

《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》团体标准

征求意见稿 编制说明

一、任务来源

铝电解槽阴极铝钢直焊技术的发展源于电解铝行业对节能降耗与大型化生产的迫切需求。传统焊接方法依赖爆炸焊块和钢连片作为过渡材料，不仅工序复杂、焊口数量多，且在电解槽系列电流提升至更高水平后，强磁场环境导致手工焊接难以实施，焊口压降高、能耗大，维修成本居高不下。尤其随着电解槽容量的持续扩大，传统方法在物理性能与工艺层面暴露明显局限——铝与钢的熔点、热膨胀系数及导热性差异显著，异种金属直接焊接长期被视为技术难题，而爆炸焊块的开裂风险进一步制约了生产稳定性。

铝钢直焊技术的核心突破在于摒弃过渡材料，通过特殊工艺在阴极钢棒端面形成铝层，实现铝软带与钢基体的直接熔合。该方法将焊口数量大幅减少，显著降低焊口压降，同时规避了磁场干扰下的焊接障碍。其工艺创新包括全截面焊接的实现，确保焊缝有效导电面积最大化，从而减少电流偏流风险，提升电解槽运行稳定性。此外，该技术支持带电环境操作，无需停槽即可完成修复，既保障生产连续性，又降低安全风险。

经济效益方面，该技术通过简化材料与工序，显著削减焊接成本及后期维护需求。更关键的是，其节能效果直接体现为吨铝电耗的降低，为电解铝企业绿色转型提供技术支撑。行业逐步以该技术替代传统爆炸焊块模式，推动阴极连接工艺向高效、高可靠性方向演进，为电解槽大型化与智能化升级奠定基础。

目前，铝电解槽阴极铝钢直焊技术相关的标准有YB/T 4926-2021 铝电解槽阴极扁钢、YS/T 5035-2016 铝电解槽带电焊接技术规范。

团体标准与YB/T 4926-2021、YS/T 5035-2016相比，在技术理念和应用场景上存在显著差异。YB/T 4926-2021主要针对阴极扁钢的材料规格和机械性能提出要求，侧重于材料本身的标准化，而YS/T 5035-2016则聚焦于带电焊接的工艺安全与操作流程，强调在不停电条件下的焊接规范性。相比之下，团体标准的核心优势在于其创新性地整合了铝钢直焊技术的全流程规范，突破了传统依赖爆炸焊块或钢连片过渡的工艺限制，直接实现铝层与钢面的高效连接，从而显著降低焊口压降和能耗。该标准不仅覆盖了材料预处理、焊接工艺、质量控制等环节，还引入了氩气保护、多层多道焊等先进方法，确保焊缝的导电稳定性和寿命匹配电解槽大修周期。此外，团体标准更注重环保与安全防护，明确焊接烟尘处理和废弃焊材分类要求，填补了铝钢异种材料直焊领域的标准空白，为电解铝行业节能降耗提供了可操作性更强的技术依据。

为此申请立项《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》该标准。本团体标准的制定，具有以下几方面的意义：

1. 推动行业技术进步

该标准的制定将系统总结铝钢直焊技术的核心工艺与质量控制要求，为行业提供统一的技术指南，避免企业因工艺差异导致的质量不稳定问题。通过规范焊接方法、材料选用及操作流程，促进技术迭代与创新，推动电解铝行业从传统过渡连接方式向高效直焊技术转型。

2. 提升能源利用效率

铝钢直焊技术通过减少传统焊接中的过渡环节（如钢连片、爆炸焊块），显著降低焊口压降，从而减少电流传输过程中的能量损耗。团体标准的实施可确保焊接工艺的优化，进一步挖掘节能潜力，助力企业实现绿色低碳生产目标。

3. 降低生产成本与资源消耗

标准化的直焊技术可减少焊接工序和辅助材料的使用，简化生产流程，降低人工与设备投入。同时，通过规范材料选择与工艺控制，延长焊接结构寿命，减少因维修或更换导致的资源浪费，提升整体经济效益。

4. 保障生产安全与稳定性

标准明确焊接质量检测、无损探伤及性能验证要求，可有效避免因焊缝缺陷引发的电解槽运行故障（如过热、脱落）。此外，通过规范操作人员资质与安全防护措施，降低焊接过程中的职业健康风险，确保生产系统长期稳定运行。

5. 促进产业链协同发展

团体标准为上下游企业（如阴极材料供应商、电解槽设计单位、施工方）提供了统一的技术接口，减少因技术参数不匹配导致的协作障碍。同时，标准化的技术输出有助于形成行业共识，推动铝钢直焊技术在新建或改造项目中的规模化应用。

先进性与创新型：

1. 技术突破：铝钢异种材料直接焊接技术革新

项目突破传统铝钢焊接依赖过渡接头的技术瓶颈，首创铝电解槽阴极铝钢直接焊接工艺，通过优化焊接热源控制与界面冶金反应，实现铝与钢的冶金结合。该技术省去过渡材料，减少界面接触电阻，提升阴极系统导电性和结构稳定性，解决了传统间接焊接工艺中接头易失效、能耗偏高的行业难题，为铝电解槽长周期稳定运行提供技术支撑。

2. 工艺创新：全流程精细化焊接工艺体系

构建“焊前预处理-精准焊接-焊后强化”全流程工艺体系。焊前采用分级表面清理（机械打磨+化学清洗）与梯度预热技术，消除氧化膜与应力；焊接阶段通过钨极氩弧焊（TIG）或熔化极氩弧焊（MIG）的参数动态调控，实现熔池稳定成形；焊后引入针对性热处理与表面钝化工艺，细化晶粒并抑制界面脆性相生成。工艺链条的协同优化使焊接接头熔合率与力学性能同步提升，突破异种材料焊接质量不稳定的瓶颈。

3. 材料适配：多材料体系协同设计

针对铝、钢、阴极炭块的材料特性差异，建立“材料性能-焊接工艺-接头质量”匹配模型。铝导杆选用高纯度工业纯铝，降低电阻率；阴极钢棒采用低碳钢/低合金钢，平衡强度与焊接性；焊接材料选用铝硅合金焊丝与高纯保护气体，优化熔池流动性与界面冶金反应。材料体系的精准适配确保焊接接头兼具高强度与高导电性，满足电解槽极端工况下的服役需求。

4. 质量控制：多维度智能检测与评价体系

创新构建“外观-无损-力学-导电”四维质量检测体系。外观检验严控焊缝成形与缺陷；无损检测（渗透/超声波）确保内部熔合质量；力学性能检验验证接头强度储备；导电性检验量化接触电阻。通过关键指标（如熔合率、抗拉强度）的数字化管控，实现焊接质量的全生命周期追溯，树立铝电解槽焊接质量控制新标杆。

5. 安全环保：绿色焊接与本质安全技术集成

融合GB 29741铝电解安全生产规范，建立全流程安全环保管控机制。焊前采用低尘表面处理工艺，减少有害颗粒物；焊接过程配备局部排风系统，控制焊接烟尘扩散；焊后废弃物分类处理，实现危险废物合规处置。同时，通过自动化焊接设备应用降低人工操作风险，构建“人-机-环”协同的本质安全体系，推动铝电解行业绿色制造升级。

二、起草单位所作工作

1. 起草单位

本标准由XXX等单位共同起草。

2. 主要起草单位及其所作工作

本文件主要起草单位及工作职责见表1。

表1 主要起草单位及工作职责

起草单位	工作职责
XXX	项目主编单位主编人员，负责标准制定的统筹规划与安排，标准内容和试验方案编制与确定，标准水平的把握及标准编制运行的组织协调。人员中包括了行业资深专业人员，行业管理人员
XXX	实际生产单位、负责汇报实际生产数据、试验方法，参与标准编制。

三、标准的编制原则

标准起草小组在编制标准过程中，以国家、行业现有的标准为制订基础，结合我国目前的行业现状，按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定及相关要求编制。

四、标准编制过程

4.1 调研阶段

1. 技术现状调研

通过对国内外铝电解槽阴极焊接技术的全面梳理，发现传统工艺普遍采用“铝-过渡接头-钢”间接焊接方式，存在界面接触电阻高、接头易腐蚀失效、工艺环节复杂等问题。调研显示，铝钢异种材料直接焊接因铝钢熔点差异大、界面易生成脆性相，一直是行业技术瓶颈。现有研究多聚焦于实验室阶段的焊接方法探索，但缺乏系统性工艺规范与质量控制标准，亟需通过标准化推动技术产业化落地。

2. 市场需求分析

随着铝电解行业向大型化、高效化发展，市场对电解槽寿命（目标 ≥ 2000 天）和能耗（直流电耗 ≤ 12500 kWh/t-Al）提出更高要求。调研数据显示，阴极系统失效导致的电解槽大修占比超60%，而焊接接头质量是关键影响因素。下游电解铝企业普遍期望通过直焊技术简化流程、降低能耗，同时对焊接质量稳定性、检测方法标准化需求迫切，市场对技术规范的需求已进入爆发期。

3. 相关标准研究

系统分析了GB 29741《铝电解安全生产规范》、YS/T 287《铝电解用半石墨质阴极炭块》等12项现行标准，发现现有标准存在三方面缺口：一是缺乏铝钢直焊的专用工艺参数；二是异种材料焊接接头的质量评价指标（如熔合率、导电性）未明确；三是焊后热处理与环保要求的针对性条款不足。本标准将填补上述空白，形成与现有标准的协同配套体系。

4. 产业链调研

对产业链上下游开展全覆盖调研：上游材料端，确认工业纯铝（99.5%）、低碳钢、铝硅合金焊丝等关键材料的供应稳定性，与3家头部供应商建立技术协作机制；中游设备端，调研了TIG/MIG焊机、无损检测设备的技术适配性，验证了自动化焊接设备的工艺兼容性；下游应用端，联合5家电解铝企业开展工艺试焊，收集施工反馈并优化操作要点，确保标准的产业适用性。

5. 行业问题与挑战

调研总结行业面临三大核心挑战：技术层面，铝钢界面脆性相控制与焊接应力消除难度大；质量层面，缺乏统一的熔合率检测方法 with 合格阈值；环保层面，焊接烟尘与废弃物处理需满足新《环保法》要求。此

外，行业存在工艺参数混乱、检验方法不统一等问题，导致焊接质量波动大，亟需通过标准制定实现“技术统一、质量可控、安全环保”的规范化发展。

4.2 立项阶段

2025年8月15日，中国技术市场协会正式批准《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》立项。

4.3 起草阶段

4.3.1 成立标准制定工作组，根据《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》编制需要，XXX等机构相关专家成立标准制定工作组。

4.3.2 形成标准草案：根据工作计划及分工安排，在系统参考、学习已有标准及研究的基础上，标准制定工作组完成《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》各部分内容，并于2025年9月30日汇总形成标准草案。

4.3.3 2025年10月30日，通过腾讯会议线上召开了《铝电解槽阴极铝钢直焊技术规范》团体标准讨论会，与会代表30余人参加会议。会上，标准编制组就该标准立项背景和标准框架分别进行了介绍。与会专家和代表就标准名称、框架结构、定义、范围、技术指标、试验方法等内容进行了深入讨论。明确了该标准编制工作方向，并提出了一系列标准内容的完善措施和修改意见、建议。

在讨论会结束后标准编制工作组根据与会专家及参会代表的意见和建议，对标准稿进行了修改完善，形成了标准征求意见稿和编制说明。

4.4 征求意见阶段

2025年10月31日，本标准由中国技术市场协会在全国团体标准信息平台面向社会进行公开征求意见，同时由编制工作组向相关单位进行定向征求意见，具体见《征求意见汇总表》。

五、标准主要内容

根据生产企业XXX等单位的产品数据得到以下主要技术内容：

1. 焊缝表面质量

焊缝表面质量是焊接接头外观检验的核心指标，要求焊缝表面平整、无裂纹、气孔、夹渣、未焊透等缺陷。该指标直接反映焊接工艺的稳定性：表面裂纹可能导致应力集中，在电解槽热循环载荷下扩展；气孔和夹渣会降低接头致密性，增加电解液渗透风险。通过目视 inspection 与表面粗糙度检测，可直观评估焊接过程中熔池保护、参数控制的有效性，是保障接头结构完整性与耐腐蚀性的首要屏障。

2. 焊缝尺寸偏差

焊缝尺寸偏差要求焊脚高度、坡口填充度等关键尺寸符合设计标准，偏差需控制在允许范围内。尺寸不足会导致接头承载面积减小，降低力学性能储备；尺寸过大则可能引入焊接残余应力，引发接头变形或开裂。该指标通过卡尺、样板等工具测量，确保焊接接头与阴极炭块、钢棒的结构匹配性，是实现电解槽电流均匀分布与结构受力平衡的基础。

3. 焊接接头熔合率

熔合率是衡量母材与焊缝金属结合程度的关键指标，要求不低于特定阈值。熔合率不足意味着母材与焊缝未充分冶金结合，存在界面分层风险，在电解槽高温、强电场环境下易发生接触电阻升高或接头断裂。通过超声波检测（UT）或渗透检测（PT）评估，该指标直接关联焊接热源控制精度与坡口设计合理性，是保障接头长期服役可靠性的核心参数。

4. 焊接接头抗拉强度

抗拉强度要求焊接接头不低于母材最低抗拉强度的特定比例，反映接头在拉伸载荷下的承载能力。铝电解槽运行中，阴极系统承受热膨胀应力与电磁力，抗拉强度不足会导致接头塑性变形或脆性断裂，引发电解槽漏槽等重大事故。通过拉伸试验测定，该指标综合体现焊接材料匹配性、热影响区软化程度及焊后热处理效果，是接头力学性能的核心保障。

5. 焊接接头电阻值

电阻值是评估焊接接头导电性的关键指标，要求不大于设计阈值。铝电解槽通过阴极系统传导强大电流，接头电阻过大会导致局部过热、能耗升高，甚至影响电解效率。采用四探针法或直流压降法测量，该指标与焊接熔合质量、界面氧化程度密切相关，直接关系电解槽直流电耗控制与运行经济性，是实现“节能降碳”目标的重要技术参数。

六、主要试验（验证）的分析，技术经济论证，预期的经济效果

6.1 主要试验（验证）的分析

本项目通过多维度试验验证体系，系统评估铝电解槽阴极铝钢直焊技术的可靠性与稳定性。在焊接工艺验证方面，重点开展了焊接方法对比试验，通过对钨极氩弧焊（TIG）与熔化极氩弧焊（MIG）在不同材料厚度下的焊接效果进行测试，分析两种方法对焊缝成形、熔深及热影响区的影响规律，最终确定适配铝钢异种材料焊接的最优工艺路径。材料兼容性试验覆盖阴极炭块、铝及铝合金、钢材料的匹配性验证，通过模拟电解槽高温服役环境，测试不同材料组合下焊接接头的界面反应行为，确保无脆性相生成及界面剥离风险。质量检验验证环节，采用外观检验、无损检测（渗透/超声波）、力学性能检验及导电性检验的组合方案，通过破坏性与非破坏性试验结合，全面验证焊接接头的熔合质量、强度储备及导电性能，确保各项指标满足电解槽长期稳定运行需求。此外，工艺稳定性验证通过多批次焊接试验，分析焊前清理时效、预热温度波动、焊接参数偏差对最终质量的影响，建立工艺参数容错区间，为工业化应用提供数据支撑。

6.2 技术经济论证

该项目技术方案具备坚实的可行性基础，核心体现在成熟工艺的创新集成与标准化体系的完善。从材料体系看，阴极炭块符合YS/T 287或YS/T 623标准，铝及铝合金材料选用高纯度工业纯铝或合规铝合金，钢材采用低碳钢/低合金钢，焊接材料选用铝硅合金焊丝与高纯氩气，材料性能均有明确标准支撑且供应稳定。焊接工艺方面，焊前准备环节细化表面清理（机械+化学方法）、坡口加工及预热工艺，焊接操作明确TIG/MIG方法及参数控制要点，焊后处理包含清理与针对性热处理，全流程工艺参数基于大量试验数据优化，可操作性强。质量控制体系融合外观、无损、力学、导电四维检测方法，引用GB/T 18851（渗透检测）、GB/T 11345（超声波检测）等国家标准，确保检测结果权威可靠。安全环保方面，严格遵循GB 29741铝电解安全生产规范，配备通风防护设施与废弃物处理机制，符合行业安全环保要求。整体技术路线已通过实验室验证与中试考核，工艺稳定性与可靠性得到充分验证，具备工业化推广条件。

该技术方案的经济合理性体现在全生命周期成本优化与资源利用效率提升。相较于传统铝钢焊接依赖过渡接头的工艺，直焊技术省去过渡材料采购成本，减少材料库存与管理费用，同时简化焊接工序，缩短施工周期，降低人工成本。从能耗角度，直焊接头导电性提升可降低电解槽运行电阻，减少电能损耗，长期运行可显著节约电费支出。质量提升带来的维护成本降低是另一重要经济优势：焊接接头熔合质量与力学性能的优化，可延长电解槽使用寿命，减少因阴极系统失效导致的大修次数，降低停机损失与维修费用。此外，标准化的工艺与质量控制体系减少返工率，提高生产效率，间接提升企业产能利用率。从行业层面，该技术推动铝电解槽制造向绿色化、高效化转型，符合国家节能减排政策导向，可帮助企业获得政策支持与市场竞争优势，综合经济效益显著。

6.3 预期的经济效果

该项目的推广应用将为铝电解行业带来多维度经济收益。在生产效率方面，直焊技术简化焊接流程，缩短电解槽组装周期，助力企业实现产能扩张，提升市场响应速度。能耗降低方面，优化后的焊接接头导电性提升，可降低电解槽直流电耗，按行业平均生产规模估算，长期运行可产生可观的电费节约效益。设备寿命延长方面，高质量焊接接头减少阴极系统故障风险，电解槽大修周期延长，显著降低固定资产重置成本与停机损失。资源利用方面，省去过渡材料与减少焊接耗材消耗，降低原材料采购支出，同时焊后废弃物合规处理减少环保罚款风险。从产业链协同效应看，该技术标准化将带动焊接设备、检测仪器、材料供应等上下游产业发展，形成产业集群效应。此外，技术创新提升企业核心竞争力，有助于开拓高端市场，树立行业标杆，实现经济效益与品牌价值的双重提升，推动铝电解行业向高质量发展转型。

七、标准水平分析

7.1 采用国际标准和国外先进标准的程度

经查，暂无相同类型的国际标准与国外标准，故没有相应的国际标准、国外标准可采用。

7.2 与国际标准及国外标准水平对比

本标准达到国内先进水平。

7.3 与现有标准及制定中的标准协调配套情况

本标准的制定与现有的标准及制定中的标准协调配套，无重复交叉现象。

7.4 设计国内外专利及处置情况

经查，本标准没有涉及国内外专利。

八、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准及相关标准协调配套情况

本标准的制定过程、技术要求的选定、试验方法的确定、检验项目设置等符合现行法律、法规和强制性国家标准的规定。

九、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

十、标准作为强制性或推荐性标准的建议

建议该标准作为推荐性团体标准。

十一、贯彻标准的要求和措施建议，包括（组织措施、技术措施、过渡办法）

由于本标准首次制定，没有特殊要求。

十二、废止现有有关标准的建议

无。

团体标准起草组

2025 年 10 月