

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

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

版权与免责声明

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2025V
sales@chinatungsten.com

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化钨（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化钨含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



目录

第一章 引言

- 1.1 钨钨电极概述
- 1.2 钨钨电极的历史与发展
- 1.3 钨钨电极在现代工业中的重要性

第二章 钨钨电极的基本概念

- 2.1 钨钨电极的定义
- 2.2 钨钨电极的化学组成
- 2.3 钨钨电极与其他钨电极对比
- 2.4 钨钨电极的物理与化学特性
 - 2.4.1 熔点与热稳定性
 - 2.4.2 导电性与导热性
 - 2.4.3 抗氧化性与耐腐蚀性
 - 2.4.4 机械性能（硬度、延展性等）

第三章 钨钨电极的牌号

- 3.1 钨钨电极牌号分类
 - 3.1.1 国际常用牌号（如 WZ3、WZ8）
 - 3.1.2 国内牌号命名规则
- 3.2 各牌号的钨含量与性能差异
- 3.3 钨钨电极牌号选择与应用场景
- 3.4 钨钨电极牌号标准化与国际对照

第四章 钨钨电极的特性

- 4.1 钨钨电极的电弧稳定性
- 4.2 钨钨电极的点火性能与电极寿命
- 4.3 钨钨电极的抗烧损与抗污染能力
- 4.4 钨钨电极在不同焊接环境下的表现
 - 4.4.1 直流焊接（DC）
 - 4.4.2 交流焊接（AC）
- 4.5 钨钨电极的热力学特性
- 4.6 钨钨电极的微观结构分析
- 4.7 中钨智造钨钨电极 MSDS

第五章 钨钨电极的制备生产工艺

- 5.1 钨钨电极的原料准备
 - 5.1.1 钨粉与钨化合物的选择
 - 5.1.2 原料纯度与预处理
- 5.2 钨钨电极的粉末冶金工艺
 - 5.2.1 混合与研磨

- 5.2.2 压制成型
- 5.2.3 烧结工艺
- 5.3 钨钨电极的成型技术
 - 5.3.1 拉拔与挤压
 - 5.3.2 热处理与退火
- 5.4 钨钨电极的表面处理与抛光
- 5.5 钨钨电极的质量控制与工艺优化

第六章 钨钨电极的生产技术

- 6.1 钨钨电极的掺杂技术
 - 6.1.1 钨氧化物的掺杂方法
 - 6.1.2 掺杂均匀性控制
- 6.2 钨钨电极的高温烧结技术
- 6.3 钨钨电极的精密加工技术
- 6.4 钨钨电极的自动化与智能化生产技术
- 6.5 钨钨电极的绿色生产与环保技术
- 6.6 生产中的常见问题与解决方案

第七章 钨钨电极的用途

- 7.1 钨钨电极在 TIG 焊接中的应用
 - 7.1.1 铝及铝合金焊接
 - 7.1.2 不锈钢与镁合金焊接
- 7.2 钨钨电极在等离子切割与喷涂中的应用
- 7.3 钨钨电极的其他工业应用
 - 7.3.1 航空航天
 - 7.3.2 核工业
 - 7.3.3 医疗设备制造
- 7.4 钨钨电极在特殊环境下的应用
- 7.5 钨钨电极的替代品与竞争分析

第八章 钨钨电极的生产设备

- 8.1 钨钨电极的原料处理设备
 - 8.1.1 研磨与混合设备
 - 8.1.2 筛分与分级设备
- 8.2 钨钨电极的压制与成型设备
 - 8.2.1 液压机与等静压机
 - 8.2.2 模具设计与制造
- 8.3 钨钨电极的烧结与热处理设备
 - 8.3.1 高温烧结炉
 - 8.3.2 真空热处理炉
- 8.4 钨钨电极的精密加工设备
 - 8.4.1 拉拔机与切割机

- 8.4.2 表面抛光设备
- 8.5 钨钨电极的质量检测设备
- 8.6 钨钨电极的设备维护与优化

第九章 钨钨电极的国内外标准

- 9.1 钨钨电极的国际标准
 - 9.1.1 ISO 标准（如 ISO 6848）
 - 9.1.2 AWS 标准（如 AWS A5.12）
- 9.2 钨钨电极的国内标准
 - 9.2.1 GB/T 标准
 - 9.2.2 行业标准与企业标准
- 9.3 钨钨电极标准的内容与要求
 - 9.3.1 化学成分要求
 - 9.3.2 物理性能要求
 - 9.3.3 尺寸与公差要求
- 9.4 钨钨电极国内外标准的对比与协调
- 9.5 钨钨电极标准的更新与发展趋势

第十章 钨钨电极的检测方法

- 10.1 钨钨电极的化学成分检测
 - 10.1.1 光谱分析
 - 10.1.2 化学滴定法
- 10.2 钨钨电极的物理性能检测
 - 10.2.1 硬度测试
 - 10.2.2 密度与孔隙率测试
- 10.3 钨钨电极的微观结构分析
 - 10.3.1 扫描电子显微镜（SEM）
 - 10.3.2 X 射线衍射（XRD）
- 10.4 钨钨电极的电极性能测试
 - 10.4.1 电弧稳定性测试
 - 10.4.2 点火性能与寿命测试
- 10.5 钨钨电极的环境适应性测试
- 10.6 钨钨电极检测设备的校准与标准化
- 10.7 钨钨电极检测中的常见问题与解决方案

第十一章 钨钨电极的未来发展趋势

- 11.1 新材料与新技术的发展
- 11.2 钨钨电极的性能优化方向
- 11.3 智能化与自动化生产的趋势
- 11.4 绿色制造与可持续发展
- 11.5 钨钨电极在新兴领域的潜力

第十二章 钨电极的回收与循环利用

- 12.1 报废电极的回收处理工艺
- 12.2 钨材料的再生利用与经济价值
- 12.3 回收流程中的污染控制与环保规范
- 12.4 国内外钨回收现状与发展趋势

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

第一章 引言

1.1 钨钨电极概述

钨钨电极 (Zirconium Tungsten Electrode) 是一种以钨为基体、掺杂少量氧化锆 (ZrO_2) 的特种电极材料, 广泛应用于钨极惰性气体保护焊接 (TIG 焊接)、等离子切割、等离子喷涂以及其他高温高电流的工业场景。钨钨电极因其优异的电弧稳定性、点火性能和抗烧损能力, 成为焊接和切割领域不可或缺的材料, 尤其在交流 (AC) 焊接中表现出色, 适用于铝、镁及其合金等轻金属的加工。

钨钨电极的化学组成主要包括高纯度钨 (通常纯度超过 99.5%) 和少量氧化锆 (一般为 0.15% 至 0.8%)。氧化锆的掺杂显著改善了钨电极的性能, 使其在高温电弧环境下能够维持稳定的电子发射能力和较长的使用寿命。相比纯钨电极, 钨钨电极具有更低的电极烧损率和更高的抗污染能力, 这使其在对焊接质量要求极高的场景中具有显著优势。与其他掺杂电极 (如钍钨、铈钨或镧钨电极) 相比, 钨钨电极在交流焊接中表现出更好的电弧集中性和较低的电极尖端熔化风险, 尤其适合焊接铝合金等对电极性能敏感的材料。

钨钨电极的牌号通常以 “WZ” 开头, 后面接数字表示氧化锆的含量, 例如 WZ3 (含 0.3% 氧化锆) 和 WZ8 (含 0.8% 氧化锆)。这些牌号的性能差异主要体现在电弧稳定性、点火性能和使用寿命上, 具体选择取决于焊接电流、材料类型和工艺要求。钨钨电极的物理特性包括高熔点 (约 $3422^{\circ}C$, 接近纯钨)、良好的导电性和导热性, 以及优异的抗氧化性和耐腐蚀性。这些特性使其能够在极端条件下保持性能稳定, 成为高精度焊接和切割的理想选择。

钨钨电极的生产过程涉及粉末冶金、掺杂、烧结、拉拔和表面处理等多个步骤。生产工艺的复杂性要求高精度的设备和严格的质量控制, 以确保电极的化学成分均匀性和微观结构的稳定性。近年来, 随着绿色制造和智能化生产技术的发展, 钨钨电极的生产工艺不断优化, 产品质量和一致性显著提升。

1.2 钨钨电极的历史与发展

钨钨电极的研发和应用历史可以追溯到 20 世纪中期, 当时焊接技术随着工业化的推进迅速发展。钨极惰性气体保护焊接 (TIG 焊接) 在 20 世纪 40 年代逐渐成熟, 最初主要使用纯钨电极。然而, 纯钨电极在交流焊接中存在电弧不稳定、点火困难和电极烧损严重等问题, 限制了其在高要求场景中的应用。为了解决这些问题, 科研人员开始探索向钨基体中掺杂氧化物以改善其性能。

20 世纪 50 年代, 氧化锆作为一种掺杂材料被引入钨电极的制造中。氧化锆具有高熔点、耐高温和化学稳定性等特点, 能够有效提升钨电极的电子发射能力和抗烧损性能。早期的钨钨电极主要用于实验性应用, 其生产工艺较为粗糙, 掺杂均匀性和电极质量稳定性较差。随着粉末冶金技术和高温烧结技术的进步, 钨钨电极的性能在 20 世纪 60 年代得到显著提升, 逐渐被工业界接受并广泛应用于铝合金和镁合金的焊接。

20 世纪 70 年代, 国际标准化组织 (ISO) 和美国焊接学会 (AWS) 开始制定钨电极的相关标准, 包括钨钨电极的化学成分、性能要求和牌号分类。这些标准的出台推动了钨钨电极的规

范化生产和全球化应用。同一时期，钨钨电极的牌号体系逐渐完善，WZ3 和 WZ8 等牌号成为主流，其性能差异被系统研究并应用于不同焊接场景。

进入 21 世纪，随着航空航天、核工业和医疗设备制造等高新技术领域的快速发展，钨钨电极的应用范围进一步扩大。现代钨钨电极的生产已实现高度自动化，采用先进的掺杂技术和精密加工设备，确保了电极的高一致性和可靠性。同时，绿色制造理念的引入推动了生产过程中的环保优化，例如减少废料排放和提高原料利用率。

近年来，钨钨电极的研发重点转向性能优化和多功能化。例如，针对高电流交流焊接的需求，科研人员开发了新型钨钨电极配方，以进一步提高电弧集中性和电极寿命。此外，纳米技术在钨钨电极生产中的应用也成为研究热点，纳米级氧化钨颗粒的掺杂能够显著改善电极的微观结构和性能。

1.3 钨钨电极在现代工业中的重要性

钨钨电极在现代工业中扮演着至关重要的角色，尤其是在高精度焊接和切割领域。其重要性主要体现在以下几个方面：

首先，钨钨电极在 TIG 焊接中的应用极大提升了焊接质量和效率。TIG 焊接以其高精度、无飞溅和适用性广等特点，广泛用于航空航天、汽车制造和船舶工业等领域。钨钨电极在交流焊接中表现出优异的电弧稳定性，能够有效减少电弧漂移和焊接缺陷，特别适合焊接铝、镁等轻金属及其合金。这些材料在航空航天领域（如飞机机身、发动机部件）和汽车工业（如铝合金车身）中应用广泛，对焊接质量要求极高，钨钨电极的稳定性能为这些行业提供了可靠保障。

其次，钨钨电极在等离子切割和喷涂中的应用进一步扩展了其工业价值。等离子切割需要电极在高温高电流环境下保持稳定，钨钨电极的抗烧损能力和长寿命使其成为理想选择。在等离子喷涂中，钨钨电极能够提供稳定的等离子弧，确保涂层质量和均匀性，这在航空发动机叶片涂层和耐磨材料制备中尤为重要。

此外，钨钨电极在核工业和医疗设备制造等高新技术领域也具有重要应用。在核工业中，钨钨电极用于焊接核反应堆的关键部件，其高可靠性和抗腐蚀性能够满足极端环境的要求。在医疗设备制造中，钨钨电极用于生产高精度部件，如 X 射线设备和手术器械，其优异的性能确保了设备的长期稳定性和安全性。

钨钨电极的广泛应用还推动了相关产业链的发展。例如，钨钨电极的生产促进了钨矿开采、粉末冶金设备制造和质量检测技术的发展。同时，其标准化生产和国际贸易推动了全球焊接行业的协作与技术交流。

未来，随着智能制造和绿色生产技术的进一步发展，钨钨电极的性能和应用领域有望继续扩展。例如，在新能源领域（如风能和太阳能设备制造）和 3D 打印技术中，钨钨电极的潜在应用正在被探索。这些新兴领域对材料性能和工艺精度的要求将进一步凸显钨钨电极的重要性。



第二章 钨钨电极的基本概念

2.1 钨钨电极的定义

钨钨电极是一种以高纯度钨为基体、掺杂少量氧化锆（ ZrO_2 ）的非消耗性电极材料，主要用于钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）、等离子切割、等离子喷涂等高温高电流的工业应用。钨钨电极通过在钨基体中添加氧化锆，显著改善了电极的电弧稳定性、点火性能和抗烧损能力，使其在交流（AC）焊接中表现出色，尤其适用于焊接铝、镁及其合金等轻金属。

根据国际标准（如 ISO 6848 和 AWS A5.12），钨钨电极被定义为含有特定比例氧化锆（通常为 0.15% 至 0.8%）的钨合金电极，其牌号以“WZ”开头，例如 WZ3（0.3% 氧化锆）和 WZ8（0.8% 氧化锆）。这些电极在制造过程中通过粉末冶金技术将氧化锆均匀掺杂到钨基体中，以优化其高温性能和电学特性。钨钨电极的主要功能是作为电弧焊接或切割中的非消耗性电极，提供稳定的电弧并维持较长的使用寿命，同时避免对焊缝的污染。

钨钨电极的设计初衷是为了弥补纯钨电极在交流焊接中的不足，如电弧不稳定和电极尖端过早烧损。与其他掺杂电极（如钍钨或铈钨电极）相比，钨钨电极在交流焊接中具有独特的优势，其电弧集中性强，适合高精度焊接工艺。此外，钨钨电极不含放射性元素，相较于钍钨电极更为环保，符合现代工业对安全性和可持续性的要求。

2.2 锆钨电极的化学组成

锆钨电极的化学组成以高纯度钨（W）为主要成分，掺杂少量氧化锆（ ZrO_2 ）作为性能增强剂。钨的纯度通常要求达到 99.5% 以上，以确保电极在高温高电流环境下的稳定性。氧化锆的掺杂比例根据电极牌号的不同而变化，通常在 0.15% 至 0.8% 之间，具体牌号如 WZ3（0.3% ZrO_2 ）和 WZ8（0.8% ZrO_2 ）。除钨和氧化锆外，锆钨电极可能含有微量杂质（如铁、硅、碳等），但这些杂质的含量需严格控制在国际标准规定的范围内（通常低于 0.05%），以避免影响电极性能。

氧化锆的加入是锆钨电极性能提升的关键。氧化锆是一种高熔点（约 $2715^{\circ}C$ ）、化学稳定性强的氧化物，能够在钨基体中形成均匀分布的微小颗粒。这些颗粒通过改变钨的晶体结构和电子发射特性，显著提高了电极的电弧稳定性和抗烧损能力。氧化锆的掺杂比例直接影响电极的性能：较低的掺杂量（如 WZ3）适用于中等电流的交流焊接，而较高的掺杂量（如 WZ8）则更适合高电流和对电弧集中性要求较高的场景。

锆钨电极的化学组成在生产过程中通过精确的原料配比和掺杂工艺控制。生产中常用的钨原料为高纯度钨粉，氧化锆通常以高纯度粉末或溶液形式加入。掺杂过程需确保氧化锆颗粒在钨基体中的均匀分布，避免局部聚集或偏析，以保证电极性能的一致性。现代生产技术还可能引入微量其他添加剂（如稀土氧化物）以进一步优化性能，但这些添加剂的使用需符合相关标准和行业要求。

2.3 锆钨电极与其他钨电极对比

锆钨电极作为钨电极家族的一员，与纯钨电极、钍钨电极、铈钨电极和铈钨电极等其他类型钨电极在性能、用途和适用场景上存在显著差异。

以下从多个维度对比锆钨电极与其他钨电极的特点：

纯钨电极（WP）

纯钨电极由 99.95% 以上的高纯度钨制成，不含任何氧化物掺杂。其优点是化学稳定性高，无放射性，适合低电流直流（DC）焊接。然而，纯钨电极在交流焊接中电弧稳定性较差，点火性能较弱，且电极尖端容易过热烧损，导致使用寿命较短。相比之下，锆钨电极通过氧化锆掺杂显著改善了交流焊接中的电弧稳定性和点火性能，特别适合焊接铝和镁合金。

钍钨电极（WT20）

钍钨电极掺杂 1.5% 至 2.0% 的氧化钍（ ThO_2 ），具有优异的点火性能和电弧稳定性，广泛用于直流焊接。然而，氧化钍具有轻微放射性，对健康和环境存在潜在风险，且在交流焊接中电弧集中性不如锆钨电极。锆钨电极无放射性，更加环保，且在交流焊接中表现出更好的电弧控制能力，适合高精度焊接。

铈钨电极（WC20）

铈钨电极掺杂约 2.0% 的氧化铈（ CeO_2 ），点火性能优异，适合低电流直流和交流焊接。与锆钨电极相比，铈钨电极在高电流交流焊接中的电弧稳定性稍逊，且电极寿命略短。锆钨电极在交流焊接中的抗烧损能力和电弧集中性更强，适合高要求场景。

铈钨电极 (WL15、WL20)

铈钨电极掺杂 1.0%至 2.0%的氧化铈 (La_2O_3)，具有良好的点火性能和较长的使用寿命，适用于直流和交流焊接。与钨钨电极相比，铈钨电极在直流焊接中的性能更优，但在交流焊接中电弧集中性略逊于钨钨电极，尤其在焊接铝合金时，钨钨电极的电弧控制能力更强。

总结而言，钨钨电极在交流焊接中具有独特的优势，尤其在焊接铝、镁等轻金属时表现出色。其无放射性、环保的特点使其在现代工业中逐渐取代钨钨电极，成为高精度焊接的首选电极。然而，在直流焊接或低电流场景中，铈钨或铈钨电极可能更具优势。电极的选择需根据具体工艺、电流类型和材料要求综合考虑。

2.4 钨钨电极的物理与化学特性

钨钨电极的物理与化学特性是其在高温高电流环境下优异性能的基础。以下从熔点与热稳定性、导电性与导热性、抗氧化性与耐腐蚀性、机械性能四个方面详细分析。

2.4.1 熔点与热稳定性

钨钨电极继承了钨的高熔点特性，熔点约为 3422°C （纯钨的熔点），是已知金属材料中最高的之一。氧化钨的掺杂（熔点约 2715°C ）虽略降低钨基体的理论熔点，但在实际应用中，钨钨电极仍能在高达 6000°C 的电弧环境中保持结构稳定。氧化钨颗粒在钨基体中形成稳定的分散相，能够有效抑制晶粒长大和高温形变，从而提升电极的热稳定性。

在 TIG 焊接或等离子切割中，钨钨电极需承受电弧产生的高温（约 6000°C 至 7000°C ）。其优异的热稳定性使其能够在长时间高电流工作下保持尖端形状，减少烧损和熔化现象。相比纯钨电极，钨钨电极在交流焊接中的热稳定性更优，尤其在高频切换的交流电弧中能够维持稳定的电子发射。

2.4.2 导电性与导热性

钨钨电极具有良好的导电性和导热性，这与其钨基体的特性密切相关。钨的电导率为 $1.82 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，导热系数约为 $173 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ （室温下）。氧化钨的掺杂对电导率和导热率的影响较小，但在高电流交流焊接中，钨钨电极的导电性能够确保稳定的电弧形成和能量传输。

导热性对电极的性能至关重要。在焊接过程中，电极尖端承受高温，而良好的导热性能够快速将热量从尖端传导到电极其他部分，防止局部过热和烧损。钨钨电极的导热性使其在高电流交流焊接中能够维持较低的尖端温度，延长使用寿命。

2.4.3 抗氧化性与耐腐蚀性

钨钨电极在高温环境下的抗氧化性和耐腐蚀性是其重要优势。钨本身在高温下容易与氧气反应生成挥发性氧化物（如 WO_3 ），导致电极烧损。氧化钨的掺杂通过形成稳定的氧化物层，显著提高了电极的抗氧化能力。氧化钨颗粒在电极表面形成保护层，减缓了钨与氧气的反应速率，使钨钨电极在氧化性气氛中仍能保持较长的使用寿命。

在耐腐蚀性方面，钨钨电极对常见的焊接环境中存在的化学物质（如惰性气体、金属蒸气）表现出良好的稳定性。尤其在铝合金焊接中，钨钨电极能够抵抗铝氧化物和其他污染物的影

响，减少电极尖端的污染和性能衰减。

2.4.4 机械性能（硬度、延展性等）

钨钨电极的机械性能包括高硬度、适中的延展性和良好的抗断裂能力。钨的硬度（维氏硬度约 350-400 HV）赋予钨钨电极优异的耐磨性和抗变形能力，使其能够在高频振动和机械应力下保持结构完整。氧化钨的掺杂略微提高了电极的硬度，同时改善了其抗脆性断裂的能力。

在生产过程中，钨钨电极通过拉拔和热处理工艺获得适中的延展性，使其能够加工成不同直径（如 1.0mm 至 6.4mm）和长度的电极棒。延展性的优化确保了电极在加工和使用过程中不易发生裂纹或断裂。此外，钨钨电极的抗疲劳性能使其能够在高频交流电弧中承受反复的热应力和机械应力，延长使用寿命。



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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化锆 (ZrO_2) 的非放射性焊接电极，专为 TIG (钨极氩弧焊) 交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化锆含量 (wt.%)	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



第三章 钨钨电极的牌号

3.1 钨钨电极牌号分类

钨钨电极的牌号分类是基于其氧化钨 (ZrO_2) 含量和性能特征制定的,旨在为不同焊接和切割工艺提供标准化的电极选择。牌号分类不仅便于生产和应用中的识别,还为用户提供了明确的性能指引。国际和国内市场均采用标准化的命名规则,以确保钨钨电极在全球范围内的兼容性和一致性。

3.1.1 国际常用牌号 (如 WZ3、WZ8)

国际上,钨钨电极的牌号通常遵循国际标准化组织 (ISO 6848) 和美国焊接学会 (AWS A5.12) 标准,以“WZ”开头,后面接数字表示氧化钨的大致重量百分比 (以 0.1% 为单位)。最常见的国际牌号包括 WZ3 和 WZ8,分别表示氧化钨含量为 0.3% 和 0.8%。这些牌号在全球焊接行业中广泛应用,尤其在欧美市场占据主导地位。

WZ3 (0.15% - 0.4% ZrO_2): WZ3 是钨钨电极中氧化钨含量较低的牌号,通常用于中等电流的交流 (AC) 焊接。其特点是电弧稳定性良好,点火性能优异,适合焊接铝、镁及其合金等轻金属。WZ3 电极的抗烧损能力适中,适用于对电极寿命要求不太高的场景,如小型焊接作业或低频交流焊接。

WZ8 (0.7% - 0.9% ZrO_2): WZ8 含有较高比例的氧化钨,专为高电流交流焊接设计。其电弧集中性更强,抗烧损能力优于 WZ3,适合需要高精度和高质量焊缝的场景,如航空航天部件和核工业设备制造。WZ8 电极在高频交流电弧中表现出色,能够维持稳定的电弧形状和较长的使用寿命。

除 WZ3 和 WZ8 外,部分国家和地区可能根据特定需求开发了其他非标准牌号,但这些牌号的使用范围较窄,通常仅限于特定行业或定制化应用。国际标准还规定了钨钨电极的颜色标识,WZ3 和 WZ8 通常以棕色和白色标记 (尖端或整根电极涂层),以便于现场识别。

3.1.2 国内牌号命名规则

在国内,钨钨电极的牌号命名主要遵循国家标准 (GB/T 标准),如 GB/T 4187-2017《钨电极》。国内牌号命名与国际标准类似,通常以“WZ”开头,后面接数字表示氧化钨含量,但也可能根据企业或行业需求进行扩展。国内常见的牌号包括 WZ3 和 WZ8,与国际标准一致,但在部分企业中可能使用自定义命名,如“WZr-3”或“WZr-8”,其含义与国际牌号相同。

国内牌号命名规则还可能结合电极的用途或性能进行补充说明。例如,某些企业会在牌号后添加字母或数字,表示电极的特定加工工艺或应用场景,如“WZ8-H”表示高精度加工的 WZ8 电极。国内标准对钨钨电极的化学成分、尺寸公差和性能要求有明确规定,确保其与国际标准接轨。

与国际市场相比,国内牌号命名更注重本地化应用,尤其在中小型焊接企业 and 非标设备制造中,可能存在一些非标准化的命名方式。这些命名方式通常由生产厂家根据客户需求定制,但整体仍参考 GB/T 标准,以保证产品质量和一致性。

3.2 各牌号的钨含量与性能差异

钨电极的性能差异主要源于氧化钨含量的不同。氧化钨作为掺杂剂，通过改变钨基体的微观结构和电子发射特性，显著影响电极的电弧稳定性、点火性能、抗烧损能力和使用寿命。以下详细分析 WZ3 和 WZ8 等牌号的钨含量与性能差异：

WZ3 (0.15% - 0.4% ZrO_2)

WZ3 电极的氧化钨含量较低，适合中等电流（50 - 150 A）的交流焊接。其主要性能特点包括：

电弧稳定性：WZ3 在交流焊接中提供稳定的电弧，电弧漂移较少，适合焊接薄板铝合金或镁合金。

点火性能：氧化钨的低含量使 WZ3 在点火时具有较低电子逸出功，启动电弧较为容易。

抗烧损能力：相比纯钨电极，WZ3 的抗烧损能力有所提升，但在高电流或长时间焊接中，电极尖端可能出现轻微烧损。

使用寿命：WZ3 的使用寿命适中，适合中小型焊接任务，但在高电流或高频焊接中寿命较 WZ8 略短。

微观结构：WZ3 的氧化钨颗粒分布较为稀疏，晶粒尺寸较大，适合中等强度的焊接环境。

WZ8 (0.7% - 0.9% ZrO_2)

WZ8 电极的氧化钨含量较高，专为高电流（150 - 400 A）交流焊接设计，其性能特点包括：

电弧稳定性：WZ8 的电弧集中性极强，电弧形状稳定，适合高精度焊接，如航空航天部件的 TIG 焊接。

点火性能：高氧化钨含量进一步降低电子逸出功，使 WZ8 在高频交流电弧中点火性能优异。

抗烧损能力：WZ8 的抗烧损能力显著优于 WZ3，能够在高电流和高温环境下维持尖端形状，减少熔化或裂纹。

使用寿命：WZ8 的使用寿命更长，适合长时间、高强度的焊接任务。

微观结构：WZ8 的氧化钨颗粒分布更密集，晶粒尺寸较小，微观结构更均匀，提高了电极的耐高温性能。

其他牌号在某些特殊应用中，可能存在非标准牌号，如含 0.5% 或 1.0% 氧化钨的钨电极。这些牌号通常为定制化产品，性能介于 WZ3 和 WZ8 之间，适用于特定行业需求，如高精度等离子切割或特殊合金焊接。

氧化钨含量的增加通常会提升电极的电弧稳定性和抗烧损能力，但过高的掺杂量可能导致电极脆性增加或加工难度加大。因此，WZ3 和 WZ8 的氧化钨含量被认为是性能与成本的最佳平衡点，满足大多数工业需求。

3.3 钨电极牌号选择与应用场景

钨电极的牌号选择直接影响焊接质量、效率和成本。以下从应用场景、焊接工艺和材料类型等方面分析 WZ3 和 WZ8 的适用性：

WZ3 的应用场景

焊接材料：WZ3 适用于焊接铝、镁及其合金，尤其在薄板焊接（如厚度小于 3mm 的铝合金板）中表现出色。其电弧稳定性能够减少焊缝缺陷，适合高表面质量要求的场景。

电流范围：适合 50 - 150 A 的交流焊接，适用于中小型焊接设备，如手动 TIG 焊机。

典型应用：家用电器制造、自行车铝合金框架焊接、船舶铝结构焊接。

优点：成本较低，点火容易，适合中小规模生产或低频焊接任务。

局限性：在高电流或长时间焊接中，WZ3 的抗烧损能力和寿命可能不足。

WZ8 的应用场景

焊接材料：WZ8 适合焊接高要求的铝合金、镁合金和不锈钢，尤其在厚板焊接（如厚度大于 5mm）或高精度焊接中表现优异。

电流范围：适合 150 - 400 A 的高电流交流焊接，适用于自动化焊接设备或高频交流电弧。

典型应用：航空航天（如飞机机身、发动机部件）、核工业（如反应堆部件）、医疗设备制造（如 X 射线设备外壳）。

优点：电弧集中性强，抗烧损能力高，寿命长，适合高强度、长时间焊接任务。

局限性：成本较高，加工难度略大，可能不适合低电流或低精度场景。

选择原则钨电极的牌号选择需综合考虑以下因素：

焊接电流：低电流选择 WZ3，高电流选择 WZ8。

材料类型：铝、镁合金优先选择钨电极，WZ8 更适合高精度要求。

焊接环境：高频交流或高热输入场景优先选择 WZ8，普通交流焊接可选择 WZ3。

经济性：WZ3 成本较低，适合中小型企业；WZ8 性能优异，适合高端应用。

设备兼容性：确保电极直径和长度与焊接设备匹配，常用直径为 1.6mm、2.4mm、3.2mm 等。

3.4 钨电极牌号标准化与国际对照

钨电极的牌号标准化是确保其在全球范围内一致性和互换性的关键。国际和国内标准为钨电极的牌号、化学成分和性能要求提供了统一规范，促进了焊接行业的全球化发展。

国际标准

ISO 6848:2015：该标准规定了非消耗性钨电极的分类和要求，钨电极被归类为“WZ”系列，明确了 WZ3（0.15% - 0.4% ZrO_2 ）和 WZ8（0.7% - 0.9% ZrO_2 ）的化学成分、颜色标识（棕色或白色）和性能要求。ISO 标准还规定了电极的尺寸公差、表面质量和检测方法。

AWS A5.12/A5.12M:2009：美国焊接学会标准与 ISO 标准高度一致，详细定义了钨电极的牌号、化学成分和应用场景。AWS 标准中，WZ3 和 WZ8 的颜色标识分别为棕色和白色，符合国际惯例。

其他国际标准：欧洲（EN 标准）和日本（JIS 标准）也参考 ISO 和 AWS 标准，确保钨电极的全球兼容性。

国内标准

GB/T 4187-2017：中国国家标准《钨电极》详细规定了钨电极的牌号、化学成分、性能和检测方法。国内的 WZ3 和 WZ8 与国际标准一致，但在企业标准中可能存在扩展命名，如“WZr-3”或“WZr-8”。

版权与免责声明

行业标准：中国焊接协会和有色金属行业协会制定了补充标准，针对钨钨电极在特定行业（如航空航天、核工业）的应用提出了额外要求。

国际对照国际和国内牌号的对照关系较为简单，WZ3 和 WZ8 在 ISO、AWS 和 GB/T 标准中定义一致。颜色标识（棕色或白色）在全球范围内统一，便于现场识别。部分国家可能在标准中对电极的杂质含量、表面处理或包装要求略有差异，但核心性能指标保持一致。

标准化趋势随着焊接技术的进步，钨钨电极的标准化工作也在不断更新。未来趋势包括：

性能优化：开发新型牌号以适应高电流、高频率或特殊材料的焊接需求。

环保要求：进一步降低电极中的杂质含量，推动绿色制造。

国际化协调：加强 ISO、AWS 和 GB/T 标准的协调，促进全球贸易和应用。

智能化检测：引入自动化检测技术，提高牌号认证的精度和效率。



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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化钨（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化钨含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



第四章 钨钨电极的特性

4.1 钨钨电极的电弧稳定性

电弧稳定性是钨钨电极在钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）和等离子切割中的核心性能之一，指电极在高电流、高温电弧环境中维持稳定电弧形状和避免电弧漂移的能力。钨钨电极因掺杂氧化锆（ ZrO_2 ），在电弧稳定性方面表现出色，尤其在交流（AC）焊接中具有显著优势。

氧化锆的掺杂降低了钨基体的电子逸出功(work function)，使电子更容易从电极表面发射，从而形成稳定的电弧。相比纯钨电极，钨钨电极的电弧更集中，电弧漂移现象显著减少。这种特性在焊接铝、镁等轻金属时尤为重要，因为这些材料在交流焊接中容易因电弧不稳定而产生焊缝缺陷，如气孔或未熔合。钨钨电极的电弧稳定性主要得益于氧化锆颗粒在钨基体中的均匀分布，这些颗粒通过优化晶体结构和表面电子发射特性，增强了电弧的持续性和可控性。

在实际应用中，钨钨电极的电弧稳定性与氧化锆含量密切相关。例如，WZ8（0.7% - 0.9% ZrO_2 ）相比 WZ3（0.15% - 0.4% ZrO_2 ）具有更高的电弧集中性，适合高电流（150 - 400 A）交流焊接，能够在高频电弧中维持稳定的电弧形状。WZ3 则更适合中等电流（50 - 150 A）场景，其电弧稳定性足以满足薄板焊接或低频交流焊接的需求。电弧稳定性的优异表现使钨钨电极广泛应用于航空航天、汽车制造和船舶工业等对焊缝质量要求极高的领域。

此外，钨钨电极的电弧稳定性还受到电极尖端形状的影响。尖端研磨成锥形（锥角通常为 30° - 60° ）能够进一步增强电弧集中性，减少电弧扩散。现代焊接设备通过精确控制电流波形（如方波交流）进一步优化了钨钨电极的电弧稳定性，使其在复杂焊接环境中表现出更高的可靠性。

4.2 钨钨电极的点火性能与电极寿命

点火性能 (ignition performance) 是指电极在启动电弧时的难易程度，通常通过点火电压和点火成功率来评估。钨钨电极因掺杂氧化锆，显著降低了电子逸出功（约为 2.7 - 3.0 eV，低于纯钨的 4.5 eV），使电弧启动更加容易，尤其在高频交流焊接中表现出色。这种优异的点火性能使钨钨电极成为焊接铝合金和镁合金的首选材料。

WZ8 电极由于氧化锆含量较高，其点火性能优于 WZ3。在高频交流焊接中，WZ8 能够在较低的点火电压下迅速形成电弧，减少点火失败或电弧中断的风险。WZ3 虽然点火性能略逊于 WZ8，但在中等电流范围内仍能提供可靠的点火效果，适合中小型焊接任务。点火性能的提升不仅提高了焊接效率，还减少了因点火困难导致的设备损耗和操作时间浪费。

电极寿命是钨钨电极的另一关键特性，指电极在正常使用条件下能够维持性能的时间。钨钨电极的寿命主要受其抗烧损能力和抗污染能力的限制。氧化锆的掺杂通过形成稳定的氧化物层，显著降低了电极在高温电弧中的烧损速率。WZ8 电极因其较高的氧化锆含量，寿命通常比 WZ3 长 30% - 50%，尤其在高温、长时间焊接中表现出色。例如，在航空航天部件的 TIG 焊接中，WZ8 电极能够在连续高电流（200 - 300 A）下工作数小时而无需频繁更换。

电极寿命还受到焊接环境和操作条件的影响。例如，适当的惰性气体保护（如氩气或氦气）能够减少电极表面氧化，延长寿命。尖端研磨角度和电流波形的优化也能有效延长电极寿命。相比纯钨电极，钨钨电极的寿命在交流焊接中通常延长 2 - 3 倍，这使其在工业生产中具有更高的经济性。

4.3 钨钨电极的抗烧损与抗污染能力

抗烧损能力（burn-off resistance）是钨钨电极在高温电弧环境中抵抗尖端熔化或损耗的能力。钨钨电极通过掺杂氧化钨显著提高了抗烧损能力。氧化钨颗粒在钨基体中形成稳定的分散相，能够有效抑制钨在高温下的挥发和氧化反应（生成 WO_3 等挥发性氧化物）。这种保护机制使钨钨电极能够在 6000°C 以上的电弧环境中维持尖端形状，减少烧损和熔化现象。

WZ8 电极的抗烧损能力优于 WZ3，因其较高的氧化钨含量形成更致密的保护层。在高电流交流焊接中，WZ8 电极的尖端烧损速率可降低至纯钨电极的 $1/3$ ，显著延长了电极寿命。WZ3 电极在中等电流下也能提供良好的抗烧损性能，但长时间高电流工作可能导致尖端轻微磨损。

抗污染能力（contamination resistance）是指电极在焊接过程中抵抗金属蒸气、氧化物或其他污染物附着的能力。铝合金焊接中，铝氧化物（ Al_2O_3 ）和其他杂质容易附着在电极尖端，导致电弧不稳定或点火困难。钨钨电极的抗污染能力得益于氧化钨的化学稳定性，其表面不易与铝氧化物或其他污染物发生化学反应。此外，钨钨电极的表面光洁度较高（通常通过精密抛光实现），进一步减少了污染物附着的可能性。

在实际应用中，钨钨电极的抗污染能力使其在复杂焊接环境中表现出色。例如，在高湿度或含氧环境中，钨钨电极能够维持稳定的电弧性能，减少因污染导致的焊接缺陷。相比钨钨电极，钨钨电极无放射性，更加环保，且其抗污染能力在交流焊接中优于钨钨和钨钨电极。

4.4 钨钨电极在不同焊接环境下的表现

钨钨电极在不同焊接环境下的表现因电流类型（直流或交流）、焊接材料和工艺条件而异。以下分别分析其在直流（DC）和交流（AC）焊接中的性能。

4.4.1 直流焊接（DC）

在直流焊接（DC）中，钨钨电极通常作为负极（DCEN，直流电极负极）使用，电弧由电极向工件发射电子。钨钨电极在直流焊接中的应用相对较少，因为其主要优势在于交流焊接。然而，在特定直流焊接场景中（如低电流焊接或特殊合金焊接），钨钨电极仍能发挥一定作用。

电弧稳定性：在直流焊接中，钨钨电极的电弧稳定性略逊于钨钨或钨钨电极，但优于纯钨电极。其氧化钨掺杂使电弧保持较为集中，适合焊接薄板不锈钢或镁合金。

点火性能：钨钨电极在直流焊接中的点火性能良好，但不如钨钨或钨钨电极在低电流下的表现突出。

抗烧损能力：直流焊接中电极尖端温度较低，钨钨电极的抗烧损能力足以满足需求，寿命较长。

应用场景：钨钨电极在直流焊接中的应用主要集中在对电极污染敏感的场景，如医疗设备制造或食品级不锈钢焊接。

总体而言，钨钨电极在直流焊接中的表现不如钨钨或钨钨电极，但其无放射性和抗污染能力使其在特定场景中具有竞争力。

4.4.2 交流焊接（AC）

交流焊接是钨钨电极的主要应用领域，尤其在焊接铝、镁等轻金属时表现出色。交流焊接中，电极在正半周和负半周交替充当阴极和阳极，导致电极尖端温度波动较大，对电极的热稳定性和抗烧损能力要求较高。

电弧稳定性：钨钨电极在交流焊接中表现出极佳电弧稳定性，电弧集中且漂移少。WZ8 电极在高电流（150 - 400 A）下能够形成稳定的锥形电弧，适合厚板铝合金焊接；WZ3 电极适合中等电流（50 - 150 A），用于薄板焊接。

点火性能：钨钨电极在交流焊接中的点火性能优异，尤其在高频交流电弧中能够快速启动电弧，减少点火失败。

抗烧损能力：交流焊接中，钨钨电极的抗烧损能力显著优于纯钨电极。WZ8 电极在高频、高电流条件下能够维持尖端形状，延长使用寿命。

应用场景：钨钨电极广泛应用于航空航天（如飞机机身焊接）、汽车制造（如铝合金车身）和船舶工业（如铝合金船体）。其在交流焊接中的优异性能使其成为铝合金焊接的首选电极。

钨钨电极在交流焊接中的优势还得益于现代焊接设备的电流波形控制技术。例如，方波交流（square wave AC）能够优化电弧的正负半周切换，结合钨钨电极的高性能，进一步提升焊接质量。

4.5 钨钨电极的热力学特性

钨钨电极的热力学特性是其在高温电弧环境中保持性能稳定的基础，主要包括热容量、热膨胀系数和热导率等指标。以下详细分析其热力学特性：

热容量：钨钨电极的比热容约为 $0.13 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ （接近纯钨），能够在高温下吸收和储存热量，减少尖端过热。氧化钨的掺杂略微提高了电极的热容量，使其在高频交流电弧中能够更好地应对温度波动。

热膨胀系数：钨钨电极的热膨胀系数约为 $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ （接近纯钨），较低的热膨胀系数使其在高温下形变小，保持尖端几何形状的稳定。氧化钨的加入进一步降低了热膨胀系数，增强了电极的抗热冲击能力。

热导率：钨钨电极的热导率约为 $173 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ （室温下），能够快速将电极尖端的热量传导到其他部分，防止局部过热。WZ8 电极因其更致密的微观结构，热导率略优于 WZ3，有助于在高电流焊接中维持较低的尖端温度。

热稳定性：钨钨电极的高熔点（约 3422°C ）使其能够在 6000°C 以上的电弧环境中保持结

构完整。氧化锆颗粒通过抑制晶粒长大和高温形变，增强了电极的热稳定性。

这些热力学特性使钨钨电极能够在极端条件下（如高电流、长时间焊接）保持性能稳定，减少烧损和形变，延长使用寿命。

4.6 钨钨电极的微观结构分析

钨钨电极的微观结构对其性能有重要影响，通常通过扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射（XRD）和透射电子显微镜（TEM）等技术进行分析。钨钨电极的微观结构主要包括钨基体和氧化锆颗粒的分布特征。

钨基体：钨钨电极的钨基体为体心立方（BCC）晶体结构，晶粒尺寸通常在 10 - 50 μm 之间。钨的高纯度（99.5%以上）保证了基体的致密性和机械强度。

氧化锆颗粒：氧化锆以微小颗粒（直径 0.1 - 1 μm ）均匀分布在钨基体中，WZ8 的颗粒密度高于 WZ3。氧化锆颗粒通过钉扎效应（pinning effect）抑制钨晶粒在高温下的长大，增强了电极的热稳定性和机械性能。

界面特性：氧化锆与钨基体之间的界面结合紧密，无明显孔隙或裂纹。这种良好的界面结合提高了电极的抗热冲击能力和抗烧损性能。

微观缺陷：优质钨钨电极的微观结构中孔隙率低于 0.5%，杂质相（如氧化物或碳化物）含量极低。生产过程中的烧结和热处理工艺对减少微观缺陷至关重要。

微观结构分析表明，WZ8 电极的氧化锆颗粒分布更均匀，晶粒尺寸更小（约 10 - 20 μm ），使其在高电流焊接中具有更高的稳定性。WZ3 电极的晶粒尺寸略大（约 20 - 50 μm ），适合中等电流场景。微观结构的优化是钨钨电极性能提升的关键，现代生产技术通过控制掺杂和烧结工艺进一步提高了结构的均匀性和致密性。

4.7 中钨智造钨钨电极 MSDS

材料安全数据表（MSDS, Material Safety Data Sheet）为钨钨电极的使用、储存和处理提供了安全指导。以下为中钨智造钨钨电极的 MSDS 概要，基于行业标准和通用规范：

产品名称：钨钨电极（WZ3、WZ8）

化学成分：钨（W，99.5%以上）、氧化锆（ ZrO_2 ，0.15% - 0.9%）、微量杂质（Fe、Si、C 等， $<0.05\%$ ）。

物理状态：固态金属棒，直径 1.0 - 6.4 mm，长度 150 - 300 mm。

危害识别：

钨钨电极在正常使用下无显著健康危害，无放射性。

焊接过程中可能产生金属蒸气、臭氧和紫外线，需佩戴防护设备（如焊接面罩、手套）。

研磨电极时可能产生钨粉尘，需使用通风设备和呼吸防护装置。

版权与法律声明

急救措施：

吸入粉尘：移至通风处，必要时就医。

皮肤接触：无特殊危害，清洗即可。

眼睛接触：若粉尘进入眼睛，用清水冲洗并就医。

消防措施：钨钨电极不可燃，使用干粉或二氧化碳灭火器处理周围火灾。

处理与储存：

储存于干燥、通风环境，避免潮湿或高温。

使用后废弃电极应按金属废料回收处理，避免随意丢弃。

个人防护：焊接时使用防护面罩、手套和通风设备；研磨时佩戴防尘口罩和护目镜。

环境影响：钨钨电极无显著环境危害，生产和废弃处理需符合环保法规。

运输信息：非危险品，运输时避免机械损伤和潮湿。

中钨智造的钨钨电极 MSDS 符合国际标准（如 OSHA、REACH），确保用户在操作过程中安全合规。实际 MSDS 可能因厂家和地区法规而略有差异，建议用户参考供应商提供的具体版本。



版权与免责声明

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2025V
sales@chinatungsten.com

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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化钨（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化钨含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



第五章 钨电极的制备生产工艺

钨电极的制备生产工艺是一项复杂且高精度的过程，涉及从原料选择到成品加工的多个步骤。钨电极的高性能依赖于原料质量、掺杂均匀性、微观结构控制和加工工艺的优化。本章详细介绍钨电极的制备生产工艺，涵盖原料准备、粉末冶金工艺、成型技术、表面处理与抛光，以及质量控制与工艺优化。

5.1 钨电极的原料准备

原料准备是钨电极生产的基础，直接影响电极的化学组成、微观结构和最终性能。钨电极的主要原料包括高纯度钨粉和氧化钨（ ZrO_2 ）化合物，需通过严格的选择和预处理确保其符合生产要求。

5.1.1 钨粉与钨化合物的选择

钨粉的选择

钨粉是钨电极的主要原料，通常由钨酸盐（如仲钨酸铵，APT）通过还原工艺制备。钨粉的纯度要求极高，通常需达到 99.95% 以上（3N5 级或更高），以减少杂质（如铁、硅、碳、氧）对电极性能的影响。钨粉的粒度分布对后续工艺至关重要，常用粒径范围为 1 - 10 μm ，平均粒径约为 3 - 5 μm 。细小的粒径有利于提高粉末的烧结性能和电极的致密性，但过细的颗粒可能增加研磨难度和生产成本。

钨粉的形貌也需严格控制，优选球形或近球形颗粒，因其具有更好的流动性和堆积密度，有利于混合和压制过程。现代生产中，钨粉通常通过氢气还原法或等离子球化法制备，以确保形貌均匀和杂质含量低。

氧化钨化合物的选择

氧化钨（ ZrO_2 ）作为钨电极的掺杂剂，通常以高纯度粉末或溶液形式加入。氧化钨的纯度要求达到 99.9% 以上，以避免杂质干扰电极的电子发射性能。氧化钨颗粒的粒径通常在 0.1 - 1 μm 范围内，纳米级氧化钨（<100 nm）在高端电极生产中逐渐普及，因其能更均匀地分布在钨基体中，提升电极的微观结构稳定性。

氧化钨的选择还需考虑其晶型结构，通常采用单斜晶型（monoclinic ZrO_2 ）或部分稳定氧化钨（PSZ，掺杂少量氧化镁或氧化钇）。单斜晶型氧化钨在高温烧结过程中具有较好的稳定性，适合钨电极的制备。氧化钨的加入比例根据电极牌号（如 WZ3、WZ8）精确控制，通常为 0.15% - 0.9%（重量百分比）。

5.1.2 原料纯度与预处理

原料纯度原料的纯度直接影响钨电极的性能。钨粉中的杂质（如铁<0.005%、硅<0.003%、碳<0.005%）需通过化学分析（如 ICP-MS，电感耦合等离子体质谱）严格检测。氧化钨中的杂质（如氧化铝、氧化硅）也需控制在 0.01% 以下，以确保电极的化学稳定性和电弧性能。高纯度原料的选择需结合供应商资质和生产工艺。例如，钨粉生产商需具备先进的还原和提纯设备，氧化钨则需通过化学沉淀法或溶胶-凝胶法制备，以保证高纯度和均匀的颗粒形貌。

预处理原料预处理包括清洗、干燥和筛分等步骤，旨在去除表面杂质、调节粒度分布和提高原料的均匀性。钨粉通常通过酸洗（如稀盐酸或硝酸溶液）去除表面氧化物和有机残留物，随后在真空或惰性气体（如氩气）环境下干燥，以防止氧化。氧化锆粉末则需通过超声清洗或高温煅烧去除吸附水分和挥发性杂质。

筛分是预处理的重要步骤，用于控制钨粉和氧化锆的粒度分布。常用振动筛或气流分级设备，将粒径控制在目标范围内（钨粉 3 - 5 μm ，氧化锆 0.1 - 1 μm ）。此外，部分高端生产工艺可能采用球磨或喷雾干燥技术，进一步优化原料的形貌和流动性。

5.2 钨钨电极的粉末冶金工艺

粉末冶金是钨钨电极生产的核心工艺，通过混合、压制和烧结等步骤将钨粉和氧化锆转化为致密的电极坯料。粉末冶金工艺的精确控制对电极的微观结构和性能至关重要。

5.2.1 混合与研磨

混合

混合是将钨粉与氧化锆粉末均匀结合的过程，旨在确保氧化锆颗粒在钨基体中的均匀分布。混合通常采用干混或湿混工艺：

干混：使用高速搅拌机或 V 型混合机，在惰性气体（如氩气）保护下进行混合。混合时间一般为 2 - 4 小时，需避免粉末团聚和杂质引入。

湿混：将钨粉和氧化锆分散在液体介质（如乙醇或去离子水）中，通过搅拌或超声波分散实现均匀混合。湿混后需通过喷雾干燥或真空干燥去除液体介质。

混合工艺需精确控制氧化锆的比例（如 WZ3 为 0.3%，WZ8 为 0.8%），通常使用高精度电子天平称量。现代生产中，自动化混合设备（如行星式混合机）能够提高混合均匀性，减少人为误差。

研磨

研磨用于进一步细化粉末颗粒，优化粒度分布和形貌。常用设备包括球磨机或气流磨，研磨介质（如氧化锆球或钨球）需选择高硬度、低污染材料。研磨时间一般为 4 - 8 小时，需控制温度（ $<50^{\circ}\text{C}$ ）以防止粉末氧化。研磨后的粉末需再次筛分，确保粒径均匀（钨粉 2 - 5 μm ，氧化锆 0.1 - 0.5 μm ）。

纳米级氧化锆的研磨需采用高能球磨或超细研磨技术，以实现更均匀的掺杂效果。研磨过程中需监测粉末的氧含量和杂质水平，避免性能劣化。

5.2.2 压制成型

压制成型是将混合好的粉末压制成电极坯料的过程，通常采用冷等静压（CIP）或模压工艺。压制成型的目的是形成具有一定强度和密度的坯料，便于后续烧结。

冷等静压（CIP）：将混合粉末装入柔性模具，在高压（100 - 200 MPa）下通过液体介质（如

水或油）均匀施压，形成致密的坯料。CIP 工艺能够减少坯料中的孔隙和应力集中，提高烧结后电极的均匀性。

模压：使用刚性模具和液压机将粉末压制成圆柱形坯料，适用于小批量生产。模压工艺需精确控制压力（50 - 100 MPa）和保压时间（10 - 30 秒），以避免坯料开裂。

压制过程中需控制粉末的堆积密度（通常为 50% - 60%理论密度），并避免模具污染。压制后的坯料直径一般为 10 - 20 mm，长度为 100 - 300 mm，具体尺寸根据后续加工需求确定。

5.2.3 烧结工艺

烧结是将压制坯料加热至高温，使粉末颗粒结合成致密材料的过程。钨钨电极的烧结通常采用高温真空烧结或氢气保护烧结，以确保电极的高密度和低杂质含量。

烧结设备：常用高温真空烧结炉或氢气烧结炉，温度范围为 1800 - 2200° C。真空烧结能够有效去除坯料中的氧气和挥发性杂质，氢气烧结则通过还原气氛防止钨氧化。

烧结工艺参数：

温度：烧结温度需精确控制，通常分阶段升温：1000° C 预烧结去除挥发物，1800 - 2000° C 主烧结促进颗粒结合，2200° C 高温保温优化晶体结构。

时间：总烧结时间为 4 - 8 小时，保温时间 1 - 2 小时。

气氛：真空度 $<10^{-3}$ Pa 或高纯氢气（纯度 $>99.999\%$ ）。

烧结效果：优质钨钨电极的烧结密度可达 95% - 98%理论密度，孔隙率低于 0.5%。氧化钨颗粒在烧结过程中均匀分布，抑制钨晶粒长大，增强电极的热稳定性和机械性能。

烧结后的坯料需通过 X 射线检测或超声检测检查内部缺陷，确保无裂纹或孔隙。烧结工艺的优化是钨钨电极性能提升的关键，现代生产中常采用计算机控制系统精确调节温度和气氛。

5.3 钨钨电极的成型技术

烧结后的坯料需通过成型技术加工成符合规格的电极棒，包括拉拔、挤压、热处理和退火等步骤，以获得所需的尺寸、形状和性能。

5.3.1 拉拔与挤压

拉拔

拉拔是将烧结坯料通过一系列模具逐步拉伸，制成细长电极棒的过程。拉拔设备包括多次拉拔机，模具材料通常为硬质合金或金刚石，以承受钨的高硬度。拉拔过程中需控制以下参数：

拉拔速度：0.1 - 1 m/min，过快可能导致表面缺陷。

润滑剂：使用石墨或二硫化钼润滑剂，减少模具磨损和电极表面划痕。

道次：通常需要 10 - 20 道次拉拔，将坯料直径从 10 - 20 mm 减小至 1.0 - 6.4 mm。

拉拔后的电极棒直径公差需控制在 ± 0.05 mm 以内，表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu m$ 。拉拔工艺能够提高电极的机械强度和表面光洁度，但需避免过度拉伸导致的内部微裂纹。

挤压

挤压是替代拉拔的成型工艺，适用于生产大直径电极（如 $>6\text{ mm}$ ）。挤压设备为液压挤压机，坯料在高温（ $1200 - 1500^{\circ}\text{C}$ ）下通过模具挤压成型。挤压工艺的优点是能够一次成型，减少加工道次，但对设备和模具的耐高温性能要求较高。

5.3.2 热处理与退火

热处理

热处理用于消除拉拔或挤压过程中的内应力，优化电极的晶体结构。热处理通常在真空或氢气保护炉中进行，温度为 $1200 - 1600^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 $1 - 2$ 小时。热处理能够提高电极的延展性和抗断裂能力，减少使用中的脆性断裂风险。

退火

退火是热处理的后续步骤，通过缓慢冷却（冷却速率 $<50^{\circ}\text{C/h}$ ）进一步降低内应力。退火工艺能够改善电极的微观结构，使氧化锆颗粒更均匀分布，提高电极的热稳定性和电弧性能。退火后的电极表面需进行检查，确保无氧化或裂纹。

5.4 锆钨电极的表面处理与抛光

表面处理与抛光是锆钨电极生产的最后步骤，旨在提高电极的表面光洁度和性能稳定性。表面质量直接影响电极的点火性能和抗污染能力。

表面处理

表面处理包括清洗和去毛刺，用于去除拉拔或挤压过程中残留的润滑剂、氧化物或微小划痕。常用方法包括：

化学清洗：使用稀酸溶液（如 5% 硝酸或盐酸）清洗电极表面，去除氧化物和杂质。

超声清洗：在去离子水或乙醇中通过超声波振动去除微小颗粒和油污。

等离子清洗：使用低温等离子体处理电极表面，提高表面洁净度。

抛光

抛光用于提高电极表面的光洁度，降低表面粗糙度（ $Ra < 0.4\text{ }\mu\text{m}$ ）。常用抛光设备包括旋转抛光机或电化学抛光设备，抛光介质为氧化铝或金刚石悬浮液。抛光过程需控制速度和压力，避免过度抛光导致表面过热或形变。抛光后的电极表面呈现镜面光泽，有助于减少焊接过程中的污染物附着和电弧漂移。

部分高端电极可能采用激光抛光或离子束抛光技术，以实现纳米级表面光洁度，进一步提升点火性能和抗污染能力。

5.5 锆钨电极的质量控制与工艺优化

质量控制与工艺优化贯穿锆钨电极生产的每个环节，旨在确保电极的化学成分、微观结构和性能符合国际标准（如 ISO 6848、AWS A5.12、GB/T 4187）。

质量控制

原料检测：通过 ICP-MS、XRF（X 射线荧光光谱）等方法检测钨粉和氧化锆的化学成分，确

保杂质含量低于标准要求。

过程监控：在混合、压制、烧结和成型过程中使用在线监测设备（如激光粒度分析仪、红外测温仪）控制工艺参数，实时检测粉末粒度、坯料密度和烧结温度。

成品检测：烧结和成型后的电极需进行多维度检测，包括：

化学成分：通过光谱分析验证氧化锆含量（如 WZ3 为 0.3%、WZ8 为 0.8%）。

微观结构：使用 SEM 和 XRD 分析晶粒尺寸和氧化锆分布。

尺寸公差：通过激光测距仪检查电极直径（ $\pm 0.05\text{ mm}$ ）和长度（ $\pm 1\text{ mm}$ ）。

表面质量：使用表面粗糙度仪检测 Ra 值（ $< 0.4\text{ }\mu\text{m}$ ）。

工艺优化

自动化生产：采用 PLC（可编程逻辑控制器）或 SCADA（数据采集与监控系统）控制混合、压制和烧结过程，提高生产一致性和效率。

绿色制造：优化烧结工艺，减少能源消耗和废气排放；回收废料（如钨粉和氧化锆）以提高原料利用率。

智能化技术：引入人工智能和机器学习优化工艺参数，例如通过数据分析预测最佳烧结温度和拉拔速度，提高电极性能和生产良率。

纳米技术：使用纳米级氧化锆颗粒和先进的掺杂技术（如溶胶-凝胶法），提高电极的微观结构均匀性和性能稳定性。

质量控制与工艺优化的结合确保了钨钨电极的高性能和一致性，满足航空航天、核工业等高要求领域的应用需求。现代生产企业还通过 ISO 9001 质量管理体系认证，进一步规范生产流程。



第六章 钨钨电极的生产技术

钨钨电极的生产技术是实现其高性能和高一致性的关键，涉及掺杂技术、高温烧结、精密加工、自动化与智能化生产、绿色制造以及生产问题的解决方案等多个方面。钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）和等离子切割中的核心材料，其生产技术需兼顾性能优化、成本控制和环保要求。本章将详细探讨钨钨电极生产技术的各个环节，分析其工艺原理、关键技术和最新发展。

6.1 钨钨电极的掺杂技术

掺杂技术是钨钨电极生产的核心环节，通过向高纯度钨基体中添加氧化锆（ ZrO_2 ），显著改善电极的电弧稳定性、点火性能和抗烧损能力。掺杂技术的目标是实现氧化锆在钨基体中的均匀分布，同时确保电极的化学组成符合国际标准（如 ISO 6848 和 AWS A5.12）。

6.1.1 钨氧化物的掺杂方法

氧化锆的掺杂方法直接影响钨钨电极的微观结构和性能。常用的掺杂方法包括干法掺杂、湿法掺杂和化学共沉淀法，每种方法各有优势，适用于不同的生产需求和电极牌号（如 WZ3、WZ8）。

干法掺杂

干法掺杂是将高纯度钨粉与氧化锆粉末通过机械混合实现掺杂的过程。混合设备通常为高速搅拌机、V型混合机或行星式球磨机，操作环境需为惰性气体（如氩气或氮气）以防止粉末氧化。干法掺杂的工艺流程包括：

原料准备：选用纯度>99.95%的钨粉（粒径 3 - 5 μm ）和纯度>99.9%的氧化锆粉末（粒径 0.1 - 1 μm ）。

混合：按目标比例（如 WZ3 为 0.3% ZrO_2 ，WZ8 为 0.8% ZrO_2 ）称量原料，使用高速搅拌机混合 2 - 4 小时，搅拌速度为 100 - 300 rpm。

筛分：混合后的粉末通过振动筛（筛孔<10 μm ）去除团聚颗粒，确保粒度均匀。

干法掺杂的优点是工艺简单、成本低，适合大批量生产。然而，其均匀性受限于机械混合效率，容易出现局部氧化锆颗粒聚集，影响电极性能。

湿法掺杂

湿法掺杂通过将钨粉和氧化锆分散在液体介质（如去离子水或乙醇）中混合，再通过干燥去除液体介质。湿法掺杂的工艺流程包括：

分散：将钨粉和氧化锆粉末加入液体介质，使用超声波分散或高速搅拌（500 - 1000 rpm）形成均匀悬浮液。

混合：通过搅拌或球磨（研磨时间 4 - 8 小时）确保氧化锆颗粒均匀分布。

干燥：采用喷雾干燥或真空干燥（温度<100° C）去除液体介质，获得均匀的混合粉末。

湿法掺杂的优点是能实现更高的掺杂均匀性，尤其适合纳米级氧化锆的掺杂。然而，湿法掺杂需控制液体介质的纯度，避免引入杂质，且干燥过程可能增加能耗。

化学共沉淀法

化学共沉淀法是一种先进的掺杂技术，通过化学反应在钨基体中直接生成氧化锆颗粒。工艺流程包括：

溶液制备：将钨酸盐（如仲钨酸铵）溶于水，加入锆盐溶液（如氯化锆或硝酸锆）。

共沉淀：通过加入沉淀剂（如氨水），使钨和锆离子同时沉淀，形成含氧化锆的钨前驱体。

煅烧：将沉淀物在 800 - 1000° C 下煅烧，生成含氧化锆的钨粉。

化学共沉淀法的优点是掺杂均匀性极高，氧化锆颗粒可达纳米级（<100 nm），显著提升电极性能。然而，其工艺复杂、成本较高，主要用于高端锆钨电极的生产。

其他掺杂方法近年来，溶胶-凝胶法和等离子喷涂法也被用于锆钨电极的掺杂研究。溶胶-凝胶法通过制备含锆的凝胶前驱体实现纳米级掺杂，等离子喷涂法则通过高温等离子体将氧化锆沉积到钨基体上。这些方法适用于特殊用途电极（如高电流等离子切割），但尚未广泛应用于工业生产。

6.1.2 掺杂均匀性控制

掺杂均匀性是钨钨电极性能一致性的关键，直接影响电极的电弧稳定性和使用寿命。不均匀的掺杂可能导致局部性能差异，引发电弧漂移或电极烧损。掺杂均匀性控制需从以下几个方面入手：

原料粒度控制：钨粉和氧化锆的粒径需匹配，通常钨粉为 $3 - 5 \mu\text{m}$ ，氧化锆为 $0.1 - 1 \mu\text{m}$ 。过大的粒径差异可能导致混合不均，影响烧结效果。

混合设备优化：使用高精度混合设备（如行星式球磨机或超声波分散器）确保氧化锆颗粒均匀分布。混合时间和速度需根据粉末特性优化，例如湿法掺杂需控制搅拌速度在 $500 - 1000 \text{ rpm}$ ，混合时间 $4 - 6$ 小时。

在线监测：采用激光粒度分析仪和扫描电子显微镜（SEM）实时监测粉末的粒度分布和混合均匀性。现代生产中，人工智能算法可用于分析 SEM 图像，预测掺杂均匀性。

工艺参数调整：通过调整混合时间、介质比例和研磨强度，优化氧化锆的分布。例如，湿法掺杂中可添加分散剂（如聚乙烯醇）提高悬浮液稳定性。

质量检测：混合后的粉末需通过 X 射线荧光光谱（XRF）或电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）检测氧化锆含量，确保与目标牌号（如 WZ3、WZ8）一致。

掺杂均匀性控制的最新进展包括纳米技术应用和智能化混合设备。纳米级氧化锆的引入显著提高了掺杂均匀性，而智能混合设备通过实时反馈调节工艺参数，进一步提升了生产一致性。

6.2 钨钨电极的高温烧结技术

高温烧结是将混合粉末压制成坯料后，通过高温处理使其结合成致密电极坯料的关键工艺。烧结技术直接影响钨钨电极的密度、微观结构和性能稳定性。钨钨电极的烧结通常采用真空烧结或氢气保护烧结，以防止钨氧化并确保高密度。

烧结设备高温烧结炉是烧结工艺的核心设备，需具备高精度温控和气氛控制功能。常用设备包括：

真空烧结炉：真空度 $< 10^{-3} \text{ Pa}$ ，温度范围 $1800 - 2200^\circ \text{C}$ ，适合高纯度电极生产。

氢气烧结炉：使用高纯氢气（ $> 99.999\%$ ）作为保护气氛，防止钨氧化，适合大批量生产。

微波烧结炉：近年来兴起的烧结技术，通过微波加热实现快速、均匀的烧结，缩短烧结时间（ $2 - 4$ 小时）。

烧结工艺流程烧结过程通常分为预烧结、主烧结和保温三个阶段：

预烧结（ $800 - 1000^\circ \text{C}$ ）：去除坯料中的挥发性杂质（如水分、润滑剂）和吸附气体，时间 $1 - 2$ 小时。

主烧结（ $1800 - 2000^\circ \text{C}$ ）：促进钨颗粒结合和氧化锆分散相形成，时间 $2 - 4$ 小时。烧结温度需精确控制（ $\pm 10^\circ \text{C}$ ），以避免晶粒过大或孔隙残留。

保温（ $2000 - 2200^\circ \text{C}$ ）：保温 $1 - 2$ 小时，优化晶体结构，增强电极的致密性和热稳定性。

烧结参数

温度：烧结温度需根据电极牌号优化，WZ8（高氧化锆含量）需更高温度（2000 - 2200° C）以确保氧化锆颗粒均匀分布。

气氛：真空烧结需保持真空度 $<10^{-3}$ Pa，氢气烧结需控制氢气流率（10 - 50 L/min）以维持还原气氛。

升温速率：通常为 5 - 10° C/min，避免快速升温导致坯料开裂。

冷却速率：控制在 20 - 50° C/h，防止内应力积累。

烧结效果优质钨钨电极的烧结密度可达 95% - 98%理论密度，孔隙率 $<0.5\%$ 。氧化锆颗粒在烧结过程中形成稳定的分散相，抑制钨晶粒长大（晶粒尺寸 10 - 20 μm ）。烧结后的坯料需通过 X 射线检测或超声波检测检查内部缺陷，确保无裂纹或孔隙。

技术进展近年来，高温烧结技术的进步包括：

等离子体烧结（SPS）：通过高压脉冲电流快速加热（升温速率 $>100^\circ\text{C/min}$ ），缩短烧结时间并提高密度。

微波烧结：利用微波能量实现均匀加热，减少能耗并改善微观结构。

智能化控制：采用计算机控制系统和传感器实时监测温度、气氛和坯料状态，优化烧结参数。

高温烧结技术的优化显著提高了钨钨电极的性能一致性和生产效率，为高精度焊接提供了可靠的材料支持。

6.3 钨钨电极的精密加工技术

精密加工技术是将烧结坯料加工成符合规格的电极棒的关键步骤，包括拉拔、挤压、切割和研磨等工艺。精密加工的目标是实现电极的高尺寸精度、表面光洁度和性能稳定性。

拉拔技术拉拔是将烧结坯料通过一系列模具逐步拉伸，制成细长电极棒的过程。拉拔设备为多道次拉拔机，模具材料通常为硬质合金或金刚石，以承受钨的高硬度。拉拔工艺参数包括：

拉拔速度：0.1 - 1 m/min，过快可能导致表面划痕或内部微裂纹。

模具设计：模具孔径逐步减小（每次减小 5% - 10%），总道次 10 - 20 次，将坯料直径从 10 - 20 mm 减小至 1.0 - 6.4 mm。

润滑剂：使用石墨或二硫化钼润滑剂，减少模具磨损和电极表面缺陷。

拉拔后的电极直径公差需控制在 $\pm 0.05\text{ mm}$ ，表面粗糙度 $Ra < 0.8\ \mu\text{m}$ 。现代拉拔技术采用伺服控制系统，精确调节拉拔速度和张力，提高加工一致性。

挤压技术挤压是替代拉拔的成型工艺，适用于生产大直径电极（ $>6\text{ mm}$ ）。挤压设备为高温液压挤压机，坯料在 1200 - 1500° C 下通过模具挤压成型。挤压工艺的优点是加工道次少，但对模具的耐高温性能要求较高。挤压后的电极需通过热处理消除内应力。

切割技术切割用于将拉拔或挤压后的长电极棒切成标准长度（如 150 mm、175 mm）。常用设备包括线切割机或激光切割机，切割精度需控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 。切割过程中需使用冷却液（如水或油）防止电极过热。

研磨技术研磨用于提高电极表面的光洁度和尖端几何形状。常用设备包括数控研磨机，研磨介质为氧化铝或金刚石悬浮液。尖端研磨角度（ 30° - 60° ）根据焊接需求优化，交流焊接通常采用钝角（ 45° - 60° ）以提高电弧稳定性。研磨后的电极表面粗糙度 $Ra < 0.4 \mu m$ 。

技术进展精密加工技术的最新发展包括：

激光加工：采用激光切割和抛光技术，实现纳米级表面光洁度和高精度尺寸控制。

数控加工：使用五轴数控机床加工复杂电极形状，满足特殊焊接需求。

表面改性：通过离子束抛光或等离子体处理提高表面抗污染能力。

精密加工技术的进步显著提升了钨钨电极的尺寸精度和性能稳定性，满足航空航天、核工业等高要求领域的应用需求。

6.4 钨钨电极的自动化与智能化生产技术

自动化与智能化生产是钨钨电极制造的未来方向，通过引入自动化设备、工业物联网和人工智能技术，提高生产效率、质量一致性和工艺可控性。

自动化生产自动化技术覆盖钨钨电极生产的各个环节，包括：

原料处理：自动化称量和混合设备（如机器人配料系统）确保原料比例精确，减少人为误差。

压制成型：自动冷等静压机通过 PLC（可编程逻辑控制器）控制压力和保压时间，提高坯料一致性。

烧结：自动化烧结炉配备温度和气氛传感器，实时调节工艺参数。

加工与检测：自动化拉拔机和数控切割机实现高精度加工，在线检测设备（如激光测距仪、X 射线检测仪）实时监控电极质量。

自动化生产线的典型配置包括 SCADA（数据采集与监控系统）和 MES（制造执行系统），通过数据集成实现全流程监控和优化。

智能化生产

智能化生产通过人工智能和大数据分析进一步提升生产效率和质量：

工艺优化：使用机器学习算法分析历史生产数据，预测最佳混合、烧结和加工参数。例如，通过神经网络模型优化烧结温度，减少能耗 10% - 15%。

质量预测：基于 AI 的图像识别技术分析 SEM 图像，预测电极微观结构的均匀性和缺陷率。

故障诊断：通过物联网传感器监测设备状态，预测潜在故障并实施预防性维护，减少停机时间。

供应链管理：智能化系统通过 ERP（企业资源计划）整合原料采购、生产计划和库存管理，提高生产效率。

自动化与智能化生产技术的应用显著降低了生产成本，提高了钨钨电极的性能一致性和市场竞争力。

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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化锆 (ZrO_2) 的非放射性焊接电极，专为 TIG (钨极氩弧焊) 交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化锆含量 (wt. %)	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



6.5 钨钨电极的绿色生产与环保技术

绿色生产与环保技术是钨钨电极制造的重要发展方向，旨在减少能源消耗、废料排放和环境污染，符合可持续发展的要求。

能源优化

高效烧结：采用微波烧结或等离子体烧结技术，缩短烧结时间（2-4 小时），降低能耗 20% - 30%。

余热回收：利用烧结炉和热处理炉的余热为其他工艺（如干燥或预热）提供能量，提高能源利用率。

可再生能源：部分生产企业使用太阳能或风能供电，减少碳排放。

废料回收

钨粉回收：通过化学提纯和还原工艺回收生产中的钨废料，回收率可达 90% 以上。

氧化钨再利用：将研磨和切割过程中产生的氧化钨粉尘收集后重新提纯，用于下一批次生产。

废水处理：湿法掺杂和清洗过程中产生的废水通过过滤和化学处理去除重金属，达到排放标准。

环保工艺

低污染掺杂：采用无溶剂湿法掺杂或化学共沉淀法，减少有机溶剂使用。

无尘化生产：在混合和研磨环节使用密闭设备和高效除尘系统，控制粉尘排放（ $<10 \text{ mg/m}^3$ ）。

绿色包装：使用可回收材料（如纸质或可降解塑料）包装电极，减少塑料污染。

法规合规钨钨电极生产需符合国际和国内环保法规，如欧盟 REACH 法规 and 中国的《环境保护法》。生产企业需定期进行环境影响评估，确保废气、废水和固体废物处理达标。

绿色生产技术的应用不仅降低了环境影响，还提高了企业的社会责任感和市场竞争力。例如，采用绿色制造的钨钨电极在欧美市场更受欢迎，符合客户对环保产品的需求。

6.6 生产中的常见问题与解决方案

钨钨电极生产过程中可能遇到多种问题，包括掺杂不均、烧结缺陷、加工裂纹和性能不稳定等。以下分析常见问题及其解决方案：

问题 1：掺杂不均匀

现象：氧化钨颗粒在钨基体中分布不均，导致电极性能不一致，电弧漂移或点火困难。

原因：混合时间不足、粒径差异过大或设备性能不足。

解决方案：

延长混合时间（4-6 小时），提高搅拌速度（500-1000 rpm）。

使用纳米级氧化钨（ $<100 \text{ nm}$ ）或湿法掺杂提高均匀性。

采用在线粒度分析仪和 SEM 检测掺杂效果，调整工艺参数。

问题 2：烧结缺陷（如孔隙或裂纹）

现象：烧结坯料内部出现孔隙或裂纹，降低电极密度和机械强度。

原因：烧结温度过高/过低、升温速率过快或气氛控制不当。

解决方案：

优化烧结曲线，控制升温速率（ $5 - 10^{\circ} \text{C/min}$ ）和保温时间（1 - 2 小时）。

提高真空度（ $<10^{-3} \text{ Pa}$ ）或氢气纯度（ $>99.999\%$ ）。

使用 X 射线或超声波检测坯料缺陷，剔除不合格品。

问题 3：加工裂纹

现象：拉拔或切割过程中电极表面或内部出现微裂纹，影响性能和寿命。

原因：拉拔速度过快、模具磨损或内应力未消除。

解决方案：

降低拉拔速度（ $0.1 - 0.5 \text{ m/min}$ ），定期更换模具。

增加热处理和退火步骤，消除内应力（退火温度 $1200 - 1400^{\circ} \text{C}$ ）。

使用激光切割替代机械切割，减少应力集中。

问题 4：性能不稳定

现象：电极在焊接中电弧不稳定或寿命缩短。

原因：原料杂质超标、微观结构不均匀或表面质量差。

解决方案：

加强原料检测，使用 ICP-MS 控制杂质含量（ $<0.005\%$ ）。

优化掺杂和烧结工艺，确保氧化锆均匀分布和晶粒尺寸控制（ $10 - 20 \mu\text{m}$ ）。

提高表面抛光精度（ $Ra < 0.4 \mu\text{m}$ ），减少污染物附着。

问题 5：环保问题

现象：生产过程中废气、废水或粉尘排放超标，影响合规性。

原因：除尘设备效率低、废水处理不当或能源消耗过高。

解决方案：

安装高效除尘系统（如 HEPA 过滤器），控制粉尘排放 $<10 \text{ mg/m}^3$ 。

采用闭循环废水处理系统，回收重金属和化学物质。

使用微波烧结或可再生能源降低能耗。

通过系统化的工艺优化和质量控制，上述问题可得到有效解决，确保钨钨电极的高性能和生产效率。



第七章 钨钨电极的用途

钨钨电极因其优异的电弧稳定性、点火性能、抗烧损能力和抗污染能力，在现代工业中具有广泛的应用。钨钨电极主要用于钨钨惰性气体保护焊接（TIG 焊接）、等离子切割、等离子喷涂等工艺，尤其在交流（AC）焊接中表现出色，适用于铝、镁等轻金属及其合金的加工。此外，其在航空航天、核工业、医疗设备制造等高精度领域以及特殊环境下的应用也日益增多。本章将详细探讨钨钨电极的各种用途，分析其不同工艺和行业中的具体表现，并对替代品和竞争态势进行深入剖析，以全面展示其在现代工业中的重要性。

7.1 钨钨电极在 TIG 焊接中的应用

钨钨惰性气体保护焊接（TIG 焊接，Tungsten Inert Gas Welding）是钨钨电极最主要的应用领域。TIG 焊接以其高精度、无飞溅、焊缝质量优异等特点，广泛应用于需要高质量焊缝的工业场景，如航空航天、汽车制造、船舶工业和精密仪器制造。钨钨电极因其在交流焊接中的出色性能，尤其适合焊接铝、镁合金和不锈钢等材料，成为 TIG 焊接中的首选电极之一。

7.1.1 铝及铝合金焊接

铝及铝合金因其轻质、高强度/重量比、良好的导热性和耐腐蚀性，在航空航天、汽车制造、船舶工业和建筑行业中应用广泛。然而，铝的焊接具有显著的技术挑战，主要源于其表面形成的氧化铝（ Al_2O_3 ）膜。氧化铝的熔点高达 $2050^{\circ}C$ ，远高于铝的熔点（约 $660^{\circ}C$ ），且具

有高化学稳定性，容易导致电弧不稳定、焊缝气孔或未熔合等缺陷。钨钨电极在铝及铝合金的交流 TIG 焊接中表现出卓越的性能，其优势体现在以下几个方面：

电弧稳定性：钨钨电极通过掺杂氧化锆 (ZrO_2) 降低了电子逸出功（约为 2.7 - 3.0 eV，显著低于纯钨的 4.5 eV），使电弧在交流正负半周切换时保持稳定。交流焊接的正半周（电极为阳极）具有“清洗作用”，能够有效去除铝表面的氧化膜，而钨钨电极的电弧集中性确保了焊缝质量。WZ8 电极（含 0.7% - 0.9% ZrO_2 ）在高电流（150 - 400 A）下能够形成锥形电弧，适合厚板铝合金（如 5xxx、6xxx 系列，厚度 > 5 mm）的焊接；WZ3 电极（含 0.15% - 0.4% ZrO_2 ）则更适合低至中等电流（50 - 150 A），用于薄板焊接（厚度 < 3 mm）。

点火性能：钨钨电极的低电子逸出功使其在高频交流电弧中点火迅速，点火电压通常低于 50 V，显著减少点火失败的概率。这对于自动化 TIG 焊接尤为重要，可提高生产效率并减少设备损耗。例如，在焊接铝合金薄板时，WZ3 电极的快速点火能够避免因多次点火导致的局部过热。

抗烧损能力：钨钨电极的高熔点（约 3422° C，接近纯钨）和氧化锆的分散相保护作用，使其在高温电弧（6000° C 以上）中能够维持尖端形状，减少烧损。WZ8 电极在高电流长时间焊接中的寿命可达纯钨电极的 2 - 3 倍，显著降低了电极更换频率和生产成本。

抗污染能力：铝合金焊接中，铝氧化物和其他挥发性杂质容易附着在电极尖端，导致电弧不稳定。钨钨电极的化学稳定性使其表面不易与氧化物反应，保持电弧清洁，减少焊缝缺陷。WZ8 电极在高湿度或复杂环境中仍能维持稳定的性能。

应用案例：

汽车工业：铝合金（如 5083、6061）在新能源汽车和轻量化汽车制造中广泛用于车身框架和电池外壳。钨钨电极（WZ8）在 TIG 焊接中确保了高强度、无缺陷焊缝。例如，特斯拉 Model Y 的铝合金车身焊接采用 WZ8 电极，显著提高了生产效率和焊缝质量。

船舶工业：铝合金船体（如 5083-H116）需耐海水腐蚀，TIG 焊接要求高质量焊缝以确保结构强度。钨钨电极的抗污染能力使其在高湿度、含盐环境中表现优异，广泛用于豪华游艇和军用舰艇的制造。

航空航天：铝合金（如 7075、2024）用于飞机机身和机翼结构，要求极高的焊缝强度和表面质量。钨钨电极（WZ8）在波音 787 和空客 A350 的铝合金部件焊接中被广泛采用，其电弧稳定性和抗烧损能力满足了航空航天领域的苛刻要求。

建筑与装饰：铝合金幕墙和结构件（如 6063 合金）在现代建筑中广泛应用，钨钨电极（WZ3）用于薄板焊接，确保美观、无飞溅的焊缝。

工艺参数：

电流类型：交流（AC），方波交流可进一步优化电弧稳定性。

电流范围：50 - 150 A（WZ3，薄板）或 150 - 400 A（WZ8，厚板）。

电极直径：1.6 - 2.4 mm（薄板）或 2.4 - 3.2 mm（厚板）。

尖端角度：45° - 60°，优化电弧集中性。

保护气体：高纯氩气（>99.99%）或氩氦混合气（氩气 70%+氦气 30%），流率 10 - 20 L/min。

版权与法律声明

焊接速度：0.1 - 0.5 m/min，视材料厚度和设备调整。

铝及铝合金焊接是钨钨电极的核心应用领域，其优异的性能显著提升了焊缝质量和生产效率。

7.1.2 不锈钢与镁合金焊接

不锈钢和镁合金是 TIG 焊接的常见材料，广泛应用于医疗设备、化工、航空航天和汽车工业。钨钨电极在这些材料的交流和直流（DC）焊接中表现出良好的适应性，尤其在交流焊接中具有独特优势。

不锈钢焊接不锈钢（如 304、316L、430）因其优异的耐腐蚀性和机械性能，广泛用于食品加工设备、医疗器械、化工管道和建筑结构。钨钨电极在不锈钢的 TIG 焊接中（尤其是交流焊接）具有以下优势：

电弧稳定性：钨钨电极在交流焊接中提供稳定的电弧，减少焊缝气孔、裂纹和氧化物夹杂。交流正半周的清洗作用能够有效去除不锈钢表面的氧化铬（ Cr_2O_3 ）和其他杂质，确保焊缝清洁。WZ3 电极适合低至中等电流（50 - 150 A），用于薄板不锈钢（如厚度 < 2 mm）的精密焊接；WZ8 电极适合高电流（150 - 300 A），用于厚板焊接。

点火性能：钨钨电极的低点火电压和快速点火特性减少了焊接过程中的电弧中断，尤其在高频交流焊接中表现优异。这对于自动化焊接生产线（如不锈钢管材生产）至关重要。

抗污染能力：不锈钢焊接中可能产生铬氧化物或其他挥发性杂质，钨钨电极的化学稳定性使其表面不易被污染，保持电弧稳定性。WZ8 电极在复杂环境中（如高湿度或含油污环境）仍能维持性能。

抗烧损能力：钨钨电极在交流焊接中能够承受正半周的高温冲击，减少尖端烧损，延长使用寿命。例如，WZ8 电极在连续焊接中寿命可达纯钨电极的 2 倍以上。

应用案例：

医疗设备：316L 不锈钢用于制造手术器械和植入物，要求焊缝光滑、无飞溅。钨钨电极（WZ3）在 TIG 焊接中确保了高精度和高质量焊缝，满足医疗行业严格的卫生标准。

化工工业：304 不锈钢管道用于输送腐蚀性液体，钨钨电极（WZ8）在厚壁管道焊接中提供稳定的电弧和抗污染性能，确保焊缝耐腐蚀性。

食品加工：不锈钢容器（如储罐、搅拌器）需符合食品安全标准，钨钨电极的抗污染能力避免了焊缝污染，提高了生产效率。

镁合金焊接镁合金（如 AZ31、AZ91、WE43）因其极低的密度（约 1.74 g/cm^3 ）和高强度/重量比，在航空航天、汽车和电子行业中应用日益增加。然而，镁合金的低熔点（约 650°C ）、高化学活性以及易形成氧化镁（ MgO ，熔点约 2852°C ）膜，使其焊接难度较大。钨钨电极在镁合金的交流 TIG 焊接中表现出色：

电弧控制：钨钨电极的集中电弧能够精确控制热输入，避免镁合金过热或烧穿。WZ3 电极适合薄板镁合金（厚度 $<3\text{ mm}$ ），WZ8 电极适合厚板（厚度 $>5\text{ mm}$ ）或高电流（ $150 - 250\text{ A}$ ）焊接。

抗氧化性能：钨钨电极在镁合金焊接中能够抵抗氧化镁污染，维持电弧稳定性。其表面光洁度（ $Ra < 0.4\text{ }\mu\text{m}$ ）进一步减少了污染物附着。

点火性能：钨钨电极在高频交流电弧中点火迅速，减少因点火困难导致的焊缝缺陷，尤其适合自动化焊接。

抗烧损能力：钨钨电极的高抗烧损能力使其在交流焊接中能够承受镁合金焊接的高温环境，延长电极寿命。

应用案例：

航空航天：镁合金用于制造卫星结构件、无人机框架和直升机部件。钨钨电极（WZ8）在 TIG 焊接中确保了高强度、无缺陷焊缝。例如，SpaceX 的 Starship 火箭部分结构件采用镁合金焊接，钨钨电极是常用选择。

汽车工业：镁合金轮毂和悬架部件用于轻量化汽车设计，钨钨电极（WZ3）在薄板焊接中提供了高质量焊缝。

电子行业：镁合金外壳用于笔记本电脑和手机，钨钨电极在精密焊接中确保了美观和结构强度。

工艺参数：

电流类型：交流（AC）或直流（DCEN，视材料和设备要求）。

电流范围： $50 - 150\text{ A}$ （WZ3，不锈钢/薄板镁合金）或 $150 - 300\text{ A}$ （WZ8，厚板）。

电极直径： $1.6 - 2.4\text{ mm}$ （薄板）或 $2.4 - 3.2\text{ mm}$ （厚板）。

尖端角度： $30^\circ - 60^\circ$ ，薄板焊接偏向锐角（ $30^\circ - 45^\circ$ ），厚板偏向钝角（ $45^\circ - 60^\circ$ ）。

保护气体：氩气或氩氦混合气（氩气 70%+氦气 30%），流率 $12 - 20\text{ L/min}$ 。

焊接速度： $0.1 - 0.4\text{ m/min}$ ，视材料厚度和工艺优化。

钨钨电极在不锈钢和镁合金焊接中的优异性能，使其在高精度、复杂材料焊接中占据重要地位，满足了多种工业领域的严格要求。

7.2 钨钨电极在等离子切割与喷涂中的应用

等离子切割和等离子喷涂是钨钨电极的重要应用领域，涉及高温等离子弧的生成和控制。钨钨电极因其高抗烧损能力、电弧稳定性和抗污染能力，成为这些高强度工艺的理想选择。

等离子切割

等离子切割利用高温等离子弧（温度可达 $20,000^\circ\text{C}$ 以上）熔化并吹离金属材料，广泛用于钢铁、铝合金、不锈钢和铜合金的切割，适用于造船、建筑、汽车制造和重型机械行业。钨钨电极在等离子切割中作为阴极，提供稳定的等离子弧，其性能优势包括：

电弧稳定性：钨钨电极（WZ8）在高电流（ $100 - 500\text{ A}$ ）下能够形成稳定的等离子弧，减少弧柱漂移，确保切割边缘平整（粗糙度 $Ra < 25\text{ }\mu\text{m}$ ）。其电弧集中性适合切割厚板（厚度 $20 - 50\text{ mm}$ ）或复杂形状。

抗烧损能力: 钨钨电极的高熔点和氧化钨的保护作用使其在高温等离子环境中能够维持尖端形状，减少烧损。WZ8 电极的寿命可达纯钨电极的 2 - 3 倍，降低了生产成本。

抗污染能力: 等离子切割中，金属蒸气和氧化物可能污染电极尖端。钨钨电极的化学稳定性使其表面不易附着污染物，保持等离子弧的稳定性。

应用案例:

造船工业: 钨钨电极用于切割船体钢板（如 AH36、DH36，厚度 30 - 50 mm），确保高精度和高效生产。例如，现代重工的造船厂采用 WZ8 电极进行等离子切割，提高了切割速度和质量。

汽车制造: 铝合金车身部件（如 6061 合金）的等离子切割需要高精度，钨钨电极（WZ3）在低至中等电流（100 - 200 A）下提供了稳定的电弧。

建筑行业: 钢结构梁和柱的切割采用钨钨电极，确保切割面光滑，减少后续加工。

工艺参数:

电流类型: 直流 (DCEN)。

电流范围: 100 - 500 A，视材料厚度和设备调整。

电极直径: 2.4 - 4.0 mm。

保护气体: 氩气、氮气或氩氢混合气（氩气 95%+氢气 5%），流率 20 - 30 L/min。

喷嘴设计: 钨钨电极需与高耐热性喷嘴（如氧化钨陶瓷）配合，确保等离子弧集中。

等离子喷涂

等离子喷涂通过高温等离子弧（温度 10,000 - 20,000° C）将粉末材料（如氧化钨、氧化铝）熔化并喷涂到基材表面，形成耐磨、耐高温或耐腐蚀涂层，广泛用于航空发动机、燃气轮机和医疗植入物制造。钨钨电极在等离子喷涂中作为阴极，提供稳定的等离子弧，其性能优势包括:

电弧稳定性: WZ8 电极在高电流（300 - 600 A）下能够形成均匀的等离子弧，确保涂层厚度一致（通常 0.1 - 1 mm）和结构均匀。

抗烧损能力: 钨钨电极在高温等离子环境中能够承受长时间工作，减少尖端烧损和电极更换频率。例如，WZ8 电极在连续喷涂中寿命可达 100 小时以上。

抗污染能力: 等离子喷涂中，粉末材料（如氧化钨颗粒）可能附着在电极尖端。钨钨电极的表面光洁度和化学稳定性减少了污染影响，保持喷涂质量。

应用案例:

航空航天: 钨钨电极用于喷涂陶瓷涂层（如氧化钨）到涡轮叶片表面，提高耐高温性能。例如，GE 航空发动机的涡轮叶片喷涂采用 WZ8 电极，确保涂层均匀性和耐久性。

能源工业: 钨钨电极用于喷涂耐磨涂层到锅炉管道或燃气轮机部件，延长设备寿命。

医疗行业: 钨钨电极用于喷涂生物相容性涂层（如羟基磷灰石）到骨科植入物表面，提高植入物的耐腐蚀性和生物相容性。

工艺参数:

电流类型: 直流 (DCEN)。

电流范围: 300 - 600 A。

电极直径: 3.2 - 4.8 mm。

保护气体: 氩气或氩氦混合气 (氩气 70%+氦气 30%), 流率 30 - 50 L/min。

粉末材料: 氧化锆、氧化铝或金属合金粉末, 粒径 20 - 100 μm 。

锆钨电极在等离子切割与喷涂中的优异性能, 使其成为高强度、高精度工艺的不可或缺材料, 推动了相关行业的技术进步和效率提升。

7.3 锆钨电极的其他工业应用

锆钨电极的应用不仅限于 TIG 焊接和等离子工艺, 还在航空航天、核工业和医疗设备制造等高新技术领域发挥重要作用。这些领域对电极的性能要求极高, 锆钨电极因其高可靠性、抗烧损能力和抗污染能力而被广泛采用。

7.3.1 航空航天

航空航天领域对材料和焊接工艺的要求极为严格, 涉及高强度、轻量化材料 (如铝合金、镁合金、钛合金) 和复杂结构 (如飞机机身、发动机部件)。锆钨电极在航空航天领域的 TIG 焊接和等离子喷涂中具有重要应用, 其优势包括:

高精度焊接: 航空航天部件 (如波音 787 的铝合金机身、空客 A350 的镁合金结构件) 要求焊缝无缺陷、高强度。锆钨电极 (WZ8) 在交流 TIG 焊接中提供稳定的电弧和抗污染能力, 确保焊缝质量。例如, 波音 737 的机翼铝合金蒙皮焊接中, WZ8 电极能够承受高电流 (200 - 300 A) 并维持电弧稳定性。

等离子喷涂: 航空发动机涡轮叶片需喷涂耐高温陶瓷涂层 (如氧化锆或氧化钇), 锆钨电极在等离子喷涂中提供稳定的等离子弧, 确保涂层均匀性和附着力。例如, 罗尔斯-罗伊斯 Trent XWB 发动机的叶片喷涂广泛采用 WZ8 电极。

轻量化材料: 镁合金和铝合金在航空航天中的应用日益增加, 锆钨电极的抗污染能力和电弧控制性能使其在这些材料的焊接中表现出色。例如, SpaceX 的 Starship 火箭使用镁合金结构件, 锆钨电极在 TIG 焊接中确保了高质量焊缝。

应用案例:

飞机制造: 锆钨电极用于波音和空客飞机的铝合金机身和机翼焊接, 确保结构强度和耐腐蚀性。

火箭制造: 锆钨电极在 SpaceX 和 Blue Origin 的火箭部件焊接中被广泛使用, 满足高可靠性和轻量化的要求。

卫星制造: 锆钨电极用于焊接卫星的镁合金框架和等离子喷涂天线反射器的陶瓷涂层。

7.3.2 核工业

核工业对材料和焊接工艺的要求极高, 涉及高温、高辐射和强腐蚀环境。锆钨电极在核反应堆部件的焊接和等离子喷涂中具有重要应用, 其优势包括:

抗腐蚀性性能：核反应堆的压力容器和管道通常使用不锈钢或钨合金，钨钨电极在 TIG 焊接中能够抵抗腐蚀性环境中的氧化物污染，保持电弧稳定性。例如，WZ8 电极在 316L 不锈钢压力容器的焊接中提供了高质量焊缝。

高可靠性：核工业要求焊缝无缺陷、无裂纹，钨钨电极的电弧稳定性和抗烧损能力满足了这些要求。

等离子喷涂：核反应堆的屏蔽材料和耐高温部件需喷涂陶瓷涂层，钨钨电极在等离子喷涂中确保涂层均匀性和耐久性。

应用案例：

反应堆部件：钨钨电极用于焊接核反应堆的钨合金燃料棒外壳和不锈钢冷却管道，确保长期可靠性。

屏蔽材料：钨钨电极在等离子喷涂中用于制造核反应堆的陶瓷屏蔽涂层，提高耐高温和抗辐射性能。

核废料处理：钨钨电极用于焊接核废料储存容器的不锈钢外壳，确保密封性和耐腐蚀性。

7.3.3 医疗设备制造

医疗设备制造对焊接工艺的要求极高，涉及高精度、无污染和生物相容性。钨钨电极在医疗设备制造中的 TIG 焊接和等离子喷涂中表现出色，其优势包括：

高精度焊接：医疗设备（如手术器械、植入物）通常使用 316L 不锈钢或钛合金，钨钨电极（WZ3）在薄板焊接中提供稳定的电弧和无飞溅焊缝，确保表面光滑和卫生标准。例如，心脏起搏器的钛合金外壳焊接采用 WZ3 电极。

抗污染能力：医疗设备焊接要求焊缝无杂质和氧化物，钨钨电极的抗污染能力避免了污染物对焊缝的污染，满足严格的医疗标准。

等离子喷涂：钨钨电极用于喷涂骨科植入物的生物相容性涂层（如羟基磷灰石），确保涂层均匀性和生物相容性。例如，髋关节植入物的喷涂工艺采用 WZ8 电极。

应用案例：

手术器械：钨钨电极用于焊接不锈钢手术刀和镊子，确保焊缝光滑、无毒。

植入物：钨钨电极在钛合金骨骼植入物的焊接和等离子喷涂中提供高精度和可靠性。

诊断设备：钨钨电极用于 X 射线机和 CT 扫描仪的不锈钢外壳焊接，确保结构强度和耐腐蚀性。

7.4 钨钨电极在特殊环境下的应用

钨钨电极在特殊环境下的应用（如高湿度、高温、高辐射或含腐蚀性气体的环境）展示了其卓越的适应性和可靠性。这些环境对电极的抗污染能力、抗烧损能力和化学稳定性提出了更高要求。

高湿度环境：在海洋工程和船舶制造中，焊接环境可能具有高湿度（>80%）和盐雾。钨钨电极的抗污染能力和化学稳定性使其在这些环境中能够维持电弧稳定性。例如，WZ8 电极在海

洋平台铝合金结构的 TIG 焊接中表现出色，抵抗海水盐雾的腐蚀。

高温环境：等离子切割和喷涂中的高温环境 ($>10,000^{\circ}\text{C}$) 对电极的抗烧损能力要求极高。钨钨电极 (WZ8) 的氧化钨保护层能够有效减少尖端烧损，延长使用寿命。例如，在燃气轮机叶片喷涂中，WZ8 电极在高温等离子弧中工作超过 100 小时。

高辐射环境：核工业中的焊接和喷涂工艺可能涉及高辐射环境，钨钨电极的无放射性和高可靠性使其成为理想选择。例如，WZ8 电极在核反应堆屏蔽材料的喷涂中能够承受辐射环境的影响。

腐蚀性气体环境：化工行业中的焊接可能涉及含氯气或硫化物的环境，钨钨电极的化学稳定性使其能够抵抗腐蚀性气体的侵蚀。例如，WZ3 电极在氯气管道的不锈钢焊接中保持了稳定的电弧性能。

工艺优化：

保护气体：在特殊环境中，使用高纯氩气或氩氢混合气（流率 15 - 25 L/min）增强电极保护。

电极选择：高电流、高强度环境优先选择 WZ8，低电流或薄板焊接选择 WZ3。

尖端设计：特殊环境中可采用钝角尖端 ($45^{\circ} - 60^{\circ}$) 以提高电弧稳定性。

钨钨电极在特殊环境下的优异表现，使其在极端条件下的工业应用中具有不可替代的地位。

7.5 钨钨电极的替代品与竞争分析

尽管钨钨电极在 TIG 焊接和等离子工艺中具有显著优势，但其他类型的钨电极和替代材料也在特定场景中形成竞争。以下分析钨钨电极的替代品及其优劣势，以及市场竞争态势：

替代品分析

纯钨电极 (WP)

优点：纯钨电极无掺杂、无放射性，化学稳定性高，适合低电流直流 (DC) 焊接。

缺点：在交流焊接中电弧稳定性差，点火性能弱，尖端烧损严重，寿命短。纯钨电极在铝合金焊接中的表现远不如钨钨电极。

适用场景：低电流直流焊接（如小型不锈钢部件），不适合高精度或交流焊接。

钍钨电极 (WT20, 含 1.5% - 2.0% ThO_2)

优点：点火性能优异，电弧稳定性好，适合直流焊接，广泛用于碳钢和不锈钢焊接。

缺点：氧化钍具有轻微放射性，对健康和环境存在潜在风险；在交流焊接中电弧集中性不如钨钨电极。

适用场景：直流焊接高强度钢材，但在环保要求严格的地区逐渐被替代。

铈钨电极 (WC20, 含 2.0% CeO_2)

优点：点火性能好，无放射性，适合低电流直流和交流焊接，成本较低。

缺点：在高电流交流焊接中电弧稳定性略逊于钨钨电极，寿命较短。

适用场景：中小型焊接任务，适合成本敏感的应用。

铈钨电极 (WL15、WL20, 含 1.0% - 2.0% La_2O_3)

优点: 点火性能优异, 寿命长, 适合直流和交流焊接, 综合性能较强。

缺点: 在高电流交流焊接中电弧集中性略逊于钨钨电极, 成本较高。

适用场景: 通用焊接任务, 尤其在直流焊接中表现优异。

新型复合电极

描述: 近年来, 科研机构开发了掺杂多种氧化物 (如 $\text{La}_2\text{O}_3+\text{CeO}_2+\text{ZrO}_2$) 的复合钨电极, 旨在结合各种电极的优点。

优点: 综合性能优异, 可能在特定场景中超越钨钨电极。

缺点: 生产工艺复杂, 成本高, 尚未实现大规模工业化。

适用场景: 实验性应用或高端定制化焊接。

竞争分析

市场定位: 钨钨电极在交流 TIG 焊接 (尤其铝、镁合金焊接) 和等离子工艺中具有独特优势, 市场占有率在高精度焊接领域较高。WZ8 电极在航空航天和核工业中几乎无可替代, 而 WZ3 电极在中小型企业中因其性价比高而广泛使用。

环保趋势: 随着环保法规的加强 (如欧盟 REACH 法规), 钨钨电极因放射性问题逐渐被钨钨电极和钨钨电极取代。钨钨电极的无放射性和抗污染能力使其在欧美市场更具竞争力。

成本与性能: 钨钨电极的成本高于纯钨电极和钨钨电极, 但低于铈钨电极和新型复合电极。其性能/成本比在高精度交流焊接中具有优势, 但在低电流直流焊接中可能被钨钨或铈钨电极替代。

技术进步: 钨钨电极的竞争压力部分来自新型复合电极和纳米技术的发展。例如, 纳米级氧化钨掺杂的钨钨电极正在研发中, 可能进一步提升性能, 但成本仍需优化。

区域差异: 在北美和欧洲, 钨钨电极因其环保性和高性能占据主导地位; 在中国和亚洲其他地区, 钨钨电极因成本低而具有一定市场份额, 但在高端应用中钨钨电极仍占优势。

未来趋势

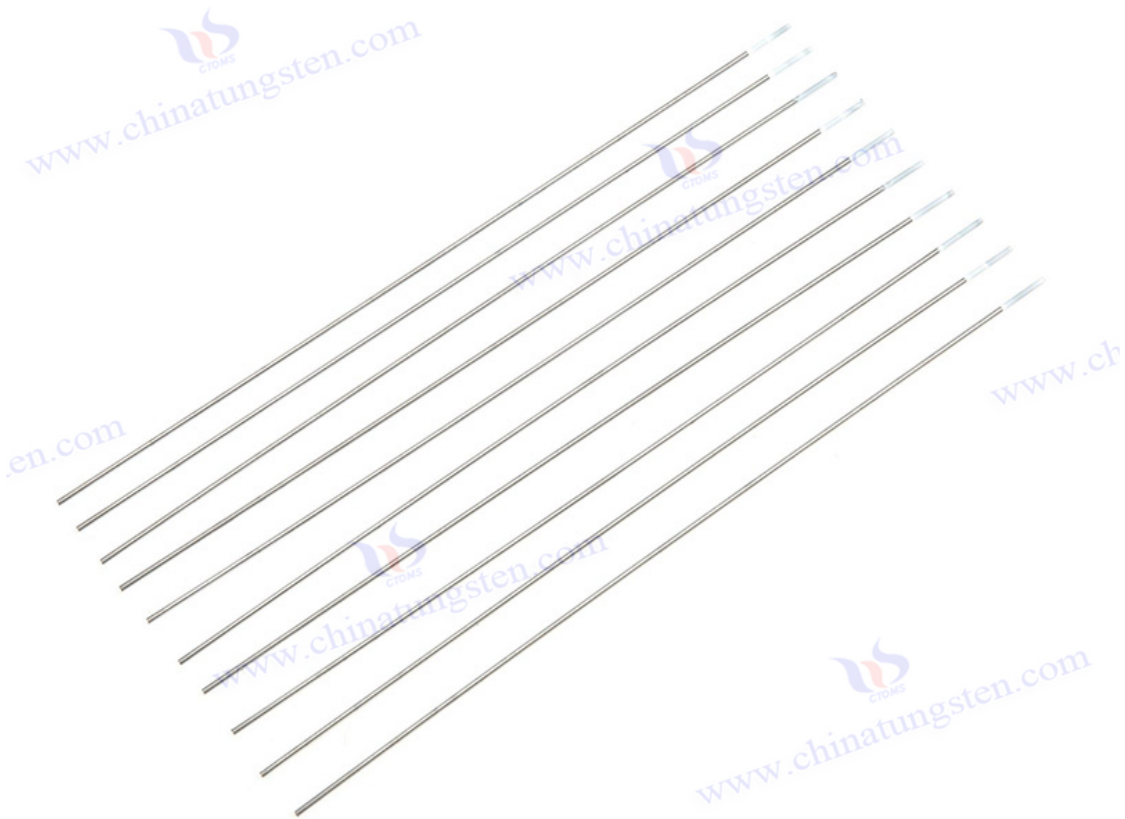
性能优化: 通过纳米掺杂和复合掺杂技术提升钨钨电极的电弧稳定性和寿命, 增强其在高电流和特殊环境中的竞争力。

绿色制造: 钨钨电极生产中的绿色技术和废料回收将进一步提高其市场吸引力。

新兴应用: 随着新能源 (风能、太阳能设备) 和 3D 打印技术的发展, 钨钨电极在这些领域的潜在应用将增加其市场竞争力。

替代品挑战: 新型复合电极和非钨基电极 (如碳基电极) 的研发可能对钨钨电极形成长期竞争, 但短期内钨钨电极仍将是高精度交流焊接的首选。

钨钨电极凭借其在交流焊接和等离子工艺中的独特优势, 在高精度工业领域占据重要地位。虽然面临替代品的竞争, 但其性能、环保性和成本的平衡使其在未来仍将保持市场竞争力。



第八章 钨钨电极的生产设备

钨钨电极的生产是一项高精度、高技术含量的工艺，涉及从原料处理到成品加工的多个环节。生产设备的性能直接影响钨钨电极的质量、性能一致性和生产效率。本章将详细探讨钨钨电极生产中使用的各类设备，包括原料处理设备、压制与成型设备、烧结与热处理设备、精密加工设备、质量检测设备，以及设备维护与优化的技术要点。每一类设备的设计、功能和操作要求都将结合钨钨电极的生产需求进行分析，以提供全面的技术参考。

8.1 钨钨电极的原料处理设备

原料处理是钨钨电极生产的第一步，涉及高纯度钨粉和氧化钨（ ZrO_2 ）粉末的研磨、混合、筛分和分级。原料处理设备需确保粉末的粒度均匀、掺杂均匀性高，并避免杂质污染，以满足钨钨电极（如 WZ3、WZ8）的严格化学成分要求。

8.1.1 研磨与混合设备

研磨设备

研磨设备用于细化钨粉和氧化钨粉末的粒径，优化其形貌和粒度分布，以提高后续混合和烧结效果。常用研磨设备包括：

行星式球磨机：行星式球磨机通过高速旋转的研磨罐和研磨球（如氧化钨球或钨球）实现粉

末细化。设备特点包括：

容量：10 - 100 L，适合中小批量生产。

转速：200 - 600 rpm，可调节以控制研磨强度。

研磨介质：氧化锆球（直径 2 - 10 mm）或钨球，减少污染。

冷却系统：配备水冷或气冷系统，防止研磨过程中粉末过热（温度控制 $<50^{\circ}\text{C}$ ）。

应用：将钨粉粒径从 10 - 20 μm 细化至 3 - 5 μm ，氧化锆从 1 - 2 μm 细化至 0.1 - 0.5 μm 。

气流磨：利用高速气流（通常为压缩空气或氮气）使粉末颗粒相互碰撞，实现超细研磨。设备特点包括：

粒径控制：可将粉末细化至亚微米级（ $<1\ \mu\text{m}$ ），适合纳米级氧化锆的制备。

无污染：无研磨介质，减少杂质引入。

效率：单次处理量可达 1 - 10 kg，适合大批量生产。

振动球磨机：通过高频振动实现粉末研磨，适合小批量实验生产。设备特点包括低能耗和操作简便，但研磨效率低于行星式球磨机。

研磨设备的选择需根据生产规模和粉末粒径要求确定。例如，高端钨钨电极（如 WZ8）生产倾向于使用气流磨以实现纳米级氧化锆的研磨，而中小型生产可使用行星式球磨机。

混合设备

混合设备用于将钨粉与氧化锆粉末按比例（如 WZ3 为 0.3% ZrO_2 ，WZ8 为 0.8% ZrO_2 ）均匀混合，确保掺杂均匀性。常用混合设备包括：

V 型混合机：通过 V 形容器旋转实现粉末混合，适合干法掺杂。设备特点包括：

容量：50 - 500 L，适合中大规模生产。

混合时间：2 - 4 小时，混合均匀性 $>99\%$ 。

气氛控制：配备惰性气体（如氩气）保护系统，防止粉末氧化。

高速搅拌机：通过高速搅拌桨（500 - 1000 rpm）实现粉末混合，适合干法和湿法掺杂。设备特点包括：

高效混合：混合时间 1 - 2 小时，均匀性高。

液体介质：可加入去离子水或乙醇进行湿法混合，需配合喷雾干燥设备。

超声波分散机：用于湿法掺杂，通过超声波振动（频率 20 - 40 kHz）将钨粉和氧化锆分散在液体介质中。设备特点包括：

高均匀性：适合纳米级氧化锆的混合。

小批量生产：处理量通常 $<10\ \text{kg}$ ，适合高端电极生产。

混合设备需配备精确的称量系统（如电子天平，精度 $\pm 0.001\ \text{g}$ ），确保氧化锆比例符合目标牌号要求。现代混合设备常集成 PLC（可编程逻辑控制器）系统，实时监控混合参数。

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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化钨（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化钨含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



8.1.2 筛分与分级设备

筛分与分级设备用于控制粉末的粒度分布，去除过大或过小的颗粒，确保原料符合生产要求。常用设备包括：

振动筛：通过高频振动（1000 - 3000 次/min）将粉末按粒径分级。设备特点包括：

筛孔尺寸：10 - 50 μm ，适合钨粉（3 - 5 μm ）和氧化锆（0.1 - 1 μm ）的分级。

处理量：0.5 - 5 kg/min，适合大批量生产。

防堵设计：配备超声波清网装置，防止筛孔堵塞。

气流分级机：利用气流将粉末按粒径分离，适合超细粉末（如纳米级氧化锆）的分级。设备特点包括：

分级精度：可分离 0.1 - 10 μm 颗粒，精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

无污染：采用惰性气体（如氮气）作为分级介质，避免氧化。

自动化：配备自动收集系统，提高生产效率。

离心分级机：通过离心力实现粉末分级，适合小批量高精度生产。设备特点包括高分级精度但处理量较小（ $< 1 \text{ kg/min}$ ）。

筛分与分级设备需定期校准，确保粒径分布符合标准（如钨粉 D50 为 3 - 5 μm ，氧化锆 D50 为 0.1 - 0.5 μm ）。现代设备常集成激光粒度分析仪，实时监测分级效果。

8.2 钨钨电极的压制与成型设备

压制与成型设备用于将混合粉末压制成药料，为后续烧结和加工提供基础。设备的性能直接影响药料的密度、强度和一致性。

8.2.1 液压机与等静压机

液压机液

压机通过刚性模具将粉末压制成药料，适用于小批量生产或大直径药料。设备特点包括：

压力范围：50 - 100 MPa，可调节以控制药料密度（50% - 60%理论密度）。

模具材料：硬质合金或高强度钢，耐磨性高。

生产效率：单次压制时间 10 - 30 秒，适合直径 10 - 20 mm 的药料。

控制系统：配备 PLC 系统，精确控制压力和保压时间。

应用：适合生产非标尺寸电极或实验性药料。

液压机的局限性在于药料密度分布可能不均匀，适合简单形状的压制。

冷等静压机（CIP）冷等静压机通过液体介质（如水或油）均匀施压，形成高密度、均匀的药料，广泛用于钨钨电极生产。设备特点包括：

压力范围：100 - 200 MPa，药料密度可达 60% - 70%理论密度。

模具设计：柔性模具（如橡胶或聚氨酯），确保压力均匀分布。

版权与免责声明

处理量：单次可压制多根坯料（直径 10 - 20 mm，长度 100 - 300 mm）。

自动化：配备自动装卸系统，提高生产效率。

应用：适合大批量生产高精度钨钨电极坯料。

冷等静压机的优势在于坯料密度均匀，减少烧结过程中的孔隙和裂纹。现代等静压机常集成压力传感器和数据采集系统，实时监控压制效果。

8.2.2 模具设计与制造

模具是压制与成型设备的核心部件，其设计和制造直接影响坯料质量。模具设计需考虑以下因素：

材料选择：模具通常采用硬质合金（如 WC-Co）或高强度钢，硬度 >60 HRC，耐磨性和耐腐蚀性强。

尺寸精度：模具内径公差 ± 0.01 mm，确保坯料直径一致（10 - 20 mm）。

表面光洁度：模具内表面粗糙度 $Ra < 0.2 \mu m$ ，减少坯料表面缺陷。

结构设计：模具需具备拆卸和清洗功能，方便维护。冷等静压模具采用柔性材料（如橡胶），确保压力均匀传递。

模具制造采用数控加工（如五轴 CNC 机床）和电火花加工（EDM），确保高精度和复杂形状的实现。现代模具设计还引入有限元分析（FEA），模拟压制过程中的应力分布，优化模具结构。

8.3 钨钨电极的烧结与热处理设备

烧结与热处理设备用于将压制坯料转化为致密的电极坯料，并消除内应力，优化微观结构。设备的性能直接影响电极的密度、晶粒尺寸和性能稳定性。

8.3.1 高温烧结炉

高温烧结炉是钨钨电极生产的核心设备，用于在 1800 - 2200° C 下烧结坯料，使钨颗粒结合并形成稳定的氧化钨分散相。常用烧结炉包括：

真空烧结炉

特点：真空度 $< 10^{-3}$ Pa，防止钨氧化；温度范围 1800 - 2200° C，精度 $\pm 5^\circ$ C。

加热元件：钼或石墨加热体，耐高温性能优异。

烧结容量：单炉处理量 10 - 100 kg，适合中大规模生产。

控制系统：配备 PLC 和红外测温仪，实时监控温度和真空度。

应用：适合生产高纯度钨钨电极（如 WZ8），确保低氧含量（ $< 0.005\%$ ）。

氢气烧结炉

特点：使用高纯氢气（ $> 99.999\%$ ）作为保护气氛，流率 10 - 50 L/min；温度范围 1800 - 2100° C。

还原性能：氢气有效去除坯料中的氧气和挥发性杂质。

安全设计：配备氢气泄漏检测和自动排气系统，确保操作安全。

应用：适合大批量生产，成本低于真空烧结。

微波烧结炉

特点：通过微波加热（频率 2.45 GHz）实现快速、均匀烧结，烧结时间 2 - 4 小时，节能 30% - 40%。

优势：减少晶粒长大，优化微观结构（晶粒尺寸 10 - 20 μm ）。

局限性：设备成本高，适合高端电极生产。

烧结炉需配备精准的温控系统（误差 $\leq \pm 10^\circ\text{C}$ ）和气氛控制系统，确保烧结密度达到 95% - 98% 理论密度，孔隙率 $\leq 0.5\%$ 。

8.3.2 真空热处理炉

真空热处理炉用于消除压制和烧结过程中的内应力，优化电极的晶体结构和机械性能。

设备特点包括：

温度范围：1200 - 1600 $^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

真空度： $< 10^{-2}$ Pa，防止电极氧化。

加热元件：钼或钨丝，耐高温性能优异。

冷却系统：配备水冷或气冷系统，控制冷却速率（20 - 50 $^\circ\text{C/h}$ ）以避免应力集中。

应用：用于烧结后坯料的退火处理，改善延展性和抗断裂能力。

现代热处理炉常集成多段温控程序，通过计算机控制实现精确的升温、保温和冷却曲线。部分高端设备还配备在线监测系统，实时检测坯料的应力和微观结构变化。

8.4 钨电极的精密加工设备

精密加工设备用于将烧结坯料加工成符合规格的电极棒，包括拉拔、切割和表面抛光。设备的精度和稳定性直接影响电极的尺寸公差和表面质量。

8.4.1 拉拔机与切割机

拉拔机

拉拔机通过一系列模具将烧结坯料拉伸成细长电极棒（直径 1.0 - 6.4 mm）。设备特点包括：

拉拔速度：0.1 - 1 m/min，伺服电机控制，精度 ± 0.01 m/min。

模具材料：硬质合金或金刚石，硬度 > 60 HRC，耐磨性强。

道次设计：10 - 20 道次，每次减小直径 5% - 10%。

润滑系统：配备石墨或二硫化钼润滑剂喷涂装置，减少表面划痕。

应用：将坯料直径从 10 - 20 mm 减小至 1.0 - 6.4 mm，公差 ± 0.05 mm。

现代拉拔机采用数控系统，自动调节拉拔速度和张力，减少微裂纹和表面缺陷。

切割机

切割机用于将拉拔后的电极棒切成标准长度（如 150 mm、175 mm）。常用设备包括：

线切割机：通过电火花放电切割，精度 ± 0.1 mm，适合高精度要求。

激光切割机：使用高功率激光（功率 1 - 5 kW）切割，速度快（0.5 - 2 m/min），表面光洁度高（ $Ra < 0.8 \mu m$ ）。

冷却系统：配备水冷或油冷装置，防止电极过热。

应用：切割电极棒至标准长度，满足 TIG 焊接和等离子切割需求。

8.4.2 表面抛光设备

表面抛光设备用于提高电极表面的光洁度（ $Ra < 0.4 \mu m$ ），减少污染物附着和电弧漂移。常用设备包括：

旋转抛光机：通过旋转抛光轮（转速 1000 - 3000 rpm）和抛光介质（如氧化铝或金刚石悬浮液）实现表面抛光。设备特点包括：

抛光精度：表面粗糙度 $Ra < 0.4 \mu m$ 。

自动化：配备自动进给系统，处理量 100 - 500 根/小时。

应用：适合大批量电极抛光。

电化学抛光机：通过电化学反应去除电极表面微小缺陷，适合高精度电极。设备特点包括：

抛光液：磷酸或硫酸基电解液，环保型配方减少污染。

抛光时间：10 - 30 秒/根，效率高。

表面质量： $Ra < 0.2 \mu m$ ，接近镜面效果。

激光抛光机：利用激光束（功率 500 - 2000 W）熔平电极表面，适合高端电极生产。设备特点包括高精度（ $Ra < 0.1 \mu m$ ）和无接触加工。

抛光设备需配备粉尘收集系统，防止抛光过程中的钨粉和氧化锆粉尘污染环境。

8.5 钨钨电极的质量检测设备

质量检测设备用于确保钨钨电极的化学成分、微观结构、尺寸精度和表面质量符合国际标准（如 ISO 6848、AWS A5.12、GB/T 4187）。常用设备包括：

化学成分分析设备

电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）：检测钨粉和氧化锆的杂质含量（如 Fe、Si、C $< 0.005\%$ ），精度 $\pm 0.001\%$ 。

X 射线荧光光谱仪（XRF）：快速分析氧化锆含量（如 WZ3 为 0.3%、WZ8 为 0.8%），适合在线检测。

微观结构分析设备

扫描电子显微镜（SEM）：分析电极的晶粒尺寸（10 - 20 μm ）和氧化锆分布均匀性。

X 射线衍射仪（XRD）：检测晶体结构和相组成，确保无杂相。

尺寸检测设备

激光测距仪：测量电极直径（公差 $\pm 0.05 mm$ ）和长度（公差 $\pm 1 mm$ ）。

表面粗糙度仪：检测电极表面粗糙度（ $Ra < 0.4 \mu m$ ）。

缺陷检测设备

超声波检测仪：检测坯料和成品电极的内部裂纹和孔隙，精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。

X 射线检测仪：非破坏性检测内部缺陷，适合大批量生产。

现代检测设备常集成数据采集系统，通过人工智能算法分析检测结果，提高检测效率和准确性。

8.6 钨钨电极的设备维护与优化

设备维护与优化是确保生产连续性和电极质量的关键，涉及定期维护、故障诊断和性能优化。

设备维护

定期检查：每月检查研磨、混合、烧结和加工设备的运行状态，校准传感器和控制系统。

润滑与清洁：定期清洁模具和拉拔机，添加润滑剂（如石墨）以减少磨损。

部件更换：定期更换磨损部件（如烧结炉的加热元件、拉拔机的模具），确保设备性能。

安全管理：氢气烧结炉需配备泄漏检测和自动排气系统，防止安全事故。

设备优化

自动化升级：引入工业物联网（IIoT）和 SCADA 系统，实时监控设备状态和生产数据，提高生产效率 10% - 20%。

智能化改造：使用机器学习算法优化设备参数（如烧结温度、拉拔速度），减少废品率（ $< 1\%$ ）。

绿色改造：安装余热回收系统和高效除尘设备，降低能耗和粉尘排放（ $< 10\text{ mg/m}^3$ ）。

模块化设计：采用模块化设备结构，方便维护和升级，缩短停机时间。

设备维护与优化的结合确保了钨钨电极生产线的稳定运行和高效率，满足高精度工业应用的需求。



第九章 钨钨电极的国内外标准

钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）和等离子切割中的关键材料，其性能和质量需符合严格的国内外标准。标准化确保了钨钨电极的化学成分、物理性能、尺寸精度和应用一致性，满足航空航天、汽车制造、核工业等高精度领域的需求。本章将详细探讨钨钨电极的国际标准（如 ISO 6848、AWS A5.12）和国内标准（如 GB/T 4187），分析其具体内容与要求，比较国内外标准的异同，并展望标准的更新与发展趋势。

9.1 钨钨电极的国际标准

国际标准为钨钨电极的生产、测试和应用提供了统一的规范，广泛应用于全球贸易和工业生产。主要的国际标准包括国际标准化组织（ISO）的 ISO 6848 和美国焊接学会（AWS）的 AWS A5.12。

9.1.1 ISO 标准（如 ISO 6848）

ISO 6848（最新版本为 ISO 6848:2015, Arc-welding and cutting — Non-consumable tungsten electrodes — Classification）是钨钨电极的国际标准，规定了非消耗性钨电极的分类、化学成分、性能要求和测试方法。该标准适用于 TIG 焊接和等离子切割中的钨电极，包括钨钨电极（WZ 系列）。

标准内容:

分类: 钨钨电极按氧化锆(ZrO_2)含量分类, 主要包括 WZ3(0.15% - 0.4% ZrO_2)和 WZ8(0.7% - 0.9% ZrO_2)。标准还定义其他类型钨电极, 如纯钨(WP)、钍钨(WT)和铈钨(WC)。

化学成分: 规定了钨基体纯度(>99.5%)和氧化锆含量的公差范围, 杂质(如 Fe、Si、C)含量需控制在 0.005%以下。

性能要求: 包括电弧稳定性、点火性能和抗烧损能力。钨钨电极需在交流(AC)焊接中表现出优异的电弧集中性和抗污染能力。

测试方法: 包括化学成分分析(使用 ICP-MS 或 XRF)、电弧性能测试(在标准焊接条件下测量点火电压和电弧稳定性)以及表面质量检查(表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu m$)。

标识与包装: 要求电极表面标注牌号(如 WZ8)、直径和长度, 包装需防潮、防尘, 并附有合格证书。

应用范围: ISO 6848 适用于全球 TIG 焊接和等离子切割领域, 尤其在航空航天、船舶工业和汽车制造等高要求场景中被广泛采用。例如, 波音和空客的铝合金部件焊接需符合 ISO 6848 标准的钨钨电极。

特点与优势:

全球化适用性: ISO 6848 被全球大多数国家和地区认可, 便于国际贸易和跨国生产。

严格的质量控制: 标准对化学成分和性能要求详细, 确保电极的一致性和可靠性。

环保导向: 鼓励使用无放射性的钨钨电极, 逐步替代钍钨电极(WT20)。

9.1.2 AWS 标准(如 AWS A5.12)

AWS A5.12/A5.12M:2009 (Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting) 是美国焊接学会制定的钨电极标准, 广泛应用于北美市场, 涵盖钨钨电极的分类、性能和测试要求。

标准内容:

分类: 钨钨电极分为 EWZr-1(WZ8, 含 0.7% - 0.9% ZrO_2)和 EWZr-3(WZ3, 含 0.15% - 0.4% ZrO_2)。标准还包括其他电极类型, 如纯钨(EWP)、钍钨(EWTh-2)和铈钨(EWC-2)。

化学成分: 钨基体纯度要求>99.5%, 氧化锆含量公差 $\pm 0.05\%$, 杂质(如 Fe、Si)含量<0.005%。

性能要求: 强调钨钨电极在交流焊接中的电弧稳定性、抗烧损能力和抗污染能力, 尤其适合铝和镁合金焊接。

测试方法: 包括化学成分分析(通过光谱分析)、电弧性能测试(测量点火电压<50 V 和电弧漂移率<5%)和表面质量检查($Ra < 0.8 \mu m$)。

尺寸与标识: 规定电极直径(1.0 - 6.4 mm)和长度(75 - 300 mm), 要求表面标注 AWS 分类代码(如 EWZr-1)。

应用范围: AWS A5.12 在北美市场具有广泛影响力, 尤其在汽车制造、航空航天和能源行业中被采用。例如, 特斯拉的铝合金车身焊接和通用电气的燃气轮机部件喷涂均需符合 AWS A5.12 标准。

特点与优势:

详细的性能测试: 标准对电弧性能和抗烧损能力的测试方法更加具体, 适合高精度应用。

区域性权威: AWS 标准在北美市场具有较高认可度, 便于本地化生产和认证。

兼容性强: 与 ISO 6848 在分类和要求上有较高一致性, 便于国际标准协调。

9.2 钨钨电极的国内标准

中国作为全球最大的钨资源国和钨钨电极生产国, 制定了一系列国内标准, 涵盖钨钨电极的生产、测试和应用。主要标准包括国家标准 (GB/T 标准) 和行业标准, 以及企业内部标准。

9.2.1 GB/T 标准

GB/T 4187-2017 (Tungsten Electrodes) 是中国国家标准, 规定了钨电极的分类、化学成分、性能要求和测试方法, 适用于 TIG 焊接和等离子切割。

标准内容:

分类: 钨钨电极分为 WZ3 (0.15% - 0.4% ZrO_2) 和 WZ8 (0.7% - 0.9% ZrO_2), 与其他类型钨电极 (如 WT20、WC20) 并列。

化学成分: 钨基体纯度 >99.5%, 氧化钨含量公差 $\pm 0.05\%$, 杂质 (如 Fe、Si、C) 含量 <0.005%。

性能要求: 要求钨钨电极在交流焊接中具有优异的电弧稳定性 (电弧漂移率 <5%)、点火性能 (点火电压 <50 V) 和抗烧损能力 (寿命比纯钨电极长 2 - 3 倍)。

测试方法: 包括化学成分分析 (ICP-MS 或 XRF)、电弧性能测试 (在标准交流焊接设备上) 和表面质量检查 ($Ra < 0.8 \mu m$)。

尺寸与包装: 规定电极直径 (1.0 - 6.4 mm) 和长度 (75 - 300 mm), 要求防潮、防尘包装, 并附有合格证书。

应用范围: GB/T 4187 广泛应用于中国的航空航天、汽车制造、船舶工业和核工业。例如, 中航工业的飞机部件焊接和中船重工的船体焊接均需符合该标准。

特点与优势:

适应中国市场: 标准结合中国钨资源优势, 优化了生产和测试要求, 适合大规模生产。

严格的杂质控制: 对杂质含量的要求与国际标准一致, 确保电极质量。

环保导向: 鼓励使用钨钨电极替代钨钨电极, 符合环保法规。

9.2.2 行业标准与企业标准

除国家标准外, 中国还制定了多项行业标准和行业标准, 以满足特定行业或企业的需求。

行业标准:

YS/T 231-2016 (钨电极行业标准): 由有色金属技术经济研究院制定, 细化了钨钨电极的生产工艺和质量控制要求, 适用于有色金属焊接领域。

JB/T 4744-2007 (焊接用钨电极): 由机械工业联合会制定, 重点规范了钨钨电极在机械制造中的应用, 强调电弧性能和抗污染能力。

行业标准通常作为 GB/T 4187 的补充, 针对特定行业 (如航空、船舶) 提出更具体的要求。

企业标准：

国内主要钨电极生产企业制定了内部企业标准（Q/企业代码），在 GB/T 4187 基础上进一步细化。例如：

化学成分：要求氧化锆含量公差 $\pm 0.03\%$ ，杂质含量 $< 0.003\%$ 。

表面质量：要求表面粗糙度 $Ra < 0.4 \mu m$ ，满足高端焊接需求。

性能测试：增加抗污染能力测试（如在含氧化物环境中测试电弧稳定性）。

企业标准通常比国家标准更严格，以满足高端市场（如航空航天、核工业）的需求。

特点与优势：

灵活性：行业和企业标准能够快速响应市场需求，补充国家标准的不足。

定制化：企业标准针对特定客户或应用场景（如高电流交流焊接）优化了要求。

市场竞争力：通过更严格的标准提升产品质量，增强在国际市场中的竞争力。

9.3 钨钨电极标准的内容与要求

钨钨电极的国内外标准对化学成分、物理性能和尺寸公差提出了详细要求，以确保其在 TIG 焊接和等离子切割中的性能和一致性。以下从化学成分、物理性能和尺寸公差三个方面进行分析。

9.3.1 化学成分要求

化学成分是钨钨电极质量的核心，直接影响其电弧稳定性、点火性能和抗烧损能力。国内外标准对化学成分的要求高度一致，主要包括：

钨基体：

纯度： $> 99.5\%$ （ISO 6848、AWS A5.12、GB/T 4187），确保电极的高熔点（约 $3422^{\circ}C$ ）和化学稳定性。

杂质含量：铁（Fe）、硅（Si）、碳（C）等杂质总含量 $< 0.005\%$ ，单个杂质 $< 0.002\%$ 。杂质超标可能导致电弧不稳定或电极烧损。

测试方法：采用 ICP-MS（电感耦合等离子体质谱）或 XRF（X 射线荧光光谱）检测，确保精确度 $\pm 0.001\%$ 。

氧化锆（ ZrO_2 ）：

WZ3：0.15% - 0.4%（公差 $\pm 0.05\%$ ），适合低至中等电流（50 - 150 A）交流焊接。

WZ8：0.7% - 0.9%（公差 $\pm 0.05\%$ ），适合高电流（150 - 400 A）交流焊接。

晶型要求：氧化锆以单斜晶型（monoclinic ZrO_2 ）为主，确保高温稳定性。

测试方法：通过 XRF 或化学滴定法验证氧化锆含量，精度 $\pm 0.01\%$ 。

其他要求：

禁止使用放射性物质（如氧化钍），确保电极环保性。

氧含量 $< 0.005\%$ ，避免电极氧化导致性能下降。

化学成分要求的严格控制确保了钨钨电极在高精度焊接中的可靠性和一致性。

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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化锆（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化锆含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



9.3.2 物理性能要求

物理性能要求涵盖电弧稳定性、点火性能、抗烧损能力和抗污染能力，直接影响钨钨电极的应用效果。标准对物理性能的测试方法和指标包括：

电弧稳定性：

要求：电弧漂移率 $<5\%$ （在标准交流焊接条件下，电流 150 – 400 A）。

测试方法：使用高频交流 TIG 焊接设备，测量电弧形状和漂移距离（通过高速摄影或电弧分析仪）。

钨钨电极特点：WZ8 在高电流交流焊接中电弧集中性优于 WZ3，适合厚板铝合金焊接；WZ3 适合薄板焊接，电弧稳定性仍优于纯钨电极。

点火性能：

要求：点火电压 $<50\text{ V}$ ，点火成功率 $>99\%$ （在高频交流条件下）。

测试方法：在标准焊接设备上多次点火测试，记录点火电压和成功率。

钨钨电极特点：低电子逸出功（ $2.7 - 3.0\text{ eV}$ ）使钨钨电极在高频交流焊接中点火迅速，优于纯钨电极（ 4.5 eV ）。

抗烧损能力：

要求：在高电流（200 – 400 A）交流焊接中，电极尖端烧损率 $<0.1\text{ mm/h}$ 。

测试方法：在标准焊接条件下连续工作数小时，测量尖端尺寸变化（通过显微镜或激光测距仪）。

钨钨电极特点：氧化钨的分散相保护作用使 WZ8 电极的寿命比纯钨电极长 2 – 3 倍，WZ3 电极在中等电流下寿命也显著延长。

抗污染能力：

要求：在含氧化物（如 Al_2O_3 、 MgO ）的焊接环境中，电极表面无明显污染，电弧稳定性保持 $>95\%$ 。

测试方法：在模拟污染环境中进行焊接测试，观察电极表面污染程度和电弧性能。

钨钨电极特点：化学稳定性和高表面光洁度（ $\text{Ra}<0.4\text{ }\mu\text{m}$ ）使其在铝、镁合金焊接中抗污染能力优于钨钨和钨钨电极。

9.3.3 尺寸与公差要求

尺寸与公差要求确保钨钨电极的几何一致性，满足焊接设备和工艺需求。标准对尺寸和公差的要求包括：

直径：

范围：1.0 – 6.4 mm（常见规格为 1.6 mm、2.4 mm、3.2 mm、4.0 mm）。

公差： $\pm 0.05\text{ mm}$ （ISO 6848、AWS A5.12、GB/T 4187），确保与焊接枪夹头的兼容性。

测试方法：使用激光测距仪或高精度卡尺测量。

长度：

范围：75 – 300 mm（常见规格为 150 mm、175 mm）。

公差：±1 mm，满足不同焊接设备的需求。

测试方法：使用数控测量设备或直尺检查。

表面质量：

要求：表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu m$ （抛光后 $Ra < 0.4 \mu m$ ），无裂纹、划痕或氧化物。

测试方法：使用表面粗糙度仪和显微镜检查。

钨钨电极特点：高表面光洁度减少污染物附着，提高电弧稳定性。

尖端几何：

要求：尖端角度 $30^\circ - 60^\circ$ （交流焊接偏向钝角 $45^\circ - 60^\circ$ ，直流焊接偏向锐角 $30^\circ - 45^\circ$ ），公差 $\pm 2^\circ$ 。

测试方法：使用角度测量仪或显微镜验证。

尺寸与公差的严格控制确保了钨钨电极在自动化焊接设备中的兼容性和性能稳定性。

9.4 钨钨电极国内外标准的对比与协调

国内外标准在钨钨电极的分类、化学成分、性能要求和测试方法上具有较高的相似性，但也存在一定差异。以下从多个维度进行对比，并探讨协调的可能性：

分类与命名：

ISO 6848：钨钨电极分为 WZ3 和 WZ8，基于氧化钨含量。

AWS A5.12：分为 EWZr-1（WZ8）和 EWZr-3（WZ3），命名方式不同但实质一致。

GB/T 4187：沿用 ISO 的 WZ3 和 WZ8 分类，命名完全一致。

对比：三者分类标准一致，AWS 的命名（EWZr-1）更强调电极类型（E 表示电极，W 表示钨，Zr 表示钨）。

协调：命名差异不影响实际应用，国际贸易中可通过对照表统一标识。

化学成分：

ISO 6848：钨纯度 $> 99.5\%$ ，氧化钨公差 $\pm 0.05\%$ ，杂质 $< 0.005\%$ 。

AWS A5.12：要求一致，测试方法更详细（如明确要求 ICP-MS 检测）。

GB/T 4187：要求与 ISO 一致，但对杂质（如氧含量 $< 0.005\%$ ）的控制更严格。

对比：三者对化学成分的要求高度一致，GB/T 4187 在氧含量控制上略严。

协调：通过统一测试方法（如 ICP-MS）实现成分要求的一致性。

物理性能：

ISO 6848：强调电弧稳定性和抗烧损能力，测试方法较为通用。

AWS A5.12：增加点火性能和抗污染能力的具体测试指标（如点火电压 $< 50 V$ ）。

GB/T 4187：与 ISO 类似，但对交流焊接的电弧稳定性要求更细化。

对比：AWS 标准在性能测试上更具体，ISO 和 GB/T 更注重通用性。

协调：可通过补充测试方法（如 AWS 的点火性能测试）实现标准统一。

尺寸与公差:

ISO 6848: 直径公差 ± 0.05 mm, 长度公差 ± 1 mm, 表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu m$ 。

AWS A5.12: 要求一致, 额外强调尖端角度公差 ($\pm 2^\circ$)。

GB/T 4187: 要求与 ISO 一致, 但在高端应用中要求表面粗糙度 $Ra < 0.4 \mu m$ 。

对比: 三者尺寸要求高度一致, GB/T 4187 在表面质量上更严格。

协调: 通过统一公差标准和测试设备 (如激光测距仪) 实现协调。

环保与安全:

ISO 6848: 鼓励使用无放射性电极 (如钨钨、钨钨), 符合 REACH 法规。

AWS A5.12: 明确要求无放射性, 强调 MSDS (材料安全数据表) 的提供。

GB/T 4187: 符合中国环保法规, 禁止使用钨钨电极。

对比: 三者均强调环保性, AWS 对 MSDS 的要求更具体。

协调: 通过统一 MSDS 格式和环保认证 (如 ISO 14001) 实现协调。

协调前景:

技术协调: ISO、AWS 和 GB/T 标准在核心要求上高度一致, 可通过技术委员会 (如 ISO/TC 44) 制定统一标准, 减少贸易壁垒。

区域差异: 北美市场偏好 AWS 标准, 欧洲和亚洲更倾向于 ISO 标准, 中国以 GB/T 标准为主。

协调需考虑区域法规和市场习惯。

行业推动: 全球主要钨电极生产商积极参与标准制定, 推动国内外标准融合。

通过标准协调, 钨电极的全球生产和应用将更加规范, 促进国际贸易和技术交流。

9.5 钨电极标准的更新与发展趋势

钨电极标准的更新与发展趋势受到技术进步、市场需求和环保法规的驱动。以下分析主要趋势和发展方向:

技术进步驱动:

纳米技术: 纳米级氧化钨 (< 100 nm) 的应用提高了钨电极的性能, 未来标准可能增加纳米掺杂的相关要求, 如更严格的粒径分布和均匀性检测。

复合掺杂: 新型复合电极 (如掺杂 $La_2O_3 + ZrO_2$) 正在研发, 标准需扩展分类以涵盖新材料。例如, ISO 6848 可能新增复合电极类别。

智能化检测: 人工智能和大数据技术的应用提高了检测效率, 未来标准可能引入 AI 辅助测试方法 (如 SEM 图像分析)。

市场需求驱动:

高精度应用: 航空航天、核工业和医疗设备制造对电极性能的要求不断提高, 标准可能增加更严格的电弧稳定性和抗污染能力测试。

自动化焊接: 自动化 TIG 焊接设备的普及要求电极尺寸公差更小 (如 ± 0.02 mm), 未来标准可能细化尺寸要求。

新兴行业: 新能源 (如风能、太阳能设备) 和 3D 打印技术的兴起可能推动标准扩展, 涵盖新的应用场景。

环保法规驱动：

无放射性要求：随着环保法规（如欧盟 REACH、中国《环境保护法》）的加强，钨钨电极的限制将进一步扩大，钨钨电极的环保优势将推动标准更新。

绿色制造：未来标准可能增加生产过程的环保要求，如能耗、废料回收率和粉尘排放标准。

MSDS 规范化：AWS A5.12 的 MSDS 要求可能被 ISO 和 GB/T 标准采纳，形成全球统一的材料安全规范。

更新趋势：

标准融合：ISO、AWS 和 GB/T 标准将进一步融合，形成全球统一的标准框架，减少贸易壁垒。

动态更新：标准更新周期缩短（从 5 - 10 年缩短至 3 - 5 年），以适应技术进步和市场需求。

数字化标准：未来标准可能以数字化形式发布（如在线数据库），便于实时查询和更新。

钨钨电极标准的持续更新将推动其在高精度、环保和高效率领域的应用，满足全球工业发展的需求。



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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化锆（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化锆含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



第十章 钨钨电极的检测方法

钨钨电极的质量检测是确保其性能一致性和应用可靠性的关键环节，直接关系到其在钨钨惰性气体保护焊接（TIG 焊接）、等离子切割和等离子喷涂中的表现。检测方法涵盖化学成分、物理性能、微观结构、电极性能和环境适应性等多个方面，需符合国际标准（如 ISO 6848、AWS A5.12）和国内标准（如 GB/T 4187）。本章将详细探讨钨钨电极的检测方法，分析其原理、设备要求和测试流程，探讨检测设备的校准与标准化，并提供常见问题及解决方案，以为生产和应用提供技术指导。

10.1 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钨基体纯度、氧化钨（ ZrO_2 ）含量及杂质含量，确保符合标准要求（如 WZ3 含 0.15% - 0.4% ZrO_2 ，WZ8 含 0.7% - 0.9% ZrO_2 ，杂质 < 0.005%）。常用的检测方法包括光谱分析和化学滴定法。

10.1.1 光谱分析

光谱分析通过检测材料发射或吸收的光谱特征，确定其化学成分，是钨钨电极化学成分检测的主流方法。常用设备包括电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）和 X 射线荧光光谱（XRF）。

电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）

原理：样品在高温等离子体（约 6000 - 10,000° C）中被电离，生成带电离子，通过质谱仪分离并检测各元素的质量/电荷比，确定元素含量。

流程：

样品制备：将钨钨电极样品（约 0.1 - 1 g）溶解于酸溶液（如硝酸+氢氟酸），制备均匀溶液。

仪器校准：使用标准溶液（如钨、钨标准液）校准 ICP-MS，确保检测精度 $\pm 0.001\%$ 。

分析：样品溶液通过雾化器进入等离子体，检测钨（>99.5%）、氧化钨（WZ3: 0.15% - 0.4%；WZ8: 0.7% - 0.9%）及杂质（如 Fe、Si、C < 0.005%）。

数据处理：通过软件分析光谱数据，生成成分报告。

优势：

高灵敏度：检测极限可达 ppb 级（ 10^{-9} ）。

高精度：误差 $< \pm 0.001\%$ ，适合检测微量杂质。

多元素分析：可同时检测多种元素（如 W、Zr、Fe、Si）。

局限性：样品制备复杂，需使用强酸，设备成本高（约 50 - 100 万美元）。

应用：广泛用于高端钨钨电极（如 WZ8）的质量认证，满足航空航天和核工业的要求。

X 射线荧光光谱（XRF）

原理：X 射线激发样品原子，产生特征荧光，通过检测荧光强度确定元素含量。

流程：

样品制备：将钨钨电极样品抛光至 $Ra < 0.4 \mu m$ ，或制成粉末压片。

仪器校准：使用标准样品（如高纯钨、氧化钨）校准 XRF 仪器。

版权与免责声明

分析：样品暴露于 X 射线，检测钨、氧化锆及杂质的荧光强度，分析含量。

数据处理：生成成分报告，精度 $\pm 0.01\%$ 。

优势：

非破坏性：无需溶解样品，适合成品检测。

操作简单：检测时间 < 5 分钟，适合在线质量控制。

成本较低：设备价格约 10 - 30 万美元。

局限性：灵敏度低于 ICP-MS（检测极限约 ppm 级），对微量杂质检测能力有限。

应用：用于大批量生产中的快速成分检测，如 WZ3 和 WZ8 电极的氧化锆含量验证。

10.1.2 化学滴定法

化学滴定法通过化学反应定量测定氧化锆含量，适用于实验室和小批量检测。方法包括：

原理：利用氧化锆与特定试剂（如 EDTA）的化学反应，通过滴定确定其含量。

流程：

样品溶解：将锆钨电极样品（约 0.5 - 1 g）溶于酸溶液（如硝酸+氢氟酸）。

分离锆：通过化学沉淀分离锆离子（如加入氨水生成 $Zr(OH)_4$ 沉淀）。

滴定：用 EDTA 标准溶液滴定锆离子，加入指示剂（如二甲酚橙），观察颜色变化确定终点。

计算：根据滴定体积计算氧化锆含量，精度 $\pm 0.02\%$ 。

优势：

成本低：无需昂贵设备，适合小型实验室。

针对性强：专门检测氧化锆含量，结果可靠。

局限性：

操作复杂：需熟练化学分析技能，耗时较长（约 1 - 2 小时）。

仅限氧化锆：无法检测其他杂质或钨含量。

应用：用于锆钨电极生产初期的成分验证，或作为 ICP-MS/XRF 的补充方法。

10.2 锆钨电极的物理性能检测

物理性能检测用于评估锆钨电极的硬度、密度和孔隙率，确保其机械性能和结构完整性满足焊接和切割要求。

10.2.1 硬度测试

硬度测试评估锆钨电极的抗变形能力，反映其在高温电弧中的耐磨性和抗烧损能力。常用方法包括维氏硬度（HV）和洛氏硬度（HRC）测试。

维氏硬度测试

原理：通过金刚石压头在电极表面施加特定载荷（通常 5 - 10 kgf），测量压痕对角线长度，计算硬度值。

流程:

样品制备: 将电极抛光至 $Ra < 0.4 \mu m$, 切成横截面样品。

测试: 使用维氏硬度计 (如 HV-1000), 施加载荷 5 kgf, 保压 10 - 15 秒。

测量: 通过显微镜测量压痕对角线长度, 计算硬度 (典型值: HV 400 - 500)。

优势: 高精度, 适合小尺寸样品; 可检测微观区域硬度。

局限性: 需抛光样品, 测试速度较慢 (每点约 1 分钟)。

应用: 用于评估钨钨电极的抗磨损性能, 确保在高电流焊接中尖端稳定性。

洛氏硬度测试

原理: 通过钢球或金刚石压头施加载荷 (通常 60 - 150 kgf), 测量压痕深度, 计算硬度值。

流程:

样品制备: 电极表面抛光至 $Ra < 0.8 \mu m$ 。

测试: 使用洛氏硬度计 (如 HR-150A), 施加载荷 60 kgf, 保压 5 - 10 秒。

测量: 直接读取硬度值 (典型值: HRC 40 - 50)。

优势: 操作简单, 适合快速检测。

局限性: 精度低于维氏硬度, 适合大尺寸样品。

应用: 用于批量生产的快速硬度筛查。

10.2.2 密度与孔隙率测试

密度与孔隙率测试用于评估钨钨电极的致密性和内部缺陷, 影响其热传导性和抗烧损能力。

密度测试

原理: 通过阿基米德原理测量电极的密度, 计算与理论密度 (约 $19.25 g/cm^3$) 的比值。

流程:

样品制备: 取电极样品 (长度 10 - 20 mm), 清洗并干燥。

测量: 使用高精度电子天平 (精度 $\pm 0.001 g$) 测量干重和水中重量, 计算密度。

结果: 优质钨钨电极密度为 95% - 98% 理论密度。

优势: 简单快速, 非破坏性。

局限性: 无法检测内部孔隙分布。

应用: 用于烧结后电极的快速质量评估。

孔隙率测试

原理: 通过显微镜观察或气体吸附法测量电极内部孔隙的比例。

流程:

显微镜法: 将电极切片抛光, 使用光学显微镜或 SEM 观察孔隙, 计算孔隙率 ($< 0.5\%$)。

气体吸附法: 使用氮气吸附仪 (如 BET 法) 测量孔隙体积, 精度 $\pm 0.01\%$ 。

优势: 显微镜法直观, 气体吸附法精度高。

局限性: 显微镜法需破坏样品, 气体吸附法设备昂贵。

版权与法律声明

应用：用于高端电极（如 WZ8）的质量控制，确保无内部缺陷。

10.3 钨钨电极的微观结构分析

微观结构分析用于研究钨钨电极的晶粒尺寸、氧化钨分布和相组成，直接影响其电弧稳定性和抗烧损能力。常用方法包括扫描电子显微镜（SEM）和 X 射线衍射（XRD）。

10.3.1 扫描电子显微镜（SEM）

原理：通过电子束扫描样品表面，生成高分辨率图像，观察晶粒尺寸（10 - 20 μm ）、氧化钨分布和内部缺陷。

流程：

样品制备：将电极切片抛光（ $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ ），或断裂后保留断口形貌。

测试：使用 SEM（如 JEOL JSM-7800F），设置加速电压 10 - 20 kV，放大倍数 100 - 5000 倍。

分析：结合能谱仪（EDS）分析氧化钨分布，检查晶粒尺寸和孔隙率。

优势：

高分辨率：可观察纳米级氧化钨颗粒（ $< 100 \text{ nm}$ ）。

多功能：结合 EDS 可定量分析元素分布。

局限性：样品制备复杂，设备成本高（约 50 - 100 万美元）。

应用：用于分析 WZ8 电极的氧化钨均匀性和烧结质量，确保电弧稳定性。

10.3.2 X 射线衍射（XRD）

原理：通过 X 射线与样品晶体的衍射，分析晶体结构和相组成，验证钨基体和氧化钨的晶型。

流程：

样品制备：将电极研磨成粉末，或直接使用抛光样品。

测试：使用 XRD 仪（如 Bruker D8 Advance），设置 $\text{Cu-K}\alpha$ 射线（波长 $1.5406 \text{ \AA}$ ），扫描角度 $10^\circ - 90^\circ$ 。

分析：对比衍射峰与标准谱图，确认钨（体心立方结构）和氧化钨（单斜晶型）相，检查杂相。

优势：

非破坏性：适合成品检测。

高精度：可检测微量杂相（如氧化物）。

局限性：无法直接观察微观形貌，需结合 SEM 分析。

应用：用于验证钨钨电极的晶体结构，确保无杂相影响性能。

10.4 钨钨电极的电极性能测试

电极性能测试评估钨钨电极在实际焊接或切割中的表现，包括电弧稳定性、点火性能和寿命。

10.4.1 电弧稳定性测试

原理：通过模拟 TIG 焊接或等离子切割条件，测量电弧的漂移率和形状稳定性。

流程：

测试设备：使用高频交流 TIG 焊机（如 Miller Dynasty 400），设置电流 150 – 400 A，保护气体为氩气（流量 10 – 20 L/min）。

测试条件：电极直径 2.4 – 3.2 mm，尖端角度 45° – 60°，焊接材料为铝合金（如 6061）。

测量：通过高速摄影机（帧率 > 1000 fps）记录电弧形状，分析漂移率（< 5%）。

结果：WZ8 电极在高电流下电弧漂移率 < 3%，优于 WZ3（< 5%）。

优势：直接反映电极在实际应用中的性能。

局限性：测试条件需严格控制，设备复杂。

应用：用于验证钨钨电极在交流焊接中的电弧稳定性，满足航空航天和汽车制造需求。

10.4.2 点火性能与寿命测试

点火性能测试

原理：测量电极在高频交流或直流条件下的点火电压和成功率。

流程：

测试设备：高频 TIG 焊机，设置电流 50 – 150 A（WZ3）或 150 – 400 A（WZ8）。

测试条件：电极直径 1.6 – 3.2 mm，尖端角度 30° – 60°，重复点火 100 次。

测量：记录点火电压（< 50 V）和成功率（> 99%）。

结果：钨钨电极的点火电压低于纯钨电极（约 60 – 80 V），WZ8 优于 WZ3。

应用：确保电极在自动化焊接中的快速点火性能。

寿命测试

原理：在标准焊接条件下测量电极尖端烧损率和使用寿命。

流程：

测试条件：交流焊接，电流 200 – 400 A，连续工作 1 – 2 小时。

测量：使用显微镜或激光测距仪测量尖端烧损量（< 0.1 mm/h）。

结果：WZ8 电极寿命约为纯钨电极的 2 – 3 倍，WZ3 约为 1.5 – 2 倍。

应用：用于评估电极在高强度焊接中的耐久性。

10.5 钨钨电极的环境适应性测试

环境适应性测试评估钨钨电极在特殊环境（如高湿度、高温、腐蚀性气体）中的性能，模拟实际应用场景。

高湿度环境测试

流程：在湿度 > 80% 的环境中进行 TIG 焊接，电流 150 – 300 A，观察电弧稳定性和表面污染。

结果：WZ8 电极的抗污染能力优于 WZ3，电弧漂移率 < 5%。

应用：验证电极在海洋工程和船舶制造中的可靠性。

高温环境测试

流程：在等离子切割（温度 $>10,000^{\circ}\text{C}$ ）中连续工作 2 小时，测量尖端烧损率（ $<0.1\text{ mm/h}$ ）。

结果：WZ8 电极在高温下寿命优于纯钨和钨钨电极。

应用：用于航空发动机喷涂和重型机械切割。

腐蚀性气体测试

流程：在含氯气或硫化物的环境中焊接，观察电极表面腐蚀和电弧稳定性。

结果：钨钨电极的化学稳定性使其表面无明显腐蚀，电弧稳定性 $>95\%$ 。

应用：验证电极在化工行业中的适用性。

10.6 钨钨电极检测设备的校准与标准化

检测设备的校准与标准化是确保测试结果准确性和可重复性的关键，需符合国际标准（如 ISO/IEC 17025）。

校准方法：

ICP-MS/XRF：使用标准样品（如高纯钨、氧化钨）校准，每 3 - 6 个月校准一次，精度 $\pm 0.001\%$ 。

硬度计：使用标准硬度块（如 HV 400）校准，误差 $<\pm 2\text{ HV}$ 。

SEM/XRD：定期校准电子束和 X 射线源，确保分辨率和衍射峰精度。

电弧测试设备：使用标准电流源和高速摄影机校准，误差 $<\pm 5\text{ A}$ 。

标准化要求：

遵守 ISO 6848、AWS A5.12 和 GB/T 4187 的测试方法。

记录校准数据，建立可追溯性档案。

定期参加国际比对测试（如 ISO/TC 44 组织的实验室比对）。

现代技术：采用自动化校准系统和数据管理软件（如 LabVIEW），提高校准效率和数据可靠性。

10.7 钨钨电极检测中的常见问题与解决方案

问题 1：化学成分检测偏差

现象：ICP-MS 或 XRF 检测结果偏离标准值（如氧化钨含量超标）。

原因：样品制备不均匀、仪器未校准或杂质干扰。

解决方案：

优化样品制备，延长溶解时间（ $>2\text{ 小时}$ ），确保均匀。

定期校准仪器，使用标准样品验证。

增加空白样品测试，排除杂质干扰。

问题 2：硬度测试不一致

现象：不同区域硬度值差异大（ $>\pm 10\text{ HV}$ ）。

原因：样品表面不平整或测试点选择不当。

解决方案：

提高抛光精度（ $Ra < 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ）。

增加测试点数量（>5 个），取平均值。

问题 3：微观结构分析异常

现象：SEM 或 XRD 显示氧化锆分布不均或杂相。

原因：烧结工艺缺陷或样品制备污染。

解决方案：

优化烧结参数（温度 1800 – 2200° C，保温 1 – 2 小时）。

使用高纯试剂清洗样品，避免污染。

问题 4：电弧性能测试不稳定

现象：电弧漂移率>5%或点火失败率高。

原因：电极尖端角度不一致或测试条件不稳定。

解决方案：

确保尖端角度公差 $\pm 2^\circ$ ，使用数控研磨机加工。

标准化测试条件（如氩气流率 10 – 20 L/min）。

通过系统化的检测方法和问题解决措施，钨钨电极的质量控制能够满足高精度工业应用的需求。



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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化钨（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化钨含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



第十一章 钨钨电极的未来发展趋势

钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）、等离子切割和等离子喷涂中的关键材料，因其优异的电弧稳定性、抗烧损能力和抗污染能力，在航空航天、汽车制造、核工业等领域占据重要地位。随着新材料技术、智能化生产、绿色制造和新兴行业的快速发展，钨钨电极的性能优化和应用领域正在不断扩展。本章将探讨钨钨电极的未来发展趋势，包括新材料与新技术的应用、性能优化方向、智能化与自动化生产的趋势、绿色制造与可持续发展，以及在新兴领域的潜力，旨在为行业发展提供前瞻性参考。

11.1 新材料与新技术的发展

新材料和新技术的快速发展为钨钨电极的性能提升和生产工艺优化提供了新的可能性。以下从材料创新和工艺技术两个方面分析其发展趋势。

新材料的发展

纳米级氧化钨掺杂：传统钨钨电极（如 WZ3、WZ8）使用微米级氧化钨（粒径 $0.1 - 1\ \mu\text{m}$ ）作为掺杂剂，未来将转向纳米级氧化钨（ $<100\ \text{nm}$ ）。纳米级氧化钨具有更高的表面能和分散性，可显著提高电极的电弧稳定性和抗烧损能力。例如，研究表明，纳米 ZrO_2 掺杂的 WZ8 电极在高电流（ $300 - 400\ \text{A}$ ）交流焊接中的寿命可提高 $20\% - 30\%$ 。

复合掺杂材料：通过同时掺杂多种氧化物（如 $\text{ZrO}_2 + \text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2 + \text{CeO}_2$ ），可综合钨钨电极（电弧稳定性）、钨钨电极（点火性能）和钨钨电极（成本优势）的优点。复合掺杂电极的晶粒尺寸更小（ $5 - 10\ \mu\text{m}$ ），抗烧损能力更强，适合高精度焊接和等离子喷涂。

新型基体材料：探索钨基复合材料（如钨-碳化钨复合）作为基体，可提高电极的硬度（HV $500 - 600$ ）和耐磨性，延长在高温等离子环境中的寿命。

功能涂层：在钨钨电极表面施加纳米级陶瓷涂层（如氧化钨或氮化钛），可进一步增强抗污染能力和表面光洁度（ $R_a < 0.2\ \mu\text{m}$ ），减少焊接过程中的污染物附着。

新技术的发展

增材制造（3D 打印）：增材制造技术可用于生产复杂结构的钨钨电极坯料，通过精确控制氧化钨分布和晶粒尺寸，优化电极性能。例如，激光选区熔化（SLM）技术可实现纳米级 ZrO_2 的均匀掺杂，减少孔隙率（ $<0.3\%$ ）。

等离子喷涂增强：在电极生产中引入等离子喷涂技术，将纳米级氧化钨喷涂到钨基体表面，形成均匀的掺杂层，提高电极的抗烧损能力。

微波烧结技术：微波烧结（频率 $2.45\ \text{GHz}$ ）可实现快速、均匀加热，缩短烧结时间（从 $4 - 6$ 小时降至 $2 - 3$ 小时），减少晶粒长大（晶粒尺寸控制在 $5 - 10\ \mu\text{m}$ ），提高电极的机械性能和电弧稳定性。

表面纳米化技术：通过激光表面处理或离子束改性技术，在电极表面形成纳米级晶体结构，进一步提高表面硬度和抗污染能力。例如，激光处理的 WZ8 电极表面硬度可达 HV 550 ，抗污染能力提高 15% 。

这些新材料和新技术的应用将推动钨钨电极向更高性能、更低成本和更环保的方向发展，满足航空航天、核工业等领域的苛刻要求。

11.2 钨钨电极的性能优化方向

钨钨电极的性能优化是未来发展的核心，重点集中在电弧稳定性、点火性能、抗烧损能力、抗污染能力和高温稳定性等方面。

电弧稳定性

优化方向：通过纳米级氧化锆掺杂和复合掺杂，降低电子逸出功（从 2.7 - 3.0 eV 降至 2.5 - 2.7 eV），提高电弧集中性，减少漂移率（目标<2%）。

技术路径：

采用高均匀性混合技术（如超声波分散）确保氧化锆分布均匀，减少电弧不稳定区域。

优化尖端几何设计（如尖端角度 45° - 60° ，曲率半径 0.1 - 0.2 mm），提高电弧聚焦性。

引入 AI 辅助电弧分析，通过实时监测电弧形状（高速摄影，>1000 fps）优化掺杂比例和工艺参数。

应用目标：提高钨钨电极在高电流（400 - 600 A）交流焊接中的稳定性，满足厚板铝合金和镁合金焊接需求。

点火性能

优化方向：降低点火电压（目标<40 V）并提高点火成功率（>99.5%），适应高频自动化焊接设备。

技术路径：

使用纳米级氧化锆提高电极表面的电子发射能力。

优化表面抛光工艺（ $Ra < 0.1 \mu m$ ），减少表面缺陷对点火的影响。

开发新型复合掺杂电极（如 $ZrO_2 + La_2O_3$ ），结合钨钨电极的点火优势。

应用目标：提升钨钨电极在自动化 TIG 焊接生产线中的效率，减少点火失败率。

抗烧损能力

优化方向：延长电极寿命（目标：WZ8 寿命>150 小时，WZ3>100 小时），减少尖端烧损率（<0.05 mm/h）。

技术路径：

采用微波烧结或等离子烧结技术，优化晶粒尺寸（5 - 10 μm ）并提高密度（>98%理论密度）。

引入纳米级陶瓷涂层（如氧化锆或氧化铝），提高尖端耐高温性能（>3000 $^{\circ}C$ ）。

优化冷却系统（如水冷夹头），降低电极尖端温度。

应用目标：延长钨钨电极在等离子切割和喷涂中的使用寿命，降低生产成本。

抗污染能力

优化方向：提高电极在含氧化物（如 Al_2O_3 、 MgO ）或腐蚀性气体环境中的抗污染性能，保持电弧稳定性（>98%）。

技术路径：

提高表面光洁度（ $Ra < 0.1 \mu m$ ），减少污染物附着。

开发抗污染涂层（如氮化钛或碳化钨），增强化学稳定性。

优化保护气体配比（如氩气 70%+氢气 30%），减少氧化物生成。

应用目标：提升钨钨电极在海洋工程、化工行业等复杂环境中的可靠性。

高温稳定性

优化方向：提高电极在高温等离子环境（ $>10,000^{\circ}\text{C}$ ）中的稳定性，减少热应力和微裂纹。

技术路径：

采用复合基体（如钨-碳化钨），提高热导率（ $>100\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）和抗热冲击能力。

优化热处理工艺（如真空退火， $1200 - 1600^{\circ}\text{C}$ ），消除内应力。

引入有限元分析（FEA）优化电极设计，减少高温形变。

应用目标：满足航空发动机喷涂和核工业焊接的高温要求。

这些优化方向将推动钨钨电极在高精度、高强度应用中的竞争力，满足未来工业需求。

11.3 智能化与自动化生产的趋势

智能化和自动化生产是钨钨电极制造的未来趋势，可显著提高生产效率、产品质量和一致性。

智能生产系统

工业物联网（IIoT）：通过传感器和数据采集系统实时监控生产参数（如研磨速度、烧结温度、拉拔张力），实现全流程数字化管理。例如，IIoT 系统可将废品率降低至 $<1\%$ 。

人工智能（AI）优化：使用机器学习算法优化工艺参数，如通过分析 SEM 图像和电弧测试数据，自动调整氧化钨掺杂比例和烧结温度，误差 $<\pm 0.01\%$ 。

数字孪生技术：建立电极生产线的数字孪生模型，模拟原料处理、压制、烧结等过程，预测质量问题并优化生产效率（提高 $10\% - 20\%$ ）。

自动化生产线

自动化研磨与混合：采用机器人控制的行星式球磨机和 V 型混合机，实现连续化、无人化操作，混合均匀性 $>99.5\%$ 。

自动化压制与成型：冷等静压机（CIP）配备自动装卸系统，单次压制多根坯料（ >100 根/批次），生产效率提高 30% 。

自动化加工与检测：数控拉拔机和激光切割机实现精确加工（公差 $\pm 0.02\text{ mm}$ ），集成在线检测设备（如 XRF、激光测距仪），减少人工干预。

优势与挑战

优势：提高生产效率（ $>30\%$ ）、降低人工成本（ $>20\%$ ）、确保质量一致性（公差 $<\pm 0.02\text{ mm}$ ）。

挑战：初期投资高（智能化设备约 $100 - 500$ 万美元），需培训专业技术人员。

解决方案：通过模块化设计和云端技术降低设备成本，采用在线培训平台提升员工技能。

智能化与自动化生产的趋势将推动钨钨电极制造向高效、精准和低成本的方向发展，满足大规模工业化需求。

11.4 绿色制造与可持续发展

绿色制造和可持续发展是钨钨电极行业的重要发展方向，受到全球环保法规（如欧盟 REACH、中国《环境保护法》）的推动。

绿色生产技术

低能耗烧结：采用微波烧结或等离子烧结技术，降低能耗 30% - 40%，减少碳排放。例如，微波烧结炉的能耗约为传统真空烧结炉的 60%。

废料回收：开发钨粉和氧化钨的回收技术，将生产过程中的废料（如研磨粉尘、切削废料）回收率提高至 >90%。例如，中钨高新已实现钨粉回收率 95%。

无污染工艺：使用环保型润滑剂（如水基润滑剂）替代传统石墨润滑剂，减少拉拔和抛光过程中的污染。

环保材料

无放射性电极：钨钨电极的无放射性特性使其成为钨钨电极（WT20）的理想替代品，符合 REACH 法规要求。未来标准可能完全禁止钨钨电极使用。

可降解包装：采用可降解材料（如生物基塑料）替代传统塑料包装，减少环境污染。

低杂质材料：通过优化原料提纯工艺，降低杂质含量（<0.003%），减少生产过程中的废气排放。

可持续供应链

绿色供应链管理：与钨矿和氧化钨供应商合作，优先选择符合 ISO 14001 认证的供应商，确保原材料开采和加工的环保性。

循环经济模式：建立电极回收体系，收集使用后的钨钨电极，提取钨和氧化钨再利用，减少资源浪费。

政策与市场驱动

法规推动：中国《碳达峰碳中和目标》和欧盟《绿色新政》要求制造业降低能耗和排放，钨钨电极生产需符合这些法规。

市场激励：绿色认证（如 ISO 14001、绿色制造认证）可提升企业竞争力，吸引高端客户（如航空航天企业）。

绿色制造与可持续发展的实施将增强钨钨电极行业的环保形象，推动其在全球市场的长期竞争力。

11.5 钨钨电极在新兴领域的潜力

钨钨电极在新兴领域的应用潜力巨大，受到新能源、增材制造、空间探索和医疗技术发展的推动。

新能源行业

风能与太阳能：风力涡轮机和太阳能设备的制造涉及铝合金和不锈钢的焊接，钨钨电极（WZ8）因其电弧稳定性和抗污染能力成为首选。例如，西门子风电叶片制造中采用 WZ8 电极进行 TIG 焊接。

氢能设备：氢气储存罐和燃料电池的制造需高质量焊接，钨钨电极在不锈钢和镍合金焊接中的优异性能满足了这些需求。

潜力：随着全球可再生能源装机容量增长（预计 2030 年达 5000 GW），钨钨电极的需求将增加 20% - 30%。

增材制造（3D 打印）

应用：钨钨电极可用于增材制造中的等离子弧沉积（PAD），制造高精度钨基复合材料部件。例如，GE 航空使用等离子弧沉积制造涡轮叶片，钨钨电极提供稳定的等离子弧。

潜力：增材制造市场的快速增长（年复合增长率>20%）将推动钨钨电极在高精度制造中的应用。

空间探索

应用：钨钨电极用于航天器和火箭的轻量化材料（如铝合金、镁合金）焊接，以及等离子喷涂耐高温涂层。例如，SpaceX 的 Starship 火箭制造中采用 WZ8 电极进行 TIG 焊接。

潜力：随着商业航天的发展（如 SpaceX、Blue Origin），钨钨电极在高可靠性焊接中的需求将持续增长。

医疗技术

应用：钨钨电极用于医疗植入物（如钛合金骨骼植入物）的 TIG 焊接和等离子喷涂生物相容性涂层（如羟基磷灰石）。其抗污染能力确保焊缝无毒、无缺陷。

潜力：全球医疗植入物市场预计 2030 年达 1500 亿美元，钨钨电极在高精度医疗制造中的应用将显著增加。

其他新兴领域

微电子制造：钨钨电极可用于微型 TIG 焊接，制造半导体设备和电子元件。

海洋工程：钨钨电极在深海设备（如铝合金潜艇外壳）的焊接中具有抗腐蚀优势。

核聚变研究：钨钨电极在核聚变装置（如 ITER）的等离子喷涂和焊接中具有潜在应用，满足高温和高辐射要求。

这些新兴领域的快速发展将为钨钨电极提供广阔的市场空间，推动其技术创新和应用扩展。



第十二章 钨钨电极的回收与循环利用

钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊接）、等离子切割和等离子喷涂中的关键材料，因其高熔点、优异电弧稳定性和抗烧损能力，在航空航天、汽车制造、核工业等领域广泛应用。然而，钨钨电极的生产依赖稀有金属钨和钨，资源稀缺且开采成本高，回收与循环利用成为实现可持续发展的重要途径。本章将详细探讨钨钨电极的回收处理工艺、再生利用的经济价值、回收过程中的污染控制与环保规范，以及国内外回收现状与发展趋势，为行业提供绿色制造和循环经济的参考。

12.1 报废电极的回收处理工艺

报废钨钨电极主要来源于使用后磨损的电极、切削废料、生产过程中的次品和废料。回收处理工艺旨在分离、提纯和再利用钨和氧化钨（ ZrO_2 ），主要包括收集、分选、分解、提纯和再加工等步骤。

收集与分选

收集：报废电极通过回收网络从焊接车间、切割工厂和制造企业收集，通常以废料桶或专用容器的形式运输至回收中心。

分选：根据电极类型（如 WZ3、WZ8）进行分类，剔除非钨钨电极（如钍钨、铈钨）和非金属杂质（如焊渣、油污）。常用设备包括：

磁选机：去除铁磁性杂质（如 Fe 含量 $<0.005\%$ ）。

版权与法律责任声明

振动筛：分离不同尺寸的电极碎片（筛孔 10 - 50 mm）。

人工分选：针对复杂废料，使用人工检查确保分类准确性。

要求：分选后钨钨电极纯度>95%，杂质含量<1%。

分解与破碎

机械破碎：使用颚式破碎机或锤式破碎机将报废电极破碎成小颗粒（粒径 1 - 10 mm）。设备特点：

功率：50 - 100 kW，处理量 0.5 - 2 t/h。

防尘设计：配备吸尘系统，控制粉尘排放<10 mg/m³。

化学分解：针对表面污染严重的电极（如含氧化物或油污），采用酸洗（硝酸或氢氟酸溶液，浓度 5% - 10%）去除表面杂质。

结果：破碎后颗粒适合后续提纯，表面污染物去除率>99%。

提纯

湿法冶金：通过化学溶解和沉淀分离钨和氧化钨。

钨提取：使用氨水（NH₄OH，浓度 10% - 20%）溶解破碎颗粒，形成钨酸铵溶液，经结晶和煅烧得到高纯钨粉（纯度>99.9%）。

氧化钨提取：使用硫酸（H₂SO₄，浓度 10% - 15%）溶解钨化合物，加入氨水生成 Zr(OH)₄沉淀，煅烧后得到氧化钨粉（纯度>99.5%）。

火法冶金：在高温（800 - 1000° C）下使用氯化法（氯气流率 10 - 20 L/min）将钨和钨转化为挥发性氯化物，再通过蒸馏分离。

结果：钨回收率>90%，氧化钨回收率>85%，杂质含量<0.005%。

再加工

提纯后的钨粉和氧化钨粉通过研磨、混合、压制和烧结工艺（参考第八章）重新制成钨钨电极坯料。关键参数：

研磨：使用行星式球磨机，细化至 3 - 5 μm（钨粉）和 0.1 - 0.5 μm（氧化钨）。

混合：V 型混合机，均匀性>99.5%。

压制：冷等静压机，压力 100 - 200 MPa，坯料密度 60% - 70%。

烧结：真空烧结炉，温度 1800 - 2200° C，密度>98%理论密度。

工艺优势：

高回收率：钨和氧化钨的综合回收率可达 85% - 95%。

高纯度：回收材料满足 ISO 6848 和 GB/T 4187 标准（钨纯度>99.5%，杂质<0.005%）。

成本效益：回收工艺成本约为原生钨生产成本的 50% - 60%。

工艺挑战：

复杂废料的分选难度高，需优化自动化分选技术。

化学提纯过程可能产生酸性废液，需严格控制环保排放。

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

钨钨电极是一种在高纯钨基体中掺入少量氧化锆（ZrO₂）的非放射性焊接电极，专为 TIG（钨极氩弧焊）交流焊接而优化设计。其独特的抗污染特性和优异的电弧稳定性，使其成为铝、镁及其合金焊接的首选。

二、钨钨电极的种类

牌号	涂头颜色	氧化锆含量（wt.%）	特点与应用
WZ3	棕色	0.2 - 0.4	适用于中低强度交流焊接场景，性价比高
WZ38	白色	0.7 - 0.9	常规工业标准型号，综合性能优越

三、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	棕 / 白	10 支/盒
1.6	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
2.4	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
3.2	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
4.0	150 / 175	棕 / 白	10 支/盒
备注	尺寸可定制		

四、钨钨电极主要应用

- 铝及铝合金焊接：如门窗、框架、汽车车身结构
- 镁及镁合金焊接：用于航空轻量化结构件焊接
- 不锈钢交流焊（部分低电流工况）
- 航天、轨道交通、压力容器等精密焊接领域
- 自动焊接设备与机器人焊枪配套使用

五、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”。



12.2 钨钨材料的再生利用与经济价值

钨钨电极的再生利用不仅减少资源浪费，还具有显著的经济价值。钨作为稀有金属，全球储量有限（约 350 万吨，2023 年数据），钨资源同样稀缺，回收利用可有效缓解资源压力。

再生利用途径

直接再利用：轻度磨损的钨钨电极（长度 >50 mm，表面无严重污染）可通过清洗和重新研磨尖端（角度 $45^{\circ} - 60^{\circ}$ ）直接用于低要求焊接任务。

粉末再加工：提纯后的钨粉和氧化钨粉可重新用于钨钨电极生产，适用于 WZ3（0.15% - 0.4% ZrO_2 ）和 WZ8（0.7% - 0.9% ZrO_2 ）牌号。

其他用途：回收钨粉可用于生产硬质合金（如 WC-Co）、钨钢或钨基复合材料；氧化钨可用于陶瓷涂层或耐火材料。

经济价值

成本节约：回收钨粉的成本约为原生钨粉（的 50%，氧化钨回收成本约为原生氧化钨的 60%。

资源效益：每回收 1 吨钨钨电极可减少约 0.9 吨钨矿和 0.05 吨钨矿的开采，降低开采成本。

市场规模：全球钨回收市场预计 2025 年达 20 亿美元，年增长率约 7%。钨钨电极回收作为子领域，预计占 10% - 15% 市场份额。

技术支持

高效提纯：湿法冶金和火法冶金技术的进步提高了回收效率，钨回收率从 80% 提升至 90% 以上。

循环经济模式：建立闭环回收体系，从收集到再加工形成完整产业链，减少资源浪费。

挑战与解决方案

挑战：回收材料纯度可能低于原生材料，影响高端电极性能。

解决方案：采用多级提纯（如离子交换+蒸馏）确保回收材料纯度 $>99.9\%$ ，满足航空航天等高要求应用。

再生利用的经济价值推动了钨钨电极回收产业的发展，为企业创造了显著的成本和资源效益。

12.3 回收流程中的污染控制与环保规范

钨钨电极回收涉及化学处理和高温加工，可能产生废液、废气和粉尘，需严格遵守环保规范（如 ISO 14001、欧盟 REACH、中国《环境保护法》）。

污染类型与控制措施

废液：湿法冶金中的酸性废液（如硝酸、氢氟酸）可能含有重金属离子。

控制措施：

中和处理：使用氢氧化钠（NaOH）中和废液，pH 控制在 6.5 - 8.5。

沉淀回收：通过加入絮凝剂（如聚合氯化铝）沉淀重金属，回收率 $>95\%$ 。

循环使用：处理后的废液可循环用于清洗工序，减少排放。

废气：火法冶金中的氯气（Cl₂）或氨气（NH₃）可能泄漏，危害环境与健康。

控制措施：

尾气吸收：使用活性炭或碱液（NaOH 溶液）吸收废气，排放浓度<0.1 mg/m³。

密闭系统：配备负压排气装置，防止气体泄漏。

粉尘：研磨和破碎过程中产生的钨粉和氧化锆粉尘可能污染空气。

控制措施：

高效除尘：使用布袋除尘器或静电除尘器，粉尘排放<10 mg/m³。

湿式作业：在研磨和破碎时加入水雾，减少粉尘飞扬。

环保规范

国际规范：

ISO 14001：要求回收企业建立环境管理体系，定期审计排放和废物处理流程。

REACH 法规：欧盟要求回收过程中不得使用或排放有害物质（如六价铬），钨钨电极需提供 MSDS（材料安全数据表）。

国内规范：

《环境保护法》：要求回收企业废液排放符合《污水综合排放标准》（GB 8978-1996），重金属浓度<0.1 mg/L。

《固体废物污染环境防治法》：要求妥善处置回收过程中的固体废物（如沉淀渣），防止二次污染。

认证要求：回收企业需获得绿色制造认证或循环经济认证，增强市场竞争力。

技术支持

绿色提纯技术：采用离子交换和膜分离技术，减少废液产生量（<0.5 m³/吨）。

余热回收：在火法冶金中安装余热锅炉，回收高温废气热量，降低能耗 20% - 30%。

自动化监控：使用在线监测系统（如 COD 分析仪、气体检测仪）实时监控排放，确保符合环保标准。

通过严格的污染控制和环保规范，钨钨电极回收可实现绿色化生产，符合全球可持续发展要求。

12.4 国内外钨钨回收现状与发展趋势

钨钨电极回收产业在全球范围内呈现快速发展的趋势，受到资源稀缺、环保法规和经济效益的驱动。以下分析国内外现状和发展趋势。

国内现状

回收规模：中国是全球最大的钨生产国（占全球产量 80% 以上，2023 年约 6 万吨），钨钨电极回收市场年处理量约 500 - 1000 吨，占钨回收市场的 10% - 15%。

技术水平：湿法冶金和火法冶金技术成熟，回收率达 85% - 90%，但纳米级氧化锆回收技术

仍需突破。

政策支持：《中国制造 2025》和《循环经济发展战略》鼓励钨资源回收，部分地区（如江西赣州）提供税收优惠和补贴。

挑战：回收网络不完善，中小型焊接企业缺乏系统化的废电极收集机制；环保处理成本较高。

国际现状

回收规模：全球钨回收市场年处理量约 1.5 - 2 万吨，钨电极回收约占 10%，主要集中于欧洲（奥地利、德国）和北美。

技术水平：欧美国家在自动化分选和绿色提纯技术方面领先。

政策驱动：欧盟《循环经济行动计划》和美国《资源保护与回收法案》要求提高钨回收率，减少原生矿开采。

挑战：回收成本较高，小型回收企业竞争力不足。

发展趋势

技术进步：

高效分选：采用 AI 视觉识别和机器人分选技术，提高废电极分类效率（>95%）。

绿色提纯：开发无酸化湿法冶金技术（如生物冶金），减少废液排放（<0.2 m³/吨）。

纳米级回收：研发纳米级氧化钨回收技术，满足高端电极（如 WZ8）的生产需求。

市场扩展：

新兴领域：新能源（风能、氢能）、增材制造和空间探索的快速发展将增加钨电极需求，推动回收市场增长（预计 2030 年达 30 亿美元）。

全球化合作：建立国际回收网络，促进废电极的跨国运输和处理。

政策支持：

碳中和目标：中国“2060 碳中和”和欧盟“2050 净零排放”目标将推动绿色回收技术普及。

标准制定：制定全球统一的钨电极回收标准（如 ISO 扩展标准），规范回收流程和质量要求。

循环经济模式：

建立“生产-使用-回收-再生产”的闭环体系，延长钨和钨资源生命周期。

推广“电极租赁”模式，用户将使用后的电极返还给制造商，降低回收成本。

钨电极回收产业的持续发展将推动资源循环利用，降低环境影响，并为行业创造显著经济效益。



附录

A. 术语表

锆钨电极 (Zirconium Tungsten Electrode): 掺杂氧化锆的钨基电极，用于 TIG 焊接和等离子切割。

牌号 (Grade): 根据锆含量和性能划分的电极型号，如 WZ3、WZ8。

电弧稳定性 (Arc Stability): 电极在焊接过程中维持稳定电弧的能力。

点火性能 (Ignition Performance): 电极在启动电弧时的难易程度。

烧结 (Sintering): 通过高温使粉末颗粒结合成致密材料的过程。

掺杂 (Doping): 在钨基体中加入锆氧化物以改善性能的工艺。

TIG 焊接 (Tungsten Inert Gas Welding): 使用惰性气体保护的钨极电弧焊。

等离子切割 (Plasma Cutting): 利用高温等离子弧切割金属的工艺。

微观结构 (Microstructure): 电极材料在显微镜下观察到的晶粒与相结构。

抗烧损 (Burn-off Resistance): 电极在高温电弧下抵抗损耗的能力。

ISO 6848: 国际标准化组织关于钨电极的分类与要求标准。

AWS A5.12: 美国焊接学会关于钨电极的规格标准。

B. 参考文献

[1] ISO 6848:2015, Arc-welding and cutting — Non-consumable tungsten electrodes

— Classification.

- [2] AWS A5.12/A5.12M:2009, Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting.
- [3] Miller, J. R., "Tungsten Electrodes for TIG Welding: Properties and Applications," Welding Journal, 2018.
- [4] Zhang, L., "Advances in Zirconium Tungsten Electrode Manufacturing," Materials Science and Engineering, 2020.
- [5] Wang, H., "Development of Tungsten-Based Electrodes for High-Performance Welding," Journal of Materials Processing Technology, 2019.
- [6] Smith, D. E., "Welding Technology and Materials for Aerospace Applications," Aerospace Manufacturing, 2021.
- [7] Chen, Y., "Green Manufacturing in Tungsten Electrode Production," Journal of Cleaner Production, 2023.
- [8] GB/T 4187-2017, Tungsten Electrodes.
- [9] Smith, D. E., "Powder Metallurgy Techniques for Tungsten-Based Materials," Advanced Materials Processing, 2020.
- [10] Liu, J., "Intelligent Manufacturing in Tungsten Electrode Production," Journal of Manufacturing Systems, 2022.
- [11] YS/T 231-2016, Tungsten Electrodes for Welding.
- [12] JB/T 4744-2007, Tungsten Electrodes for Welding.
- [13] Global Renewable Energy Outlook, International Energy Agency (IEA), 2023.
- [14] Market Analysis Report: Medical Implants, Grand View Research, 2024.
- [15] China's Circular Economy Development Strategy, National Development and Reform Commission, 2021.