钨铜合金的低挥发特性避免了对其他设备的污染，间接保障了整个电气系统的协同运行，减少因材料问题引发的连锁故障。

### 6.3.3.6 航天器应用中钨铜合金的选材标准及质量控制要求

航天器应用的钨铜合金需通过严苛的选材与质量控制确保可靠性。选材标准上，首先明确成分比例——接触器触点需兼顾导电与抗电弧，通常选择 W70-Cu30 至 W80-Cu20 系列；灭弧部件则需更高钨含量增强耐高温性。同时，材料致密度需达 98% 以上，避免内部孔隙成为电弧侵蚀的薄弱点；导电率需  $\geq 40\%$  IACS（国际退火铜标准），保证电流传输效率。

质量控制贯穿全流程：原材料需经过纯度检测，避免杂质影响导电性；成型工艺采用真空烧结+熔渗，减少氧化与孔隙；成品需通过高低温循环、振动冲击等环境测试，验证性能稳定性；最终还需进行电弧侵蚀模拟试验，确保在数千次通断后仍能保持功能。只有通过全链条控制，才能保证钨铜合金满足航天器“零缺陷”的应用要求。

## 6.4 其他领域应用

钨铜合金的性能优势不仅局限于航空航天等高端领域，其“耐高温与导电导热平衡”“密度与强度可控”的特性，在冶金、体育、医疗、核能等领域也展现出独特价值。通过针对不同场景的需求优化成分与工艺，钨铜合金从“特种材料”逐步拓展至更多民用与工业场景，成为解决传统材料性能瓶颈的关键选择。

### 6.4.1 冶金行业的应用场景

冶金行业的高温冶炼、铸造与加工环节，对材料的耐高温、抗磨损与导热性需求突出，钨铜合金在多个核心场景中发挥作用。在真空冶炼的电极材料中，钨铜合金凭借高导电性与耐高温性，可作为电弧熔炼的电极——钨相抵抗熔炼时的高温电弧侵蚀，铜相保证电流稳定传输，同时快速导出电弧热量避免电极过热；在连铸结晶器的耐磨部件中，高钨含量的钨铜合金可制成结晶器内壁镶块，其耐磨性能抵抗高温钢水的冲刷，导热性则辅助钢水快速冷却成型，减少粘钢现象；在金属压铸模具的局部镶件中（如模具的浇口、型芯等易磨损部位），钨铜合金的高强度与抗热震性可延长模具寿命，避免因反复受热冷却产生裂纹。此外，在冶金检测设备的高温传感器外壳中，其耐高温与密封性也能保证检测精度。

#### 版权与免责声明

#### 6.4.2 体育器材中的用例

在体育器材领域，钨铜合金的应用聚焦于“需高密度与减震结合”的核心需求，用例集中在精密运动装备。在射箭器材的平衡配重块中，高钨含量的钨铜合金因其高密度特性，可在小体积下提供足够重量，帮助射手调整箭杆重心，提升射击稳定性；同时，铜相的存在让配重块具备一定韧性，避免在碰撞中碎裂。在台球杆的加重芯体中，钨铜合金可替代传统铅块，通过调整钨铜比例控制重量分布，既满足击球时的力量传递需求，又避免铅的毒性污染。在高端钓鱼竿的把手配重部件中，其密度与抗腐蚀性能的结合——既能通过配重提升握持手感，又能抵抗水环境的锈蚀，延长器材使用寿命。这些用例均利用了钨铜合金“密度可控+无毒性+成型性好”的优势，替代传统重金属材料。

#### 6.4.3 医疗器械领域的探索

医疗器械领域对材料的生物安全性、精密性与功能性要求严格，钨铜合金的探索应用聚焦于“需高密度与射线屏蔽结合”的场景。在放射治疗的剂量校准设备中，高钨含量的钨铜合金可作为射线衰减体——钨对X射线、伽马射线的屏蔽能力强，能精准控制射线穿透剂量，而铜的存在提升材料加工精度，可制成复杂的衰减通道，保证校准准确性；同时，其无毒性及化学稳定性避免了对设备的污染。在介入式医疗器械的定位部件中（如血管支架的显影标记），钨铜合金的高密度可在X光下清晰显影，帮助医生定位支架位置，而铜相的加工性让标记可制成微型结构，不影响支架的柔韧性。目前这些应用仍处于探索阶段，核心是通过表面钝化处理进一步提升生物相容性，为临床应用奠定基础。

#### 6.4.4 核能领域的应用前景

核能领域的极端环境（高温、辐射、高压）对材料的耐受性要求极高，钨铜合金凭借“耐高温辐射+导热稳定”的特性，展现出广阔应用前景。在核反应堆的控制棒导向部件中，钨铜合金可作为导向管——钨的抗辐射性能强，能在中子辐射环境下保持结构稳定，铜的导热性则可将反应堆内的热量导出，避免导向管因过热变形，保证控制棒的顺畅移动；同时，其抗腐蚀性能可抵御反应堆冷却剂的侵蚀。在核废料处理设备的屏蔽部件中，高钨含量的钨铜合金可制成屏蔽容器，利用钨对辐射的屏蔽能力隔离核废料，铜相则提升容器的密封性与加工性，便于制成复杂的密封结构。未来，随着抗辐射涂层技术与粉末冶金工艺的优化，钨铜合金有望在小型模块化反应堆的热交换部件、辐射探测器外壳等场景中实现突破，成为核能安全运行的关键材料之一。



中钨智造钨铜合金

#### 版权与免责声明

中钨智造科技有限公司  
钨铜合金产品介绍

一、钨铜合金概述

钨铜合金（Tungsten Copper Alloy）是钨和铜组成的合金，铜含量在 10%~50%。该合金集成了两种金属的优良性能，不仅具备钨的耐高温、抗电弧侵蚀特性，又拥有铜的良好导热导电能力，在电气、电力、电子、航空航天等高端领域中表现出卓越的综合性能。中钨智造提供多种钨铜合金定制服务，产品致密性高、性能稳定，可按客户需求加工成各类电极、热管理元件、真空部件等关键零部件。

二、钨铜合金性能

产品名称	化学成分%			物理机械性能			
	Cu	杂质总和≤	W	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HB)	电阻率 (MΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
钨铜(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	115	3.2	—
钨铜(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	140	3.7	—
钨铜(65)	35±2.0	0.5	余量	13.3	155	3.9	—
钨铜(70)	30±2.0	0.5	余量	13.8	175	4.1	790
钨铜(75)	25±2.0	0.5	余量	14.5	195	4.5	885
钨铜(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	220	5	980
钨铜(85)	15±2.0	0.5	余量	15.9	240	5.7	1080
钨铜(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	260	6.5	1160

三、钨铜合金分类（按用途）

**电接触材料：**如高压断路器触头、放电加工电极。

**热管理材料：**如电子封装基板、散热部件。

**军工与航空部件：**用于火箭喷嘴、导热结构件。

**电火花加工电极：**精密模具放电加工，抗烧蚀、加工精度高。

四、钨铜合金应用

**电力设备：**高压真空开关触头；断路器导电部件；大功率继电器、电弧熔断

**电子与半导体工业：**IGBT 模块散热基板；微波器件散热板；封装盖板与电子基

**放电加工：**EDM 电极材料（适用于硬质合金模具放电加工）；高精度放电成形电极

**航天与军工领域：**高温结构件（如航天喷管、尾喷口）；热控器件与冷板组件

**激光与等离子应用：**激光焊接/切割电极；等离子喷涂阴极/阳极元件

五、采购信息

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

电话：+86 592 5129595；592 5129696

更多钨铜合金资讯，请访问中钨在线网站（[www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

## 第七章 钨铜合金的未来发展趋势展望

钨铜合金的未来发展趋势展望聚焦于其在高性能应用中的持续优化与创新，结合新兴技术推动其性能提升和应用扩展。未来发展将围绕新型制备技术、性能增强策略和可持续性设计展开，以满足电气、航空航天和新能源领域日益增长的需求。

### 7.1 钨铜合金的新型制备技术探索

钨铜合金的新型制备技术探索旨在突破传统工艺的局限，引入先进的制造方法以提升微观结构控制和性能表现。这些技术通过创新的材料加工和成型方式，优化钨和铜的分布，减少缺陷并增强功能性。新型制备技术的开发将推动合金在复杂几何形状、高精度部件和定制化应用中的广泛使用。

#### 7.1.1 增材制造技术的潜在应用

增材制造技术作为钨铜合金制备的潜在应用，提供了通过逐层沉积材料实现复杂结构的可能性。该技术通过计算机辅助设计驱动，采用粉末床熔融或定向能量沉积方法，将钨和铜粉末逐层熔化并固化，形成具有定制化微观结构的合金部件。潜在应用在于其能够精确控制钨和铜的局部分布，创造功能梯度材料，在部件的不同区域实现导电性与耐高温性的动态平衡。工艺过程允许设计复杂的几何形状，如内部冷却通道或轻量化结构，满足航空航天和电子设备的高要求。

增材制造技术的优势还包括减少材料浪费和缩短生产周期，通过数字模型直接成型，适应小批量或个性化生产需求。在钨铜合金中，该技术可优化晶粒形态和相分布，增强界面结合，减少传统工艺中的孔隙和未润湿区域。潜在应用场景包括高性能散热片、精密电接触件和定制化焊接电极，特别是在需要复杂内部结构的部件中展现独特价值。未来发展需解决粉末混合均匀性、热应力控制和后处理优化等问题，以提升部件的可靠性和一致性。这项技术的探索将推动钨铜合金在高精度和高可靠性领域的突破。

#### 7.1.2 其他前沿制备技术展望

除了增材制造技术，其他前沿制备技术的展望为钨铜合金的未来发展提供了多样化路径。这些技术包括纳米技术、等离子体喷涂和自组装方法，旨在通过创新材料设计和加工方式提升合金性能。纳米技术通过使用超细钨和铜粉末，增强微观结构的均匀性和致密性，潜在改善导电性和机械强度。等离子体喷涂技术通过高速等离子体将钨和铜颗粒熔化并沉积，适用于快速制备涂层或复杂表面，适合耐磨和抗腐蚀应用。自组装方法则利用材料自身的化学或物理特性，在分子水平上调控相分布，探索新型复合结构。

这些前沿技术的展望在于其能够突破传统粉末冶金或熔渗法的限制，提供更高的灵活性和功能性。例如，纳米技术可实现更细小的晶粒尺寸，增强抗电弧侵蚀能力；等离子体喷涂可快速修复或增强部件表面；自组装方法则可能开启智能化材料设计新领域。未来发展方向包括结合多技术集成，如纳米粉末与增材制造的结合，或等离子体喷涂与表面处理的协同，优化

#### 版权与免责声明

微观结构和性能。挑战在于工艺复杂性、成本控制和大规模应用的可行性，这些技术的推进将为钨铜合金开辟新的应用前景。

## 7.2 钨铜合金的性能优化研究方向

钨铜合金的性能优化研究方向旨在通过深入探索材料设计和工艺改进，全面提升其导电性、导热性、机械强度和耐久性，以适应日益复杂的应用需求。性能优化的核心在于平衡钨和铜的特性，针对微观结构进行精细调控，同时针对特定场景开发定制化解决方案。研究方向涵盖综合性能的提升和针对特定应用场景的强化，强调创新方法在推动合金发展的作用。

### 7.2.1 综合性能提升的研究方向

综合性能提升的研究方向聚焦于同时增强钨铜合金的多种特性，包括导电性、导热性、机械强度和抗腐蚀性，以实现全方位的性能优化。研究的核心在于微观结构的精细调控，通过优化晶粒尺寸、相分布和界面结合，减少缺陷并提高材料致密性。一种潜在方法是开发新型粉末混合技术，确保钨和铜的均匀分布，增强铜相的连续性以提升导电和导热性能，同时保持钨相的稳定结构以支撑机械强度。界面增强技术，如引入中间相或表面改性，可改善钨和铜之间的粘附力，减少剥离风险。

另一个研究方向是探索多相复合设计，通过引入微量添加剂或第二相材料，调节微观结构以平衡强度和韧性。添加剂的选择需考虑其与钨和铜的化学兼容性，以避免引入新的弱点。此外，工艺创新如分段烧结或压力辅助处理，可进一步减少孔隙，增强材料的整体稳定性。抗腐蚀性和抗氧化能力的提升可通过表面处理或涂层技术实现，保护铜相免受环境侵蚀，同时保留钨的耐高温特性。未来的研究还可结合模拟技术和人工智能，预测微观结构与性能的关系，动态优化制备参数。这些方向的推进将推动钨铜合金在多种高性能应用中的综合表现。

### 7.2.2 特定应用场景下的性能强化

特定应用场景下的性能强化研究方向旨在针对钨铜合金在电气触点、焊接电极和航空航天部件等特定领域的需求，定制化优化其性能表现。针对电气触点应用，强化重点在于提升导电性和抗电弧侵蚀能力，可通过优化铜相的网络结构，增强电子传输效率，同时采用耐高温涂层或表面改性，减少电弧引发的表面损伤。研究可探索动态调整钨含量的方法，在高电流场景中提供更好的耐磨性和稳定性。

对于焊接电极应用，性能强化的方向是提高耐高温性和抗粘连能力，可通过增加钨相的比例，增强骨架的抗熔化性能，同时优化烧结工艺，减少孔隙以改善热传导。界面结合的强化也至关重要，防止高温下铜相与工件粘连，研究可引入润湿改进剂或多层结构设计。航空航天部件如散热片的需求则聚焦于导热性和轻量化，可通过功能梯度设计实现铜相在表面的高导热分布，钨相在内部提供结构支持，研究方向包括开发新型成型技术以优化内部孔隙分布。这些特定强化的研究需结合应用场景的实际条件，如温度、机械应力和使用周期，开发针对性的测试和验证方法。未来的发展可探索自适应材料设计，使合金能够根据环境变化动态调整性能，或利用智能制造技术实时监控和优化性能表现。

#### 版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司  
钨铜合金产品介绍

一、钨铜合金概述

钨铜合金（Tungsten Copper Alloy）是钨和铜组成的合金，铜含量在 10%~50%。该合金集成了两种金属的优良性能，不仅具备钨的耐高温、抗电弧侵蚀特性，又拥有铜的良好导热导电能力，在电气、电力、电子、航空航天等高端领域中表现出卓越的综合性能。中钨智造提供多种钨铜合金定制服务，产品致密性高、性能稳定，可按客户需求加工成各类电极、热管理元件、真空部件等关键零部件。

二、钨铜合金性能

产品名称	化学成分%			物理机械性能			
	Cu	杂质总和≤	W	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (HB)	电阻率 (MΩ·cm)	抗拉强度 (MPa)
钨铜(50)	50±2.0	0.5	余量	11.85	115	3.2	—
钨铜(60)	40±2.0	0.5	余量	12.75	140	3.7	—
钨铜(65)	35±2.0	0.5	余量	13.3	155	3.9	—
钨铜(70)	30±2.0	0.5	余量	13.8	175	4.1	790
钨铜(75)	25±2.0	0.5	余量	14.5	195	4.5	885
钨铜(80)	20±2.0	0.5	余量	15.15	220	5	980
钨铜(85)	15±2.0	0.5	余量	15.9	240	5.7	1080
钨铜(90)	10±2.0	0.5	余量	16.75	260	6.5	1160

三、钨铜合金分类（按用途）

**电接触材料：**如高压断路器触头、放电加工电极。

**热管理材料：**如电子封装基板、散热部件。

**军工与航空部件：**用于火箭喷嘴、导热结构件。

**电火花加工电极：**精密模具放电加工，抗烧蚀、加工精度高。

四、钨铜合金应用

**电力设备：**高压真空开关触头；断路器导电部件；大功率继电器、电弧熔断

**电子与半导体工业：**IGBT 模块散热基板；微波器件散热板；封装盖板与电子基

**放电加工：**EDM 电极材料（适用于硬质合金模具放电加工）；高精度放电成形电极

**航天与军工领域：**高温结构件（如航天喷管、尾喷口）；热控器件与冷板组件

**激光与等离子应用：**激光焊接/切割电极；等离子喷涂阴极/阳极元件

五、采购信息

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

电话：+86 592 5129595；592 5129696

更多钨铜合金资讯，请访问中钨在线网站（[www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)）。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

## 附录

### 附录 A 中国钨铜合金国家标准

中国钨铜合金国家标准由标准化管理委员会（SAC）制定，旨在规范钨铜合金的制备、性能和应用，确保产品质量和行业一致性。这些标准主要涵盖钨铜合金粉末、成品部件及相关测试方法。虽然目前没有专门针对钨铜合金的单一国家标准，但相关标准可从钨和铜合金的通用规范中推导。中国的国家标准体系包括 GB/T 系列，部分标准如 GB/T 26055-2022（再造碳化钨粉）涉及钨基材料的制备要求，可作为参考。GB/T 38470-2023 和 GB/T 38471-2023 分别规定了二次铜合金和铜原料的质量标准，间接适用于钨铜合金的铜相质量控制。此外，GB/T 5242-2006 和 GB/T 5243-2006 提供了硬质合金产品检验规则和包装运输规范，部分内容可扩展至钨铜合金的检测和运输。这些标准通过化学分析、密度测定和显微结构评估，确保材料的均匀性和性能稳定性。

中国标准的特点在于其对国产原料和工艺的适应性，强调环境保护和质量监督。近年来，随着废料进口政策的收紧，如 2023 年新海关标准的实施，对铜原料的纯度和非金属杂质含量提出了更高要求，这间接影响了钨铜合金的生产。标准的内容通常包括材料成分、物理性能和加工工艺的要求，旨在支持国内工业需求，如电气触点和焊接电极的应用。未来，标准可能进一步细化，纳入新型制备技术的要求，以适应技术进步和国际竞争。

### 附录 B 国际钨铜合金标准

国际钨铜合金标准主要由国际标准化组织（ISO）和其他国家或地区标准机构制定，旨在为全球供应链提供统一的参考框架。尽管没有专门针对钨铜合金的国际标准，但相关规范可从钨合金和铜合金的通用标准中获取。ISO 18119 涵盖了用于硬质合金生产的钨合金粉末，提供了粉末制备和性能的基本要求，可作为钨铜合金原料的基础。其他国际标准如 JIS H 3201（日本工业标准）规定了钨合金粉末的特性，部分内容适用于钨铜复合材料。ASTM 国际标准和 EN 标准虽未直接针对钨铜合金，但其金属材料测试方法（如密度和硬度测试）可用于性能评估。

国际标准的特点在于其跨国适用性，强调材料一致性和贸易便利性。不同国家和地区如美国、日本和欧洲的工业标准（如 ASTM、JIS 和 DIN）通过互助互认，形成了全球化的规范体系。钨铜合金的国际应用，如航空航天和电子封装，促使这些标准关注高导电性、高导热性和耐高温性能。一些主要粉末生产商还制定了企业内部规格，补充国际标准的不足，确保高品质供应。然而，国际标准对新兴制备技术如增材制造的支持尚不完善，未来可能需要更新以适应技术发展。总体而言，国际标准为钨铜合金的全球贸易和应用提供了重要指导，但其具体实施需结合各国实际情况。

### 附录 C 欧美日韩等国的钨铜合金标准

欧美日韩等国的钨铜合金标准由各自的国家或地区标准化机构制定，旨在规范材料性能、制备工艺和应用要求，以支持全球贸易和工业发展。尽管没有专门针对钨铜合金的统一国际标

#### 版权与法律责任声明

准，但相关规范通常从钨合金、铜合金或复合材料的通用标准中推导。以下概述主要国家和地区的标准情况。

在欧美地区，美国的 ASTM 国际标准和欧洲的 EN 标准是主要参考框架。ASTM 标准如 ASTM B702 涵盖了钨铜电触头材料的制备和性能要求，涉及密度、导电性和硬度等参数，但未针对所有钨铜合金类型提供详细规范。EN 标准（如 EN 13601）主要聚焦铜及其合金，间接适用于钨铜合金的铜相质量控制。这些标准强调材料的一致性和测试方法的可重复性，广泛用于电气触点和热沉应用。欧美标准对高导电性和耐高温性能有较高要求，部分企业如 American Elements 和 Plansee 制定内部规格，补充通用标准的不足。

日本的 JIS 标准（如 JIS H 3201）规定了钨合金粉末的特性，部分内容适用于钨铜复合材料，关注粉末粒径和化学成分的均匀性。日本工业界对钨铜合金的应用多集中在电火花加工（EDM）电极和高压开关触头，标准强调抗电弧侵蚀和导电性能。韩国标准则由韩国工业标准（KS）制定，KS D 2101 等规范涉及钨基材料，适用于钨铜合金的粉末冶金工艺。韩国注重高精度部件的生产，标准对微观结构和热导率有具体要求，反映其在电子封装和航空航天领域的需求。

这些国家的标准存在差异，欧美注重通用性和贸易兼容性，日本和韩国更关注特定工业应用的技术细节。钨铜合金的比例（如 WCu 70/30、WCu 80/20）在不同标准中的性能要求可能有所不同，但普遍要求高致密性、低热膨胀和优异导电性。当前标准对新兴技术如增材制造的支持有限，未来可能需要更新以适应技术进步。总体而言，这些标准为钨铜合金的国际合作和应用提供了重要指导，但实施需结合各国工业特色 and 市场需求。

#### 附录 D 钨铜合金术语表

术语	定义
钨铜合金	由钨和铜通过粉末冶金或熔渗工艺制成的复合材料，兼具高熔点和导电性。
粉末冶金	通过将金属粉末混合、压制和烧结制备合金的工艺，适用于钨铜合金的均匀分布。
真空熔渗	在真空环境中将液态铜渗透至钨骨架的工艺，用于制备高致密钨铜合金。
晶粒尺寸	合金中钨或铜颗粒的平均大小，影响强度和导电性。
相分布	钨相和铜相在合金中的空间排列，决定导电性和导热路径。
孔隙率	合金中未填充空隙的比例，影响致密性和机械性能。
界面结合	钨和铜相之间的粘附质量，影响载荷传递和抗剥离能力。
导电性	合金传输电流的能力，主要由铜相的连续性决定。
导热性	合金传递热量的能力，依赖于铜相分布和微观结构均匀性。
抗电弧侵蚀性	合金抵抗电弧高温烧蚀的能力，受到钨相稳定性和孔隙分布的影响。
液相烧结	在高温下利用铜液相润湿和填充钨颗粒的烧结工艺，提升合金致密性。
热等静压	通过全向压力在高温下处理合金，减少孔隙并改善微观结构。
增材制造	通过逐层沉积钨和铜粉末制备合金的技术，适用于复杂几何形状。
功能梯度材料	钨和铜含量沿部件方向渐变的结构，优化导电性和耐高温性。

#### 版权与法律声明

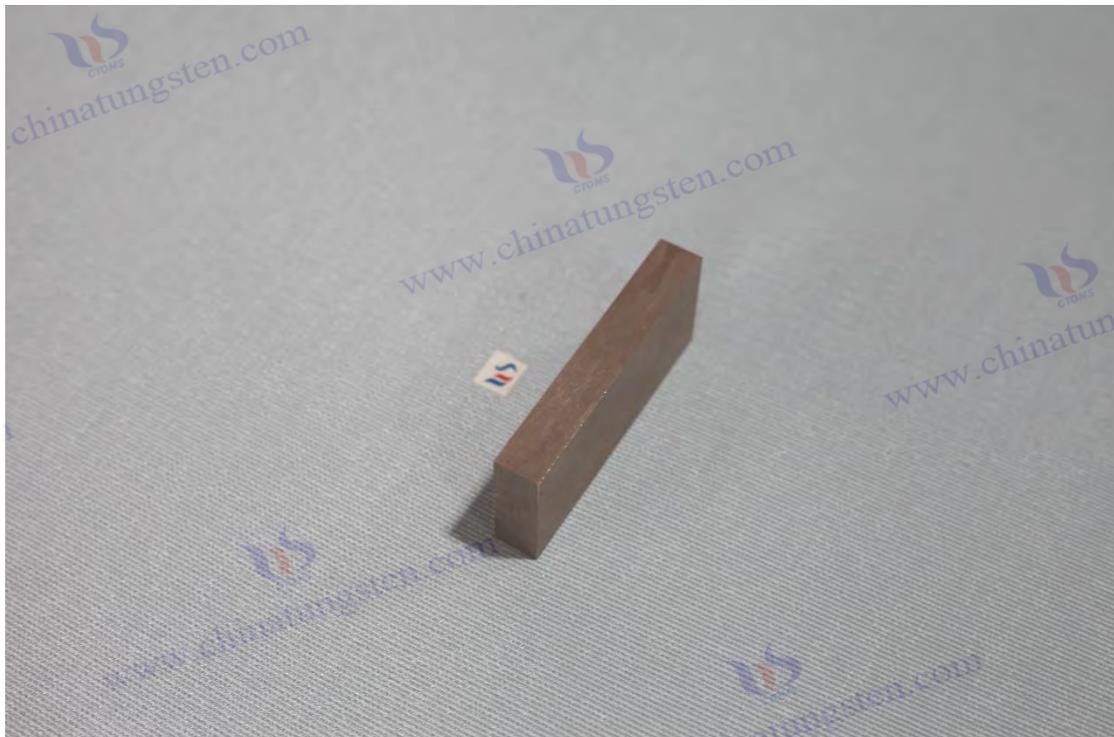
## 参考文献

### 中文文献

- [1] 中国标准化协会. (2023). GB/T 26055-2022 再造碳化钨粉. 北京: 中国标准出版社.
- [2] 中国标准化协会. (2023). GB/T 38470-2023 二次铜合金. 北京: 中国标准出版社.
- [3] 中国标准化协会. (2023). GB/T 38471-2023 铜原料质量要求. 北京: 中国标准出版社.
- [4] 中国标准化协会. (2006). GB/T 5242-2006 硬质合金产品检验规则. 北京: 中国标准出版社.
- [5] 中国标准化协会. (2006). GB/T 5243-2006 硬质合金产品包装运输规范. 北京: 中国标准出版社.

### 英文文献

- [1] International Organization for Standardization. (2020). ISO 18119: Tungsten alloy powders for hardmetals. Switzerland: ISO.
- [2] Japanese Industrial Standards Committee. (2018). JIS H 3201: Tungsten alloy powder characteristics. Tokyo: Japanese Standards Association.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM B702: Standard specification for tungsten-copper electrical contact material. USA: ASTM.
- [4] European Committee for Standardization. (2017). EN 13601: Copper and copper alloys - Rods. Brussels: CEN.
- [5] Korean Agency for Technology and Standards. (2021). KS D 2101: Powder metallurgy specifications for tungsten-based materials. Seoul: KATS.



中钨智造钨铜合金