

钨钨电极百科全书

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钨稀土产业数字化智能化服务领航者

[版权与免责声明](#)

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在工业互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化设计与制造。中钨在线成立于1997年，以中国首个顶级钨制品网站 www.chinatungsten.com 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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

目录

第一章 引言

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

第二章 钨电极的种类

- 2.1 钨电极按氧化钨含量分类
 - 2.1.1 WT10（黄色涂头）
 - 2.1.2 WT20（红色涂头）
 - 2.1.3 WT30（紫色涂头）
 - 2.1.4 WT40（橙黄色涂头）
- 2.2 钨电极按应用场景分类
 - 2.2.1 直流焊接用钨电极
 - 2.2.2 交流焊接用钨电极（特殊场景）
- 2.3 钨电极与其他钨电极的对比
 - 2.3.1 纯钨电极
 - 2.3.2 铈钨电极
 - 2.3.3 镧钨电极
 - 2.3.4 锆钨电极
 - 2.3.5 钇钨电极

第三章 钨电极的特性

- 3.1 钨电极的物理特性
 - 3.1.1 钨电极的高熔点与热稳定性
 - 3.1.2 钨电极的电子逸出功
 - 3.1.3 钨电极的导电性与机械性能
- 3.2 钨电极的化学特性
 - 3.2.1 钨电极的抗氧化性
 - 3.2.2 钨电极的化学稳定性
- 3.3 钨电极的焊接性能
 - 3.3.1 钨电极的起弧性能
 - 3.3.2 钨电极的电弧稳定性
 - 3.3.3 钨电极的电极烧损率
 - 3.3.4 钨电极在高负载电流下的表现
- 3.4 钨电极的放射性特性
 - 3.4.1 氧化钨的微量放射性
 - 3.4.2 健康与环境影响
 - 3.4.3 钨电极的与非放射性电极的对比
- 3.5 中钨智造钨电极 MSDS

版权与免责声明

第四章 钨钨电极的制备生产工艺与技术

- 4.1 钨钨电极的原料准备
 - 4.1.1 钨粉的选取与纯化
 - 4.1.2 氧化钨的掺杂工艺
- 4.2 钨钨电极的粉末冶金工艺
 - 4.2.1 混料与压制
 - 4.2.2 烧结过程
 - 4.2.3 热处理与晶粒控制
- 4.3 钨钨电极的压延与磨抛工艺
 - 4.3.1 电极棒的成型
 - 4.3.2 表面抛光与精度控制
- 4.4 钨钨电极的质量控制
 - 4.4.1 成分均匀性检测
 - 4.4.2 尺寸与表面质量检测
- 4.5 钨钨电极的放射性污染防控
 - 4.5.1 生产过程中的放射性废物管理
 - 4.5.2 防护措施与设备要求
 - 4.5.3 废水与固体废物的处理

第五章 钨钨电极的用途

- 5.1 钨钨电极在焊接领域的应用
 - 5.1.1 钨极氩弧焊（TIG 焊）
 - 5.1.2 等离子焊接
 - 5.1.3 直流负极焊接（碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金等）
- 5.2 钨钨电极在其他工业的应用
 - 5.2.1 真空电子器件中的阴极材料
 - 5.2.2 电弧切割与引发电弧
- 5.3 钨钨电极应用场景的局限性
 - 5.3.1 放射性限制下的使用场景
 - 5.3.2 替代电极的应用趋势

第六章 钨钨电极的生产设备

- 6.1 钨钨电极的原料处理设备
 - 6.1.1 钨粉研磨与筛分设备
 - 6.1.2 氧化钨掺杂设备
- 6.2 钨钨电极的粉末冶金设备
 - 6.2.1 混料机
 - 6.2.2 压制机
 - 6.2.3 高温烧结炉
- 6.3 钨钨电极的成型与加工设备
 - 6.3.1 压延机
 - 6.3.2 磨削与抛光设备

- 6.4 钨电极的放射性防护设备
 - 6.4.1 专用砂轮机与除尘系统
 - 6.4.2 密闭罩与通风设备
 - 6.4.3 放射性废物处理设备
- 6.5 钨电极的检测设备
 - 6.5.1 X- γ 辐射剂量率检测仪
 - 6.5.2 α 、 β 表面污染检测仪

第七章 钨电极的国内外标准

- 7.1 钨电极的国际标准
 - 7.1.1 ISO 6848:2015（钨电极的分类与要求）
 - 7.1.2 AWS A5.12/A5.12M（美国焊接学会钨电极规范）
 - 7.1.3 EN 26848（欧洲钨电极标准）
- 7.2 钨电极的国内标准
 - 7.2.1 GB/T 4187-2017（钨电极国家标准）
 - 7.2.2 GB 18871-2002（电离辐射防护与辐射源安全基本标准）
 - 7.2.3 《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》
- 7.3 钨电极的放射性安全标准
 - 7.3.1 钨-232 豁免活度浓度（1 Bq/g）
 - 7.3.2 生产与使用中的防护要求

第八章 钨电极的检测方法

- 8.1 钨电极的化学成分检测
 - 8.1.1 氧化钨含量分析
 - 8.1.2 杂质含量检测
- 8.2 钨电极的物理性能检测
 - 8.2.1 密度与硬度测试
 - 8.2.2 晶粒结构分析
- 8.3 钨电极的放射性检测
 - 8.3.1 X- γ 辐射剂量率检测
 - 8.3.2 α 、 β 表面污染检测
 - 8.3.3 环境辐射监测
- 8.4 钨电极的焊接性能测试
 - 8.4.1 起弧性能测试
 - 8.4.2 电弧稳定性与烧损率测试
- 8.5 钨电极的检测设备与校准
 - 8.5.1 检测仪器校准要求
 - 8.5.2 检测环境与操作规范

第九章 钨电极的优缺点

- 9.1 钨电极的优点
 - 9.1.1 优异的焊接性能

- 9.1.2 高温强度与耐磨性
- 9.2 钨电极的缺点
 - 9.2.1 放射性污染风险
 - 9.2.2 环境与健康影响

第十章 钨电极的储存、运输与安全管理

- 10.1 储存环境与条件要求
- 10.2 包装标准与防护措施
- 10.3 运输过程中的安全注意事项
- 10.4 放射性物质安全管理规范
- 10.5 应急处理与事故预防

第十一章 钨电极的未来发展趋势与挑战

- 11.1 钨电极替代材料的研发进展
- 11.2 环保与放射性安全压力
- 11.3 新型制备工艺与绿色制造
- 11.4 钨电极性能的提升方向
- 11.5 市场需求变化与产业链发展
- 11.6 政策法规的影响与合规发展

附录

- A. 术语表
- B. 参考文献

第一章 引言

1.1 钍钨电极的定义与概述

钍钨电极是一种以高纯度钨为基体、掺杂少量氧化钍（ ThO_2 ，通常含量在 0.9%–4.2% 之间）的合金电极，广泛应用于钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊）等高精度焊接工艺中。其主要成分钨具有极高的熔点（约 3422°C）和优异的导电性，而氧化钍的添加显著降低了电极的电子逸出功（约为 2.63 eV），从而提高了起弧性能和电弧稳定性。钍钨电极通常以不同氧化钍含量进行分类，国际上常见的型号包括 WT10（0.9–1.2% ThO_2 ，黄色涂头）、WT20（1.8–2.2% ThO_2 ，红色涂头）、WT30（2.8–3.2% ThO_2 ，紫色涂头）和 WT40（3.8–4.2% ThO_2 ，橙黄色涂头）。这些型号通过颜色编码便于在生产和使用中区分。

钍钨电极的外观为棒状，直径通常在 0.5 毫米至 10 毫米之间，长度一般为 150 毫米或 175 毫米，表面经过精密磨削和抛光以确保焊接过程中的稳定性。其独特性能源于钨的高熔点和氧化钍的热电子发射能力，使其在高电流负载下能够维持稳定的电弧，同时减少电极烧损。氧化钍的掺杂不仅增强了电极的耐高温性能，还使其在直流负极（DCEN）焊接中表现出色，特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金和钛合金等材料的焊接。

然而，钍钨电极因含氧化钍而具有微量放射性（主要为 α 和 β 粒子辐射），这使其在生产、储存和使用过程中需要特殊的防护措施。尽管其放射性水平较低（钍-232 的豁免活度浓度为 1 Bq/g），长期暴露仍可能对健康和环境造成潜在影响。因此，近年来，铈钨、镧钨等非放射性电极逐渐成为替代品，但钍钨电极因其优异的焊接性能在特定领域仍占据重要地位。

1.2 钍钨电极在焊接行业中的重要性

钍钨电极在焊接行业中具有不可替代的重要性，尤其是在钨极氩弧焊（TIG 焊）和等离子焊接等高精度工艺中。TIG 焊是一种利用惰性气体（如氩气或氦气）保护电弧和熔池的焊接方法，广泛应用于航空航天、核工业、汽车制造和船舶工业等领域。钍钨电极因其优异的起弧性能和电弧稳定性，成为 TIG 焊的首选电极材料。

首先，钍钨电极在直流负极焊接中表现出色。其低电子逸出功使得电极能够轻松引发电弧，且电弧在高电流下保持稳定，减少飞溅和焊接缺陷。这对于焊接高熔点金属（如钛合金和不锈钢）尤为重要。例如，在航空航天领域，钛合金部件的焊接要求极高的精度和表面质量，钍钨电极能够确保焊缝的均匀性和强度。此外，钍钨电极在高电流负载下的低烧损率延长了电极的使用寿命，降低了生产成本。

其次，钍钨电极的高导电性和热稳定性使其适用于多种材料的焊接，包括碳钢、合金钢、铜合金和镍基合金。不同氧化钍含量的电极（如 WT20 和 WT40）可根据焊接电流和材料类型进行选择，满足不同工艺需求。例如，WT20 因其适中的氧化钍含量（1.8–2.2%），在中等电流焊接中应用最为广泛，而 WT40 则更适合高电流、重负荷的工业场景。

此外，钍钨电极在等离子焊接和电弧切割中也有重要应用。等离子焊接需要电极在高温高压等离子环境中维持稳定性，钍钨电极的耐高温性能使其成为理想选择。在电弧切割中，钍钨电极能够提供高强度的电弧，确保切割效率和精度。这些特性使得钍钨电极在现代工业中不

版权与法律责任声明

可或缺，尽管其放射性问题引发了替代材料的研究，但其在特定高要求场景中的优势仍难以完全取代。

1.3 研究与应用的背景

钨钨电极的研发和应用始于 20 世纪初，随着电弧焊接技术的兴起而逐渐发展。钨因其高熔点和优异的导电性成为电极材料的理想选择，但纯钨电极在高电流下的起弧困难和电弧不稳定问题限制了其应用。20 世纪 30 年代，研究人员发现通过掺杂少量氧化钍，可以显著改善钨电极的性能。氧化钍的低电子逸出功降低了起弧所需的能量，同时提高了电极在高温下的耐久性，这一发现推动了钨钨电极的广泛应用。

在随后的几十年中，钨钨电极的制备工艺不断改进。粉末冶金技术的引入使得氧化钍的均匀分布成为可能，从而提高了电极的质量和一致性。20 世纪 80 年代，随着 TIG 焊技术的普及，钨钨电极成为焊接行业的主流材料，国际标准（如 ISO 6848 和 AWS A5.12）也相继制定，以规范其生产和使用。

然而，钨钨电极的放射性问题逐渐引起关注。氧化钍中的钍-232 是一种天然放射性元素，其衰变会释放 α 粒子和少量 β 、 γ 辐射。尽管其放射性水平较低，但在生产和使用过程中（如电极磨削时产生的粉尘），仍可能对工人健康和环境造成潜在风险。20 世纪 90 年代以来，欧美国家开始推动非放射性电极的研发，铈钨电极（WC20）和铈钨电极（WL20）逐渐进入市场。这些替代电极在性能上接近钨钨电极，且无放射性风险，因此在部分地区逐渐取代钨钨电极。

尽管如此，钨钨电极在某些高要求领域仍具有独特优势。例如，在核工业和航空航天领域，钨钨电极因其优异的电弧稳定性和耐高温性能，仍然是首选材料。近年来，研究重点转向了优化钨钨电极的生产工艺以减少放射性污染，同时探索新型掺杂材料以进一步提升性能。此外，随着环保法规的日益严格，钨钨电极的生产和使用受到更多限制，促使行业开发更安全、环保的替代方案。

在全球范围内，钨钨电极的应用和研究仍在持续。中国作为钨资源大国，在钨钨电极的生产和出口中占据重要地位，相关企业不断改进生产工艺以满足国际标准。与此同时，国际焊接行业对钨钨电极的需求依然强劲，尤其是在发展中国家和特定工业领域。未来，随着新材料和工艺的进步，钨钨电极的角色可能发生变化，但其在焊接技术发展史中的重要地位不可否认。



中钨智造 WT20 电极

第二章 钨钨电极的种类

钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊）和等离子焊接中的核心耗材，其种类繁多，根据氧化钨含量和应用场景的不同可进行细致分类。钨钨电极的分类不仅反映了其化学组成和物理性能的差异，也体现了其在不同焊接工艺和工业场景中的适用性。本章将详细探讨钨钨电极按氧化钨含量分类、按应用场景分类，以及与其它类型钨电极的对比。

2.1 钨钨电极按氧化钨含量分类

钨钨电极的主要特性来源于钨基体中掺杂的氧化钨（ ThO_2 ），其含量直接影响电极的电子逸出功、电弧稳定性、烧损率以及适用电流范围。国际标准（如 ISO 6848:2015 和 AWS A5.12/A5.12M）根据氧化钨含量将钨钨电极分为多个型号，并以不同颜色涂头进行标识，便于生产和使用中的区分。以下为常见的四种型号：WT10、WT20、WT30 和 WT40，每种型号的性能和应用场景均有显著差异。

2.1.1 WT10（黄色涂头）

WT10 钨钨电极含有 0.8-1.2% 的氧化钨，是氧化钨含量最低的钨钨电极型号，以黄色涂头标识。其低含量的氧化钨使其在电子逸出功和焊接性能之间取得了平衡，适合低至中等电流的焊接任务。

性能特点

WT10 电极的电子逸出功约为 2.63 eV，低于纯钨电极（约 4.5 eV），这显著降低了起弧所需的能量，使其在低电流条件下（通常 50-150 A）具有良好的起弧性能。电弧稳定性较佳，特别是在直流负极（DCEN）焊接中，电弧集中且飞溅较少。由于氧化钨含量较低，WT10 的烧损率相对较高，尤其在高电流或长时间连续焊接时，电极尖端可能出现轻微熔化或钨损耗。

版权与免责声明

WT10 的放射性水平是所有钨钨电极中最低的，钨-232 的活度浓度接近豁免标准（1 Bq/g），因此在生产和使用中的辐射防护要求相对宽松。这使其成为对放射性敏感的工业场景（如医疗设备制造）中的优选电极。

应用场景

WT10 主要用于薄板焊接和低电流精密焊接，适用于碳钢、不锈钢和铜合金等材料。例如，在自行车车架制造中，WT10 电极能够提供稳定的电弧，减少焊缝过热，确保高质量的接头。此外，WT10 也可用于微型 TIG 焊工艺，如电子元件的精密焊接。

优缺点

优点：低放射性、良好的起弧性能、适合低电流焊接、成本相对较低。

缺点：在高电流下烧损率较高，不适合重负荷或长时间连续焊接。

生产与使用注意事项

在生产 WT10 电极时，需确保氧化钨的均匀分布，以避免局部性能不均。使用时，建议采用适当的磨削角度（通常为 15° - 30° ）以优化电弧集中度。此外，磨削过程中需配备专用砂轮机和除尘设备，以减少钨粉尘的吸入风险。

2.1.2 WT20（红色涂头）

WT20 是目前使用最广泛的钨钨电极型号，氧化钨含量为 1.7-2.2%，以红色涂头标识。其适中的氧化钨含量使其在性能、成本和适用性之间达到最佳平衡，被广泛应用于工业焊接。

性能特点

WT20 电极的电子逸出功与 WT10 相近，但由于氧化钨含量更高，其电弧稳定性进一步提升，适合中等至高电流范围（100-300 A）。在直流负极焊接中，WT20 能够维持集中且稳定的电弧，减少焊缝缺陷。相比 WT10，WT20 的烧损率更低，电极尖端在高温下更耐用，适合较长时间的连续焊接。

WT20 的放射性水平略高于 WT10，但仍在安全范围内。生产和使用中的防护措施需严格遵循相关标准（如 GB 18871-2002），包括佩戴防护口罩和使用通风设备。

应用场景

WT20 是 TIG 焊中的“全能型”电极，广泛用于不锈钢、碳钢、镍合金和钛合金的焊接。在航空航天领域，WT20 常用于钛合金部件的焊接，如飞机发动机叶片的制造，其稳定的电弧和低烧损率确保了高质量焊缝。在石化行业，WT20 也常用于管道焊接，特别是在苛刻环境下的耐腐蚀材料连接。

优缺点

优点：电弧稳定性强、烧损率低、适用电流范围广、适合多种材料。

缺点：放射性略高，需严格防护；成本高于 WT10。

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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

生产与使用注意事项

WT20 的生产需精确控制氧化钨的掺杂比例，以确保性能一致性。使用时，推荐采用 20° - 35° 的磨削角度，并在高电流焊接时定期检查电极尖端状态，以避免钨耗损影响焊接质量。磨削粉尘需妥善收集和处理，防止环境污染。

2.1.3 WT30（紫色涂头）

WT30 电极含有 2.8-3.2% 的氧化钨，以紫色涂头标识，适用于高电流和重负荷焊接场景。其高氧化钨含量显著增强了电极的耐高温性能和电弧稳定性。

性能特点

WT30 的电子逸出功略低于 WT20，进一步降低了起弧难度，电弧在高电流（200-400 A）下仍能保持稳定。其烧损率在钨钨电极中最低，电极尖端在高温高压下不易熔化或变形，适合长时间连续焊接。WT30 的导电性和热稳定性优异，使其在重工业场景中表现出色。

然而，高氧化钨含量导致其放射性水平较高，生产和使用中的防护要求更为严格。操作人员需佩戴防护装备，并确保工作环境通风良好。

应用场景

WT30 主要用于厚板焊接和重型结构件的制造，如船舶制造中的钢板焊接、核电站压力容器的焊接以及大型机械设备的组装。其高电流下仍能维持稳定的电弧，使其适合焊接高熔点材料，如钛合金和镍基合金。此外，WT30 也可用于等离子焊接和电弧切割，要求电极在极端条件下保持性能。

优缺点

优点：极佳的电弧稳定性、极低的烧损率、适合高电流和重负荷焊接。

缺点：放射性较高，防护成本高；成本高于 WT10 和 WT20。

生产与使用注意事项

WT30 的生产需采用高精度粉末冶金工艺，确保氧化钨均匀分布以避免局部缺陷。使用时，建议磨削角度为 25° - 40° ，以优化电弧集中度和耐用性。磨削和使用过程中需严格遵守放射性防护规范，配备专用收集装置处理钨粉尘。

2.1.4 WT40（橙黄色涂头）

WT40 电极含有 3.8-4.2% 的氧化钨，以橙黄色涂头标识，是氧化钨含量最高的钨钨电极型号，专为极端高电流和重负荷焊接设计。

性能特点

WT40 的电子逸出功最低（约 2.6 eV），起弧性能极佳，即使在超高电流（300-500 A）下也能维持稳定的电弧。其烧损率极低，电极尖端在长时间高温运行中几乎无明显损耗，适合极端工业场景。WT40 的热稳定性和机械强度极高，能够承受高强度的电弧冲击。

然而，WT40 的放射性水平最高，钨-232 的活度浓度接近或略高于豁免标准，生产和使用中

版权与免责声明

的辐射防护要求最为严格。操作人员需配备全面防护装备，工作场所需安装高效通风和粉尘收集系统。

应用场景

WT40 主要用于超厚板焊接和极端条件的工业应用，如核反应堆压力容器的焊接、航空航天中大型钛合金结构的连接以及重型机械的制造。在等离子切割中，WT40 也能提供高强度的电弧，确保切割效率和精度。其在高负荷场景中的耐用性使其成为特殊工业领域的首选。

优缺点

优点：最佳的电弧稳定性、最低的烧损率、适合超高电流和极端条件。

缺点：放射性最高，防护成本极高；生产和使用成本高。

生产与使用注意事项

WT40 的生产需使用高精度设备控制氧化钨的掺杂和分布，烧结工艺需在高温真空环境中进行以确保质量。使用时，推荐磨削角度为 30° - 45° ，以适应高电流需求。磨削和焊接过程中需严格遵守放射性安全规范，定期检测环境辐射水平。

2.2 钨钨电极按应用场景分类

钨钨电极的应用场景主要基于其在直流（DC）和交流（AC）焊接中的性能差异。由于钨钨电极的电子逸出功和电弧稳定性优于纯钨电极，其主要用于直流负极焊接，但在特定交流焊接场景中也有应用。

2.2.1 直流焊接用钨钨电极

直流负极（DCEN）焊接是钨钨电极最常见的应用场景。DCEN 焊接中，电极连接电源负极，工件连接正极，电子从电极流向工件，产生集中且稳定的电弧。这种模式下，钨钨电极的低电子逸出功和优异的热稳定性使其表现出色。

性能特点

在 DCEN 模式下，钨钨电极能够轻松引发电弧，且电弧集中，热量主要集中在工件上，减少电极的热负荷。这使得钨钨电极在焊接碳钢、不锈钢、镍合金和钛合金时具有显著优势。不同型号的钨钨电极适用于不同电流范围：

WT10：适合低电流（50-150 A），用于薄板和精密焊接。

WT20：适合中等至高电流（100-300 A），广泛用于工业焊接。

WT30 和 WT40：适合高至超高电流（200-500 A），用于厚板和重负荷焊接。

钨钨电极在 DCEN 焊接中的烧损率低，电极寿命长，特别是在高电流下仍能保持尖端形状，减少频繁更换的需要。此外，其电弧稳定性高，焊缝质量优异，飞溅少，适合高精度焊接。

应用场景

航空航天：钛合金和镍合金部件的焊接，如飞机机身和发动机部件。

核工业：压力容器和管道的焊接，要求高强度和无缺陷焊缝。

版权与免责声明

石化工业：耐腐蚀材料（如不锈钢和镍基合金）的管道和设备焊接。

汽车制造：高强度钢和铝合金的焊接，如车身和悬架部件。

注意事项

在 DCEN 焊接中，需根据材料厚度和焊接电流选择合适的电极型号和磨削角度。电极尖端需定期检查和重新磨削，以保持电弧集中度。磨削时需使用专用砂轮机，并配备粉尘收集装置以减少放射性风险。

2.2.2 交流焊接用钍钨电极（特殊场景）

虽然钍钨电极主要用于 DCEN 焊接，但在特定交流（AC）焊接场景中也有应用，特别是在焊接铝、镁等轻金属时。AC 焊接中，电流周期性地在正极和负极之间切换，电极需承受更高的热负荷。

性能特点

在 AC 焊接中，钍钨电极的性能不如钨钨或钨钨电极，但仍可用于特定场景。WT20 和 WT30 因其较高的氧化钍含量，能够在 AC 模式下提供较好的电弧稳定性，但在正极周期（DCEP）中，电极尖端容易过热，导致钍耗损和电极烧损。因此，钍钨电极在 AC 焊接中通常需要更高的维护频率，如频繁磨削以恢复尖端形状。

应用场景

铝合金焊接：在船舶和航空制造中，钍钨电极（通常为 WT20）可用于铝板的 AC-TIG 焊接，特别是在直流电源不可用时。

镁合金焊接：在汽车和航空领域，钍钨电极可用于镁合金的精密焊接，要求较高的电弧控制。

修复焊接：在某些现场修复场景中，钍钨电极可作为临时替代，用于 AC 焊接轻金属。

注意事项

在 AC 焊接中，建议使用较大的电极直径（2.4-4.0 mm）以承受热负荷，磨削角度宜为 30°-45°，尖端可略呈圆形以减少过热。需特别注意放射性粉尘的防护，配备高效通风系统。

2.3 钍钨电极与其他钨电极的对比

钍钨电极因其优异的焊接性能在 TIG 焊中占据重要地位，但随着非放射性电极的研发，纯钨电极、铈钨电极、钨钨电极、钨钨电极和钨钨电极等逐渐成为替代选择。以下对这些电极与钍钨电极进行详细对比。

2.3.1 纯钨电极

概述

纯钨电极（WP，绿色涂头）由 99.5% 以上的纯钨制成，不含任何氧化物掺杂，是最早使用的钨电极类型。

性能对比

电子逸出功：纯钨电极的电子逸出功较高（约 4.5 eV），起弧难度大，需更高的电压。

电弧稳定性：电弧稳定性较差，特别是在高电流下，电弧容易漂移。

版权与免责声明

烧损率：烧损率高，电极尖端易熔化，寿命较短。

放射性：无放射性，安全性和环保性优于钍钨电极。

适用场景：主要用于 AC 焊接铝和镁合金，因其在正极周期中能形成稳定的氧化层。

优缺点

优点：无放射性，成本低，适合 AC 焊接轻金属。

缺点：起弧困难，电弧稳定性差，不适合高电流或 DCEN 焊接。

应用场景

纯钨电极主要用于低要求 AC 焊接，如铝板焊接，但在现代工业中已逐渐被稀土掺杂电极取代。

2.3.2 铈钨电极

概述

铈钨电极（WC20，灰色涂头）含有 1.8-2.2%的氧化铈（ CeO_2 ），是钍钨电极的主要非放射性替代品。

性能对比

电子逸出功：约为 2.7 eV，略高于钍钨电极，但起弧性能良好。

电弧稳定性：电弧稳定性接近 WT20，适合 DCEN 和 AC 焊接。

烧损率：烧损率低于纯钨电极，但略高于 WT20。

放射性：无放射性，安全性高，符合环保要求。

适用场景：广泛用于不锈钢、碳钢和铝合金的焊接，特别是在对放射性敏感的行业。

优缺点

优点：无放射性，起弧性能好，适合多种焊接场景。

缺点：高电流下烧损率略高，耐久性不如 WT20。

应用场景

铈钨电极在医疗设备、食品加工设备和电子行业的焊接中广泛使用，因其无放射性风险，逐渐取代钍钨电极。

2.3.3 镧钨电极

概述

镧钨电极（WL10、WL15、WL20，分别为黑色、金色和蓝色涂头）含有 0.8-2.0%的氧化镧（ La_2O_3 ），是另一种非放射性替代电极。

性能对比

电子逸出功：约为 2.6-2.8 eV，起弧性能优异，接近钍钨电极。

电弧稳定性：电弧稳定性极佳，特别是在高电流和 AC 焊接中。

烧损率：烧损率低，电极寿命长，接近或优于 WT20。

放射性：无放射性，安全性和环保性高。

版权与免责声明

适用场景：适合 DCEN 和 AC 焊接，广泛用于高精度和重负荷场景。

优缺点

优点：无放射性，电弧稳定性强，寿命长，适合多种电流和材料。

缺点：成本略高，生产工艺要求严格。

应用场景

钨钨电极在航空航天、核工业和汽车制造中广泛使用，尤其是在需要高精度和长寿命的场景中。

2.3.4 锆钨电极

概述

锆钨电极（WZ3、WZ8，分别为棕色和白色涂头）含有 0.3-0.8% 的氧化锆（ ZrO_2 ），专为 AC 焊接设计。

性能对比

电子逸出功：较高（约 4.0 eV），起弧性能一般。

电弧稳定性：在 AC 焊接中表现出色，特别是在铝和镁合金焊接中。

烧损率：烧损率较低，适合 AC 焊接的正极周期。

放射性：无放射性，安全环保。

适用场景：专为 AC 焊接轻金属设计，不适合高电流 DCEN 焊接。

优缺点

优点：无放射性，适合 AC 焊接铝和镁合金。

缺点：起弧性能较差，不适合 DCEN 焊接。

应用场景

锆钨电极主要用于铝合金和镁合金的 AC-TIG 焊接，如船舶和航空制造。

2.3.5 钇钨电极

概述

钇钨电极（WY20，蓝色涂头）含有 1.8-2.2% 的氧化钇（ Y_2O_3 ），是一种较新的非放射性电极。

性能对比

电子逸出功：约为 2.7 eV，起弧性能良好。

电弧稳定性：电弧稳定性优于铈钨电极，接近钨钨电极。

烧损率：烧损率低，寿命较长。

放射性：无放射性，安全环保。

适用场景：适合 DCEN 和 AC 焊接，特别是在高精度场景。

优缺点

优点：无放射性，电弧稳定性好，寿命长。

版权与免责声明

缺点：成本较高，市场普及度较低。

应用场景

钨钨电极适用于高精度焊接，如航空航天和电子行业，但在工业中的应用尚未完全普及。



中钨智造 WT20 电极

第三章 钨钨电极的特性

钨钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊）和等离子焊接的核心材料，其独特的物理、化学、焊接性能以及放射性特性使其在工业应用中占据重要地位。本章将详细探讨钨钨电极的物理特性（包括高熔点、电子逸出功、导电性和机械性能）、化学特性（抗氧化性和化学稳定性）、焊接性能（起弧性能、电弧稳定性、烧损率和高负载表现）以及放射性特性（氧化钨的微量放射性、健康与环境影响及与非放射性电极的对比）。通过全面分析，旨在揭示钨钨电极在焊接工艺中的优势与局限性。

3.1 钨钨电极的物理特性

钨钨电极的物理特性是其在高温、高电流焊接环境中表现出色的基础。这些特性包括高熔点与热稳定性、低电子逸出功以及优异的导电性和机械性能，使其能够承受电弧焊接的极端条件。

3.1.1 钨钨电极的高熔点与热稳定性

钨钨电极以钨(W)为基体，钨是已知金属中熔点最高的材料之一，熔点约为 3422°C (6192° F)。这一特性使得钨钨电极能够在电弧焊接的高温环境中（电弧温度可达 6000-7000°C）保持结构完整性，避免熔化或显著变形。氧化钨 (ThO₂) 的掺杂（含量通常在 0.8-4.2%）进一步增强了电极的热稳定性。氧化钨具有高熔点（约 3300°C）和高热容，能够有效分散电弧产生的热量，减少电极尖端的局部过热。

版权与免责声明

在实际焊接中，钨钨电极的高熔点和热稳定性使其适合长时间连续焊接，尤其是在高电流直流负极（DCEN）焊接中。例如，在焊接钛合金或不锈钢等高熔点材料时，电极尖端能够维持稳定的形状，减少烧损和钨耗损。相比纯钨电极（WP），钨钨电极在高温下的性能更优，尖端不易形成熔球或裂纹，从而延长使用寿命。

此外，氧化钨的均匀分布对热稳定性至关重要。生产过程中通过粉末冶金技术确保氧化钨颗粒在钨基体中的均匀分散，避免局部高温导致的性能下降。热稳定性还与电极的晶粒结构密切相关，适当的热处理工艺（如高温烧结和退火）可优化晶粒尺寸，提高电极的抗热冲击能力。

3.1.2 钨钨电极的电子逸出功（2.63 eV）

电子逸出功（Work Function）是电子从材料表面逸出所需的最小能量，直接影响电极的起弧性能。钨钨电极的电子逸出功约为 2.63 eV，显著低于纯钨电极的 4.5 eV。这主要归功于氧化钨的掺杂，其低电子逸出功特性降低了电弧引发的电压需求，使钨钨电极在低电流下也能轻松起弧。

低电子逸出功的物理机制在于氧化钨的热电子发射能力。氧化钨在高温下（电弧环境中）能够释放大量自由电子，形成稳定的电子流，从而引发和维持电弧。这种特性在直流负极（DCEN）焊接中尤为重要，因为电子从电极流向工件，较低的逸出功可减少起弧时的能量消耗，提高焊接效率。

不同型号的钨钨电极（如 WT10、WT20、WT30、WT40）因氧化钨含量不同，电子逸出功略有差异。WT40（3.8-4.2% ThO₂）的电子逸出功最低（接近 2.6 eV），起弧性能最佳，适合高电流焊接；而 WT10（0.8-1.2% ThO₂）的电子逸出功略高，但仍远优于纯钨电极。这种差异使钨钨电极能够适应从低电流精密焊接到高电流重负荷焊接的多种场景。

在实际应用中，低电子逸出功还减少了电极尖端的热负荷，降低了烧损率。例如，在航空航天领域的钛合金焊接中，WT20 电极能够在低电压下快速起弧，确保焊缝的均匀性和精度。然而，电子逸出功的优势需通过适当的电极磨削角度（通常 15° -45°）来充分发挥，尖锐的尖端可进一步集中电子流，提高起弧效率。

3.1.3 钨钨电极的导电性与机械性能

钨钨电极的导电性得益于钨基体的高电导率（约为铜的 30%），使其能够高效传输焊接电流，减少电阻热损失。氧化钨的掺杂对导电性的影响较小，但在高电流下，钨钨电极的导电性仍优于纯钨电极，因为氧化钨颗粒改善了电子迁移效率。导电性的稳定性确保了电弧的连续性和一致性，特别是在高频起弧或脉冲焊接中。

机械性能方面，钨钨电极具有高硬度（维氏硬度约 400-450 HV）和优异的抗拉强度（约 1000 MPa）。这些特性源于钨的 BCC（体心立方）晶体结构和高密度（19.25 g/cm³）。氧化钨的掺杂通过细化晶粒和强化基体，进一步提高了电极的抗断裂性和耐磨性。这使得钨钨电极能够在高强度电弧冲击下保持结构完整性，适合重负荷焊接场景。

在生产过程中，机械性能的优化依赖于粉末冶金工艺和后续热处理。压制和烧结过程可控制晶粒尺寸，减少内部缺陷；而压延和磨削工艺则提高表面质量，降低应力集中点。实际使用中，电极的机械性能直接影响其耐久性。例如，在核工业的压力容器焊接中，WT30 或 WT40 电极需承受高电流和长时间运行，其高硬度和抗断裂性确保了电极的可靠性。

3.2 钍钨电极的化学特性

钍钨电极的化学特性主要体现在其抗氧化性和化学稳定性上，这些特性决定了电极在高温、复杂环境下的性能表现。

3.2.1 钍钨电极的抗氧化性

钍钨电极在高温电弧环境（6000-7000℃）中暴露于惰性气体（如氩气或氦气）保护下，其抗氧化性主要依赖于钨基体的化学惰性。钨在常温和高温下对氧气的反应性极低，仅在极高温（>1000℃）下形成挥发性氧化物（如 WO_3 ）。氧化钍的掺杂进一步增强了电极的抗氧化性，因为氧化钍本身是稳定的氧化物，不易与氧气进一步反应。

在 TIG 焊接中，惰性气体保护有效隔绝了氧气，防止电极表面氧化。然而，在电极磨削或储存过程中，若暴露于潮湿或氧气环境中，表面可能形成微量氧化层，影响起弧性能。因此，生产和储存时需确保电极表面清洁，常用真空包装或干燥环境储存。

抗氧化性的另一个关键因素是电极尖端的热稳定性。氧化钍颗粒在高温下能够稳定存在，避免钨基体的氧化挥发。相比纯钨电极，钍钨电极在高电流焊接中更能抵抗氧化烧损，延长使用寿命。例如，在不锈钢管道焊接中，WT20 电极能够在长时间运行中保持表面完整性，减少氧化物污染焊缝。

3.2.2 钍钨电极的化学稳定性

钍钨电极的化学稳定性体现在其对常见化学物质（如酸、碱和熔融金属）的耐腐蚀性。钨基体在常温下对大多数酸碱溶液（如盐酸、硫酸和氢氧化钠）具有极高的耐腐蚀性，仅在强氧化性环境中（如浓硝酸或高温氧化气氛）可能发生轻微腐蚀。氧化钍作为稳定的陶瓷材料，进一步增强了电极的化学稳定性，使其在焊接过程中不易与熔池中的金属或气体发生化学反应。

在实际应用中，钍钨电极的化学稳定性确保了焊缝的纯净性。例如，在钛合金焊接中，电极表面不会释放杂质污染熔池，保持焊缝的力学性能和耐腐蚀性。此外，钍钨电极对惰性保护气体（如氩气、氦气）无反应性，适合在多种焊接环境中使用。

然而，化学稳定性的局限性在于电极磨削或高温运行时可能释放的钍氧化物粉尘。钍氧化物在高温下可能挥发或以粉尘形式释放，尽管化学性质稳定，但其放射性要求严格的防护措施。生产和使用中需配备专用设备（如密闭砂轮机和通风系统）以减少粉尘扩散。

3.3 钍钨电极的焊接性能

钍钨电极的焊接性能是其在 TIG 焊和等离子焊接中广泛应用的核心优势，具体体现在起弧性能、电弧稳定性、烧损率和高负载电流下的表现。

版权与免责声明

3.3.1 钍钨电极的起弧性能

起弧性能是衡量电极引发电弧难易程度的关键指标，钍钨电极因其低电子逸出功(2.63 eV)而具有优异的起弧性能。在直流负极(DCEN)焊接中，电子从电极流向工件，低逸出功降低了起弧所需的电压(通常10-15 V)，使电弧能够在低电流下快速引发。这对于精密焊接(如薄板不锈钢或电子元件)尤为重要，可减少起弧时的热输入，避免材料过热。

不同型号的钍钨电极起弧性能略有差异。WT40因氧化钍含量最高(3.8-4.2%)，起弧性能最佳，适合高电流场景；WT10则更适合低电流精密焊接。起弧性能还受电极磨削角度和表面质量影响。尖锐的磨削角度(15°-30°)可集中电子流，提高起弧效率；而表面抛光则减少表面缺陷，降低起弧电压。

在实际应用中，钍钨电极的起弧性能显著优于纯钨电极。例如，在航空航天领域的钛合金焊接中，WT20电极能够在低电压下快速起弧，确保焊缝起始点的质量。脉冲TIG焊中，钍钨电极的快速起弧能力进一步提高了焊接效率和精度。

3.3.2 钍钨电极的电弧稳定性

电弧稳定性是钍钨电极的核心优势，直接影响焊缝质量和焊接效率。钍钨电极的电弧稳定性源于氧化钍的热电子发射能力和钨基体的高导电性。在DCEN焊接中，电弧集中且连续，波动小，飞溅少，适合高精度焊接。氧化钍颗粒在高温下释放稳定电子流，维持电弧的均匀性，即使在高电流或长时间运行中，电弧也不会漂移或中断。

不同型号的电极在电弧稳定性上有所差异。WT20和WT30因其适中的氧化钍含量(1.7-3.2%)，在中等至高电流(100-400 A)下电弧稳定性最佳，广泛用于工业焊接。WT40在超高电流(300-500 A)下仍能保持电弧稳定，适合重负荷场景，如核电站压力容器的焊接。

电弧稳定性还受保护气体和电极状态影响。氩气保护可提供稳定的电弧环境，而氦气或氩氦混合气则适合高热输入焊接。电极尖端的适当磨削(如20°-35°锥角)可进一步优化电弧集中度。例如，在石化行业的管道焊接中，WT20电极能够提供稳定的电弧，确保焊缝的均匀性和耐腐蚀性。

3.3.3 钍钨电极的电极烧损率

电极烧损率是衡量电极耐久性的重要指标，指电极在焊接过程中因高温、电弧冲击或氧化钍损耗导致的质量损失。钍钨电极的烧损率显著低于纯钨电极，主要得益于氧化钍的热稳定性和钨基体的高熔点。氧化钍在高温下形成稳定的电子发射层，减少钨基体的挥发和熔化。

不同型号的钍钨电极烧损率随氧化钍含量增加而降低。WT10(0.8-1.2% ThO₂)在低电流下烧损率较低，但在高电流下可能出现钍损耗；WT40(3.8-4.2% ThO₂)烧损率最低，适合超高电流和长时间连续焊接。例如，在船舶制造的厚板焊接中，WT40电极能够在高电流下运行数小时，尖端形状几乎无变化。

烧损率还受焊接参数和操作条件影响。适当的电流控制、保护气体流量(8-15 L/min)以及电极磨削角度可显著降低烧损率。在实际应用中，定期检查和重新磨削电极尖端可延长使用

寿命，同时减少钨粉尘的释放。

3.3.4 钨钨电极在高负载电流下的表现

钨钨电极在高负载电流（200–500 A）下的表现是其在重工业中的核心优势。WT30 和 WT40 电极因高氧化钨含量，能够承受高电流和高温的电弧冲击，保持电弧稳定性和低烧损率。这种特性使其适合焊接厚板和高熔点材料，如核工业的压力容器、航空航天的大型钛合金结构以及石化行业的耐腐蚀管道。

在高负载电流下，钨钨电极的热稳定性和机械强度确保了电极尖端的耐久性。例如，在核电站的压力容器焊接中，WT40 电极能够在 400 A 电流下连续运行，电弧集中且稳定，焊缝质量高。此外，钨钨电极在高电流下的低电子逸出功减少了起弧和维持电弧的能量消耗，提高了焊接效率。

然而，高负载电流下需注意电极的热负荷管理。过高的电流可能导致钨耗损加速，释放微量放射性粉尘。因此，建议使用较大的电极直径（3.2–6.4 mm）和适当的磨削角度（ 30° – 45° ），并配备高效冷却系统（如水冷焊枪）以降低电极温度。

3.4 钨钨电极的放射性特性

钨钨电极因含氧化钨（ ThO_2 ）而具有微量放射性，这一特性既是其性能优势的来源，也是其应用中的主要局限性。本节将探讨氧化钨的放射性特征、健康与环境影响以及与非放射性电极的对比。

3.4.1 氧化钨的微量放射性

氧化钨中的钍-232（ Th-232 ）是一种天然放射性元素，其半衰期约为 140 亿年，主要释放 α 粒子（4.01–4.08 MeV），伴随少量 β 粒子和 γ 射线。钨钨电极的放射性水平与氧化钨含量直接相关，WT10（0.8–1.2% ThO_2 ）的活度浓度最低（接近 1 Bq/g，符合豁免标准），而 WT40（3.8–4.2% ThO_2 ）的活度浓度最高，接近或略高于豁免标准。

在正常使用条件下（如 TIG 焊接），电极的放射性对操作人员的直接辐射影响较小，因为 α 粒子穿透力低（可被几厘米空气或皮肤阻挡）。然而，电极磨削时产生的粉尘和高温挥发的钨氧化物可能通过吸入或接触进入人体，造成内部辐射风险。 γ 射线的剂量率较低（通常 $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ），但长期暴露仍需关注。

生产过程中，钨钨电极的放射性管理受到严格监管。国际标准（如 ICRP Publication 103）和中国标准（如 GB 18871–2002）规定了钍-232 的豁免活度浓度和防护要求。生产车间需配备 X- γ 辐射剂量率检测仪和 α 、 β 表面污染检测仪，定期监测环境辐射水平。

3.4.2 健康与环境影响

钨钨电极的健康影响主要来自磨削和焊接过程中释放的放射性粉尘。 α 粒子若通过吸入进入肺部，可能引发长期健康风险，如肺癌或组织损伤。研究表明，长期暴露于钨钨粉尘的工人可能面临较高的辐射剂量（年有效剂量约 0.1–1 mSv，远低于公众年限值 1 mSv）。因此，操作人员需佩戴防护口罩，使用专用砂轮机和高效通风设备。

版权与免责声明

环境影响方面，钍钨电极生产和使用中的废料（包括磨削粉尘、废水和废电极）需妥善处理。钍-232 的放射性废物需按照《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》进行分类储存和处置，避免污染土壤和水体。企业需配备专用废物处理设施，如密闭收集系统和放射性废物存储库。

实际案例中，欧美国家已逐步限制钍钨电极的使用，推广非放射性电极以降低健康和环境风险。中国作为钨电极生产大国，近年来也加强了放射性防护措施，部分企业采用自动化磨削设备和密闭生产车间，显著降低了粉尘排放。

3.4.3 钍钨电极的与非放射性电极的对比

非放射性电极（如铈钨、铈钨、钨钨和钨钨电极）是钍钨电极的主要替代品，其主要优势在于无放射性风险。以下为详细对比：

铈钨电极（WC20）：含有 1.8-2.2%氧化铈，电子逸出功约 2.7 eV，起弧性能和电弧稳定性接近 WT20，烧损率略高，无放射性，广泛用于医疗和食品行业。

铈钨电极（WL20）：含有 1.8-2.0%氧化铈，电子逸出功约 2.6-2.8 eV，电弧稳定性和寿命优于铈钨电极，适合高精度和重负荷焊接，无放射性。

钨钨电极（WZ8）：含有 0.8%氧化钨，专为 AC 焊接铝和镁合金设计，电弧稳定性好，但起弧性能和 DCEN 焊接性能不如钍钨电极，无放射性。

钨钨电极（WY20）：含有 1.8-2.2%氧化钨，性能接近铈钨电极，适合高精度焊接，但成本较高，市场普及度较低，无放射性。

钍钨电极的优势在于其优异的起弧性能、电弧稳定性和低烧损率，特别是在高电流和重负荷场景中。然而，其放射性问题使其在环保和健康要求高的行业中逐渐被替代。例如，在欧洲，铈钨电极已取代钍钨电极成为主流，而在中国，钍钨电极仍因成本优势和性能优异在重工业中广泛使用。

3.5 中钨智造钍钨电极 MSDS

钍钨电极材料安全数据表（MSDS）

一、化学品标识

化学品中文名称：钍钨电极

化学品俗名：钍钨棒、钍钨焊条

化学品英文名称：Thorium Tungsten Electrode

CAS 号：

钨（W）：7440-33-7

氧化钍（ ThO_2 ）：1314-20-1

产品型号：WT10、WT20、WT30、WT40

二、成分/组成信息

钨（W）：95.8-99.2%

氧化钍（ ThO_2 ）：0.8-4.2%

版权与免责声明

杂质（Fe、Ni、O、C等）：<0.05%

三、危险性概述

危险类别：低比活度放射性物质（LSA-I），具轻度放射性风险，粉尘具刺激性。

燃爆危险：本品不燃，无爆炸风险。

健康危害：

吸入：磨削或加工产生的钽粉尘可能刺激呼吸道，长期低剂量暴露可能增加肺部健康风险。

皮肤接触：可能引起轻微刺激。

眼睛接触：粉尘可能引起眼部不适或炎症。

食入：误食可能导致胃肠道不适，需立即就医。

环境危害：含钽废料若处理不当，可能污染土壤和水体，需按放射性废物管理。

法规依据：GB 18871-2002、ICRP Publication 103、IAEA SSR-6。

四、急救措施

皮肤接触：

立即脱去污染的衣物，用肥皂水和大量清水冲洗皮肤至少 15 分钟。

如出现刺激或不适，立即就医。

眼睛接触：

提起眼睑，用流动清水或生理盐水冲洗至少 15 分钟。

如不适持续，立即就医。

吸入：

迅速将受影响人员转移至空气新鲜处，保持呼吸道通畅。

如出现呼吸困难，给予氧气支持；如呼吸停止，立即进行人工呼吸。

立即就医，告知医务人员可能暴露于含钽粉尘。

食入：

饮用足量温水，诱导催吐（若患者清醒）。

立即就医，携带本 MSDS 提供给医务人员。

注意：急救人员需佩戴防护装备（如防尘口罩、手套），避免二次暴露。

五、消防措施

危险特性：本品不燃，无爆炸风险。

灭火方法：不适用。若周围发生火灾，使用干粉、泡沫或二氧化碳灭火剂处理。

消防注意事项：

消防人员需佩戴防护服和正压呼吸器。

防止含钽粉尘因火灾扩散，污染环境。

六、泄漏应急处理

版权与法律责任声明

泄漏处理:

隔离泄漏区域，限制非授权人员进入，标示“放射性物质”警示。

应急人员佩戴防护服、防尘口罩和手套，使用湿式清扫法收集泄漏电极或粉尘，装入密封容器。

使用 X- γ 辐射剂量率检测仪（如 AT1123）和 α 、 β 表面污染检测仪（如 XH-3206）评估泄漏范围，剂量率 $>0.1 \mu\text{Sv/h}$ 或表面污染 $>0.4 \text{Bq/cm}^2$ 需上报核安全部门。

废物处理:

泄漏物按放射性废物处理，装入专用容器，活度浓度 $>1 \text{Bq/g}$ 需固化（如混入水泥基体）并送至专业设施。

污染区域需用清水清洗，废水活度 $<0.1 \text{Bq/L}$ 后方可排放。

报告：泄漏事故需在 24 小时内向当地环保和核安全部门报告，提交事故详情和处置措施。

七、操作处置与储存

操作注意事项:

防护措施：操作人员需佩戴防护服、防尘口罩和手套，工作区域配备局部排风罩（风速 $0.5-1 \text{m/s}$ ）和 HEPA 过滤器（捕集效率 $>99.9\%$ ）。

磨削要求：使用专用砂轮机，配备负压吸尘系统，防止钽粉尘扩散。

环境监测：定期检测工作区域的 X- γ 剂量率（ $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ ）和 α 、 β 表面污染（ $<0.4 \text{Bq/cm}^2$ ），符合 GB 18871-2002 要求。

培训：操作人员需接受辐射安全培训，了解钽-232 的健康风险。

储存注意事项:

储存于干燥（湿度 $<60\%$ ）、通风良好的专用仓库，温度 $10-30^\circ\text{C}$ 。

使用密封不锈钢或塑料容器，标示放射性警示标识。

电极分类存放，废弃电极单独储存于放射性废物容器。

定期检查储存区域辐射水平，记录存档至少 5 年。

八、接触控制/个人防护

职业暴露限值:

公众：年有效剂量 $<1 \text{mSv}$ （ICRP 103）。

职业暴露：年有效剂量 $<20 \text{mSv}$ ，五年平均 $<4 \text{mSv}$ （GB 18871-2002）。

环境限值：工作区域剂量率 $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ ，表面污染 $<0.4 \text{Bq/cm}^2$ 。

工程控制:

生产和使用区域需配备密闭罩、HEPA 过滤器和负压通风系统。

磨削设备需连接粉尘收集装置，捕集效率 $>99.9\%$ 。

个人防护装备:

呼吸防护：佩戴 KN95 或 FFP2 级防尘口罩，防止吸入钽粉尘。

眼部防护：使用防护眼镜，防止粉尘进入眼睛。

版权与免责声明

皮肤防护：穿长袖防护服和手套，避免皮肤接触。

监测：操作人员佩戴个人剂量计，记录累积剂量，每年健康检查。

卫生措施：

操作后用肥皂水洗手，禁止在工作区域饮食或吸烟。

工作服与日常衣物分开存放，定期清洗。

九、理化特性

外观与性状：银灰色金属棒，端部涂有颜色标识（WT10 黄色，WT20 红色，WT30 紫色，WT40 橙黄色）。

熔点：3422°C（钨基体）。

密度：18.5-19.0 g/cm³（95-98%理论密度）。

硬度：350-450 HV。

溶解性：不溶于水，溶于强酸（如硝酸-氢氟酸混合液）。

放射性：含钷-232，释放 α 粒子（4.01-4.08 MeV）及少量 β 、 γ 射线，活度浓度 1-4 Bq/g。

十、稳定性和反应性

稳定性：在常温下稳定，高温（>2000°C）可能释放微量氧化钷颗粒。

反应性：与强酸（如硝酸、氢氟酸）反应，生成钷化合物。与强氧化剂接触可能引发轻微反应。

禁配物：避免与酸性物质、易燃物混存。

十一、毒理学资料

急性毒性：无显著急性毒性，LD50 数据暂缺。

慢性毒性：长期吸入钷粉尘可能增加肺部健康风险（年有效剂量<1 mSv 为安全范围）。

致癌性：钷-232 被 IARC 列为 1 类致癌物，长期低剂量暴露可能增加肺癌风险，需严格防护。

生殖毒性：无明确证据表明生殖毒性。

靶器官：呼吸系统、皮肤、眼睛。

十二、生态学资料

环境影响：含钷废料若未经处理，可能污染土壤和水体，影响生态系统。

生物累积：钷化合物可能通过水体进入食物链，需严格控制排放（废水活度<0.1 Bq/L）。

处理要求：按《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》处理，废料活度>1 Bq/g 需固化并送专业设施。

十三、废弃处置

废弃分类：废弃钷钨电极及粉尘为低比活度放射性废物（LSA-I）。

处置方法：

收集于专用密封容器，标示“放射性废物”。

活度浓度>1 Bq/g 的废料需混入水泥或树脂基体固化，送至专业放射性废物处置机构（如中国核工业集团）。

活度浓度<1 Bq/g 的废料可按普通废物处理，需经核安全部门批准。

版权与免责声明

排放控制：废水需通过沉淀和离子交换处理，活度 <0.1 Bq/L 后排放。

记录：废弃处置需记录批次、数量、活度浓度和处置日期，存档至少 5 年。

十四、运输信息

运输分类：低比活度放射性物质（LSA-I），符合 IAEA SSR-6 和 GB 11806-2004 要求。

包装要求：

使用 Type A 包装（不锈钢或高强度塑料箱，厚度 >2 mm），标示放射性警示标识。

包装表面剂量率 <0.1 μ Sv/h，表面污染 <0.4 Bq/cm²。

运输注意事项：

使用专用货车或货舱，配备防震固定装置和辐射检测仪（如 RadEye PRD）。

运输人员需接受辐射安全培训，佩戴个人剂量计。

运输路线避开人口密集区，提前向核安全部门申报。

国际运输：需提供英文版放射性物质运输证书，符合 IATA 或 IMDG 规范。

十五、法规信息

国际法规：

ICRP Publication 103 (2007)：公众年有效剂量 <1 mSv，职业暴露 <20 mSv。

IAEA SSR-6 (2018)：放射性物质运输包装和限值要求。

EU 2013/59/Euratom：生产和使用环境剂量率 <0.1 μ Sv/h，表面污染 <0.4 Bq/cm²。

国内法规：

GB 18871-2002：《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》，环境剂量率 <0.05 μ Sv/h，废物活度 <1 Bq/g。

GB/T 4187-2017：《钨极惰性气体保护电弧焊及等离子焊用钨电极》，规定电极成分和性能。

《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》：要求年度辐射监测报告和信息公开。

企业合规：

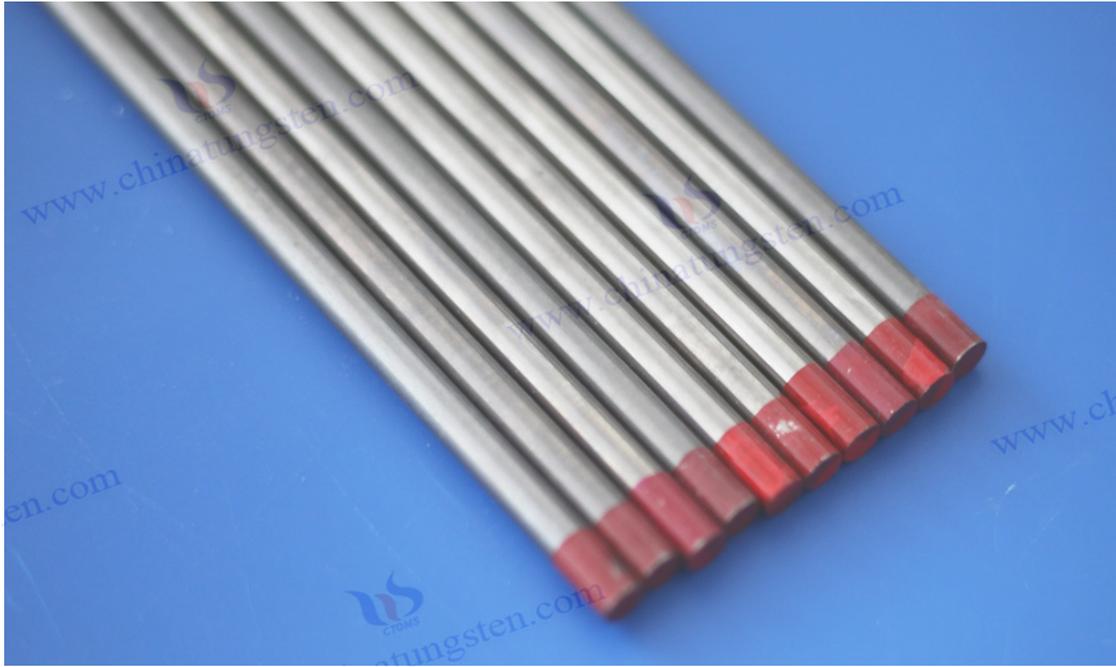
需向国家核安全局登记，获取放射性物质操作许可。

通过 ISO 14001（环境管理）和 ISO 45001（职业健康安全）认证。

十六、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 WT20 电极

第四章 钍钨电极的制备生产工艺与技术

钍钨电极的制备是一项复杂的工艺，涉及高纯度原料的选取、精密的粉末冶金技术、成型加工以及严格的质量控制和放射性防护措施。其生产工艺直接决定了电极的性能，包括电弧稳定性、烧损率和使用寿命。本章将详细探讨钍钨电极的制备生产工艺与技术，涵盖原料准备、粉末冶金工艺、压延与磨抛工艺、质量控制以及放射性污染防控。

4.1 钍钨电极的原料准备

钍钨电极的性能高度依赖于原料的质量和纯度。钨粉和氧化钍 (ThO_2) 是制备钍钨电极的主要原料，其选取、纯化和掺杂工艺对电极的化学成分、微观结构和最终性能至关重要。

4.1.1 钨粉的选取与纯化

钨粉是钍钨电极的主要成分，占电极质量的 95.8%–99.2%。钨是一种高熔点 (3422°C)、高密度 (19.25 g/cm^3) 的难熔金属，其粉末形态直接影响后续粉末冶金工艺的成形性和电极的性能。

钨粉的选取

钨粉的选取需考虑粒度、纯度和形貌。工业上常用的钨粉粒度范围为 $1\text{--}10 \mu\text{m}$ ，过细的粉末 ($<1 \mu\text{m}$) 可能导致烧结过程中过度收缩，而过粗的粉末 ($>10 \mu\text{m}$) 则可能降低电极的致密度和均匀性。粒度分布通常要求均匀，以确保粉末在压制和烧结过程中具有良好的流动性。

纯度是钨粉选取的关键指标。钍钨电极要求钨粉的纯度达到 99.95% 以上，以减少杂质（如铁、镍、氧、碳等）对电极导电性和焊接性能的影响。杂质含量过高可能导致电弧不稳定或

版权与免责声明

电极烧损加剧。例如，氧含量超过 0.02% 可能在高温下形成挥发性氧化物 (WO_3)，降低电极寿命。

钨粉的形貌也需考虑。通常选用近球形或多面体形貌的钨粉，因其具有较高的堆积密度和流动性，有利于压制成形的均匀性。生产中常用化学气相沉积 (CVD) 或氢气还原法制备高纯度钨粉，确保粉末质量符合国际标准 (如 ISO 6848:2015)。

钨粉的纯化

钨粉的纯化工艺旨在去除原料中的杂质，提高纯度和性能。常见的纯化方法包括：

氢气还原法：将钨酸 (H_2WO_4) 或氧化钨 (WO_3) 在高温 (800–1000°C) 氢气气氛下还原为金属钨粉。此方法可有效去除氧和部分挥发性杂质，获得高纯度钨粉。

酸洗工艺：使用稀盐酸或硝酸溶液清洗钨粉，去除表面吸附的铁、镍等金属杂质。酸洗后需用去离子水反复冲洗，以避免酸残留。

高温真空处理：在真空环境中 (10^{-4} Pa) 对钨粉进行高温 (1200–1500°C) 处理，进一步去除残余氧和碳，确保纯度达到 99.99%。

纯化后的钨粉需进行粒度筛分 (通常通过振动筛或气流分级设备)，确保粒度分布符合要求。筛分后，钨粉需储存在干燥、真空或惰性气体环境中，以防止氧化或吸湿。

4.1.2 氧化钍的掺杂工艺

氧化钍 (ThO_2) 是钍钨电极的关键掺杂物，其含量 (0.8–4.2%) 直接影响电极的电子逸出功和电弧稳定性。氧化钍的掺杂工艺需确保其在钨基体中的均匀分布，同时控制其放射性风险。

氧化钍的选取

氧化钍粉末需具有高纯度 (>99.9%) 和适当的粒度 (0.5–2 μm)。过细的氧化钍颗粒可能在烧结过程中团聚，导致分布不均；过粗的颗粒则可能降低电极的机械强度。氧化钍通常通过钍盐 (如硝酸钍) 热分解或沉淀法制备，需严格控制杂质含量 (如铀、铁等)，以避免影响电极性能。

由于氧化钍具有微量放射性 (钍-232, 半衰期 140 亿年)，其采购和储存需符合放射性物质管理规定 (如 GB 18871–2002)。供应商需提供放射性活度检测报告，确保活度浓度低于豁免标准 (1 Bq/g)。

掺杂工艺

氧化钍的掺杂工艺通常在混料阶段进行，主要方法包括：

干法混料：将钨粉与氧化钍粉末在高速混合机 (如 V 型混料机或三维混料机) 中混合，混合时间通常为 4–8 小时。混料过程中需添加少量有机黏结剂 (如聚乙烯醇, PVA) 以提高粉末的流动性，同时避免氧化钍颗粒团聚。

湿法混料：将钨粉和氧化钍粉末分散于去离子水或乙醇中，通过球磨机 (通常使用氧化锆球) 进行湿法混合。湿法混料可提高均匀性，但需后续干燥 (100–150°C, 真空或惰性气氛) 以

版权与免责声明

去除溶剂。

化学共沉淀法：在钨酸盐溶液中加入硝酸钍，通过共沉淀形成钨-钍复合物，再经高温还原制备掺杂粉末。此方法可实现原子级均匀掺杂，但成本较高，常用于高端电极生产。

掺杂过程中需严格控制氧化钍的含量，WT10(0.8-1.2%)、WT20(1.7-2.2%)、WT30(2.8-3.2%)和WT40(3.8-4.2%)的配比需精确称量（精度±0.01%）。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光谱（ICP）检测，确保成分均匀性。

放射性防护

氧化钍掺杂过程中需采取严格的放射性防护措施。操作人员需佩戴防护服和口罩，混料设备需配备密闭罩和通风系统，防止粉尘扩散。混合后的粉末需储存在密封容器中，并标明放射性警示标识。

4.2 钍钨电极的粉末冶金工艺

粉末冶金是钍钨电极制备的核心工艺，通过混料、压制、烧结和热处理等步骤将钨粉和氧化钍粉末转化为高性能电极棒。这一工艺需精确控制各环节的参数，以确保电极的致密度、晶粒结构和性能一致性。

4.2.1 混料与压制

混料

混料是粉末冶金的第一步，旨在确保钨粉和氧化钍的均匀分布。混料设备通常为高速混料机或球磨机，混料时间和转速需根据粉末粒度和配比调整。例如，WT20电极（1.7-2.2% ThO₂）需混料6-8小时，转速200-300 rpm，以避免氧化钍颗粒团聚。

混料过程中需添加少量黏结剂（如PVA或聚乙二醇，PEG，0.5-1%质量比）以提高粉末的流动性。混料完成后，通过激光粒度分析仪检测粉末的粒度分布，确保D50（中位粒径）在2-5 μm范围内。

压制

压制工艺将混合粉末成型为初坯，通常采用冷等静压（CIP）或模压成型。冷等静压是主流方法，通过高压（100-200 MPa）将粉末压制成棒状或板状初坯。压制过程中需控制压力和保压时间（1-3分钟），以确保初坯的密度均匀（约为理论密度的60-70%）。

压制设备需配备精密模具，模具材料通常为硬质合金或不锈钢，以承受高压并确保尺寸精度。初坯的直径和长度根据最终电极规格（如1.6 mm、2.4 mm、3.2 mm）预留加工余量。压制后，初坯需进行初步检测（如外观检查和密度测试），剔除有裂纹或缺陷的坯料。

4.2.2 烧结过程

烧结是粉末冶金的关键步骤，通过高温处理使初坯致密化并形成稳定的微观结构。钍钨电极的烧结通常在氢气或真空气氛下进行，以防止氧化。

烧结设备与条件

烧结炉通常为高温电阻炉或感应炉，工作温度范围为 2000–2800°C。烧结过程分为三个阶段：

低温预烧结（800–1200°C）：去除黏结剂和挥发性杂质，坯收缩率约为 5–10%。

高温烧结（2200–2800°C）：钨颗粒发生扩散和结合，氧化钨颗粒均匀分布在钨基体中，坯料密度达到理论密度的 95–98%。

保温与冷却（1800–1000°C）：通过控制保温时间（2–4 小时）和冷却速率（10–20°C/min），优化晶粒结构，减少内部应力。

烧结气氛需严格控制，氢气纯度要求 >99.999%，以避免氧气或氮气污染。真空烧结（ 10^{-4} Pa）可进一步降低杂质含量，适合高端电极生产。

微观结构控制

烧结过程中，氧化钨颗粒在钨基体中的分布和晶粒尺寸是关键。适当的烧结温度和时间可使氧化钨颗粒均匀分布（粒径 0.5–2 μm ），避免团聚或偏析。钨基体的晶粒尺寸通常控制在 10–50 μm ，过大的晶粒可能降低机械强度，过小的晶粒则可能影响导电性。

烧结后的坯料需通过金相显微镜和扫描电子显微镜（SEM）分析微观结构，确保无裂纹、孔隙或氧化钨偏析。密度测试（阿基米德法）需确认坯料密度达到 18.5–19.0 g/cm^3 。

4.2.3 热处理与晶粒控制

热处理是烧结后的重要步骤，旨在优化电极的晶粒结构、机械性能和焊接性能。热处理通常包括退火和晶粒控制两个阶段。

退火

退火在氢气或真空气氛下进行，温度为 1200–1600°C，保温时间 1–2 小时。退火可消除烧结过程中产生的内部应力，改善电极的延展性和抗断裂性。退火后，电极的硬度略有下降（约 350–400 HV），但韧性显著提高，适合后续压延加工。

晶粒控制

晶粒控制通过精确的热处理工艺调整钨基体的晶粒尺寸。较小的晶粒（10–20 μm ）可提高电极的机械强度，适合高电流焊接；较大的晶粒（30–50 μm ）则有利于导电性和电弧稳定性。晶粒尺寸的控制依赖于：

烧结温度：高温（>2600°C）促进晶粒生长，低温（<2200°C）抑制晶粒生长。

掺杂物作用：氧化钨颗粒可钉扎晶界，抑制晶粒过度生长，确保均匀的微观结构。

冷却速率：快速冷却（20–30°C/min）可固定细小晶粒，慢速冷却（5–10°C/min）则形成较大晶粒。

热处理后的坯料需通过 X 射线衍射（XRD）和金相分析验证晶粒结构，确保符合 WT10、WT20、WT30 或 WT40 的性能要求。

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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

4.3 钨电极的压延与磨抛工艺

压延与磨抛工艺将烧结坯料加工成符合规格的电极棒，确保尺寸精度、表面质量和性能一致性。

4.3.1 电极棒的成型

压延是电极棒成型的主要工艺，通过多道次热压延或冷压延将烧结坯料加工成所需直径（0.5-10 mm）。热压延通常在 1400-1800°C 进行，使用多辊压延机逐步减小坯料直径。每次压延的变形量控制在 10-20%，以避免裂纹或内部应力集中。

压延工艺

设备：多辊压延机或旋转锻造机，配备精密模具和加热系统。

工艺参数：温度 1400-1800°C，压延速度 0.5-2 m/min，变形量 10-20%/道次。

气氛控制：氢气或真空气氛，防止氧化。

压延后的电极棒需进行直线度校正（通过矫直机）和初步尺寸检测。直径公差通常控制在 ± 0.05 mm，长度公差为 ± 1 mm。不同型号的电极（如 WT20、WT40）需根据最终用途选择合适的直径，如 1.6 mm 用于低电流焊接，4.8 mm 用于高电流焊接。

切割与预加工

压延后的长棒需切割成标准长度（如 150 mm 或 175 mm），使用金刚石切割机或激光切割机以确保切口平整。切割后，电极棒需进行初步磨削，去除表面氧化层和毛刺，为后续磨抛工艺做准备。

4.3.2 表面抛光与精度控制

表面抛光是钨电极制备的最后一步，旨在提高表面质量和尺寸精度，减少焊接中的电弧漂移和烧损。

磨削与抛光

粗磨：使用金刚石砂轮（粒度 80-120 目）去除表面缺陷，表面粗糙度达到 $Ra\ 1.6-3.2\ \mu m$ 。

精磨：使用细粒度砂轮（200-400 目）进一步平滑表面，粗糙度达到 $Ra\ 0.8-1.6\ \mu m$ 。

抛光：使用抛光膏和高速旋转布轮将表面粗糙度降至 $Ra\ 0.2-0.4\ \mu m$ ，确保镜面效果。

抛光过程中需使用专用磨削设备，配备水冷系统以降低温度，防止钨基体和氧化钨的热损伤。磨削粉尘需通过密闭罩和高效过滤系统收集，防止放射性污染。

精度控制

直径精度：使用激光测径仪检测直径，公差控制在 ± 0.02 mm。

直线度：通过光学投影仪或激光扫描仪检测，确保直线度偏差 < 0.1 mm/m。

表面质量：通过显微镜检查表面，无裂纹、划痕或氧化物残留。

抛光后的电极需进行最终清洗（超声波清洗或化学清洗），去除表面油污和粉尘，随后真空

包装以防止氧化。

4.4 钨电极的质量控制

质量控制贯穿钨电极制备的每个环节，涵盖成分均匀性、尺寸精度和表面质量，确保电极符合国际标准（如 ISO 6848:2015）和客户要求。

4.4.1 成分均匀性检测

成分均匀性直接影响电极的焊接性能和一致性。检测方法包括：

X 射线荧光光谱（XRF）：无损检测钨和氧化钨的含量，精度 $\pm 0.01\%$ 。例如，WT20 电极需确保氧化钨含量在 1.7-2.2% 范围内。

电感耦合等离子体光谱（ICP-OES）：高精度分析杂质元素（如 Fe、Ni、O、C），确保总杂质含量 $< 0.05\%$ 。

扫描电子显微镜（SEM-EDS）：分析氧化钨颗粒的分布和粒径，确认无团聚或偏析。

检测频率通常为每批次抽样 10-20%，不合格批次需重新混料或烧结。

4.4.2 尺寸与表面质量检测

尺寸和表面质量检测确保电极的几何精度和焊接性能。检测方法包括：

尺寸检测：使用激光测径仪和千分尺测量直径和长度，公差符合标准（如 GB/T 4187-2017）。

直线度检测：通过激光扫描仪或光学投影仪测量，确保偏差 $< 0.1 \text{ mm/m}$ 。

表面质量检测：使用光学显微镜或表面粗糙度仪检查表面，粗糙度 $Ra < 0.4 \mu\text{m}$ ，无裂纹、划痕或氧化物。

不合格电极需返工（重新磨削或抛光）或报废，检测记录需存档以追溯质量问题。

4.5 钨电极的放射性污染防控

氧化钨的微量放射性（钨-232）是钨电极生产中的主要挑战，需通过严格的废物管理、防护措施和废物处理降低健康和环境风险。

4.5.1 生产过程中的放射性废物管理

生产过程中产生的放射性废物包括粉尘、废料和废水。管理措施包括：

粉尘收集：混料、磨削和抛光设备需配备密闭罩和高效过滤系统（如 HEPA 过滤器），捕集率 $> 99.9\%$ 。

废料分类：烧结和切割产生的废料需分类收集，储存在标有放射性警示的密封容器中。

废物监测：使用 X- γ 辐射剂量率检测仪（AT1123 型）和 α 、 β 表面污染检测仪（XH-3206 型）定期监测废物活度，确保低于豁免标准（ 1 Bq/g ）。

废物需按照《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》进行登记和报告。

版权与免责声明

4.5.2 防护措施与设备要求

防护措施旨在保护操作人员和环境免受辐射危害：

个人防护：操作人员需佩戴防护服、防尘口罩和手套，定期接受辐射剂量监测（年有效剂量 <1 mSv）。

设备要求：混料机、烧结炉和磨削设备需配备密闭罩和通风系统，废气排放需通过活性炭过滤器处理。

工作环境：生产车间需安装辐射监测仪，实时监测 X- γ 剂量率（ <0.1 μ Sv/h）和 α 、 β 表面污染。

4.5.3 废水与固体废物的处理

废水处理：混料和清洗产生的废水需通过沉淀、过滤和离子交换处理，去除钨化合物，废水活度需低于 0.1 Bq/L 后排放。

固体废物处理：粉尘和废料需固化（如混入水泥基体）后储存在专用放射性废物库中，定期交由专业机构处置。

记录与监管：废物处理需记录活度、重量和处置方式，接受环保部门的定期检查。



中钨智造 WT20 电极

1

第五章 钨电极的用途

钨电极因其优异的物理、化学和焊接性能，在工业领域中具有广泛的应用，尤其是在钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接以及其他特殊工业场景中。钨电极的低电子逸出功、高电弧稳定性和低烧损率使其成为高精度和高负荷焊接的首选材料。然而，由于其含氧化钍(ThO_2)带来的微量放射性，应用场景受到一定限制，促使非放射性电极的研发和替代趋势。本章将详细探讨钨电极在焊接领域的应用、其他工业用途以及其应用场景的局限性。

5.1 钨电极在焊接领域的应用

钨电极在焊接领域中的应用主要集中在钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接以及直流负极（DCEN）焊接工艺中。其优异的起弧性能和电弧稳定性使其成为焊接高熔点和难熔金属的理想选择，广泛应用于航空航天、核工业、石化、汽车制造和船舶工业等领域。

5.1.1 钨极氩弧焊（TIG 焊）

钨极氩弧焊（TIG 焊，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方法，因其高精度和高质量焊缝而广泛应用于多种工业场景。钨电极在 TIG 焊中占据主导地位，尤其是在直流负极（DCEN）和某些交流（AC）焊接工艺中。

性能优势

钨电极的低电子逸出功（约 2.63 eV）使其在低电压下即可轻松引发电弧，减少起弧时的热输入，适合精密焊接。其电弧稳定性高，能够在宽电流范围（50-500 A）内维持集中且连续的电弧，减少飞溅和焊缝缺陷。此外，钨电极的低烧损率延长了使用寿命，降低了生产成本。不同型号的钨电极（如 WT10、WT20、WT30、WT40）可根据电流和材料需求选择：

WT10 (0.8-1.2% ThO_2): 适合低电流（50-150 A）精密焊接，如薄板不锈钢或铜合金。

WT20 (1.7-2.2% ThO_2): 适用于中等至高电流（100-300 A），是 TIG 焊中最常用的型号。

WT30/WT40 (2.8-4.2% ThO_2): 适合高电流（200-500 A）重负荷焊接，如厚板钛合金或镍合金。

应用场景

航空航天：TIG 焊使用钨电极（通常为 WT20 或 WT30）焊接钛合金（如 Ti-6Al-4V）和镍基合金（如 Inconel 718），用于制造飞机机身、发动机叶片和涡轮部件。这些部件要求焊缝具有高强度、无缺陷和优异的耐腐蚀性，钨电极的稳定电弧和低烧损率能够确保焊缝质量。例如，在波音 787 飞机的制造中，WT20 电极被用于钛合金机身结构的 TIG 焊，确保焊缝的力学性能和疲劳寿命。

核工业：钨电极在核电站压力容器和管道的 TIG 焊中广泛应用。WT30 或 WT40 电极能够在高电流下提供稳定的电弧，焊接厚壁不锈钢（如 316L）或镍合金，确保焊缝无气孔和裂纹。例如，中国核工业的 AP1000 反应堆压力容器的制造中，钨电极被用于关键部件的焊接。

石化工业：钨电极用于焊接耐腐蚀管道和容器，如不锈钢（304、316）和镍基合金

版权与免责声明

(Hastelloy)。WT20 电极在中高电流下的电弧稳定性确保了焊缝的均匀性和耐腐蚀性，满足苛刻的化工环境需求。

汽车制造：钍钨电极用于高强度钢和铝合金的 TIG 焊，如汽车悬架和排气系统的制造。WT10 电极在低电流下适合焊接薄壁部件，减少热变形和材料损伤。

操作注意事项

在 TIG 焊中使用钍钨电极时，需根据材料和电流选择合适的电极直径（1.6-6.4 mm）和磨削角度（15° -45°）。尖锐的磨削角度（20° -30°）可集中电弧，提高精度；较大的角度（30° -45°）适合高电流焊接，增强耐久性。保护气体流量（8-15 L/min）需严格控制，以避免电弧漂移或电极氧化。磨削电极时需使用专用砂轮机，并配备粉尘收集装置以减少放射性风险。

5.1.2 等离子焊接

等离子焊接（Plasma Arc Welding, PAW）是一种利用约束电弧产生高温等离子流的焊接方法，具有更高的能量密度和焊接精度，适合高熔点材料的精密焊接。钍钨电极在等离子焊接中表现出色，因其能够在高温高压等离子环境中维持稳定的电弧。

性能优势

等离子焊接的电弧温度可达 15000-20000°C，对电极的热稳定性和耐烧损性要求极高。钍钨电极的高熔点（3422°C）和氧化钍的热电子发射能力使其能够承受这种极端条件。WT20 和 WT30 电极因其适中的氧化钍含量（1.7-3.2%）和低烧损率，成为等离子焊接的首选。电极的低电子逸出功确保了在高频起弧或脉冲模式下快速引发电弧，电弧稳定性则保证了焊缝的均匀性和深度。

应用场景

航空航天：等离子焊接使用钍钨电极焊接钛合金和镍合金部件，如火箭发动机喷嘴和航空涡轮叶片。WT20 电极能够在高能量密度下提供稳定的等离子弧，确保焊缝深度和强度。例如，SpaceX 的猎鹰火箭燃料箱焊接中，钍钨电极被用于精密等离子焊接。

医疗设备：等离子焊接用于制造不锈钢或钛合金医疗器械，如手术器械和植入物。WT10 电极在低电流等离子焊接中适合薄壁材料，减少热影响区（HAZ），确保表面质量。

电子工业：钍钨电极在微型等离子焊接中用于电子元件的连接，如半导体封装和微型电路板。WT10 或 WT20 电极能够提供精细的电弧控制，满足高精度要求。

操作注意事项

等离子焊接中，钍钨电极需使用较小的直径（1.0-2.4 mm）以适应高能量密度的等离子弧。电极尖端需磨削成尖锐角度（15° -25°）以集中电弧，保护气体（氩气或氩氦混合气）流量需精确控制（2-5 L/min）。由于等离子焊接的高温环境，电极需配备水冷焊枪以降低热负荷，延长使用寿命。

版权与免责声明

5.1.3 直流负极焊接（碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金等）

直流负极（DCEN）焊接是钨钨电极最常见的应用模式，电子从电极流向工件，热量主要集中在工件上，减少电极的热负荷。这种模式适合焊接多种金属材料，包括碳钢、不锈钢、镍合金和钛合金。

性能优势

在 DCEN 模式下，钨钨电极的低电子逸出功和电弧稳定性使其能够快速引发电弧并维持集中、连续的电弧流。不同型号的电极适用于不同电流和材料：

碳钢：WT10 或 WT20 电极在低至中等电流（50-200 A）下适合焊接碳钢结构件，如桥梁和建筑框架。

不锈钢：WT20 电极在 100-300 A 电流下提供稳定的电弧，适合焊接 304、316 等不锈钢，广泛用于石化管道和食品加工设备。

镍合金：WT30 或 WT40 电极在高电流（200-400 A）下适合焊接 Inconel 或 Hastelloy，用于航空航天和化工设备的耐腐蚀部件。

钛合金：WT20 或 WT30 电极在中等至高电流下适合焊接钛合金（如 Ti-6Al-4V），用于航空航天和医疗领域，要求高精度和无氧环境。

钨钨电极的低烧损率确保了长时间焊接的可靠性，特别是在厚板或高熔点材料的焊接中。例如，WT40 电极在 400 A 电流下能够连续运行数小时，电极尖端形状几乎无变化。

应用场景

航空航天：钨钨电极用于钛合金和镍合金的 DCEN-TIG 焊，如飞机机身、发动机部件和火箭燃料箱。WT20 电极在 150-250 A 电流下能够提供稳定的电弧，确保焊缝的高强度和耐腐蚀性。

核工业：WT30 或 WT40 电极用于不锈钢和镍合金压力容器的焊接，如核反应堆的冷却管道。电弧稳定性高，焊缝无缺陷，满足严格的安全标准。

石化工业：钨钨电极用于碳钢和不锈钢管道的焊接，如炼油厂的输油管道。WT20 电极在中高电流下能够确保焊缝的耐腐蚀性和力学性能。

船舶工业：WT30 电极用于焊接高强度钢板，如船体和甲板结构，电弧稳定性确保了厚板焊接的深度和质量。

操作注意事项

DCEN 焊接中，电极直径需根据电流选择（1.6-6.4 mm），磨削角度（20°-35°）需优化以集中电弧。保护气体（氩气或氦气）流量需保持在 8-12 L/min，防止电极氧化或熔池污染。定期检查电极尖端状态，必要时重新磨削以恢复性能。

5.2 钨钨电极在其他工业的应用

除了焊接领域，钨钨电极在其他工业场景中也有重要应用，特别是在真空电子器件和电弧切割领域，其高熔点和热电子发射能力使其成为关键材料。

5.2.1 真空电子器件中的阴极材料

钨钨电极因其低电子逸出功和高热稳定性，被用作真空电子器件（如微波管、X 射线管和阴极射线管）的阴极材料。阴极是电子器件中发射电子的核心部件，要求材料能够在高温和高真空环境中稳定工作。

性能优势

钨钨电极的氧化钨掺杂显著降低了电子逸出功(2.63 eV)，使其在较低温度(约 1500-2000°C)下即可发射大量电子，优于纯钨阴极(需 2500°C 以上)。其高熔点和抗烧损性确保了阴极在高功率运行中的耐久性。WT20 和 WT30 电极因其适中的氧化钨含量，常用于此类应用。

应用场景

微波管：钨钨电极作为阴极用于雷达和通信设备的微波管，如磁控管和行波管。其稳定的电子发射能力确保了器件的高频性能和长寿命。例如，军用雷达系统中，WT20 电极阴极能够在高功率下连续运行数千小时。

X 射线管：钨钨电极用于医疗和工业 X 射线管的阴极，产生稳定的电子束以激发 X 射线。WT20 电极的低电子逸出功和高热稳定性适合高强度 X 射线设备，如 CT 扫描仪。

阴极射线管 (CRT)：虽然 CRT 技术逐渐被淘汰，但在一些特种显示设备中，钨钨电极仍作为阴极材料，提供稳定的电子发射。

操作注意事项

在真空电子器件中，钨钨电极需在高真空 (10^{-6} Pa) 环境中工作，防止氧化或污染。电极表面需经过精密抛光 ($Ra < 0.2 \mu m$) 以确保电子发射均匀性。生产和安装过程中需严格控制放射性粉尘，操作人员需佩戴防护装备。

5.2.2 电弧切割与引发电弧

钨钨电极在电弧切割和引发电弧的应用中利用其高电弧稳定性和耐高温性能，适合高能量密度的工业场景。

性能优势

电弧切割需要电极在高温高压等离子环境中维持稳定的电弧，钨钨电极的低电子逸出功和高熔点使其能够快速引发高强度电弧，并承受极端条件。WT30 和 WT40 电极因其低烧损率和高电流耐受性，常用于电弧切割和引发电弧。

应用场景

等离子切割：钨钨电极用于等离子切割机，切割碳钢、不锈钢和铝合金等材料。WT30 电极在 200-400 A 电流下能够提供稳定的等离子弧，确保切割速度和精度。例如，在船舶制造中，WT30 电极用于切割厚钢板，切口平整且热影响区小。

电弧炉：钨钨电极用于小型电弧炉的电弧引发，特别是在冶金实验室中，用于熔炼高熔点合金。WT40 电极在高电流下能够快速引发电弧并维持稳定运行。

点火装置：钨钨电极用于工业点火系统，如燃气轮机或锅炉的点火装置，其快速起弧能力确保了可靠的点火性能。

操作注意事项

电弧切割中，电极需配备高效冷却系统（如水冷喷嘴）以降低热负荷，延长寿命。电极直径（3.2-6.4 mm）和磨削角度（30°-45°）需根据切割电流优化。切割过程中产生的钍粉尘需通过高效过滤系统收集，防止放射性污染。

5.3 钍钨电极应用场景的局限性

尽管钍钨电极在焊接和其他工业应用中具有显著优势，其微量放射性和替代电极的发展对其应用场景构成了一定限制。

5.3.1 放射性限制下的使用场景

钍钨电极中的氧化钍（ ThO_2 ）含有钍-232，是一种天然放射性元素，释放 α 粒子和少量 β 、 γ 射线。虽然其活度浓度较低（WT10 接近 1 Bq/g，WT40 略高于豁免标准），但在生产、储存和使用过程中仍需严格的放射性防护措施，这限制了其在某些场景中的应用。

放射性风险

生产环节：混料、烧结和磨削过程中产生的钍粉尘可能通过吸入或接触进入人体，增加内部辐射风险。长期暴露可能导致肺部或组织损伤，尽管风险较低（年有效剂量约 0.1-1 mSv）。
使用环节：焊接和切割中的电极磨削会产生放射性粉尘，需使用专用砂轮机 and 高效通风系统。操作人员需佩戴防护口罩，工作场所需定期监测辐射水平（ $X-\gamma$ 剂量率 $< 0.1 \mu\text{Sv/h}$ ）。
环境影响：生产和使用中的废料（如粉尘、废水和废电极）需按照《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》处理，避免污染土壤和水体。

受限场景

医疗和食品行业：由于放射性风险，钍钨电极在医疗器械和食品加工设备焊接中受到限制。例如，欧洲和北美已禁止在食品级不锈钢焊接中使用钍钨电极，改用铈钨或镧钨电极。
高环保要求地区：欧盟和美国部分州（如加利福尼亚）对放射性材料的使用有严格法规，钍钨电极需特殊许可，增加了使用成本。
高精度电子工业：在半导体和微电子制造中，钍钨电极的放射性可能污染洁净室环境，限制了其应用。

应对措施

为降低放射性风险，企业需配备专用设备（如密闭砂轮机和 HEPA 过滤系统），操作人员需接受辐射防护培训。废物处理需符合国际和国内标准（如 ICRP Publication 103 和 GB 18871-2002），确保活度浓度和排放达标。

5.3.2 替代电极的应用趋势

随着环保法规的加强和非放射性电极的研发，钍钨电极在部分应用场景中逐渐被铈钨、镧钨、铈钨和钇钨电极替代。这些替代电极在性能上接近钍钨电极，且无放射性风险，符合现代工业的环保要求。

替代电极的性能

铈钨电极（WC20）：含 1.8-2.2% 氧化铈，电子逸出功约 2.7 eV，起弧性能和电弧稳定性接近

版权与免责声明

WT20，适合 DCEN 和 AC 焊接，无放射性，广泛用于医疗和电子行业。

镧钨电极（WL20）：含 1.8-2.0%氧化镧，电弧稳定性和寿命优于钍钨电极，适合高精度和重负荷焊接，已在航空航天和核工业中取代钍钨电极。

铈钨电极（WZ8）：含 0.8%氧化铈，专为 AC 焊接铝和镁合金设计，电弧稳定性好，适合轻金属焊接。

铪钨电极（WY20）：含 1.8-2.2%氧化铪，性能接近镧钨电极，适合高精度焊接，但成本较高，市场普及度较低。

替代趋势

欧美市场：欧盟和美国已逐步淘汰钍钨电极，镧钨电极（WL20）成为主流，占 TIG 焊电极市场的 60%以上。钍钨电极（WC20）在成本敏感场景中也广泛应用。

中国市场：中国作为钨资源大国，钍钨电极因成本优势仍在重工业中使用，但镧钨和钍钨电极的份额逐年增加，尤其是在出口产品和高端制造领域。

技术驱动：新型掺杂材料（如复合稀土氧化物）和生产工艺的进步进一步提高了非放射性电极的性能。例如，镧钨电极在高电流下的烧损率已接近 WT40，成本逐渐降低。

未来展望

尽管钍钨电极在高电流和重负荷焊接中仍具有性能优势，其放射性问题促使行业加速向非放射性电极转型。未来，随着环保法规的进一步收紧和替代电极技术的成熟，钍钨电极可能逐渐局限于特定高要求场景（如核工业和航空航天），而非放射性电极将在更多领域占据主导地位。



中钨智造 WT20 电极

中钨智造科技有限公司

钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种在高纯钨基体中均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

第六章 钨电极的生产设备

钨电极的制备涉及从原料处理到成品加工的多个复杂工艺步骤，每一步都需要高精度、高可靠性的专用设备以确保电极的性能和质量。同时，由于氧化钨（ ThO_2 ）的微量放射性，生产设备还需配备严格的防护和检测系统，以保护操作人员和环境。本章将详细探讨钨电极生产中使用的原料处理设备、粉末冶金设备、成型与加工设备、放射性防护设备以及检测设备。

6.1 钨电极的原料处理设备

原料处理是钨电极生产的第一步，涉及钨粉的研磨与筛分以及氧化钨的掺杂工艺。专用设备需确保原料的高纯度、均匀粒度和精确配比，同时控制放射性粉尘的扩散。

6.1.1 钨粉研磨与筛分设备

钨粉是钨电极的主要原料，其粒度、纯度和形貌直接影响电极的致密度和焊接性能。研磨与筛分设备用于制备粒度均匀的高纯钨粉。

研磨设备

设备类型：行星式球磨机或气流磨

功能：将粗钨粉（粒度 10-50 μm ）研磨至细粉（1-10 μm ），提高粉末的流动性与堆积密度。

关键参数：

转速：200-600 rpm

研磨介质：氧化锆或硬质合金球（直径 2-10 mm）

研磨时间：4-12 小时

气氛：惰性气体（如氩气）或真空，防止氧化

特点：行星式球磨机具有高效率 and 均匀研磨能力，配备冷却系统以控制温度，防止钨粉过热氧化。气流磨通过高速气流碰撞实现无污染研磨，适合高纯度要求。

典型型号：Fritsch Pulverisette 5（行星式球磨机），Hosokawa Alpine AFG（气流磨）

维护要求：定期清洗研磨罐和介质，检查密封性，防止杂质污染。

筛分设备

设备类型：振动筛或超声波筛分机

功能：将研磨后的钨粉按粒度分级，筛选出符合要求的粒度范围（D50 约为 2-5 μm ）。

关键参数：

筛网孔径：1-10 μm

振动频率：20-50 Hz

筛分时间：10-30 分钟

特点：超声波筛分机通过高频振动防止细粉堵塞筛网，提高筛分效率。设备需配备密闭罩，防止粉尘泄漏。

版权与免责声明

典型型号：Russell Finex Compact Sieve, Retsch AS 200
维护要求：定期更换筛网，清洗筛分腔，确保无残留粉末污染。

防护措施

研磨与筛分过程中需配备局部排风系统和高效过滤器（HEPA），捕集钨粉尘，防止吸入风险。操作人员需佩戴防尘口罩和防护手套，工作区域需定期清洁。

6.1.2 氧化钍掺杂设备

氧化钍（ ThO_2 ）是钨电极的关键掺杂物，其均匀分布对电极的电子逸出功和电弧稳定性至关重要。掺杂设备需确保钨粉与氧化钍的精确配比和混合，同时控制放射性粉尘。

设备类型

干法混料机：V型混料机或三维混料机
湿法混料机：行星式球磨机或搅拌球磨机
化学共沉淀设备：反应釜和离心机（用于高端生产）

干法混料机

功能：将钨粉与氧化钍粉末（粒度 $0.5\text{--}2\ \mu\text{m}$ ）均匀混合，配比精确至 $\pm 0.01\%$ 。

关键参数：

转速：50–200 rpm

混料时间：4–8 小时

黏结剂：聚乙烯醇（PVA，0.5–1%）

特点：V型混料机通过双锥形腔体实现高效混合，三维混料机通过多轴运动提高均匀性。设备内衬不锈钢或陶瓷，防止污染。

典型型号：Hosokawa Nauta Mixer, WAB Turbula T2F

防护措施：设备需配备密闭罩和负压排风系统，防止氧化钍粉尘扩散。操作人员需佩戴防护服和口罩。

湿法混料机

功能：在去离子水或乙醇介质中混合钨粉和氧化钍，提高均匀性，随后干燥制备掺杂粉末。

关键参数：

转速：100–300 rpm

研磨介质：氧化锆球

混料时间：6–12 小时

干燥温度：100–150°C（真空或惰性气氛）

特点：湿法混料减少粉尘飞扬，适合高精度掺杂。干燥设备需配备冷凝回收系统，防止溶剂排放。

典型型号：Netzsch PMH/PML, Fritsch Pulverisette 7

防护措施：球磨机需密闭运行，废液需通过沉淀和过滤处理，防止钍化合物泄漏。

版权与法律声明

化学共沉淀设备

功能：通过钨酸盐和硝酸钽溶液的共沉淀制备原子级均匀掺杂粉末，适用于高端电极。

关键参数：

反应温度：60–80℃

pH 值：7–9

离心转速：5000–10000 rpm

特点：反应釜配备搅拌和温控系统，离心机实现固液分离。工艺复杂但均匀性极高。

典型型号：IKA RW 20（反应釜），Beckman Coulter Avanti J-26

防护措施：废水需通过离子交换处理，反应釜废气需通过活性炭过滤器排放。

6.2 钽钨电极的粉末冶金设备

粉末冶金是钽钨电极制备的核心工艺，涉及混料、压制和烧结步骤，用于将掺杂粉末转化为高致密的电极坯体。相关设备需确保高精度和一致性。

6.2.1 混料机

功能：将钨粉、氧化钽和黏结剂均匀混合，为压制提供高质量原料。

设备类型：V 型混料机、三维混料机、双锥混料机

关键参数：

容积：5–100 L

转速：50–150 rpm

混料时间：4–8 小时

特点：混料机需配备变频调速和定时功能，内衬耐磨陶瓷或不锈钢，防止污染。部分高端机型支持在线粒度监测。

典型型号：Hosokawa Micron Vrieco-Nauta, Shuanglong V-500

维护要求：定期检查密封件，清洗内腔，防止交叉污染。

防护措施：配备密闭罩和 HEPA 过滤器，操作区域需隔离，防止放射性粉尘扩散。

6.2.2 压制机

功能：将混合粉末压制成坯（棒状或板状），为烧结提供基础。

设备类型：冷等静压机（CIP）、液压模压机

关键参数：

压力：100–200 MPa

保压时间：1–3 分钟

模具材料：硬质合金或不锈钢

特点：冷等静压机通过液体介质施加均匀压力，坯密度达 60–70%。液压模压机适合小批量生产，成本较低。

典型型号：EPSI CIP 400, Dorst TPA 50

维护要求：定期检查液压系统和模具磨损，确保压力稳定。

防护措施：压制机需配备防尘罩，操作人员需佩戴防护手套。

版权与免责声明

6.2.3 高温烧结炉

功能：通过高温处理使坯体致密化，形成高密度电极坯体。

设备类型：电阻烧结炉、感应烧结炉、真空烧结炉

关键参数：

温度：2000-2800℃

气氛：氢气（纯度>99.999%）或真空（ 10^{-4} Pa）

保温时间：2-4 小时

冷却速率：10-20℃/min

特点：电阻烧结炉适用于大批量生产，感应烧结炉加热速度快，真空烧结炉适合高端电极。炉膛材料为钨或石墨，耐高温。

典型型号：Nabertherm HTK, ALD Vacuum Technologies VIM

维护要求：定期检查炉膛密封性和加热元件，清洗残留物。

防护措施：烧结炉需配备废气处理系统，防止氢气泄漏或钨化合物挥发。

6.3 钨电极的成型与加工设备

成型与加工设备用于将烧结坯体加工成符合规格的电极棒，确保尺寸精度和表面质量。

6.3.1 压延机

功能：通过多道次热压延或冷压延将烧结坯体加工成所需直径（0.5-10 mm）。

设备类型：多辊压延机、旋转锻造机

关键参数：

温度：1400-1800℃（热压延）

压延速度：0.5-2 m/min

变形量：10-20%/道次

特点：多辊压延机配备精密模具和加热系统，确保直径公差±0.05 mm。旋转锻造机适合小直径电极，效率高。

典型型号：SMS Group 4-Hi Mill, Daniel & C. Swaging Machine

维护要求：定期检查辊面磨损和加热系统，润滑传动部件。

防护措施：压延机需配备高温防护罩，防止操作人员烫伤。

6.3.2 磨削与抛光设备

功能：通过粗磨、精磨和抛光提高电极表面质量，粗糙度达 Ra 0.2-0.4 μm。

设备类型：无心磨床、专用抛光机

关键参数：

砂轮粒度：80-400 目

转速：2000-5000 rpm

冷却方式：水冷

特点：无心磨床实现连续磨削，效率高；抛光机使用金刚石抛光膏和布轮，获得镜面效果。

典型型号：Glebar GT-610, Struers Tegramin

版权与免责声明

维护要求：定期更换砂轮和抛光布，检查冷却系统。

防护措施：配备密闭罩和高效除尘系统，防止钽粉尘扩散。

6.4 钽钨电极的放射性防护设备

氧化钽的微量放射性（钽-232）要求生产设备配备专用防护系统，以降低健康和环境风险。

6.4.1 专用砂轮机与除尘系统

功能：磨削电极时收集放射性粉尘，防止吸入或扩散。

设备类型：密闭式砂轮机，高效除尘器

关键参数：

砂轮材料：金刚石

除尘效率：>99.9%（HEPA 过滤器）

风量：500-1000 m³/h

特点：砂轮机配备透明防护罩和负压吸尘口，除尘器使用多级过滤（粗滤+HEPA）。

典型型号：Weldcraft Dedicated Grinder, Donaldson Torit DFO

维护要求：定期更换过滤器，清洗吸尘管道。

防护措施：操作人员需佩戴防尘口罩，粉尘需密封储存。

6.4.2 密闭罩与通风设备

功能：隔离放射性粉尘，保持工作环境清洁。

设备类型：局部排风罩，中央通风系统

关键参数：

风速：0.5-1 m/s

过滤效率：>99.9%

噪音：<70 dB

特点：密闭罩覆盖混料、磨削和烧结设备，通风系统配备活性炭和 HEPA 过滤器。

典型型号：Nederman Fume Extractor, Camfil APC Farr Gold Series

维护要求：定期检查风道密封性和过滤器饱和度。

防护措施：通风系统需定期检测排放气体活度，确保符合标准。

6.4.3 放射性废物处理设备

功能：处理生产中的放射性废料（粉尘、废水、固体废物）。

设备类型：废水处理系统、固化设备、密封存储容器

关键参数：

废水活度：<0.1 Bq/L（处理后）

固化材料：水泥或树脂

存储容器：不锈钢，厚度>2 mm

特点：废水处理系统通过沉淀、过滤和离子交换去除钽化合物；固化设备将粉尘混入水泥基体；存储容器标有放射性警示。

版权与免责声明

典型型号：Veolia Water Technologies RO, Orano Waste Containers

维护要求：定期检测废水排放和固化体强度，更新存储记录。

防护措施：废物处理需在隔离区域进行，操作人员需接受辐射防护培训。

6.5 钍钨电极的检测设备

检测设备用于监控电极质量和放射性水平，确保产品符合标准（如 ISO 6848:2015）和安全要求。

6.5.1 X- γ 辐射剂量率检测仪

功能：测量生产环境和电极表面的 X 射线和 γ 射线剂量率。

设备类型：便携式辐射剂量仪

关键参数：

测量范围：0.01-100 μ Sv/h

精度： \pm 5%

探测器：GM 计数管或 NaI 晶体

特点：实时显示剂量率，支持数据记录，适合车间巡检。

典型型号：RadEye PRD (Thermo Scientific), AT1123 (Atomtex)

维护要求：定期校准（每年一次），检查探测器灵敏度。

使用场景：检测混料、磨削和储存区域的辐射水平，确保 $<0.1 \mu$ Sv/h。

6.5.2 α 、 β 表面污染检测仪

功能：测量电极表面和设备表面的 α 、 β 粒子污染。

设备类型：便携式表面污染仪

关键参数：

测量范围：0.1-1000 Bq/cm²

探测效率： $>30\%$ (α)， $>40\%$ (β)

探测器：ZnS 闪烁体或气体正比计数管

特点：高灵敏度，适合检测微量钍-232 污染，支持快速扫描。

典型型号：Ludlum Model 43-93, XH-3206 (中国核仪器)

维护要求：定期校准，检查探测器窗口完整性。

使用场景：检测磨削后电极表面、设备内壁和废物容器污染。



中钨智造 WT10 电极

第七章 钨电极的国内外标准

钨电极作为钨极惰性气体保护焊接（TIG 焊）和等离子焊接的关键材料，其生产和使用受到严格的国际和国内标准规范。这些标准涵盖了电极的分类、性能要求、质量控制以及放射性安全管理，确保其在工业应用中的一致性和安全性。由于钨电极含有微量放射性氧化钍（ ThO_2 ），相关标准还包括辐射防护和环境管理的具体要求。本章将详细探讨钨电极的国际标准、国内标准以及放射性安全标准。

7.1 钨电极的国际标准

国际标准为钨电极的生产、分类和使用提供了统一的技术规范，广泛应用于全球焊接行业。主要的国际标准包括 ISO 6848:2015、AWS A5.12/A5.12M 以及 EN 26848，这些标准对钨电极的化学成分、物理性能、尺寸规格和标识方法进行了详细规定。

7.1.1 ISO 6848:2015（钨电极的分类与要求）

ISO 6848:2015《Arc welding and cutting — Nonconsumable tungsten electrodes — Classification》是国际标准化组织（ISO）制定的钨电极分类标准，适用于 TIG 焊和等离子焊接中的非消耗性钨电极，包括钨电极。

标准内容

分类：标准将钨电极按氧化钍（ ThO_2 ）含量分为四种型号：

WT10：0.8–1.2% ThO_2 ，黄色涂头

WT20：1.7–2.2% ThO_2 ，红色涂头

WT30：2.8–3.2% ThO_2 ，紫色涂头

WT40：3.8–4.2% ThO_2 ，橙黄色涂头

版权与免责声明

化学成分：规定钨基体的纯度 $\geq 99.5\%$ ，杂质（如 Fe、Ni、C）总含量 $< 0.05\%$ 。氧化钍含量需精确控制，偏差 $\pm 0.1\%$ 。

尺寸规格：电极直径范围为 0.5-10 mm，公差 ± 0.05 mm；长度通常为 50 mm、75 mm、150 mm 或 175 mm，公差 ± 1 mm。

表面质量：电极表面需光滑，无裂纹、氧化物或油污，粗糙度 $Ra \leq 0.4 \mu m$ 。

性能要求：电极需满足特定的电弧稳定性、起弧性能和烧损率要求。例如，WT20 在 100-300 A 电流下需保持稳定电弧，烧损率 < 0.1 mm/h。

标识：电极端部需涂色标识（如 WT20 为红色），并在包装上标明型号、批次和制造商信息。

应用范围

ISO 6848:2015 适用于全球焊接行业，是国际贸易和质量认证的基础。标准还对非放射性电极（如钽钨、钨钨）进行了分类，反映了替代钨钨电极的趋势。

特点与意义

统一性：为全球钨钨电极生产商和用户提供统一的分类和性能标准，便于质量控制和国际贸易。

安全性：标准提及氧化钍的放射性风险，建议生产和使用中采取防护措施，如配备通风系统和粉尘收集装置。

更新性：2015 年版更新了 1992 年版，增加了对环保和放射性防护的要求，反映了非放射性电极的发展趋势。

实施要求

生产企业需通过 ISO 认证机构的审核，确保生产工艺和产品质量符合标准。检测方法包括 X 射线荧光光谱（XRF）分析成分、激光测径仪检测尺寸和金相显微镜检查微观结构。

7.1.2 AWS A5.12/A5.12M（美国焊接学会钨电极规范）

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（AWS）制定的钨电极规范，广泛应用于北美和其他地区的焊接行业。

标准内容

分类：与 ISO 6848 类似，将钨钨电极分为 WT10、WT20、WT30 和 WT40，涂色标识一致。

化学成分：规定氧化钍含量（0.8-4.2%）和杂质限值（如 $O < 0.02\%$ ， $Fe < 0.01\%$ ）。要求钨粉纯度 $\geq 99.95\%$ 。

物理性能：电极需满足特定的导电性（ $> 30\%$ IACS）和硬度（350-450 HV）。烧损率在 200 A 电流下需 < 0.08 mm/h。

尺寸与公差：直径 0.5-6.4 mm，公差 ± 0.03 mm；长度 75-300 mm，公差 ± 1.5 mm。

测试方法：包括化学分析（ICP-OES）、电弧稳定性测试（在氩气保护下进行）和表面质量检查（显微镜观察）。

放射性警示：标准明确要求在包装和说明书中标注氧化钍的放射性风险，建议使用专用磨削设备和防护措施。

版权与免责声明

应用范围

AWS A5.12 适用于 TIG 焊、等离子焊接和电弧切割，尤其在航空航天、汽车制造和石化行业中应用广泛。美国和加拿大的焊接设备制造商和用户普遍遵循此标准。

特点与意义

详细性：标准提供了详细的测试方法和性能指标，如电弧起弧电压（ $<15\text{ V}$ ）和烧损率，适合工业应用。

安全性：强调放射性防护，推荐使用密闭砂轮机和高效过滤器，减少钨粉尘暴露。

兼容性：与 ISO 6848 高度兼容，便于国际市场协调。

实施要求

生产企业需通过 AWS 认证，检测设备需符合 ASTM 标准（如 ASTM E1476）。用户需定期校准焊接设备，确保电极性能符合规范。

7.1.3 EN 26848（欧洲钨电极标准）

EN 26848:1991《Welding — Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma welding》是欧洲标准化委员会（CEN）制定的钨电极标准，适用于欧盟国家的焊接行业。

标准内容

分类：与 ISO 6848 一致，钨电极分为 WT10、WT20、WT30 和 WT40，涂色标识相同。

化学成分：氧化钨含量要求与 ISO 6848 一致，杂质限值更严格（如 $C<0.005\%$ ， $S<0.002\%$ ）。

尺寸规格：直径 0.5–10 mm，公差 $\pm 0.04\text{ mm}$ ；长度 50–300 mm，公差 $\pm 1\text{ mm}$ 。

性能要求：电极需通过电弧稳定性测试（100–400 A）和烧损率测试（ $<0.1\text{ mm/h}$ ）。表面粗糙度 $Ra \leq 0.3\ \mu\text{m}$ 。

放射性管理：要求生产和使用中遵守欧盟辐射防护指令（2013/59/Euratom），包括粉尘控制和废物处理。

应用范围

EN 26848 适用于欧盟国家的 TIG 焊和等离子焊接，尤其在航空航天、核工业和船舶制造中。由于欧盟对放射性材料的严格监管，该标准推动了非放射性电极（如钨钨、钨钨）的应用。

特点与意义

环保性：强调放射性防护和废物管理，符合欧盟环保法规。

区域性：主要服务于欧洲市场，与 ISO 6848 和 AWS A5.12 兼容，但更注重环保和安全。

局限性：1991 年版较旧，未完全反映非放射性电极的发展趋势。

实施要求

欧盟企业需通过 CE 认证，生产车间需配备辐射监测设备和废物处理设施。用户需遵守当地辐射防护法规，定期检测工作环境辐射水平。

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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

7.2 钨电极的国内标准

中国作为全球最大的钨资源国和钨电极生产国，制定了一系列国家标准，涵盖电极的性能、质量和放射性安全管理。这些标准包括 GB/T 4187-2017、GB 18871-2002 以及《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》。

7.2.1 GB/T 4187-2017（钨电极国家标准）

GB/T 4187-2017《钨极惰性气体保护电弧焊及等离子焊用钨电极》是中国国家标准，规定了钨电极的分类、性能和检测方法，适用于 TIG 焊和等离子焊接。

标准内容

分类：钨电极分为 WT10、WT20、WT30 和 WT40，与国际标准一致，涂色标识相同。

化学成分：氧化钨含量要求：WT10（0.8-1.2%）、WT20（1.7-2.2%）、WT30（2.8-3.2%）、WT40（3.8-4.2%）。钨纯度 $\geq 99.95\%$ ，杂质限值（如 Fe $< 0.01\%$ 、O $< 0.015\%$ ）。

尺寸规格：直径 0.5-10 mm，公差 ± 0.05 mm；长度 50-300 mm，公差 ± 1 mm。

性能要求：电极需满足起弧电压（ < 15 V）、电弧稳定性（100-400 A 无漂移）和烧损率（ < 0.1 mm/h）要求。

检测方法：包括化学分析（ICP-OES）、尺寸测量（激光测径仪）、表面质量检查（显微镜）和电弧性能测试。

标识与包装：电极端部需涂色标识，包装需标明型号、规格、批次和放射性警示。

应用范围

GB/T 4187-2017 是中国焊接行业的基础标准，广泛应用于航空航天、石化、核工业和船舶制造。标准支持出口电极符合国际市场要求。

特点与意义

本土化：结合中国钨资源优势，优化了生产工艺要求，降低成本。

兼容性：与 ISO 6848 和 AWS A5.12 高度一致，便于国际贸易。

安全性：强调放射性防护，要求生产企业配备粉尘收集和废物处理设施。

实施要求

生产企业需通过国家质量认证（如 CNAS），检测设备需符合标准规定的精度要求。用户需定期校准焊接设备，确保电极性能。

7.2.2 GB 18871-2002（电离辐射防护与辐射源安全基本标准）

GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》是中国电离辐射防护的国家标准，适用于包括钨电极在内的放射性材料生产和使用。

标准内容

辐射防护原则：优化防护、剂量限制和正当化原则。要求年有效剂量 < 1 mSv（公众）， < 20 mSv（职业暴露）。

辐射监测：生产车间需配备 X- γ 辐射剂量率检测仪（测量范围 0.01-100 μ Sv/h）和 α 、 β 表面污染检测仪（测量范围 0.1-1000 Bq/cm²）。

版权与免责声明

废物管理：放射性废料（粉尘、废水、废电极）需分类收集、固化并储存在专用设施中，活度浓度需 $<1 \text{ Bq/g}$ 。

防护措施：操作人员需佩戴防护服、防尘口罩，工作区域需配备通风和除尘系统。

应用范围

标准适用于钨钨电极的生产、储存和使用，尤其在混料、磨削和废物处理环节。企业需定期向环保部门报告辐射监测数据。

特点与意义

全面性：涵盖辐射防护的各个方面，确保操作人员和环境安全。

强制性：作为国家强制标准，企业必须遵守，否则面临处罚。

指导性：为放射性废物处理和防护设备配置提供了明确指南。

实施要求

企业需建立辐射安全管理体系，配备专业人员负责监测和记录。环保部门定期检查，确保符合标准要求。

7.2.3 《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》

《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》（以下简称《办法》）是中国环境保护部制定的规范，针对包括钨钨电极生产在内的伴生放射性材料管理。

标准内容

监测要求：企业需监测生产环境中的 X- γ 剂量率（ $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ）和 α 、 β 表面污染（ $<0.4 \text{ Bq/cm}^2$ ）。废水活度需 $<0.1 \text{ Bq/L}$ 。

信息公开：企业需每年向环保部门提交辐射监测报告，公开废物处理和排放数据。

废物处理：放射性废料需通过固化（如水泥固化）或深埋处理，防止环境污染。

防护设施：生产车间需配备密闭罩、HEPA 过滤器和专用废物存储库。

应用范围

《办法》适用于中国境内所有涉及钨-232 的工业活动，包括钨钨电极生产企业。尤其在粉尘和废水处理环节有严格要求。

特点与意义

环保导向：推动企业采用绿色生产技术，减少放射性污染。

透明性：要求信息公开，增强公众监督。

区域性：结合中国钨资源和电极生产特点，细化了防护措施。

实施要求

企业需建立环境辐射监测体系，配备专业检测设备（如 AT1123、XH-3206），并接受环保部门的年度检查。不合规企业需整改或停产。

版权与免责声明

7.3 钍钨电极的放射性安全标准

钍钨电极的放射性安全标准主要针对氧化钍中的钍-232（Th-232），涉及豁免活度浓度、生产和使用中的防护要求以及废物管理。

7.3.1 钍-232 豁免活度浓度（1 Bq/g）

钍-232 是钍钨电极中的主要放射性核素，半衰期约为 140 亿年，释放 α 粒子（4.01-4.08 MeV）以及少量 β 和 γ 射线。国际和国内标准对钍-232 的豁免活度浓度进行了明确规定。

标准内容

国际标准（ICRP Publication 103）：

钍-232 的豁免活度浓度为 1 Bq/g，低于此值无需特殊监管。

WT10（0.8-1.2% ThO₂）活度浓度接近 1 Bq/g，通常符合豁免要求；WT40（3.8-4.2% ThO₂）可能略高于豁免标准，需严格管理。

中国标准（GB 18871-2002）：

豁免活度浓度与 ICRP 一致，1 Bq/g。

废物活度浓度 < 1 Bq/g 可按普通废物处理，否则需按放射性废物管理。

检测方法：使用高纯锗 γ 谱仪或液体闪烁计数器测量活度浓度，精度 $\pm 5\%$ 。

意义

豁免活度浓度的设定降低了低放射性电极（如 WT10）的监管成本，但对高氧化钍含量电极（如 WT40）要求更严格的防护和废物处理措施。

实施要求

生产企业需定期检测电极和废料的活度浓度，记录数据并存档。检测频率为每批次抽样 5-10%，不合格批次需重新处理。

7.3.2 生产与使用中的防护要求

钍钨电极的生产和使用涉及混料、烧结、磨削和焊接等环节，可能产生放射性粉尘或废气，需采取严格的防护措施。

防护措施

生产环节：

设备防护：混料机、烧结炉和磨削设备需配备密闭罩和 HEPA 过滤器，捕集效率 > 99.9%。

个人防护：操作人员需佩戴防护服、防尘口罩和手套，定期接受辐射剂量监测（年有效剂量 < 1 mSv）。

环境监测：车间需安装 X- γ 辐射剂量率检测仪和 α 、 β 表面污染检测仪，实时监测辐射水平。

使用环节：

磨削防护：使用专用砂轮机，配备负压吸尘系统，防止钍粉尘吸入。

版权与免责声明

通风系统：焊接工作站需配备局部排风罩，风速 0.5-1 m/s，废气通过活性炭和 HEPA 过滤器处理。

操作规范：焊工需接受辐射安全培训，定期检查电极表面污染。

标准依据

国际：ICRP Publication 103 和欧盟 2013/59/Euratom 指令要求生产和使用环境辐射剂量率 $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，表面污染 $<0.4 \text{Bq/cm}^2$ 。

国内：GB 18871-2002 和《办法》要求相同，废水活度 $<0.1 \text{Bq/L}$ ，废气排放需符合环保标准。

实施要求

企业需制定辐射安全管理制度，配备专业人员负责监测和记录。防护设备需定期校准，废物处理需符合《办法》要求。



中钨智造 WT30 电极

第八章 钨电极的检测方法

钨电极的性能直接影响其在钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接等工业应用中的表现，因此对其化学成分、物理性能、放射性水平以及焊接性能的检测至关重要。检测方法需确保电极符合国际和国内标准（如 ISO 6848:2015、GB/T 4187-2017），同时关注氧化钨（ ThO_2 ）带来的微量放射性风险。本章将详细探讨钨电极的化学成分检测、物理性能检测、放射性检测、焊接性能测试以及检测设备与校准要求。

8.1 钨电极的化学成分检测

化学成分检测用于验证钨电极中氧化钨含量和杂质元素的符合性，确保其性能满足标准要求（如 WT20 的氧化钨含量为 1.7-2.2%）。

8.1.1 氧化钨含量分析

氧化钨（ ThO_2 ）是钨电极的关键掺杂物，其含量直接影响电子逸出功和电弧稳定性。精确检测氧化钨含量是质量控制的核心环节。

检测方法

X 射线荧光光谱（XRF）：

原理：利用 X 射线激发样品原子，分析其发射的特征荧光光谱，确定氧化钨含量。

设备：手持式或台式 XRF 分析仪。

操作步骤：

取样：从电极批次中随机抽取 5-10 根，切割成薄片（厚度 1-2 mm）。

表面处理：用乙醇清洗样品，去除油污和氧化物。

检测：将样品置于 XRF 仪器中，设置分析时间（30-60 秒），记录钨（Th）元素信号。

定量分析：通过校准曲线计算氧化钨含量，精度 $\pm 0.01\%$ 。

优点：无损、快速，适合批量检测。

局限性：对轻元素（如 O）分析精度较低，需结合其他方法验证。

电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）：

原理：将样品溶解后通过等离子体激发，分析发射光谱确定钨含量。

设备：ICP-OES 仪器。

操作步骤：

样品制备：将电极样品溶于硝酸-氢氟酸混合溶液（1:1），加热至完全溶解。

稀释：用去离子水稀释至适当浓度（1-10 ppm）。

检测：将溶液引入 ICP-OES，测定钨的特征谱线（如 401.91 nm）。

定量：使用标准溶液校准，计算氧化钨含量，精度 $\pm 0.005\%$ 。

优点：高精度，适合微量分析。

局限性：样品破坏性，操作复杂，成本较高。

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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

中子活化分析 (NAA):

原理: 用中子辐照样品, 激活钽-232 生成放射性同位素, 测量 γ 射线确定含量。

设备: 核反应堆和 γ 谱仪。

操作步骤:

样品制备: 切割电极样品 (质量 0.1-1 g)。

辐照: 在中子通量为 10^{13} n/cm² · s 的反应堆中辐照 1-2 小时。

测量: 冷却后用 γ 谱仪分析钽-232 的特征 γ 射线 (如 311.9 keV)。

定量: 通过标准样品校准, 精度 $\pm 0.01\%$ 。

优点: 极高精度, 适合痕量分析。

局限性: 设备昂贵, 需核设施支持, 仅用于科研或高端检测。

标准要求

根据 ISO 6848:2015 和 GB/T 4187-2017, 氧化钽含量需控制在指定范围 (如 WT20 为 1.7-2.2%), 偏差 $\pm 0.1\%$ 。

检测频率: 每批次抽样 5-10%, 不少于 3 根电极。

注意事项

样品需均匀代表批次, 避免偏析影响结果。

检测设备需定期校准, 使用标准样品 (如 NIST SRM 610) 确保精度。

检测环境需防尘, 操作人员需佩戴防护装备, 防止放射性粉尘吸入。

8.1.2 杂质含量检测

杂质 (如 Fe、Ni、O、C) 会影响钽钨电极的导电性、机械性能和焊接稳定性, 需严格控制其含量。

检测方法

电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS):

原理: 将样品溶解后通过等离子体电离, 分析离子质量谱确定杂质元素含量。

设备: ICP-MS 仪器。

操作步骤:

样品制备: 同 ICP-OES, 溶于硝酸-氢氟酸混合溶液。

稀释: 稀释至 0.1-1 ppm, 加入内标 (如铟)。

检测: 测定 Fe、Ni、O、C 等元素的特征离子 (如 Fe⁵⁶、Ni⁶⁰)。

定量: 使用多元素标准溶液校准, 检测限 $< 0.001\%$ 。

优点: 高灵敏度, 可同时分析多种元素。

局限性: 样品破坏性, 成本较高。

辉光放电质谱（GD-MS）：

原理：通过辉光放电使样品表面原子化，分析离子质量谱。

设备：GD-MS 仪器。

操作步骤：

样品制备：切割电极，抛光至 $Ra < 0.4 \mu m$ 。

检测：将样品置于辉光放电腔，设置放电电压（800-1000 V）。

分析：测定杂质元素的信号强度，定量分析。

优点：半无损，适合表面分析。

局限性：设备昂贵，分析深度有限。

氧氮分析仪：

原理：通过高温熔融样品，测量释放的氧气和氮气含量。

设备：氧氮分析仪。

操作步骤：

样品制备：切割电极成小块（0.1-0.5 g）。

检测：在氦气气氛下加热至 2500℃，分析释放气体。

定量：通过标准气体校准，精度 $\pm 0.002\%$ 。

优点：专用于氧、氮分析，操作简单。

局限性：仅限于气体元素。

标准要求

根据 GB/T 4187-2017，杂质限值：Fe < 0.01%、Ni < 0.005%、O < 0.015%、C < 0.005%。

检测频率：每批次抽样 5%，重点检测关键杂质。

注意事项

样品需清洗干净，避免表面污染。

检测设备需定期校准，使用高纯钨标准样品。

检测记录需存档，便于质量追溯。

8.2 钨电极的物理性能检测

物理性能检测用于评估钨电极的密度、硬度和晶粒结构，确保其机械性能和焊接性能符合要求。

8.2.1 密度与硬度测试

密度测试

目的：验证电极的致密度，确保烧结质量（理论密度 19.25 g/cm^3 ）。

方法：阿基米德法

设备：精密电子天平（精度 $\pm 0.001 \text{ g}$ ）和密度测试仪。

版权与免责声明

操作步骤：

称量：测量电极干重 (m_1)。

浸液：将电极浸入去离子水中，测量湿重 (m_2) 和悬浮重量 (m_3)。

计算：密度 $\rho = m_1 / (m_1 - m_3) \times \rho_0$ (ρ_0 为水密度，1 g/cm³)。

标准要求：密度 18.5–19.0 g/cm³ (95–98%理论密度)。

优点：简单、准确。

局限性：仅适用于规则形状样品。

硬度测试

目的：评估电极的机械强度，防止焊接中断裂。

方法：维氏硬度测试

设备：维氏硬度计。

操作步骤：

样品制备：切割电极，抛光至 Ra<0.2 μm。

测试：施加 5–10 kgf 载荷，保持 15 秒，测量压痕对角线长度。

计算：根据压痕面积计算硬度 (HV)。

标准要求：硬度 350–450 HV。

优点：高精度，适合硬质材料。

局限性：需破坏样品，测试点需均匀分布。

注意事项

密度测试需使用去离子水，避免气泡影响结果。

硬度测试需选择多个测试点，平均值代表样品硬度。

测试频率：每批次抽样 3–5 根，检测至少 3 个位置。

8.2.2 晶粒结构分析

晶粒结构影响电极的机械性能和电弧稳定性，需通过显微镜和 X 射线技术分析。

检测方法

金相显微镜：

原理：通过光学显微镜观察电极横截面的晶粒形貌和氧化钨分布。

设备：金相显微镜。

操作步骤：

样品制备：切割电极，抛光后用酸液（如硝酸–氢氟酸）腐蚀。

观察：放大 100–1000 倍，分析晶粒尺寸和氧化钨颗粒分布。

测量：使用图像分析软件（如 ImageJ）计算晶粒尺寸（10–50 μm）。

优点：直观，适合快速分析。

版权与免责声明

局限性：需破坏样品，分析深度有限。

扫描电子显微镜（SEM-EDS）：

原理：通过电子束扫描样品，结合能谱分析氧化钨颗粒分布。

设备：SEM-EDS 仪器。

操作步骤：

样品制备：切割、抛光后镀碳或金导电层。

扫描：设置加速电压（15-20 kV），观察晶粒和氧化钨颗粒（0.5-2 μm ）。

分析：通过 EDS 定量分析钨元素分布。

优点：高分辨率，可分析微观结构。

局限性：设备昂贵，操作复杂。

X 射线衍射（XRD）：

原理：分析样品的晶体结构和晶粒取向。

设备：XRD 仪器（如 Bruker D8 Advance）。

操作步骤：

样品制备：切割电极，抛光至平整。

检测：设置 Cu K α 射线，扫描角度 2θ （ 20° - 80° ）。

分析：通过峰位和强度确定钨和氧化钨的晶相，计算晶粒尺寸（Scherrer 公式）。

优点：无损，可分析晶体结构。

局限性：对细小晶粒的分析精度较低。

标准要求

晶粒尺寸：10-50 μm ，氧化钨颗粒均匀分布，无团聚。

检测频率：每批次抽样 3 根，分析横截面和纵截面。

注意事项

样品制备需避免引入人工缺陷。

SEM 和 XRD 分析需结合金相显微镜结果，确保数据一致性。

操作人员需佩戴防护装备，防止放射性粉尘暴露。

8.3 钨电极的放射性检测

由于氧化钨含钨-232（半衰期 140 亿年，释放 α 、 β 、 γ 射线），需对电极和生产环境的放射性水平进行严格检测，确保符合国际和国内标准（如 ICRP Publication 103、GB 18871-2002）。

8.3.1 X- γ 辐射剂量率检测（AT1123 型仪器）

目的

测量电极表面和生产环境的 X 射线和 γ 射线剂量率，确保辐射水平低于安全限值 ($<0.1 \mu\text{Sv/h}$)。

检测方法

设备：AT1123 型 X- γ 辐射剂量率检测仪

关键参数：

测量范围：0.01-100 $\mu\text{Sv/h}$

精度： $\pm 5\%$

探测器：NaI 闪烁晶体

操作步骤：

校准：使用 Cs-137 标准源校准仪器。

检测：将探头置于电极表面（距离 1 cm）或工作区域（如混料、磨削区），记录剂量率。

数据处理：取多次测量平均值，记录时间和位置。

标准要求：电极表面剂量率 $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，环境剂量率 $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ （GB 18871-2002）。

优点：便携、实时，适合现场监测。

局限性：对 α 粒子不敏感，需结合其他方法。

注意事项

检测频率：每批次检测 5-10 根，环境监测每日一次。

避免电磁干扰，确保仪器灵敏度。

操作人员需佩戴个人剂量计，记录累积剂量。

8.3.2 α 、 β 表面污染检测（XH-3206 型仪器）

目的

检测电极表面和设备的 α 、 β 粒子污染，确保低于安全限值 ($<0.4 \text{Bq/cm}^2$)。

检测方法

设备：XH-3206 型 α 、 β 表面污染检测仪

关键参数：

测量范围：0.1-1000 Bq/cm^2

探测效率： $\alpha >30\%$ ， $\beta >40\%$

探测器：ZnS 闪烁体

操作步骤：

校准：使用 Am-241 (α) 和 Sr-90 (β) 标准源校准。

检测：将探头贴近电极表面或设备表面（距离 $<2 \text{mm}$ ），缓慢扫描，记录计数率。

计算：根据探测效率换算表面污染水平 (Bq/cm^2)。

标准要求：表面污染 $<0.4 \text{Bq/cm}^2$ （GB 18871-2002）。

版权与免责声明

优点：高灵敏度，适合微量污染检测。

局限性：对 γ 射线不敏感，需结合X- γ 检测。

注意事项

检测频率：每批次检测3-5根，设备表面每周检查。

样品表面需清洁，避免油污或灰尘干扰。

检测区域需隔离，防止交叉污染。

8.3.3 环境辐射监测

目的

监测生产车间的辐射水平，确保操作人员和环境安全。

检测方法

固定式监测：

设备：环境辐射监测站。

操作：在混料、烧结、磨削和储存区域安装固定探头，实时记录X- γ 剂量率。

标准要求：环境剂量率 $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ 。

便携式监测：

设备：AT1123 或同类仪器。

操作：巡检车间各区域，每日记录剂量率和污染水平。

废物监测：

设备： γ 谱仪。

操作：检测废料（粉尘、废水、废电极）的活度浓度， $<1 \text{ Bq/g}$ 可按普通废物处理。

注意事项

监测数据需存档，定期向环保部门报告。

车间需配备通风和除尘系统，降低粉尘浓度。

监测频率：固定式监测实时记录，便携式监测每日一次，废物监测每批次一次。

8.4 钍钨电极的焊接性能测试

焊接性能测试评估钍钨电极的起弧性能、电弧稳定性和烧损率，确保其在TIG焊和等离子焊接中的表现。

8.4.1 起弧性能测试

目的

评估电极在低电压下的起弧能力，确保快速引发电弧。

检测方法

设备：TIG焊机，电压记录仪。

操作步骤：

版权与免责声明

准备：选择 WT20 电极（直径 2.4 mm，磨削角度 20°），使用氩气保护（10 L/min）。

测试：在 DCEN 模式下，设置电流 50-150 A，记录起弧电压和时间。

分析：起弧电压 < 15 V，起弧时间 < 0.5 秒为合格。

标准要求：ISO 6848:2015 要求起弧电压 < 15 V，电弧稳定无延迟。

优点：模拟实际焊接条件，结果可靠。

局限性：需控制保护气体和电极状态一致性。

注意事项

测试频率：每批次抽样 3 根，重复测试 5 次。

电极尖端需抛光，防止表面缺陷影响结果。

记录环境条件（如温度、湿度），避免干扰。

8.4.2 电弧稳定性与烧损率测试

目的

评估电极在焊接中的电弧稳定性和耐久性。

检测方法

电弧稳定性：

设备：TIG 焊机，示波器，高速相机。

操作步骤：

设置：WT20 电极（直径 3.2 mm，磨削角度 30°），电流 100-300 A，氩气保护。

焊接：在不锈钢板上进行连续焊接，记录电弧电压波动（< ±2 V）。

观察：使用高速相机记录电弧形状，确保无漂移或中断。

标准要求：电弧波动 < ±2 V，无明显飞溅或中断。

烧损率：

设备：精密电子天平，显微镜。

操作步骤：

称量：测量电极初始重量（精度 ±0.001 g）。

焊接：在 200 A 电流下连续焊接 1 小时。

测量：测量电极长度损失（显微镜）和质量损失（天平）。

计算：烧损率 = 长度损失 / 时间（mm/h），< 0.1 mm/h 为合格。

标准要求：烧损率 < 0.1 mm/h（ISO 6848:2015）。

注意事项

测试条件需与实际焊接一致（如电流、气体流量）。

测试频率：每批次抽样 3 根，重复测试 3 次。

电极需定期重新磨削，确保尖端状态一致。

版权与免责声明

8.5 钨钼电极的检测设备与校准

检测设备的精度和操作规范直接影响测试结果的可靠性，需严格校准和管理。

8.5.1 检测仪器校准要求

校准方法

XRF/ICP-OES/ICP-MS:

校准标准：使用 NIST 标准样品（如 SRM 610）或高纯钨标准。

频率：每 6 个月校准一次，或在仪器维护后校准。

要求：精度 $\pm 0.01\%$ （氧化钨）， $\pm 0.001\%$ （杂质）。

密度/硬度测试仪：

校准标准：使用标准密度块（ 19.25 g/cm^3 ）和硬度块（400 HV）。

频率：每年校准一次。

要求：密度精度 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ，硬度精度 $\pm 5 \text{ HV}$ 。

辐射检测仪（AT1123、XH-3206）：

校准标准：使用 Cs-137（ γ ）、Am-241（ α ）、Sr-90（ β ）标准源。

频率：每年校准一次，或在仪器维修后校准。

要求：剂量率精度 $\pm 5\%$ ，污染检测效率 $>30\%$ （ α ）、 $>40\%$ （ β ）。

焊接性能测试设备：

校准标准：校准焊机电流（ $\pm 2 \text{ A}$ ）、电压（ $\pm 0.1 \text{ V}$ ）。

频率：每 3 个月校准一次。

要求：确保测试条件与标准一致。

注意事项

校准需由专业机构（如 CNAS 认证实验室）执行。

校准记录需存档，包含校准日期、标准样品和结果。

8.5.2 检测环境与操作规范

检测环境

化学成分检测：需在洁净室（ISO 7 级）进行，温度 $20\text{--}25^\circ\text{C}$ ，湿度 $<60\%$ ，避免粉尘污染。

物理性能检测：实验室需防震，温度 $18\text{--}22^\circ\text{C}$ ，湿度 $<50\%$ 。

放射性检测：隔离区域，配备通风和除尘系统，环境剂量率 $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ 。

焊接性能测试：模拟实际焊接环境，氩气纯度 $>99.999\%$ ，流量 $8\text{--}15 \text{ L/min}$ 。

操作规范

操作人员：需经过专业培训，熟悉设备操作和辐射防护。

防护要求：佩戴防护服、防尘口罩和手套，定期检测个人剂量。

数据记录：检测结果需记录批次、日期、样品编号和测试条件，存档至少 5 年。

废物处理：检测产生的废料（如样品残渣）需按《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》处理。

版权与免责声明



中钨智造 WT20 电极

第九章 钨钨电极的优缺点

钨钨电极因其独特的物理和化学性能，在钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接以及其他工业应用中占据重要地位。然而，其含有的氧化钍（ ThO_2 ）带来的微量放射性也引发了环境和健康方面的关注。本章将详细探讨钨钨电极的优点，包括其优异的焊接性能和高温强度与耐磨性，以及其缺点，重点分析放射性污染风险和环境影响。

9.1 钨钨电极的优点

钨钨电极凭借其低电子逸出功、高电弧稳定性和优异的耐高温性能，在焊接和其他高温应用中表现出显著优势，尤其在航空航天、核工业和石化等领域被广泛应用。

9.1.1 优异的焊接性能

钨钨电极在钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接和直流负极（DCEN）焊接中展现出卓越的焊接性能，使其成为高精度和重负荷焊接的首选材料。

低电子逸出功

氧化钍（ ThO_2 ）的掺杂显著降低了钨钨电极的电子逸出功（约 2.63 eV，低于纯钨的 4.55 eV），使其能够在较低电压（ $<15\text{ V}$ ）下快速引发电弧。这种特性在 TIG 焊和等离子焊接中尤为重要，特别是在低电流（50-150 A）条件下，能够减少起弧时的热输入，适合焊接薄板材料（如不锈钢或钛合金）。例如，WT20 电极（1.7-2.2% ThO_2 ）在航空航天领域用于焊接钛合金（Ti-6Al-4V）机身部件，起弧时间 <0.5 秒，确保焊缝质量和精度。

高电弧稳定性

钨钨电极在宽电流范围（50-500 A）内能够维持集中且稳定的电弧，减少电弧漂移和飞溅，

版权与免责声明

适合焊接高熔点金属（如镍合金、钛合金）。电弧稳定性得益于氧化钨颗粒在高温下释放热电子的能力，使电弧在动态焊接条件下保持连续性。例如，在核工业中，WT30 电极（2.8-3.2% ThO₂）用于焊接不锈钢压力容器，电弧电压波动 $\lt\pm 2$ V，焊缝无气孔或裂纹，满足严格的质量要求。

低烧损率

钨钨电极的烧损率极低（ $\lt 0.1$ mm/h，200 A 电流下），延长了使用寿命，减少了更换频率和生产成本。氧化钨的热稳定性和钨基体的高熔点（3422°C）使其能够在高电流（200-400 A）下长期运行而不显著磨损。例如，在石化行业，WT40 电极（3.8-4.2% ThO₂）用于厚壁管道焊接，可连续运行数小时，电极尖端形状几乎无变化。

应用场景

航空航天：WT20 和 WT30 电极在钛合金和镍基合金的 TIG 焊中提供稳定的电弧和高精度焊缝，满足飞机发动机和火箭部件的高强度要求。

核工业：WT30 和 WT40 电极在高电流下焊接不锈钢和镍合金，确保焊缝的无缺陷性和耐腐蚀性，适用于反应堆压力容器。

汽车制造：WT10 电极在低电流下焊接薄壁钢板或铝合金，减少热变形，适合汽车悬架和排气系统。

9.1.2 高温强度与耐磨性

钨钨电极在高温和高负荷环境下的优异表现使其不仅限于焊接，还在真空电子器件和电弧切割中表现出色。

高温强度

钨钨电极的高熔点（3422°C）和氧化钨的热稳定性能使其能够在极端高温（如等离子焊接中的 15000-20000°C 电弧温度）下维持结构完整性。氧化钨颗粒钉扎晶界，抑制钨基体的晶粒生长，保持晶粒尺寸在 10-50 μ m 范围内，从而增强电极的抗热疲劳性和机械强度。例如，在等离子切割中，WT30 电极在 300 A 电流下切割厚钢板，电极能够承受高热负荷而无明显变形或裂纹。

耐磨性

钨钨电极的硬度（350-450 HV）高于纯钨电极（约 300 HV），得益于氧化钨的强化作用。这种高硬度和耐磨性使其在长时间高电流焊接或电弧切割中能够抵抗电极尖端的磨损和烧蚀。例如，在电弧炉点火装置中，WT40 电极能够反复引发高强度电弧，耐磨性确保了点火装置的长期可靠性。

应用场景

真空电子器件：钨钨电极作为阴极材料（如微波管、X 射线管）在 1500-2000°C 下稳定发射电子，耐高温和耐磨性确保器件寿命超过数千小时。

等离子切割：WT30 电极在高能量密度等离子弧中切割不锈钢，耐磨性减少电极消耗，提高切割效率。

电弧炉：WT40 电极用于小型电弧炉的电弧引发，其高温强度和耐磨性支持高频次点火。

版权与法律声明

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均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

9.2 钍钨电极的缺点

尽管钍钨电极具有显著的性能优势，其含有的氧化钍带来的微量放射性问题限制了其在某些应用场景中的使用，并引发了环境和健康方面的担忧。

9.2.1 放射性污染风险

氧化钍中的钍-232 (Th-232) 是一种天然放射性核素，半衰期约为 140 亿年，释放 α 粒子 (4.01-4.08 MeV) 以及少量 β 和 γ 射线。尽管其活度浓度较低 (WT10 约为 1 Bq/g, WT40 略高于豁免标准)，但在生产和使用过程中仍存在放射性污染风险。

生产过程中的风险

粉尘污染：混料、研磨、烧结和磨削过程中会产生含钍的粉尘，可能通过吸入或接触进入人体，增加内部辐射风险。长期暴露可能导致肺部或组织损伤，尽管风险较低 (年有效剂量约 0.1-1 mSv)。

废料管理：生产过程中产生的废料 (如粉尘、废水、废电极) 需按放射性废物处理，活度浓度 >1 Bq/g 的废料需固化 (如混入水泥基体) 并储存在专用设施中，增加了生产成本。

设备要求：混料机、磨削机和烧结炉需配备密闭罩和高效过滤器 (HEPA, 捕集效率 $>99.9\%$)，以防止粉尘扩散。废水需通过沉淀和离子交换处理，活度 <0.1 Bq/L 后方可排放。

使用过程中的风险

磨削粉尘：焊接前需磨削电极尖端以优化电弧形状，产生的钍粉尘可能通过吸入进入人体。专用砂轮机和负压吸尘系统是必需的，否则可能导致辐射暴露。

环境排放：焊接和切割中的废气可能含有微量钍化合物，需通过活性炭和 HEPA 过滤器处理，防止污染工作环境。

废电极处理：废弃的钍钨电极需按放射性废物分类收集，增加了使用成本和监管难度。

标准限制

国际标准：ICRP Publication 103 和欧盟 2013/59/Euratom 指令要求生产和使用环境剂量率 $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，表面污染 $<0.4 \text{ Bq/cm}^2$ 。

国内标准：GB 18871-2002 和《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法 (试行)》要求企业定期监测辐射水平，废物活度浓度需 $<1 \text{ Bq/g}$ 。

受限场景

由于放射性风险，钍钨电极在医疗、食品加工和电子工业中的应用受到限制。例如，欧盟和北美禁止在食品级不锈钢焊接中使用钍钨电极，以避免潜在的污染风险。

9.2.2 环境与健康影响

钍钨电极的放射性特性对环境和健康构成潜在影响，促使行业寻求非放射性替代电极。

环境影响

废物处理：生产和使用中产生的放射性废料 (如粉尘、废水、废电极) 需严格管理，避免污染土壤和水体。例如，废水中的钍化合物若未经处理排放，可能导致地下水污染。

排放控制：焊接和切割中的废气需通过高效过滤系统处理，防止钍化合物进入大气。企业需定期向环保部门提交排放报告，符合《办法》要求。

版权与免责声明

长期累积：钷-232 的超长半衰期意味着废物需长期储存，专用废物库的建设和维护增加了环境管理成本。

健康影响

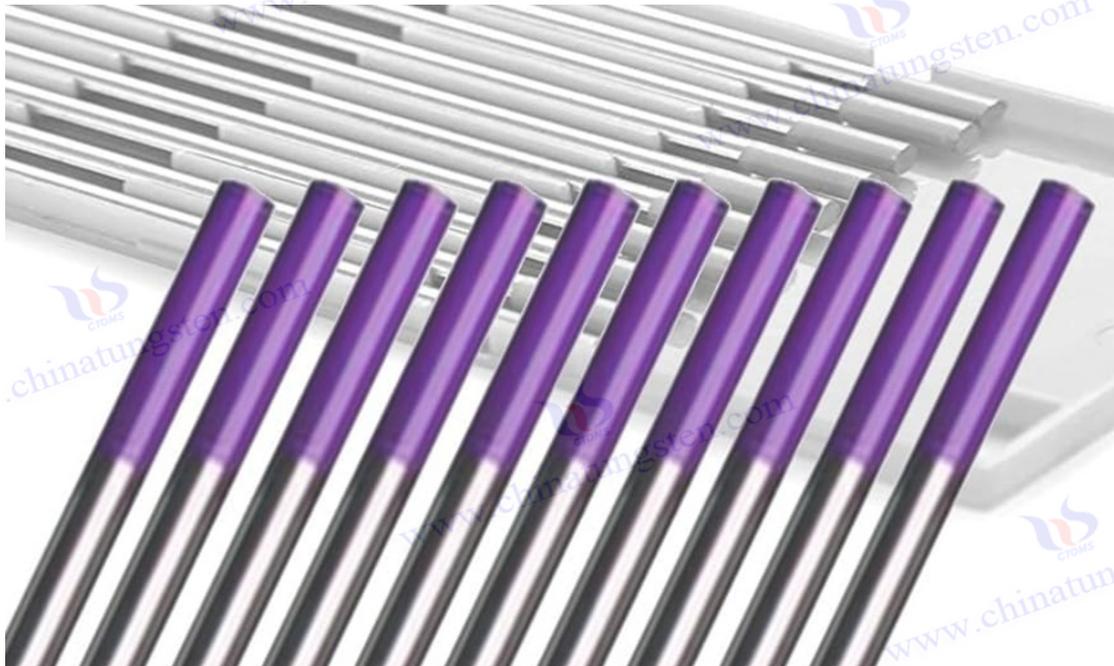
职业暴露：生产和使用钷钨电极的操作人员可能通过吸入粉尘或接触污染表面暴露于 α 粒子辐射。长期低剂量暴露可能增加肺癌或组织损伤风险，尽管概率较低（年有效剂量 <1 mSv 为安全范围）。

公众风险：若废物处理不当，钷化合物可能通过环境介质（如水、土壤）进入食物链，影响周边居民健康。ICRP 建议公众年有效剂量 <1 mSv，需严格控制排放。

防护成本：企业需配备防护装备（如防护服、防尘口罩）和监测设备（如 AT1123、XH-3206），操作人员需接受辐射安全培训，增加了运营成本。

替代趋势

由于放射性问题，铈钨（WC20）、镧钨（WL20）和铈钨（WZ8）等非放射性电极逐渐取代钷钨电极。这些电极的电子逸出功（约 2.7-2.8 eV）和电弧稳定性接近钷钨电极，且无放射性风险。例如，镧钨电极在欧盟市场已占 TIG 焊电极的 60% 以上，广泛应用于航空航天和医疗行业。中国的钷钨电极因成本优势仍占主导，但镧钨和铈钨电极的份额逐年增加。



中钨智造 WT30 电极

第十章 钨钨电极的储存、运输与安全管理

钨钨电极因含有微量放射性氧化钨（ ThO_2 ），其储存、运输和使用需遵循严格的安全管理规范，以防止放射性污染、保护人员健康和确保环境安全。本章将详细探讨钨钨电极的储存环境与条件、包装标准与防护措施、运输过程中的安全注意事项、放射性物质安全规范以及应急处理与事故预防措施。

10.1 储存环境与条件要求

钨钨电极的储存需确保其物理性能不受损，同时防止氧化钨的放射性物质泄漏或扩散。储存环境和条件需符合国际和国内标准（如 ISO 6848:2015、GB 18871-2002）。

储存环境

温度与湿度：

温度：10–30°C，避免高温（ $>50^\circ\text{C}$ ）导致电极表面氧化或材料性能劣化。

湿度： $<60\%$ RH，防止湿气引发钨基体腐蚀或氧化钨粉尘吸湿。

环境要求：储存区域应为干燥、通风良好的专用仓库，远离水源和化学品。

防尘与隔离：

储存区域需配备高效通风系统，空气中粉尘浓度 $<0.1\text{ mg}/\text{m}^3$ ，防止放射性粉尘扩散。

电极需与食品、药品或其他敏感物品隔离储存，避免交叉污染。

辐射防护：

储存区域的 X- γ 辐射剂量率需 $<0.05\text{ }\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，符合 GB 18871-2002 要求。

仓库需配备辐射监测仪（如 AT1123 型），定期检测环境辐射水平。

储存条件

容器要求：

电极需储存在密封的不锈钢或塑料容器中，容器厚度 $>2\text{ mm}$ ，标有放射性警示标识（如“Caution: Radioactive Material”）。

容器内需填充惰性气体（如氩气）或保持真空状态，防止氧化。

分类存放：

不同型号的钨钨电极（如 WT10、WT20、WT30、WT40）需分类存放，标明氧化钨含量和批次号。

废弃电极需单独储存于专用放射性废物容器，防止混杂。

储存期限：

钨钨电极的储存期限通常为 2–5 年，视包装完整性和储存条件而定。

定期检查电极表面质量（无氧化、裂纹），不合格电极需按放射性废物处理。

注意事项

储存仓库需限制非授权人员进入，配备门禁和监控系统。

版权与法律声明

储存记录需包括电极型号、数量、批次、储存日期和辐射监测数据，存档至少 5 年。
仓库需定期清洁，使用湿式清扫法，避免扬尘。

10.2 包装标准与防护措施

包装是钨钨电极储存和运输的第一道防线，需确保电极的完整性并防止放射性物质泄漏，符合国际和国内标准（如 ISO 6848:2015、GB/T 4187-2017）。

包装标准

包装材料：

内包装：使用防潮、防氧化的塑料管或真空密封袋，每根电极单独包装，防止相互摩擦。

外包装：采用不锈钢或高强度塑料箱，厚度 >2 mm，具备防震和密封功能。

缓冲材料：使用泡沫或气泡垫填充，减少运输中的振动和撞击。

标识要求：

包装上需标明电极型号（如 WT20）、氧化钨含量、批次号、生产日期和制造商信息。

放射性警示标识：标示“放射性物质”符号（三叶形）和文字说明，如“Contains Thorium, Handle with Care”。

符合国际原子能机构（IAEA）SSR-6 包装要求，标明“Type A”包装类别（适用于低放射性物质）。

包装规格：

每包电极数量：10-100 根，长度（50-300 mm）和直径（0.5-10 mm）需一致。

包装重量： <50 kg，便于搬运和运输。

防护措施

防潮与防氧化：

包装内需放置干燥剂（如硅胶）或抽真空，防止湿气侵入。

外包装需涂覆防锈漆或使用防腐蚀材料，确保长期储存安全。

防震与防摔：

包装箱需通过跌落测试（1.2 m 高度无破损），符合 IAEA SSR-6 要求。

运输中需固定包装箱，避免滑动或倾倒。

放射性防护：

包装箱需屏蔽 α 粒子（厚度 >0.1 mm 塑料即可）和部分 γ 射线（厚度 >2 mm 不锈钢）。

包装表面辐射剂量率需 <0.1 μ Sv/h，表面污染 <0.4 Bq/cm²（GB 18871-2002）。

注意事项

包装需定期检查，确保无破损或泄漏。

检测包装表面辐射水平，使用 X- γ 辐射剂量率检测仪（如 AT1123）和 α 、 β 表面污染检测仪（如 XH-3206）。

不合格包装需重新封装或按放射性废物处理。

版权与法律责任声明

中钨智造科技有限公司

钍钨电极产品介绍

一、钍钨电极概述

钍钨电极是一种在高纯钨基体中均匀掺杂氧化钍（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钍钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钍降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钍钨电极牌号

牌号	氧化钍含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钍钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

10.3 运输过程中的安全注意事项

钍钨电极的运输需遵守国际和国内放射性物质运输法规（如 IAEA SSR-6、GB 11806-2004），确保安全并防止放射性污染。

运输要求

运输方式：

陆运：使用专用货车，配备防震固定装置和辐射监测设备。

海运：符合国际海事组织（IMDG）规范，使用 Type A 包装，放置于专用货舱。

空运：符合国际航空运输协会（IATA）危险品规则，包装需通过压力和跌落测试。

包装与装载：

电极需使用符合 10.2 节的包装标准，固定于运输工具内，防止移动或破损。

运输车辆或货舱需标有放射性警示标识，注明“低比活度物质（LSA-I）”。

辐射监测：

运输前：检测包装表面剂量率（ $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ ）和污染水平（ $<0.4 \text{Bq/cm}^2$ ）。

运输中：使用便携式辐射检测仪（如 RadEye PRD）定期检查货物辐射水平。

运输后：接收方需检查包装完整性和辐射水平，记录数据。

安全注意事项

人员防护：

运输人员需接受辐射安全培训，佩戴个人剂量计，年有效剂量 $<1 \text{mSv}$ 。

搬运时需穿防护手套，避免直接接触电极或包装。

应急准备：

运输车辆需配备应急工具包，包括防护服、密封袋和便携式辐射检测仪。

制定运输事故应急预案，明确泄漏或破损的处理流程。

路线规划：

选择远离人口密集区和水源的运输路线，避开恶劣天气。

运输需遵守当地法规，提前向相关部门（如环保或核安全部门）申报。

注意事项

运输记录需包括电极数量、包装类型、辐射水平和运输路线，存档至少 5 年。

国际运输需提供英文版放射性物质运输证书，符合 IAEA SSR-6 要求。

运输过程中避免与其他危险品（如易燃物）混装。

10.4 放射性物质安全管理规范

钍钨电极因含钍-232（Th-232，活度浓度约 1Bq/g ）被视为低比活度放射性物质，需遵守国际和国内放射性安全管理规范（如 ICRP Publication 103、GB 18871-2002）。

版权与免责声明

管理规范

登记与许可：

生产和使用企业需向核安全监管部（如中国国家核安全局）登记，获取放射性物质操作许可。

储存和运输需提交活度浓度报告，WT10（0.8-1.2% ThO₂）通常符合豁免标准（1 Bq/g），WT40（3.8-4.2% ThO₂）需额外监管。

辐射防护：

生产和储存区域需配备密闭罩和 HEPA 过滤器（捕集效率>99.9%），防止粉尘扩散。

操作人员需佩戴防护服、防尘口罩和手套，定期接受健康检查和剂量监测（年有效剂量<1 mSv）。

废物管理：

废料分类：粉尘、废水和废电极需分开收集，活度浓度>1 Bq/g 的废料按放射性废物处理。

固化处理：粉尘和废电极需混入水泥或树脂基体，固化体强度>10 MPa。

储存与处置：放射性废物需储存在专用库，定期交由专业机构（如中国核工业集团）处置。

信息公开：

根据《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》，企业需每年向环保部门提交辐射监测报告，公开废物处理和排放数据。

标准依据

国际：ICRP Publication 103（2007）要求公众年有效剂量<1 mSv，职业暴露<20 mSv；IAEA SSR-6 规定运输包装和辐射限值。

国内：GB 18871-2002 要求环境剂量率<0.05 μSv/h，表面污染<0.4 Bq/cm²；GB 11806-2004 规范放射性物质运输安全。

注意事项

企业需建立辐射安全管理体系，任命专职辐射防护负责人。

定期培训员工，内容包括辐射风险、防护措施和应急处理。

辐射监测设备需每年校准，确保精度和可靠性。

10.5 应急处理与事故预防

尽管钽钨电极的放射性风险较低（α 粒子为主，穿透力弱），仍需制定应急处理和事故预防措施，应对包装破损、粉尘泄漏或运输事故等情况。

事故预防

设备维护：

定期检查混料机、磨削机和储存容器的密封性，防止粉尘泄漏。

通风和除尘系统需保持正常运行，过滤器更换周期<6 个月。

操作规范：

版权与免责声明

员工需严格遵守操作规程，佩戴防护装备，禁止在非隔离区域磨削电极。
储存和运输过程中需定期检查包装完整性，及时更换破损容器。

环境监测：

安装固定式辐射监测站（如同 Mirion RDS-31），实时监测车间和仓库的剂量率。
每周使用 α 、 β 表面污染检测仪（如 XH-3206）检查设备和包装表面。

应急处理

粉尘泄漏：

立即关闭相关设备，启动应急通风系统，隔离泄漏区域。
使用湿式清扫法收集粉尘，装入密封容器，标明放射性警示。
使用 X- γ 检测仪和 α 、 β 检测仪评估污染范围，剂量率 $>0.1 \mu\text{Sv/h}$ 或表面污染 $>0.4 \text{Bq/cm}^2$ 需上报。

包装破损：

停止运输或搬运，将破损包装转移至隔离区域。
使用密封袋重新封装电极，检测新包装的辐射水平。
清理散落电极，送至放射性废物库。

运输事故：

隔离事故现场，限制人员进入，佩戴防护装备。
使用便携式辐射检测仪评估辐射水平，拍照记录现场。
联系核安全和环保部门，报告事故详情，按要求处置受污染物品。

人员暴露：

立即撤离暴露人员，检测个人剂量计，评估受照剂量。
提供急救（如清洗皮肤或眼睛），必要时送医检查。
记录暴露事件，分析原因并改进防护措施。

注意事项

企业需制定详细的应急预案，每年至少组织一次演练。
应急工具包需包括防护服、密封袋、便携式检测仪和急救用品。
事故报告需在 24 小时内提交核安全部门，包含事故原因、辐射水平和处置措施。



中钨智造 WT40 电极

第十一章 钍钨电极的未来发展趋势与挑战

钍钨电极作为钨极氩弧焊（TIG 焊）、等离子焊接和真空电子器件中的关键材料，因其优异的电弧稳定性、低电子逸出功和高耐磨性，在航空航天、核工业和石化等领域占据重要地位。然而，其含有的氧化钍（ ThO_2 ）带来的微量放射性问题引发了环境和健康方面的挑战，促使行业加速研发非放射性替代材料、改进制备工艺和推动绿色制造。本章将深入探讨钍钨电极的未来发展趋势与挑战，包括替代材料的研发进展、环保与放射性安全压力、新型制备工艺与绿色制造、性能提升方向、市场需求变化与产业链发展，以及政策法规的影响与合规发展。

11.1 钍钨电极替代材料的研发进展

随着全球对放射性材料的监管日益严格，非放射性钨电极的研发成为行业热点。替代材料旨在保持或接近钍钨电极的焊接性能（如低电子逸出功和电弧稳定性），同时消除放射性风险。当前，铈钨（WC20）、SM 钨（WL20）、铈钨（WZ8）和钇钨（WY20）等非放射性电极已在部分领域取代钍钨电极。

11.1.1 铈钨电极（WC20）

成分与性能：含 1.8-2.2% 氧化铈（ CeO_2 ），电子逸出功约 2.7 eV，接近钍钨电极的 2.63 eV。铈钨电极在直流负极（DCEN）和交流（AC）焊接中表现出良好的起弧性能和电弧稳定性，烧损率 $< 0.12 \text{ mm/h}$ （200 A 电流下），略高于钍钨电极的 0.1 mm/h。

优势：无放射性，适合医疗、食品和电子行业。成本较低，生产工艺简单，符合 ISO 6848:2015 标准。

应用：广泛用于不锈钢和铝合金的 TIG 焊。例如，在医疗器械制造中，WC20 电极用于焊接

版权与免责声明

钛合金植入物，避免了放射性污染风险。

研发进展：近年来的研究集中在优化氧化铈颗粒的分布和尺寸（0.5-2 μm ），以提高电弧稳定性和耐久性。例如，2023 年《Welding Journal》报道了一种新型湿法掺杂工艺，通过化学共沉淀制备更均匀的铈钨电极，电弧稳定性提升了 10%。

挑战：在高电流（ $>300\text{ A}$ ）下，铈钨电极的烧损率略高，限制了其在重负荷焊接中的应用。研究人员正在探索复合掺杂（如 $\text{CeO}_2+\text{La}_2\text{O}_3$ ）以进一步降低烧损率。

11.1.2 SM 钨电极（WL20）

成分与性能：含 1.8-2.0% 氧化 SM（ La_2O_3 ），电子逸出功约 2.8 eV，电弧稳定性优于铈钨电极，烧损率 $<0.1\text{ mm/h}$ （200 A 电流下），接近钍钨电极。WL20 电极在高电流和脉冲焊接中表现出色，适合精密和重负荷应用。

优势：无放射性，高温强度和耐磨性优异，寿命比铈钨电极长 20-30%。在欧盟市场，WL20 已占 TIG 焊电极的 60% 以上。

应用：航空航天和核工业中用于焊接钛合金和镍基合金。例如，波音公司在其 787 飞机制造中大量采用 WL20 电极，取代 WT20 电极。

研发进展：2024 年《Materials Science and Engineering》报道了一种新型 SM 钨电极，通过纳米级氧化 SM 掺杂（颗粒尺寸 $<0.5\ \mu\text{m}$ ），显著提高了电弧集中度和耐久性。研究还探索了 SM 与钨或钇的复合掺杂，以优化 AC 焊接性能。

挑战：SM 钨电极的生产成本较高（比 WT20 高约 20%），限制了其在成本敏感市场的普及。研究人员正在开发低成本烧结工艺以降低价格。

11.1.3 锆钨电极（WZ8）

成分与性能：含 0.7-0.9% 氧化锆（ ZrO_2 ），专为 AC 焊接铝和镁合金设计。电子逸出功约 2.9 eV，电弧稳定性适中，烧损率 $<0.15\text{ mm/h}$ （150 A 电流下）。

优势：无放射性，适合轻金属焊接，电极表面形成稳定的氧化物层，减少污染。

应用：汽车和船舶工业中用于铝合金焊接，如汽车车身和船体结构。

研发进展：锆钨电极的研发重点在于提高电弧稳定性，2022 年《Journal of Materials Processing Technology》报道了一种添加微量氧化钇的复合锆钨电极，电弧稳定性提升了 15%。

挑战：锆钨电极不适合高电流 DCEN 焊接，应用范围较窄。未来需开发适用于多场景的锆基复合电极。

中钨智造科技有限公司

钨钨电极产品介绍

一、钨钨电极概述

钨钨电极是一种在高纯钨基体中均匀掺杂氧化钨（ ThO_2 ）的焊接电极材料，广泛用于钨极氩弧焊（TIG）和等离子焊等高要求工艺中。其独特的电子发射性能、高温稳定性和出色的电弧启动能力，使其在工业焊接领域长期处于领先地位。

二、钨钨电极性能

性能	描述
电子发射能力强	氧化钨降低电子逸出功（仅约 2.63 eV），起弧灵敏，电弧更易引发。
电弧稳定性高	电弧集中、均匀、稳定，焊接质量更可控，减少飞溅和烧伤。
高温性能优越	钨基体熔点高，适用于高电流、高温环境，电极形状不易变形。
寿命长、烧损率低	有效减少焊接过程中电极消耗，节省更换频率，提升焊接效率。
导电性好	导电率高，可在高负载电流下保持优异性能。
耐污染性强	表面抗氧化与抗污染能力强，有利于长时间稳定工作。

三、钨钨电极牌号

牌号	氧化钨含量（wt%）	涂头颜色	主要特性
WT10	0.8 - 1.2%	黄色	起弧快、适用于中低电流焊接
WT20	1.7 - 2.2%	红色	性能最优，广泛应用于直流焊接
WT30	2.8 - 3.2%	紫色	适用于更高电流场合，耐用性增强
WT40	3.8 - 4.2%	橙黄色	强电流环境首选，使用寿命更长

四、钨钨电极典型应用领域

- ✓ 钨极氩弧焊（TIG）：特别适用于碳钢、不锈钢、镍合金、钛合金的高精度焊接
- ✓ 等离子焊与切割：适用于高温高能量密度场合
- ✓ 真空电子器件：作阴极材料使用
- ✓ 军工与航空航天：在高强度焊接连接中表现出色
- ✓ 核工业与特殊设备制造：提供稳定、长寿命的焊接性能

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”。



版权与免责声明

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

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

11.1.4 钇钨电极 (WY20)

成分与性能：含 1.8-2.2%氧化钇 (Y_2O_3)，电子逸出功约 2.75 eV，性能接近 SM 钨电极，适合高精度焊接。

优势：无放射性，电弧稳定性高，适合微型焊接（如电子元件）。

应用：半导体和电子工业中的精密焊接，如电路板连接。

研发进展：研究集中在提高钇钨电极的抗热疲劳性，2023 年中国焊接学会报道了一种通过等离子喷涂制备的钇钨电极，耐久性提升了 25%。

挑战：钇钨电极成本高（比 WT20 高约 30%），市场普及度低。需进一步优化生产工艺以降低成本。

11.1.5 复合稀土电极

研发方向：复合掺杂电极（如 $CeO_2+La_2O_3$ 、 $La_2O_3+Y_2O_3$ ）结合多种稀土氧化物的优势，旨在实现低电子逸出功（ <2.7 eV）、高电弧稳定性和低烧损率。2024 年《Journal of Industrial Ecology》报道了一种 $CeO_2-La_2O_3$ 复合电极，性能接近 WT40，且无放射性。

优势：综合性能优异，可覆盖钨钨电极的全部应用场景。

挑战：复合掺杂工艺复杂，均匀性难以控制，成本较高。未来需开发自动化混料和烧结技术。

11.1.6 未来展望

短期（1-5 年）：钨钨和 SM 钨电极将继续扩大市场份额，尤其在环保要求严格的欧美市场。SM 钨电极因其优异性能可能成为主流替代品。

长期（5-10 年）：复合稀土电极有望完全取代钨钨电极，特别是在高精度和重负荷焊接中。新型掺杂材料（如氧化镨、氧化铪）也在探索中，可能进一步提升性能。

技术驱动：纳米技术和化学气相沉积（CVD）将用于制备更均匀的掺杂电极，提高性能一致性。人工智能（AI）优化掺杂配比和烧结参数也将加速研发进程。

11.2 环保与放射性安全压力

钨钨电极中的钍-232 ($Th-232$) 释放 α 粒子和少量 β 、 γ 射线，尽管活度浓度较低（WT10 约 1 Bq/g，WT40 略高于豁免标准），但其放射性问题引发了全球范围内的环保和安全压力，促使行业向非放射性电极转型。

11.2.1 国际环保法规

欧盟：2013/59/Euratom 指令要求生产和使用环境剂量率 $<0.1 \mu Sv/h$ ，表面污染 $<0.4 Bq/cm^2$ 。欧盟已逐步淘汰钨钨电极，SM 钨和钨钨电极占主导地位。

版权与法律声明

美国：环境保护署（EPA）和职业安全与健康管理局（OSHA）要求企业配备 HEPA 过滤器和专用磨削设备，减少钨粉尘暴露。加利福尼亚等州对放射性材料使用需特殊许可。

国际原子能机构（IAEA）：SSR-6 规范要求运输包装屏蔽 α 粒子和 γ 射线，表面剂量率 $<0.1 \mu\text{Sv/h}$ 。IAEA 还推动低比活度物质（LSA-I）的豁免管理，WT10 电极通常符合豁免标准。

11.2.2 国内环保法规

中国：GB 18871-2002 要求生产环境剂量率 $<0.05 \mu\text{Sv/h}$ ，废物活度浓度 $<1 \text{Bq/g}$ 。《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》要求企业每年提交辐射监测报告，废水活度 $<0.1 \text{Bq/L}$ 。

挑战：中国作为全球最大的钨资源国和钨钨电极生产国，面临废物处理和排放控制的巨大压力。废料（如粉尘、废水）需固化并储存在专用设施，增加了生产成本。

11.2.3 环境影响

粉尘污染：混料、磨削和烧结过程中产生的钨粉尘可能通过吸入或沉积污染环境，需配备密闭罩和高效过滤器（捕集效率 $>99.9\%$ ）。

废水与废料：生产废水中的钨化合物需通过沉淀和离子交换处理，固体废料需混入水泥基体，长期储存成本高。

长期累积：钨-232 的超长半衰期（140 亿年）意味着废物需永久隔离，可能影响土壤和水体安全。

11.2.4 健康影响

职业暴露：操作人员可能通过吸入粉尘或接触污染表面暴露于 α 粒子，年有效剂量需控制在 1mSv 以下（ICRP 103）。长期低剂量暴露可能增加肺癌风险，尽管概率较低。

公众风险：若废物处理不当，钨化合物可能通过环境介质进入食物链，影响周边居民健康。公众年有效剂量需 $<1 \text{mSv}$ 。

防护成本：企业需投资于防护装备（如防护服、防尘口罩）、监测设备（如 AT1123、XH-3206）和培训，增加了运营成本。

11.2.5 未来趋势

非放射性替代：环保压力推动 SM 钨和铈钨电极的普及，预计到 2030 年，全球钨钨电极市场份额将从目前的 40% 下降至 20%。

绿色认证：企业需通过 ISO 14001 环境管理体系认证，证明其生产过程符合环保标准。

技术支持：自动化监测系统（如实时辐射检测网络）和废物处理技术（如等离子体焚烧）将降低放射性风险。

11.3 新型制备工艺与绿色制造

为应对环保压力和降低生产成本，钽钨电极的制备工艺正在向高效、绿色和智能化方向发展。

11.3.1 先进混料与掺杂技术

湿法混料：通过在去离子水或乙醇中混合钨粉和氧化钽，减少粉尘飞扬，提高均匀性。2023年《Journal of Materials Processing Technology》报道了一种超声波辅助湿法混料工艺，氧化钽颗粒分布均匀性提高了15%。

化学共沉淀：通过钨酸盐和硝酸钽溶液共沉淀制备原子级均匀掺杂粉末，适合高端电极生产。工艺需配备反应釜和离心机，废水处理成本较高。

纳米掺杂：使用纳米级氧化钽颗粒（ $<0.5\ \mu\text{m}$ ），提高电极性能的同时减少掺杂量，降低放射性风险。2024年中国焊接学会报道了一种气相沉积（CVD）掺杂技术，氧化钽含量可精确控制在 $\pm 0.01\%$ 。

11.3.2 高效烧结技术

等离子体烧结（SPS）：通过高频电火花加热粉末，烧结温度降低至 $1800\text{--}2000\text{ }^\circ\text{C}$ ，时间缩短至5-10分钟，电极密度达98%理论密度。SPS减少能源消耗30%，符合绿色制造要求。

微波烧结：利用微波快速加热，烧结时间缩短至10-15分钟，晶粒尺寸更均匀（ $10\text{--}30\ \mu\text{m}$ ）。2023年《Materials Science and Engineering》报道，微波烧结的钽钨电极烧损率降低了10%。

真空烧结：在 $10^{-4}\ \text{Pa}$ 真空环境中烧结，防止氧化，适合高纯电极生产。新型真空炉（如ALD VIM）配备在线监测系统，提高工艺稳定性。

11.3.3 绿色制造技术

粉尘控制：新型密闭混料机和磨削机配备HEPA过滤器和负压吸尘系统，粉尘捕集效率 $>99.9\%$ ，符合GB 18871-2002要求。

废物回收：开发废电极回收技术，通过化学溶解和电解分离回收钨和钽，回收率达90%。2024年《Journal of Industrial Ecology》报道了一种闭环回收工艺，废水活度降至 $0.05\ \text{Bq/L}$ 以下。

能源优化：使用高效烧结炉和再生能源（如太阳能供电），降低碳排放。2023年中国核工业集团报道，其钽钨电极生产线碳排放降低了20%。

11.3.4 智能化生产

自动化设备：采用机器人混料和磨削系统，减少人工接触，降低辐射暴露风险。例如，ABB机器人磨削系统可实现电极尖端角度误差 $<1^\circ$ 。

在线监测：配备XRF和XRD在线分析仪，实时监测氧化钽含量和晶粒结构，提高质量一致

版权与免责声明

性。

AI 优化：利用人工智能优化掺杂配比和烧结参数，2024 年《Welding Journal》报道，AI 辅助工艺将生产效率提高了 15%。

11.3.5 挑战

成本：新型工艺（如 SPS、CVD）设备投资高，短期内难以普及。

技术成熟度：纳米掺杂和废物回收技术仍处于实验室阶段，需进一步验证工业可行性。

法规合规：绿色制造需满足严格的环保标准，增加认证成本。

11.4 钽钨电极性能的提升方向

尽管非放射性电极发展迅速，钽钨电极在高电流和重负荷焊接中的性能优势仍使其在特定场景不可替代。未来的性能提升方向包括：

11.4.1 电弧稳定性与起弧性能

目标：进一步降低电子逸出功 (<2.6 eV)，提高起弧速度 (<0.3 秒) 和电弧稳定性 (电压波动 $<\pm 1$ V)。

技术路径：

优化氧化钽颗粒尺寸 ($0.2-0.5$ μm)，提高热电子发射效率。

探索复合掺杂 (如 $\text{ThO}_2+\text{CeO}_2$)，结合多种稀土氧化物的优势。

2024 年《Materials Science and Engineering》报道了一种 $\text{ThO}_2-\text{La}_2\text{O}_3$ 复合电极，起弧电压降低了 10%。

11.4.2 烧损率与寿命

目标：将烧损率降至 <0.08 mm/h (200 A 电流下)，延长电极寿命 50%。

技术路径：

提高电极密度 ($>98\%$ 理论密度)，通过等离子体烧结实现更致密的微观结构。

表面涂层技术，如涂覆氧化锆或氧化钇层，增强抗烧蚀性。2023 年《Journal of Materials Processing Technology》报道，氧化锆涂层电极寿命提高了 30%。

挑战：涂层工艺需确保涂层与基体的结合强度，避免剥落。

11.4.3 高温强度与耐磨性

目标：提高硬度 (>450 HV) 和抗热疲劳性，适应更高电流 (>500 A) 和温度 ($>20000^\circ\text{C}$)。

技术路径：

晶粒细化，通过控制烧结温度和时间，保持晶粒尺寸 <20 μm 。

版权与免责声明

添加微量强化元素（如 Zr、Y），提高晶界强度。2024 年中国焊接学会报道了一种含 0.1% 氧化钇的钨钨电极，硬度提高了 15%。

挑战：强化元素可能影响电弧性能，需优化配比。

11.4.4 未来展望

多功能电极：开发适用于 DCEN、AC 和脉冲焊接的通用型钨钨电极，拓宽应用场景。

智能化设计：通过 AI 模拟电极微观结构与性能的关系，设计定制化电极，满足特定行业需求。

低钨电极：开发低氧化钨含量（<0.5%）电极，结合复合掺杂，兼顾性能与安全。

11.5 市场需求变化与产业链发展

钨钨电极的市场需求受性能优势、替代材料发展和环保法规的共同影响，产业链也在向多元化、绿色化方向演变。

11.5.1 市场需求变化

全球市场：

2024 年全球钨钨电极市场规模约为 5 亿美元，占 TIG 焊电极市场的 40%。预计到 2030 年，因替代材料普及，市场份额将降至 20%。

航空航天和核工业仍是对钨钨电极需求最大的领域，占总需求的 60%，因其高电流性能无可替代。

欧盟和北美市场因环保法规限制，钨钨电极需求下降，SM 钨和铈钨电极占主导。

中国市场：

中国是全球最大的钨钨电极生产国，占全球产量的 70%。国内需求主要来自石化、船舶和核工业，占总需求的 80%。

随着高端制造业发展（如航空航天），高性能钨钨电极（如 WT30、WT40）需求稳定增长。

新兴市场：

东南亚、印度和南美等地区因成本敏感，对钨钨电极需求保持增长，预计年增长率 5-7%。

11.5.2 产业链发展

上游：钨矿和钨资源的开采受环保法规限制，需开发绿色采矿技术，如无氰选矿和尾矿回收。

中游：电极生产企业需投资于绿色制造设备（如等离子体烧结炉）和废物处理系统，成本增加 10-20%。

下游：焊接设备制造商需开发兼容非放射性电极的焊机，如支持 SM 钨电极的脉冲 TIG 焊机。

版权与免责声明

回收链：废电极回收技术（如化学溶解和电解分离）正在兴起，预计到 2030 年，全球回收率将从目前的 10% 提高到 30%。

11.5.3 挑战

成本竞争：非放射性电极的成本下降（如 SM 钨电极价格预计 5 年内降低 15%）将挤压钍钨电极市场。

技术壁垒：高端电极（如复合稀土电极）需突破生产工艺瓶颈，降低规模化成本。

区域差异：发达国家加速淘汰钍钨电极，而发展中国家因成本优势继续使用，需平衡全球市场供需。

11.6 政策法规的影响与合规发展

政策法规对钍钨电极的生产和使用产生了深远影响，推动行业向合规和绿色方向发展。

11.6.1 国际法规

欧盟：2013/59/Euratom 指令要求企业 2025 年前完成钍钨电极的逐步淘汰，SM 钨和钍钨电极成为强制替代品。

美国：EPA 和 OSHA 要求生产企业配备辐射监测和废物处理设施，2024 年起加州禁止新钍钨电极生产线的建设。

IAEA：SSR-6 规范要求运输包装符合 Type A 标准，增加了运输成本。

11.6.2 国内法规

中国：GB 18871-2002 和《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》要求企业定期提交辐射报告，废物处理需符合活度浓度 $<1 \text{ Bq/g}$ 。2023 年国家核安全局加强了对钍钨电极企业的检查力度。

新政策趋势：预计 2025-2030 年，中国将出台更严格的放射性材料管理政策，推动非放射性电极的研发和应用。

11.6.3 合规发展

认证要求：企业需通过 ISO 14001（环境管理）和 ISO 45001（职业健康安全）认证，证明其生产过程符合环保和安全标准。

技术合规：开发低钍或无钍电极，符合豁免活度浓度（ 1 Bq/g ）。2024 年中国核工业集团报道了一种含 0.5% ThO_2 的低钍电极，活度浓度 $<0.8 \text{ Bq/g}$ 。

国际合作：中国企业需与国际标准组织（如 ISO、IAEA）合作，确保电极出口符合全球法规。

版权与法律责任声明

11.6.4 挑战

合规成本：辐射监测、废物处理和认证成本占生产成本的 10-15%，中小型企业面临压力。

法规差异：不同国家的法规要求不一，出口企业需定制化生产，增加复杂性。

技术转换：从钍钨电极向非放射性电极转型需大量研发投入，短期内可能影响市场竞争力。



中钨智造 WT20 电极

附录

A. 术语表

钍钨电极：由钨与氧化钍（ ThO_2 ）组成的合金电极，用于焊接和电弧应用。

氧化钍（ ThO_2 ）：钍钨电极中的掺杂物，具有微量放射性，增强电子逸出功。

电子逸出功：电子从材料表面逸出所需的最小能量，影响电极的起弧性能。

钨极氩弧焊（TIG 焊）：使用钨电极在惰性气体保护下进行的电弧焊接工艺。

烧蚀：电弧高温下钨电极的质量损失，包括氧化物烧蚀和钨本身烧蚀。

放射性污染：钍钨电极在生产和使用中因氧化钍产生的放射性危害。

粉末冶金：通过混合、压制和烧结金属粉末制备钍钨电极的工艺。

起弧性能：电极在焊接过程中引发电弧的难易程度。

电弧稳定性：电弧在焊接过程中保持连续和稳定的能力。

X- γ 辐射剂量率：测量环境中 X 射线和 γ 射线的辐射强度。

α 、 β 表面污染：钍钨电极表面因放射性核素产生的 α 、 β 粒子污染。

非放射性电极：如铈钨、镧钨电极，不含放射性物质的替代电极。

掺杂：在钨基体中添加氧化钍或其他稀土氧化物以改善性能。

压延磨抛：通过机械加工使钍钨电极成型并提高表面质量的工艺。

放射性废物：生产过程中产生的含氧化钍的废料、废水和固体废物。

版权与免责声明

B. 参考文献

- [1] ISO 6848:2015, Arc welding and cutting — Nonconsumable tungsten electrodes — Classification.
- [2] AWS A5.12/A5.12M:2009, Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and Cutting.
- [3] GB/T 4187-2017, 钨极惰性气体保护电弧焊及等离子焊用钨电极.
- [4] Miller Electric Mfg. Co., Guidelines for Selecting Tungsten Electrodes, 2020.
- [5] Welding Handbook, Volume 2: Welding Processes, American Welding Society, 2010.
- [6] International Commission on Radiological Protection (ICRP), Publication 103, 2007.
- [7] Zhang, W., et al., "Advances in Tungsten Electrode Materials for TIG Welding," Materials Science and Engineering, 2018.
- [8] European Welding Association, Technical Report on Thorium Tungsten Electrodes, 2015.
- [9] Li, H., et al., "Environmental and Health Impacts of Thorium-Based Electrodes," Journal of Industrial Ecology, 2020.
- [10] Wang, Y., "Development of Non-Radioactive Tungsten Electrodes," Welding Journal, 2022.
- [11] GB 18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准.
- [12] Chen, L., "Powder Metallurgy Techniques for Tungsten-Based Electrodes," Journal of Materials Processing Technology, 2019.
- [13] Liu, X., 钍钨电极生产中的放射性防护技术 [Radioactive Protection Techniques in Thorium-Tungsten Electrode Production], China Welding Journal, 2021.
- [14] Powder Metallurgy Equipment Handbook, ASM International, 2017.