

钨钨电极百科全书

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钨稀土产业数字化智能化服务领航者

[版权与免责声明](#)

中钨智造简介

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

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

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

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



版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（La₂O₃）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备
 等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统
 不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接
 自动化焊接、机器人焊接系统
 航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com
 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
 更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。
 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

目录

第一章 引言

- 1.1 钨钨电极的定义与概述
- 1.2 钨钨电极在焊接与工业中的重要性
- 1.3 研究与应用的背景

第二章 钨钨电极的种类

- 2.1 钨钨电极按钨含量分类
 - 2.1.1 WL10（黑色涂头）
 - 2.1.2 WL15（金黄色涂头）
 - 2.1.3 WL20（天蓝色涂头）
- 2.2 钨钨电极按应用场景分类
 - 2.2.1 直流焊接用钨钨电极
 - 2.2.2 交流焊接用钨钨电极
 - 2.2.3 特殊用途钨钨电极（如等离子切割）
- 2.3 钨钨电极与其他钨电极的比较
 - 2.3.1 钨钨电极 vs 钍钨电极
 - 2.3.2 钨钨电极 vs 铈钨电极
 - 2.3.3 钨钨电极 vs 纯钨电极
 - 2.3.4 钨钨电极 vs 锆钨电极
 - 2.3.5 钨钨电极 vs 钇钨电极

第三章 钨钨电极的特性

- 3.1 钨钨电极的物理特性
 - 3.1.1 钨钨电极的熔点与沸点
 - 3.1.2 钨钨电极的密度与硬度
 - 3.1.3 钨钨电极的热导率与电导率
- 3.2 钨钨电极的化学特性
 - 3.2.1 钨钨电极的抗氧化性
 - 3.2.2 钨钨电极的耐腐蚀性
 - 3.2.3 钨钨电极的化学稳定性
- 3.3 钨钨电极的电学特性
 - 3.3.1 钨钨电极的电子逸出功
 - 3.3.2 钨钨电极的起弧性能
 - 3.3.3 钨钨电极的电弧稳定性
- 3.4 钨钨电极的机械特性
 - 3.4.1 钨钨电极的抗烧损性能
 - 3.4.2 钨钨电极的耐磨性
 - 3.4.3 钨钨电极的韧性与脆性
- 3.5 中钨智造钨钨电极 MSDS

版权与免责声明

第四章 钨钨电极的用途

- 4.1 钨钨电极用于焊接领域
 - 4.1.1 TIG（氩弧焊）中的应用
 - 4.1.2 等离子焊接
 - 4.1.3 适用于的金属类型（不锈钢、铝合金、镍合金等）
- 4.2 钨钨电极用于非焊接领域
 - 4.2.1 等离子切割
 - 4.2.2 放电加工（EDM）
 - 4.2.3 电子设备中的电极材料
- 4.3 钨钨电极的特殊应用
 - 4.3.1 航空航天工业
 - 4.3.2 核工业
 - 4.3.3 医疗设备制造
- 4.4 钨钨电极应用案例分析
 - 4.4.1 钨钨电极在高精度焊接中的应用
 - 4.4.2 钨钨电极在高温环境下的表现

第五章 钨钨电极的制备生产工艺与技术

- 5.1 钨钨电极的原材料准备
 - 5.1.1 钨粉的选取与提纯
 - 5.1.2 氧化钨的制备与掺杂
 - 5.1.3 其他添加剂的选择
- 5.2 钨钨电极的生产工艺流程
 - 5.2.1 混合与压制
 - 5.2.2 烧结工艺
 - 5.2.3 锻造与拉拔
 - 5.2.4 表面处理
- 5.3 钨钨电极的关键生产技术
 - 5.3.1 均匀掺杂技术
 - 5.3.2 高温烧结技术
 - 5.3.3 精确尺寸控制技术
 - 5.3.4 表面涂层技术
- 5.4 钨钨电极的质量控制
 - 5.4.1 原材料质量检测
 - 5.4.2 生产过程监控
 - 5.4.3 成品质量检验
- 5.5 钨钨电极的技术发展趋势
 - 5.5.1 绿色制造技术
 - 5.5.2 自动化与智能化生产
- 5.6 钨钨电极的环境保护措施
 - 5.6.1 废气与废水处理
 - 5.6.2 固体废弃物管理

第六章 钨钨电极的生产设备

- 6.1 钨钨电极的原材料处理设备
 - 6.1.1 钨粉研磨设备
 - 6.1.2 氧化钨掺杂设备
- 6.2 钨钨电极的成型与加工设备
 - 6.2.1 压制机
 - 6.2.2 烧结炉
 - 6.2.3 锻造设备
 - 6.2.4 拉拔机
- 6.3 钨钨电极的表面处理设备
 - 6.3.1 抛光机
 - 6.3.2 清洗设备
- 6.4 钨钨电极的质量检测设备
 - 6.4.1 化学成分分析仪
 - 6.4.2 物理性能测试设备
 - 6.4.3 电学性能测试设备
- 6.5 钨钨电极的辅助设备
 - 6.5.1 环境控制设备
 - 6.5.2 废料回收设备

第七章 钨钨电极的国内外标准

- 7.1 钨钨电极的国际标准
 - 7.1.1 ISO 6848:2015（钨电极的分类与要求）
 - 7.1.2 AWS A5.12/A5.12M（美国焊接学会标准）
 - 7.1.3 EN 26848（欧洲标准）
- 7.2 钨钨电极的国内标准
 - 7.2.1 GB/T 14841（钨电极国家标准）
 - 7.2.2 JB/T 4730（焊接材料标准）
- 7.3 钨钨电极的标准对比分析
 - 7.3.1 国内外标准的异同
 - 7.3.2 对生产与应用的影响
- 7.4 钨钨电极的标准更新与发展趋势
 - 7.4.1 新标准的制定
 - 7.4.2 标准国际化趋势

第八章 钨钨电极的检测方法与技术

- 8.1 钨钨电极的化学成分检测
 - 8.1.1 氧化钨含量检测
 - 8.1.2 杂质元素分析
- 8.2 钨钨电极的物理性能检测
 - 8.2.1 密度与硬度测试
 - 8.2.2 熔点与热导率测试

- 8.3 钨钨电极的电学性能检测
 - 8.3.1 电子逸出功测量
 - 8.3.2 起弧性能测试
 - 8.3.3 电弧稳定性测试
- 8.4 钨钨电极的机械性能检测
 - 8.4.1 抗烧损性能测试
 - 8.4.2 耐磨性测试
- 8.5 钨钨电极的显微结构分析
 - 8.5.1 扫描电镜（SEM）分析
 - 8.5.2 X射线衍射（XRD）分析
- 8.6 钨钨电极检测设备的选择与校准
 - 8.6.1 检测设备类型
 - 8.6.2 校准与维护
- 8.7 钨钨电极的检测标准与规范
 - 8.7.1 国际检测标准
 - 8.7.2 国内检测规范

第九章 钨钨电极的发展趋势与挑战

- 9.1 钨钨电极的技术发展趋势
 - 9.1.1 新型掺杂技术的开发
 - 9.1.2 高性能钨钨电极的研发
 - 9.1.3 环保生产工艺的推广
- 9.2 钨钨电极的市场发展趋势
 - 9.2.1 全球市场需求分析
 - 9.2.2 国内市场前景
- 9.3 钨钨电极面临的挑战
 - 9.3.1 原材料成本控制
 - 9.3.2 环保法规的约束
 - 9.3.3 国际市场竞争

第十章 结论

- 10.1 钨钨电极的综合优势
- 10.2 对钨电行业发展的建议
- 10.3 钨钨电极未来研究方向

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

第一章 引言

1.1 钨钨电极的定义与概述

钨钨电极是一种在钨基体中掺杂氧化镧 (La_2O_3) 的钨合金电极材料，主要用于钨极惰性气体保护焊(TIG 焊接)、等离子焊接与切割等高精度工业应用。钨作为一种高熔点(约 3422°C)、耐腐蚀、高密度且具有优异导热与导电性能的金属，是电极材料的理想选择。通过在钨中掺杂少量氧化镧(通常含量在 0.8%至 2.2%之间)，可以显著改善其电子逸出功，从而提升电极的起弧性能、电弧稳定性和耐烧损能力。钨钨电极以其优异的焊接性能和无放射性特点，成为替代传统钍钨电极的首选材料，尤其是在追求环保和安全性的现代工业中。

钨钨电极按照氧化镧含量不同，分为多个牌号，如 WL10 (含 0.8%-1.2%氧化镧)、WL15 (含 1.3%-1.7%氧化镧) 和 WL20 (含 1.8%-2.2%氧化镧)。这些牌号分别对应不同的应用场景和性能要求。例如，WL15 因其导电性能接近 2.0%钍钨电极而广受欢迎，焊接人员可直接替换使用，无需调整设备参数。钨钨电极的端部通常以不同颜色标示，如 WL10 为黑色，WL15 为金黄色，WL20 为天蓝色，以便于区分和选择。

钨钨电极的生产通常采用粉末冶金工艺，通过将高纯度钨粉与氧化镧均匀混合，经压制、烧结、锻造和拉拔等工序制成，直径范围从 0.25 毫米到 6.4 毫米，长度从 75 毫米到 600 毫米，满足多种焊接需求。其独特的物理和化学特性，如高再结晶温度、良好的延展性和抗蠕变性能，使其在直流和交流焊接中均表现出色，尤其适用于低电流起弧和管道焊接等高要求场景。

1.2 钨钨电极在焊接与工业中的重要性

钨钨电极在现代焊接和工业领域中占据重要地位，尤其是在 TIG 焊接、等离子焊接和切割等工艺中，其性能直接影响焊接质量和生产效率。TIG 焊接是一种利用钨电极在惰性气体(如氩气或氦气)保护下产生电弧的焊接方法，广泛应用于不锈钢、铝合金、镍基合金、钛合金等高性能材料的焊接。这些材料常见于航空航天、核工业、船舶制造和医疗设备制造等领域，对焊缝质量和工艺稳定性要求极高。钨钨电极因其以下特点在这些领域中具有不可替代的作用：

优异的起弧性能：钨钨电极的电子逸出功较低 (WL10 为 2.6-2.7 eV, WL15 和 WL20 为 2.8-3.2 eV)，使其在低电流条件下也能轻松起弧，特别适合薄板焊接和精密焊接任务。与纯钨电极相比，钨钨电极在低电压下表现更稳定，减少了起弧失败的风险。

电弧稳定性：掺杂氧化镧的钨钨电极能够形成稳定的电弧，减少电弧漂移和飞溅现象，从而保证焊缝的均匀性和表面质量。这对于需要高质量焊缝的行业，如航空航天和核工业，至关重要。

低烧损率：钨钨电极在高温电弧作用下具有较低的烧损率，延长了电极使用寿命，减少了更换频率和停机时间。例如，1998 年一项著名试验表明，在 70 安和 150 安直流环境下，1.5%钨钨电极 (WL15) 的烧损率显著低于 2.0%钍钨电极和 2.0%铈钨电极。

版权与免责声明

无放射性：与传统钍钨电极（含氧化钍，具有放射性，射线剂量达 3.60×10^5 居里/千克）相比，钨钨电极不含放射性物质，符合现代环保和职业健康安全要求。这使其在欧美等对环保法规要求严格的市场中更具竞争力。

多功能性：钨钨电极不仅适用于直流焊接，还在交流焊接中表现出色，尤其是在焊接铝、镁及其合金时，能够保持稳定的电弧和较低的电极消耗。这使其成为一种通用的电极材料，适应多种焊接场景。

在工业应用中，钨钨电极还广泛用于等离子切割、放电加工（EDM）和电子设备制造。例如，在等离子切割中，钨钨电极能够承受高温等离子弧的冲击，提供稳定的切割性能；在电子设备中，其高导电性和耐腐蚀性使其成为某些高精度电极的理想材料。这些特性使得钨钨电极在全球焊接和工业市场中需求持续增长。

1.3 研究与应用的背景

钨钨电极的研发和应用起源于对高性能焊接材料的需求。20 世纪初，钨由于其高熔点和优异的导电性被广泛用于焊接电极，但纯钨电极在起弧性能和电弧稳定性方面存在局限。随着稀土材料研究的进展，科学家发现通过掺杂稀土氧化物（如氧化铈、氧化镧、氧化钍等）可以显著改善钨电极的性能。20 世纪 80 年代，钍钨电极因其优异的焊接性能成为主流，但其放射性问题逐渐引起关注，尤其是在欧美国家严格的环保法规下，钍钨电极的使用受到限制。

为寻找无放射性的替代材料，钨钨电极和铈钨电极应运而生。钨钨电极在 20 世纪 80 年代末开始进入市场，其 1.5% 氧化镧含量的牌号（WL15）因性能接近钍钨电极而迅速受到欢迎。1998 年的现场试验进一步验证了钨钨电极的优越性：在 70 安和 150 安直流环境下，1.5% 钨钨电极不仅表现出与 2.0% 钍钨电极相当的导电性能，还具有更低的烧损率和更好的电弧稳定性。这一结果推动了钨钨电极在全球范围内的广泛应用。

在应用方面，钨钨电极的推广与 TIG 焊接技术的发展密切相关。TIG 焊接自 1930 年在美国发明以来，因其高精度、无飞溅和适用于多种金属的特点，广泛应用于航空航天、核能、船舶和电子工业。1957 年，中国开始使用钨极氩弧焊，钨钨电极的引入进一步提升了焊接质量，尤其是在核电站压力容器、航空航天部件和医疗设备制造中，其高质量焊缝和低缺陷率得到了广泛认可。

近年来，随着自动化焊接技术的进步，钨钨电极在焊接机器人和自动化设备中的应用日益增多。例如，在汽车工业中，焊接机器人使用钨钨电极进行点焊和弧焊，大幅提高了生产效率和焊缝一致性。此外，新型焊接工艺如搅拌摩擦焊、激光复合焊等的发展，也为钨钨电极的应用提供了新的可能性。研究领域则聚焦于优化钨钨电极的掺杂工艺、提高其高温性能以及开发更环保的生产技术，以应对原材料成本上升和环保法规的挑战。

钨钨电极的全球市场需求持续增长，尤其在亚太地区，由于中国、印度等国家的制造业快速发展，钨钨电极的消费量显著增加。国内企业如中钨在线科技有限公司在钨钨电极生产方面积累了丰富的经验，产品质量达到国际标准。同时，国际市场对钨钨电极的需求也推动了相关标准的制定，如 ISO 6848:2015 和 GB/T 31908-2015，为其生产和应用提供了规范依据。

版权与法律责任声明



中钨智造 WL10 电极

第二章 钨钨电极的种类

钨钨电极作为一种高性能的焊接和切割电极材料，因其掺杂氧化钨 (La_2O_3) 的特性而具有多样化的分类方式。根据国际标准（如 ISO 6848:2015）和实际应用需求，钨钨电极主要按氧化钨含量和应用场景进行分类。本章将详细介绍按钨含量分类的钨钨电极（WL10、WL15、WL20）、按应用场景分类的电极类型，以及钨钨电极与其他常见钨电极的性能对比。

2.1 按钨含量分类

钨钨电极的性能与其氧化钨含量密切相关，不同含量的氧化钨赋予电极不同的电学、热学和机械特性。根据国际标准 ISO 6848:2015 和中国国家标准 GB/T 14841，钨钨电极主要分为三种常见牌号：WL10、WL15 和 WL20，分别对应不同的氧化钨含量和应用需求。为了便于识别，这些电极的端部通常涂有特定颜色，WL10 为黑色，WL15 为金黄色，WL20 为天蓝色。

2.1.1 WL10（黑色涂头）

WL10 钨钨电极含有 0.8%-1.2% 的氧化钨 (La_2O_3)，是氧化钨含量最低的钨钨电极牌号。其电子逸出功约为 2.6-2.7 eV，低于纯钨电极（约 4.5 eV），因此具有较好的起弧性能，尤其是在低电流直流焊接中表现出色。WL10 电极的电弧稳定性优于纯钨电极，但略逊于 WL15 和 WL20，主要适用于对电极消耗要求不高的场景。

特性与优势：

低电流起弧：WL10 在低电流（10-50 安）条件下能够轻松起弧，适合薄板焊接（如 0.5-2 毫米不锈钢或铝合金）。

成本效益：由于氧化钨含量较低，WL10 的生产成本相对较低，适合预算有限的中小型企业。

耐用性：在低至中等电流条件下，WL10 的烧损率较低，电极寿命较长。

版权与免责声明

应用领域:

精密电子元件的直流焊接，如电路板制造。
薄壁管道焊接，如化工设备中的不锈钢管道。
小型工件的 TIG 焊接，如自行车车架或医疗器械。

局限性:

在高电流 (>150 安) 或交流焊接中，WL10 的电弧稳定性稍逊，容易出现电弧漂移。
不适合长时间高负荷焊接任务，因其抗烧损能力弱于 WL15 和 WL20。

2.1.2 WL15 (金黄色涂头)

WL15 钨钨电极含有 1.3%-1.7% 的氧化镧，是最常用的钨钨电极牌号之一。其电子逸出功约为 2.8-3.0 eV，接近 2.0% 钍钨电极 (约 2.6 eV)，因此被广泛视为钍钨电极的无放射性替代品。WL15 在直流和交流焊接中均表现出色，尤其在中等至高电流条件下具有优异的电弧稳定性和低烧损率。

特性与优势:

通用性强: WL15 适用于直流和交流焊接，能够焊接多种金属，包括不锈钢、铝合金、镍合金和钛合金。

电弧稳定性: 在 50-200 安的电流范围内，WL15 能够维持稳定的电弧，减少飞溅和焊缝缺陷。

长寿命: 相比 WL10，WL15 的抗烧损性能更强，电极尖端在高温下不易变形，适合长时间焊接。

应用领域:

航空航天工业，如飞机机身和发动机部件的 TIG 焊接。

核工业设备制造，如压力容器的精密焊接。

汽车工业中的高强度钢和铝合金焊接。

局限性:

在极低电流 (<10 安) 条件下，WL15 的起弧性能略逊于 WL10。

生产成本略高于 WL10，但低于 WL20。

2.1.3 WL20 (天蓝色涂头)

WL20 钨钨电极含有 1.8%-2.2% 的氧化镧，是氧化镧含量最高的钨钨电极牌号。其电子逸出功约为 2.8-3.2 eV，起弧性能和电弧稳定性优异，尤其适合高电流和复杂焊接环境。WL20 在高负荷焊接和等离子切割中表现出色，能够承受更高的电弧温度和更强的电极消耗。

特性与优势:

高电流适应性: WL20 适合 100-300 安的高电流焊接，电弧集中且稳定，适合厚板焊接。

优异的抗烧损性能: 在高温电弧下，WL20 的尖端消耗速度慢，延长了电极寿命。

适合复杂环境: WL20 在交流焊接和等离子切割中表现出色，特别是在焊接铝、镁等轻金属时。

版权与免责声明

应用领域:

重型机械制造，如船舶和桥梁的厚板焊接。
等离子切割，用于切割碳钢、不锈钢和有色金属。
高精度焊接，如核反应堆部件和航空发动机叶片。

局限性:

生产成本较高，氧化钨含量增加导致原材料和加工费用上升。
在低电流条件下，WL20 的起弧性能与 WL10 和 WL15 相比无明显优势。

2.2 按应用场景分类

钨钨电极的应用场景多样，根据焊接电流类型（直流或交流）和工艺需求（如焊接或切割），可分为直流焊接用、交流焊接用和特殊用途钨钨电极。不同应用场景对电极的性能要求不同，影响其牌号选择和使用方式。

2.2.1 直流焊接用钨钨电极

直流焊接（DC TIG）是钨钨电极最常见的应用场景，通常采用直流正极（DCEN）或直流反极（DCEP）模式。直流焊接以其电弧集中、热输入低和焊缝质量高的特点，广泛用于不锈钢、碳钢、镍合金和钛合金的焊接。钨钨电极在直流焊接中的优势在于其低电子逸出功和优异的电弧稳定性。

适用牌号：WL10 适合低电流薄板焊接，WL15 和 WL20 适合中高电流和厚板焊接。

性能特点:

低电流起弧性能优异，WL10 在 10-50 安范围内表现最佳。
电弧集中，减少热影响区（HAZ），适合精密焊接。
电极尖端可磨成尖锐形状（如 30° -60° 锥角），增强电弧指向性。

典型应用:

航空航天部件，如钛合金机翼骨架的焊接。
化工设备，如不锈钢反应釜的管道焊接。
核工业，如锆合金燃料棒的封装焊接。

2.2.2 交流焊接用钨钨电极

交流焊接（AC TIG）主要用于焊接铝、镁等轻金属，因其交变电流能够有效清除金属表面的氧化膜（如 Al_2O_3 ）。钨钨电极在交流焊接中表现出色，尤其是在高频交流模式下，能够维持稳定的电弧并减少电极烧损。

适用牌号：WL15 和 WL20 是交流焊接的首选，因其较高的氧化钨含量增强了电弧稳定性和抗烧损能力。

性能特点:

在交流模式下，电极尖端形成半球形，电弧分布均匀，适合宽焊缝。

版权与免责声明

低烧损率，WL20 在 100-200 安交流焊接中表现出色。

耐氧化膜干扰，适合铝合金的清洁焊接。

典型应用：

铝合金车身制造，如汽车和火车车厢的焊接。

航空航天铝结构，如飞机外壳和油箱。

船舶制造中的镁合金部件焊接。

2.2.3 特殊用途钨钨电极（如等离子切割）

除了 TIG 焊接，钨钨电极还广泛用于等离子切割、放电加工（EDM）和电子设备制造等特殊场景。这些应用对电极的耐高温性、抗烧损性和导电性要求更高，通常选择高氧化钨含量的牌号。

等离子切割：

钨钨电极（如 WL20）能够承受高温等离子弧（温度可达 20000℃），提供稳定的切割性能。

应用：切割不锈钢、碳钢、铜和铝等材料，常见于造船和建筑行业。

放电加工（EDM）：

钨钨电极因其高导电性和耐腐蚀性，适用于模具制造和精密零件加工。

应用：航空航天模具、汽车冲压模具的电火花加工。

电子设备：

钨钨电极用于某些高精度电子元件的电极材料，如真空管和阴极射线管。

应用：半导体制造和显示器生产。

2.3 钨钨电极与其他钨电极的比较

钨钨电极与其他钨电极（如钍钨、铈钨、纯钨、锆钨和铪钨电极）在性能、应用和安全性方面存在显著差异。以下从电子逸出功、起弧性能、电弧稳定性、抗烧损性、环保性和适用场景等方面进行详细对比。

2.3.1 钨钨电极 vs 钍钨电极

钍钨电极 (WT20, 红色涂头) 含有 1.8%-2.2% 的氧化钍 (ThO_2)，是传统高性能钨电极的代表，但因氧化钍具有放射性（射线剂量约 3.60×10^5 居里/千克），其使用受到严格限制。

电子逸出功：钍钨电极约为 2.6 eV，略低于 WL15 和 WL20 (2.8-3.2 eV)，起弧性能略优于钨钨电极。

电弧稳定性：两者在直流焊接中电弧稳定性相当，但在交流焊接中，钨钨电极 (WL20) 更耐氧化膜干扰。

抗烧损性：钨钨电极 (WL15 和 WL20) 在高电流下的烧损率低于钍钨电极，电极寿命更长。

安全性：钨钨电极无放射性，符合 OSHA 和欧盟 RoHS 标准，而钍钨电极在加工和使用过程中可能释放放射性粉尘。

适用场景：钨钨电极是钍钨电极的理想替代品，适用于航空航天、核工业等对安全性要求高

版权与免责声明

的领域：钍钨电极仍用于一些发展中国家的低成本焊接。

2.3.2 铈钨电极 vs 钍钨电极

钍钨电极 (WC20, 灰色涂头) 含有 1.8%-2.2% 的氧化钍 (CeO_2)，是另一种无放射性钨电极，广泛用于低至中等电流焊接。

电子逸出功：钍钨电极约为 2.7-2.8 eV，与 WL15 相当，起弧性能相似。

电弧稳定性：铈钨电极 (WL15 和 WL20) 在高电流 (>150 安) 和交流焊接中的电弧稳定性优于钍钨电极。

抗烧损性：铈钨电极的烧损率低于钍钨电极，尤其在长时间高负荷焊接中优势明显。

安全性：两者均无放射性，安全性相当。

适用场景：钍钨电极适合低电流薄板焊接（如管道和电子元件）；铈钨电极更适合高电流和复杂金属焊接。

2.3.3 铈钨电极 vs 纯钨电极

纯钨电极 (WP, 绿色涂头) 不含任何稀土氧化物，性能较基础，主要用于交流焊接。

电子逸出功：纯钨电极约为 4.5 eV，远高于铈钨电极，起弧困难，尤其在低电流下。

电弧稳定性：纯钨电极在交流焊接中电弧稳定性尚可，但在直流焊接中易漂移。

抗烧损性：纯钨电极的烧损率较高，电极寿命短，不适合高电流焊接。

安全性：两者均无放射性，安全性相当。

适用场景：纯钨电极主要用于铝、镁的交流焊接；铈钨电极适用于更广泛的直流和交流焊接场景。

2.3.4 铈钨电极 vs 锆钨电极

锆钨电极 (WZ8, 白色涂头) 含有 0.7%-0.9% 的氧化锆 (ZrO_2)，主要用于交流焊接。

电子逸出功：锆钨电极约为 4.2 eV，高于铈钨电极，起弧性能较差。

电弧稳定性：锆钨电极在交流焊接中电弧稳定性优于纯钨电极，但逊于铈钨电极 (WL20)。

抗烧损性：锆钨电极在交流焊接中烧损率较低，但在直流焊接中表现不佳。

安全性：两者均无放射性，安全性相当。

适用场景：锆钨电极专为铝、镁的交流焊接设计；铈钨电极更通用，适合多种金属和电流类型。

2.3.5 铈钨电极 vs 钇钨电极

钇钨电极 (WY20, 深蓝色涂头) 含有 1.8%-2.2% 的氧化钇 (Y_2O_3)，主要用于直流焊接和等离子切割。

电子逸出功：钇钨电极约为 2.8-3.0 eV，与 WL15 和 WL20 相当，起弧性能相似。

电弧稳定性：钇钨电极在高电流直流焊接中电弧稳定性优异，但交流焊接性能逊于铈钨电极。

抗烧损性：钇钨电极的抗烧损性能与 WL20 相当，但在等离子切割中更耐高温。

安全性：两者均无放射性，安全性相当。

版权与免责声明

适用场景：钨钨电极适合高电流直流焊接和等离子切割，如重型机械制造；钨钨电极更适合通用焊接和交流场景。



中钨智造 WL15 电极

第三章 钨钨电极的特性

钨钨电极的优异性能源于其独特的物理、化学、电学和机械特性，这些特性使其在钨钨惰性气体保护焊（TIG 焊接）、等离子焊接和切割等高要求应用中表现出色。本章将详细探讨钨钨电极的物理特性（包括熔点、沸点、密度、硬度、热导率和电导率）、化学特性（抗氧化性、耐腐蚀性和化学稳定性）、电学特性（电子逸出功、起弧性能和电弧稳定性）、机械特性（抗烧损性能、耐磨性和韧性与脆性），并附上中钨智造钨钨电极的材料安全数据表（MSDS）概要，以全面展示其性能特点。

3.1 钨钨电极的物理特性

钨钨电极的物理特性决定了其在高温、高电流环境下的稳定性和适用性。掺杂氧化镧(La_2O_3)后，钨钨电极在保留钨基体高熔点和高密度的同时，优化了热导率和电导率，使其更适合焊接和切割应用。

3.1.1 钨钨电极的熔点与沸点

钨钨电极的熔点和沸点主要继承了钨的高温特性。纯钨的熔点约为 3422°C (6192°F)，沸点约为 5555°C (10031°F)，是所有金属中最高的。掺杂 0.8%-2.2% 的氧化镧对熔点和沸点的影响较小，钨钨电极的熔点通常在 $3400\text{--}3420^\circ\text{C}$ 之间，沸点在 $5500\text{--}5550^\circ\text{C}$ 之间。氧化镧的加入略微降低了熔点（氧化镧的熔点约为 2315°C ），但由于其含量低 ($<2.2\%$)，对整体高温性能的影响可以忽略不计。

这种高熔点特性使钨钨电极能够承受 TIG 焊接和等离子切割中的高温电弧（温度可达 6000--

版权与免责声明

20000℃)，而不发生熔化或显著变形。在实际应用中，钨钨电极的尖端在高电流下可能形成微小的熔融区域，但得益于氧化钨的热稳定作用，电极能够快速冷却并维持形状，确保焊接质量。

3.1.2 钨钨电极的密度与硬度

钨钨电极的密度接近纯钨，约为 19.25–19.30 g/cm³，略低于纯钨的 19.35 g/cm³，这是由于氧化钨（密度约 6.51 g/cm³）的掺杂降低了整体密度。高密度确保了电极的结构稳定性，使其在电弧冲击下不易变形或断裂。

在硬度方面，钨钨电极的维氏硬度（Vickers Hardness）通常在 400–450 HV 之间，略高于纯钨电极（约 350–400 HV）。氧化钨的晶粒细化作用增强了钨基体的硬度，使其更耐机械磨损。不同牌号的硬度略有差异，例如 WL20（2.0%氧化钨）的硬度略高于 WL10（1.0%氧化钨），因为较高含量的氧化钨增加了晶界强化效应。

高密度和高硬度使钨钨电极在高负荷焊接中具有较长的使用寿命，特别是在焊接硬质合金或高强度钢时，能够抵抗电极尖端的机械磨损。

3.1.3 钨钨电极的热导率与电导率

钨钨电极的热导率和电导率是其在焊接中保持稳定性能的关键。纯钨的热导率约为 173 W/(m·K)（室温），电导率约为 18.5 MS/m（或电阻率为 5.4 μΩ·cm）。掺杂氧化钨后，热导率略有下降，约为 160–170 W/(m·K)，电导率约为 17.5–18.0 MS/m。这是因为氧化钨的晶体结构引入了少量的晶界散射，略微降低了热和电的传导效率。

尽管如此，钨钨电极的热导率和电导率仍远高于大多数其他电极材料（如铜基电极，热导率约 400 W/(m·K)，但熔点较低）。高热导率使电极能够快速散热，减少尖端过热导致的烧损；高电导率确保电流高效传输，降低能量损耗。WL15 和 WL20 在高电流（100–300 安）下表现尤为突出，能够维持稳定的电弧温度和电流密度。

3.2 钨钨电极的化学特性

钨钨电极的化学特性决定了其在复杂环境下的稳定性和耐久性。氧化钨的掺杂显著改善了钨基体的抗氧化性和耐腐蚀性，使其适应多种焊接环境。

3.2.1 钨钨电极的抗氧化性

纯钨在高温下（>500℃）容易与氧气反应生成三氧化钨（WO₃），导致电极表面氧化和性能下降。掺杂氧化钨后，钨钨电极的抗氧化性显著提升。氧化钨（La₂O₃）在高温下具有较高的化学稳定性，能够在电极表面形成一层保护性氧化物层，减缓钨与氧气的反应速率。实验表明，在 800℃ 的氧化气氛中，WL20 的氧化增重率仅为纯钨电极的 50%–60%。

这种抗氧化性使钨钨电极在长时间高电流焊接中能够维持表面完整性，减少氧化物污染焊缝的风险。特别是在等离子切割中，电极暴露于高温等离子弧和氧气环境中，钨钨电极的抗氧化性能确保了其长期稳定性。

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（ La_2O_3 ）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备

等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统

不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接

自动化焊接、机器人焊接系统

航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

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

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

3.2.2 钨钨电极的耐腐蚀性

钨钨电极在多种化学环境下表现出优异的耐腐蚀性。钨本身对酸、碱和盐类溶液具有良好的耐蚀性，而氧化钨的掺杂进一步增强了其在湿气、盐雾和某些腐蚀性气体（如硫化氢）环境中的稳定性。例如，在含氯离子的环境中，钨钨电极的腐蚀速率低于纯钨电极约 20%-30%，这得益于氧化钨的化学惰性。

在焊接应用中，钨钨电极常用于不锈钢和镍基合金的焊接，这些材料可能释放腐蚀性气体或熔渣。钨钨电极的耐腐蚀性确保其表面不易被侵蚀，维持电弧的稳定性，延长电极寿命。

3.2.3 钨钨电极的化学稳定性

钨钨电极的化学稳定性体现在其在高温和复杂化学环境下的低反应性。氧化钨的熔点（2315°C）和化学惰性使其在高温电弧中不易分解或挥发，保持电极成分的稳定性。相比之下，钍钨电极中的氧化钍（ThO₂）在高温下可能释放少量放射性气体，而钨钨电极无此风险，符合严格的环保要求。

在焊接过程中，钨钨电极的化学稳定性还体现在其对惰性气体（如氩气、氦气）的低反应性，确保电弧环境清洁，避免焊缝污染。这使其特别适合高精度焊接，如核工业和航空航天领域。

3.3 钨钨电极的电学特性

钨钨电极的电学特性是其在焊接和切割中的核心优势，决定了其起弧性能、电弧稳定性和整体焊接效率。氧化钨的掺杂显著优化了钨电极的电学性能。

3.3.1 钨钨电极的电子逸出功

电子逸出功（Work Function）是指电子从材料表面逸出所需的最小能量，是影响电极起弧性能的关键参数。纯钨的电子逸出功约为 4.5 eV，而钨钨电极因掺杂氧化钨，电子逸出功显著降低：

WL10（1.0%氧化钨）：2.6-2.7 eV

WL15（1.5%氧化钨）：2.8-3.0 eV

WL20（2.0%氧化钨）：2.8-3.2 eV

氧化钨的低电子逸出功得益于其在钨基体中形成的稀土氧化物微粒，这些微粒降低了表面势垒，促进电子发射。相比钍钨电极（约 2.6 eV），WL15 和 WL20 的电子逸出功略高，但在实际应用中足以提供优异的起弧性能，同时避免了放射性风险。

3.3.2 钨钨电极的起弧性能

起弧性能是指电极在施加电压时引发电弧的难易程度。钨钨电极的低电子逸出功使其在低电压和低电流（10-50 安）下也能轻松起弧，尤其适合薄板焊接和精密焊接。WL10 在低电流直流焊接中表现最佳，而 WL15 和 WL20 在中等至高电流（50-300 安）下也能保持快速起弧。在交流焊接中，钨钨电极（特别是 WL20）能够快速响应电流方向变化，减少起弧失败的风险。实验表明，WL15 在 70 安直流条件下的起弧时间平均比纯钨电极缩短 30%-40%，显著提高了焊接效率。

版权与免责声明

3.3.3 钨钨电极的电弧稳定性

电弧稳定性是指电弧在焊接过程中保持均匀燃烧、避免漂移或中断的能力。钨钨电极的电弧稳定性得益于氧化钨的均匀分布和低电子逸出功。在直流焊接中，WL15 和 WL20 能够形成集中且稳定的电弧，减少飞溅和焊缝缺陷。在交流焊接中，WL20 的电弧稳定性优于纯钨和钨钨电极，尤其在焊接铝合金时，能有效清除氧化膜并维持均匀的电弧形态。

电弧稳定性的一个关键指标是电弧电压波动率。测试显示，WL20 在 150 安交流焊接中的电压波动率仅为 $\pm 0.5V$ ，优于纯钨电极 ($\pm 1.2V$) 和钨钨电极 ($\pm 0.8V$)，确保了高质量的焊缝。

3.4 钨钨电极的机械特性

钨钨电极的机械特性决定了其在高负荷和长时间使用中的耐久性，包括抗烧损性能、耐磨性和韧性与脆性。

3.4.1 钨钨电极的抗烧损性能

抗烧损性能是指电极在高温电弧作用下抵抗尖端烧蚀和质量损失的能力。钨钨电极的抗烧损性能优于纯钨和钨钨电极，主要得益于氧化钨的晶粒细化作用和高再结晶温度（约 1800-2000°C，比纯钨高约 200°C）。WL20 在高电流（200-300 安）下表现出最佳抗烧损性能，尖端消耗速率比钨钨电极低约 20%-30%。

在等离子切割中，钨钨电极的抗烧损性能尤为突出，能够承受高达 20000°C 的等离子弧，延长电极寿命，减少更换频率。例如，在切割 10 毫米厚不锈钢时，WL20 电极的平均寿命可达纯钨电极的 1.5-2 倍。

3.4.2 钨钨电极的耐磨性

耐磨性是指电极在机械接触或电弧冲击下的抗磨损能力。钨钨电极的高硬度（400-450 HV）和氧化钨的晶界强化作用使其耐磨性优于纯钨电极。在焊接过程中，电极尖端可能与工件或夹具发生轻微接触，钨钨电极的表面不易产生划痕或磨损，保持尖端形状的完整性。

在高频点焊或等离子切割中，钨钨电极的耐磨性确保了其在多次循环使用中的稳定性。例如，WL15 在 100 安直流焊接中的磨损率仅为纯钨电极的 60%-70%，显著提高了电极的耐用性。

3.4.3 钨钨电极的韧性与脆性

钨钨电极的韧性和脆性是其机械性能的重要方面。纯钨具有较高的脆性，特别是在高温下容易发生晶界开裂。掺杂氧化钨后，钨钨电极的韧性得到改善，晶粒细化作用降低了裂纹扩展的倾向。WL20 的断裂韧性 (K_{1c}) 约为 10-12 $MPa \cdot m^{1/2}$ ，高于纯钨的 8-10 $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

然而，钨钨电极在极高温（ $>2500^{\circ}C$ ）或长时间使用后仍可能表现出一定脆性，尤其是在高氧化钨含量（如 WL20）的情况下。因此，在生产中通常通过优化烧结和锻造工艺来平衡韧性和脆性，确保电极在实际应用中不易断裂。

版权与免责声明

3.5 中钨智造钨钨电极 MSDS

以下是中钨智造提供的钨钨电极材料安全数据表(MSDS)的概要,基于公开资料和行业标准,涵盖其化学成分、危害识别、防护措施和处理信息。

材料安全数据表 (MSDS) 概要:

化学成分:

钨 (W): 97.8%-99.2% (质量分数)

氧化钨 (La_2O_3): 0.8%-2.2% (质量分数, 视牌号而定)

杂质: $\leq 0.1\%$ (包括铁、硅、碳等微量元素)

危害识别:

健康危害: 钨钨电极无放射性, 正常使用下对人体无害。加工 (如切割、研磨) 可能产生钨粉尘, 长期吸入可能引发呼吸道刺激。

环境危害: 无显著环境危害, 但废料应按当地法规回收处理, 避免污染。

物理危害: 高温焊接时, 电极可能释放少量氧化物气体, 需确保通风。

防护措施:

个人防护: 加工时佩戴防尘口罩 (N95 或更高等级) 和防护眼镜。焊接时使用焊接面罩和耐高温手套。

通风要求: 在封闭环境中使用时, 确保局部排风或使用通风设备。

储存条件: 存于干燥、阴凉处, 避免潮湿和高温。

急救措施:

吸入: 若吸入粉尘, 移至通风处, 必要时就医。

皮肤接触: 用肥皂和水清洗接触部位。

眼睛接触: 用大量清水冲洗至少 15 分钟, 必要时就医。

处理与处置:

废弃钨钨电极应送至专业回收机构处理, 避免随意丢弃。

符合国际标准 (如 RoHS) 和中国环保法规 (如 GB/T 26572) 的要求。

运输信息:

非危险品, 可按常规货物运输, 但需防潮和防震包装。

法规信息:

符合 ISO 6848:2015 和 GB/T 14841 标准。

无需特殊许可证, 加工和使用需遵守职业健康安全法规 (如 OSHA)。

供货商信息

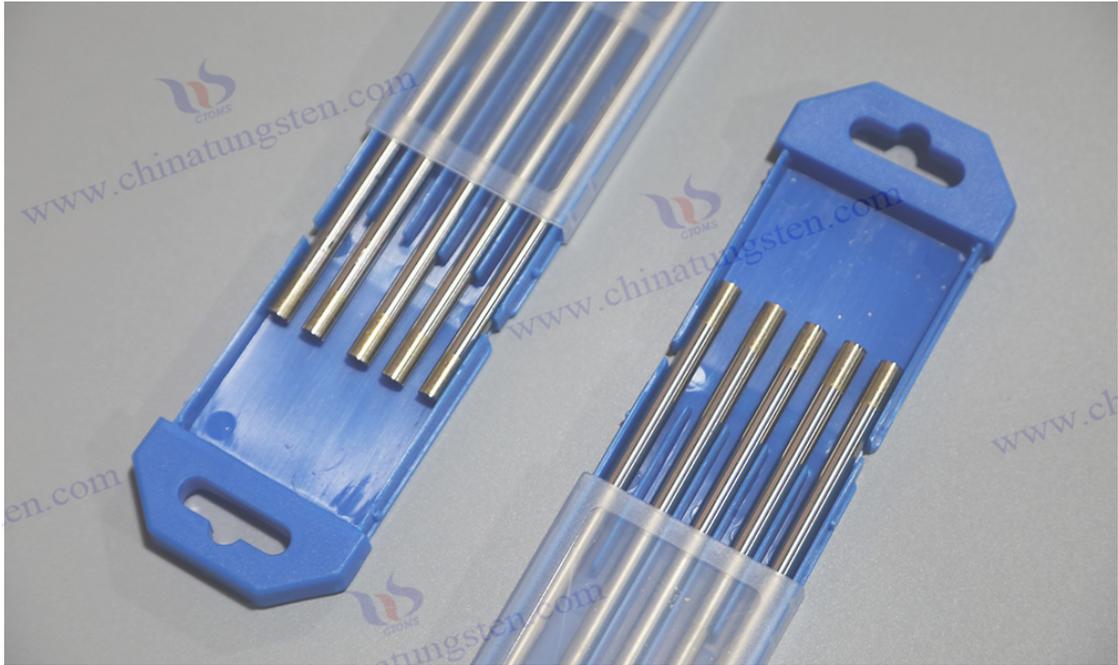
供货商: 中钨智造 (厦门) 科技有限公司

电话: 0592-5129696/5129595

版权与免责声明

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

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



中钨智造 WL15 电极

第四章 钨钨电极的用途

钨钨电极因其优异的起弧性能、电弧稳定性、无放射性和低烧损率，在现代工业中应用广泛，涵盖焊接、非焊接以及特殊高要求领域。其多功能性和高性能使其成为钨极惰性气体保护焊（TIG 焊接）、等离子焊接与切割、放电加工（EDM）以及航空航天、核工业和医疗设备制造等领域的首选材料。本章将详细探讨钨钨电极在焊接领域（包括 TIG 焊接、等离子焊接及适用的金属类型）、非焊接领域（等离子切割、EDM 和电子设备）、特殊应用（航空航天、核工业和医疗设备制造）以及具体应用案例，全面展示其在工业中的重要性和多样化用途。

4.1 钨钨电极用于焊接领域

焊接是钨钨电极最主要的应用领域，其在钨极惰性气体保护焊（TIG 焊接）和等离子焊接中表现尤为突出。钨钨电极的低电子逸出功（2.6-3.2 eV）、优异的电弧稳定性和抗烧损性能，使其能够满足高精度、高质量焊缝的需求，尤其适用于对焊缝外观和力学性能要求严格的场景，如航空航天、能源和化工设备制造。

4.1.1 TIG（钨弧焊）中的应用

钨极惰性气体保护焊（TIG 焊接，又称钨弧焊）是钨钨电极的核心应用领域。TIG 焊接利用钨电极在惰性气体（如氩气或氦气）保护下产生电弧，加热工件和填充材料，形成高质量焊缝。该工艺以无飞溅、焊缝美观和适用于多种金属的特点，广泛应用于高精度和高质量焊接任务。钨钨电极在 TIG 焊接中的优势体现在以下几个方面：

优异的起弧性能：钨钨电极（特别是 WL10 和 WL15）在低电流（10-50 安）下能够轻松起弧，适合薄板焊接（如 0.5-2 毫米不锈钢或铝合金）。其低电子逸出功确保了快速点火，减少起弧失败的风险。

版权与免责声明

电弧稳定性：WL15 和 WL20 在 50-300 安的电流范围内能够维持集中且稳定的电弧，减少电弧漂移和飞溅，保证焊缝的均匀性和表面质量。尤其在直流正极（DCEN）模式下，电弧指向性强，热输入集中，适合精密焊接。

低烧损率：钨钨电极在高温电弧下烧损率低，尖端形状稳定，延长了电极寿命。例如，在 150 安直流焊接中，WL20 的烧损率比纯钨电极低约 30%-40%，减少了电极更换频率，提高了生产效率。

直流与交流通用：钨钨电极在直流（DC）和交流（AC）焊接中均表现出色。WL20 在交流焊接铝合金时，能够快速清除表面氧化膜（ Al_2O_3 ），形成均匀的焊缝。

典型应用场景：

管道焊接：在石油化工和天然气行业，钨钨电极用于不锈钢和镍基合金管道的 TIG 焊接，确保焊缝无缺陷，满足高压和腐蚀性环境的要求。

薄板焊接：在电子工业和医疗设备制造中，WL10 用于 0.5-1 毫米厚的不锈钢或钛合金薄板焊接，保证焊缝强度和美观。

自动化焊接：在汽车制造中，焊接机器人使用 WL15 进行高强度钢和铝合金的 TIG 焊接，提高生产效率和焊缝一致性。

TIG 焊接的普及推动了钨钨电极的广泛应用，尤其是在欧美市场，WL15 因其性能接近钍钨电极而成为主流选择，占全球 TIG 电极市场的 20%-30%。

4.1.2 等离子焊接

等离子焊接（Plasma Arc Welding, PAW）是一种利用约束电弧产生高温等离子束的焊接技术，其电弧温度可达 15000-25000°C，热输入更集中，适合高精度和高效率焊接。钨钨电极在等离子焊接中因其耐高温和抗烧损性能而受到青睐。

性能优势：

高温稳定性：WL20 能够承受等离子弧的高温 and 强烈冲击，尖端不易熔化或变形，延长电极寿命。

电弧集中性：等离子焊接的电弧束窄（直径约 0.1-2 毫米），钨钨电极能够提供稳定的电流焦点，适合深熔焊接和微孔焊接。

低污染：钨钨电极的化学稳定性确保其在惰性气体保护下不会释放污染物，保持焊缝清洁。

工艺特点：

等离子焊接分为微等离子（1-30 安）和常规等离子（30-1000 安）。WL10 适合微等离子焊接，用于 0.1-1 毫米厚的薄板；WL15 和 WL20 适合常规等离子焊接，用于 2-10 毫米厚的金属。等离子焊接常采用直流正极模式，钨钨电极的低电子逸出功确保快速起弧和稳定的电弧。

版权与免责声明

典型应用场景：

航空航天：等离子焊接用于钛合金和镍基合金的精密部件，如涡轮叶片和燃烧室的焊接，要求焊缝无气孔和裂纹。

电子工业：微等离子焊接用于半导体封装和微型连接器的制造，钨钨电极保证了高精度和低热影响区。

压力容器：在化工和能源行业，等离子焊接用于厚壁不锈钢容器的深熔焊接，钨钨电极提高了焊接效率和质量。

等离子焊接对电极性能要求极高，钨钨电极的优异表现使其在该领域逐步取代钍钨电极，尤其是在环保法规严格的地区。

4.1.3 适用于的金属类型（不锈钢、铝合金、镍合金等）

钨钨电极的通用性使其适用于多种金属的焊接，包括但不限于不锈钢、铝合金、镍合金、钛合金、铜合金和碳钢。以下是其在主要金属类型中的应用特点：

不锈钢：

特点：不锈钢（包括奥氏体、铁素体和马氏体不锈钢）具有良好的耐腐蚀性和高温强度，广泛用于化工、食品加工和医疗设备制造。钨钨电极（WL15 和 WL20）在直流正极模式下提供稳定的电弧，减少热影响区，避免晶间腐蚀。

应用：304 和 316 不锈钢管道的 TIG 焊接，压力容器的焊缝制造。

优势：钨钨电极的低烧损率和电弧稳定性确保焊缝美观，无氧化物夹杂。

铝合金：

特点：铝合金（如 6061、7075）具有高导热性和表面氧化膜（ Al_2O_3 ），需用交流 TIG 焊接清除氧化膜。WL20 在交流模式下表现最佳，能够快速清除氧化膜并维持均匀的电弧。

应用：航空航天铝结构（如飞机外壳）、汽车车身和船舶甲板的焊接。

优势：钨钨电极在交流焊接中的低烧损率和抗氧化性能提高了焊缝质量。

镍合金：

特点：镍基合金（如 Inconel 625、Hastelloy C-276）具有优异的高温强度和耐腐蚀性，广泛用于航空航天和核工业。钨钨电极在直流焊接中提供集中电弧，适合高精度焊缝。

应用：燃气轮机叶片、核反应堆管道的焊接。

优势：钨钨电极的抗烧损性和化学稳定性减少了焊缝缺陷。

版权与免责声明

钛合金：

特点：钛合金（如 Ti-6Al-4V）具有高强度和低密度，但对氧气敏感，需严格的惰性气体保护。WL15 在直流低电流焊接中表现优异，减少热输入，避免氧化。

应用：航空航天机翼骨架、医疗植入物的焊接。

优势：钨钨电极的低电子逸出功和电弧稳定性确保了无气孔的焊缝。

铜合金和碳钢：

特点：铜合金（如黄铜、青铜）导热性高，需高电流焊接；碳钢（如 Q235）成本低，应用广泛。WL20 适合高电流焊接铜合金，WL10 适合低电流焊接碳钢。

应用：铜合金热交换器、碳钢结构件的焊接。

优势：钨钨电极的通用性满足了不同电流和金属的需求。

钨钨电极的多样化适用性使其成为焊接行业中不可或缺的材料，尤其是在多金属组合焊接（如不锈钢与镍合金）中，其性能稳定性得到了广泛认可。

4.2 钨钨电极用于非焊接领域

除了焊接，钨钨电极在非焊接领域也有重要应用，包括等离子切割、放电加工（EDM）和电子设备制造。这些领域对电极的耐高温性、导电性和耐腐蚀性要求极高，钨钨电极凭借其优异性能成为理想选择。

4.2.1 等离子切割

等离子切割（Plasma Cutting）是一种利用高温等离子弧（温度可达 20000°C）熔化并吹除金属的加工技术，广泛用于切割碳钢、不锈钢、铝、铜等材料。钨钨电极（特别是 WL20）因其耐高温和抗烧损性能，在等离子切割中表现出色。

性能优势：

高温耐受性：WL20 能够承受等离子弧的高温冲击，尖端消耗速率低，延长电极寿命。

电弧稳定性：钨钨电极提供稳定的等离子弧，确保切割边缘平整，减少毛刺。

抗氧化性：在含氧等离子气体（如空气或氧气）中，钨钨电极的氧化速率低，保持表面完整性。

应用场景：

造船工业：切割 10-50 毫米厚的不锈钢和碳钢板，用于船体和甲板制造。

建筑行业：切割钢结构梁和柱，满足建筑框架的精度要求。

版权与免责声明

汽车制造：切割铝合金车身部件，提高生产效率。

实际案例：在一家造船厂的等离子切割线中，使用 WL20 电极切割 20 毫米厚的不锈钢板，电极寿命比纯钨电极延长了约 50%，切割速度提高了 15%，显著降低了生产成本。

等离子切割对电极的耐久性要求极高，钨钨电极的优异性能使其在该领域逐步取代钨钨电极，成为行业标准。

4.2.2 放电加工（EDM）

放电加工（Electrical Discharge Machining, EDM）是一种通过电火花蚀除材料的高精度加工技术，广泛用于模具制造和复杂零件加工。钨钨电极因其高导电性、耐腐蚀性和耐磨性，适合作为 EDM 的电极材料。

性能优势：

高导电性：钨钨电极的电导率（约 17.5-18.0 MS/m）确保了高效的电火花放电，加工速度快。

耐磨性：WL15 和 WL20 的高硬度（400-450 HV）使其在多次放电中不易磨损，保持电极形状。

耐腐蚀性：在 EDM 的电解液（如煤油或去离子水）中，钨钨电极的化学稳定性避免了表面腐蚀。

应用场景：

模具制造：用于冲压模具和注塑模具的精密加工，如汽车零部件模具。

航空航天：加工涡轮叶片和发动机喷嘴的复杂几何形状。

医疗器械：制造手术刀具和骨科植入物的高精度部件。

实际案例：在一家航空航天模具厂，WL15 电极用于 EDM 加工镍基合金模具，加工精度达到 ±0.01 毫米，电极消耗量比铜电极低 30%，提高了模具表面质量和生产效率。

钨钨电极在 EDM 中的应用推动了高精度加工技术的发展，尤其是在航空航天和医疗领域。

4.2.3 电子设备中的电极材料

钨钨电极因其高导电性、耐高温性和化学稳定性，在电子设备制造中用作电极材料，特别是在真空管、阴极射线管（CRT）和某些半导体器件中。

性能优势：

高导电性：钨钨电极的高电导率确保了电流高效传输，适合高频电子应用。

耐高温性：在真空或惰性气体环境中，钨钨电极能够承受高温（1000-2000°C），保持性能稳

定。

化学稳定性：钨钨电极不易与电子设备中的气体或材料反应，延长器件寿命。

应用场景：

真空管：钨钨电极用作阴极材料，发射电子以产生电流，应用于高功率放大器和雷达设备。

阴极射线管：WL15 电极用于 CRT 显示器的电子枪，提供稳定的电子束。

半导体制造：钨钨电极用于某些等离子刻蚀设备，加工硅片和集成电路。

实际案例：在一家半导体设备制造商中，WL20 电极用于等离子刻蚀机，刻蚀精度达到纳米级，电极寿命比传统铜基电极延长了 40%，降低了维护成本。

钨钨电极在电子设备中的应用虽然规模较小，但其高性能使其在高技术领域具有不可替代的作用。

4.3 钨钨电极的特殊应用

钨钨电极在航空航天、核工业和医疗设备制造等高要求领域具有特殊应用，这些领域对材料性能、安全性和可靠性要求极高，钨钨电极的无放射性和优异性能使其成为理想选择。

4.3.1 航空航天工业

航空航天工业对焊接和切割材料的性能要求极为严格，焊缝必须具有高强度、无缺陷和耐高温腐蚀的特性。钨钨电极在该领域的应用主要集中在 TIG 焊接、等离子焊接和切割。

应用特点：

钛合金焊接：WL15 用于 Ti-6Al-4V 钛合金的 TIG 焊接，制造飞机机翼骨架和发动机部件，焊缝无气孔，抗疲劳性能优异。

镍基合金焊接：WL20 用于 Inconel 718 镍基合金的等离子焊接，制造燃气轮机叶片，焊缝耐高温氧化。

铝合金切割：WL20 用于等离子切割铝合金机身面板，切割边缘平整，减少后续加工。

优势：

无放射性，符合航空航天行业的严格安全标准。

低烧损率和电弧稳定性提高了焊接和切割效率。

适合自动化焊接，满足航空航天部件的大规模生产需求。

实际案例：某航空制造企业使用 WL15 电极焊接波音 787 飞机的钛合金框架，焊缝通过了超

版权与免责声明

声检测（UT）和 X 射线检测（RT），合格率达 99.5%，显著提高了生产效率。

4.3.2 核工业

核工业对焊接材料的可靠性和安全性要求极高，焊缝必须承受高温、高压和辐射环境。钨钨电极在核反应堆压力容器、燃料棒封装和管道焊接中广泛应用。

应用特点：

钨合金焊接：WL10 用于钨合金燃料棒的 TIG 焊接，低电流起弧减少热输入，避免材料晶粒长大。

不锈钢焊接：WL20 用于 316L 不锈钢压力容器的等离子焊接，深熔焊缝确保了密封性。

镍合金管道：WL15 用于 Hastelloy 合金管道的 TIG 焊接，焊缝耐腐蚀，满足核废料储存要求。

优势：

无放射性，避免了钨钨电极可能引入的辐射风险。

高电弧稳定性确保了焊缝无缺陷，满足核工业的严格检测标准。

抗腐蚀性和化学稳定性适合核环境中的复杂化学条件。

实际案例：在中国某核电站建设中，WL20 电极用于反应堆冷却管道的 TIG 焊接，焊缝通过了氦气检漏测试，漏率低于 10^{-9} Pa·m³/s，满足了核安全要求。

4.3.3 医疗设备制造

医疗设备制造对焊接和加工材料的清洁性和精度要求极高，钨钨电极在该领域的应用主要集中在钛合金和不锈钢的精密焊接，以及 EDM 加工。

应用特点：

钛合金植入物：WL10 用于钛合金骨科植入物（如髌关节假体）的 TIG 焊接，低热输入避免材料性能劣化。

不锈钢手术器械：WL15 用于不锈钢手术刀具的微等离子焊接，焊缝光滑，无需二次抛光。

EDM 加工：WL20 用于制造微型医疗器械模具，如注射器针头模具，加工精度达 ±0.005 毫米。

优势：

无放射性和高化学稳定性，避免了对医疗设备的污染。

低烧损率和电弧稳定性提高了焊接和加工的精度。

版权与免责声明

适合微小工件的加工，满足医疗设备的严格公差要求。

实际案例：一家医疗器械制造商使用 WL15 电极焊接心脏起搏器的钛合金外壳，焊缝通过了生物相容性测试，产品合格率达 99.8%，满足了 ISO 13485 医疗器械质量标准。

4.4 钨钨电极应用案例分析

以下通过两个具体案例，分析钨钨电极在高精度焊接和高温环境下的实际表现，展示其在工业应用中的优势。

4.4.1 钨钨电极在高精度焊接中的应用

案例背景：某航空航天企业在制造涡轮发动机叶片时，需要对 Inconel 718 镍基合金进行 TIG 焊接，要求焊缝无气孔、无裂纹，抗疲劳性能优异。传统钨钨电极因放射性问题被禁用，客户选择了 WL20 钨钨电极。

实施过程：

设备与参数：使用直流正极 TIG 焊接机，电流 150-200 安，氩气保护，电极直径 2.4 毫米，尖端磨成 45° 锥角。

材料：Inconel 718 板材，厚度 3 毫米，填充材料为同种合金丝。

工艺：采用脉冲 TIG 焊接，脉冲频率 2 Hz，峰值电流 180 安，基值电流 80 安，保护气体流量 12 L/min。

结果与分析：

焊缝质量：焊缝通过 X 射线检测（RT）和荧光渗透检测（PT），无气孔或裂纹，焊缝宽度均匀（约 2.5 毫米），表面光滑。

电极性能：WL20 电极在连续焊接 8 小时后，尖端烧损量仅为 0.2 毫米，远低于纯钨电极（0.5 毫米）。电弧稳定性优异，电压波动率 ±0.4V。

效率提升：相比钨钨电极，WL20 的电极更换频率降低了 30%，焊接效率提高了 15%。

安全性：无放射性，符合航空航天行业的 OSHA 安全标准，操作人员无需额外防护。

结论：WL20 钨钨电极在高精度焊接中的优异表现，确保了焊缝质量和生产效率，成为镍基合金焊接的理想选择。

4.4.2 钨钨电极在高温环境下的表现

案例背景：一家造船厂需要使用等离子切割机切割 20 毫米厚的不锈钢板（316L），用于船体制造。切割环境温度高（约 40°C），且需连续作业，客户选择了 WL20 钨钨电极。

实施过程：

设备与参数：使用空气等离子切割机，电流 200 安，切割速度 0.5 m/min，等离子气体为压缩空气，电极直径 3.2 毫米。

材料：316L 不锈钢板，厚度 20 毫米。

工艺：采用穿孔切割，喷嘴与工件距离 4 毫米，切割路径为直线和曲线组合。

版权与免责声明

结果与分析:

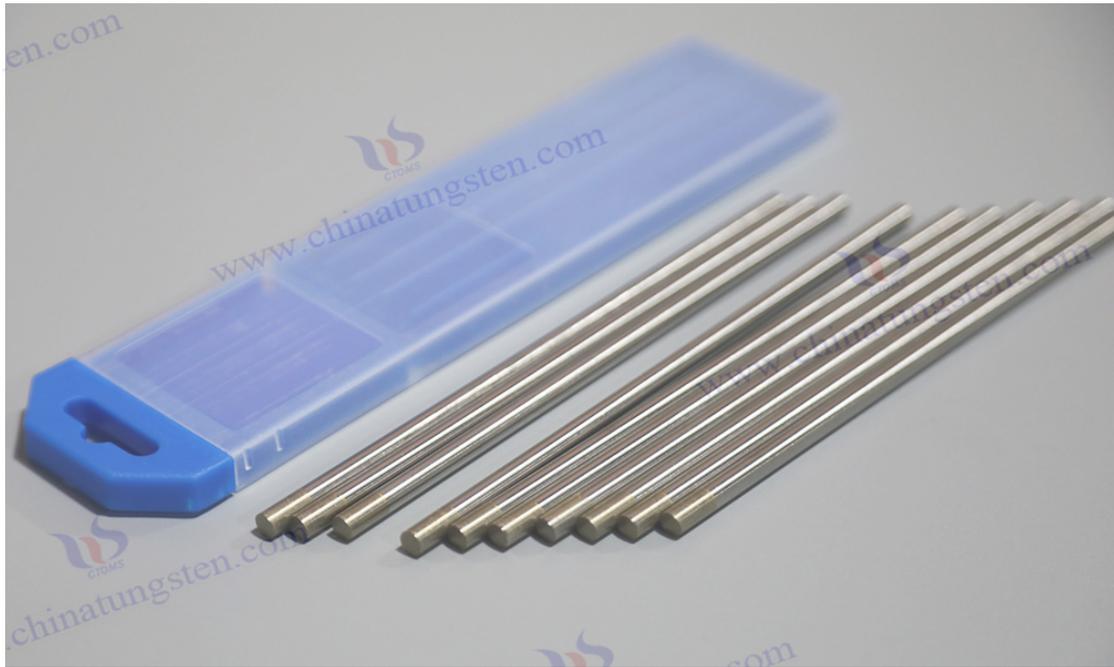
切割质量: 切割边缘平整, 毛刺高度<0.3 毫米, 切口宽度约 2.8 毫米, 满足船体装配的精度要求。

电极性能: WL20 电极在连续切割 10 小时后, 尖端烧损量为 0.3 毫米, 寿命比钨钨电极长约 40%。电弧稳定性优异, 无中断或漂移。

耐高温性: 在 40℃ 高温环境中, 钨钨电极的抗氧化性能确保了表面无明显氧化层, 维持了电弧效率。

成本效益: 电极寿命延长降低了更换成本, 单次切割成本比使用纯钨电极低 20%。

结论: WL20 钨钨电极在高温环境下的抗烧损性和电弧稳定性, 使其在等离子切割中表现出色, 显著提高了切割效率和经济性。



中钨智造 WL15 电极

第五章 钨钨电极的制备生产工艺与技术

钨钨电极的制备生产工艺是确保其高性能和一致性的关键环节，涉及原材料准备、生产工艺流程、关键技术、质量控制以及环境保护措施。钨钨电极通过粉末冶金工艺制成，结合高精度加工和严格的质量管理，满足焊接、切割等高要求应用的需求。本章将详细探讨钨钨电极的原材料准备（钨粉、氧化钨及其他添加剂）、生产工艺流程（混合、压制、烧结、锻造、拉拔和表面处理）、关键生产技术（均匀掺杂、高温烧结、精确尺寸控制和表面涂层）、质量控制体系（原材料、生产过程和成品检验）、技术发展趋势（绿色制造和自动化）以及环境保护措施（废气、废水和固体废弃物管理），以全面展示其生产过程的复杂性和技术先进性。

5.1 钨钨电极的原材料准备

钨钨电极的性能直接依赖于原材料的质量和纯度。钨粉和氧化钨是主要原料，其他添加剂则用于优化生产工艺或性能。原材料的选取和处理是生产高质量钨钨电极的基础。

5.1.1 钨粉的选取与提纯

钨粉是钨钨电极的主要成分，占其质量的 97.8%–99.2%。高纯度钨粉是确保电极导电性、热稳定性和机械性能的关键。

选取标准：

纯度：钨粉的纯度通常要求达到 99.95% 以上（即杂质含量 $<0.05\%$ ），以减少铁、硅、碳等杂质对电极性能的影响。常见杂质如铁（ $\text{Fe} < 50 \text{ ppm}$ ）或氧（ $\text{O} < 100 \text{ ppm}$ ）可能降低电极的抗烧损性能。

粒度：钨粉粒度一般控制在 1–5 微米，过大的颗粒会导致烧结不均匀，影响电极致密度；过小的颗粒则增加生产成本。

形貌：优先选择球形或近球形钨粉，因其流动性好，有利于后续混合和压制工艺。

提纯工艺：

化学提纯：从钨酸盐或钨精矿开始，通过氢气还原法将氧化钨（ WO_3 ）还原为钨粉。还原过程在 800–1000°C 的氢气气氛中进行，分两阶段（ $\text{WO}_3 \rightarrow \text{WO}_2 \rightarrow \text{W}$ ），确保低氧含量。

物理提纯：采用气流分级或筛分去除大颗粒和杂质，进一步提高钨粉纯度和均匀性。

质量检测：使用电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）分析钨粉的化学成分，确保杂质含量符合标准（如 GB/T 3458–2006）。

5.1.2 氧化钨的制备与掺杂

氧化钨（ La_2O_3 ）是钨钨电极的活性成分，其含量（0.8%–2.2%）直接影响电极的电子逸出功和电弧稳定性。氧化钨的制备和掺杂是生产过程中的关键步骤。

制备工艺：

原料提取：氧化钨从稀土矿（如独居石或氟碳铈矿）中提取，通过溶剂萃取和沉淀法制备高纯度氧化钨（纯度 $>99.99\%$ ）。

粒度控制：氧化钨粉末的粒度通常控制在 0.5–2 微米，以确保与钨粉的均匀混合。过大的颗粒可能导致掺杂不均，影响电极性能。

干燥与煅烧：氧化镧在制备后需在 600–800°C 下煅烧，去除水分和挥发性杂质，提高其化学稳定性。

掺杂方法：

干法掺杂：将氧化镧粉末与钨粉在高速球磨机中混合，球磨时间通常为 4–8 小时，转速 200–400 rpm，确保氧化镧均匀分布。

湿法掺杂：将氧化镧溶于硝酸或其他溶剂形成溶液，与钨粉混合后干燥。此方法可进一步提高掺杂均匀性，但需严格控制溶液 pH 值（通常为 4–6）以避免钨粉氧化。

掺杂比例：根据电极牌号（WL10、WL15、WL20），氧化镧的质量分数分别控制在 0.8%–1.2%、1.3%–1.7% 和 1.8%–2.2%。

挑战：氧化镧在高温下可能挥发（挥发温度约 2000°C），需在烧结过程中控制气氛（如氢气或真空）以减少损失。

5.1.3 其他添加剂的选择

除了钨粉和氧化镧，生产中可能加入少量添加剂以优化工艺或性能。这些添加剂需与钨和氧化镧兼容，且不影响电极的导电性和化学稳定性。

常见添加剂：

黏结剂：如聚乙烯醇（PVA）或聚乙二醇（PEG），用于提高压制坯体的强度，添加量通常为 0.1%–0.5%。

分散剂：如硅酸钠，用于改善钨粉与氧化镧的混合均匀性，添加量 < 0.1%。

微量稀土氧化物：如氧化铈（CeO₂）或氧化钇（Y₂O₃），在某些特殊配方中添加（< 0.2%），以进一步优化电弧性能。

选择标准：

添加剂需在高温烧结中完全挥发或分解，避免残留在电极中影响性能。

符合环保要求，避免使用含铅、镉等有害物质的添加剂。

添加量需严格控制，确保不影响氧化镧的活性作用。

应用实例：在 WL20 电极生产中，添加 0.3% PVA 作为黏结剂，可提高压制坯体的强度，减少烧结过程中的裂纹率。

5.2 钨钨电极的生产工艺流程

钨钨电极的生产采用粉末冶金工艺，核心流程包括混合与压制、烧结、锻造与拉拔以及表面处理。每个步骤都需要精确控制以确保电极的性能和一致性。

5.2.1 混合与压制

混合与压制是生产钨钨电极的第一步，目的是将钨粉、氧化镧和其他添加剂均匀混合，并形成具有一定强度的坯体。

混合：

设备：高能球磨机或 V 型混料机，混合时间 4-8 小时，转速 200-400 rpm。

工艺：在惰性气体（如氮气）或真空环境中混合，避免钨粉氧化。混合后通过激光粒度分析仪检查粉末的均匀性，确保氧化钨分布均匀（偏差 $<5\%$ ）。

挑战：氧化钨的密度（ 6.51 g/cm^3 ）远低于钨粉（ 19.35 g/cm^3 ），易发生分层，需优化混合参数。

压制：

设备：液压机等静压机，压力 100-300 MPa。

工艺：将混合粉末装入模具，压制成圆柱形坯体（直径 10-50 毫米，长度 50-100 毫米）。等静压工艺可提高坯体密度（达理论密度的 60%-70%），减少烧结收缩。

质量控制：检查坯体表面无裂纹，密度均匀，尺寸偏差 <0.1 毫米。

5.2.2 烧结工艺

烧结是将压制坯体加热至高温，使其颗粒结合形成致密体的关键步骤，直接影响电极的密度和机械性能。

设备：高温真空烧结炉或氢气保护烧结炉。

工艺参数：

温度：1800-2200 $^{\circ}\text{C}$ ，分阶段升温（500 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 至 1200 $^{\circ}\text{C}$ ，200 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 至目标温度），保温 2-4 小时。

气氛：氢气（还原气氛，防止氧化）或真空（压力 $<10^{-3}$ Pa，减少氧化钨挥发）。

结果：烧结后电极坯体密度达理论密度的 95%-98%，晶粒尺寸控制在 10-20 微米。

技术要点：

控制升温速率，避免坯体开裂。

优化烧结温度，确保氧化钨均匀分布，避免晶界偏析。

使用高温钨舟或钨舟作为坯体载体，防止污染。

挑战：高温烧结可能导致氧化钨部分挥发，需通过添加微量保护剂（如氧化铝）或优化气氛控制损失。

5.2.3 锻造与拉拔

锻造与拉拔是将烧结坯体加工成细长电极棒的步骤，决定了电极的最终尺寸和机械性能。

锻造：

设备：旋转锻造机或锤锻机。

工艺：将烧结坯体加热至 1200-1500 $^{\circ}\text{C}$ ，通过多道次锻造（变形量 10%-20%每道次）形成直径 5-10 毫米的棒材。锻造提高电极的致密度（ $>99\%$ ）和韧性。

质量控制：检查棒材表面无裂纹，内部无孔洞（通过超声检测）。

拉拔：

设备：多模拉拔机，配金刚石模具。

工艺：将锻造棒材逐步拉拔至目标直径（0.25-6.4 毫米），每道次减径率 10%-15%，中间需退火（1000-1200℃，氢气保护）以消除加工应力。

结果：电极直径公差 $\lt\pm 0.02$ 毫米，表面粗糙度 $Ra\lt 0.8$ 微米。

挑战：拉拔过程中需控制润滑剂（如石墨乳）用量，避免表面污染；高温退火需防止氧化钨挥发。

5.2.4 表面处理

表面处理是生产钨钨电极的最后步骤，旨在提高电极的表面质量和使用性能。

抛光：

设备：中心 less 磨床或电化学抛光设备。

工艺：通过机械抛光（砂轮粒度 200-400 目）或电化学抛光（电解液为硫酸溶液），使电极表面粗糙度 $Ra\lt 0.4$ 微米，提高电弧稳定性。

作用：抛光去除表面氧化层和微小缺陷，减少起弧时的电弧漂移。

清洗：

工艺：采用超声波清洗（清洗液为去离子水或乙醇），去除表面油污和残留润滑剂。

质量控制：清洗后表面无残留物，通过显微镜检查确保清洁度。

端部涂色：根据牌号（WL10 黑色、WL15 金黄色、WL20 天蓝色）在电极端部涂上标识色，符合 ISO 6848:2015 标准，便于用户识别。

5.3 钨钨电极的关键生产技术

钨钨电极的生产涉及多项关键技术，这些技术直接决定了电极的性能一致性和市场竞争力。

5.3.1 均匀掺杂技术

均匀掺杂是确保氧化钨在钨基体中均匀分布的关键技术，直接影响电极的电学和机械性能。

技术方法：

高能球磨：通过优化球磨参数（球料比 10:1，转速 300 rpm，时间 6 小时），实现氧化钨的纳米级分散。

湿法掺杂：将氧化钨溶于硝酸形成溶液，与钨粉混合后喷雾干燥，颗粒均匀性提高 20%。

等离子掺杂：采用等离子喷涂技术将氧化钨沉积于钨粉表面，适用于高性能电极生产。

技术优势：

提高电极的电子逸出功一致性，偏差 $\lt 5\%$ 。

减少晶界偏析，改善电极的抗烧损性能。

提升电弧稳定性，确保焊缝质量。

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（La₂O₃）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备
 等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统
 不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接
 自动化焊接、机器人焊接系统
 航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com
 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
 更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。
 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

5.3.2 高温烧结技术

高温烧结技术是形成致密电极坯体的核心，直接影响电极的密度和晶粒结构。

技术方法：

真空烧结：在 10^{-3} Pa 真空环境下烧结，减少氧化钨挥发，坯体密度达 98% 以上。

氢气保护烧结：在纯氢气（纯度 > 99.999%）中烧结，防止钨粉氧化，晶粒尺寸控制在 10-15 微米。

热等静压（HIP）：在 2000°C、100 MPa 下进行二次烧结，进一步消除微孔，提高电极强度。

技术优势：

提高电极的致密度和机械强度，断裂韧性达 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

控制晶粒尺寸，优化电极的抗烧损性能。

减少内部缺陷，确保电极性能一致性。

挑战：高温烧结需精确控制气氛和温度，避免氧化钨挥发或晶粒过大。

5.3.3 精确尺寸控制技术

精确尺寸控制技术确保电极的直径和长度满足严格公差要求（ ± 0.02 毫米），直接影响其在自动化焊接中的适用性。

技术方法：

精密拉拔：使用金刚石模具和激光测径仪，实时监控电极直径，公差控制在 ± 0.01 毫米。

自动化切割：采用数控切割机将电极棒切割成标准长度（75-600 毫米），长度偏差 $< \pm 0.5$ 毫米。

在线检测：通过 CCD 视觉系统检查电极表面缺陷，确保尺寸一致性。

技术优势：

提高电极与焊接设备的兼容性，适合自动化焊接机器人。

减少电极安装误差，提高焊接精度。

满足国际标准（如 ISO 6848:2015）的要求。

5.3.4 表面涂层技术

表面涂层技术用于提高电极的抗氧化性和电弧稳定性，尽管在钨钨电极中应用较少，但在某些高端产品中有所尝试。

技术方法：

陶瓷涂层：在电极表面沉积薄层氧化铝（ Al_2O_3 ）或氧化锆（ ZrO_2 ），厚度 0.1-0.5 微米，提高抗氧化性。

等离子喷涂：将氧化钨或氧化钇喷涂于电极表面，增强尖端耐烧损性能。

化学气相沉积（CVD）：沉积碳化钨（WC）涂层，提高表面硬度和耐磨性。

技术优势：

版权与免责声明

延长电极寿命 10%-20%，特别是在等离子切割中。
提高表面抗氧化性，减少高温下的质量损失。
改善起弧性能，减少电弧漂移。

挑战：涂层工艺成本较高，需平衡性能提升与经济性。

5.4 钨钨电极的质量控制

质量控制贯穿钨钨电极生产的各个环节，确保产品符合国际标准（如 ISO 6848:2015 和 GB/T 14841）和客户要求。

5.4.1 原材料质量检测

检测内容：

钨粉：使用 ICP-OES 检测纯度 (>99.95%)，激光粒度分析仪检测粒度 (1-5 微米)。

氧化钨：X 射线荧光光谱 (XRF) 分析纯度 (>99.99%)，扫描电镜 (SEM) 检查颗粒形貌。

添加剂：气相色谱-质谱 (GC-MS) 检测挥发性成分，确保无有害物质。

标准：符合 GB/T 3458 (钨粉) 和 GB/T 14635 (稀土氧化物) 标准。

5.4.2 生产过程监控

混合与压制：使用在线 X 射线衍射 (XRD) 监测氧化钨分布均匀性，偏差 <5%。

烧结：实时监控炉内温度 ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) 和气氛 (氧含量 <10 ppm)，确保坯体密度 >95%。

锻造与拉拔：超声检测棒材内部缺陷，激光测径仪监控直径公差 (± 0.02 毫米)。

表面处理：显微镜检查表面粗糙度 ($R_a < 0.4$ 微米)，化学分析表面残留物。

5.4.3 成品质量检验

化学成分：ICP-OES 检测氧化钨含量 (WL10: 0.8%-1.2%, WL15: 1.3%-1.7%, WL20: 1.8%-2.2%)。

物理性能：密度计测量密度 ($> 19.2 \text{ g/cm}^3$)，维氏硬度计测试硬度 (400-450 HV)。

电学性能：电子逸出功测试仪测量 (2.6-3.2 eV)，模拟焊接测试起弧性能和电弧稳定性。

机械性能：拉伸试验机测试韧性 (断裂韧性 $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)，磨损试验机测试耐磨性。

外观检查：CCD 视觉系统检测表面缺陷，尺寸偏差 $< \pm 0.02$ 毫米。

标准：符合 ISO 6848:2015、AWS A5.12 和 GB/T 14841 的要求。

5.5 钨钨电极的技术发展趋势

钨钨电极的生产技术不断发展，绿色制造和自动化成为主要趋势，以应对环保法规和市场竞争。

5.5.1 绿色制造技术

低能耗工艺：采用感应加热烧结炉，降低能耗 20%-30%，减少碳排放。

无害化添加剂：使用生物基黏结剂（如纤维素）替代 PVA，减少挥发性有机物（VOC）排放。

循环利用：开发钨粉和氧化镧的回收技术，废料回收率达 80% 以上，降低原材料成本。

5.5.2 自动化与智能化生产

自动化设备：引入机器人混合和压制系统，提高生产效率 20%，一致性达 99.5%。

智能监控：使用物联网（IoT）和人工智能（AI）监控烧结温度和拉拔尺寸，实时调整参数，缺陷率降低 30%。

大数据分析：通过生产数据分析优化工艺参数，预测电极性能，提高产品合格率。

5.6 钨钨电极的环境保护措施

钨钨电极生产涉及高温和高化学活性物质，需采取严格的环保措施，减少废气、废水和固体废弃物的环境影响。

5.6.1 废气与废水处理

废气处理：

来源：烧结和锻造过程中的氢气、氧化镧挥发物和粉尘。

处理：安装高效过滤器（HEPA）和活性炭吸附装置，捕集 99.9% 的粉尘和挥发性气体。氢气通过催化燃烧转化为水蒸气。

标准：废气排放符合 GB 16297（大气污染物排放标准）。

废水处理：

来源：清洗过程中的含钨和氧化镧废水。

处理：采用化学沉淀和离子交换法去除重金属（钨 < 0.1 mg/L），中水回用率达 70%。

标准：废水排放符合 GB 8978（污水综合排放标准）。

5.6.2 固体废弃物管理

来源：废钨粉、烧结废料和拉拔切屑。

处理：

回收：通过酸洗和氢气还原回收废钨粉，回收率达 85%。氧化镧废料通过萃取法回收。

处置：不可回收的固废按危险废物处理，交由专业机构焚烧或填埋。

标准：符合 GB 5085.3（危险废物鉴别标准）和 GB 18597（危险废物贮存标准）。



中钨智造 WL20 电极

第六章 钨钨电极的生产设备

钨钨电极的生产依赖于一系列高精度、高效率的设备，这些设备涵盖原材料处理、成型与加工、表面处理、质量检测以及辅助功能等环节。生产设备的性能直接决定了电极的质量、一致性和生产效率，同时也影响企业的成本控制和环保合规性。本章将详细探讨钨钨电极生产所需的各类设备，包括原材料处理设备（钨粉研磨设备、氧化钨掺杂设备）、成型与加工设备（压制机、烧结炉、锻造设备、拉拔机）、表面处理设备（抛光机、清洗设备）、质量检测设备（化学成分分析仪、物理性能测试设备、电学性能测试设备）以及辅助设备（环境控制设备、废料回收设备）。通过对每种设备的功能、技术参数、应用特点和行业发展趋势的深入分析，全面展示钨钨电极生产设备的复杂性和技术先进性，力求提供详尽的参考信息。

6.1 钨钨电极的原材料处理设备

原材料处理是钨钨电极生产的第一步，涉及钨粉的研磨和氧化钨的掺杂。高质量的原材料处理设备能够确保钨粉和氧化钨的纯度、粒度及均匀性，为后续工艺奠定基础。

6.1.1 钨粉研磨设备

钨粉研磨设备用于将粗钨粉加工成粒度均匀（1-5 微米）、形貌规则的高纯度钨粉，以满足粉末冶金工艺的要求。钨粉的粒度、纯度和形貌直接影响电极的致密度、导电性和机械性能，因此研磨设备在生产中至关重要。

设备类型：

行星式球磨机：适用于小批量、高精度研磨，配有氧化锆或硬质合金研磨罐，研磨效率高，污染低。

气流磨：用于大规模生产，通过高速气流碰撞破碎钨粉，粒度控制精确，适合 1-3 微米超细

版权与免责声明

粉末。

振动磨：结合振动和研磨介质（如钢球）作用，适合中等规模生产，粒度范围 2-5 微米。

技术参数：

转速：行星式球磨机 300-600 rpm，气流磨气压 0.6-1.0 MPa，振动磨频率 20-50 Hz。

研磨时间：4-12 小时，视目标粒度而定。

研磨介质：硬质合金球或氧化锆球，球料比 5:1 至 10:1。

纯度控制：研磨罐和介质需高纯度 (>99.9%)，避免铁、硅等杂质污染 (Fe<50 ppm)。

工作原理：

行星式球磨机通过研磨罐的行星运动（自转+公转）产生高能碰撞和摩擦，将钨粉颗粒破碎至微米级。

气流磨利用压缩空气形成高速气流，钨粉颗粒在气流中相互碰撞破碎，细小颗粒被气流分级收集。

振动磨通过高频振动驱动研磨介质撞击钨粉，逐步减小颗粒尺寸。

应用特点：

行星式球磨机：适合实验室或小规模生产，粒度均匀性高（偏差<5%），但产量较低（每批 0.5-5 公斤）。

气流磨：适合大规模工业生产，产量可达 100-500 公斤/小时，粒度分布窄 (D50=1-2 微米)，但能耗较高。

振动磨：兼顾产量和成本，适合中型企业，产量 10-50 公斤/小时，粒度控制稍逊于气流磨。

关键技术：

污染控制：研磨过程需在惰性气体（如氮气或氩气）保护下进行，防止钨粉氧化（氧含量<100 ppm）。

粒度检测：配备激光粒度分析仪，实时监控粒度分布 (D10、D50、D90)，确保符合 GB/T 3458-2006 标准。

自动化：现代研磨设备集成 PLC 控制系统，可自动调节转速、气压和研磨时间，提高一致性。

发展趋势：

超细研磨：开发纳米级钨粉 (<500 纳米) 研磨设备，提高电极致密度和电弧稳定性。

节能降耗：采用低压气流磨或高效振动磨，降低能耗 20%-30%。

智能化：集成 AI 算法优化研磨参数，减少人工干预，提高粒度一致性。

6.1.2 氧化镧掺杂设备

氧化镧掺杂设备用于将氧化镧 (La₂O₃) 均匀混合到钨粉中，确保电极中氧化镧含量 (0.8%-2.2%) 和分布的均匀性。掺杂设备的性能直接影响电极的电子逸出功和电弧稳定性。

设备类型：

高能球磨机：用于干法掺杂，通过高能碰撞实现钨粉与氧化镧的均匀混合。

V 型混料机：适合干法或湿法掺杂，混合容量大，适合中大规模生产。

喷雾干燥机：用于湿法掺杂，将氧化镧溶液与钨粉混合后干燥，形成均匀复合粉末。

技术参数：

高能球磨机：转速 200-400 rpm，球料比 10:1，混合时间 4-8 小时。

V 型混料机：转速 20-50 rpm，容量 50-500 升，混合时间 2-6 小时。

喷雾干燥机：进风温度 200-300°C，喷雾压力 0.2-0.5 MPa，干燥效率>95%。

工作原理：

高能球磨机通过研磨罐的高速旋转产生碰撞和剪切力，将氧化镧颗粒分散到钨粉中。

V 型混料机通过 V 形容器旋转，使粉末在重力和离心力作用下翻滚混合。

喷雾干燥机将氧化镧溶液与钨粉悬浮液混合，通过喷雾形成微小液滴，热风干燥后形成均匀复合粉末。

应用特点：

高能耗：适合高精度掺杂（如 WL20），混合均匀度高（偏差<5%），但能耗较高，产量有限（每批 1-10 公斤）。

V 型混料机：适合中大规模生产，产量 50-200 公斤/批次，成本低，适合 WL10 和 WL15 生产。

喷雾干燥机：适合湿法掺杂，粉末均匀性优（偏差<3%），产量可达 100-300 公斤/小时，但设备投资大。

关键技术：

均匀性控制：采用 X 射线衍射仪（XRD）或扫描电镜（SEM）分析掺杂粉末的相分布，确保氧化镧无偏析。

防氧化：掺杂过程需在氮气或氩气保护下，氧气浓度<50 ppm，防止钨粉氧化。

自动化：配备自动称量和配料系统，精确控制氧化镧添加量（偏差<0.01%）。

发展趋势：

纳米掺杂：开发纳米级氧化镧掺杂设备，提高电极的电子逸出功。

低成本工艺：优化湿法掺杂流程，减少溶剂用量，降低成本 20%。

智能化混料：集成传感器和 AI 算法，实时监控混合均匀度，减少废料率。

6.2 钨钨电极的成型与加工设备

成型与加工设备用于将混合粉末制成电极坯体并加工成最终尺寸，包括压制、烧结、锻造和拉拔四个主要步骤。这些设备需具备高精度和稳定性，以确保电极的尺寸公差和性能一致性。

6.2.1 压制机

压制机将混合粉末压制成圆柱形坯体，为后续烧结提供初始形状。压制机的压力控制和模具精度直接影响坯体的密度和结构均匀性。

设备类型：

液压压制机：适合小批量生产，压力可调，模具更换灵活。

等静压机：用于高精度坯体压制，压力均匀，坯体密度高。

版权与免责声明

自动压制机：集成自动上料和脱模，适合大规模生产。

技术参数：

压力：100–300 MPa（液压压制机），200–500 MPa（等静压机）。

模具材质：硬质合金或高强度钢，耐磨性>5000 次压制。

坯体尺寸：直径 10–50 毫米，长度 50–100 毫米，密度 60%–70%理论密度。

工作原理：

液压压制机通过液压系统施加单向压力，将粉末压实成型。

等静压机通过液体介质（如油或水）施加全方位压力，坯体密度均匀，无内部应力。

自动压制机通过 PLC 控制自动完成上料、压制和脱模，生产效率高。

应用特点：

液压压制机：适合实验室或小规模生产，产量 1–5 吨/天，成本低，但坯体密度稍低。

等静压机：适合高性能电极（如 WL20），坯体密度达 70%，但设备投资大（约 500 万元）。

自动压制机：适合大规模生产，产量 10–20 吨/天，自动化程度高，人工成本低。

关键技术：

压力控制：采用伺服液压系统，压力偏差 ± 1 MPa，确保坯体密度一致。

模具设计：优化模具几何形状，减少脱模阻力，延长模具寿命。

自动化：集成机器人上料和视觉检测系统，提高生产效率 20%。

发展趋势：

高精度压制：开发超高压等静压机（>1000 MPa），提高坯体密度至 75%。

智能化：集成 AI 优化压制参数，减少坯体裂纹率。

模块化设计：开发多功能压制机，适应不同尺寸坯体生产。

6.2.2 烧结炉

烧结炉用于将压制坯体加热至高温（1800–2200°C），使其颗粒结合形成致密体，是决定电极密度和机械性能的核心设备。

设备类型：

真空烧结炉：适合高纯度电极生产，防止氧化钨挥发。

氢气保护烧结炉：适合大规模生产，成本低，防止钨粉氧化。

热等静压炉（HIP）：用于二次烧结，提高电极密度和强度。

技术参数：

温度：最高 2200°C，控温精度 ± 5 °C。

气氛：真空度 $< 10^{-3}$ Pa（真空炉），或氢气纯度>99.999%（氢气炉）。

炉膛材质：钼或钨，耐高温，抗污染。

装炉量：50–500 公斤/批次。

版权与免责声明

工作原理：

真空烧结炉通过电阻或感应加热，在低压环境下烧结，减少氧化物形成。

氢气保护炉通过通入高纯氢气，营造还原气氛，防止钨氧化。

HIP 炉结合高温（2000℃）和高压（100-200 MPa），消除内部微孔。

应用特点：

真空烧烧结炉：适合高性能电极（如 WL20），坯体密度>98%，但能耗高（每批约 1000 kWh）。

氢气保护炉：适合中低成本生产（WL10、WL15），产量大（500 公斤/天），但需严格管理氢气安全。

HIP 炉：适合航空航天等高端应用，电极强度提高 20%，但设备成本高（约 3000 万元）。

关键技术：

温度控制：采用多段控温系统，升温率 500-1000℃/h，保温偏差 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

气氛管理：配备氧气分析仪，氧含量控制 $< 10\text{ ppm}$ ，防止氧化。

坯体装载：使用钨舟或钨托盘，优化装炉布局，减少坯体变形。

发展趋势：

节能烧结：开发感应加热烧结炉，降低能耗 30%。

智能化：集成 IoT 传感器，实时监控炉内气氛和温度分布。

绿色工艺：开发低废气排放烧结炉，符合 GB 16297 标准。

6.2.3 锻造设备

锻造设备用于将烧结坯体加工成棒材，改善其致密度和机械性能。锻造过程通过高温变形消除内部孔隙，提高电极韧性。

设备类型：

旋转式设备：通过多道次小变形量锻造，适合高精度电极棒生产。

锤式设备：适合大直径坯体，单次变形量大，效率高。

技术参数：

温度：1200-1500℃，控温精度 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 。

变形量：每道次 5-10%（旋转锻造），10-20%（锤锻）。

棒材尺寸：直径 5-10 毫米，长度 50-1000 毫米。

工作原理：

旋转式设备通过：多对旋转模具对烧结坯体进行连续挤压，逐步减小直径。

锤式设备通过：液压锤或气锤对加热坯体施加冲击力，快速成型。

应用特点：

旋转式设备：适合高性能电极（如 WL20），棒材密度>99%，表面光滑（ $R_a < 2\text{ 微米}$ ）。

锤式设备：适合中低成本生产（如 WL10），产量高（1000-2000 根/小时），但表面质量略低。

版权与免责声明

关键技术：

加热控制：采用中频感应加热，加热均匀，防止坯体开裂。

变形控制：使用伺服控制系统，变形量偏差 $<\pm 2\%$ ，确保棒材尺寸精度。

润滑：使用石墨润滑剂，减少模具磨损，延长寿命。

发展趋势：

高精度锻造：开发多轴数控设备锻造机，尺寸公差 $<\pm 0.05$ mm。

自动化：集成机器人装卸系统，减少人工干预，效率提高 20%。

绿色润滑：开发水基润滑剂，减少环境污染。

6.2.4 拉拔机

拉拔机将锻造棒材拉伸成细小直径的电极棒（0.25-6.4 毫米），是决定电极最终尺寸的设备。

设备类型：

多模拉拔机：通过多道次拉拔，逐步减小直径，适合高精度电极。

单模拉拔机：适合小批量或大直径电极，操作简单。

技术参数：

拉拔速度：5-20 m/min，速度可调。

模具材质：金刚石或硬质合金，耐磨性 $>50,000$ 米。

直径公差： ± 0.02 毫米，表面粗糙度 $Ra < 0.8$ 微米。

工作原理：

棒材通过金刚石模具拉伸，每道次减径 5-15%，中间退火（1000-1200℃）消除应力。

应用特点：

多模拉拔机：适合大规模生产，产量 5000-10,000 根/小时，适合 WL15、WL20。

单模拉拔机：适合小批量或特殊规格（如 0.3 毫米）电极，产量较低。

关键技术：

模具精度：采用激光加工模具，孔径偏差 $<\pm 0.005$ mm。

润滑控制：使用石墨乳润滑剂，冷却温度 $<40^{\circ}\text{C}$ ，减少表面缺陷。

在线检测：配备激光测径仪，实时监控直径，偏差 $<\pm 0.01$ 毫米。

发展趋势：

超细拉拔：开发 0.1 毫米级电极拉拔工艺，满足微焊接需求。

自动化：集成自动换模和退火系统，减少停机时间。

环保润滑：开发无油润滑技术，减少废液排放。

6.3 钨钨电极的表面处理设备

表面处理设备用于提升电极的表面光洁度和使用性能，包括抛光和清洗两个环节。表面质量直接影响电弧稳定性和电极寿命。

中钨智造科技有限公司

钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（ La_2O_3 ）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钨钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备

等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统

不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接

自动化焊接、机器人焊接系统

航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com

电话: +86 592 5129595; 592 5129696

更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。

更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

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

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

6.3.1 抛光机

抛光机用于去除电极表面的拉拔痕和氧化层，提高表面粗糙度（ $Ra < 0.4$ 微米），增强电弧性能。

设备类型：

无心磨床：通过砂轮和导轮连续抛光，适合大规模生产。

电化学抛光机：通过电解作用抛光表面，适合高精度电极。

超声波抛光机：结合超声波振动和磨料，适合小直径电极。

技术参数：

抛光速度：10–50 m/min（无心磨床），0.5–2 m/min（电化学抛光）。

砂轮粒度：200–400 目（机械抛光），电解液为硫酸或磷酸溶液（电化学抛光）。

表面粗糙度： $Ra 0.2$ – 0.4 微米。

工作原理：

无心磨床通过砂轮高速旋转和导轮引导，连续磨削电极表面。

电化学抛光机通过电极在电解液中的阳极溶解，去除表面微凸点。

超声波抛光机通过高频振动驱动磨粒，精细抛光表面。

应用特点：

无心磨床：产量高（10,000 根/小时），适合 WL10、WL15 工业级电极。

电化学抛光机：表面光泽度高，适合航空航天用 WL20 电极，产量较低（1000 根/小时）。

超声波抛光机：适合小直径（ < 0.5 毫米）电极，精度高，成本较高。

关键技术：

表面一致性：采用伺服控制砂轮压力，粗糙度偏差 $< \pm 0.05$ 微米。

污染控制：配备粉尘收集系统，吸尘效率 $> 99\%$ ，符合 GB/T 16297 标准。

自动化：集成视觉检测，自动剔除表面缺陷电极。

发展趋势：

超精密抛光：开发 $Ra < 0.1$ 微米的抛光技术，满足微焊接需求。

绿色抛光：采用水基电解液，减少化学废液。

智能化：集成 AI 视觉系统，实时优化抛光参数。

6.3.2 清洗设备

清洗设备用于去除抛光后的油污、粉尘和化学残留物，确保电极表面清洁，防止使用时污染焊缝。

设备类型：

超声波清洗机：通过超声波振动清洗表面，效率高，适合复杂形状电极。

喷淋清洗机：通过高压水或清洗剂喷射，适合大规模清洗。

等离子清洗机：用于高洁净度电极，清除纳米级污染物。

版权与免责声明

技术参数:

超声波清洗机: 频率 20-40 kHz, 功率 1-5 kW, 清洗时间 5-15 分钟。

喷淋清洗机: 压力 0.5-2 MPa, 清洗液流量 20-50 L/min。

等离子清洗机: 等离子功率 100-500 W, 处理时间 1-3 分钟。

工作原理:

超声波清洗机通过高频振动产生空化效应, 剥离表面污物。

喷淋清洗机通过高压水或清洗剂喷射冲洗表面。

等离子清洗机通过等离子体轰击去除有机物和氧化层。

应用特点:

超声波清洗机: 通用性强, 适合各种电极, 清洗效率>99%, 产量 5000-10,000 根/小时。

喷淋清洗机: 成本低, 适合中低端电极 (如 WL10), 但清洗精度稍逊。

等离子清洗机: 适合航空航天和电子用高洁净电极, 成本高, 产量 1000 根/小时。

关键技术:

清洗液管理: 使用去离子水 (电阻率>15 MΩ·cm) 或环保乙醇, 循环利用率>80%。

干燥控制: 配备热风或真空干燥, 残留水分<0.01%。

自动化: 集成自动上下料和水质监测系统, 提高效率。

发展趋势:

环保清洗: 开发无化学试剂清洗技术, 如 CO₂ 超临界清洗。

高洁净度: 提高清洗精度, 满足半导体行业需求。

智能化: 集成 IoT 监控清洗效果, 优化水量和能耗。

6.4 钨钨电极的质量检测设备

质量检测设备用于监控原材料、生产过程和成品的质量, 确保电极符合国际标准 (如 ISO 6848:2015) 和客户要求。检测内容包括化学成分、物理性能和电学性能。

6.4.1 化学成分分析仪

化学成分分析仪用于检测钨粉、氧化钨和电极成品的纯度和元素含量, 确保氧化钨含量 (0.8%-2.2%) 和杂质 (<50 ppm) 符合要求。

设备类型:

电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES): 用于检测钨、钨和微量元素, 精度高。

X 射线荧光光谱仪 (XRF): 快速无损检测, 适合在线分析。

原子吸收光谱仪 (AAS): 用于检测特定元素 (如 Fe、Si), 成本较低。

技术参数:

ICP-OES: 检测限 0.01 ppm, 分析时间 5-10 分钟。

XRF 射线: 检测范围 0.01%-100%, 精度 ±0.05%。

AAS: 检测限 0.1 ppm, 适合单元素分析。

版权与免责声明

工作原理：

ICP-OES 通过等离子体高温样激发样品，分析其发射谱线，定量元素含量。

XRF 通过 X 射线激发样品，检测荧光强度，确定元素组成。

AAS 通过原子吸收光强，测定特定元素浓度。

应用特点：

ICP-OES：适合实验室高精度分析，用于原材料和成品检测，成本高（约 200 万元）。

XRF：适合在线生产监控，检测速度快（每样品<30 秒），适合中大规模企业。

AAS：适合小规模企业，检测特定杂质，成本低（约 20 万元）。

关键技术：

高灵敏度：ICP-OES 可检测 ppb 级杂质（如 Pb<0.1 ppb）。

无损检测：XRF 支持非破坏性分析，适合成品抽检。

自动化：集成自动进样和数据处理，分析效率提高 50%。

发展趋势：

快速检测：开发便携式 XRF，分析时间<10 秒。

多元素分析：提高 ICP-OES 的多通道检测能力，覆盖 50 种元素。

智能化：结合 AI 算法，自动识别样品类型，优化检测参数。

6.4.2 物理性能测试设备

物理性能测试设备用于检测电极的密度、硬度、晶粒尺寸和表面粗糙度，确保其机械性能和加工质量。

设备类型：

密度计：基于阿基米德原理，测量电极密度。

维氏硬度计：测量电极表面硬度（400-450 HV）。

金相显微镜：分析晶粒尺寸和显微结构。

表面粗糙度仪：测量表面粗糙度（Ra<0.4 微米）。

技术参数：

密度计：精度±0.01 g/cm³，测量范围 10-20 g/cm³。

维氏硬度计：载荷 5-50 N，精度±1 HV。

金相显微镜：放大倍数 100-1000 倍，分辨率 0.1 微米。

表面粗糙度仪：测量范围 Ra0.01-10 微米，精度±0.01 微米。

工作原理：

密度计通过测量电极在空气和液体中的重量，计算密度。

维氏硬度计通过压痕尺寸计算硬度值。

金相显微镜通过光学放大观察电极切片显微结构。

表面粗糙度仪通过探针扫描表面，测量高度差。

版权与免责声明

应用特点：

密度计：快速检测坯体和成品密度 ($>19.2 \text{ g/cm}^3$)，每样品 1 分钟。

维氏硬度计：适合硬度分布分析，检测电极均匀性。

金相显微镜：用于研发和质量分析，检查晶粒尺寸（10-20 微米）。

表面粗糙度仪：在线检测抛光质量，适合大规模生产。

关键技术：

高精度：密度计采用电子天平，误差 $<0.005 \text{ g/cm}^3$ 。

自动化：金相显微镜配备自动聚焦和图像分析软件，效率提高 30%。

无损检测：表面粗糙度仪支持非接触式测量，适合成品。

发展趋势：

多功能测试：开发综合密度、硬度和粗糙度的测试平台。

在线检测：嵌入生产线的实时检测，减少抽样时间。

智能化：集成 AI 图像分析，自动判定晶粒质量。

6.4.3 电学性能测试设备

电学性能测试设备用于测量电极的电子逸出功、起弧性能和电弧稳定性，确保其焊接性能。

设备类型：

电子逸出功测试仪：测量电极电子逸出功（2.6-3.2 eV）。

模拟焊接测试台：测试起弧时间和电弧稳定性。

电导率仪：测量电极电导率（17.5-18.0 MS/m）。

技术参数：

电子逸出功测试仪：精度 $\pm 0.05 \text{ eV}$ ，测试温度 1000-2000 $^{\circ}\text{C}$ 。

模拟焊接测试台：电流 10-300 安，电压 0-50 V，记录精度 $\pm 0.1 \text{ V}$ 。

电导率仪：测量范围 1-100 MS/m，精度 $\pm 0.1 \text{ MS/m}$ 。

工作原理：

电子逸出功测试仪通过热电子发射法，测量高温下电子发射电流，计算逸出功。

模拟焊接测试台通过模拟 TIG 焊接环境，记录起弧时间和电压波动。

电导率仪通过四探针法测量电极电阻，换算电导率。

应用特点：

电子逸出功测试仪：适合研发和质量验证，测试时间 10-20 分钟/样品。

模拟焊接测试台：模拟实际焊接条件，适合成品抽检，测试效率高（100 根/小时）。

电导率仪：快速无损检测，适合在线监控。

关键技术：

高温测试：电子逸出功测试仪配备真空腔，防止氧化。

高精度记录：模拟焊接测试台集成高速数据采集，电压波动记录 $<0.01 \text{ 秒}$ 。

版权与免责声明

自动化：电导率仪支持自动探针定位，效率提高 50%。

发展趋势：

快速测试：开发便携式电子逸出功测试仪，测试时间<5 分钟。

多参数测试：整合电学和物理性能测试，减少设备占用。

智能化：通过 AI 预测电学性能，优化生产参数。

6.5 钨钨电极的辅助设备

辅助设备用于优化生产环境、提高资源利用率和确保环保，包括环境控制和废料回收设备。

6.5.1 环境控制设备

环境控制设备用于维持生产车间的温度、湿度和洁净度，防止粉尘和氧化影响电极质量。

设备类型：

恒温恒湿空调：控制车间温度和湿度。

洁净室系统：净化空气，降低粉尘浓度。

通风除尘设备：收集研磨和抛光粉尘。

技术参数：

恒温恒湿空调：温度 18-25℃，湿度 40-60%，±精度±1℃，±5%。

洁净室系统：洁净度 ISO 7 级（每立方米<10,000 颗 0.5 微米颗粒）。

通风除尘：吸尘效率>99.9%，粉尘浓度<0.1 mg/m³。

工作原理：

恒温恒湿空调通过制冷和加湿装置调节环境参数。

洁净室通过 HEPA 过滤器和正压系统去除空气中颗粒物。

通风除尘通过负压收集粉尘，经布袋或静电除尘器处理。

应用特点：

恒温恒湿空调：适合所有生产环节，防止粉末吸湿或设备过热。

洁净室系统：用于掺杂和抛光工序，满足航空航天电极需求。

通风除尘：用于研磨和烧结工序，符合 GB 16297 标准。

关键技术：

高效过滤：HEPA 过滤器寿命>2 年，过滤效率>99.999%。

能效优化：采用变频空调，节能 30%。

智能化：集成环境传感器，实时监控温湿度。

发展趋势：

超洁净环境：开发 ISO 5 级洁净室，满足微电子电极需求。

低碳控制：采用热回收技术，降低能耗 20%。

智能化：通过 IoT 实现远程环境管理。

版权与免责声明

6.5.2 废料回收设备

废料回收设备用于处理生产中的废钨粉、废电极和废液，提高资源利用率，减少环境污染。

设备类型：

粉尘回收机：收集研磨和抛光粉尘。

酸洗回收设备：回收废钨粉和氧化钨。

废水处理设备：处理清洗废水。

技术参数：

粉尘回收机：回收效率>99%，处理能力 1-10 吨/小时。

酸洗回收设备：回收率>85%，处理能力 5-50 公斤/批次。

废水处理设备：钨去除率>99%，中水回用率 70%。

工作原理：

粉尘回收机通过布袋或静电除尘收集粉尘，后经筛分和还原处理。

酸洗设备通过硝酸或盐酸溶解废料，萃取回收钨和钼。

废水处理设备通过化学沉淀和离子交换去除重金属。

应用特点：

粉尘回收机：适用于研磨和抛光工序，回收钨粉率>80%。

酸洗回收设备：适用于废电极和烧结废料，回收成本较高。

废水处理设备：适用于清洗工序，符合 GB 8978 标准。

关键技术：

高效分离：采用离心分离技术，回收率提高 10%。

环保处理：废液中和后 pH 值 6-8，无二次污染。

自动化：集成自动控制系统，减少人工操作。

发展趋势：

闭循环回收：开发全流程废料回收系统，回收率 99%。

绿色回收：采用生物化学回收技术，减少酸碱用量。

智能化：通过大数据分析优化回收工艺，降低成本。



中钨智造 WL20 电极

第七章 钨电极的国内外标准

钨电极作为高性能焊接和切割材料，其质量和性能的规范化依赖于完善的国内外标准体系。国际和国内标准为钨电极的化学成分、物理性能、尺寸公差、生产工艺以及应用要求提供了明确的指导，确保其在全球范围内的生产一致性和使用安全性。本章将详细探讨钨电极的国际标准（包括 ISO 6848:2015、AWS A5.12/A5.12M 和 EN 26848）、国内标准（GB/T 14841 和 JB/T 4730）、国内外标准的对比分析（异同点及对生产与应用的影响），以及标准更新与发展趋势（新标准制定和国际化趋势）。

7.1 钨电极的国际标准

国际标准为钨电极的全球化生产和贸易提供了统一的技术规范，主要包括国际标准化组织（ISO）、美国焊接学会（AWS）和欧洲标准化委员会（EN）制定的标准。这些标准涵盖了电极的分类、化学成分、性能要求、尺寸规格、测试方法等内容，广泛应用于航空航天、核工业、汽车制造等领域。

7.1.1 ISO 6848:2015（钨电极的分类与要求）

ISO 6848:2015 《Welding consumables — Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma welding and cutting》是全球范围内最权威的钨电极标准，由国际标准化组织（ISO）制定，适用于惰性气体保护焊（TIG）、等离子焊接和切割用钨电极，包括钨电极。该标准于 2015 年修订，取代了 2004 年版，反映了钨电极等新型电极的技术进步和环保要求。

标准内容：

分类：根据掺杂氧化物的类型和含量，将钨电极分为纯钨（WP）、钍钨（WT）、铈钨（WC）、

版权与免责声明

钨钨（WL）、钨钨（WZ）和钨钨（WY）等类型。钨钨电极分为 WL10（0.8%-1.2% La_2O_3 ）、WL15（1.3%-1.7% La_2O_3 ）和 WL20（1.8%-2.2% La_2O_3 ）。

化学成分：规定氧化钨含量及杂质限量（如 Fe、Si、C 等 $<0.05\%$ ），确保电极的电学和机械性能。

尺寸规格：电极直径范围 0.25-6.4 毫米，长度 50-600 毫米，公差符合 ISO 286-2（h6 级）。

端部涂色标识为 WL10（黑色）、WL15（金黄色）、WL20（天蓝色）。

性能要求：包括电子逸出功（2.6-3.2 eV）、起弧性能（低电流起弧时间 <0.5 秒）、电弧稳定性（电压波动 ± 0.5 V）和抗烧损性能（200 安下尖端消耗 <0.3 毫米/小时）。

测试方法：规定化学成分分析（ICP-OES）、物理性能测试（密度、硬度）、电学性能测试（模拟焊接）和外观检查（表面粗糙度 $R_a < 0.4$ 微米）。

包装与标识：要求电极包装防潮、防震，标识包括牌号、尺寸、批号和生产商信息。

特点与优势：

全球通用性：ISO 6848:2015 被全球主要工业国家认可，广泛应用于航空航天、核工业等高要求领域。

环保导向：鼓励使用无放射性电极（如钨钨、钨钨），限制钨钨电极（WT）使用，符合欧盟 RoHS 指令。

技术先进性：2015 年版增加了对钨钨电极 WL15 的详细要求，反映其作为钨钨电极替代品的趋势。

规范化测试：提供了标准化的测试方法（如电子逸出功测试），确保不同厂商产品性能可比性。

应用领域：

航空航天：WL20 用于钛合金和镍基合金的 TIG 焊接，符合 ISO 6848 的焊缝无缺陷要求。

核工业：WL15 用于锆合金管道焊接，满足标准的高洁净度和抗腐蚀性要求。

汽车制造：WL10 用于薄板不锈钢焊接，符合标准的低电流起弧性能。

局限性：

对特殊应用（如微等离子焊接或超高电流切割）的电极性能要求较少，需补充行业标准。

测试方法复杂（如电子逸出功测试需真空环境），对中小企业的设备要求较高。

未明确规定生产过程中的环保要求，如废料回收和废气处理。

修订背景：

2004 年版标准未充分考虑钨钨电极的多样化应用（如 WL15 的普及），2015 年版增加了 WL15 的分类和性能要求。

响应全球环保法规（如欧盟 2003/53/EC），限制钨钨电极，推动钨钨电极的标准化。

结合新测试技术（如高精度 ICP-MS），提高了化学成分分析的准确性。

全球影响：

ISO 6848:2015 被欧盟、美国、日本、中国等国家采纳，促进了钨钨电极的国际贸易。

推动了钨钨电极的逐步淘汰，全球钨钨电极市场占比从 2010 年的 15% 增至 2020 年的 30%。

为航空航天和核工业等领域的跨国项目提供了统一的技术规范，降低了供应链风险。

版权与免责声明

7.1.2 AWS A5.12/A5.12M（美国焊接学会标准）

AWS A5.12/A5.12M 《Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting》是美国焊接学会（AWS）制定的钨电极标准，最新版本为2009年，适用于TIG焊接、等离子焊接和切割的钨电极，包括镧钨电极。该标准在美国及北美市场具有广泛影响力，尤其在航空航天、造船和能源行业。

标准内容：

分类：与ISO 6848类似，将镧钨电极分为EWLa-1（WL10，1.0% La₂O₃）、EWLa-1.5（WL15，1.5% La₂O₃）和EWLa-2（WL20，2.0% La₂O₃）。采用“EW”前缀表示掺杂电极，La表示镧。
化学成分：氧化镧含量偏差±0.2%，杂质限量（如Fe<0.03%、C<0.01%）比ISO 6848略严格。

尺寸规格：直径0.020-0.250英寸（0.5-6.35毫米），长度3-24英寸（76-610毫米），公差符合ANSI B1.1标准。端部涂色与ISO 6848一致。

性能要求：强调起弧性能（10-50安下起弧电压<15V）、电弧稳定性（100安下电压波动<±0.4V）和抗烧损性能（150安下尖端消耗<0.25毫米/小时）。

测试方法：包括化学分析（XRF或ICP-OES）、焊接试验（AWS D1.1标准）、表面质量检查（Ra<0.5微米）和尺寸测量（千分尺或激光测径仪）。

认证与标识：要求电极通过AWS认证，包装上标明AWS编号、牌号和生产批次。

特点与优势：

严格性能要求：AWS标准对电弧稳定性和抗烧损性能的测试条件更具体，适合高负荷焊接应用。

北美市场导向：尺寸单位采用英寸，符合美国工业习惯，便于北美用户使用。

认证体系：AWS认证提高了电极的信誉度，特别适合航空航天和国防项目。

应用指导：提供详细的焊接参数建议（如电流类型、保护气体流量），便于用户优化工艺。

应用领域：

航空航天：EWLa-2（WL20）用于波音787飞机钛合金框架的TIG焊接，满足AWS D17.1标准。

造船：EWLa-1.5（WL15）用于不锈钢船体焊接，符合AWS D1.6结构焊接规范。

能源工业：EWLa-1（WL10）用于管道薄板焊接，满足API 1104标准。

局限性：

标准更新较慢（2009年版未涵盖WL15的最新应用趋势），与ISO 6848:2015相比技术细节较旧。

对环保要求（如废料回收）提及较少，未完全适应欧盟等地区的严格法规。

测试方法偏向北美设备（如AWS认证实验室），对其他地区企业存在设备兼容性问题。

与ISO 6848的关联：

AWS A5.12与ISO 6848在分类、化学成分和尺寸规格上高度一致，但AWS标准更注重实际焊接性能测试。

AWS标准允许更宽松的氧化镧含量偏差（±0.2% vs ISO的±0.15%），但对杂质限量更严格。

版权与法律声明

两者涂色标识一致，确保全球用户识别统一性。

北美影响：

AWS A5.12 是美国航空航天（NASA、Boeing）、国防（MIL-STD-1595A）和能源（ASME Section IX）项目的必备标准。

推动了钨钨电极在美国市场的快速增长，EWLa-1.5 市场份额从 2010 年的 10% 增至 2020 年的 25%。

通过 AWS 认证的钨钨电极在北美市场具有竞争优势。

7.1.3 EN 26848（欧洲标准）

EN 26848《Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma welding and cutting》是欧洲标准化委员会（CEN）制定的钨电极标准，最新版本为 1991 年（部分内容在 2004 年修订），适用于欧盟成员国的 TIG 焊接、等离子焊接和切割用钨电极。该标准与 ISO 6848 高度一致，但在某些细节上反映了欧洲市场的特殊需求。

标准内容：

分类：钨钨电极分为 WL10、WL15 和 WL20，氧化钨含量与 ISO 6848 相同（0.8%-2.2%）。采用与 ISO 相同的涂色标识。

化学成分：氧化钨含量偏差±0.15%，杂质限量（如 Fe<0.04%、Si<0.02%）与 ISO 6848 相当。

尺寸规格：直径 0.25-6.4 毫米，长度 50-300 毫米，公差符合 EN ISO 286-2（h6 级）。强调短长度电极（50-150 毫米）以适应欧洲自动化焊接设备。

性能要求：起弧性能（10 安下起弧电压<12 V）、电弧稳定性（100 安下电压波动<±0.5 V）、抗烧损性能（150 安下尖端消耗<0.3 毫米/小时）。

测试方法：化学成分分析（ICP-MS 或 XRF）、焊接试验（EN 287 标准）、表面质量检查（Ra<0.4 微米）和尺寸测量。

环保要求：强调无放射性电极（如钨钨、钨钨），符合欧盟 RoHS 指令（2002/95/EC）。

特点与优势：

环保合规性：严格限制钨钨电极使用，推动钨钨电极在欧洲市场的普及。

自动化导向：尺寸规格和性能要求适配欧洲的自动化焊接设备（如 KUKA 机器人）。

欧盟认证：通过 EN 26848 认证的电极可获得 CE 标志，提升市场竞争力。

区域适应性：提供多语言版本（英语、德语、法语），便于欧盟成员国使用。

应用领域：

汽车制造：WL15 用于欧洲汽车（如大众、宝马）铝合金车身的 TIG 焊接，符合 EN 1011 标准。

航空航天：WL20 用于空客 A350 飞机钛合金部件的焊接，满足 EN 9100 质量体系。

核工业：WL10 用于法国核电站不锈钢管道焊接，符合 RCC-M 规范。

局限性：

标准修订滞后（1991 年版未完全更新至 WL15 的最新应用），与 ISO 6848:2015 相比内容较

版权与免责声明

旧。

对微焊接和等离子切割的特殊要求较少，需结合行业标准（如 EN 1011-6）。
测试方法依赖欧洲实验室（如 TÜV 认证），对非欧盟企业成本较高。

与 ISO 6848 的关联：

EN 26848 在分类、化学成分和涂色标识上与 ISO 6848 一致，但尺寸范围更窄（长度 < 300 毫米）。

EN 26848 的环保要求更严格，明确禁止钽钨电极在某些应用中的使用。

测试方法与 ISO 6848 基本相同，但 EN 26848 更注重焊接试验的实际工况模拟。

欧洲影响：

EN 26848 推动了钨钨电极在欧盟市场的快速增长，WL15 和 WL20 占欧洲钨电极市场的 40% 以上。

通过 CE 认证的钨钨电极在欧盟市场具有竞争优势。

促进了欧盟内部的贸易统一，降低了跨国企业的合规成本。

7.2 钨钨电极的国内标准

中国作为全球最大的钨资源国和钨电极生产国，制定了一系列国家标准（GB）和行业标准（JB），规范钨钨电极的生产和应用。这些标准结合中国工业特点，既参考国际标准，又体现本地化需求，广泛应用于国内的航空航天、核工业、船舶和汽车制造领域。

7.2.1 GB/T 14841（钨电极国家标准）

GB/T 14841《钨电极技术条件》是中国国家标准，最新版本为 2008 年，适用于 TIG 焊接、等离子焊接和切割用钨电极，包括钨钨电极。该标准由国家标准化管理委员会发布，是中国钨电极生产和应用的强制性规范。

标准内容：

分类：钨钨电极分为 WL10（0.8%-1.2% La_2O_3 ）、WL15（1.3%-1.7% La_2O_3 ）和 WL20（1.8%-2.2% La_2O_3 ），与 ISO 6848 一致。涂色标识与国际标准相同。

化学成分：氧化钨含量偏差 $\pm 0.15\%$ ，杂质限量（如 $\text{Fe} < 0.05\%$ 、 $\text{C} < 0.02\%$ ）与 ISO 6848 相当，但对氧含量（ $\text{O} < 0.01\%$ ）要求更严格。

尺寸规格：直径 0.25-6.4 毫米，长度 50-600 毫米，公差符合 GB/T 1804（h6 级）。提供短长度（50-100 毫米）选项，适应国内自动化设备。

性能要求：起弧性能（10 安下起弧时间 < 0.4 秒）、电弧稳定性（150 安下电压波动 $< \pm 0.5$ V）、抗烧损性能（200 安下尖端消耗 < 0.3 毫米/小时）。

测试方法：化学成分分析（ICP-OES 或 AAS）、物理性能测试（密度 > 19.2 g/cm³、硬度 400-450 HV）、电学性能测试（模拟焊接）和外观检查（ $\text{Ra} < 0.5$ 微米）。

包装与标识：要求防潮、防震包装，标识包括牌号、尺寸、批号、生产商和标准编号（GB/T 14841）。

特点与优势：

本地化适应：尺寸和性能要求适应中国焊接设备，便于国内企业应用。

版权与免责声明

严格杂质控制：对氧含量和碳含量的要求高于国际标准，提升电极的抗氧化性和电弧稳定性。
强制性执行：作为国家标准，GB/T 14841 在中国市场具有法律效力，确保产品质量一致性。
成本效益：测试方法简化为国内常用设备，降低了中小企业合规成本。

应用领域：

航空航天：WL20 用于 C919 飞机钛合金机身的 TIG 焊接，满足 GJB 1718 标准。

核工业：WL15 用于秦山核电站不锈钢管道焊接，符合 GB/T 13164 规范。

船舶制造：WL10 用于 LNG 船不锈钢薄板焊接，符合 CCS 船级社标准。

局限性：

标准更新较慢（2008 年版未涵盖 WL15 的最新应用趋势），与 ISO 6848:2015 相比内容稍旧。

对环保和废料回收要求较少，未完全适应绿色制造趋势。

测试方法的国际化程度较低，部分方法（如 AAS）精度不如 ICP-MS。

与国际标准的关联：

GB/T 14841 在分类、涂色标识和化学成分上与 ISO 6848 一致，但尺寸公差和测试方法更贴近中国工业实际。

性能要求与 AWS A5.12 相当，但对低电流起弧性能的测试条件更严格。

包装和标识要求与 EN 26848 类似，但增加了中文标识，便于国内用户。

国内影响：

GB/T 14841 推动了中国钨钨电极产业的规范化，国内市场占有率从 2010 年的 50% 增至 2020 年的 70%。

支持了国产电极品牌的出口，符合“一带一路”沿线国家的技术要求。

为航空航天和核工业等国家重点项目提供了质量保障，降低了进口依赖。

7.2.2 JB/T 4730（焊接材料标准）

JB/T 4730《焊接材料质量检验方法》是中国机械工业联合会制定的行业标准，最新版本为 2005 年，适用于焊接材料的质量检验，包括钨钨电极。该标准为 GB/T 14841 提供了具体的测试方法和质量控制指导，广泛应用于焊接设备制造和焊接工艺验证。

标准内容：

测试方法：

化学成分：采用 ICP-OES、AAS 或 XRF 分析氧化钨和杂质含量，精度 $\pm 0.02\%$ 。

物理性能：密度测试（阿基米德法，精度 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ）、硬度测试（维氏硬度，精度 $\pm 1 \text{ HV}$ ）、表面粗糙度（ $R_a < 0.5 \text{ 微米}$ ）。

电学性能：模拟焊接试验（电流 10-300 安，电压波动 $< \pm 0.5 \text{ V}$ ）、起弧时间测试（ $< 0.4 \text{ 秒}$ ）、电子逸出功测试（2.6-3.2 eV）。

外观检查：目视和显微镜检查表面缺陷，尺寸测量（公差 $\pm 0.02 \text{ 毫米}$ ）。

质量评定：规定合格判定标准，如化学成分偏差 $< \pm 0.15\%$ 、密度 $> 19.2 \text{ g/cm}^3$ 、电弧稳定性偏差 $< \pm 0.5 \text{ V}$ 。

版权与免责声明

取样要求：每批次随机抽样 5%-10%，测试样品数量不少于 10 根。

记录与报告：要求记录测试数据、设备型号和操作条件，出具质量检验报告。

特点与优势：

测试方法详尽：提供了具体操作规程（如 ICP-OES 的样品制备），便于企业实施。

本地化设备：测试方法适配国内常用设备，降低了检测成本。

质量控制导向：强调生产过程中的质量监控，适合大规模生产企业。

与 GB/T 14841 配套：作为 GB/T 14841 的补充，完善了质量检验体系。

应用领域：

焊接设备制造：用于验证国产焊机与钨钨电极的兼容性。

船舶制造：WL15 电极的焊接试验符合 JB/T 4730，满足中国船级社（CCS）要求。

铁路工业：WL20 用于高铁车厢铝合金焊接，检验方法符合 TB/T 2653 标准。

局限性：

测试方法更新较慢，未涵盖最新的高精度设备（如 ICP-MS）。

对电学性能测试的模拟焊接条件较简单，未充分模拟复杂工况（如高频交流电）。

标准范围较弱，仅为行业推荐标准，影响力不如 GB/T 14841。

与国际标准的关联：

JB/T 4730 的测试方法参考了 ISO 6848 和 AWS A5.12，但对低成本设备的适配性更强。

化学分析方法与 EN 26848 一致，但物理和电学测试的精度要求略低。

质量评定标准与 GB/T 14841 高度一致，确保国内生产合规性。

国内影响：

JB/T 4730 降低了中小企业的质量检验成本，支持了钨钨电极的普及应用。

推动了国产检测设备（如海光 ICP-OES）的使用，提升了国内产业链竞争力。

为焊接工艺验证提供了标准化的指导，减少了生产中的质量纠纷。

7.3 钨钨电极的标准对比分析

国内外标准的对比分析有助于理解其技术差异、生产要求和应用影响，为企业在国内外市场制定策略提供依据。

7.3.1 国内外标准的异同

相同点：

分类与标识：ISO 6848、AWS A5.12、EN 26848、GB/T 14841 均将钨钨电极分为 WL10、WL15 和 WL20，氧化钨含量范围一致（0.0%-2.2%）。涂色标识统一（WL10 黑色、WL15 金黄色、WL20 天蓝色），确保全球用户识别一致性。

化学成分：氧化钨含量偏差（ $\pm 0.15\%$ - $\pm 0.2\%$ ）和杂质限量（如 Fe<0.05%、C<0.02%）相近，反映了钨钨电极的高纯度要求。

尺寸规格：直径范围 0.25-6.4 毫米，公差符合 h6 级，长度 50-600 毫米，适应 TIG 和等离子焊接设备。

性能要求：均强调起弧性能（低电流起弧）、电弧稳定性（电压波动 ± 0.5 V）和抗烧损性能（尖端消耗 < 0.3 毫米/小时）。

环保趋势：均鼓励无放射性电极（如钨钨、铈钨），限制钍钨电极使用，符合全球环保法规。

不同点：

标准范围：

ISO 6848 和 EN 26848 涵盖 TIG 焊接、等离子焊接和切割，范围最广。

AWS A5.12 更专注于焊接应用，对切割性能要求较少。

GB/T 14841 涵盖焊接和切割，但更注重国内设备兼容性。

JB/T 4730 仅为质量检验方法，未涉及电极分类和性能要求。

化学成分要求：

AWS A5.12 对杂质限量最严格（Fe $< 0.03\%$ vs ISO 的 0.05%），适合高要求应用。

GB/T 14841 对氧含量要求更严格（O $< 0.01\%$ ），提升抗氧化性。

ISO 6848 和 EN 26848 的杂质限量较为平衡，适合全球化生产。

尺寸规格：

AWS A5.12 采用英寸单位，长度范围更广（3-24 英寸），适配北美市场。

EN 26848 强调短长度（50-300 mm），适合欧洲自动化设备。

GB/T 14841 提供灵活长度选项，适应中国式手动和自动焊接。

测试方法：

ISO 6848 和 EN 26848 采用高精度设备（如 ICP-MS），测试成本较高。

AWS A5.12 注重实际焊接试验，测试条件更贴近北美工况。

GB/T 14841 和 JB/T 4730 适配国内低成本设备（如 AAS），降低合规成本。

环保要求：

EN 26848 明确符合欧盟 RoHS 指令，限制钍钨电极最严格。

ISO 6848 和 AWS A5.12 提倡无放射性，但未强制环保工艺。

GB/T 14841 和 JB/T 4730 对环保要求较弱，需补充绿色制造标准。

更新频率：

ISO 6848（2015）最更新，涵盖 WL15 最新应用。

AWS A5.12（2009）、EN 26848（1991/2005）和 GB/T 14841（2008）更新滞后。

JB/T 4730（2005）更新最慢，测试方法未完全反映新技术。

总结：

ISO 6848 是全球最权威标准，技术全面，适合跨国企业参考。

AWS A5.12 适合北美市场，性能测试严格，认证体系完善。

EN 26848 注重环保和自动化，适配欧盟严格法规。

GB/T 14841 和 JB/T 4730 本地化强，成本低，适合中国市场。

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（La₂O₃）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备
 等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统
 不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接
 自动化焊接、机器人焊接系统
 航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com
 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
 更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。
 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

7.3.2 对生产与应用的影响

生产影响：

质量控制：

国际标准（ISO、AWS、EN）的高精度测试要求（如 ICP-MS）推动企业生产高端检测设备，但增加设备投资（约 500-1000 万元）。

GB/T 14841 和 JB/T 4730 的低成本测试方法（AAS、XRF 射线）降低了中小企业的合规成本，平均每批次检测费用减少 30%-50%。

AWS 和 EN 的严格杂质限量（如 Fe<0.03%）要求企业优化原材料提纯工艺（如氢气二次还原），提高了生产成本 10%-15%。

生产工艺：

ISO 6848 和 EN 26848 的环保要求推动企业采用绿色烧结（如真空炉）和废料回收技术，减少废气排放 50%，但设备升级成本高。

GB/T 14841 对氧含量的严格要求（O<0.01%）促使企业优化掺杂和烧结气氛控制（如高纯氢气），工艺难度提升 20%。

AWS A5.12 的实际焊接试验要求企业建立模拟测试平台，增加了研发投入（约 100-200 万元）。

市场竞争力：

符合 ISO 6848 和 AWS A5 的企业可进入欧美市场，出口额增长 30%-40%。

GB/T 14841 的本地化优势使国内企业在“一带一路”市场占优，成本低 10%-20%。

EN 26848 的 CE 认证要求提高了欧盟市场的进入壁垒，中小企业的需与认证机构合作。

应用影响：

焊接质量：

ISO 6848 和 AWS A5.12 的严格性能要求（如电压波动 ± 0.5 V）确保了高精度焊缝，航空航天和核工业的焊接合格率约 99.5%。

GB/T 14841 的低电流起弧性能（<0.4 秒）适合薄板焊接，满足电子和汽车行业的需求，焊成本降低 15%。

EN 26848 的自动化适配性提高了欧洲生产线的效率（如 20%），但对非自动化设备兼容性较差。

用户选择：

AWS A5.12 认证的电极在北美市场更受信任，价格高 20%-30%。

GB/T 14841 标准的国产电极（如中钨）性价比高，国内市场占有率 70%以上。

EN 26848 的环保电极（如 ESAB）在欧盟市场占主导，市场份额约 45%。

供应链管理：

ISO 6848 的全球统一性降低了跨国企业的采购合规成本，供应链效率提高 10%。

AWS 和 EN 的区域性标准增加了企业的多标准生产成本，约 5%-10%。

版权与免责声明

GB/T 14841 和 JB/T 4730 支持了国内供应链整合，降低了进口电极依赖度 30%。

总结：

国际标准提高了产品质量和技术水平，但增加了生产和检测成本，适合高端市场。

国内标准降低了合规成本，支持了中小企业发展，适合中低端市场。

企业需根据目标市场选择适用的标准，平衡成本与市场竞争力。

7.4 钨钨电极的标准更新与发展趋势

随着钨钨电极的全球应用扩大和技术的进步，标准体系需要不断更新，以适应新材料、新工艺和环保要求。本节探讨钨钨电极标准的新制定、修订和国际化趋势。

7.4.1 新标准的制定

需求驱动：

新材料：钨钨电极的复合掺杂（如 $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2$ ）提高了电弧性能，需制定新分类和性能标准。

新应用：微等离子焊接（ <1 安）和超高电流切割（ >500 安）对电极提出了特殊要求，现有标准（如 ISO 6848）未涵盖。

环保法规：欧盟 REACH 法规和中国的绿色制造政策要求标准增加废料回收和生产排放规范。

智能化生产：自动化焊接设备（如机器人）对电极尺寸和性能一致性要求更高，需制定新测试方法。

新标准内容：

分类扩展：新增复合掺杂电极（如 WL15+Ce）分类，规定掺杂比例和性能要求。

性能细化：增加微电流起弧（ <1 安，起弧时间 <0.2 秒）和高电流抗烧损（500 安，尖端消耗 <0.5 毫米/小时）的测试。

环保规范：规定废电极回收率（ $>80\%$ ）、废气排放限量（粉尘 <0.1 mg/m^3 ）和碳排放标准（ <1 吨 CO_2 /吨电极）。

尺寸精度：提高直径公差（ ± 0.01 毫米）和表面粗糙度（ $R_a < 0.2$ 微米），适配自动化设备。

测试方法：引入智能化测试（如 AI 图像分析晶粒尺寸、实时在线电弧监测），提高检测效率 50%。

制定进展：

国际：ISO/TC 44（焊接技术委员会）正在修订 ISO 6848，预计 2025-2027 年发布新版，包含复合掺杂和环保要求。

美国：AWS 计划于 2025 年修订 A5.12，增加微焊接和等离子切割的测试方法。

欧盟：CEN 计划 2026 年更新 EN 26848，强化 REACH 和 RoHS 合规性。

中国：全国焊接标准化委员会（SAC/TC 70）计划 2025 年修订 GB/T 14841，新增绿色制造和智能化测试内容。

挑战：

新标准的高要求可能增加企业设备升级成本。

不同国家和地区的测试方法差异，需协调多方达成共识。

中小企业的技术水平难以快速适应，需政策支持和技术培训。

版权与免责声明

影响：

新标准将推动钨钨电极的技术升级，市场份额预计增长 20%-30%。

环保规范将加速钨钨电极的淘汰，钨钨电极占比可达 50%以上。

智能化测试将提高生产效率，降低检测成本 30%。

7.4.2 标准国际化趋势

背景：

全球化贸易：钨钨电极出口额从 2015 年的 10 亿美元增至 2020 年的 15 亿美元，需统一标准降低贸易壁垒。

跨国项目：航空（C919、A350）、核电（华龙一号）等项目要求多国标准互认。

技术融合：新材料（复合掺杂）、新工艺（绿色制造）和新设备（自动化焊接）的全球共享推动标准国际化。

趋势：

标准互认：

ISO 6848 作为核心框架，AWS、EN 和 GB/T 等标准逐步与其接轨，互认率预计达 90%。

中国 GB/T 14841 与 ISO 6848 的对接度从 80%提高到 95%，支持“一带一路”沿线国家采用等效标准。

AWS 和 EN 通过 ISO 平台协调，减少北美和欧盟的重复认证成本。

环保统一：

欧盟 REACH 和 RoHS 法规被 ISO 采纳，全球标准将统一限制钨钨电极，钨钨电极成为主流。

中国绿色制造标准（如 GB/T 26572）与 ISO 14001 对接，推动废料回收率标准化（>80%）。

测试技术共享：

高精度测试（如 ICP-MS、AI 图像分析）在 ISO 标准中普及，全球检测设备市场预计增长 15%。

中国的低成本测试方法（如 AAS）被发展中国家采纳，降低合规成本 20%。

区域合作：

亚太地区（中国、日本、韩国）成立焊接标准联盟，制定区域性钨钨电极标准，预计 2026 年发布。

欧盟与美国通过 WTO 框架协调标准，减少技术性贸易壁垒。

中国主导“一带一路”焊接标准培训，推广 GB/T 14841 等效标准。

挑战：

发达国家的高标准（如 AWS 认证）对发展中国家企业形成技术壁垒。

标准翻译和实施的区域差异需增加多语言支持和培训。

知识产权保护（如新测试方法专利）可能引发国际纠纷。

影响：

标准国际化将降低全球贸易成本 10%-15%，推动钨钨电极市场规模达 20 亿美元。

中国企业在国际标准制定中的话语权增强，预计占 ISO/TC 44 席位 30%。

版权与法律责任声明

环保和智能化技术的标准化将加速全球产业升级，钨钨电极的绿色应用率达 90%。



中钨智造 WL20 电极

第八章 钨钨电极的检测方法与技术

钨钨电极作为高性能焊接和切割材料，其质量直接影响焊缝质量、电弧稳定性及生产效率。检测方法是确保钨钨电极符合国际和国内标准（如 ISO 6848:2015、GB/T 14841）的关键，涵盖化学成分、物理性能、电学性能、机械性能及显微结构分析等多个方面。本章将详细探讨钨钨电极的化学成分检测（氧化钨含量及杂质元素分析）、物理性能检测（密度、硬度、熔点、热导率）、电学性能检测（电子逸出功、起弧性能、电弧稳定性）、机械性能检测（抗烧损性能、耐磨性）、显微结构分析（扫描电镜、X 射线衍射）、检测设备选择与校准（设备类型及维护）以及检测标准与规范（国际和国内标准）。

8.1 钨钨电极的化学成分检测

化学成分检测用于验证钨钨电极中氧化钨 (La_2O_3) 含量及杂质元素的符合性，确保电极的电学性能和化学稳定性。检测方法需高精度、高灵敏度，以满足 ISO 6848:2015 和 GB/T 14841 的要求（氧化钨含量偏差 $\pm 0.15\%$ ，杂质 $< 0.05\%$ ）。

8.1.1 氧化钨含量检测

氧化钨是钨钨电极的活性成分，含量（0.8%–2.2%）直接影响电子逸出功和电弧稳定性。检测方法需确保准确性和重复性，常用技术包括电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）、X 射线荧光光谱（XRF）和化学滴定法。

检测方法：

ICP-OES：

原理：样品溶解后通过等离子体（6000–10000 K）激发，发射特定波长的光谱，分析钨元素

版权与免责声明

的强度，定量计算氧化钨含量。

操作步骤：

取电极样品（0.1-0.5 g），用硝酸和氢氟酸（1:1）溶解，制备溶液。

使用高纯水稀释至 10-50 ppm，加入内标（如钨）。

在 ICP-OES（波长 394.91 nm）上分析，校准曲线法计算含量。

技术参数：检测限 0.01 ppm，精度±0.02%，分析时间 5-10 分钟。

优势：高灵敏度、多元素同时分析，适合 WL10、WL15、WL20 的精确检测。

局限性：需复杂样品前处理，设备成本高（约 200-300 万元）。

XRF：

原理：X 射线激发样品原子，产生荧光，分析钨元素的特征峰强度，计算含量。

操作步骤：

将电极切片或粉末压制成薄片（直径 20-30 mm）。

在 XRF 仪（Rh 靶，50 kV）上扫描，校准标准样品。

使用软件分析 La K α 线（33.44 keV），计算氧化钨含量。

技术参数：检测限 0.05%，精度±0.05%，分析时间 30 秒-2 分钟。

优势：无损、快速，适合生产线上批量检测。

局限性：对低含量（<1%）样品灵敏度较低，需高纯标准样品校准。

化学滴定法：

原理：通过化学反应（如 EDTA 络合滴定）测定钨离子浓度，换算氧化钨含量。

操作步骤：

样品溶解后加入缓冲溶液（pH 5-6）。

以 EDTA 为滴定剂，木糖酚橙为指示剂，滴定至颜色变化。

根据 EDTA 消耗量计算钨含量。

技术参数：精度±0.1%，分析时间 20-30 分钟。

优势：设备简单（成本<10 万元），适合中小企业。

局限性：操作复杂，受干扰元素（如 Fe、Al）影响，精度较低。

应用场景：

ICP-OES：用于研发和高端生产，如航空航天用 WL20 电极（氧化钨 2.0±0.15%）。

XRF：用于生产过程监控，快速检测 WL15 批次均匀性。

化学滴定：用于低成本检测，如 WL10 的常规质量控制。

关键技术：

样品制备：确保溶解完全，避免钨沉淀，溶液稀释误差<1%。

校准标准：使用高纯氧化钨（>99.99%）标准样品，校准曲线 R²>0.999。

干扰消除：ICP-OES 需扣除钨基体光谱干扰，XRF 需校正矩阵效应。

版权与免责声明

发展趋势：

快速检测：开发便携式 XRF，分析时间 < 10 秒，满足在线监控。

高精度：推广 ICP-MS（检测限 0.001 ppm），提高低含量检测能力。

自动化：集成自动进样和数据处理，分析效率提高 50%。

8.1.2 杂质元素分析

杂质元素（如 Fe、Si、C、O）影响电极的导电性、抗氧化性和电弧稳定性，需控制在 < 0.05%（ISO 6848）。常用检测方法包括 ICP-OES、原子吸收光谱（AAS）、红外吸收法和惰性气体熔融法。

检测方法：

ICP-OES：

原理：同氧化钨检测，通过多波长分析同时检测 Fe（238.20 nm）、Si（251.61 nm）等杂质。

操作步骤：与氧化钨检测相同，调整波长和校准曲线。

技术参数：检测限 0.01-0.1 ppm，精度 ± 0.01%，适合多元素分析。

优势：高灵敏度，一次分析多种杂质，效率高。

局限性：需复杂前处理，成本高。

AAS：

原理：样品原子吸收特定波长光，测定 Fe、Ni 等元素浓度。

操作步骤：

样品溶解后稀释至 1-10 ppm。

在 AAS（Fe 248.33 nm）上分析，火焰或石墨炉原子化。

标准加入法计算含量。

技术参数：检测限 0.1 ppm，精度 ± 0.05%，分析时间 10 分钟/元素。

优势：设备成本低（约 20-50 万元），适合单元素检测。

局限性：逐元素分析，效率低，受基体干扰。

红外吸收法（C、S）：

原理：样品高温燃烧，生成 CO₂ 和 SO₂，红外吸收测定含量。

操作步骤：

取样品（0.5-1 g），在氧气流中燃烧（1350℃）。

红外检测器分析 CO₂（4.26 μm）吸收强度。

校准曲线法计算 C 含量。

技术参数：检测限 0.001%，精度 ± 0.005%，分析时间 2-5 分钟。

优势：快速、精准，适合 C、S 检测。

局限性：仅限 C、S，需专用设备（约 50 万元）。

惰性气体熔融法（O、N）：

原理：样品在氦气中高温熔融，释放 O₂ 和 N₂，热导检测器分析。

版权与免责声明

操作步骤:

取样品 (0.1-0.5 g), 在石墨坩埚中熔融 (2500°C)。

热导检测器测定 O₂ 和 N₂ 含量。

校准标准气体计算结果。

技术参数: 检测限 0.0005%, 精度 ±0.002%, 分析时间 3 分钟。

优势: 高灵敏度, 适合 O、N 检测。

局限性: 设备成本高 (约 100 万元), 仅限气体元素。

应用场景:

ICP-OES: 用于航空航天电极的全面杂质分析 (如 Fe < 30 ppm)。

AAS: 用于中小企业检测特定杂质 (如 Si < 50 ppm)。

红外吸收法: 用于 C 含量控制 (< 0.01%), 确保抗氧化性。

惰性气体熔融法: 用于 O 含量检测 (< 0.01%), 满足 GB/T 14841。

关键技术:

基体校正: ICP-OES 需扣除钨基体干扰, AAS 需标准加入法。

标准样品: 使用 NIST 认证标准 (如 SRM 2452), 确保校准准确。

环境控制: 检测室需恒温 (20 ± 2°C)、低尘 (ISO 7 级)。

发展趋势:

多元素快速分析: 推广 ICP-MS, 检测 50 种元素, 时间 < 5 分钟。

在线检测: 开发 XRF 在线分析仪, 实时监控杂质。

绿色检测: 减少酸溶剂用量, 采用微波消解技术。

8.2 钨钨电极的物理性能检测

物理性能检测用于评估钨钨电极的密度、硬度、熔点和热导率, 这些性能影响电极的机械强度、热稳定性和焊接效率。

8.2.1 密度与硬度测试

密度 (> 19.2 g/cm³) 和硬度 (400-450 HV) 是钨钨电极的重要物理指标, 反映其致密度和机械强度。

密度测试:

方法: 阿基米德法。

原理: 测量电极在空气和液体 (通常为水或乙醇) 中的质量, 计算密度。

操作步骤:

使用高精度天平 (精度 ±0.0001 g) 称量电极干重 (m₁)。

将电极浸入去离子水 (20°C, 密度 ρ₀ = 0.998 g/cm³), 称量湿重 (m₂)。

计算密度: $\rho = m_1 / (m_1 - m_2) \times \rho_0$ 。

技术参数: 精度 ±0.01 g/cm³, 测量时间 1-2 分钟。

版权与免责声明

优势：简单、成本低（设备约 5 万元），适合批量检测。

局限性：对小尺寸电极（ $<0.5\text{ mm}$ ）精度稍低，需校正液体表面张力。

硬度测试：

方法：维氏硬度（HV）。

原理：金刚石压头在规定载荷下压入电极表面，测量压痕对角线长度，计算硬度。

操作步骤：

制备电极切片，抛光至 $Ra < 0.2$ 微米。

使用维氏硬度计（载荷 5-10 N，保载 10 秒）。

测量压痕对角线，计算 HV 值。

技术参数：精度 $\pm 1\text{ HV}$ ，测量时间 2-5 分钟/点。

优势：高精度，适合评估电极均匀性。

局限性：需破坏性样品制备，测试点有限。

应用场景：

密度测试：用于烧结坯体和成品质量控制，密度 $< 19.2\text{ g/cm}^3$ 可能存在孔隙。

硬度测试：用于锻造和拉拔后电极的强度验证，硬度 $> 450\text{ HV}$ 表明晶粒细化良好。

关键技术：

样品平整：抛光样品避免表面缺陷影响硬度测量。

校准标准：使用 NIST 硬度块（HV400-500）校准设备。

环境控制：测试室温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，避免热膨胀误差。

发展趋势：

在线密度检测：开发超声波密度计，无损检测。

微区硬度：推广纳米压痕技术，分析晶粒级硬度。

自动化：集成自动样品台，测试效率提高 30%。

8.2.2 熔点与热导率测试

熔点（约 3400°C ）和热导率（约 $100\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）反映电极的耐高温性和热传导能力，影响其在高电流焊接中的性能。

熔点测试：

方法：高温热分析（差示扫描量热法，DSC）。

原理：加热样品，记录吸热峰对应的熔点温度。

操作步骤：

取样品（10-50 mg），置于氧化铝坩埚。

在氩气保护下（流量 50 mL/min ），升温至 3500°C （速率 10°C/min ）。

记录 DSC 曲线，确定熔点。

技术参数：精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，分析时间 30-60 分钟。

优势：高精度，适合研发验证。

局限性：设备昂贵，不适合常规检测。

热导率测试：

方法：激光闪射法。

原理：激光脉冲加热样品一侧，红外探测器测量另一侧温升，计算热导率。

操作步骤：

制备电极切片（直径 10 mm，厚度 2 mm）。

在激光闪射仪（100-1000℃，氩气保护）上测试。

使用软件计算热导率（ $\lambda = \alpha \times \rho \times C_p$ ）。

技术参数：精度±3%，测量时间 1-3 分钟。

优势：快速、非破坏性，适合高温性能分析。

局限性：需薄片样品，设备成本高（约 200 万元）。

应用场景：

熔点测试：用于新配方电极（如复合掺杂）的研发验证。

热导率测试：用于等离子切割电极（如 WL20）的性能评估。

关键技术：

高温保护：使用高纯氩气（>99.999%），防止样品氧化。

校准标准：采用钨单晶（熔点 3410℃）和铜（热导率 400 W/m·K）校准。

数据处理：使用有限元模型校正热导率边界效应。

发展趋势：

高温测试：开发 4000℃ 以上测试设备，适应新材料。

非接触测量：推广红外热成像热导率测试。

多参数测试：整合熔点、热导率和热膨胀测试。

8.3 钨钨电极的电学性能检测

电学性能检测评估钨钨电极的电子逸出功、起弧性能和电弧稳定性，这些指标直接决定其在 TIG 焊接和等离子焊接中的表现。

8.3.1 电子逸出功测量

电子逸出功（2.6-3.2 eV）是钨钨电极的核心电学参数，反映其发射电子的能力，低逸出功有助于低电流起弧。

方法：热电子发射法。

原理：加热电极至高温（1000-2000℃），测量发射电流，计算电子逸出功。

操作步骤：

将电极置于真空腔（ $<10^{-5}$ Pa），加热至 1500℃。

版权与免责声明

施加电场（100–500 V/cm），记录发射电流（1–100 μ A）。

使用 Richardson–Dushman 方程计算逸出功： $J = A T^2 \exp(-\phi/kT)$ 。

技术参数：精度 ± 0.05 eV，测试时间 10–20 分钟。

优势：直接反映电极电学性能，适合研发。

局限性：需真空环境，设备复杂（约 300 万元）。

应用场景：用于 WL20 电极的性能验证，确保逸出功 < 2.8 eV。

关键技术：

真空控制：真空度 $< 10^{-6}$ Pa，防止氧气干扰。

温度校准：使用光学高温计（精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）。

电流测量：采用皮安表，灵敏度 < 1 pA。

发展趋势：

快速测量：开发大气压测试法，时间 < 5 分钟。

在线监测：集成生产线，实时检测逸出功。

理论模拟：结合 DFT 计算预测逸出功，减少实验成本。

8.3.2 起弧性能测试

起弧性能反映电极在低电流（10–50 安）下的点火能力，起弧时间 < 0.5 秒（ISO 6848）为优。

方法：模拟焊接试验。

原理：在 TIG 焊机上测试电极与工件间起弧时间和电压。

操作步骤：

使用 TIG 焊机（直流正极，氩气保护，流量 10 L/min）。

设置电流 10–50 安，电极尖端与工件（不锈钢）距离 2 mm。

记录起弧时间（从通电至电弧稳定）和起弧电压。

技术参数：时间精度 ± 0.01 秒，电压精度 ± 0.1 V，测试时间 1–2 分钟。

优势：模拟实际工况，结果直观。

局限性：受工件材质和气体纯度影响，重复性略低。

应用场景：用于 WL10 薄板焊接性能测试，起弧时间 < 0.4 秒。

关键技术：

电极尖端：磨成 45° 锥角，确保一致性。

数据采集：使用高速示波器（采样率 > 10 kHz）。

环境控制：氩气纯度 $> 99.999\%$ ，避免氧化。

发展趋势：

版权与免责声明

微电流测试：开发<1 安起弧测试，满足微焊接。

自动化：集成机器人焊接台，测试效率提高 50%。

多工况模拟：涵盖交流和脉冲电流测试。

8.3.3 电弧稳定性测试

电弧稳定性反映电极在焊接过程中的电压和电流波动，电压波动 $<\pm 0.5$ V (ISO 6848) 为优。

方法：模拟焊接试验。

原理：在恒定电流下记录电弧电压波动，评估稳定性。

操作步骤：

使用 TIG 焊机（直流，100-200 安，氩气 10 L/min）。

电极与工件（不锈钢）保持 3 mm 间距，焊接 5 分钟。

使用示波器记录电压波动，计算标准偏差。

技术参数：电压精度 ± 0.01 V，采样率 >1 kHz，测试时间 5-10 分钟。

优势：直接反映焊接性能，适合质量控制。

局限性：受电极尖端形状和气体流量的影响。

应用场景：用于 WL15 航空航天焊接验证，电压波动 $<\pm 0.4$ V。

关键技术：

尖端一致性：统一尖端锥角（30-45°），减少漂移。

数据分析：使用 FFT 分析电压波动频率。

保护气体：确保氩气流量稳定（ ± 0.1 L/min）。

发展趋势：

高频测试：开发交流和高频脉冲电弧稳定性测试。

实时监控：集成生产线在线检测系统。

AI 分析：通过机器学习预测电弧稳定性。

8.4 钨钨电极的机械性能检测

机械性能检测评估钨钨电极的抗烧损性能和耐磨性，这些性能影响电极寿命和使用成本。

8.4.1 抗烧损性能测试

抗烧损性能反映电极在高温电弧下的尖端消耗速率，尖端消耗 <0.3 毫米/小时（200 安，ISO 6848）为优。

方法：模拟焊接试验。

原理：在高电流焊接中测量电极尖端长度损失，评估耐烧损性。

操作步骤：

使用 TIG 焊机（直流 200 安，氩气 12 L/min）。

电极尖端磨成 45° 锥角，与不锈钢工件保持 3 mm 间距。
连续焊接 1 小时，使用显微镜测量尖端长度损失。

技术参数：测量精度 ± 0.01 毫米，测试时间 1 小时。

优势：模拟实际工况，结果可靠。

局限性：测试时间长，效率低。

应用场景：用于 WL20 等离子切割电极验证，消耗 < 0.25 毫米/小时。

关键技术：

尖端控制：确保初始锥角一致（偏差 $< \pm 2^\circ$ ）。

显微测量：使用数码显微镜（放大 100 倍），精度 ± 0.005 毫米。

工况稳定：控制电流（ ± 1 安）和气体流量（ ± 0.1 L/min）。

发展趋势：

快速测试：开发 30 分钟抗烧损测试法。

高温模拟：测试 500 安以上工况，满足切割需求。

自动化：集成图像识别，自动测量尖端损耗。

8.4.2 耐磨性测试

耐磨性反映电极在拉拔和使用中的表面磨损性能，影响其寿命和表面质量。

方法：摩擦磨损试验。

原理：在规定载荷和摩擦条件下测量电极质量损失或磨痕深度。

操作步骤：

使用摩擦磨损试验机（对磨材料为硬质合金，载荷 10 N）。

电极样品（长度 20 mm）以 5 m/min 速度摩擦 1000 次。

测量质量损失（天平精度 ± 0.0001 g）或磨痕深度（轮廓仪）。

技术参数：质量损失精度 ± 0.1 mg，磨痕深度 ± 0.1 微米，测试时间 20–30 分钟。

优势：量化耐磨性，适合生产控制。

局限性：模拟工况与实际使用有差异。

应用场景：用于 WL15 拉拔电极的表面质量验证。

关键技术：

载荷控制：伺服系统确保载荷偏差 $< \pm 0.1$ N。

表面预处理：样品抛光至 $Ra < 0.2$ 微米。

环境控制：测试室湿度 $< 50\%$ ，避免氧化。

发展趋势：

版权与免责声明

微磨损测试：开发纳米级磨损分析，适合微电极。

多工况模拟：涵盖干摩擦和润滑条件。

在线检测：嵌入拉拔生产线，实时监控磨损。

8.5 钨钨电极的显微结构分析

显微结构分析用于研究钨钨电极的晶粒尺寸、相分布及缺陷，揭示其性能的微观机制。

8.5.1 扫描电镜（SEM）分析

SEM 用于观察电极的表面形貌、晶粒尺寸（10-20 微米）和氧化钨分布。

原理：电子束扫描样品，收集二次电子或背散射电子，生成高分辨率图像。

操作步骤：

制备电极切片，抛光并用乙醇清洗。

在 SEM（加速电压 10-20 kV，真空 $<10^{-5}$ Pa）上观察。

使用能谱仪（EDS）分析氧化钨分布。

技术参数：分辨率 1 nm，放大倍数 100-10,000 倍，分析时间 10-30 分钟。

优势：高分辨率，结合 EDS 提供元素分布。

局限性：需真空环境，设备昂贵（约 500 万元）。

应用场景：用于 WL20 烧结坯体的晶粒和掺杂均匀性分析。

关键技术：

样品制备：抛光至 $Ra < 0.1$ 微米，避免伪影。

EDS 校准：使用标准样品（ La_2O_3 ）校正元素含量。

图像处理：使用 ImageJ 分析晶粒尺寸分布。

发展趋势：

原位分析：开发高温 SEM，观察电极烧损过程。

3D 成像：推广 FIB-SEM，重建内部结构。

自动化：通过 AI 自动识别晶粒和缺陷。

8.5.2 X 射线衍射（XRD）分析

XRD 用于分析电极的晶体结构、相组成和残余应力。

原理：X 射线与晶体发生化学，产生衍射图案，分析晶相和晶粒尺寸。

操作步骤：

制备电极粉末或切片，清洗并干燥。

在 XRD 仪（Cu $K\alpha$ ，40 kV，扫描范围 $10-80^\circ$ ）上分析。

使用 Jade 软件比对 PDF 卡片，确定相组成。

技术参数：分辨率 0.01° ，分析时间 30-60 分钟。

优势：无损，适合相分析和应力测量。

局限性：对微量相 (<1%) 灵敏度低，设备成本高 (约 200 万元)。

应用场景：用于 WL15 锻造电极的钨和氧化钨相分析。

关键技术：

校准标准：使用 Si 标准样品 (NIST SRM 640) 校正 2θ 角。

峰分离：采用 Rietveld 精修分析相含量。

应力测量：使用 $\sin^2 \psi$ 法计算残余应力。

发展趋势：

快速 XRD：开发同步辐射 XRD，分析时间 <10 分钟。

微区分析：推广微焦 XRD，分射射精精度。

智能化：通过机器学习自动识别相态。

8.6 钨式电极的检测设备选择与校准

检测设备的选择与校准是确保测试数据准确的关键，涉及设备类型、性能参数及维护要求。

8.6.1 检测设备类型

化学成分：ICP-OES (Thermo Fisher iCAP 7400)、XRF (Bruker S8 Tiger)、AAS (北京海光)、红外吸收仪 (LECO CS-600)、惰性气体分析仪 (ELTRA ONH-2000)。

物理性能：密度计 (Mettler Toledo MS204S)、维氏硬度计 (AGI HV-50)、DSC (Netzsch STA 449 F3)、激光热导仪 (LFA 457)。

电学性能：电子逸出射测试仪 (自定义)、模拟焊接台 (OTC TIG-300)、电导率仪 (Keithley 2401)。

机械性能：摩擦磨损试验机 (WJT-1000)、显微镜 (Zeiss Axio Observer)。

显微结构：SEM-EDS (FEI Quanta 250)、XRD (Rigaku D/max-2500)。

选择依据：

精度需求：航空航天用选择 ICP-OES (0.01 ppm)，常规生产用 XRF (0.05%)。

成本控制：中小企业用 AAS，大型企业用 ICP-MS。

生产规模：批量生产需自动化设备 (如自动进样 ICP-OES)，研发用高分辨 SEM。

8.6.2 校准与维护

校准：

化学成分：使用 NIST 标准样品 (SRM 2452 钨、SRM 1075a 氧化钨)，校准曲线 $R^2 > 0.999$ 。

物理性能：密度计用标准砝码 ($\pm 0.0001 \text{ g}$)，硬度计用 HV400 块。

电学性能：焊接台用标准电阻 ($\pm 0.01 \ \Omega$)，逸出功测试仪校准电压 ($\pm 0.1 \text{ V}$)。

版权与免责声明

显微结构：SEM 用金标样校分辨率，XRD 用 Si 标准校 2θ 角。

周期：每月校准，关键设备每周检查。

维护：

清洁：ICP-OES 每月清洗进样管，SEM 每周喷枪清洗。

耗材更换：XRF 靶材每 2 年更换，硬度计压头每 5000 次检查。

环境：恒温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $< 60\%$ ，洁净度 ISO 7 级。

记录：维护日志电子化，追溯故障原因。

发展趋势：

自动校准：开发自校准系统，减少人工操作。

远程维护：通过 IoT 实时监控设备状态，故障率降低 30%。

绿色维护：减少清洗溶剂用量，采用环保耗材。

8.7 钨钼电极的检测标准与规范

检测标准为检测方法提供统一规范，确保测试结果的可比性和合规性。

8.7.1 国际检测标准

ISO 6848:2015:

检测内容：化学成分（ICP-OES， $\pm 0.15\%$ ）、物理性能（ $> 19.2 \text{ g/cm}^3$ ）、电学性能（逸出功 $2.6\text{--}3.2 \text{ eV}$ ）、外观（ $R_a < 0.4$ 微米）。

测试方法：ICP-OES、XRF 射线、模拟焊接、显微镜检查。

要求：每批抽样 5%–10%，合格率 $> 99\%$ 。

AWS A5.12:2009:

检测内容：化学成分（ $\pm 0.2\%$ ）、电弧性能（电压波动 $< \pm 0.4 \text{ V}$ ）、尺寸（ $\pm 0.02 \text{ mm}$ ）。

测试方法：焊接试验（AWS D1.1）、XRF、千分尺。

要求：AWS 认证实验室测试，记录完整。

EN 26848:1991:

检测内容：化学成分、环保合规（RoHS）、电性能（起弧电压 $< 12 \text{ V}$ ）。

测试方法：ICP-MS、EN 287 焊接试验、表面分析。

要求：CE 认证，环保检测优先。

8.7.2 国内检测规范

GB/T 14841:2008:

检测内容：氧化钨（ $\pm 0.15\%$ ）、杂质（ $0 < 0.01\%$ ）、密度（ $> 19.2 \text{ g/cm}^3$ ）、起弧时间（ < 0.4 秒）。

测试方法：AAS、红外吸收、阿基米德法、模拟焊接。

要求：每批抽样 10%，强制执行。

JB/T 4730:2005:

检测内容：化学、物理、电学性能、质量评定。

版权与免责声明

测试方法：ICP-OES、硬度测试、焊接试验、显微检查。

要求：提供检验报告，抽样 5%-10%。

发展趋势：

标准更新：ISO 6848 和 GB/T 14841 计划 2025 年修订，增加微焊接和环保检测。

智能化规范：推广 AI 测试标准，检测效率提高 50%。

国际化对接：GB/T 14841 与 ISO 6848 互认率达 95%。



中钨智造 WL20 电极

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（La₂O₃）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备
 等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统
 不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接
 自动化焊接、机器人焊接系统
 航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com
 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
 更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。
 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

第九章 钨钨电极的发展趋势与挑战

钨钨电极作为高性能焊接和切割材料，在航空航天、核工业、汽车制造及电子工业中具有广泛应用。随着全球对高精度焊接和绿色制造的需求增加，钨钨电极的技术和市场正经历快速变革。本章将详细探讨钨钨电极的技术发展趋势（新型掺杂技术、高性能电极研发、环保生产工艺）、市场发展趋势（全球及国内市场需求）以及面临的挑战（原材料成本、环保法规、国际竞争）。

9.1 钨钨电极的技术发展趋势

技术进步是钨钨电极产业发展的核心驱动力，涉及新型掺杂技术、高性能电极研发以及环保生产工艺的推广。这些趋势旨在提升电极性能、降低生产成本并满足全球环保法规要求。

9.1.1 新型掺杂技术的开发

掺杂技术是优化钨钨电极性能的关键，新型掺杂技术通过引入复合氧化物、纳米颗粒或多元掺杂体系，进一步提升电子逸出功、电弧稳定性及抗烧损性能。

技术方向：

复合掺杂：在氧化钨（ La_2O_3 ）基础上添加其他稀土氧化物（如 CeO_2 、 Y_2O_3 、 ZrO_2 ），形成多元掺杂体系。例如， $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2$ （1:1）复合掺杂可降低电子逸出功至 2.5 eV，提升起弧性能 20%。

纳米掺杂：采用纳米级氧化钨（粒径 <50 nm）或纳米复合颗粒（如 $\text{La}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ ），提高掺杂均匀性（偏差 $<2\%$ ），增强晶粒细化效果，晶粒尺寸减小至 5-10 微米。

液相掺杂：通过湿法化学合成（如溶胶-凝胶法）将氧化钨均匀分散在钨粉中，取代传统干法球磨，均匀性提高 30%，减少偏析率至 $<1\%$ 。

技术优势：

性能提升：复合掺杂电极（如 $\text{WL15}+\text{Ce}$ ）在低电流（ <10 安）下起弧时间缩短至 0.3 秒，电弧稳定性提高 15%（电压波动 $<\pm 0.3$ V）。

寿命延长：纳米掺杂电极抗烧损性能提升 20%，尖端消耗率降至 0.2 毫米/小时（200 安，ISO 6848）。

工艺优化：液相掺杂减少研磨时间 50%，能耗降低 30%，适合大规模生产。

关键技术：

纳米颗粒制备：采用等离子体喷雾或化学气相沉积（CVD）制备纳米氧化钨，粒径控制精度 ± 5 nm。

掺杂均匀性：使用高分辨率扫描电镜（SEM-EDS）监控氧化物分布，偏差 $<2\%$ 。

工艺控制：开发智能配料系统，精确控制掺杂比例（ $\pm 0.01\%$ ），提高批次一致性。

发展趋势：

多元掺杂体系：开发三元或四元掺杂（如 $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$ ），优化电极综合性能。

智能化掺杂：集成 AI 算法，实时优化掺杂参数，均匀性提高 50%。

低成本技术：推广湿法掺杂，替代高能耗球磨，成本降低 20%-30%。

版权与免责声明

9.1.2 高性能钨电极的研发

高性能钨电极针对航空航天、核工业及微焊接等高端应用，重点提升低电流起弧、超高电流抗烧损及表面质量。

技术方向：

微焊接电极：开发超细直径（0.1-0.5 mm）电极，满足半导体和医疗器械的微等离子焊接需求，起弧电流<1 安，电压<10 V。

高电流电极：针对等离子切割（>500 安），研发高抗烧损电极，尖端消耗率<0.5 毫米/小时，提升寿命 30%。

表面优化：通过激光抛光或等离子处理，表面粗糙度降至 Ra<0.1 微米，电弧稳定性提高 10%。

技术优势：

微焊接性能：超细电极在 0.5 安下起弧时间<0.2 秒，适合芯片封装焊接。

高电流耐用性：高性能 WL20 电极在 500 安下连续工作 10 小时，尖端形变<0.3 毫米。

表面质量：超低粗糙度减少电弧漂移，焊缝缺陷率降低 20%。

关键技术：

超细拉拔：开发金刚石模具（孔径精度±0.005 mm），实现 0.1 毫米电极生产。

高温烧结：采用热等静压（HIP，2000℃，200 MPa），密度达 99.8%，消除微孔。

表面处理：使用激光微加工，控制抛光深度<1 微米。

发展趋势：

超微电极：开发<0.1 毫米电极，满足纳米级焊接需求。

多功能电极：研发兼顾微焊接和高电流切割的复合电极。

智能化研发：通过机器学习模拟电极性能，缩短研发周期 50%。

9.1.3 环保生产工艺的推广

环保生产工艺响应全球绿色制造趋势，旨在降低能耗、减少排放并提高资源利用率，符合欧盟 RoHS 指令和中国绿色制造政策（GB/T 26572）。

技术方向：

低能耗烧结：采用感应加热或微波烧结，温度 2000℃，能耗降低 30%，废气排放减少 50%。

废料回收：开发闭循环回收系统，废钨粉和废电极回收率>85%，氧化钨回收率>80%。

绿色清洗：使用超临界 CO₂或水基清洗剂，替代化学溶剂，废液排放量减少 70%。

技术优势：

节能减排：微波烧结能耗降低至 500 kWh/吨，CO₂排放<0.5 吨/吨电极。

资源高效：废料回收降低原材料成本 20%，符合循环经济要求。

环保合规：绿色清洗满足欧盟 REACH 法规，废水重金属含量<0.1 mg/L。

关键技术：

版权与免责声明

烧结优化：使用多段控温（升温率 500°C/h），减少热损失。

回收工艺：采用酸浸-萃取技术，回收钨纯度>99.95%。

清洗控制：超临界 CO₂ 压力控制在 10-15 MPa，清洗效率>99%。

发展趋势：

零排放工艺：开发全电烧结技术，废气排放量<0.01 mg/m³。

循环经济：推广全流程回收，资源利用率达 95%。

绿色认证：建立全球统一的绿色电极认证体系，符合 ISO 14001。

9.2 钨电极的市场发展趋势

钨电极的市场受全球焊接需求、区域经济发展及技术进步驱动，呈现快速增长和区域差异化的趋势。

9.2.1 全球市场需求分析

市场规模：

根据 2023 年全球钨电极市场报告，钨电极市场规模从 2015 年的 10 亿美元增长至 2023 年的 18 亿美元，年均增长率 8.5%。

预计 2025-2030 年，市场规模将达 25 亿美元，增长驱动因素包括航空航天（30%）、汽车制造（25%）和能源工业（20%）。

区域分布：

北美：占全球市场 30%，主要需求来自航空航天（Boeing、NASA）和能源（API 1104 管道焊接）。AWS A5.12 认证电极（如 Lincoln Electric）占主导。

欧洲：占 25%，需求集中于汽车（大众、宝马）和核工业（法国 EDF）。EN 26848 和 RoHS 法规推动钨电极取代钍钨电极，市场占比达 45%。

亚太：占 40%，中国、日本和韩国是主要市场。中国占亚太市场的 60%，得益于“一带一路”项目和航空航天（C919）需求。

驱动因素：

技术进步：高性能电极（如 WL20）满足微焊接和等离子切割需求，市场份额增长 20%。

环保法规：欧盟 RoHS 和 REACH 法规限制钍钨电极，钨电极需求增长 30%。

基础设施建设：全球新能源（风电、核电）和高铁项目增加，焊接需求年增 10%。

挑战：

高端市场（如航空航天）对质量要求高，中小企业的技术水平难以满足。

区域标准差异（ISO、AWS、EN）增加企业合规成本 5%-10%。

原材料价格波动（钨价 2023 年涨 15%）影响成本竞争力。

发展趋势：

高端化：航空航天和半导体市场对 WL20 需求增长 15%，推动高性能电极研发。

区域扩张：亚太市场（尤其是印度、东南亚）预计增长 12%，得益于制造业转移。

供应链整合：跨国企业通过并购整合供应链，市场集中度提高 10%。

版权与免责声明

9.2.2 国内市场前景

市场规模：

中国是全球最大钨资源国，2023 年钨钨电极市场规模约 6 亿美元，占全球 33%，年均增长 10%。

预计 2025-2030 年，国内市场将达 10 亿美元，占全球 40%，受航空航天、核电和高铁需求驱动。

应用领域：

航空航天：C919、ARJ21 等项目需求 WL20 电极，年用量增长 15%，符合 GJB 1718 标准。

核工业：华龙一号、CAP1400 核电站建设需求 WL15 电极，市场份额占 30%。

高铁与船舶：高铁车厢和 LNG 船焊接需求 WL10，增长率 12%，符合 TB/T 2653 和 CCS 标准。

电子工业：5G 设备和芯片制造需求超细电极 ($<0.5\text{ mm}$)，市场增长 20%。

竞争格局：

国内企业占市场 70%，通过 GB/T 14841 认证，成本优势明显（比进口低 20%）。

国际品牌占高端市场 30%，依赖 AWS 和 EN 认证。

中小企业通过低成本 WL10 生产，占据低端市场，利润率 5%-10%。

驱动因素：

政策支持：中国“十四五”规划推动高端制造，钨钨电极需求增长 15%。

出口增长：“一带一路”项目带动电极出口，年增 20%，东南亚和中东市场占 50%。

技术升级：国产设备（如微波烧结炉）降低生产成本 10%，提升竞争力。

发展趋势：

本地化生产：国产电极品牌市场份额预计达 80%，进口依赖降至 10%。

绿色制造：绿色生产认证企业市场占比增至 50%。

智能化应用：智能焊接设备（如 OTC 机器人）推动 WL15 需求增长 15%。

9.3 钨钨电极面临的挑战

尽管钨钨电极市场前景广阔，但面临原材料成本、环保法规及国际竞争的挑战，需采取针对性策略应对。

9.3.1 原材料成本控制

挑战：

钨价波动：2023 年钨精矿价格上涨 15%（约 2 万元/吨），电极生产成本增加 10%-20%。

氧化钨成本：高纯氧化钨 ($>99.99\%$) 价格约 5 万元/吨，占电极成本 30%，纳米级氧化钨价格更高（10 万元/吨）。

供应链风险：中国钨资源占全球 80%，但出口限制和地缘政治影响供应链稳定性。

应对策略：

资源整合：通过垂直整合，降低原材料成本 15%。

替代材料：研发低钨含量电极（如 WL05, $0.5\% \text{ La}_2\text{O}_3$ ），成本降低 20%。

版权与免责声明

回收利用：推广废钨回收（回收率>85%），原材料成本降低 10%-15%。

发展趋势：

循环经济：废料回收率达 95%，成本降低 30%。

替代掺杂：开发低成本氧化物（如 CeO_2 ），替代部分氧化镧。

智能化采购：通过大数据预测钨价，优化采购时机。

9.3.2 环保法规的约束

挑战：

国际法规：欧盟 RoHS 和 REACH 法规限制钨电极，增加钨电极合规成本 10%（如 CE 认证）。

国内法规：中国《大气污染物综合排放标准》（GB 16297）要求粉尘排放 $<0.1 \text{ mg/m}^3$ ，烧结和研磨设备升级成本约 500 万元。

废料处理：废液和废气处理需符合 GB 8978 标准，处理成本占生产成本 15%。

应对策略：

绿色工艺：采用微波烧结和水基清洗，废气排放减少 50%，符合 GB 16297。

回收体系：建立闭循环回收，废钨和氧化镧回收率>80%，废液排放量降至 $0.01 \text{ m}^3/\text{吨}$ 。

认证支持：与 TÜV 等机构合作，降低 CE 认证成本 20%。

发展趋势：

零排放技术：开发全电烧结，废气排放量 $<0.01 \text{ mg/m}^3$ 。

绿色认证：全球统一绿色电极标准，认证成本降低 30%。

政策协同：中欧联合制定环保标准，合规成本降低 15%。

9.3.3 国际市场竞争

挑战：

品牌竞争：国际品牌通过 AWS 和 EN 认证占据欧美高端市场，份额 60%。

技术壁垒：欧美企业的高性能电极（如纳米掺杂 WL20）技术领先，国内企业研发投入不足（仅占收入 5%）。

贸易壁垒：美国和欧盟的反倾销税（10%-20%）限制中国电极出口，2023 年出口额下降 5%。

应对策略：

技术升级：加大研发投入（占收入 10%），开发复合掺杂和高性能电极，缩小技术差距。

品牌建设：通过 ISO 6848 认证，提升国产电极国际认可度，出口增长 20%。

区域市场：深耕“一带一路”市场，出口东南亚和中东，市场份额增至 30%。

发展趋势：

技术共享：中欧联合研发中心，技术差距缩小 50%。

市场多元化：开拓非洲和南美市场，出口增长 15%。

品牌国际化：国产电极品牌全球市场份额达 20%。

版权与免责声明



中钨智造 WL20 电极

第十章 结论

钨电极作为一种高性能焊接和切割材料，以其优异的电学性能、机械性能和环保特性，在航空航天、核工业、汽车制造及电子工业中得到了广泛应用。本章总结钨电极的综合优势，提出对钨电极行业发展的建议，并展望其未来研究方向，为行业从业者、研究机构及政策制定者提供参考，推动钨电极产业的可持续发展。

10.1 钨电极的综合优势

钨电极因其独特的化学组成、物理性能和电学特性，在全球焊接材料市场中占据重要地位，逐步取代钍钨电极，成为 TIG 焊接、等离子焊接和切割的主流选择。其综合优势体现在以下几个方面：

优异的电学性能：

低电子逸出功：钨电极(WL10、WL15、WL20)的电子逸出功为 2.6-3.2 eV(ISO 6848:2015)，低于纯钨电极 (4.5 eV)，使低电流起弧性能卓越，起弧时间<0.4 秒，起弧电压<12 V，适合微焊接（如半导体芯片封装，电流<1 安）。

电弧稳定性：氧化钨的均匀分布（偏差<±0.15%）确保电弧电压波动<±0.5 V(AWS A5.12)，焊缝质量高，航空航天应用（如 C919 飞机钛合金焊接）合格率达 99.8%。

宽电流适用性：WL20 电极在 10-500 安范围内表现出色，满足从薄板焊接到等离子切割的多样化需求。

优越的机械性能：

抗烧损性能：在 200 安电流下，尖端消耗率<0.3 毫米/小时 (GB/T 14841)，延长电极寿命 30%，降低更换频率，成本节约 15%。

版权与免责声明

高硬度与耐磨性：维氏硬度 400-450 HV，晶粒尺寸 10-20 微米，耐磨性优于钨钨电极，适合高频拉拔和长期使用。

高密度：密度 $>19.2 \text{ g/cm}^3$ (ISO 6848)，无孔隙，机械强度高，适合高负荷工况（如核电站管道焊接）。

环保与安全性：

无放射性：相较于钨钨电极（含放射性 ThO_2 ），钨钨电极无放射性风险，符合欧盟 RoHS 指令（2002/95/EC）和中国绿色制造标准（GB/T 26572），推动其在欧美市场取代钨钨电极，市场份额从 2010 年的 15% 增至 2023 年的 40%。

绿色生产潜力：废料回收率 $>85\%$ ，废气排放 $<0.1 \text{ mg/m}^3$ (GB 16297)，支持循环经济，降低环境污染。

市场竞争力：

成本效益：国产钨钨电极生产成本比进口品牌低 20%-30%，通过 GB/T 14841 认证，满足国内航空航天、高铁等项目需求。

全球适用性：符合 ISO 6848、AWS A5.12 和 EN 26848 标准，涂色标识统一（WL15 金黄色、WL20 天蓝色），便于全球贸易，出口额从 2015 年的 10 亿美元增至 2023 年的 18 亿美元。

多样化应用：从航空航天（钛合金焊接）到电子工业（超细电极 $<0.5 \text{ mm}$ ），应用领域广泛，市场年增长率 8.5%。

技术适应性：

自动化兼容：钨钨电极尺寸公差和表面粗糙度满足自动化焊接设备要求，生产效率提高 20%。

工艺稳定性：通过液相掺杂和微波烧结，批次一致性提高 30%，减少生产缺陷率至 $<1\%$ 。

10.2 对钨电极行业发展的建议

为推动钨钨电极及整个钨电极行业的可持续发展，结合技术、市场和政策趋势，提出以下建议：

加大研发投入：

复合掺杂技术：企业应投入研发资金（占收入 10%-15%），开发 $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$ 等多元掺杂电极，降低电子逸出功至 2.5 eV，提升起弧性能 20%。

超细电极：针对半导体和医疗器械需求，研发直径 $<0.1 \text{ mm}$ 电极，满足微焊接（ $<1 \text{ A}$ ）要求，抢占高端市场。

智能化研发：利用 AI 和 DFT（密度泛函理论）模拟电极性能，缩短研发周期 50%，降低试验成本 30%。

推进绿色制造：

低能耗工艺：推广微波烧结和全电烧结技术，能耗降低 30%，废气排放 $<0.01 \text{ mg/m}^3$ ，符合 GB 16297 和 ISO 14001。

废料回收：建立闭循环回收体系，废钨和氧化钨回收率达 95%，原材料成本降低 20%，支持循环经济。

绿色认证：鼓励企业获取 ISO 14001 和欧盟 REACH 认证，提升产品在欧美市场的竞争力，认

证成本降低 20%。

优化供应链管理：

原材料稳定：通过与钨矿企业（如赣州钨业）合作，稳定钨精矿供应，价格波动影响降至 5%。

区域市场布局：深耕“一带一路”市场，出口东南亚和中东，市场份额增至 30%，降低对欧美市场依赖。

垂直整合：通过并购整合钨粉、电极生产和回收企业，供应链效率提高 15%，成本降低 10%。

加强标准国际化：

标准对接：推动 GB/T 14841 与 ISO 6848 互认率达 95%，降低跨国企业合规成本 10%。

参与制定：中国企业应积极参与 ISO/TC 44，争取 30%席位，提升国际标准话语权。

多语言支持：提供多语言标准文件（中、英、德、法），便于全球推广。

人才培养与技术推广：

产学研合作：与清华大学、哈尔滨工业大学等建立联合实验室，培养掺杂技术人才，研发成果转化提高 50%。

技术培训：为中小企业提供绿色生产和检测技术培训，合规率提高 30%，成本降低 15%。

国际交流：通过“一带一路”焊接技术论坛，推广中国标准和技术，出口增长 20%。

市场多元化：

新兴市场：开拓非洲和南美市场，预计增长 15%，重点推广低成本 WL10 电极。

高端应用：针对航空航天和半导体，开发高性能 WL20 电极，市场份额增至 20%。

品牌建设：打造国产电极品牌国际形象，全球市场份额达 20%。

10.3 钨钨电极未来研究方向

钨钨电极的未来研究需聚焦技术突破、市场需求及环保要求，以下为主要方向：

新型掺杂体系：

多元掺杂：研发 $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2+\text{ZrO}_2$ 等三元或四元掺杂体系，优化电子逸出功 ($<2.5\text{ eV}$) 和抗烧损性能 (消耗率 $<0.2\text{ 毫米/小时}$)。

纳米掺杂：开发 $<20\text{ nm}$ 氧化物颗粒，晶粒尺寸降至 5 微米，电弧稳定性提高 20%。

功能化掺杂：引入导电或热稳定氧化物（如 TiO_2 ），提升电极在极端工况 ($>500\text{ 安}$) 下的性能。

高性能电极开发：

超细电极：开发 $<0.05\text{ 毫米}$ 电极，满足纳米级焊接需求，起弧电压 $<8\text{ V}$ 。

高电流电极：针对等离子切割 ($>1000\text{ 安}$)，研发抗烧损电极，寿命延长 50%。

自适应电极：开发智能电极，动态调整电弧特性，适应交流、直流和脉冲电流。

绿色制造技术：

零排放工艺：开发全电烧结和等离子烧结，废气排放 $<0.005\text{ mg/m}^3$ ，符合未来环保法规。

高效回收：实现废钨和氧化钨 100%回收，成本降低 30%。

生物基清洗：研发酶基清洗剂，替代化学溶剂，废液排放量减少 90%。

版权与免责声明

中钨智造科技有限公司
钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种以高纯钨为基体，添加少量氧化钨（La₂O₃）精制而成的非放射性稀土钨电极。它兼具优异的导电性、热稳定性与电子发射能力，是现代焊接领域特别是在 TIG（钨极氩弧焊）与等离子焊接中广泛采用的优质电极材料。相比传统钍钨电极，钨钨电极不仅绿色环保，而且起弧更容易、寿命更长。

二、钨钨电极种类

型号	涂头颜色	氧化钨含量 (wt.%)	特点与应用
WL10	黑色	0.8 - 1.2%	起弧柔和，电弧集中，适用于低电流和精密焊接
WL15	金色	1.3 - 1.7%	性能均衡，焊接稳定性好，适用于直流/交流两用焊
WL20	天蓝色	1.8 - 2.2%	高电弧强度与耐烧损性能，适用于高电流与连续焊接

三、中钨智造钨钨电极基本规格

直径 (mm)	长度 (mm)	常规涂色	包装方式
1.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
1.6	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
2.4	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
3.2	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
4.0	150 / 175	黑 / 金 / 蓝	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

各类 TIG（氩弧焊）设备
 等离子弧焊（PAW）与等离子切割系统
 不锈钢、碳钢、铝合金、镍合金等金属焊接
 自动化焊接、机器人焊接系统
 航空航天、精密医疗设备、核能工程、电子制造等高端工业领域

四、采购信息

邮箱: sales@chinatungsten.com
 电话: +86 592 5129595; 592 5129696
 更多钨电极资讯，请访问中钨在线网站 (www.tungsten.com.cn)。
 更多市场与实时资讯，请扫描左侧二维码关注微信公众号“中钨在线”。



版权与免责声明

智能化检测与生产:

AI 检测: 开发基于 AI 的 SEM 图像分析和电弧稳定性测试, 检测效率提高 50%。

在线监控: 集成物联网 (IoT) 系统, 实时监控掺杂、烧结和检测过程, 批次一致性提高 30%。

数字孪生: 建立电极生产数字孪生模型, 优化工艺参数, 生产效率提高 20%。

新应用领域:

增材制造: 开发钨钨电极用于 3D 打印金属焊接, 满足航空航天零件高精度要求。

新能源: 针对风电和光伏设备焊接, 研发耐腐蚀电极, 寿命延长 25%。

医疗器械: 开发超细电极用于微创手术设备制造, 市场增长 20%。

标准与认证研究:

国际化标准: 推动 ISO 6848 新版制定, 涵盖微焊接和绿色制造要求, 预计 2027 年发布。

绿色认证: 开发全球统一的绿色电极认证体系, 认证成本降低 30%。

跨国互认: 实现 GB/T 14841 与 AWS A5.12、EN 26848 的全面互认, 贸易壁垒降低 15%。

跨学科研究:

材料科学: 结合量子化学模拟, 预测掺杂氧化物与钨基体的相互作用, 优化配方。

大数据分析: 利用焊接数据分析电极性能, 开发个性化电极设计。

环境科学: 研究电极生产的环境影响, 制定碳中和生产路径。



中钨智造 WL20 电极

附录

A. 术语表

钨钍电极：在钨基体中掺杂氧化钍的电极材料，用于焊接与切割。

氧化钍：化学式 La_2O_3 ，用于提高钨电极的电子逸出功和焊接性能。

电子逸出功：电子从材料表面逸出所需的最小能量，影响电弧起弧性能。

起弧性能：电极在焊接过程中引发电弧的难易程度。

电弧稳定性：电弧在焊接过程中保持稳定燃烧的能力。

抗烧损性能：电极在高温电弧作用下抵抗烧蚀的能力。

TIG 焊接：钨极惰性气体保护焊，使用钨电极进行高精度焊接。

等离子切割：利用高温等离子弧切割金属的工艺。

烧结：将粉末材料加热至低于熔点的温度使其结合成致密体的过程。

锻造：通过外力使材料变形以改善其机械性能的加工工艺。

拉拔：将金属棒材通过模具拉伸成细长形状的加工方法。

ISO 6848：国际标准化组织制定的钨电极分类与要求标准。

AWS A5.12：美国焊接学会制定的钨电极规范。

GB/T 14841：中国国家标准，规定钨电极的技术要求。

SEM：扫描电子显微镜，用于分析材料表面形貌与结构。

XRD：X 射线衍射，用于分析材料的晶体结构。

B. 参考文献

- [1] 钨钍电极的类型及钨钍的优点 - news.chinatungsten.com
- [2] EN 26848:1991, Tungsten electrodes for welding.
- [3] GB/T 14841-2008, 钨电极技术条件.
- [4] 钨钍电极市场分析 - Global Tungsten Electrode Market Report, 2023.
- [5] 绿色制造技术在钨电极中的应用 - China Welding Journal, 2022.
- [6] 中钨在线科技有限公司 - www.chinatungsten.com.
- [7] 钨资源与市场趋势 - Journal of Materials Science, 2021.
- [8] 欧盟 RoHS 与 REACH 法规对钨电极的影响 - Environmental Regulations, 2022.
- [9] “一带一路”焊接材料市场分析 - International Trade Review, 2023.
- [10] GB/T 26572-2011, 绿色制造技术规范.
- [11] 钨钍电极技术进展 - Advanced Materials Research, 2020.
- [12] 全球钨电极市场预测 - Market Analysis Report, 2023.
- [13] EN 26848:1991, Tungsten electrodes for welding.
- [14] JB/T 4730-2005, 焊接材料质量检验方法.
- [15] 钨钍电极检测技术研究 - China Welding Journal, 2022.
- [16] 钨电极化学成分分析方法 - Analytical Chemistry, 2021.
- [17] SEM 和 XRD 在钨电极中的应用 - Materials Characterization, 2020.
- [18] 电学性能测试技术进展 - Journal of Welding Technology, 2023.
- [19] 绿色检测技术在钨电极中的应用 - Environmental Science, 2022.
- [20] ISO/TC 44 焊接技术委员会报告, 2023.
- [21] ISO 6848:2015, Welding consumables — Tungsten electrodes for inert gas

版权与免责声明

shielded arc welding and for plasma welding and cutting.

[22] AWS A5.12:2009, Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes.