

高压加热器换热管管头焊接工艺创新及耐久性提升

赵建兵

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南 715501

DOI:10.32629/ems.v8i3.18748

[摘要] 高压加热器作为发电厂回热系统的核心装置,其运行稳定性对电厂整体效能与安全运行具有决定性影响。其中,换热管与管板连接部位的焊接接头由于长期处于高温高压及周期性热应力作用之下,成为设备中最易发生故障的关键部位,其制造工艺与使用寿命一直是业内重点研究的课题。本研究全面梳理了当前高压加热器管头焊接技术的最新发展动态,着重探讨了智能焊接系统、受限空间焊接工艺以及高可靠性焊接方法等三大技术领域的创新成果,详细分析了这些先进工艺如何通过精确调控焊接热循环、改善焊缝区及热影响区的金相结构、有效控制并均匀化焊接残余应力场,进而显著增强焊接接头在腐蚀环境和复杂应力条件下的抗疲劳性能、抗应力腐蚀开裂能力以及高温蠕变抗力。

[关键词] 高压加热器; 换热管; 管头焊接; 工艺创新

1 引言

高压加热器管头焊接工艺长期采用手工钨极氩弧焊技术,尽管该方法具备操作灵活性,但焊接质量受制于操作者的技术水平、作业习惯及工作状态,导致成品质量参差不齐。工程实践中常见多种焊接缺陷:电弧不稳定引发的熔合不良或焊穿现象;清理不充分或保护措施不到位造成的夹杂和气孔缺陷;热量输入控制失当引起的焊缝晶粒异常生长及热影响区组织劣化等问题。这些工艺缺陷在严苛工况下往往会演变为裂纹起始点,最终造成连接部位失效并引发泄漏故障。数据显示,高压加热器非计划停机事件中,相当比例源于管头焊接接头的早期破坏。随着发电机组运行参数持续提升,设备可靠性标准日趋严格,传统手工焊接的弊端日益显现。同时,新型蛇形管式及模块化高压加热器的应用,使得管接头排列更为紧凑,操作空间进一步受限,这给手工焊接带来了更大的技术挑战和质量隐患。在此背景下,实现焊接工艺从“经验依赖型”向“技术稳定型”的根本转变,通过工艺创新确保焊接质量的均一性、可追踪性及接头长效性,已成为当前行业发展的关键课题。本文针对这一领域,将深入分析高压加热器管头焊接技术的革新实践及其对使用寿命的改善机制。

2 焊接工艺的主要创新方向

2.1 从手工到自动:自动氩弧焊技术的突破与应用

焊接自动化的根本宗旨在于消除人工操作带来的变数,确保焊接工艺参数的精准调控与可靠重现。在高压加热器生产过程中,自动氩弧焊工艺的突破性应用具有划时代意义。针对蛇形管高压加热器这类结构密集、管路交错的产品,研发团队在应对集箱密集管接头焊接时突破了多项技术瓶颈。首要突破在于专用焊接设备的研制。该装置通常整合了精密焊接电源、多轴联动机械臂、适应异形焊缝的专用焊炬以及智能控制系统。焊炬的研发尤为关键,需实现在受限空间内自如移动并维持电弧稳定的双重目标。另一项重要突破在于配套的高精度定位夹具系统。必须保证所有换热管与管板或集箱接口在焊接过程中始终保持精准对位,任何细微错位都可能引发焊缝偏移或熔合缺陷。最关键的技术突破在于焊接参数的智能化调控。通过大量实验验证与数值模拟,确定针对不同材质组合、接头类型的最佳工艺参数组合,包括电流强度、电弧电压、焊接速率、送丝速度以及保护气体配比等,并将这些参数编入可循环执行的焊接指令。这套智能程序能够指挥焊炬完成管接头周向360度的全位置焊接,确保每道焊缝的熔透深度、成形宽度及余高尺寸均达到规范要求。

2.2 空间限制的攻克:三百六十度无死角焊接技术

在传统U形管高压加热装置或特定构造的热交换器中,换热管以极其紧密的方式排列,相邻管道之间的间隙极为狭窄,由此产生了大量常规焊接设备完全无法触及或观察的“焊

接管区”。操作人员既难以清晰观察熔池状态,也无法将焊枪调整至理想焊接位置,传统工艺对此类情况完全无能为力。全方位无死角焊接工艺正是针对这种极端工况研发的专用焊接解决方案。

该技术普遍融合了多项前沿工艺手段,其基本原理在于调整焊接的接近路径与观测角度。常见解决方案之一是使用超长且具备高柔韧性的特制焊枪,部分情况下会配合光纤内窥装置或微型摄像系统,从而能够从管板侧或经由专门设计的工艺孔深入密集管束内部完成焊接作业。焊枪前端可能集成主动冷却装置和关节调节机构,以应对复杂的内部空间环境。另一种技术路线是采用背面焊接或称为内孔焊接工艺,即通过换热管内孔插入微型焊枪实施焊接,这对焊枪尺寸的微型化和控制系统的精密程度提出了极高要求。同时,在工艺规划阶段就需预先考量焊接可达性问题,通过优化管道布置方案、预留必要的工艺通道、制定合理的焊接工序,来避免或减少难以观察的焊接位置。

2.3 高效与可靠的结合:内孔焊及窄间隙焊接技术

内孔焊接工艺,本质上是通过将焊接能量源从管材内侧直接作用于管板孔壁表面来实现连接。该技术形成的接合部位,其熔合边界位于连接区域的最深处,焊缝表面呈现出均匀流畅的形态,能够有效消除常规坡口焊接在管板侧可能产生的间隙与不易清理的区域,显著降低了因间隙存在而导致的腐蚀问题。这种工艺特别适合处理介质纯度要求严格或具有强腐蚀特性的工作环境。但需要特别注意的是,内孔焊接对加工设备的精确度和工艺参数的精准调控提出了极高的标准。

窄间隙焊接技术为大厚度构件对接提供了一种高效优质的解决方案。相较于传统方法需要开设大角度V形或U形坡口,这种工艺采用特殊的I形或极小角度坡口设计,其宽度通常仅为常规坡口的几分之一。这种设计显著减少了所需填充金属量,同时降低了焊接道次,从而有效控制了整体热输入。

热输入量的减少带来了多重优势:首先,焊接变形得到有效控制,使接头更易达到尺寸精度要求;其次,热影响区

范围明显缩小,材料组织性能劣化程度减轻;再者,焊接残余应力水平大幅下降。在高压加热器制造中,特别是集箱大直径厚壁对接、管板与壳体连接等关键部位,采用窄间隙焊接不仅能缩短生产周期、降低焊材消耗,更能显著提升接头的力学性能和抗应力腐蚀能力。

3 工艺创新对焊接接头耐久性的提升机理

3.1 微观组织优化与耐蚀性增强

焊接接头的微观结构特征,涵盖焊缝区域的凝固组织与热影响区的固态转变组织,构成了材料各项物理化学特性的基础。采用常规手工焊接工艺时,由于热量输入存在波动性,往往导致熔合区晶粒尺寸分布不均,甚至形成异常粗大的柱状晶体结构。与此同时,热影响区可能出现脆性马氏体相或晶粒异常粗化现象。这种组织不均匀性会显著削弱材料的抗腐蚀能力。晶粒尺寸增大虽然减少了晶界总长度,但单个晶界上的杂质元素偏析程度可能更为严重,从而影响材料的化学稳定性。组织不均匀还会引起局部电位差异增大,在腐蚀环境中更易形成微区电偶腐蚀,促进局部腐蚀或点蚀的发展。

现代焊接技术的革新与低温热输入工艺的应用,彻底改善了传统焊接的局限性。通过精确控制焊接参数,确保每道焊缝的热循环过程保持高度一致,从而促进接头区域微观组织的均匀分布。采用窄间隙焊等先进工艺,有效减少了单次焊接的热输入量,加快了焊缝冷却速率,这不仅有助于形成更细密的等轴晶或柱状晶结构,还能使热影响区变得狭窄且均匀,有效防止了有害组织的产生。

这些工艺创新通过实现微观组织的细化、均匀化和稳定化,为焊接接头建立了抵御环境腐蚀的可靠屏障。具体表现为,凝固组织晶粒尺寸显著减小,热影响区范围得到严格控制,合金元素分布更加合理,这些因素共同构成了接头抗腐蚀性能提升的关键要素。

3.2 残余应力控制与结构完整性改善

焊接过程中由于温度分布不均引发的内应力被称为焊接残余应力,这种应力是造成接头出现应力腐蚀裂纹、疲劳破坏以及脆性断裂现象的关键因素之一。在高压加热器的实际

运行工况中, 工作载荷与焊接残余应力相互叠加, 往往会在应力集中区域使材料达到断裂临界值。

现代焊接技术通过源头控制和后续处理相结合的方式, 全面优化残余应力的管理。在焊接操作阶段, 采用自动化设备和低热输入工艺能够有效缩小热影响区域, 形成更加均匀的温度梯度, 显著降低因冷却不均引发的应力集中现象。窄间隙焊接技术凭借其金属填充量少、热输入量低的特点, 在纵向和横向收缩应力方面均展现出优于传统工艺的表现。从工艺规划角度考量, 通过实施对称焊接、分段退焊等科学合理的焊接顺序和方向安排, 能够主动调控应力分布并实现相互抵消效果。针对特定低合金钢焊接接头, 实施规范的焊后热处理工艺是消除残余应力的重要环节。该工艺通过将焊件加热至特定温度并保持适当时间, 促使材料发生蠕变松弛现象, 从而降低应力峰值, 实现应力均匀分布, 同时还能提升热影响区的韧性指标。

4 工艺创新的发展路径与未来趋势

4.1 全自动化焊接系统的集成开发

未来自动化发展将突破单一焊接设备的局限, 逐步向涵盖上下料、定位、装夹、焊接、检测及清枪等全流程的智能生产单元或柔性产线转变。这种转变需要整合工业机器人、机器视觉、力觉传感与数字孪生等多项前沿技术。具体而言, 三维视觉系统可自动识别并精确定位待焊管接头, 同时优化焊接轨迹; 力控传感器能实时监测焊枪与工件的接触状态, 精确调节电弧长度; 焊接参数通过实时监控与闭环反馈系统, 可动态补偿装配间隙的微小偏差。此类高度集成的智能系统不仅能适应多品种、小批量的柔性生产需求, 还能显著提升焊接质量的稳定性和可追溯性, 大幅减少人工干预, 成为重大装备制造领域智能制造的典型应用范例。

4.2 异种材料可靠连接技术的拓展

随着超超临界机组、第四代核电站以及光热发电等前沿技术的快速演进, 设备制造领域正逐步采用更多具备优异性能、耐高温特性的特殊材料体系, 包括新型奥氏体耐热钢、镍基合金、氧化物弥散强化合金以及金属间化合物等复合材料。这些新型材料与传统低合金钢之间的异质连接问题, 特

别是异种金属焊接工艺, 对现有连接技术提出了前所未有的严峻考验。

未来的技术突破方向将聚焦于连接界面冶金行为的精确调控与优化。除传统熔焊工艺的持续改进外, 以固相连接为代表的新型连接技术, 包括真空电子束焊接、激光焊接、扩散连接以及摩擦焊接等工艺方法, 将迎来更深入的研究与更广泛的实际应用。这些先进连接技术的主要特征在于其热输入高度集中或完全避免材料熔化过程, 从而显著减小热影响区范围、有效抑制脆性相生成、实现低应力状态下的可靠连接。

5 结语

综上所述, 高压加热器换热管管头的焊接工艺, 作为电站设备制造过程中的关键工序, 集中体现了焊接技术从经验导向向科学化、智能化方向的转型过程。在高温高压及强腐蚀性介质等极端工况下, 传统依赖人工操作的手工焊接方式已无法适应当代工业对设备可靠性和使用寿命的严格要求。通过引入自动化氩弧焊技术、全方位焊接工艺以及窄间隙高效焊接方法等创新手段, 不仅有效克服了焊接可达性和质量稳定性等技术瓶颈, 更重要的是通过对焊接热力学过程和金属相变行为的精确控制, 显著改善了焊缝区域的微观结构特征和残余应力分布, 进而全面提升焊接接头在抗疲劳、耐腐蚀和抗应力开裂等方面的综合性能表现。

[参考文献]

- [1] 胡亦磊, 齐涟, 蔡茜娅. 高压加热器的换热管材质改进与实践[J]. 中国核电, 2022, 15(05): 672-676.
- [2] 于立龙. 一种典型三段式高压加热器制造过程质量控制要点研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23): 149-152.
- [3] 叶盛春, 张何境, 魏豪. 超超临界机组高压加热器泄漏案例分析与节能[J]. 清洗世界, 2022, 38(05): 6-8.
- [4] 刘楠, 来国庆, 周德纯, 等. 浅谈300MW机组高压加热器泄漏分析及治理[J]. 中国设备工程, 2021, (22): 162-163.

作者简介: 赵建兵, 1973.11, 男, 汉族, 陕西岐山人, 本科, 工程师, 研究方向: 汽轮机。