

纯钨电极百科全书

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](#)

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
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊（TIG 焊）：尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂：作为高温离子源的电极材料。

电子器件：用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极：在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用：涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分（W 含量）	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率（ 20°C ）	$\sim 30\%$ IACS
硬度（HV）	340 - 400 HV
热导率	$170\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5\text{ mm} \sim \varnothing 6.4\text{ mm}$ （可定制）
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度（可定制）
执行标准	ISO 6848（焊接钨电极标准）

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态：磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装：每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

目录

第一章 引言

- 1.1 纯钨电极的定义与概述
- 1.2 纯钨电极在焊接行业中的重要性
- 1.3 纯钨电极研究与应用的背景

第二章 纯钨电极的特性

- 2.1 纯钨电极的物理特性
 - 2.1.1 纯钨电极的熔点与沸点
 - 2.1.2 纯钨电极的密度
 - 2.1.3 纯钨电极的导热性与导电性
 - 2.1.4 纯钨电极的热膨胀系数
 - 2.1.5 纯钨电极的蒸汽压
- 2.2 纯钨电极的化学特性
 - 2.2.1 纯钨电极的化学稳定性
 - 2.2.2 纯钨电极的抗氧化性
 - 2.2.3 纯钨电极与其他元素的反应性
- 2.3 纯钨电极的电学特性
 - 2.3.1 纯钨电极的电子逸出功
 - 2.3.2 纯钨电极的电弧稳定性
 - 2.3.3 纯钨电极的电极消耗率
- 2.4 纯钨电极的机械特性
 - 2.4.1 纯钨电极的硬度与脆性
 - 2.4.2 纯钨电极的延展性
 - 2.4.3 纯钨电极的高温强度与抗蠕变性
- 2.5 纯钨电极与其他钨电极的对比
 - 2.5.1 纯钨电极与铈钨电极
 - 2.5.2 纯钨电极与镧钨电极
 - 2.5.3 纯钨电极与钍钨电极
 - 2.5.4 纯钨电极与钇钨电极
 - 2.5.5 纯钨电极与锆钨电极
- 2.6 中钨智造纯钨电极 MSDS

第三章 纯钨电极的制备生产工艺与技术

- 3.1 纯钨电极的原材料准备
 - 3.1.1 钨矿石的提取与提纯
 - 3.1.2 高纯钨粉的制备
- 3.2 纯钨电极的粉末冶金工艺
 - 3.2.1 钨粉压制成型
 - 3.2.2 烧结工艺
 - 3.2.3 热处理与退火

版权与免责声明

- 3.3 纯钨电极的压力加工
 - 3.3.1 锻造与轧制
 - 3.3.2 拉丝与拉拔
 - 3.3.3 电极棒材成型
- 3.4 纯钨电极的表面处理
 - 3.4.1 清洗与抛光
 - 3.4.2 绿色涂头标记
- 3.5 纯钨电极的质量控制
 - 3.5.1 原材料质量检测
 - 3.5.2 生产过程监控
 - 3.5.3 成品检验
- 3.6 纯钨电极的技术难点与创新
 - 3.6.1 高纯度控制
 - 3.6.2 晶粒组织的优化
 - 3.6.3 生产效率提升
 - 3.6.4 环保与可持续发展

第四章 纯钨电极的用途

- 4.1 焊接应用
 - 4.1.1 钨极氩弧焊（TIG 焊接）
 - 4.1.2 交流焊接（AC）中的应用
 - 4.1.3 镁、铝及其合金的焊接
- 4.2 其他工业应用
 - 4.2.1 电阻焊电极
 - 4.2.2 等离子切割与喷涂
 - 4.2.3 热电子发射材料
 - 4.2.4 溅射靶材
 - 4.2.5 配重块与加热元件
- 4.3 特殊领域应用
 - 4.3.1 航空航天工业
 - 4.3.2 军工领域
 - 4.3.3 核工业
- 4.4 应用局限性
 - 4.4.1 直流焊接（DC）中的不足
 - 4.4.2 电极磨损与寿命问题

第五章 纯钨电极的生产设备

- 5.1 纯钨电极的原材料处理设备
 - 5.1.1 钨矿石破碎与研磨设备
 - 5.1.2 化学提纯设备
- 5.2 纯钨电极的粉末冶金设备
 - 5.2.1 压制机

- 5.2.2 烧结炉
- 5.2.3 真空热处理炉
- 5.3 纯钨电极的压力加工设备
 - 5.3.1 锻造机
 - 5.3.2 轧机
 - 5.3.3 拉丝机
- 5.4 纯钨电极的表面处理设备
 - 5.4.1 清洗设备
 - 5.4.2 抛光机
 - 5.4.3 涂头设备
- 5.5 纯钨电极的检测与质量控制设备
 - 5.5.1 化学成分分析仪
 - 5.5.2 显微组织分析设备
 - 5.5.3 物理性能测试设备
- 5.6 纯钨电极的自动化与智能化设备
 - 5.6.1 自动化生产线的应用
 - 5.6.2 智能监控系统

第六章 纯钨电极的国内外标准

- 6.1 纯钨电极的国际标准
 - 6.1.1 AWS A5.12（美国焊接学会标准）
 - 6.1.2 ISO 6848（国际标准化组织标准）
 - 6.1.3 EN 26848（欧洲标准）
- 6.2 纯钨电极的中国国家标准
 - 6.2.1 GB/T 4190（钨电极标准）
 - 6.2.2 相关行业标准
- 6.3 纯钨电极的其他国家标准
 - 6.3.1 JIS Z 3233（日本工业标准）
 - 6.3.2 DIN EN ISO 6848（德国标准）
- 6.4 纯钨电极的标准对比与差异
 - 6.4.1 化学成分要求
 - 6.4.2 尺寸与公差
 - 6.4.3 性能测试方法
- 6.5 纯钨电极标准的发展趋势
 - 6.5.1 环保与安全要求
 - 6.5.2 高性能电极标准

第七章 纯钨电极的检测方法与技术

- 7.1 纯钨电极的化学成分检测
 - 7.1.1 光谱分析（ICP-OES）
 - 7.1.2 X射线荧光分析（XRF）
 - 7.1.3 化学滴定法

- 7.2 纯钨电极的物理性能检测
 - 7.2.1 密度测量
 - 7.2.2 硬度测试
 - 7.2.3 导电性测试
- 7.3 纯钨电极的显微组织分析
 - 7.3.1 光学显微镜观察
 - 7.3.2 扫描电子显微镜（SEM）
 - 7.3.3 晶粒尺寸分析
- 7.4 纯钨电极的焊接性能测试
 - 7.4.1 起弧性能测试
 - 7.4.2 电弧稳定性测试
 - 7.4.3 电极消耗率测试
- 7.5 纯钨电极的环境与安全检测
 - 7.5.1 放射性检测（针对钷钨电极的对比）
 - 7.5.2 粉尘与废气排放检测
- 7.6 纯钨电极检测设备的校准与标准化
 - 7.6.1 设备校准方法
 - 7.6.2 国际检测标准

第八章 纯钨电极的优缺点分析

- 8.1 纯钨电极的优点
 - 8.1.1 成本低廉
 - 8.1.2 高温稳定性
 - 8.1.3 适合交流焊接
- 8.2 纯钨电极的缺点
 - 8.2.1 直流焊接性能较差
 - 8.2.2 电极消耗率较高
 - 8.2.3 起弧困难与电弧不稳定
- 8.3 纯钨电极的改进方向
 - 8.3.1 工艺优化
 - 8.3.2 合金化研究
 - 8.3.3 新型电极材料的开发

第九章 纯钨电极的市场与发展趋势

- 9.1 纯钨电极全球市场概况
 - 9.1.1 主要生产国家
 - 9.1.2 市场规模与需求
- 9.2 纯钨电极中国市场分析
 - 9.2.1 国内生产能力
 - 9.2.2 市场需求与应用领域
- 9.3 纯钨电极技术发展趋势
 - 9.3.1 高效生产技术

- 9.3.2 环保生产工艺
- 9.3.3 新型钨电极的研发
- 9.4 纯钨电极面临的挑战
 - 9.4.1 原材料价格波动
 - 9.4.2 环保法规压力
 - 9.4.3 国际竞争

第十章 结论

- 10.1 纯钨电极的综合评价
- 10.2 纯钨电极的未来发展展望
- 10.3 纯钨电极研究与应用建议

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

第一章 引言

1.1 纯钨电极的定义与概述

纯钨电极 (Pure Tungsten Electrode, 简称 WP 电极) 是一种以高纯度钨 (钨含量 $\geq 99.5\%$) 为主要原料制成的焊接电极材料, 通常不掺杂稀土氧化物或其他合金元素, 采用先进的粉末冶金工艺生产, 其表面涂以绿色标记以符合国际标准识别规范。钨作为一种稀有金属, 具有极高的熔点 (3422°C)、高密度 (19.3 g/cm^3)、优异的导电性 (约 30% IACS)、导热性 ($173\text{ W/m}\cdot\text{K}$) 以及卓越的化学稳定性, 使纯钨电极成为钨极氩弧焊 (TIG 焊接) 中最早使用的电极类型之一。其高电子逸出功 (约 4.52 eV) 赋予其在高温下良好的热电子发射能力, 但在直流焊接 (DC) 中因起弧困难和电弧稳定性不足, 应用受限, 主要用于交流焊接 (AC), 特别是铝、镁及其合金的焊接。

纯钨电极的制备工艺复杂且精密, 涉及从钨矿石提纯到成品电极的多个步骤。首先, 通过化学方法从钨矿 (如黑钨矿或白钨矿) 中提取高纯度钨粉, 随后通过压制成型、烧结、锻造、拉丝及表面抛光等工艺制成电极棒材。成品电极的规格多样, 直径范围通常为 0.5 至 6.4 mm , 长度为 75 至 600 mm , 常见规格包括 1.0 、 1.6 、 2.4 、 3.2 和 4.0 mm , 以满足不同焊接设备和工艺需求。此外, 纯钨电极的表面质量和尺寸公差对焊接性能至关重要, 因此生产过程中需严格控制杂质含量和晶粒结构, 以确保电极在高温电弧环境中的稳定性和耐用性。

1.2 纯钨电极在焊接行业中的重要性

纯钨电极在焊接行业中具有不可替代的地位, 尤其在钨极氩弧焊 (TIG 焊接) 中, 因其独特的物理化学性能成为交流焊接的首选材料。首先, 纯钨电极的高熔点和优异的高温稳定性使其能够在高电流 (通常 100 – 300 A) 和高温电弧 (约 6000 – 7000°C) 环境中保持结构完整, 显著减少电极消耗, 延长使用寿命, 从而提高焊接效率和质量。其次, 在交流焊接中, 纯钨电极能够形成稳定的半球状电极端, 这种端部形态有助于均匀分布电弧能量, 有效清除铝、镁等轻金属及其合金表面的氧化膜, 形成光洁、致密的焊缝, 满足高精度焊接需求。

相较于掺杂稀土氧化物的钨电极 (如铈钨电极、镧钨电极或铈钨电极), 纯钨电极具有显著的成本优势和环境友好特性。由于不含放射性元素 (如钍), 纯钨电极在使用和废弃处理过程中无辐射风险, 符合现代绿色制造和环保法规的要求。这一特性使其在对安全性要求较高的行业 (如航空航天、医疗设备制造) 中备受青睐。此外, 纯钨电极的生产工艺成熟, 原材料来源广泛, 价格相对稳定, 使其在大规模工业生产中具有经济性。

纯钨电极的应用领域涵盖多个高端制造业。在汽车工业中, 纯钨电极用于焊接铝制车身和零部件; 在航空航天领域, 其用于钛合金和铝合金的精密焊接; 在电子电器行业, 其用于焊接薄壁金属和微型元件。得益于全球制造业的转型升级和对高质量焊接工艺的需求增长, 纯钨电极的市场需求持续扩大。尽管其在直流焊接中的局限性使其部分应用被掺杂电极取代, 但在交流焊接、电阻焊接以及某些等离子切割和喷涂工艺中, 纯钨电极依然是不可或缺的材料。

1.3 纯钨电极研究与应用的背景

钨作为一种战略稀有金属, 因其卓越的物理化学性能自 19 世纪末以来被广泛应用于工业和军事领域。纯钨电极的研发与应用始于 20 世纪初, 与钨极氩弧焊技术的诞生和发展密切相关。

版权与免责声明

关。1910 年代，钨电极首次被用于焊接实验，其高熔点和热电子发射能力使其迅速成为 TIG 焊接的核心材料。然而，早期纯钨电极因电子逸出功较高，在直流焊接中存在起弧困难和电弧不稳定的问题，限制了其应用范围。为克服这些缺点，研究人员自 20 世纪中期开始探索掺杂稀土氧化物（如氧化铈、氧化镧、氧化钍）的钨电极，以降低电子逸出功、提升起弧性能和电弧稳定性。尽管掺杂电极在直流焊接中表现出色，纯钨电极因其无放射性、成本低廉及适合交流焊接的特性，依然保留了重要的市场地位。

20 世纪后期，随着航空航天、汽车制造、核工业及电子电器行业的快速发展，对高性能焊接材料的需求显著增加，推动了纯钨电极生产工艺的持续改进。现代生产技术包括高纯度钨粉制备、等静压成型、真空烧结、精密锻造和自动化拉丝等，显著提高了电极的纯度、晶粒均匀性和机械性能。此外，国际标准（如 AWS A5.12、ISO 6848）及中国国家标准（如 GB/T 4190）对纯钨电极的化学成分、尺寸公差、表面质量及性能测试方法进行了详细规范，促进了其在全球市场的标准化生产和应用。

中国作为全球钨资源储量（约 190 万吨，占全球 50% 以上）和产量（2024 年约占全球 80%）最大的国家，拥有从钨矿开采、冶炼到电极制造的完整产业链。国内企业通过技术创新和规模化生产，显著提升了纯钨电极的国际竞争力。同时，行业信息平台如中钨在线科技有限公司通过网站和微信公众号发布市场动态、技术进展及价格信息，为全球客户提供定制化解决方案，成为钨制品行业的权威信息源。

当前，纯钨电极的研究方向包括优化晶粒组织以提高耐磨性和电弧稳定性、开发高效环保生产工艺以降低能耗和排放、以及探索新型电极材料以满足多样化焊接需求。此外，全球对绿色制造和可持续发展的重视推动了无放射性电极的研发和应用，纯钨电极因其环境友好特性在这一趋势中占据优势。未来，随着新能源、航空航天及高端装备制造的进一步发展，纯钨电极的应用前景将更加广阔。



中钨智造纯钨电极

第二章 纯钨电极的特性

2.1 纯钨电极的物理特性

纯钨电极（WP 电极）以其卓越的物理特性在焊接行业中占据重要地位。其高熔点、高密度、优异的导热导电性、低热膨胀系数和低蒸汽压等特性使其成为钨极氩弧焊（TIG 焊接）中不可或缺的材料，尤其在交流焊接（AC）中表现出色。以下详细探讨纯钨电极的物理特性。

2.1.1 纯钨电极的熔点与沸点

钨是所有金属中熔点最高的元素，纯钨电极的熔点为 3422°C （约 3695 K ），沸点为 5660°C （约 5933 K ）。这一特性使纯钨电极能够在高温电弧（约 $6000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ ）环境中维持结构完整性，减少电极熔化或过度烧损的风险。在 TIG 焊接中，高熔点确保电极在高电流（ $100\text{--}300\text{ A}$ ）条件下仍能保持稳定的端部形态，尤其在交流焊接铝、镁等轻金属时，电极可形成半球状端部，有助于电弧的均匀分布。然而，高熔点也意味着纯钨电极在加工过程中需要更高的能量输入，增加了生产成本。

2.1.2 纯钨电极的密度

纯钨电极的密度为 19.3 g/cm^3 （ 25°C 时），接近黄金（ 19.32 g/cm^3 ），是钢（ 7.8 g/cm^3 ）的 2.5 倍。高密度赋予电极优异的机械稳定性和抗振动能力，在焊接过程中可承受电弧产生的冲击力，减少端部变形或断裂的风险。此外，高密度使纯钨电极在配重块和航空航天领域具有潜在应用。然而，高密度也增加了电极的重量，对某些需要轻量化设计的焊接设备可能带来挑战。

2.1.3 纯钨电极的导热性与导电性

纯钨电极具有良好的导热性和导电性，其导热系数约为 $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ （室温），导电性约为 30% IACS（国际退火铜标准）。优异的导热性使电极能够快速散发电弧产生的热量，降低电极过热的风险，延长使用寿命。良好的导电性确保电极在焊接过程中能够高效传输电流，维持稳定的电弧。然而，与铜（导热系数约 $400\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，导电性 100% IACS）相比，纯钨的导电性较低，这在高电流直流焊接（DC）中可能导致电极过热，影响电弧稳定性。因此，纯钨电极更适合交流焊接场景。

2.1.4 纯钨电极的热膨胀系数

纯钨电极的热膨胀系数较低，约为 $4.5\times 10^{-6}/\text{K}$ （ $20\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ ）。低热膨胀系数意味着电极在高温焊接过程中尺寸变化小，能够保持形状和尺寸的稳定性，减少因热应力引起的裂纹或变形。这在精密焊接（如航空航天部件）中尤为重要。然而，低热膨胀系数也使纯钨电极在与基材（如钢或铝）热膨胀系数差异较大时，可能产生界面应力，需通过工艺优化（如预热）来缓解。

2.1.5 纯钨电极的蒸汽压

纯钨电极在高温下的蒸汽压极低，在 3000°C 时蒸汽压仅为 0 Pa [2]。低蒸汽压意味着电极在高温电弧环境中挥发性极低，减少了电极材料的气化损失，延长了电极寿命。这在长时间连续焊接（如工业生产中的自动化焊接）中尤为重要。然而，在极高温度下（如接近沸点），蒸汽压会显著增加，可能导致电极端部轻微损耗，影响电弧的稳定性。

版权与免责声明

2.2 纯钨电极的化学特性

纯钨电极的化学特性主要体现在其化学稳定性、抗氧化性以及与其他元素的反应性上。这些特性决定了电极在不同焊接环境中的适用性和耐久性。

2.2.1 纯钨电极的化学稳定性

钨在室温和中低温下具有极高的化学稳定性，不与大多数酸、碱或盐溶液反应，仅在强氧化性酸（如浓硝酸或氢氟酸）中缓慢溶解。在 TIG 焊接中，纯钨电极通常在惰性气体（如氩气或氦气）保护下工作，化学稳定性使其能够抵抗焊接环境中的腐蚀，保持表面清洁和电弧稳定性。然而，在非惰性气体环境中（如含氧或含水蒸气的气氛），钨的化学稳定性会下降，需通过工艺控制避免电极表面氧化。

2.2.2 纯钨电极的抗氧化性

纯钨电极在高温下的抗氧化性较差，约 400° C 以上开始与氧气反应生成三氧化钨 (WO_3)，在更高温度下（如 800° C 以上）氧化速率显著加快[21]。在 TIG 焊接中，惰性气体保护可有效防止电极氧化，但若保护气流不足或中断，电极表面会迅速形成黄色或蓝色的氧化层，导致电弧不稳定甚至电极失效。因此，焊接操作中需确保稳定的气体保护，并定期检查电极表面状态。此外，纯钨电极的抗氧化性不如掺杂稀土氧化物的电极（如铈钨或钍钨电极），这限制了其在某些苛刻环境中的应用。

2.2.3 纯钨电极与其他元素的反应性

纯钨电极在高温下与其他元素（如碳、氮、氢）的反应性较低，但在特定条件下可能发生反应。例如，在含碳气氛（如 CO 或 CH_4 ）中，钨可能形成碳化钨 (WC)，导致电极表面硬度增加但脆性增强，影响焊接性能。在含氮气氛中，钨可形成氮化钨 (WN)，但反应速率较慢，对电极性能影响有限。此外，钨与熔池中的金属（如铝、镁）几乎不发生化学反应，确保了焊缝的纯净性。这些特性使纯钨电极适合焊接高纯度材料，但需避免与活性气氛的直接接触。

2.3 纯钨电极的电学特性

纯钨电极的电学特性直接影响其在 TIG 焊接中的性能，包括起弧性能、电弧稳定性和电极消耗率。以下从电子逸出功、电弧稳定性及电极消耗率三个方面进行分析。

2.3.1 纯钨电极的电子逸出功

电子逸出功是衡量材料发射热电子难易程度的指标，纯钨电极的电子逸出功较高，约为 4.52 eV。高电子逸出功意味着电极在焊接初始阶段需要更高的电压来引发电弧，尤其在直流焊接 (DC) 中，起弧性能较差，容易出现不起弧或电弧跳跃的现象。在交流焊接 (AC) 中，交变电流的正负半周期交替作用可部分缓解起弧困难，但仍需较高的起弧电压。相比之下，掺杂稀土氧化物的电极（如铈钨电极，电子逸出功约 2.7-3.0 eV）起弧性能更优，这也是纯钨电极在直流焊接中应用受限的主要原因。

2.3.2 纯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连续、均匀的能力。纯钨电极在交流焊接中电弧稳定性较好，因其高熔点和导热性可维持稳定的电极端部形态（半球状），确保电弧能量分布均匀。然而，在直流焊接中，由于高电子逸出功和较低的热电子发射效率，电弧容易出现漂移

或中断，尤其在低电流（<50 A）或高频率条件下。此外，电极表面污染（如氧化物或油污）会进一步降低电弧稳定性，因此需定期打磨电极端部以保持清洁。

2.3.3 纯钨电极的电极消耗率

电极消耗率是指电极在焊接过程中因熔化、蒸发或机械损耗而减少的速率。纯钨电极的电极消耗率较高，尤其在高电流（>200 A）或长时间连续焊接时，因其高电子逸出功导致电极端部温度较高，加速了材料挥发和烧损。在交流焊接中，半球状端部的形成可部分减缓消耗，但在直流正接（DCSP）中，电极消耗率显著高于掺杂电极（如铈钨或铈钨电极）。为降低消耗率，需优化焊接参数（如电流、气体流量）并定期打磨电极以维持尖端角度。

2.4 纯钨电极的机械特性

纯钨电极的机械特性包括硬度、脆性、延展性及高温强度，这些特性决定了其在生产、加工和使用中的表现。

2.4.1 纯钨电极的硬度与脆性

纯钨电极具有极高的硬度，室温下维氏硬度（HV）约为 350-450，接近碳化钨（HV 约 500）。高硬度使其耐磨性优异，能够承受电弧冲击和机械磨损。然而，钨的晶体结构（体心立方）使其具有较高的脆性，尤其在室温下易发生脆性断裂。在生产过程中，需通过高温锻造和退火降低脆性，但成品电极仍需小心操作以避免摔落或撞击导致断裂。在焊接中，电极的高硬度有助于维持端部形态，但脆性可能导致端部微裂纹，影响电弧稳定性。

2.4.2 纯钨电极的延展性

纯钨电极的延展性较差，室温下几乎无塑性变形能力，断裂伸长率接近 0%。在高温（>1200°C）下，钨的延展性略有改善，可通过锻造或拉丝加工成型。然而，高温延展性仍有限，加工过程中需严格控制温度和变形速率以避免裂纹。在焊接应用中，延展性差使得电极难以适应复杂形状的焊接需求，但其高硬度和稳定性弥补了这一不足。

2.4.3 纯钨电极的高温强度与抗蠕变性

纯钨电极在高温下具有优异的高温强度和抗蠕变性。在 2000°C 以上，其抗拉强度仍可达 100-200 MPa，抗蠕变能力远超大多数金属。这一特性使电极能够在高温电弧环境中保持机械稳定性，减少因热应力引起的变形或断裂。在长时间连续焊接中，抗蠕变性确保电极端部形态的稳定性，延长使用寿命。然而，高温下晶粒长大可能降低强度，需通过生产工艺优化（如控制烧结温度）来细化晶粒。

2.5 纯钨电极与其他钨电极的对比

纯钨电极与其他掺杂钨电极（如铈钨、铈钨、钍钨、钇钨、钨钨电极）在性能上存在显著差异。以下从焊接性能、应用场景及优缺点等方面进行对比。

2.5.1 纯钨电极与铈钨电极

铈钨电极（WC 电极）在钨基体中掺杂 2%-4%氧化铈（CeO₂），色标为灰色。铈钨电极的电子逸出功较低（约 2.7-3.0 eV），起弧性能优于纯钨电极，尤其在低电流直流焊接（<100 A）中表现突出。此外，铈钨电极的电弧稳定性高，电极消耗率低，适用于不锈钢、碳钢等材料

的直流焊接。相比之下，纯钨电极在直流焊接中起弧困难，电弧不稳定，但其成本较低，适合交流焊接铝、镁合金。铈钨电极无放射性，符合环保要求，但在高电流交流焊接中，端部易形成不规则形状，电弧稳定性不如纯钨电极。

2.5.2 纯钨电极与镧钨电极

镧钨电极 (WL 电极) 掺杂 1%-2%氧化镧 (La_2O_3)，色标为蓝色或金色。镧钨电极的电子逸出功约为 2.8-3.2 eV，起弧性能和电弧稳定性优于纯钨电极，适用于直流和交流焊接。其电极消耗率低，高温下端部形态稳定，适合高精度焊接（如航空航天部件）。纯钨电极在交流焊接中端部形成稳定的半球状，适合铝合金焊接，但在直流焊接中性能较差。此外，镧钨电极的生产成本高于纯钨电极，限制了其在低成本应用中的推广。

2.5.3 纯钨电极与钍钨电极

钍钨电极 (WT 电极) 掺杂 1%-2%氧化钍 (ThO_2)，色标为红色或黄色。钍钨电极的电子逸出功最低（约 2.6 eV），起弧性能和电弧稳定性极佳，广泛用于直流焊接碳钢、不锈钢和镍合金。其电极消耗率低，允许电流密度高 (>200 A)。然而，氧化钍具有放射性（射线剂量约 3.60×10^5 居里/kg），对人体和环境存在潜在危害[17]。纯钨电极无放射性，成本低，适合交流焊接，但在直流焊接中性能远不及钍钨电极。目前，钍钨电极在环保要求严格的地区逐渐被铈钨或镧钨电极替代。

2.5.4 纯钨电极与钇钨电极

钇钨电极 (WY 电极) 掺杂 2%氧化钇 (Y_2O_3)，色标为深蓝色，主要用于军工和航空航天领域的直流焊接。钇钨电极的电子逸出功约为 2.9 eV，起弧性能和电弧稳定性优异，电极消耗率低，适合高电流焊接（如钛合金）。纯钨电极在这些领域应用较少，因其起弧困难和电弧不稳定。钇钨电极的生产成本高，市场应用范围较窄，而纯钨电极因其经济性和适合交流焊接的特性，仍有广泛应用。

2.5.5 纯钨电极与锆钨电极

锆钨电极 (WZ 电极) 掺杂 0.3%-0.8%氧化锆 (ZrO_2)，色标为棕色或白色，专为交流焊接设计。锆钨电极的电子逸出功约为 4.0 eV，略低于纯钨电极，起弧性能稍优，电弧稳定性高，适合铝、镁合金的交流焊接。其电极消耗率低于纯钨电极，端部形态更稳定。纯钨电极在交流焊接中性能接近锆钨电极，但成本更低，适合对成本敏感的应用。锆钨电极的生产工艺复杂，价格较高，限制了其市场份额。

2.6 中钨智造纯钨电极 MSDS

化学品安全技术说明书 (Material Safety Data Sheet, MSDS) 是描述纯钨电极安全使用、储存及处置的重要文档。以下为纯钨电极 MSDS 的主要内容摘要：

第一部分：产品名称

中文名称：纯钨电极 (WP 电极)

英文名称：Pure Tungsten Electrode (WP)

CAS No. : 7440-33-7

版权与免责声明

第二部分：成分/组成信息

主含量 $W \geq 99.95\%$

杂质总含量 $\leq 0.05\%$

第三部分：危险性概述

健康危害：本品对眼和皮肤无刺激性。

燃爆危险：本品不可燃，不具刺激性。

第四部分：急救措施

皮肤接触：脱去污染的衣着，用大量流动清水冲洗。

眼睛接触：提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗。就医。

吸入：脱离现场至空气新鲜处。如呼吸困难，给输氧。就医。

食入：饮足量温水，催吐。就医。

第五部分：消防措施

有害燃烧产物：自然分解产物未知。

灭火方法：消防人员须佩戴防毒面具、穿全身消防服，在上风向灭火。灭火剂：干草粉、砂土。

第六部分：泄漏应急处理

应急处理：隔离泄漏污染区，限制出入。切断火源。建议应急处理人员戴防尘面具（全面罩），穿防毒服。避免扬尘，小心扫起，置于袋中转移至安全场所。若大量泄漏，用塑料布、帆布覆盖。收集回收或运至废物处理场所处置。

第七部分：操作处置与储存

操作注意事项：操作人员必须经过专门培训，严格遵守操作规程。建议操作人员佩戴自吸过滤式防尘口罩，戴化学安全防护眼镜，穿防毒物渗透工作服，戴橡胶手套。远离火种、热源，工作场所严禁吸烟。使用防爆型的通风系统和设备。避免产生粉尘。避免与氧化剂、卤素接触。搬运时要轻装轻卸，防止包装及容器损坏。配备相应品种和数量的消防器材及泄露应急处理设备。倒空的容器可能残留有害物。

储存注意事项：储存于阴凉、通风的库房。远离火种、热源。应与氧化剂、卤素分开存放，切忌混储。配备相应品种和数量的消防器材。储区应备有合适的材料收容泄漏物。

第八部分：接触控制/个体防护

版权与法律责任声明

中国 MAC (mg/m³): 6

前苏联 MAC (mg/m³): 6

TLVTN: ACGIH 1mg/m³

TLVWN: ACGIH 3mg/m³

监测方法: 硫氰化钾-氯化钛分光亮度法

工程控制: 生产过程无尘, 全面通风。

呼吸系统防护: 空气中粉尘浓度超标时, 必须佩戴自吸过滤式防尘口罩。紧急事态抢救撤离时, 应该佩戴空气呼吸器。

眼睛防护: 戴化学安全防护眼镜。

身体防护: 穿防毒物渗透工作服。

手防护: 戴橡胶手套。

第九部分: 理化特性

主要成分: 纯品

外观与性状: 固体, 金属亮白色

熔点 (°C): N/A

沸点 (°C): N/A

相对密度(水=1): 13~18.5 (20°C)

对蒸气密度 (空气=1): 无资料

饱和蒸气压 (kPa): 无资料

燃烧热 (kJ/mol): 无资料

临界温度 (°C): 无资料

临界压力 (MPa): 无资料

水分配系数的对数值: 无资料

闪点 (°C): 无资料

引燃温度 (°C): 无资料

爆炸上限% (V/V): 无资料

爆炸下限% (V/V): 无资料

溶解性: 溶于硝酸、氢氟酸

主要用途: 用于制做屏蔽件、钨合金飞镖杆、钨合金球等

第十部分: 稳定性和反应活性

禁配物: 强酸碱。

第十一部分:

急性毒性: 无资料

LC50: 无资料

第十二部分: 生态学资料

这部分暂无数据

版权与免责声明

第十三部分：废弃处置

废弃物性质废弃处置方法：处置前应参阅国家和地方有关法规。若可能，回收使用。

第十四部分：运输信息

危险货物编号：无资料

包装类别：Z01

运输注意事项：起运时包装要完整，装载应稳妥。运输过程中要确保容器不泄漏、不倒塌、不坠落、不损坏。严禁与氧化剂、卤素、食用化学品等混装混运。运输途中应防曝晒、雨淋，防高温。车辆运输完毕应进行彻底清扫。

第十五部分：法规信息

法规信息：化学危险物品安全管理条例（1987年2月17日国务院发布），化学危险物品安全管理条例实施细则（化劳发[1992]677号），工作场所安全使用化学品规定（[1996]劳部发423号）等法规，针对化学危险品的安全使用、生产、储存、运输、装卸等方面均作了相应规定；车间空气中钨卫生标准（GB 16229-1996），规定了车间空气中该物质的最高容许浓度及检测方法。

第十六部分：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



中钨智造纯钨电极

中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

第三章 纯钨电极的制备生产工艺与技术

纯钨电极（WP 电极）的制备是一项涉及多学科交叉的高精度工艺，从原材料的提取到成品电极的成型，涵盖了矿物冶金、粉末冶金、压力加工和表面处理等多个环节。每一环节都需要严格控制工艺参数，以确保电极的高纯度、均匀性和优异的焊接性能。本章将详细探讨纯钨电极的制备生产工艺与技术，涵盖原材料准备、粉末冶金、压力加工、表面处理、质量控制以及技术难点与创新方向。

3.1 纯钨电极的原材料准备

纯钨电极的制备始于原材料的选择与处理。钨作为一种稀有金属，主要以钨矿的形式存在于自然界中，其制备过程需要从矿石中提取高纯度的钨化合物，并进一步加工成高纯钨粉。这一阶段的工艺直接决定了电极的纯度和性能。

3.1.1 钨矿石的提取与提纯

钨矿石的提取与提纯是纯钨电极生产的第一步，主要涉及从自然界中获取钨矿并将其转化为高纯度钨化合物。全球钨矿资源主要分布在中国、俄罗斯、加拿大和澳大利亚等地，其中中国储量占全球一半以上。常见的钨矿石包括黑钨矿（主要成分为 FeWO_4 和 MnWO_4 ）和白钨矿（主要成分为 CaWO_4 ）。黑钨矿因其较高的钨含量和易选矿特性，是制备纯钨电极的主要原料。

钨矿石的提取通常采用露天或地下开采方法，采出的矿石需经过破碎和研磨，制成粒度较小的矿粉，以便后续选矿。选矿工艺包括重力选矿、浮选和磁选等，通过这些方法将钨矿物与其他杂质（如硅酸盐、硫化物）分离，获得高品位的钨精矿。钨精矿的钨含量通常需达到一定标准，以满足提纯要求。

提纯过程主要通过湿法冶金完成。首先，将钨精矿与氢氧化钠或碳酸钠溶液反应，生成钨酸钠（ Na_2WO_4 ）溶液。这一过程需在高温高压下进行，以提高反应效率。随后，通过过滤去除溶液中的不溶性杂质，如硅、铁等。接下来，通过加入酸（如盐酸）使钨酸钠转化为钨酸（ H_2WO_4 ）沉淀。钨酸沉淀经过洗涤和干燥后，进一步煅烧生成三氧化钨（ WO_3 ），这是制备高纯钨粉的中间产物。整个提纯过程需严格控制溶液的 pH 值、温度和反应时间，以最大限度减少杂质的残留，确保三氧化钨的纯度，为后续工艺奠定基础。

3.1.2 高纯钨粉的制备

高纯钨粉是纯钨电极制备的核心原料，其纯度、粒度和形貌直接影响电极的性能。钨粉的制备通常以三氧化钨为起始原料，通过氢气还原法生产。具体工艺包括以下步骤：

首先，将三氧化钨置于还原炉中，在高温下通入高纯氢气，使三氧化钨逐步还原为金属钨粉。还原过程分为两个阶段：第一阶段在较低温度下将三氧化钨还原为二氧化钨（ WO_2 ），第二阶段在更高温度下进一步还原为金属钨。这一过程需精确控制温度梯度、氢气流量和还原时间，以避免钨粉颗粒过大或团聚。还原后的钨粉需经过筛分和清洗，去除残余的氧化物和杂质。

为满足纯钨电极的高纯度要求，钨粉的纯度通常需达到 99.95% 以上，杂质（如铁、镍、硅、

氧)的含量需严格控制在微量水平。此外,钨粉的粒度分布和形貌也至关重要。粒度过大可能导致烧结坯体的密度不足,而粒度过小则可能增加压制难度。因此,钨粉的平均粒度通常控制在 1-5 微米范围内,颗粒形貌以近球形为佳,以提高流动性与压制性能。

近年来,部分企业采用等离子体还原或化学气相沉积等先进技术制备超细钨粉,进一步提高了粉末的纯度和均匀性。这些技术虽然成本较高,但在高性能电极生产中具有显著优势。

3.2 纯钨电极的粉末冶金工艺

粉末冶金是纯钨电极制备的核心工艺,通过压制、烧结和热处理等步骤将钨粉转化为高密度、高强度的钨坯体。这一过程需在高温、高压和真空环境中进行,以确保电极的致密度和机械性能。

3.2.1 钨粉压制成型

钨粉压制成型是将高纯钨粉加工成具有一定形状和强度的坯体的过程。这一阶段的目标是形成具有均匀密度和足够强度的坯体,为后续烧结提供基础。压制工艺主要包括冷等静压和模压两种方法。

冷等静压是目前最常用的压制方法,通过将钨粉装入柔性模具(如橡胶模具),置于高压液体介质中施加均匀压力(通常为 100-300 MPa),使粉末颗粒紧密结合。冷等静压的优点是压力分布均匀,坯体密度一致,适合生产大型或复杂形状的坯体。模压则适用于小批量生产,通过钢模对钨粉施加单向压力成型,但易产生密度梯度,需后续工艺优化。压制过程中需添加少量粘结剂(如聚乙烯醇或石蜡)以提高坯体的成型强度,但粘结剂在后续烧结前需完全去除,以避免残留杂质。为确保坯体的均匀性,需控制钨粉的装填密度和压制速度,避免出现裂纹或分层现象。

3.2.2 烧结工艺

烧结是将压制坯体加热至低于钨熔点的温度,使粉末颗粒结合形成致密材料的过程。钨的高熔点使其烧结温度较高,通常在 2000-2800°C 之间。为避免氧化,烧结需在真空或氢气保护气氛中进行,常用设备包括真空烧结炉或氢气烧结炉。

烧结过程分为三个阶段:初期、中期和后期。在初期,低温下(约 1000-1500°C)坯体中的粘结剂挥发,颗粒表面开始形成颈部连接。中期(1500-2200°C)颗粒间结合增强,坯体收缩,密度逐渐增加。后期(2200-2800°C)晶粒长大,坯体达到最大致密度,通常为理论密度的 95%-98%。烧结时间和温度需精确控制,过高的温度或过长的保温时间可能导致晶粒过度长大,降低坯体的机械性能。

为提高烧结效率,部分企业采用活性烧结技术,通过添加微量金属(如镍或钴)降低烧结温度,但需确保添加剂不影响电极的纯度。此外,中频感应烧结和放电等离子烧结(SPS)等新兴技术逐渐应用于高性能钨电极生产,可显著缩短烧结时间并提高坯体密度。

3.2.3 热处理与退火

烧结后的钨坯体通常存在内应力和微观缺陷,需通过热处理和退火消除应力、改善组织结构。

热处理通常在真空或氢气气氛中进行，温度控制在 1200–1800° C，保温时间根据坯体尺寸和性能要求调整。热处理可细化晶粒，增强坯体的韧性和加工性能。

退火是热处理的延伸步骤，旨在进一步降低坯体的硬度和脆性，提高延展性。退火温度通常低于热处理温度（约 800–1200° C），采用缓慢冷却以避免新的应力产生。退火后的坯体更适合后续的压力加工，如锻造和拉丝。

3.3 纯钨电极的压力加工

压力加工是将烧结坯体加工成具有精确尺寸和形状的电极棒材的过程，包括锻造、轧制、拉丝和拉拔等步骤。钨的高硬度和脆性使其加工难度较大，需在高温下进行以提高延展性。

3.3.1 锻造与轧制

锻造是将烧结坯体在高温下（约 1500–1800° C）通过锤击或压力机变形，制成棒状或板状坯料的过程。锻造可细化晶粒，提高坯体的密度和强度，但需控制变形速率以避免裂纹。锻造通常在氢气保护气氛中进行，以防止氧化。

轧制是锻造后的进一步加工步骤，通过多道次轧机将锻造坯料轧制成更细的棒材或线材。轧制温度逐渐降低（从 1500° C 降至 1000° C），以提高材料表面质量和尺寸精度。轧制过程中需定期退火，以消除加工硬化和内应力，确保坯料的可加工性。

3.3.2 拉丝与拉拔

拉丝是将轧制棒材通过模具拉伸，制成直径更小的钨丝或电极坯料的过程。拉丝需在高温（约 800–1200° C）下进行，使用硬质合金或金刚石模具以承受钨的高硬度。拉丝过程中需涂抹润滑剂（如石墨或二硫化钼）以减少摩擦和模具磨损。每道次拉丝的变形量通常控制在 10%–20%，需多次退火以恢复延展性。

拉拔是拉丝的延伸工艺，用于生产直径更小（0.5–6.4 mm）的电极坯料。拉拔模具的精度直接影响电极的表面质量和尺寸公差，因此需定期检查和更换模具。拉丝与拉拔的连续化生产可显著提高效率，但需严格控制温度和拉伸速度以避免断丝。

3.3.3 电极棒材成型

电极棒材成型是将拉拔后的钨丝切割、矫直和定尺，制成符合规格的电极棒材。切割通常采用机械剪切或激光切割，需确保切口平整无毛刺。矫直通过滚轮矫直机完成，以消除棒材的弯曲和内应力。定尺根据客户需求调整，常见长度为 75–600 mm。成型后的棒材需经过表面检查，确保无裂纹、划痕或氧化痕迹。

3.4 纯钨电极的表面处理

表面处理是纯钨电极制备的最后阶段，旨在提高电极的表面质量、焊接性能和识别度，包括清洗、抛光和绿色涂头标记等步骤。

3.4.1 清洗与抛光

清洗是将成型棒材表面的油污、氧化物和杂质去除的过程，通常采用化学清洗和超声波清洗结合的方法。化学清洗使用碱性溶液（如氢氧化钠）或酸性溶液（如稀硝酸）去除氧化层，

随后用纯水冲洗并干燥。超声波清洗通过高频振动去除微小颗粒，确保表面清洁。

抛光是提高电极表面光洁度的关键步骤，通常采用机械抛光或电化学抛光。机械抛光使用砂轮或抛光布去除表面微小划痕，电化学抛光通过电解作用使表面更加平滑。抛光后的电极表面粗糙度达 Ra1.6-3.2 μm ，有助于提高电弧稳定性和焊接质量。

3.4.2 绿色涂头标记

绿色涂头标记是纯钨电极的国际标准识别方式，符合 AWS A5.12 和 ISO 6848 标准。标记过程通常在电极一端涂覆绿色无毒涂料（如水性环保漆），涂层厚度均匀，耐磨且不影响焊接性能。涂头标记需在清洁的表面上进行，确保附着力和耐久性。部分企业采用自动化喷涂设备，提高标记效率和一致性。

3.5 纯钨电极的质量控制

质量控制贯穿纯钨电极生产的每个环节，从原材料到成品，需通过多层次检测确保电极的性能和可靠性。

3.5.1 原材料质量检测

原材料质量检测主要针对钨精矿、三氧化钨和钨粉。钨精矿需检测钨含量和杂质（如硫、磷、硅）。三氧化钨需通过 X 射线荧光分析（XRF）或电感耦合等离子体光谱（ICP-OES）检测纯度和杂质含量。钨粉需检测粒度分布、形貌和氧含量，确保符合生产要求。

3.5.2 生产过程监控

生产过程监控包括压制、烧结、锻造、拉丝和表面处理等环节的实时检测。压制坯体的密度和尺寸需通过超声波检测仪检查，烧结坯体的致密度和晶粒尺寸需通过金相显微镜分析。锻造和拉丝过程中需监测温度、变形量和表面质量，避免裂纹或缺陷。表面处理时需检查表面粗糙度和涂层质量。

3.5.3 成品检验

成品检验包括化学成分、物理性能、尺寸公差和焊接性能的全面检测。化学成分通过 ICP-OES 或 XRF 分析，确保钨含量 $\geq 99.5\%$ 。物理性能包括密度、硬度和导电性测试。尺寸公差需符合标准（如 ISO 6848），直径偏差控制在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 。焊接性能通过模拟 TIG 焊接测试，评估起弧性能、电弧稳定性和电极消耗率。

3.6 纯钨电极的技术难点与创新

纯钨电极的制备涉及多项技术难点，近年来通过技术创新取得了显著进展。以下从高纯度控制、晶粒组织优化、生产效率提升和环保可持续发展四个方面探讨。

3.6.1 高纯度控制

高纯度是纯钨电极的核心要求，杂质（如氧、铁、碳）含量需控制在 ppm 级。技术难点包括原材料提纯和生产过程中杂质的引入。创新方向包括采用离子交换和溶剂萃取技术提高三氧化钨纯度，使用高纯氢气和真空环境减少还原和烧结过程中的氧污染，以及开发在线杂质检测技术（如激光诱导击穿光谱）实现实时监控。

中钨智造科技有限公司

纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊（TIG 焊）：尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂：作为高温离子源的电极材料。

电子器件：用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极：在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用：涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分（W 含量）	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率（ 20°C ）	$\sim 30\%$ IACS
硬度（HV）	340 - 400 HV
热导率	$170\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5\text{ mm} \sim \varnothing 6.4\text{ mm}$ （可定制）
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度（可定制）
执行标准	ISO 6848（焊接钨电极标准）

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态：磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装：每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

3.6.2 晶粒组织的优化

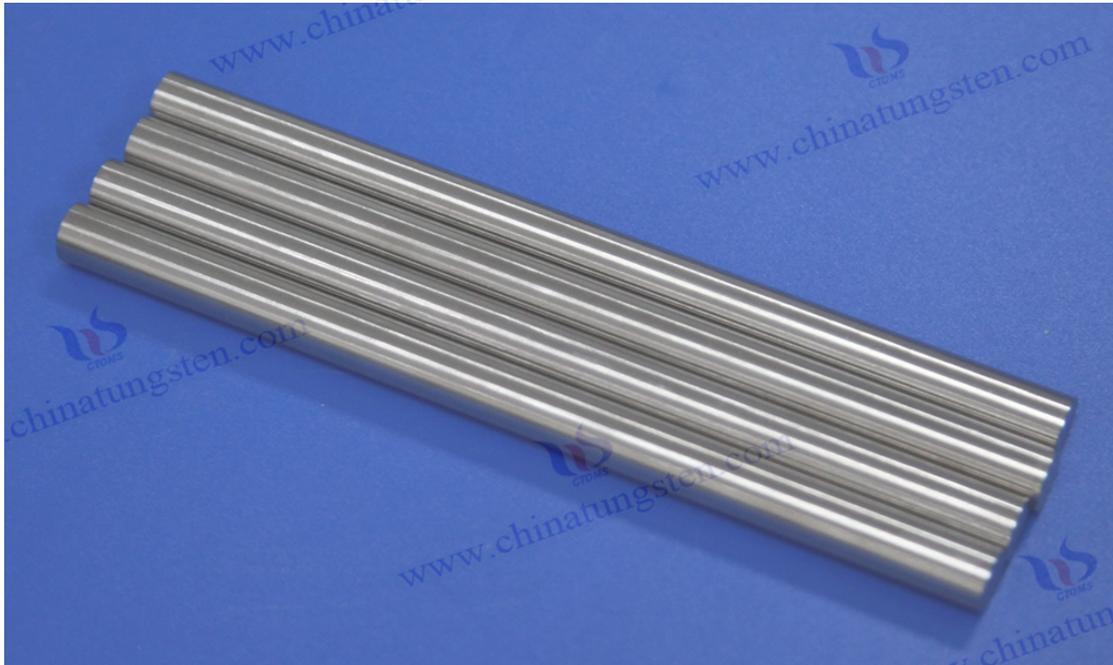
晶粒组织直接影响电极的机械性能和焊接性能，过大的晶粒导致脆性增加，过小的晶粒降低高温强度。技术难点在于控制烧结和加工过程中的晶粒长大。创新方向包括采用纳米钨粉作为原料，通过快速烧结技术（如SPS）细化晶粒，以及添加微量抑制剂（如氧化铝）控制晶粒生长。

3.6.3 生产效率提升

纯钨电极的生产周期长、能耗高，限制了规模化生产。技术难点包括烧结时间长、加工难度大和设备维护成本高。创新方向包括开发连续化烧结炉提高生产效率，采用自动化拉丝和表面处理设备降低人工成本，以及应用智能制造技术（如工业物联网）优化生产流程。

3.6.4 环保与可持续发展

钨电极生产涉及高能耗和废水废气排放，面临环保压力。技术难点包括降低能耗和处理含钨废料。创新方向包括采用可再生能源驱动生产设备，开发废水循环利用技术，以及建立钨废料回收体系实现资源循环利用。部分企业已开始探索绿色制造模式，如使用无毒溶剂和低排放设备。



中钨智造纯钨电极

第四章 纯钨电极的用途

纯钨电极（WP 电极）以其高熔点、优异的导电导热性能和化学稳定性，在多种工业领域中发挥了重要作用。尤其在焊接行业中，纯钨电极是钨极氩弧焊（TIG 焊接）的核心材料，广泛应用于交流焊接（AC）场景。此外，在其他工业应用、特殊领域以及某些非焊接场景中也展现出独特优势。然而，纯钨电极的应用也存在一定局限性。本章将全面探讨纯钨电极的用途，涵盖焊接应用、其他工业应用、特殊领域应用及其局限性。

4.1 焊接应用

焊接是纯钨电极最主要的应用领域，尤其在钨极氩弧焊（TIG 焊接）中，纯钨电极因其高熔点和稳定的电弧特性成为不可或缺的材料。以下从 TIG 焊接、交流焊接以及镁、铝及其合金的焊接三个方面详细阐述其应用。

4.1.1 钨极氩弧焊（TIG 焊接）

钨极氩弧焊（TIG 焊接，Tungsten Inert Gas Welding）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工艺，以其高精度、高质量焊缝和广泛的材料适用性而著称。纯钨电极作为 TIG 焊接的早期电极类型，因其高熔点（ 3422°C ）和优异的高温稳定性，能够在电弧高温（约 $6000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ ）环境中保持结构完整，减少电极熔化或烧损的风险。这一特性使其在要求高质量焊缝的工业场景中具有重要价值。

在 TIG 焊接中，纯钨电极作为非熔化电极，主要负责引发和维持电弧，而填充金属（若需要）则由焊丝提供。电极的端部形态对电弧形状和焊接质量有显著影响。在操作中，纯钨电极通常需要打磨成锥形或半球形，以优化电弧的集中度和稳定性。惰性气体的保护作用可防止电极和熔池被氧化，确保焊缝的纯净性和力学性能。

纯钨电极在 TIG 焊接中的应用广泛，涵盖从薄板到厚板的多种金属材料焊接，尤其在对焊缝外观和性能要求较高的场景中表现出色。例如，在不锈钢、铝合金和镁合金的焊接中，纯钨电极能够提供稳定的电弧和清洁的焊缝，满足精密制造的需求。此外，TIG 焊接的灵活性使其适用于手工焊接和自动化焊接，纯钨电极在两种模式下均表现出可靠的性能。

尽管纯钨电极在 TIG 焊接中具有广泛应用，但其高电子逸出功（约 4.52 eV ）导致起弧性能较差，尤其在直流焊接（DC）中表现不佳。因此，其主要应用集中在交流焊接场景，而直流焊接多采用掺杂稀土氧化物的电极（如铈钨或镧钨电极）。即便如此，纯钨电极因其成本低廉、无放射性和适合特定材料的特性，仍是 TIG 焊接中不可或缺的选择。

4.1.2 交流焊接（AC）中的应用

交流焊接（AC）是纯钨电极的主要应用场景之一，因其在交流电的正负半周期交替作用下能够形成稳定的电弧，特别适合焊接具有氧化膜的轻金属。交流焊接利用交变电流，使电极和工件交替成为阴极和阳极，从而实现电弧的动态平衡。纯钨电极在交流焊接中的独特优势在于其能够形成稳定的半球状电极端，这种端部形态有助于均匀分布电弧能量，提高焊接质量。

在交流焊接中，纯钨电极的半球状端部在正半周期（电极为阴极）时产生强烈的电子发射，形成高温电弧；在负半周期（工件为阴极）时，电弧对工件表面的氧化膜产生“阴极清洗”

版权与免责声明

作用，有效去除氧化层，确保焊缝的清洁。这一特性使纯钨电极在焊接铝、镁及其合金时表现优异。此外，交流焊接的电流波形（如方波或正弦波）可通过焊接设备调节，以优化电弧特性和熔深，纯钨电极能够适应多种波形设置，展现出较强的工艺适应性。

纯钨电极在交流焊接中的应用场景包括建筑、船舶制造、汽车工业和航空航天等领域。例如，在建筑行业中，铝制幕墙和结构件的焊接常采用交流 TIG 焊接，纯钨电极能够提供高质量的焊缝，满足外观和强度要求。在船舶制造中，铝合金船体的焊接需要稳定的电弧和清洁的焊缝，纯钨电极是理想选择。此外，其无放射性特性使其在对安全性要求较高的环境中（如食品加工设备制造）更具优势。

尽管纯钨电极在交流焊接中表现出色，但其电弧稳定性在高频率或低电流条件下可能略逊于掺杂电极。为提高性能，操作者需定期打磨电极端部，保持其清洁和适当的端部角度。此外，焊接参数（如电流、气体流量）的优化也至关重要，以确保电弧的稳定性和焊缝质量。

4.1.3 镁、铝及其合金的焊接

镁、铝及其合金因其轻质、高强度和良好的耐腐蚀性，广泛应用于航空航天、汽车制造和电子行业。然而，这些材料表面易形成致密的氧化膜（如 Al_2O_3 ，熔点约 $2050^{\circ}C$ ），对焊接工艺提出了挑战。纯钨电极在交流 TIG 焊接中的“阴极清洗”作用使其成为焊接镁、铝及其合金的首选材料。

在铝合金焊接中，纯钨电极通过交流电的负半周期去除氧化膜，同时在正半周期提供足够的热量熔化基材，形成均匀的熔池。铝合金（如 6061、7075）的焊接要求电弧稳定、熔深适中，纯钨电极的半球状端部能够满足这些需求。此外，铝的高导热性（约 $237 W/m \cdot K$ ）要求焊接过程中控制热输入，纯钨电极的优异导热性有助于散发电弧热量，减少过热风险。

镁合金（如 AZ31、AZ91）因其密度低（约 $1.74 g/cm^3$ ）被广泛用于轻量化设计，但其低熔点（约 $650^{\circ}C$ ）和高化学活性增加了焊接难度。纯钨电极在镁合金焊接中能够提供稳定的电弧，配合适当的惰性气体保护（如氩气或氩-氦混合气），可有效防止熔池氧化，确保焊缝质量。在航空航天领域，镁合金部件（如座椅框架、机身面板）的焊接常采用纯钨电极，因其能够满足高精度和高质量的要求。

为优化镁、铝及其合金的焊接效果，需注意以下几点：首先，电极直径需根据工件厚度和电流选择，常用直径为 1.6-3.2 mm；其次，保护气体流量需适中（约 8-15 L/min），以确保熔池保护；最后，电极端部需定期打磨成半球形，以维持电弧稳定性。纯钨电极在这些材料焊接中的广泛应用，充分体现了其在交流焊接领域的独特优势。

4.2 其他工业应用

除了焊接，纯钨电极在其他工业领域也有广泛应用，涵盖电阻焊、等离子切割与喷涂、热电子发射、溅射靶材以及配重块与加热元件等领域。这些应用充分利用了钨的高熔点、高密度和优异的电学性能。

4.2.1 电阻焊电极

电阻焊是一种通过电流产生的电阻热熔化金属的焊接工艺，广泛用于汽车制造、电子行业和

家电生产。纯钨电极因其高硬度、高导电性和耐磨性，常用于电阻焊电极，尤其在点焊和缝焊中表现出色。在点焊中，纯钨电极作为电极头，直接与工件接触，传递高电流（数千安培）以产生局部高温，熔化金属形成焊点。其高熔点确保电极在高温下不软化或粘附工件，延长使用寿命。

在电子行业中，电阻焊用于焊接薄金属片（如铜箔、镍片）或微型元件，纯钨电极的高导电性和稳定性能够提供精确的热量控制，避免过热损伤敏感部件。此外，纯钨电极的耐磨性使其适合高频次焊接操作，如汽车零部件的连续点焊。尽管铜合金电极在某些电阻焊场景中更常见，但纯钨电极在高精度和高温应用中具有独特优势。

4.2.2 等离子切割与喷涂

等离子切割是一种利用高温等离子电弧（温度可达 20,000° C）熔化金属并吹除熔融材料的加工工艺，广泛用于钢铁、铝合金和不锈钢的切割。纯钨电极作为等离子切割枪的核心部件，负责引发和维持等离子电弧。其高熔点和低蒸汽压使其能够在极端高温下保持稳定，减少电极消耗。此外，纯钨电极的导电性确保电弧的快速响应，适合高速切割应用。

在等离子喷涂中，纯钨电极用于产生高温等离子气流，将陶瓷或金属粉末熔化并喷涂到基材表面，形成耐磨、耐腐蚀或隔热的涂层。纯钨电极的耐高温性和化学稳定性使其能够承受喷涂过程中的苛刻条件，确保涂层的均匀性和质量。等离子切割与喷涂的广泛应用推动了纯钨电极在制造业中的需求增长，尤其在重工业和表面工程领域。

4.2.3 热电子发射材料

纯钨电极因其高电子逸出功和优异的热电子发射性能，常用于需要热电子发射的设备，如电子显微镜、阴极射线管（CRT）和 X 射线管。在这些设备中，纯钨电极作为阴极，在高温下（约 2000-2500° C）发射电子，形成电子束或射线。其高熔点和低蒸汽压确保电极在高温真空环境中长期稳定运行，而其化学稳定性防止了与残余气体的反应。

尽管掺杂稀土氧化物的钨电极（如钨钨电极）在某些热电子发射应用中性能更优，纯钨电极因其无放射性、成本低廉，仍广泛用于对安全性要求较高的设备。此外，纯钨电极的机械强度使其能够承受高电压和热冲击，适合高功率电子设备的应用。

4.2.4 溅射靶材

溅射是一种物理气相沉积（PVD）技术，用于在基材表面沉积薄膜，广泛应用于半导体、太阳能电池和光学镀膜行业。纯钨电极因其高纯度（≥99.95%）和高密度，可作为溅射靶材，在高速离子轰击下释放钨原子，形成均匀的钨薄膜。这些薄膜具有优异的导电性、耐腐蚀性和高温稳定性，适用于制造微电子器件、传感器和光学元件。

纯钨靶材的生产需严格控制杂质含量和晶粒结构，以确保薄膜的性能。纯钨电极的高密度和均匀性使其成为优质靶材的理想选择。此外，其高熔点和化学稳定性确保靶材在高真空和高温溅射环境中长期使用而不退化。随着半导体和新能源产业的快速发展，纯钨电极作为溅射靶材的需求持续增长。

版权与免责声明

4.2.5 配重块与加热元件

纯钨电极的高密度（ 19.3 g/cm^3 ）使其成为配重块的理想材料，广泛用于航空航天、汽车和精密仪器领域。例如，在飞机和卫星中，钨配重块用于平衡结构，提高飞行稳定性；在赛车中，钨配重块用于优化车辆重心分布。纯钨的高密度使其在较小体积内提供更大的重量，优于传统的铅或钢配重材料。此外，其无毒性和耐腐蚀性符合环保要求。

在加热元件方面，纯钨电极因其高熔点和优异的导电性，常用于高温炉（如真空炉、石墨炉）的加热元件。在这些设备中，钨电极能够承受 2000°C 以上的温度，提供稳定的热源，适用于金属熔炼、陶瓷烧结和热处理工艺。尽管钨在高温下易氧化，惰性气体或真空保护可有效延长其使用寿命。

4.3 特殊领域应用

纯钨电极在航空航天、军工和核工业等特殊领域中具有重要应用，这些领域对材料的性能、安全性和可靠性要求极高。

4.3.1 航空航天工业

航空航天工业对焊接质量和材料性能要求极为严格，纯钨电极在该领域的应用主要集中于铝合金、镁合金和钛合金的 TIG 焊接。例如，在飞机机身、发动机部件和卫星结构的制造中，铝合金（如 7075、6061）因其轻质和高强度被广泛使用。纯钨电极通过交流 TIG 焊接去除氧化膜，形成高质量焊缝，满足航空航天部件的强度和耐腐蚀要求。

此外，镁合金在航空航天中的应用日益增加，如直升机传动系统和座椅框架的制造。纯钨电极在镁合金焊接中的稳定电弧和清洁焊缝特性，确保了部件的可靠性和轻量化。此外，纯钨电极的无放射性使其适合制造对安全性要求极高的航天器部件，如卫星外壳和燃料箱。

在航空航天领域，纯钨电极还用于等离子喷涂和配重块制造。等离子喷涂用于在发动机叶片表面形成耐高温涂层，纯钨电极的稳定性确保涂层质量。配重块用于平衡航天器结构，纯钨的高密度和无毒性使其成为理想选择。

4.3.2 军工领域

军工领域对材料的耐高温、耐腐蚀和高强度要求极高，纯钨电极在该领域的应用包括装甲车辆、导弹部件和武器系统的焊接与加工。例如，铝合金和不锈钢在装甲车辆制造中广泛使用，纯钨电极通过 TIG 焊接提供高质量焊缝，增强结构强度。在导弹部件（如导引头外壳）的制造中，纯钨电极的精准电弧控制满足了高精度的焊接需求。

此外，纯钨电极在军工领域的等离子切割和热电子发射应用中也发挥作用。等离子切割用于加工高强度钢和钛合金，纯钨电极的耐高温性确保切割效率和精度。热电子发射用于军用雷达和通信设备的电子管，纯钨电极的稳定性保证了设备的长期运行。纯钨电极的无放射性特性使其在军工领域更具优势，尤其在对环境和人员安全要求严格的场景中。

4.3.3 核工业

核工业对材料的抗辐射性、耐高温性和化学稳定性要求极高，纯钨电极在核反应堆部件、燃料棒外壳和实验设备的制造中具有重要应用。例如，在核反应堆的冷却系统和结构件中，铝

合金和不锈钢的焊接常采用纯钨电极，因其能够提供无缺陷的焊缝，满足抗辐射和耐腐蚀的要求。

在核聚变研究（如国际热核聚变实验堆 ITER）中，钨因其高熔点和低溅射率被用作等离子体面向材料（PFM）。纯钨电极在这些部件的焊接和加工中发挥作用，其高纯度和稳定性确保了部件的性能。此外，纯钨电极在核工业的配重块和加热元件中也有应用，如用于辐射屏蔽的配重块和高温实验炉的加热元件。

纯钨电极的无放射性特性使其在核工业中更具优势，相比钍钨电极（含放射性氧化钍），其在安全性和环保性方面表现更优。核工业的快速发展为纯钨电极的应用提供了广阔前景。

4.4 应用局限性

尽管纯钨电极在多种领域中具有广泛应用，但其性能局限性限制了其在某些场景中的使用。以下从直流焊接和电极磨损与寿命两个方面分析其不足。

4.4.1 直流焊接（DC）中的不足

纯钨电极在直流焊接（DC）中的主要局限性在于其高电子逸出功（约 4.52 eV），导致起弧困难和电弧不稳定。在直流正接（DCSP）中，电极作为阴极需要发射大量电子，高电子逸出功使起弧需要更高的电压，容易出现电弧跳跃或中断。在直流反接（DCRP）中，电极作为阳极承受更高的热负荷，可能导致过热和快速消耗。

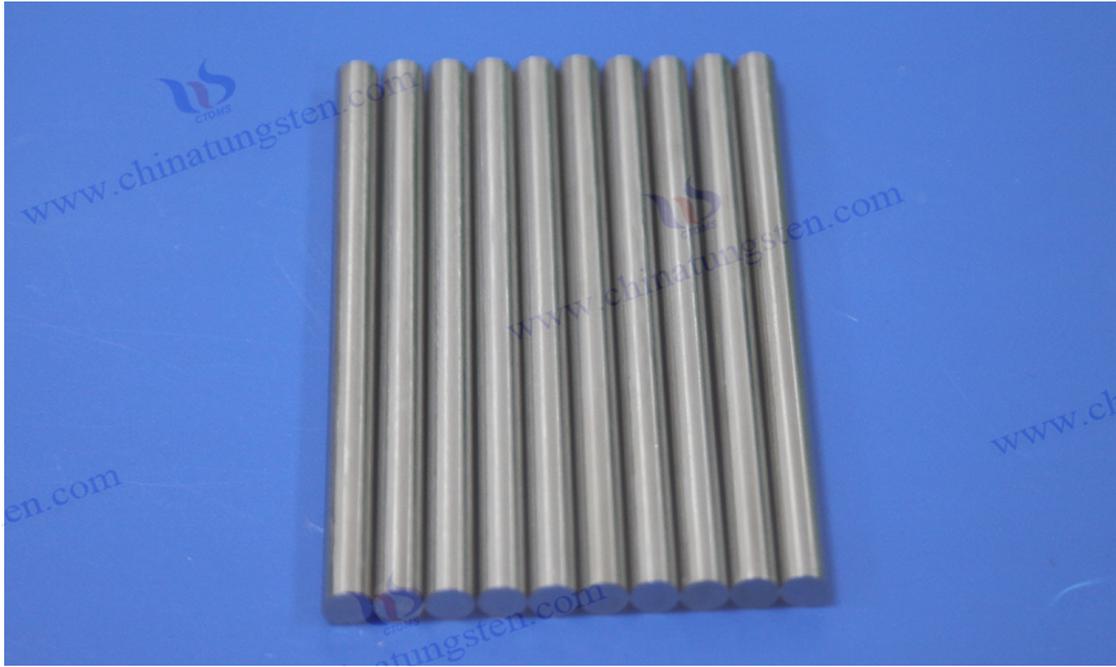
相比之下，掺杂稀土氧化物的电极（如钍钨、镧钨电极）具有较低电子逸出功（约 2.7-3.2 eV），在直流焊接中起弧性能和电弧稳定性更优。因此，纯钨电极在直流焊接中的应用主要局限于低要求场景，如低电流焊接或临时修补，而高精度或高效率的直流焊接多采用掺杂电极。为缓解这一局限性，可通过优化焊接设备（如高频引弧）或调整电极端部角度改善起弧性能，但效果有限。

4.4.2 电极磨损与寿命问题

纯钨电极的电极磨损和寿命问题是其另一主要局限性。在高电流（>200 A）或长时间连续焊接中，纯钨电极因高电子逸出功导致端部温度较高，加速了材料的挥发和烧损，表现为电极长度的逐渐缩短和端部形态的变化。在交流焊接中，半球状端部的形成可部分减缓磨损，但在高频率或不稳定的电流条件下，磨损速率仍较高。

此外，电极表面污染（如氧化物、油污）或不当操作（如电极接触熔池）会进一步加剧磨损，降低电弧稳定性。为延长电极寿命，需定期打磨电极端部，保持其清洁和适当的端部形态。然而，频繁打磨增加了操作成本和时间，尤其在自动化焊接中可能影响生产效率。相比之下，掺杂电极（如镧钨电极）因其较低的消耗率和更稳定的端部形态，寿命通常更长。

为克服磨损和寿命问题，可通过优化焊接参数（如降低电流、增加气体保护）、改进电极生产工艺（如细化晶粒）或开发新型电极材料来提高性能。然而，这些改进可能增加成本，需在性能与经济性之间权衡。



中钨智造纯钨电极

第五章 纯钨电极的生产设备

纯钨电极（WP 电极）的生产涉及从原材料处理到成品检验的复杂工艺链，每个环节都需要专用设备以确保产品质量和生产效率。生产设备涵盖原材料处理、粉末冶金、压力加工、表面处理、检测与质量控制以及自动化与智能化系统。这些设备需具备高精度、高可靠性和耐高温耐腐蚀的特性，以适应钨的高熔点和硬度特性。本章将详细探讨纯钨电极生产中使用的各类设备，分析其功能、特点及技术发展趋势。

5.1 纯钨电极的原材料处理设备

原材料处理是纯钨电极生产的第一步，涉及从钨矿石到高纯钨粉的转化过程，需使用专用设备进行破碎、研磨和化学提纯。这些设备需具备高效、稳定和环保的特性，以满足高纯度钨粉的生产要求。

5.1.1 钨矿石破碎与研磨设备

钨矿石（如黑钨矿或白钨矿）从矿山开采后需经过破碎和研磨，制成适合选矿的细小颗粒。破碎与研磨设备主要包括以下类型：

颚式破碎机：用于初级破碎，将大块钨矿石（尺寸可达 1-2 米）破碎成 50-100 mm 的颗粒。颚式破碎机通过动颚和定颚的挤压作用破碎矿石，设备需采用高强度耐磨材料（如锰钢）以应对钨矿石的高硬度。现代颚式破碎机配备液压调节系统，可精确控制出料粒度，提高破碎效率。

圆锥破碎机：用于中细碎，将初级破碎后的矿石进一步破碎至 5-20 mm。圆锥破碎机通过旋转锥体和固定锥体的挤压作用实现连续破碎，适合处理高硬度矿石。其优点是破碎比大、产

版权与免责声明

量高，适用于大规模钨矿加工。

球磨机：用于研磨，将破碎后的矿石磨成 0.1-1 mm 的细粉，为选矿做准备。球磨机通过钢球与矿石的碰撞和摩擦作用研磨物料，内衬采用耐磨陶瓷或高铬钢以延长使用寿命。湿式球磨机常用于钨矿研磨，通过添加水介质减少粉尘污染，提高研磨效率。

振动筛：用于分级，筛选出粒度均匀的矿粉。振动筛通过高频振动将不同粒度的物料分离，确保进入选矿工序的矿粉粒度一致。现代振动筛配备多层筛网，可实现多级分选，提高选矿效率。

这些设备需配备除尘系统以减少粉尘污染，并采用自动化控制系统以优化操作参数，如破碎压力、研磨时间和筛分频率。近年来，智能化破碎设备逐渐普及，通过传感器和 PLC（可编程逻辑控制器）实现实时监控和故障诊断，提高了生产效率和安全性。

5.1.2 化学提纯设备

化学提纯是将钨精矿转化为高纯三氧化钨 (WO_3) 或钨酸 (H_2WO_4) 的过程，涉及溶解、过滤、沉淀和干燥等步骤。常用设备包括：

反应釜：用于钨精矿与氢氧化钠或碳酸钠反应，生成钨酸钠溶液。反应釜需采用耐腐蚀材料（如不锈钢或搪瓷）制造，以承受高温高压和强碱环境。现代反应釜配备搅拌系统和温控装置，确保反应均匀和高效。

过滤机：用于去除溶液中的不溶性杂质（如硅酸盐、铁化合物）。真空过滤机或压滤机是常用设备，通过多级过滤确保溶液纯度。过滤机需配备耐腐蚀滤布和自动化清洗系统，以延长使用寿命并减少人工操作。

沉淀槽：用于将钨酸钠溶液通过酸化反应转化为钨酸沉淀。沉淀槽需具备精确的 pH 控制和搅拌功能，以确保沉淀颗粒的均匀性和纯度。部分先进设备采用在线 pH 监测仪，实时调整酸液添加量。

干燥炉：用于干燥钨酸沉淀或三氧化钨，制备干燥的中间产物。干燥炉通常采用电加热或燃气加热，需具备均匀温场和惰性气体保护功能，以防止物料氧化。现代干燥炉配备真空系统，可在较低温度下完成干燥，降低能耗。

化学提纯设备需严格控制工艺参数（如温度、压力、溶液浓度），以确保三氧化钨的纯度达到 99.95% 以上。此外，废水处理设备（如中和槽和沉淀池）是提纯过程中不可或缺的组成部分，用于处理含钨废液，符合环保要求。

5.2 纯钨电极的粉末冶金设备

粉末冶金是纯钨电极生产的核心工艺，涉及钨粉压制、烧结和热处理等步骤，需要高精度、高温耐受的设备以确保坯体的密度和性能。

中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

5.2.1 压制机

压制机用于将高纯钨粉压制成具有一定形状和强度的坯体，常见设备包括：

冷等静压机：通过高压液体介质（如水或油）对钨粉施加均匀压力（100-300 MPa），制成密度均匀的坯体。冷等静压机采用柔性模具（如橡胶或聚氨酯模具），适合生产大型或复杂形状的坯体。设备需配备高压泵和密封系统，确保压力稳定和安全操作。现代冷等静压机配备自动化装料和卸模系统，提高生产效率。

模压机：通过钢模对钨粉施加单向压力，适用于小批量或简单形状坯体的生产。模压机需采用高强度模具（如硬质合金）以承受钨粉的高硬度。设备通常配备液压或机械驱动系统，可精确控制压制力（50-200 MPa）和压制速度。

压制机需配备粉末装填装置和粘结剂喷涂系统，以确保钨粉的均匀性和坯体的成型强度。此外，压制过程中的粉尘控制至关重要，需配备负压吸尘系统以保护操作环境。

5.2.2 烧结炉

烧结炉用于将压制坯体加热至 2000-2800° C，使钨粉颗粒结合形成高密度坯体。常用烧结炉包括：

真空烧结炉：在真空环境中（ 10^{-3} - 10^{-5} Pa）进行烧结，避免钨坯体氧化。真空烧结炉采用钨或石墨加热元件，温场均匀性高，适合生产高纯度电极。设备配备多级真空泵和冷却系统，可快速达到高真空并控制冷却速率。

氢气烧结炉：在高纯氢气保护下进行烧结，氢气可还原残余氧化物，提高坯体纯度。氢气烧结炉需配备气体循环和净化系统，确保氢气纯度（ $\geq 99.999\%$ ）并防止泄漏。现代烧结炉采用中频感应加热技术，可快速升温并降低能耗。

烧结炉需配备精确的温度控制系统（如红外测温仪）和气氛监控装置，以确保烧结过程的稳定性和坯体质量。近年来，放电等离子烧结炉（SPS）逐渐应用于高性能钨电极生产，通过电脉冲快速加热，缩短烧结时间并细化晶粒。

5.2.3 真空热处理炉

真空热处理炉用于烧结后坯体的热处理和退火，消除内应力和改善组织结构。设备特点包括：

高温真空环境：热处理温度为 1200-1800° C，真空度为 10^{-3} - 10^{-4} Pa，防止坯体氧化。炉体采用钨或钨加热元件，配备水冷系统以保护炉体结构。

精确温控：通过热电偶和 PID 控制器实现 $\pm 5^\circ$ C 的温度精度，确保热处理效果一致。部分先进设备配备多段温控程序，可实现复杂热处理工艺。

惰性气体保护：部分热处理炉支持氩气或氮气保护，适用于特定工艺需求。气体循环系统可提高热效率并减少气体消耗。

真空热处理炉需定期维护加热元件和真空系统，以确保长期稳定运行。智能化热处理炉通过传感器实时监控坯体温度和应力分布，优化热处理参数。

5.3 纯钨电极的压力加工设备

压力加工是将烧结坯体加工成电极棒材的关键步骤，涉及锻造、轧制和拉丝等工艺，需使用高温高强度的加工设备。

5.3.1 锻造机

锻造机用于将烧结坯体在高温（1500–1800° C）下变形，制成棒状或板状坯料。常用设备包括：

液压锻造机：通过液压系统施加高压（1000–5000 kN），使坯体逐步变形。设备需配备高温加热炉和氢气保护系统，防止坯体氧化。液压锻造机适合生产大尺寸坯料，变形精度高。

空气锤：通过气动驱动锤头对坯体进行快速冲击，适用于中小型坯料的锻造。空气锤操作灵活，但需人工控制变形量，适合小批量生产。

锻造机需配备高强度模具和润滑系统，以减少坯体与模具的摩擦。现代锻造机采用自动化控制系统，可实时调整锻造力和温度，提高生产效率。

5.3.2 轧机

轧机用于将锻造坯料进一步加工成细长棒材或线材，常用设备包括：

热轧机：在 1000–1500° C 下通过多道次轧制，将坯料轧制成直径 5–20 mm 的棒材。热轧机采用硬质合金或陶瓷轧辊，以承受钨的高硬度。设备配备加热炉和冷却系统，确保轧制温度和表面质量。

冷轧机：用于精轧，进一步提高棒材的尺寸精度和表面光洁度。冷轧机需配备高精度轧辊和润滑系统，减少加工硬化。

轧机需定期维护轧辊和传动系统，以确保长期运行的稳定性。自动化轧机通过传感器监控轧制力和棒材尺寸，提高加工一致性。

5.3.3 拉丝机

拉丝机用于将轧制棒材拉伸成直径 0.5–6.4 mm 的电极坯料，常用设备包括：

单模拉丝机：通过单一模具逐次拉伸棒材，适合小批量生产。设备需配备硬质合金或金刚石模具，以承受钨的高硬度和摩擦。

连续拉丝机：通过多道模具连续拉伸，提高生产效率。连续拉丝机配备润滑系统（如石墨乳或二硫化钼）和退火装置，减少断丝风险。

拉丝机需精确控制拉伸速度和温度（800–1200° C），以避免裂纹或表面缺陷。现代拉丝机采用伺服电机和 PLC 控制，实现高精度拉伸。

5.4 纯钨电极的表面处理设备

表面处理设备用于提高电极的表面质量和识别度，包括清洗、抛光和涂头标记等步骤。

5.4.1 清洗设备

清洗设备用于去除电极表面的油污、氧化物和杂质，常用设备包括：

超声波清洗机：通过高频超声波振动（20–40 kHz）去除表面微小颗粒，清洗液通常为碱性溶液或纯水。设备需配备多槽清洗系统，支持多级清洗和漂洗。

化学清洗槽：使用稀酸（如稀硝酸）或碱性溶液（如氢氧化钠）去除氧化层。清洗槽需采用耐腐蚀材料（如聚四氟乙烯）制造，配备搅拌和加热装置。

清洗设备需配备废液处理系统，回收含钨废液以符合环保要求。自动化清洗线可实现连续清洗，提高效率。

5.4.2 抛光机

抛光机用于提高电极表面光洁度，常用设备包括：

机械抛光机：通过砂轮或抛光布去除表面划痕，表面粗糙度可达 Ra 0.2–0.4 μm 。设备需配备多级抛光头，支持粗抛和精抛。

电化学抛光机：通过电解作用平滑表面，提高光洁度和耐腐蚀性。电化学抛光机需配备稳定电源和电解液循环系统，确保抛光均匀。

抛光机需定期更换抛光介质和检查电解液成分，以维持抛光质量。自动化抛光设备通过机器人手臂实现精准操作。

5.4.3 涂头设备

涂头设备用于在电极一端涂覆绿色标记，符合 AWS A5.12 和 ISO 6848 标准。常用设备包括：

自动喷涂机：通过喷枪将水性绿色环保漆均匀涂覆在电极端部。设备配备精准定位系统，确保涂层厚度均匀（约 0.1–0.2 mm）。

烘干炉：用于固化涂层，温度控制在 100–150° C，采用热风循环或红外加热。烘干炉需具备快速升温和均匀温场，确保涂层附着。

涂头设备需定期清洁喷嘴和检查涂料质量，以避免涂层缺陷。智能化涂头设备可通过视觉识别系统自动调整喷涂位置。

版权与免责声明

5.5 纯钨电极的检测与质量控制设备

检测与质量控制设备用于确保电极的化学成分、显微组织和物理性能符合标准，涵盖原材料、半成品和成品的检测。

5.5.1 化学成分分析仪

化学成分分析仪用于检测钨粉和电极的纯度及杂质含量，常用设备包括：

电感耦合等离子体光谱仪（ICP-OES）：通过等离子体激发样品，分析元素发射光谱，检测钨及杂质（如铁、镍、氧）的含量，精度可达 ppm 级。设备需配备高纯气体供应和样品前处理系统。

X 射线荧光分析仪（XRF）：通过 X 射线激发样品，分析荧光光谱，适合快速无损检测。XRF 设备便携性强，适用于生产现场的实时分析。

化学成分分析仪需定期校准，确保检测精度。智能化分析仪可自动生成分析报告，提高检测效率。

5.5.2 显微组织分析设备

显微组织分析设备用于检测电极的晶粒尺寸、缺陷和组织均匀性，常用设备包括：

光学显微镜：用于观察电极截面的晶粒结构和显微缺陷，放大倍数为 50-1000 倍。设备需配备图像分析软件，量化晶粒尺寸和缺陷分布。

扫描电子显微镜（SEM）：通过电子束扫描样品，分析表面形貌和微观结构，分辨率可达纳米级。SEM 常配备能谱仪（EDS），用于分析局部化学成分。

显微组织分析设备需定期维护电子束源和真空系统，确保成像质量。先进设备支持三维重构，深入分析电极内部结构。

5.5.3 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、导电性和尺寸公差，常用设备包括：

密度测试仪：通过阿基米德原理测量电极密度，确保达到理论密度（ 19.3 g/cm^3 ）的 95% 以上。设备需配备高精度天平和恒温水槽。

硬度测试仪：采用维氏或布氏硬度计，测量电极硬度（HV 350-450）。设备需配备金刚石压头和高精度载荷系统。

导电性测试仪：通过四探针法测量电极的电阻率，评估导电性能。设备需配备恒流源和微伏计，确保测量精度。

尺寸测量仪：采用激光测距仪或影像测量仪，检测电极直径（ $\pm 0.05 \text{ mm}$ ）和长度公差。设

版权与法律责任声明

备支持非接触测量，适合高精度要求。

物理性能测试设备需定期校准，确保数据可靠性。自动化测试系统可实现多参数同步检测，提高效率。

5.6 纯钨电极的自动化与智能化设备

自动化与智能化设备是纯钨电极生产现代化的重要趋势，通过集成传感器、控制系统和数据分析技术，提高生产效率和质量稳定性。

5.6.1 自动化生产线的应用

自动化生产线将破碎、压制、烧结、加工和表面处理等环节集成，通过机器人、传送带和自动控制系统实现连续生产。关键设备包括：

自动化装料系统：用于钨粉的自动装填和压制，配备机械臂和称重传感器，确保装料均匀性和精度。

连续烧结线：通过传送带将坯体连续送入烧结炉，配备多段温控系统，实现高效烧结。系统支持在线监测坯体温度和气氛。

自动化加工线：集成锻造、轧制和拉丝设备，通过 PLC 控制实现连续加工。系统配备视觉识别装置，检测坯料尺寸和表面缺陷。

自动化生产线通过减少人工干预，降低了操作误差和安全风险，同时提高了生产效率。部分先进生产线支持模块化设计，可根据生产需求灵活调整工艺流程。

5.6.2 智能监控系统

智能监控系统通过传感器、物联网和大数据分析技术，实时监控生产过程的各项参数，提高质量控制和设备维护效率。关键技术包括：

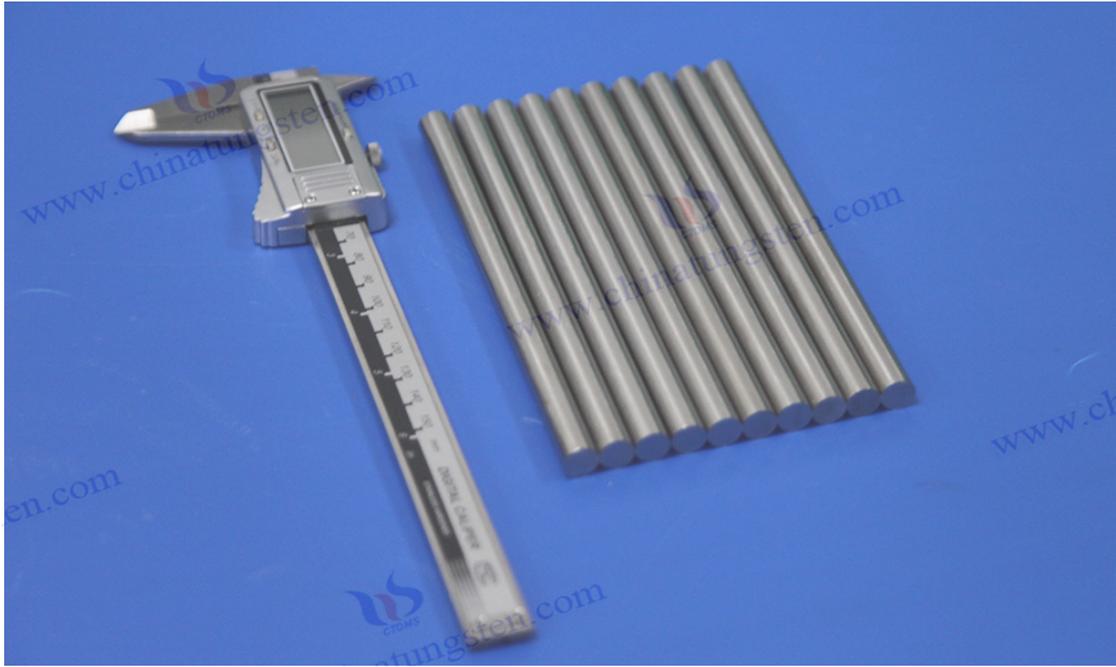
在线监测传感器：包括温度传感器、压力传感器和气体分析仪，实时监测烧结炉温度、拉丝机拉力和保护气氛成分。数据通过物联网传输至中控系统。

故障诊断系统：通过机器学习算法分析设备运行数据，预测潜在故障并提供维护建议。系统可减少设备停机时间，提高生产连续性。

质量追溯系统：记录每批电极的生产参数和检测数据，建立可追溯数据库。系统支持条码或 RFID 技术，方便质量管理和客户查询。

智能监控系统通过数据可视化平台（如 SCADA 系统）为操作者提供实时反馈，支持远程监控和优化决策。未来，随着工业 4.0 技术的发展，智能监控系统将进一步整合人工智能和云计算，实现全流程的智能化管理。

版权与法律责任声明



中钨智造纯钨电极

第六章 纯钨电极的国内外标准

纯钨电极（WP 电极）作为钨极氩弧焊（TIG 焊接）的重要材料，其性能和质量直接影响焊接效果。为确保产品一致性和市场通用性，全球范围内制定了多项标准，涵盖化学成分、尺寸公差、性能要求及测试方法。这些标准由国际组织、国家机构及行业协会制定，形成了较为完善的规范体系。本章将详细探讨纯钨电极的国际标准、中国国家标准、其他国家标准，分析其差异，并展望标准的发展趋势。

6.1 纯钨电极的国际标准

国际标准为纯钨电极的全球贸易和应用提供了统一规范，主要由美国焊接学会（AWS）、国际标准化组织（ISO）及欧洲标准化委员会（CEN）制定。以下重点介绍 AWS A5.12、ISO 6848 和 EN 26848 标准。

6.1.1 AWS A5.12（美国焊接学会标准）

AWS A5.12 是美国焊接学会制定的钨电极标准，全称为《Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting》，最新版本为 AWS A5.12/A5.12M:2009。该标准广泛应用于北美及全球焊接行业，涵盖纯钨电极及其他掺杂电极的分类、化学成分、尺寸及性能要求。

对于纯钨电极（代号 EWP，绿色标记），AWS A5.12 要求钨含量 $\geq 99.5\%$ ，其余为微量杂质（如铁、镍、氧）。电极表面需光滑，无裂纹、气孔或夹杂物，端部涂绿色标记以便识别。标准规定了电极的直径范围（0.5–6.4 mm）和长度（75–610 mm），公差需符合精密制造要求。此外，AWS A5.12 对电极的包装和标识有明确规定，要求标明批号、规格及制造商信息，以确保可追溯性。

版权与免责声明

AWS A5.12 强调电极的焊接性能，建议纯钨电极主要用于交流焊接（AC），特别适合铝、镁及其合金的焊接。标准未明确规定电弧稳定性或电极消耗率的测试方法，但要求制造商提供性能数据以供用户参考。该标准在北美市场具有权威性，许多国际制造商也参照其要求生产纯钨电极。

6.1.2 ISO 6848（国际标准化组织标准）

ISO 6848 是国际标准化组织制定的钨电极标准，全称为《Arc-welding and cutting — Non-consumable tungsten electrodes — Classification》，最新版本为 ISO 6848:2015。该标准适用于全球焊接行业，旨在统一钨电极的分类、标记和性能要求，促进国际贸易和技术交流。

ISO 6848 将纯钨电极分类为 WP（绿色标记），要求钨含量 $\geq 99.5\%$ ，杂质含量需严格控制。标准详细规定了电极的化学成分、尺寸公差及表面质量，要求电极表面无明显缺陷，涂层标记需耐磨且不影响焊接性能。电极直径范围为 0.5–10 mm，长度通常为 50–175 mm，具体尺寸可根据用户需求定制。ISO 6848 还要求电极在包装前进行清洁和干燥，防止污染或氧化。

与 AWS A5.12 类似，ISO 6848 推荐纯钨电极用于交流焊接，因其在铝、镁合金焊接中具有优异的“阴极清洗”作用。标准对电极的性能测试方法有简要描述，如起弧性能和电弧稳定性需在标准焊接条件下评估，但未规定具体测试参数。ISO 6848 的国际化特性使其在欧洲、亚洲及非洲市场广泛应用，是全球钨电极贸易的重要参考标准。

6.1.3 EN 26848（欧洲标准）

EN 26848 是欧洲标准化委员会（CEN）制定的钨电极标准，与 ISO 6848 高度一致，全称为《Welding consumables — Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma welding》。该标准主要在欧盟成员国使用，最新版本与 ISO 6848:2015 同步更新。

EN 26848 对纯钨电极（WP，绿色标记）的化学成分要求与 ISO 6848 相同，钨含量 $\geq 99.5\%$ ，杂质需控制在微量水平。标准对电极的尺寸、表面质量和标记要求与 ISO 6848 一致，强调电极的均匀性和清洁度。EN 26848 还对电极的储存和运输提出建议，要求使用防潮、防震包装以保护电极性能。

在应用方面，EN 26848 推荐纯钨电极用于交流 TIG 焊接和等离子焊接，尤其在欧洲的汽车、航空航天和船舶制造行业中应用广泛。标准未详细规定性能测试方法，但要求制造商提供技术数据表，说明电极的适用场景和操作建议。EN 26848 的实施促进了欧洲焊接行业的标准化，推动了纯钨电极在高精度制造领域的应用。

6.2 纯钨电极的中国国家标准

中国作为全球最大的钨资源国和钨电极生产国，制定了多项国家标准和行业标准，规范纯钨电极的生产和应用。其中，GB/T 4190 是主要标准，相关行业标准补充了具体要求。

中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头 (尖头)

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

6.2.1 GB/T 4190（钨电极标准）

GB/T 4190 是中国国家标准，全称为《非熔化极氩弧焊用钨及钨合金电极》，最新版本为 GB/T 4190-2017。该标准适用于 TIG 焊接和等离子焊接用钨电极，涵盖纯钨电极及其他掺杂电极的分类、化学成分、尺寸及性能要求。

对于纯钨电极（代号 WP），GB/T 4190 要求钨含量 $\geq 99.5\%$ ，杂质（如铁、硅、碳）含量需控制在微量水平，以确保电极的纯度和焊接性能。电极表面需光滑，无裂纹、氧化层或油污，端部涂绿色标记，符合国际惯例。标准规定了电极的直径（0.5-6.0 mm）和长度（50-300 mm），公差需满足精密加工要求。包装要求电极分装于塑料或金属盒中，标明规格、批号和生产日期。

GB/T 4190 推荐纯钨电极用于交流焊接，尤其在铝、镁及其合金的焊接中表现出色。标准对性能测试有简要规定，如电弧稳定性需通过模拟焊接试验评估，电极消耗率需在标准电流下测量。GB/T 4190 还要求制造商提供质量证明书，说明电极的化学成分和性能数据。该标准在中国市场具有强制性，是国内钨电极生产和应用的主要依据。

6.2.2 相关行业标准

除 GB/T 4190 外，中国还制定了多项行业标准，补充了纯钨电极在特定领域的规范。例如：YS/T 626-2018《钨电极》：由有色金属行业制定，详细规定了钨电极的化学成分、尺寸公差和表面质量，适用于航空航天和电子行业。该标准对纯钨电极的杂质含量要求更严格，适合高精度焊接应用。

JB/T 12839-2016《焊接用钨电极技术条件》：由机械工业部制定，侧重于钨电极的焊接性能和测试方法。该标准要求纯钨电极在交流焊接中具有良好的起弧性能和电弧稳定性，适用于船舶制造和压力容器焊接。

QJ 2088-2005《航天用钨电极》：由航天工业部制定，专为航空航天领域的高可靠性焊接制定。标准对纯钨电极的纯度、晶粒结构和尺寸精度要求极高，确保其在极端环境下的性能。

这些行业标准与 GB/T 4190 形成互补，覆盖了从通用制造到高端应用的多种场景，推动了中国钨电极行业的标准化发展。

6.3 纯钨电极的其他国家标准

除国际标准和国家标准外，其他国家也制定了钨电极标准，以满足本地市场需求。以下重点介绍日本的 JIS Z 3233 和德国的 DIN EN ISO 6848 标准。

6.3.1 JIS Z 3233（日本工业标准）

JIS Z 3233 是日本工业标准，全称为《Tungsten Electrodes for Inert Gas Shielded Arc Welding》，最新版本为 JIS Z 3233:2017。该标准适用于 TIG 焊接用钨电极，广泛用于日本的汽车、电子和精密机械行业。

JIS Z 3233 将纯钨电极分类为 WP，要求钨含量 $\geq 99.5\%$ ，杂质含量需严格控制。电极表面需

版权与免责声明

清洁、无缺陷，端部涂绿色标记。标准规定了电极的直径（0.5-6.0 mm）和长度（50-200 mm），公差与 ISO 6848 一致。JIS Z 3233 推荐纯钨电极用于交流焊接，尤其在铝合金和镁合金的焊接中应用广泛。

与国际标准相比，JIS Z 3233 对电极的表面质量要求更高，要求无任何可视缺陷，以满足日本制造业的高精度需求。标准还对电极的包装和储存提出具体要求，如使用防潮包装并存放在干燥环境中。JIS Z 3233 在日本市场具有重要影响力，许多日本焊接设备制造商参照其要求设计产品。

6.3.2 DIN EN ISO 6848（德国标准）

DIN EN ISO 6848 是德国采用的国际标准 ISO 6848 的本地化版本，由德国标准化协会（DIN）发布，内容与 ISO 6848:2015 一致。该标准在德国及中欧地区广泛应用，尤其在汽车、航空航天和重工业领域。

DIN EN ISO 6848 对纯钨电极（WP，绿色标记）的化学成分、尺寸和性能要求与 ISO 6848 相同，强调电极的高纯度和表面质量。标准推荐纯钨电极用于交流 TIG 焊接，适用于铝、镁及其合金的焊接。DIN EN ISO 6848 还要求制造商提供详细的技术文档，包括电极的化学成分分析和焊接性能数据。

德国作为欧洲制造业中心，对焊接材料的质量要求极高。DIN EN ISO 6848 的实施推动了纯钨电极在德国市场的标准化应用，尤其在高端制造领域（如奔驰、宝马汽车生产）中具有重要作用。

6.4 纯钨电极的标准对比与差异

尽管国内外标准在纯钨电极的分类和应用上具有高度一致性，但在化学成分、尺寸公差和性能测试方法等方面存在细微差异。以下从三个方面进行对比分析。

6.4.1 化学成分要求

各标准对纯钨电极的化学成分要求基本一致，钨含量均需 $\geq 99.5\%$ ，但对杂质的控制范围略有不同。例如：

AWS A5.12：对铁、镍、硅等杂质的总量无明确上限，但要求杂质不影响焊接性能。标准更注重电极的实际应用效果。

ISO 6848 和 EN 26848：明确规定杂质（如铁、碳、氧）的单项含量需低于 0.05%，总量 $\leq 0.5\%$ ，以确保电极的高纯度和电弧稳定性。

GB/T 4190：对杂质的控制更严格，铁、硅、碳等单项含量需低于 0.03%，氧含量需低于 0.02%，适合高精度焊接应用。

JIS Z 3233：杂质要求与 ISO 6848 类似，但对氧含量要求更严格（ $\leq 0.015\%$ ），以满足日本电子行业的需求。

版权与免责声明

这些差异反映了各国对焊接场景和行业需求的侧重。ISO 6848 和 GB/T 4190 更注重纯度控制，适合高端制造；AWS A5.12 更灵活，适应多样化应用。

6.4.2 尺寸与公差

各标准对电极的尺寸范围和公差要求较为一致，但具体细节存在差异：

直径范围：AWS A5.12 和 ISO 6848 支持 0.5-10 mm，GB/T 4190 和 JIS Z 3233 限制在 0.5-6.0 mm，反映了不同市场的主流需求。

公差：AWS A5.12 允许直径公差为 ± 0.05 mm（小直径）至 ± 0.13 mm（大直径）；ISO 6848 和 GB/T 4190 要求更严格，统一为 ± 0.05 mm；JIS Z 3233 对小直径电极（ < 2.0 mm）的公差要求为 ± 0.03 mm，体现日本对精密制造的重视。

长度：AWS A5.12 支持最长 610 mm，适合北美市场的大型焊接设备；ISO 6848 和 GB/T 4190 以 50-300 mm 为主，适应通用设备；JIS Z 3233 以 50-200 mm 为主，适合小型精密焊接。

这些差异与各国焊接设备和工艺习惯有关。例如，日本的精密焊接倾向于小直径短电极，而北美的大型工业焊接更常用大直径长电极。

6.4.3 性能测试方法

性能测试方法是标准的另一差异点，各标准对测试的规范程度不同：

AWS A5.12：未明确规定起弧性能、电弧稳定性或电极消耗率的测试方法，仅要求制造商提供性能数据。测试多依赖行业惯例，如在标准电流下进行模拟焊接。

ISO 6848 和 EN 26848：建议在标准焊接条件下测试起弧性能和电弧稳定性，但未提供详细测试参数。电极消耗率测试需在交流焊接中进行，记录单位时间内的长度损失。

GB/T 4190：规定了较为详细的测试方法，如起弧性能需在 50-150 A 电流下测试，电弧稳定性需通过电弧电压波动评估，电极消耗率需在 200 A 交流焊接中测量。

JIS Z 3233：测试方法与 ISO 6848 类似，但要求在低电流（ < 50 A）下测试起弧性能，以满足电子行业的需求。

这些差异反映了各国对焊接性能关注的重点。GB/T 4190 和 JIS Z 3233 的测试要求更严格，适合高精度应用；AWS A5.12 更注重实用性，测试灵活性较高。

6.5 纯钨电极标准的发展趋势

随着全球制造业的转型升级和环保意识的增强，纯钨电极标准正向更高性能、更安全和更环保的方向发展。以下从环保与安全要求和高性能电极标准两个方面展望未来趋势。

6.5.1 环保与安全要求

环保和安全是钨电极标准发展的核心驱动力。传统钍钨电极因含放射性氧化钍（ ThO_2 ）逐渐

被限制，纯钨电极因其无放射性成为环保替代品。未来标准将进一步强化以下要求：

无害化材料：标准将严格限制电极中潜在有害杂质（如铅、镉）的含量，并推广无毒涂层（如水性绿色标记漆）以减少环境污染。

生产过程环保：标准可能引入生产环节的环保要求，如降低能耗、减少废水废气排放和推广废料回收。ISO 6848 和 GB/T 4190 的未来修订可能参考 ISO 14001（环境管理体系）制定相关条款。

安全标识：标准将完善电极的包装和标识规范，要求明确标示无放射性和安全使用指南，方便用户识别和操作。AWS A5.12 已开始要求详细的安全数据表（SDS）。

环保与安全要求的提升将推动纯钨电极在绿色制造中的应用，尤其在欧盟和中国等环保法规严格的地区。

6.5.2 高性能电极标准

随着航空航天、新能源和半导体行业的快速发展，对钨电极的性能要求不断提高。未来标准将聚焦以下方向：

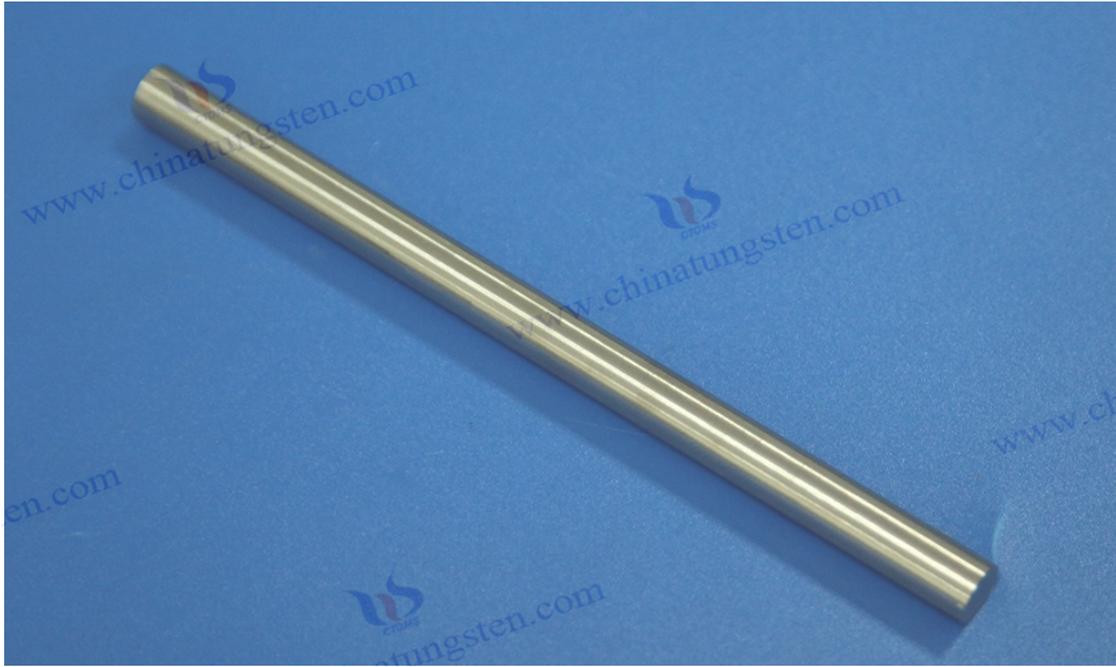
高纯度要求：标准可能将钨含量要求提高至 99.99%，杂质含量进一步降低，以满足半导体和核工业的超高纯度需求。

性能测试规范化：标准将制定更详细的测试方法，如起弧性能需在多电流段（10-300 A）测试，电弧稳定性需通过高频电弧分析仪量化，电极消耗率需在多种焊接条件下评估。

新材料兼容性：标准可能扩展至新型钨基电极（如纳米晶钨电极），规定其化学成分、晶粒结构和性能要求，以适应高性能焊接需求。

智能化应用：标准可能引入与智能焊接设备兼容的要求，如电极的尺寸和表面质量需适配自动化焊接机器人，提高生产效率。

高性能电极标准的制定将推动纯钨电极在高端制造领域的应用，同时促进生产工艺的创新，如超细钨粉制备和快速烧结技术。



中钨智造纯钨电极

第七章 纯钨电极的检测方法与技术

纯钨电极（WP 电极）的质量检测是确保其性能和可靠性的关键环节，涵盖化学成分、物理性能、显微组织、焊接性能以及环境与安全性能的评估。检测方法需结合高精度仪器和标准化流程，以满足国际标准（如 AWS A5.12、ISO 6848）和中国国家标准（如 GB/T 4190）的要求。本章将详细探讨纯钨电极的检测方法与技术，包括化学成分检测、物理性能检测、显微组织分析、焊接性能测试、环境与安全检测，以及检测设备的校准与标准化。

7.1 纯钨电极的化学成分检测

化学成分检测是评估纯钨电极纯度和杂质含量的核心手段，确保钨含量 $\geq 99.5\%$ 且杂质（如铁、镍、氧）在可控范围内。常用方法包括光谱分析、X 射线荧光分析和化学滴定法。

7.1.1 光谱分析（ICP-OES）

电感耦合等离子体光谱分析（ICP-OES, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry）是检测纯钨电极化学成分的高精度方法，广泛用于实验室和生产现场。ICP-OES 通过高温等离子体（约 8000-10,000 $^{\circ}$ C）激发样品原子，产生特定波长的发射光谱，分析钨及杂质元素的含量。

检测过程包括样品制备、溶解、分析和数据处理。首先，将电极样品切割成小块，用酸（如硝酸和氢氟酸混合液）溶解成溶液。溶液注入 ICP-OES 仪器后，被等离子体雾化和激发，发射光谱通过光谱仪分光并由探测器记录。仪器根据标准曲线（基于已知浓度的标准溶液）计算元素浓度，检测限可达 ppb（十亿分之一）级，适合检测微量杂质（如铁、镍、硅、碳）。

ICP-OES 的优点是高灵敏度、多元素同时分析和宽动态范围，适合高纯度钨电极的严格要求。

版权与免责声明

缺点是样品需破坏性溶解，且仪器成本较高。现代 ICP-OES 仪器配备自动化进样系统和数据处理软件，提高了检测效率和准确性。

7.1.2 X 射线荧光分析 (XRF)

X 射线荧光分析 (XRF, X-Ray Fluorescence) 是一种无损检测方法，用于快速分析纯钨电极的化学成分。XRF 通过 X 射线照射样品，激发原子内层电子跃迁，产生特征荧光，分析钨及杂质元素的含量。

检测时，电极样品直接置于 XRF 仪器样品台上，无需复杂前处理。仪器发射高能 X 射线（如 Rh 靶或 W 靶），样品原子发射的荧光由探测器收集并转化为光谱。XRF 可检测从铝 (Al) 到铀 (U) 的多种元素，检测限为 ppm（百万分之一）级，适合生产现场的快速质量控制。

XRF 的优点是无损、快速（几分钟内完成）和操作简便，适合批量检测。缺点是灵敏度低于 ICP-OES，对轻元素（如氧、碳）的检测能力有限。此外，表面污染可能影响结果，需确保样品表面清洁。便携式 XRF 设备近年来广泛应用于现场检测，提高了灵活性。

7.1.3 化学滴定法

化学滴定法是一种传统分析方法，用于测定钨电极中钨的主含量，适合实验室验证或无高精度仪器时的检测。滴定法通过化学反应定量分析钨的含量，通常采用钨酸盐沉淀-滴定法。

检测过程包括样品溶解、钨酸沉淀和滴定分析。首先，将电极样品溶于酸液（如盐酸和硝酸混合液），加入氢氧化钠生成钨酸钠溶液。随后，通过加入酸使钨酸沉淀，过滤并洗涤沉淀后，用标准碱溶液（如 NaOH）滴定，计算钨含量。滴定终点通常通过指示剂（如酚酞）或电位滴定仪确定。

化学滴定法的优点是设备简单、成本低，适合中小型企业。缺点是操作繁琐、耗时长，且只能检测主元素（钨），无法分析微量杂质。此外，人工操作可能引入误差，需严格控制实验条件。现代实验室多以 ICP-OES 或 XRF 为主，化学滴定法作为补充验证方法。

7.2 纯钨电极的物理性能检测

物理性能检测评估纯钨电极的密度、硬度和导电性，确保其机械性能和电学性能符合焊接要求。常用方法包括密度测量、硬度测试和导电性测试。

7.2.1 密度测量

密度是衡量纯钨电极致密度的重要指标，理论密度为 19.3 g/cm^3 ，合格电极的密度通常需达到 95%–98% 理论密度。密度测量常用阿基米德原理，通过测量样品在空气和液体（通常为水或乙醇）中的质量差计算密度。

检测设备包括高精度电子天平（精度 $\pm 0.0001 \text{ g}$ ）和恒温液体槽。样品首先在空气中称重，记录质量 m_1 ；随后浸入液体中称重，记录质量 m_2 。密度计算公式为： $\rho = m_1 / (m_1 - m_2) \times \rho_0$ ，其中 ρ_0 为液体密度。检测需确保样品表面清洁，无气泡附着。

版权与免责声明

密度测量的优点是简单、准确，适合生产现场和实验室。缺点是对样品形状要求较高，不规则样品需额外加工。现代密度测试仪配备自动化测量系统，可快速完成多批次检测，并记录数据以供追溯。

7.2.2 硬度测试

硬度反映纯钨电极的耐磨性和机械强度，常用维氏硬度（HV）或布氏硬度（HB）测试。纯钨电极的硬度通常为 HV 350-450，具体值取决于生产工艺和晶粒结构。

维氏硬度测试使用金刚石四棱锥压头，在样品表面施加一定载荷（通常 5-10 kg），测量压痕对角线长度，计算硬度值。设备包括维氏硬度计和显微镜，需确保样品表面平整抛光。布氏硬度测试使用硬质合金球压头，适合较大样品，但精度略低于维氏法。

硬度测试的优点是直观、可靠，可反映电极的加工质量和耐用性。缺点是测试点局部性强，需多次测量取平均值以代表整体性能。自动化硬度测试仪通过图像分析软件自动测量压痕尺寸，提高了检测效率。

7.2.3 导电性测试

导电性测试评估纯钨电极的电学性能，反映其在焊接中的电流传输能力。纯钨电极的导电性约为 30% IACS（国际退火铜标准）。常用四探针法测量电极的电阻率，进而计算导电性。

四探针法使用四根探针与样品表面接触，外侧两探针通入恒定电流，内侧两探针测量电压。电阻率计算公式为： $\rho = (V/I) \times S/L$ ，其中 V 为电压，I 为电流，S 为样品截面积，L 为探针间距。导电性为电阻率的倒数，换算为 IACS 百分比。

检测设备包括四探针测试仪、恒流源和微伏计，需确保探针接触良好且样品表面清洁。四探针法的优点是精度高、测量范围广，适合高导电材料。缺点是对样品形状和表面质量要求较高。现代导电性测试仪支持自动化数据采集和分析，适合批量检测。

7.3 纯钨电极的显微组织分析

显微组织分析用于评估纯钨电极的晶粒尺寸、缺陷和组织均匀性，反映其生产工艺质量和性能稳定性。常用方法包括光学显微镜观察、扫描电子显微镜（SEM）分析和晶粒尺寸分析。

7.3.1 光学显微镜观察

光学显微镜用于观察电极截面的晶粒结构、气孔和夹杂物，放大倍数为 50-1000 倍。检测过程包括样品制备、观察和记录。首先，将电极样品切割、镶嵌、抛光并用腐蚀剂（如氢氧化钠和铁氰化钾混合液）腐蚀，显露晶粒边界。随后，在光学显微镜下观察，记录晶粒形态、缺陷分布和组织均匀性。

光学显微镜的优点是设备成本低、操作简单，适合快速检测。缺点是分辨率有限（约 0.2 μ m），难以观察纳米级缺陷。现代光学显微镜配备图像分析软件，可自动识别晶粒边界并生成组织报告。

7.3.2 扫描电子显微镜（SEM）

扫描电子显微镜（SEM）通过电子束扫描样品表面，生成高分辨率图像（分辨率可达纳米级），用于分析电极的微观形貌、断口特征和缺陷。SEM 常配备能谱仪（EDS），可进行局部化学成分分析。

检测时，样品需切割、抛光并涂导电层（如金或碳），以增强导电性。SEM 通过电子束与样品的相互作用产生二次电子、背散射电子等信号，生成表面形貌或成分分布图像。SEM 可检测电极表面的微裂纹、气孔及杂质分布，评估生产工艺的缺陷控制能力。

SEM 的优点是分辨率高、成像清晰，可深入分析微观结构。缺点是设备昂贵、样品制备复杂，且需在高真空环境下操作。现代 SEM 支持三维重构和自动化扫描，提高了分析效率。

7.3.3 晶粒尺寸分析

晶粒尺寸是影响电极机械性能和焊接性能的重要参数，细小均匀的晶粒可提高强度和韧性。晶粒尺寸分析通常结合光学显微镜或 SEM 进行，通过图像分析软件测量晶粒平均尺寸。

检测方法包括线性截距法和面积法。线性截距法通过在显微图像上绘制随机直线，统计晶粒边界交点数，计算平均晶粒尺寸。面积法通过测量每个晶粒的面积，统计尺寸分布。标准如 ASTM E112 提供了晶粒尺寸评级的规范，纯钨电极的晶粒尺寸通常为 10-50 μm 。

晶粒尺寸分析的优点是量化、直观，可直接反映烧结和热处理工艺的质量。缺点是需大量统计数据以确保代表性。自动化图像分析软件可快速处理显微图像，提高分析效率和准确性。

7.4 纯钨电极的焊接性能测试

焊接性能测试评估纯钨电极在实际焊接中的表现，包括起弧性能、电弧稳定性和电极消耗率。这些测试需在标准焊接条件下进行，模拟实际应用场景。

7.4.1 起弧性能测试

起弧性能反映电极引发电弧的难易程度，纯钨电极因高电子逸出功（约 4.52 eV）在直流焊接（DC）中起弧较困难，但在交流焊接（AC）中表现较好。测试方法包括：

标准焊接试验：使用 TIG 焊接设备，在标准电流（50-150 A）、氩气保护（8-15 L/min）和铝合金基材上测试。记录起弧所需电压和时间，起弧电压越低、时间越短，性能越优。

高频引弧测试：通过高频引弧装置辅助起弧，评估电极在不同电流下的响应速度。测试需重复多次，取平均值以减少误差。

检测设备包括 TIG 焊机、电压表和计时器，需确保电极端部打磨成半球形（交流焊接）或锥形（直流焊接）。起弧性能测试的优点是直观、贴近实际应用，缺点是结果受设备和操作者影响较大。自动化测试系统可通过传感器记录起弧参数，提高数据可靠性。

7.4.2 电弧稳定性测试

电弧稳定性反映电弧在焊接过程中的连续性和均匀性，直接影响焊缝质量。纯钨电极在交流

焊接中电弧稳定性较好，但在直流焊接中易出现漂移。测试方法包括：

电压波动分析：在标准焊接条件下（100-200 A，氩气保护），记录电弧电压的波动幅度。电压波动越小，电弧越稳定。测试设备包括示波器和电压传感器。

视觉观察：通过高速摄像机记录电弧形态，分析电弧的长度、形状和漂移情况。稳定电弧应呈锥形，无明显跳跃或中断。

焊缝质量评估：通过焊接试验板，检查焊缝的均匀性、熔深和表面缺陷。稳定的电弧产生光滑、无气孔的焊缝。

电弧稳定性测试需控制基材、电流和气体流量等参数，确保结果可比性。现代测试系统通过人工智能分析电弧图像和电压数据，提供量化评估。

7.4.3 电极消耗率测试

电极消耗率反映电极在焊接中的损耗速度，纯钨电极因高电子逸出功消耗率较高，尤其在高电流（>200 A）下。测试方法包括：

长度损失测量：在标准焊接条件（200 A，交流焊接，30 分钟）下，测量电极长度减少量。消耗率以 mm/h 表示，典型值为 0.1-0.5 mm/h。

质量损失测量：通过高精度天平测量焊接前后电极的质量差，计算单位时间的质量损失。质量损失法更精确，适合实验室检测。

端部形态分析：通过显微镜观察焊接后电极端部的形貌变化，评估烧损和挥发程度。稳定的端部形态（如半球形）表示消耗率较低。

电极消耗率测试需控制焊接时间、电流和电极端部角度，以确保结果一致。自动化测试系统可实时记录电极长度和质量变化，提高检测效率。

7.5 纯钨电极的环境与安全检测

环境与安全检测评估纯钨电极生产和使用过程中的环保性和安全性，重点包括放射性检测和粉尘与废气排放检测。

7.5.1 放射性检测（针对钍钨电极的对比）

纯钨电极无放射性，是其相较于钍钨电极（含氧化钍， ThO_2 ）的显著优势。放射性检测用于验证纯钨电极的安全性，并与钍钨电极进行对比。检测方法包括：

伽马射线检测：使用盖革计数器或闪烁探测器测量电极的放射性水平，记录伽马射线剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）。纯钨电极的剂量率应接近背景辐射水平（约 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ），而钍钨电极可能达 $1-10 \mu\text{Sv/h}$ 。

放射性核素分析：通过高纯锗探测器（HPGe）分析电极中的放射性核素（如 Th-232、U-238），确保无放射性杂质。检测需在屏蔽室中进行，以降低背景干扰。

放射性检测的优点是快速、可靠，可确保电极符合安全标准（如 ISO 6848）。缺点是设备昂贵，需专业操作。纯钨电极的无放射性特性使其在环保和安全要求高的场景中更具优势。

7.5.2 粉尘与废气排放检测

纯钨电极生产中的研磨、抛光和烧结过程可能产生钨粉尘和废气（如氧化钨蒸汽），需检测排放水平以符合环保法规。检测方法包括：

粉尘浓度检测：使用激光粉尘仪或重量法测量生产车间的粉尘浓度，确保低于职业暴露限值（如中国标准为 4 mg/m^3 ）。采样点需覆盖研磨和抛光区域。

废气分析：通过气体分析仪（如红外光谱仪）检测烧结炉排放的废气成分，分析氧化钨、氮氧化物和挥发性有机物（VOC）的浓度。废气需经除尘和吸附处理后排放。

废水检测：通过 ICP-OES 或分光光度法分析清洗和提纯工序的废水中钨和其他重金属的含量，确保符合排放标准（如中国 GB 25466-2010）。

粉尘与废气检测需定期进行，并配备在线监测系统以实时记录排放数据。现代环保设备（如高效过滤器和湿式洗涤塔）可显著降低排放，满足绿色制造要求。

7.6 纯钨电极检测设备的校准与标准化

检测设备的校准和标准化是确保检测结果准确性和可比性的关键，直接影响质量控制的可靠性。

7.6.1 设备校准方法

检测设备的校准需定期进行，遵循国际或国家标准（如 ISO/IEC 17025）。常见校准方法包括：

ICP-OES 校准：使用多元素标准溶液（含已知浓度的钨、铁、镍等）绘制标准曲线，校准仪器灵敏度和线性范围。校准需每周进行，并记录校准因子。

XRF 校准：使用标准样品（如高纯钨块）校准荧光强度与元素浓度的关系。校准需每月进行，确保检测一致性。

硬度计校准：使用标准硬度块（如 HV 400）校准压痕尺寸和载荷，误差控制在 $\pm 2\%$ 。校准需每季度进行。

显微镜校准：使用标准刻度尺校准放大倍数和图像分辨率，误差控制在 $\pm 1\%$ 。校准需每年进行。

版权与免责声明

校准需由专业人员操作，并记录校准日期、参数和结果。自动化校准系统可通过软件控制标准样品的进样和数据分析，提高校准效率。

7.6.2 国际检测标准

纯钨电极的检测需遵循国际标准，确保结果的全球可比性。相关标准包括：

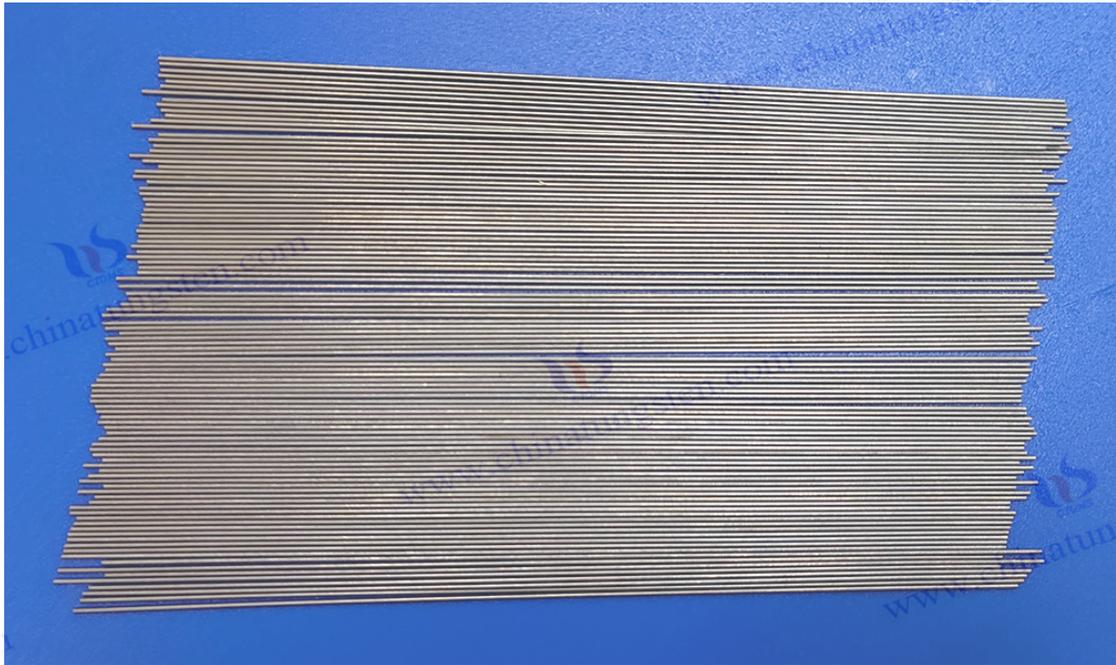
ISO 6848:2015：规定了钨电极的化学成分和性能测试要求，建议使用 ICP-OES 或 XRF 检测成分，显微镜分析组织。

AWS A5.12:2009：要求检测电极的化学成分和表面质量，推荐无损方法（如 XRF）进行快速分析。

ASTM E112：提供了晶粒尺寸测量的标准方法，适用于显微组织分析。

ISO 14001：为粉尘和废气检测提供环境管理指南，强调排放控制和监测。

这些标准为检测方法的规范化提供了依据。未来，国际检测标准可能进一步整合人工智能和大数据技术，制定更精准的测试规范。



中钨智造纯钨电极

中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

第八章 纯钨电极的优缺点分析

纯钨电极（WP 电极）作为钨极氩弧焊（TIG 焊接）的传统材料，因其独特的物理化学性能在焊接行业中占据重要地位。然而，其应用范围和性能受到一定限制，尤其在与掺杂钨电极（如钨钨、钨钨电极）的对比中显现出优劣势。本章将系统分析纯钨电极的优点和缺点，并探讨其改进方向，以期为生产和应用提供指导。

8.1 纯钨电极的优点

纯钨电极以其成本优势、高温稳定性和适合交流焊接的特性，在特定场景中具有不可替代的价值。以下从三个方面详细阐述其优点。

8.1.1 成本低廉

纯钨电极的主要优势之一是其生产成本相对低廉，使其成为经济性要求较高的焊接应用的理想选择。纯钨电极以高纯度钨（ $\geq 99.5\%$ ）为原料，不掺杂稀土氧化物（如氧化铈、氧化镧或氧化钪），避免了昂贵添加剂的使用和复杂配方的生产工艺。钨作为全球储量丰富的稀有金属（中国占全球储量约 50%），其原材料供应链稳定，价格波动较小。此外，纯钨电极的生产工艺（如粉末冶金、压力加工）已高度成熟，设备通用性强，规模化生产进一步降低了成本。

与掺杂电极相比，纯钨电极的生产无需额外的稀土提纯和掺杂工序，显著减少了能耗和人工成本。例如，钨钨电极需精确控制氧化铈的均匀分布，增加了烧结和质量控制的复杂性，而纯钨电极的生产流程更为简洁。成本优势使纯钨电极在建筑、船舶制造和通用机械加工等对成本敏感的行业广泛应用。此外，纯钨电极的无放射性特性避免了特殊储存和废弃处理的要求，进一步降低了使用成本，符合绿色制造的趋势。

在实际应用中，纯钨电极的低成本使其适合大批量焊接任务，如铝制幕墙、汽车零部件和压力容器的焊接。尽管其性能在某些方面不如掺杂电极，但对于质量要求适中的交流焊接场景，纯钨电极提供了高性价比的选择。

8.1.2 高温稳定性

纯钨电极因其极高的熔点（ 3422°C ）和优异的高温稳定性，能够在苛刻的焊接环境中保持结构完整性和性能稳定。钨是所有金属中熔点最高的材料，使纯钨电极能够在电弧高温（约 $6000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ ）下耐受热冲击，减少熔化、烧损或形变的风险。这一特性确保电极在高电流（ $100\text{--}300\text{ A}$ ）或长时间连续焊接中仍能维持稳定的端部形态，延长使用寿命。

在交流焊接中，纯钨电极通常形成半球状端部，这种形态有助于均匀分布电弧能量，减少局部过热，提高焊接质量。其低蒸汽压（ 3000°C 时接近 0 Pa ）进一步降低了高温下的材料挥发，保持了电极的尺寸稳定性和电弧一致性。此外，纯钨电极的优异导热性（约 $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）使其能够快速散发电弧热量，防止过热引起的端部软化或裂纹。

高温稳定性使纯钨电极在焊接轻金属（如铝、镁）及其合金时表现出色，尤其在航空航天、汽车制造和电子行业中。铝合金的高导热性和氧化膜特性要求电极在高温下保持稳定，纯钨电极的性能能够满足这些需求。此外，其化学稳定性使其在惰性气体（如氩气或氦气）保护

版权与免责声明

下不易与环境反应，确保焊缝的纯净性。

8.1.3 适合交流焊接

纯钨电极在交流焊接（AC）中的优异性能是其最重要的应用优势，尤其适合焊接铝、镁及其合金等具有氧化膜的轻金属。交流焊接通过交变电流的正负半周期交替作用，实现电弧的动态平衡。纯钨电极在正半周期（电极为阴极）时发射电子，产生高温电弧；在负半周期（工件为阴极）时，电弧对工件表面的氧化膜（如 Al_2O_3 ，熔点约 $2050^{\circ}C$ ）产生“阴极清洗”作用，有效去除氧化层，形成清洁的焊缝。

纯钨电极在交流焊接中能够形成稳定的半球状端部，这种形态优化了电弧的分布和能量传递，减少了电弧漂移或中断的风险。其高熔点和导热性确保电极在交变电流的热循环中保持稳定，适合高频率或高电流的焊接条件。此外，纯钨电极的无放射性特性使其在对安全性要求较高的行业（如食品加工设备、医疗器械制造）中更具优势，相比钍钨电极（含放射性氧化钍）更符合环保法规。

纯钨电极的交流焊接应用涵盖建筑、船舶、航空航天和汽车行业。例如，在铝制船舶结构的焊接中，纯钨电极能够提供光滑、无缺陷的焊缝，满足耐腐蚀和强度要求。在航空航天领域，铝合金和镁合金的精密焊接依赖纯钨电极的稳定电弧，确保部件的高可靠性。总之，纯钨电极在交流焊接中的专长使其成为轻金属焊接的首选材料。

8.2 纯钨电极的缺点

尽管纯钨电极具有显著优势，但其性能局限性限制了其在某些焊接场景中的应用，尤其在直流焊接和高温高负荷条件下。以下从三个方面分析其缺点。

8.2.1 直流焊接性能较差

纯钨电极在直流焊接（DC）中的性能较差，主要因其高电子逸出功（约 4.52 eV ）导致起弧困难和电弧不稳定。在直流正接（DCSP）中，电极作为阴极需要发射大量电子，高电子逸出功要求更高的起弧电压，容易出现不起弧或电弧跳跃的现象。在直流反接（DCRP）中，电极作为阳极承受更高的热负荷，可能导致过热、烧损或端部变形。

相比之下，掺杂稀土氧化物的电极（如铈钨电极，电子逸出功约 $2.7\text{--}3.0\text{ eV}$ ；镧钨电极，约 $2.8\text{--}3.2\text{ eV}$ ）在直流焊接中具有更低的起弧电压和更稳定的电弧，广泛用于不锈钢、碳钢和镍合金的焊接。纯钨电极在直流焊接中的局限性使其应用主要局限于低要求场景，如临时修补或低电流焊接，而高精度或高效率的直流焊接多采用掺杂电极。

为缓解这一缺点，可通过高频引弧装置或优化电极端部角度（如尖锥形）改善起弧性能，但效果有限。此外，直流焊接中的电弧不稳定性可能导致焊缝不均匀或缺陷增多，限制了纯钨电极在高性能焊接中的竞争力。

8.2.2 电极消耗率较高

纯钨电极的电极消耗率较高，尤其在高电流（ $>200\text{ A}$ ）或长时间连续焊接中，因其高电子逸出功导致端部温度较高，加速了材料的挥发和烧损。消耗表现为电极长度的逐渐缩短和端部

版权与免责声明

形态的变化，如从半球形变为不规则形状，影响电弧的稳定性和焊缝质量。

在交流焊接中，半球状端部的形成可部分减缓消耗，但在高频率或不稳定的电流条件下，消耗率仍较高。在直流焊接中，消耗率更为显著，尤其在直流正接（DCSP）中，电极的高温运行导致材料快速损失。相比之下，掺杂电极（如钨钨电极）因较低电子逸出功和更稳定的端部形态，消耗率通常低于纯钨电极。

高消耗率增加了电极更换频率和操作成本，尤其在自动化焊接中可能导致生产中断。为延长电极寿命，需定期打磨端部以维持适当形态，并优化焊接参数（如降低电流、增加气体保护）。然而，频繁打磨增加了人工和时间成本，限制了纯钨电极在高负荷焊接中的应用。

8.2.3 起弧困难与电弧不稳定

起弧困难和电弧不稳定是纯钨电极的主要缺点，与其高电子逸出功密切相关。在直流焊接中，高起弧电压和不稳定的电子发射导致电弧难以引发或维持，尤其在低电流（ $<50\text{ A}$ ）或高频率条件下更为明显。在交流焊接中，交变电流的正负半周期交替作用可部分缓解起弧困难，但仍需较高的起弧电压。

电弧不稳定性表现为电弧漂移、跳跃或中断，影响焊缝的均匀性和质量。表面污染（如氧化物、油污）或不当的端部形态（如过度磨损）会进一步加剧不稳定性，需定期清洁和打磨电极。此外，纯钨电极对焊接设备的要求较高，如需配备高频引弧装置或稳定的电源以改善起弧性能。

与掺杂电极相比，纯钨电极的电弧稳定性较差，尤其在直流焊接中。钨钨和钨钨电极通过稀土氧化物的掺杂降低了电子逸出功，显著改善了起弧性能和电弧稳定性，适合多种焊接场景。纯钨电极的这一缺点使其在高精度和高效焊接中的应用受限，需通过工艺优化或设备改进来弥补。

8.3 纯钨电极的改进方向

为克服纯钨电极的缺点并提升其竞争力，研究人员和企业正从工艺优化、合金化研究和新型电极材料开发三个方向探索改进路径。这些改进旨在提高电极的焊接性能、降低消耗率并拓宽应用范围。

8.3.1 工艺优化

工艺优化是提升纯钨电极性能的直接途径，重点包括生产工艺改进和焊接参数优化。在生产方面，可通过以下措施提高电极质量：

高纯度控制：采用离子交换、溶剂萃取等先进提纯技术，将钨粉纯度提高至 99.99%，减少杂质对起弧性能和电弧稳定性的影响。优化还原和烧结工艺，降低氧含量（如 $\leq 0.01\%$ ），提高电极的导电性和耐高温性。

晶粒细化：通过快速烧结技术（如放电等离子烧结，SPS）或添加微量抑制剂（如氧化铝）控制晶粒生长，获得细小均匀的晶粒结构（ $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ ）。细化晶粒可提高电极的硬度和韧性，

降低高温下的消耗率。

表面质量提升：改进抛光和清洗工艺，降低表面粗糙度，减少表面缺陷对电弧稳定性的干扰。采用自动化抛光设备确保表面一致性，提高电极的焊接性能。

在焊接应用方面，可通过优化参数和设备改善纯钨电极的性能。例如，调整电流波形（如方波交流）以降低起弧电压，增加氩气或氦气混合保护气体的流量（10-20 L/min）以增强电弧稳定性。此外，高频引弧装置和先进的 TIG 焊机可显著改善起弧困难问题，适合直流焊接场景。

工艺优化的优点是成本较低、技术成熟，可在现有生产基础上快速实施。缺点是改进幅度有限，难以完全克服高电子逸出功的根本限制。

8.3.2 合金化研究

合金化研究通过在纯钨基体中添加微量元素，改善其电学和机械性能，同时保留成本优势和无放射性特性。合金化目标是降低电子逸出功、提高电弧稳定性和减少消耗率，常见研究方向包括：

微量稀土掺杂：在纯钨中添加低含量（<0.5%）的稀土氧化物（如氧化镧、氧化铈），以降低电子逸出功（至 4.0-4.2 eV），改善起弧性能和电弧稳定性。微量掺杂可保留纯钨的成本优势，同时提升直流焊接性能。

非稀土元素掺杂：探索添加氧化锆（ ZrO_2 ）或氧化钇（ Y_2O_3 ）等非稀土氧化物，增强电极的高温强度和抗蠕变性，降低消耗率。这些元素无放射性，符合环保要求。

复合掺杂：结合多种氧化物（如氧化镧+氧化锆）进行复合掺杂，优化电极的综合性能。复合掺杂可平衡起弧性能、电弧稳定性和耐用性，适合高负荷焊接。

合金化研究需精确控制掺杂元素的分布和含量，避免不均匀掺杂导致的性能波动。现代生产技术（如等离子体掺杂、化学气相沉积）可实现高均匀性掺杂，提高电极质量。然而，合金化可能增加生产成本和工艺复杂性，需在性能提升与经济性之间权衡。

8.3.3 新型电极材料的开发

新型电极材料的开发旨在从根本上克服纯钨电极的局限性，探索具有更低电子逸出功、更高耐用性和更广适用性的材料。研究方向包括：

纳米晶钨电极：利用纳米钨粉（粒径<100 nm）制备电极，通过超细晶粒结构提高硬度、韧性和电弧稳定性。纳米晶钨电极的电子逸出功略低于传统钨电极，起弧性能有所改善。快速烧结技术（如 SPS）是实现纳米晶电极的关键。

钨基复合材料：开发钨与高导电材料（如铜、石墨烯）的复合电极，结合钨的高熔点和复合材料的优异导电性（>50% IACS），显著降低起弧电压和电极消耗率。复合材料需解决界面结合和高温稳定性的挑战。

版权与免责声明

新型无放射性电极：探索钨以外的替代材料，如钼基或钨基合金，作为低电子逸出功的非熔化电极。这些材料需具备高熔点（ $>2000^{\circ}\text{C}$ ）和化学稳定性，同时保持低成本和环保性。

新型材料开发的优点是潜力巨大，可显著提升电极性能并拓宽应用领域，如半导体制造、核聚变设备和超高强度材料的焊接。缺点是研发周期长、成本高，且新材料的推广需经过严格的行业认证和市场验证。未来，新型电极材料的开发将推动焊接技术的革新，需结合产学研合作加速技术落地。



中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头 (尖头)

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

第九章 纯钨电极的市场与发展趋势

纯钨电极（WP 电极）作为钨极氩弧焊（TIG 焊接）的重要耗材，在全球焊接行业中占据重要地位。其市场发展受到原材料供应、生产技术、环保要求及国际竞争等多重因素的影响。本章将分析纯钨电极的全球市场概况、中国市场现状、技术发展趋势及面临的挑战，为行业从业者和研究者提供全面参考。

9.1 纯钨电极全球市场概况

纯钨电极的全球市场与焊接行业的发展密切相关，广泛应用于航空航天、汽车制造、船舶建造及建筑等领域。以下从主要生产国家和市场规模与需求两个方面探讨全球市场现状。

9.1.1 主要生产国家

全球纯钨电极生产集中在钨资源丰富的国家和技术先进的工业强国，主要包括中国、美国、德国、日本和俄罗斯。

中国：作为全球最大的钨资源国（占全球储量约 50%），中国在纯钨电极生产中占据主导地位。湖南、江西和河南等地拥有丰富的钨矿资源，形成了从钨矿开采到电极生产的完整产业链。

美国：美国是纯钨电极的重要生产国，拥有先进的生产技术和严格的质量标准。企业专注于高性能钨电极，产品广泛应用于航空航天和核工业。美国市场以高端应用为主，注重无放射性电极（如纯钨和铈钨电极）的推广。

德国：德国以其精密制造闻名，生产的高品质纯钨电极主要服务于汽车、航空航天和机械制造行业。企业采用先进粉末冶金和表面处理技术，产品符合 DIN EN ISO 6848 标准，出口至欧洲及全球市场。

日本：日本的纯钨电极生产以高精度和小型化为主，满足电子、汽车和精密机械行业的需求。企业注重电极的表面质量和焊接性能，产品符合 JIS Z 3233 标准。日本市场对小直径电极（0.5-2.0 mm）需求较大。

俄罗斯：俄罗斯拥有丰富的钨矿资源，生产成本较低，其纯钨电极主要供应国内及东欧市场。企业如在低成本电极生产中具有优势，但技术水平和品牌影响力相对较弱。

这些国家形成了全球纯钨电极市场的竞争格局，中国以产量和成本优势领先，美国、德国和日本以技术和服务占据高端市场，俄罗斯则以资源优势补充低端市场。

9.1.2 市场规模与需求

全球纯钨电极市场规模与焊接行业的增长同步，受到制造业、基础设施建设和新能源产业的推动。根据行业数据，2024 年全球钨电极市场规模约为 15 亿美元，其中纯钨电极约占 30%-35%，即 4.5-5.25 亿美元。预计到 2030 年，市场规模将以年均复合增长率（CAGR）3%-5% 增长，达到 6-7 亿美元，主要驱动因素包括：

版权与免责声明

航空航天需求：航空航天领域对铝合金和镁合金的精密焊接需求增加，推动纯钨电极在交流焊接中的应用。例如，波音和空客的飞机制造需要高可靠性焊缝，纯钨电极是关键耗材。

汽车工业发展：全球汽车行业向轻量化转型，铝合金和不锈钢的焊接需求增长。纯钨电极在汽车零部件（如车身、电池外壳）生产中应用广泛，尤其在新能源汽车领域。

基础设施建设：亚洲、非洲和拉美地区的基础设施建设（如高铁、桥梁、建筑）带动了铝制结构件的焊接需求，纯钨电极因其成本优势受到青睐。

新能源行业：太阳能电池和风电设备制造涉及薄膜沉积和金属连接，纯钨电极作为溅射靶材和焊接材料的需求稳步增长。

地区分布上，亚太地区（以中国、印度和东南亚为主）占全球市场份额约 50%，得益于制造业的快速发展和低成本生产优势。北美和欧洲各占 20%-25%，以高端应用为主。中东和非洲市场份额较小（约 5%），但随着工业化进程加快，需求潜力逐渐显现。

9.2 纯钨电极中国市场分析

中国是全球最大的纯钨电极生产国和消费国，其市场发展受到国内钨资源优势、制造业升级和环保政策的综合影响。以下从生产能力和市场需求与应用领域两个方面分析中国市场。

9.2.1 国内生产能力

中国纯钨电极生产能力位居全球首位，依托丰富的钨矿资源和完善的产业链。2024 年，中国钨电极年产能约为 2.5 万吨，其中纯钨电极占约 40%，即 1 万吨。湖南株洲、江西赣州和河南洛阳是主要生产基地，形成了从钨矿开采、钨粉制备到电极加工的完整产业链。

中国生产能力的优势在于成本低、规模大和供应链稳定。近年来，国内企业通过引进先进设备（如德国的真空烧结炉、日本的自动化拉丝机）提升了生产效率和产品质量。同时，部分企业加大研发投入，开发超细钨粉和纳米晶电极，逐步缩小与欧美国家的技术差距。

然而，中国生产能力也面临环保压力和产能过剩问题。钨矿开采和提纯涉及高能耗和废水排放，需符合《环境保护法》和《国家危险废物名录》的要求。产能过剩导致低端市场竞争激烈，价格战压缩了利润空间，促使企业向高端市场转型。

9.2.2 中电市场需与应求电领域

中国纯电市场需电求约为 1.2 万吨，占国内电电市场约 60% 的市场份，市场主电包括：

建筑与基础设施：高铁、桥梁和幕墙建设推动铝合金焊接需求增长，纯电电以其成本优势在建筑领域应用广泛。例如，京雄城际铁路和深圳湾超高层建筑的铝结构件焊接依赖纯钨电极。

汽车制造：新能源汽车的电池外壳、车身和铝合金零部件需高精度焊接，纯钨电极在交流焊接中占据重要地位。2024 年，中国新能源汽车产量超过 800 万辆，带动了电极需求增长。

版权与法律责任声明

航空航天：中国商飞（如 C919 飞机）和航天项目（如长征系列火箭）对铝合金和镁合金的焊接要求严格，纯钨电极因其无放射性和稳定性能受到青睐。

船舶与海洋工程：沿海地区的船舶制造和海洋平台建设涉及大量铝合金焊接，纯钨电极在这些场景中需求稳定。

电子与新能源：太阳能电池和半导体制造中，纯钨电极作为溅射靶材和焊接材料的应用逐渐增加。

中国市场的特点是需求多样化，既有低成本的通用焊接需求，也有高性能的精密焊接需求。未来，随着制造业升级和“一带一路”倡议的推进，中国纯钨电极市场预计以 3%-4% 的年均增长率持续扩张，尤其在高端应用领域。

9.3 纯电电极技术发展趋势

纯电电极的技术发展受高效生电、环保要求和新材料研电的驱动，旨在提升性能、降低成本并满足法规要求。以下从三个方面探讨技术趋势。

9.3.1 高效电生产电技术

高效生产技术旨在缩短生产周期、降低能耗并提高产品质量，主要技术包括：

连续化生产：开发连续烧结炉和自动化拉丝设备，实现从压制到加工的连续生产，缩短生产周期 20%-30%。例如，中频感应连续烧结炉可快速升温并提高坯体均匀性。

智能制造：通过工业物联网（IIoT）和传感器监控生产参数，优化设备运行效率。智能生产设备线设备可实时检测坯体密度和尺寸偏差，减少废品率。

快速烧结技术：放电等离子烧结（SPS）通过电脉冲快速加热，缩短烧结时间至分钟级，细化晶粒（ $<10 \mu\text{m}$ ），提高电极强度和耐用性。SPS 已在高端电极生产中试点应用。

这些技术的应用将推动生产效率提升，降低单位成本，增强市场竞争力。然而，高设备投资和维护成本可能限制其在中小企业的推广。

9.3.2 环保生产工序

环保工艺是应对法规压力和绿色制造需求的重点，关键技术包括：

低能耗提纯：采用离子交换和膜分离技术替代传统湿法冶金，减少废水和废气排放。新型提纯设备可回收 90% 以上的含钨废液，降低环境污染。

废料循环利用：建立钨废料回收体系，通过高温焙烧和电解还原回收钨粉末，减少资源浪费。中国部分企业已开发了废料回收率达 80% 的工艺。

无毒工艺替代：推广水性清洗剂和无毒绿色涂料（如丙烯酸基漆），取代传统有机溶剂和含

版权与法律责任声明

铅涂料，符合欧盟 REACH 法规和中国的 RoHS 标准。

可再生能源驱动：利用太阳能或风电为烧结和热加工设备供电，降低碳足迹。试点项目显示，可再生能源可减少 30% 的生产能耗。

环保工艺的推广需平衡成本与合规性，但随着环保法规的趋严和消费者绿色意识的增强，其市场接受度逐渐提高。

9.3.3 新型钨电极的研发

新型钨电极的研发旨在克服纯钨电极的性能限制，满足高性能焊接需求，主要方向包括：

纳米晶钨电极：利用纳米钨粉制备电极，通过超细晶粒 (<50 nm) 提高硬度和电弧稳定性。纳米电极的起弧性能和消耗率优于传统电极，适合航空航天和半导体行业。

微合金化电极：在纯钨中添加微量氧化（如氧化锆、氧化钇），降低电子逸出功（至 4.0-4.2 eV），改善直流焊接性能。微合金化电极保留了纯钨的成本优势和无放射性特性。

钨基复合电极：开发钨与石墨烯或碳纳米管的复合材料，结合高熔点和优异导电性 (>40% IACS)，显著提高起弧性和耐用性。复合电极需解决高温下的界面稳定性问题。

新型电极的研发需结合市场需求和生产可行性，例如，纳米电极的生产成本需进一步降低以实现规模化应用。未来，产学研合作和国际技术交流将加速新型电极的产业化进程。

9.4 纯电电极面电的挑战

纯电电极市场虽发展迅速，但面临多重挑战，包括原材料价格波动、环保法规压力和技术竞争。

9.4.1 原材料价格波动

钨作为稀有金属，其价格受全球供需、地缘政治和矿产政策影响。2024 年，钨精矿价格波动在每吨 12-15 万元人民币之间，影响了纯钨电极的生产成本。价格上涨的主要原因包括：

资源限制：中国对钨矿开采实施配额管理，限制了供应增长。

出口需求：欧美对无放射性电极的需求增加，推高了钨的国际价格。

地缘风险：俄乌冲突等地缘政治事件可能扰乱俄罗斯的钨供应。

价格波动增加了生产成本的不确定性，尤其对中小型企业影响较大。应对策略包括与供应商签订长期合同、开发钨废料回收技术及探索替代材料，但短期内原材料价格波动仍将是主要风险。

9.4.2 环保法规压力

钨电极生产涉及高能耗和污染排放，需符合日益严格的环保法规，例如中国的《环境保护法》和欧盟的《废物框架指令》。挑战包括：

版权与法律责任声明

废水处理：钨提纯和清洗产生的含钨废水需处理至重金属含量低于 0.01 mg/L，增加了处理成本。

废气控制：烧结和研磨产生的粉尘和氧化钨气体需通过高效过滤和吸附处理，设备投资较高。

能耗限制：中国“双碳”目标（碳达峰、碳中和）要求企业降低单位能耗，传统高耗能工艺面临淘汰风险。

环保法规的合规成本可能挤占研发资金，影响技术创新。企业需通过绿色工艺和可再生能源应用降低合规成本，同时争取政府补贴和绿色金融支持。

9.4.3 国际竞争与技术壁垒

纯电极市场竞争激烈，国际竞争和技术壁垒是主要挑战：

高端市场壁垒：美国、德国和日本企业凭借先进技术（如 SPS 烧结、纳米晶加工）占据高端市场，品牌效应和技术专利限制了中国企业的进入。

低端市场竞争：中国、越南和印度等国的低成本生产商在低端市场展开价格战，利润率持续下降。

技术差距：欧美企业在新型电极材料（如复合钨电极）和智能制造领域领先，中国企业在核心设备（如高精度拉丝机）和高端工艺上仍需突破。

应对国际竞争需加强技术研发、品牌建设和国际合作。例如，通过与德国企业合作引入先进设备，或参与国际标准制定（如 ISO）提升话语权。此外，差异化竞争策略（如定制化电极、绿色认证）可帮助企业突破市场壁垒。



中钨智造纯钨电极

中钨智造科技有限公司
纯钨电极产品介绍

一、纯钨电极概述

纯钨电极是以高纯度钨（含量 $\geq 99.95\%$ ）为主要成分，通过粉末冶金工艺压制、烧结、锻造和精加工制成的电极材料。它不添加任何稀土或合金元素，是最基本的钨电极类型，广泛应用于需要高温、高电流密度的焊接和等离子应用场景。

二、纯钨电极主要应用领域

钨极氩弧焊 (TIG 焊): 尤其适用于镁、铝、钛等反应性金属的直流焊接（使用直流电负极）。

等离子切割与喷涂: 作为高温离子源的电极材料。

电子器件: 用作电子管、放电管等真空器件中的阴极或支撑部件。

高温炉电极: 在惰性气氛或真空中操作的电阻炉中作为加热电极使用。

科研与实验应用: 涉及高温、高能密度试验的领域。

三、纯钨电极基本数据

项目	参数
化学成分 (W 含量)	$\geq 99.95\%$
熔点	3410°C
密度	19.3 g/cm^3
电导率 (20°C)	$\sim 30\% \text{ IACS}$
硬度 (HV)	340 - 400 HV
热导率	$170 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
工作电流范围	直流负极，取决于直径与焊接材质
电极直径规格	$\varnothing 0.5 \text{ mm} \sim \varnothing 6.4 \text{ mm}$ (可定制)
电极长度	150 mm 和 175mm 标准长度 (可定制)
执行标准	ISO 6848 (焊接钨电极标准)

四、纯钨电极供应形式与包装

供应形态: 磨光棒材、定制打磨端头（尖头）

标准包装: 每 10 根为一塑料盒，外箱防震包装

可根据客户要求定制尺寸、包装与端头处理

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”。



版权与法律责任声明

第十章 结论

纯钨电极（WP 电极）作为钨极氩弧焊（TIG 焊接）的核心耗材，凭借其高熔点、成本优势和无放射性特性，在焊接及其他工业领域中发挥了重要作用。本书通过对纯钨电极的制备工艺、生产设备、检测方法、国内外标准、市场现状及优缺点等内容的系统阐述，全面展示了其技术特点和应用价值。本章将对纯钨电极进行综合评价，展望其未来发展方向，并提出研究与应用的建议，以为行业从业者和研究人员提供参考。

10.1 纯钨电极的综合评价

纯钨电极作为最早应用于 TIG 焊接的非熔化电极类型，其性能和应用特点在长期实践中得到了充分验证。以下从技术性能、应用场景、经济性及环保性四个方面对其进行综合评价。

技术性能

纯钨电极以高纯度钨（ $\geq 99.5\%$ ）为主要成分，具备极高的熔点（ 3422°C ）、优异的导热性（约 $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）和低蒸汽压，使其在高温电弧环境（ $6000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ ）下能够保持结构稳定性和端部形态的完整性。这些特性使其在交流焊接（AC）中表现尤为出色，尤其适合焊接铝、镁及其合金等具有氧化膜的轻金属。纯钨电极在交流焊接中通过正负半周期的交替作用，实现“阴极清洗”效果，有效去除氧化层（如 Al_2O_3 ，熔点约 2050°C ），形成清洁、高质量的焊缝。

然而，纯钨电极的高电子逸出功（约 4.52 eV ）导致其在直流焊接（DC）中起弧困难和电弧不稳定，限制了其在不锈钢、碳钢等材料的焊接应用中竞争力。此外，其电极消耗率较高，尤其在高电流（ $>200\text{ A}$ ）或长时间连续焊接中，端部材料易挥发，导致长度缩短和性能下降。与掺杂电极（如钨钨、钨钨电极，电子逸出功约 $2.7\text{--}3.2\text{ eV}$ ）相比，纯钨电极的综合焊接性能稍逊，但在特定场景下仍具有不可替代的优势。

在非焊接应用中，纯钨电极的高密度（ 19.3 g/cm^3 ）、硬度（HV 350–450）和化学稳定性使其成为电阻焊电极、等离子切割电极、热电子发射材料、溅射靶材及配重块的理想选择。例如，在半导体制造中，纯钨电极作为溅射靶材可形成高质量的钨薄膜；在航空航天领域，其高密度配重块用于优化结构平衡。总体而言，纯钨电极的技术性能在高温、高精度和无放射性要求的应用中表现出色，但需通过工艺优化进一步提升其通用性。

经济性

纯钨电极的显著优势之一是其低生产成本。相比掺杂电极，纯钨电极无需添加稀土氧化物（如氧化铈、氧化镧），避免了昂贵的原材料和复杂的掺杂工艺，降低了生产成本。全球钨资源丰富（中国占储量约 50% ），供应链稳定，钨精矿价格波动相对可控（2024 年约为 $12\text{--}15\text{ 万元/吨}$ ）。此外，纯钨电极的生产工艺（如粉末冶金、压力加工）已高度成熟，规模化生产进一步降低了单位成本。

在应用中，纯钨电极的低成本使其在建筑、船舶制造和通用机械加工等对成本敏感的行业中具有广泛吸引力。例如，铝制幕墙、船舶结构件和汽车零部件的焊接多采用纯钨电极，以平衡质量和成本。然而，其较高的消耗率和频繁打磨需求增加了使用成本，尤其在高负荷焊接

版权与免责声明

中，需更频繁更换电极，间接提高了操作成本。综合来看，纯钨电极在成本敏感型应用中具有明显优势，但在高性能场景下需权衡性能与经济性。

环保性与安全性

纯钨电极的无放射性特性是其相较于钍钨电极（含放射性氧化钍， ThO_2 ）的重大优势。钍钨电极的放射性（伽马射线剂量率约 $1-10 \mu\text{Sv/h}$ ）在生产、储存和废弃处理中存在安全隐患，而纯钨电极的剂量率接近背景辐射水平（约 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ），符合欧盟 REACH 法规和中国的 RoHS 标准。这一特性使其在食品加工设备、医疗器械和航空航天等对安全性要求高的领域中更具吸引力。

然而，纯钨电极生产过程中的环保问题不容忽视。钨矿提纯和烧结涉及高能耗和废水废气排放，如含钨废液和氧化钨蒸汽需严格处理以符合《环境保护法》等法规要求。近年来，企业通过采用离子交换、废料回收和可再生能源（如太阳能供电）等技术降低了环境影响，但合规成本对中小型企业仍构成挑战。总体而言，纯钨电极在环保性和安全性方面具有先天优势，但需进一步优化生产工艺以实现绿色制造。

应用场景

纯钨电极的应用场景主要集中在交流 TIG 焊接，特别适合铝、镁及其合金的焊接，广泛应用于航空航天、汽车制造、船舶建造和建筑行业。例如，在航空航天领域，纯钨电极用于 C919 飞机铝合金机身和镁合金部件的焊接；在汽车行业，其在新能源汽车电池外壳的焊接中发挥重要作用。此外，纯钨电极在非焊接领域（如等离子切割、溅射靶材和配重块）也有广泛应用，展现了其多功能性。

然而，其在直流焊接中的局限性限制了其在不锈钢、镍合金等材料的焊接应用，掺杂电极在这些场景中更具优势。此外，纯钨电极在高负荷或高频率焊接中的快速消耗和高维护需求也限制了其在自动化生产中的竞争力。综合来看，纯钨电极在交流焊接和特定非焊接领域具有独特优势，但在通用性和高性能应用中需进一步改进。

10.2 纯钨电极的未来发展展望

随着全球制造业的转型升级、新能源产业的崛起及环保法规的日益严格，纯钨电极的未来发展将受到技术创新、市场需求和政策导向的共同驱动。以下从技术进步、市场拓展和绿色发展三个方面展望其未来趋势。

技术进步

技术进步是提升纯钨电极性能和竞争力的关键，未来发展将聚焦于以下方向：

高纯度与晶粒优化：通过离子交换、溶剂萃取等先进提纯技术，将钨粉纯度提升至 99.99%，减少杂质（如氧、铁）对电弧稳定性的影响。快速烧结技术（如放电等离子烧结，SPS）可细化晶粒至 $10 \mu\text{m}$ 以下，提高电极的硬度和耐用性，降低消耗率。纳米晶钨电极的研发将进一步增强起弧性能和电弧稳定性，拓展其在直流焊接中的应用。

智能制造与自动化：工业物联网（IIoT）和传感器技术将推动生产线的智能化转型。例如，

版权与法律声明

实时监控烧结炉温度、拉丝机拉力和电极表面质量的智能系统可降低废品率，提高生产效率。自动化生产线的普及（如连续烧结炉、机器人抛光设备）将缩短生产周期 20%-30%，降低人工成本。

新型材料开发：微合金化电极（如添加氧化锆或氧化钇）和钨基复合材料（如钨-石墨烯复合电极）将成为研发热点。这些材料可降低电子逸出功（至 4.0-4.2 eV），改善直流焊接性能，同时保留纯钨的成本优势和无放射性特性。新型电极的产业化需解决成本控制和工艺稳定性问题，预计在未来 5-10 年内实现规模化应用。

技术进步将显著提升纯钨电极的性能，使其在高精度和高负荷焊接中更具竞争力，同时推动其在半导体、核工业等新兴领域的应用。

市场拓展

全球纯钨电极市场预计将以年均复合增长率（CAGR）3%-5%持续增长，到 2030 年市场规模有望达到 6-7 亿美元。市场拓展的驱动因素包括：

新兴市场增长：亚太地区（中国、印度、东南亚）的制造业和基础设施建设快速增长，推动纯钨电极需求。例如，印度的高铁项目和东南亚的港口建设将增加铝合金焊接需求，纯钨电极的成本优势使其在这些市场中占主导地位。

新能源与高科技产业：太阳能电池、风电设备和半导体制造对高纯度钨材料的需求增加，纯钨电极作为溅射靶材和焊接材料的应用前景广阔。例如，光伏行业的薄膜沉积和新能源汽车电池制造将推动电极需求增长。

高端应用突破：随着生产工艺的优化，纯钨电极在航空航天和核工业的精密焊接中将获得更多机会。例如，国际热核聚变实验堆（ITER）等项目对无放射性、高性能电极的需求将推动纯钨电极的技术升级和市场拓展。

然而，市场拓展需应对掺杂电极的竞争和国际贸易壁垒。欧美企业凭借技术优势占据高端市场，中国企业需通过品牌建设和差异化产品（如定制化电极）提升竞争力。此外，“一带一路”倡议为中国企业提供了进入中东、非洲和拉美市场的机会，需抓住政策红利拓展出口。

绿色发展

环保和可持续发展是纯钨电极行业的长期趋势，受全球“碳中和”目标和环保法规的推动。未来发展方向包括：

绿色生产工艺：采用低能耗提纯技术（如膜分离）和废料回收体系，减少废水废气排放。试点项目显示，废料回收率可达 80%，显著降低资源浪费。可再生能源（如太阳能、风电）在烧结和热加工中的应用可减少 30%的碳排放。

无毒材料推广：推广水性绿色涂料和无毒清洗剂，替代传统含铅涂料和有机溶剂，符合欧盟 REACH 法规和中国 RoHS 标准。这些材料可降低环境污染和健康风险，提升产品市场接受度。

版权与法律责任声明

循环经济模式：建立钨电极的回收再利用体系，通过高温焙烧和电解还原回收使用过的电极，减少对原生钨矿的依赖。循环经济模式可降低 20%-30% 的原材料成本，同时提升企业的绿色形象。

绿色发展不仅满足法规要求，还可提升企业的社会责任感和市场竞争力。未来，绿色认证（如 ISO 14001）将成为纯钨电极进入国际市场的通行证。

10.3 纯钨电极研究与应用建议

基于纯钨电极的综合评价和未来发展趋势，以下从技术研发、生产优化、应用推广和政策支持四个方面提出研究与应用建议。

技术研发

高性能电极开发：加大对纳米晶钨电极和微合金化电极的研发投入，通过添加微量氧化物（如氧化钇、氧化锆）降低电子逸出功，提升直流焊接性能。产学研合作可加速新型电极的实验室验证和产业化进程。

工艺优化研究：开发快速烧结技术和智能化生产设备，细化晶粒结构并提高生产效率。例如，推广 SPS 烧结技术，缩短烧结时间至分钟级，降低能耗。传感器和人工智能技术的应用可实现生产参数的实时优化。

检测技术升级：开发在线检测技术（如激光诱导击穿光谱，LIBS）实现化学成分和显微组织的实时分析，提高质量控制效率。建立统一的检测标准数据库，促进检测结果的国际互认。

生产优化

自动化与智能化：推广自动化生产线和智能监控系统，覆盖从钨粉压制到表面处理的全部流程。例如，连续拉丝机和机器人抛光设备可提高生产效率 15%-20%。数据分析平台（如 SCADA 系统）可优化工艺参数，降低废品率。

绿色制造实施：投资环保设备（如高效过滤器、湿式洗涤塔）处理生产废水废气，确保符合环保法规。推广可再生能源供电，降低碳足迹。建立废料回收体系，提高资源利用率。

供应链管理：与钨矿供应商签订长期合同，稳定原材料价格。开发钨废料回收技术，降低对原生钨矿的依赖。加强供应链数字化管理，实时监控库存和物流，提高响应速度。

应用推广

行业定制化产品：针对航空航天、汽车和新能源行业的需求，开发定制化纯钨电极，如小直径电极（0.5-1.0 mm）用于电子行业，大直径电极（4.0-6.4 mm）用于船舶制造。定制化产品可提升市场竞争力。

国际市场拓展：利用“一带一路”倡议，进入中东、非洲和拉美市场，推广低成本、高性能的纯钨电极。参与国际展览（如德国埃森焊接展）并申请绿色认证（如 ISO 14001），提升品牌影响力。

技术培训与支持：为用户提供焊接参数优化和电极使用培训，改善纯钨电极在直流焊接中的性能。例如，推荐高频引弧和方波交流电流设置，提升起弧性能和电弧稳定性。

政策支持

环保政策引导：政府可出台补贴政策，鼓励企业采用绿色生产技术和可再生能源。制定更严格的钨矿开采和排放标准，推动行业向绿色制造转型。

技术研发资助：设立专项基金支持新型钨电极的研发和产业化，如纳米晶电极和复合材料电极。鼓励产学研联合攻关，加速技术转化。

国际合作与标准制定：参与 ISO 和 AWS 标准修订，提升中国在钨电极标准制定中的话语权。推动检测结果的国际互认，降低贸易壁垒，促进出口增长。



中钨智造纯钨电极

附录

A. 术语表

- 纯钨电极 (WP Electrode):** 含钨量 $\geq 99.5\%$ 的钨电极, 通常用于交流焊接, 色标为绿色。
- 钨极氩弧焊 (TIG Welding):** 使用钨电极在惰性气体保护下进行焊接的工艺。
- 电子逸出功 (Work Function):** 电子从材料表面逸出所需的最小能量。
- 电弧稳定性 (Arc Stability):** 电弧在焊接过程中保持连续且均匀的能力。
- 粉末冶金 (Powder Metallurgy):** 通过压制和烧结金属粉末制备材料的技术。
- 稀土氧化物 (Rare Earth Oxide):** 如氧化铈、氧化镧等, 用于改善钨电极性能的添加剂。
- 烧结 (Sintering):** 将粉末颗粒加热至低于熔点的温度使其结合成致密材料的过程。
- 起弧性能 (Arc Starting Performance):** 电极在焊接开始时引发电弧的难易程度。
- 熔深 (Penetration Depth):** 焊接时电弧对工件材料的熔化深度。
- 热电子发射 (Thermionic Emission):** 材料在高温下发射电子的现象。
- 晶粒长大 (Grain Growth):** 高温下晶粒尺寸增大的现象, 可能导致材料性能下降。
- AWS A5.12:** 美国焊接学会制定的钨电极标准。
- ISO 6848:** 国际标准化组织制定的钨电极标准。
- 绿色涂头 (Green Tip):** 纯钨电极的国际通用颜色标记。
- 直流焊接 (DC Welding):** 使用直流电源进行的焊接工艺。
- 交流焊接 (AC Welding):** 使用交流电源进行的焊接工艺。
- 电极消耗率 (Electrode Consumption Rate):** 电极在焊接过程中损耗的速度。
- 热膨胀系数 (Thermal Expansion Coefficient):** 材料随温度变化的尺寸变化率。
- 导电性 (Electrical Conductivity):** 材料传导电流的能力。
- 抗蠕变性 (Creep Resistance):** 材料在高温下抵抗缓慢变形的能力。

B. 参考资料

- [1] 纯钨电极性能与应用综述. 中国钨业, 2025-01-20.
- [2] 钨电极市场发展趋势分析. 中钨在线科技有限公司, 2024.
- [3] 高性能钨电极研发进展. 金属材料与工程, 2024-11-15.
- [4] 钨行业绿色制造技术. 国际钨业协会, 2024.
- [5] TIG 焊接材料与工艺研究. 焊接技术, 2025-02-10.
- [6] 全球钨电极市场分析报告. 中国钨工业, 2024-11-30.
- [7] 高效钨电极生产技术进展. 金属材料与工程, 2024-10-10.
- [8] 钨资源市场与价格趋势. 中国矿业报, 2024-09-20.
- [9] 纯钨电极性能优缺点分析. 中国钨工业, 2024-12-25.
- [10] 钨电极材料改进研究进展. 金属材料与工程, 2024-11-10.
- [11] 钨基复合材料在焊接中的应用. 材料科学与工程, 2023-12-20.
- [12] 高纯钨材料分析方法. 金属材料与工程, 2024-10-15.
- [13] ISO 6848:2015. Arc-welding and cutting — Non-consumable tungsten electrodes — Classification. International Organization for Standardization, 2015.
- [14] AWS A5.12/A5.12M:2009. Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting. American Welding Society, 2009.

版权与免责声明

- [15] ISO 6848:2015. Arc-welding and cutting — Non-consumable tungsten electrodes — Classification. International Organization for Standardization, 2015.
- [16] EN 26848:1991. Welding consumables — Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma welding. European Committee for Standardization, 1991.
- [17] GB/T 4190-2017. 非熔化极氩弧焊用钨及钨合金电极. 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [18] JIS Z 3233:2017. Tungsten Electrodes for Inert Gas Shielded Arc Welding. Japanese Industrial Standards Committee, 2017.