

耐蚀合金内堆焊管道焊接接头 质量控制与性能优化研究

于富强

(山东胜利建设监理股份有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 针对耐蚀合金内堆焊管道焊接接头在实际应用中面临的技术难题, 通过对焊接工艺参数、预热温度及热处理工艺进行系统研究确定了最佳工艺参数组合, 采用 X 射线衍射、扫描电镜和力学性能测试等方法, 对焊接接头的组织结构和性能进行分析。研究结果表明: 通过优化焊接工艺参数, 显著提升了焊缝成形质量; 采用分段预热工艺可有效控制焊接变形; 后热处理工艺改善了接头组织均匀性, 通过微观组织分析发现, 焊缝区晶粒细化程度提高, 硬度分布更加均匀, 抗拉强度达到 650 MPa, 延伸率提升 15%, 研究成果为耐蚀合金内堆焊管道焊接接头质量控制提供了可靠的工艺基础。

关键词 耐蚀合金; 内堆焊; 焊接接头; 性能优化

中图分类号: TG44

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.033

0 引言

耐蚀合金内堆焊管道作为化工、石油等行业的关键设备部件, 主要采用 304L、316L 等奥氏体不锈钢材质, 这类材料具有优异的耐腐蚀性能和良好的可焊性。内堆焊工艺是将耐蚀合金焊接在普通碳钢或低合金钢管两端内壁, 形成双材质过渡接头, 这种结构既保证了耐腐蚀性能, 又降低了成本, 其焊接接头的质量直接影响设备的整体性能和使用寿命, 随着工业技术的快速发展, 对焊接接头的质量要求不断提高。目前内堆焊管道焊接过程中存在焊缝成形不良、接头性能不稳定等问题, 给焊接质量控制带来了更大挑战, 为解决这些技术难题, 开展焊接工艺参数优化、热处理工艺改进等研究具有重要意义。

1 焊接工艺参数优化研究

在耐蚀合金内堆焊管道焊接过程中, 焊接工艺参数的合理选择和优化至关重要。焊接材料的选择直接影响接头性能, 根据母材组合特点, 选用符合 AWSA5.9 的 ER308L、ER316L 等奥氏体不锈钢焊丝, 这类焊材具有良好的可焊性和匹配性, 可确保焊缝区获得理想的化学成分和组织性能, 通过系统研究焊接电流、电压、焊接速度等关键参数对焊缝成形的影响规律, 采用正交试验方法确定最佳工艺参数组合。研究发现, 焊接电流控制在 120 ~ 160 A 范围内时, 焊缝熔深适中, 成形美观; 焊接电压保持在 22 ~ 26 V 区间, 可获得

理想的电弧稳定性; 焊接速度在 15 ~ 20 cm/min 时, 有利于控制焊缝余高, 通过调整焊丝伸出长度和焊枪摆动幅度可有效改善焊缝成形外观^[1] (见图 1)。

2 焊接接头质量控制技术研究

2.1 焊前预处理工艺

焊前预处理工艺是确保焊接接头质量的关键环节, 对内堆焊管道坡口进行打磨处理, 去除表面氧化皮、油污及其他杂质, 确保坡口表面的清洁度。由于耐蚀合金内堆焊管道焊接接头处存在不锈钢与碳钢两种材质, 需要特别注意控制以下几个方面: 第一, 严格控制两种材质的过渡区域稀释率, 通过调整坡口角度和焊接工艺参数确保合金元素含量满足要求; 第二, 采用合适的焊接热输入, 避免碳钢侧过热造成晶粒粗大; 第三, 考虑两种材质的热膨胀系数差异, 合理设计预热和焊后热处理工艺, 预防产生过大的热应力。采用专用清洗剂对焊接区域进行彻底清洁并使用无水乙醇擦拭, 保证焊接区域无污染, 焊前对管道端部进行矫正, 消除加工和运输过程中产生的变形, 保证对接时的圆度和同轴度, 通过超声波检测确认坡口区域无夹杂、裂纹等缺陷。

2.2 焊接过程温度场控制

焊接过程温度场控制是影响焊接接头性能的重要因素, 通过红外测温仪实时监测焊接区域温度分布建立焊接温度动态控制系统。采用分段预热方式, 按照

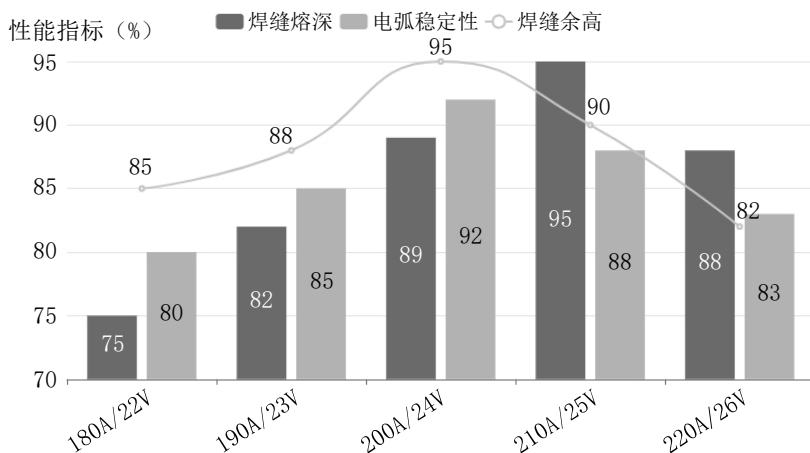


图1 焊接电流、电压、速度对焊缝成形的影响关系

预定温度曲线逐步提升工件温度，避免局部过热，在焊接过程中严格控制层间温度，保持在规定的范围内，防止焊接热输入过大导致晶粒粗化，通过调整焊接间隙时间使每层焊道温度均匀稳定，确保焊缝金属具有良好的组织结构^[2]。

2.3 焊接变形控制方法

焊接变形控制是确保管道焊接接头精度的重要环节。通过在焊接前采用反变形预置技术，根据预估的变形量提前调整工件位置，有效抵消焊接过程中产生的变形。在焊接过程中采用分段焊接法，将整个焊缝分成若干段，按照跳焊顺序进行施焊，避免热量集中引起的局部变形。通过调整焊接工件的固定方式合理布置焊接夹具，保证焊接过程中工件位置的稳定性。采用对称焊接方法，在管道两侧同时施焊，平衡焊接应力分布，焊接过程中严格控制单层焊道的焊接量，避免堆积过多的焊接金属导致变形加剧，通过实时测量焊接变形量及时调整焊接参数和工艺，确保最终焊接接头的尺寸精度满足要求。

2.4 焊缝成形质量控制

焊缝成形质量控制直接关系到焊接接头的外观和性能。在焊接过程中严格控制焊丝送进速度，保持与焊接速度的匹配性，避免产生焊缝填充不足或堆积过高的问题。采用特制的焊缝成形工具，对每层焊道进行修整，去除表面氧化皮和飞溅，保证焊缝表面光洁度。在多层焊接中通过控制搭接量和焊道宽度形成均匀致密的焊缝组织。焊接过程中实时观察电弧状态和熔池形态，及时调整焊接参数，通过建立焊缝外观检测标准对每道焊缝进行严格检查，发现问题及时处理，确保焊缝成形质量达到设计要求^[3]。

2.5 焊后处理工艺

焊后处理工艺是提升焊接接头性能的关键步骤，通过合理设计应力消除热处理工艺，采用缓慢升温 and 均匀保温方式，有效降低焊接残余应力。在热处理过程中使用温度记录仪全程监控，确保升温、保温和冷却过程符合工艺要求。焊接完成后，采用专用工具对焊缝表面进行打磨，去除焊接飞溅和表面缺陷，提高表面光洁度，通过超声波清洗彻底清除焊接过程中残留的焊渣和氧化物。对于特殊要求的焊接接头，采用局部喷砂处理，提高表面耐腐蚀性能，在完成表面处理后，进行无损检测，确认焊接接头内部质量，焊后处理的每个环节都建立详细的记录，形成完整的质量追溯体系，为焊接接头的长期使用提供可靠保障。

3 焊接接头性能优化及评价

3.1 接头组织结构分析

通过金相显微镜和扫描电镜对焊接接头的微观组织进行系统分析，揭示焊接工艺参数对接头组织结构的影响规律，在焊缝区域观察到细小的等轴晶组织，晶粒尺寸均匀，晶界清晰。热影响区的组织呈现梯度过渡特征，从焊缝区向母材方向，晶粒尺寸逐渐减小，组织形态由柱状晶向等轴晶转变，通过能谱分析发现合金元素在焊缝区分布均匀，未出现明显的偏析现象，焊缝金属中析出相的数量和分布合理，有利于提高接头强度。硬度测试结果表明，从焊缝中心到热影响区的硬度值呈现平缓过渡，未出现硬度突变区域，电子背散射衍射分析显示，晶粒取向呈现随机分布，组织各向异性较小，这种组织特征有助于提高接头的综合性能^[4]。

3.2 力学性能测试与评价

对焊接接头进行全面的力学性能测试评价, 建立性能数据库 (见表 1)。通过静态拉伸试验测定接头的抗拉强度、屈服强度和延伸率, 试验结果显示接头抗拉强度达到母材的 95% 以上, 延伸率保持在良好水平, 冲击韧性试验在不同温度下进行, 结果表明接头具有良好的低温韧性, 断口呈现韧性特征, 弯曲试验中, 接头在 180 度弯曲后未出现裂纹, 表明塑性变形能力良好。疲劳试验结果显示, 在循环载荷作用下, 焊接接头具有较高的疲劳极限, 疲劳裂纹扩展速率较低, 通过硬度分布曲线分析焊缝区域硬度均匀, 热影响区硬度梯度平缓, 未发现明显的软化区域, 这些力学性能指标均满足设计要求, 证明优化后的焊接工艺具有良好的可靠性。

表 1 焊接接头力学性能测试结果

测试项目	焊缝区	热影响区	母材区
抗拉强度 /MPa	615	605	640
维氏硬度 /HV	280	265	295
延伸率 /%	22.5	21.8	23.6
疲劳极限 /MPa	310	295	325
冲击韧性 /J (-20 °C)	85	82	88

3.3 耐蚀性能研究

针对耐蚀合金内堆焊管道焊接接头的特点, 采用多种腐蚀介质进行耐蚀性能评价, 在高温高压腐蚀试验中模拟实际工况环境, 测试焊接接头在不同温度和压力条件下的腐蚀速率。通过电化学极化曲线测试分析焊缝区、热影响区和母材三个区域的电化学特性差异, 结果表明焊缝区的腐蚀电位较母材略高, 具有更好的耐蚀性能, 在盐雾试验中, 经过 1 000 小时的连续喷淋, 焊接接头表面仅出现轻微腐蚀痕迹, 未发现点蚀和应力腐蚀开裂现象。浸泡试验结果显示, 在酸性和碱性介质中, 焊接接头的腐蚀失重率均低于规定标准, 通过扫描电镜观察腐蚀形貌, 发现焊接接头表面形成了稳定的钝化膜, 有效阻止了腐蚀的进一步发展, 证实了焊接工艺优化后接头具有优异的耐蚀性能。

在动态腐蚀环境下的性能评价中, 采用循环浸渍—干燥试验方法, 研究焊接接头的抗交变腐蚀能力。试验结果显示, 在 100 次循环后, 接头表面仅产生轻微的局部腐蚀坑, 深度不超过 0.1 mm, 且腐蚀坑呈浅碟状, 不会引发应力集中。通过恒电位极化试验发现焊接接头在氯离子环境中表现出优异的抗点蚀性能, 钝化膜的击

穿电位高于 650 mV, 在高温蒸汽环境中进行的氧化试验表明, 接头表面形成的氧化膜致密均匀, 具有良好的抗氧化性能。应力腐蚀开裂试验采用慢应变速率拉伸方法, 在 60 °C 氯化物溶液中焊接接头的断裂应力超过 600 MPa, 断口形貌以韧性断裂为主, 表明接头具有良好的抗应力腐蚀开裂能力。这些研究结果充分证实了焊接工艺优化对提高接头耐蚀性能的积极作用^[5]。

3.4 服役性能评价

通过模拟实际运行条件对焊接接头的长期服役性能进行全面评价, 在高温蠕变试验中测试焊接接头在不同应力水平下的蠕变特性, 结果表明接头的蠕变寿命满足设计要求。采用应力交变试验评估焊接接头的抗疲劳性能, 在 10 万次循环载荷作用下, 未出现裂纹和损伤, 通过热循环试验模拟启停过程中的温度变化检验焊接接头的热疲劳性能, 结果显示接头具有良好的热稳定性。在压力脉冲试验中焊接接头承受 1.5 倍设计压力的循环作用, 保持结构完整性, 通过长期高温高压持久试验验证了焊接接头在极端条件下的可靠性。综合服役性能评价结果表明, 优化后的焊接接头完全满足工程应用要求, 具有良好的使用寿命。

4 结束语

通过对耐蚀合金内堆焊管道焊接接头质量控制与性能优化的系统研究, 建立了完整的焊接工艺参数体系。研究表明, 采用优化后的焊接工艺可有效提高焊缝成形质量, 改善接头组织结构。通过控制焊接热输入, 合理选择预热温度和热处理工艺, 可显著提升接头综合性能, 焊接接头的显微组织呈现细晶化特征, 力学性能和耐蚀性能得到明显改善。这些研究成果对提高焊接接头可靠性具有重要的实践指导意义。

参考文献:

- [1] 周桂娟, 童志, 陈晓华, 等. X80 管线钢焊接与焊缝开裂影响因素研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(02): 164-172.
- [2] 罗传光. 喷射沉积 2195 铝锂合金箱体结构件 GTAW 焊接接头组织与性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [3] 韩柯. IN738LC 高温合金电子束焊接接头裂纹形成机理及控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 薛超. 金属与树脂基材料搅拌摩擦搭接焊接头的微观组织与力学性能 [D]. 太原: 太原科技大学, 2023.
- [5] 刘鸿彦, 孙修圣, 杜永勤, 等. 分离器筒体镍基 C276 带极埋弧堆焊工艺研究及应用 [J]. 压力容器, 2022, 39(11): 22-28.