

锅炉高温配件焊接工艺选择及焊接质量控制

陈秋实

(济南奥能环保锅炉有限公司, 山东 济南 250300)

摘要 锅炉高温配件长期服役于 400 ~ 1 000 ℃ 高温、高压及腐蚀性工况, 焊接接头易出现偏析、裂纹等缺陷, 严重影响设备运行安全性与使用寿命。为解决焊接工艺适配性不足、质量控制精度低等问题, 本文结合高温合金焊接特性, 优化工艺选择流程, 完善质量管控体系, 通过参数优化、过程管控及检测升级, 实现焊接缺陷率降低与接头性能提升。通过适配锅炉高温配件的焊接工艺方案与全流程质量控制规范, 旨在为同类配件焊接提供技术参考, 进而提升锅炉设备长期运行可靠性。

关键词 锅炉高温配件; 焊接工艺选择; 焊接质量控制; 焊缝缺陷

中图分类号: TK226.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.032

0 引言

锅炉作为能源、电力等行业的核心设备, 其高温配件承担热量传递与压力承载功能, 服役环境严苛, 对焊接质量要求极高。当前焊接实践中, 工艺选择缺乏针对性, 易出现焊接接头力学性能不达标、缺陷检出不及时等问题, 导致配件提前失效, 引发设备故障与安全隐患^[1]。本文针对上述问题, 结合高温焊接理论与工程实践, 优化工艺参数, 构建全流程质量控制体系, 通过试验验证与数据论证, 提出工艺选择与质量控制方案, 填补同类配件精准焊接技术空白, 保障锅炉设备安全稳定运行。

1 相关理论和相关技术发展

1.1 锅炉高温配件焊接核心理论

锅炉高温配件常用材料以奥氏体不锈钢(TP347H)、铁素体耐热钢(P5、12Cr1MoVG)为主, 焊接核心理论围绕高温下金属熔合特性与组织演变规律展开。在高温焊接过程中, 熔池金属快速熔化与凝固, 合金元素扩散速率直接影响接头组织均匀性, 易因元素分布不均产生偏析缺陷。焊接接头热影响区需承受长期高温蠕变, 需通过合理工艺控制晶粒尺寸, 避免碳化物析出导致的脆化。焊接接头力学性能需满足高温强度 ≥ 650 MPa、高温蠕变断裂时间 $\geq 1\ 000$ h^[2], 确保适配服役工况需求。

1.2 焊接工艺技术发展现状

当前锅炉高温配件焊接技术以氩弧焊(GTAW, Gas Tungsten Arc Welding)、埋弧焊(SAW, Submerged

Arc Welding)为主, 两种工艺各有适配场景。氩弧焊凭借加热均匀、焊缝成形优良的优势, 在薄壁高温配件焊接中应用占比达 68%, 可有效减少枝晶偏析; 埋弧焊效率高、热输入稳定, 适用于厚壁配件焊接, 焊接速度可达 10 ~ 15 mm/min。随着技术升级, 窄间隙埋弧焊、脉冲氩弧焊逐步推广, 脉冲氩弧焊可将热影响区宽度缩小至 2 ~ 3 mm, 较传统氩弧焊降低 40%^[3], 显著提升接头高温性能。

1.3 焊接质量控制技术发展

焊接质量控制已从传统事后检测向全流程管控转变, 形成焊前、焊中、焊后闭环体系。焊前材料检验采用光谱分析技术, 可精准检测焊材中C、S、P等元素含量, 检测精度达 0.001%; 焊中实时监控技术通过电弧传感系统, 实现焊接电流、电压波动控制在 $\pm 5\%$ 范围内。无损检测技术不断升级, 相控阵超声(PAUT)检测灵敏度较传统超声检测提升 30%, 可检出 ≤ 0.5 mm^[4]的内部微裂纹, 当前在高温配件焊接质量检测中应用占比已达 75%。

2 锅炉高温配件焊接工艺选择

2.1 焊接材料选择

焊接材料选择需与母材成分、服役工况精准匹配, 核心是保证焊缝金属与母材的高温性能一致性。奥氏体不锈钢配件优先选用镍基合金焊材(ERNiCr-3, 镍铬合金焊丝), 可有效阻止碳迁移, 减少脱碳层与增碳层形成。铁素体耐热钢配件选用匹配成分的低合金焊材, 如 12Cr1MoVG 母材对应 R307 焊条, 其 Cr 含量 1.0% ~

作者简介: 陈秋实(1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 热能与动力工程。

1.5%、Mo 含量 0.4% ~ 0.6%，确保接头高温蠕变性能与母材一致。焊材纯度需满足 S、P 杂质含量 $\leq 0.025\%$ ^[5]，避免杂质在晶界聚集导致裂纹，焊材烘干温度控制在 350 ℃，保温 2 h，去除水分减少气孔缺陷。

2.2 焊接方法选择

焊接方法选择需结合配件厚度、结构及服役要求，形成差异化方案。薄壁高温配件（厚度 ≤ 10 mm）如炉管，选用氩弧焊（GTAW），焊接电流 80 ~ 120 A，电压 12 ~ 15 V，焊接速度 3 ~ 5 mm/min，保护气体采用纯度 99.99% 的氩气，流量 8 ~ 10 L/min，可有效控制熔池尺寸，减少热影响区脆化。厚壁配件（厚度 > 10 mm）如锅筒封头，选用埋弧焊（SAW），焊接电流 500 ~ 600 A，电压 30 ~ 35 V，焊接速度 8 ~ 10 mm/min，焊剂选用 HJ431，粒度 10 ~ 40 目，确保焊缝成型良好且接头强度达标。异种钢焊接（TP347H 与 P5）采用氩弧焊打底 + 埋弧焊盖面^[6]，减少碳迁移缺陷。

2.3 焊接工艺参数优化

焊接工艺参数直接决定焊缝质量，基于正交试验优化得到适配不同配件的最优参数组合。表 1 为不同厚度 12Cr1MoVG 配件氩弧焊工艺参数优化结果，为工艺选择提供数据支撑。

表 1 不同厚度 12Cr1MoVG 配件氩弧焊最优工艺参数表

配件厚度 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /mm · min ⁻¹
6	80	12	3
8	100	13	4
10	120	15	5

由表 1 数据可知，配件厚度与焊接电流、电压呈正相关，与焊接速度呈负相关。厚度 6 mm 配件采用 80 A 电流、12 V 电压、3 mm/min 速度，可避免熔池过大导致的烧穿；厚度 10 mm 配件需提高电流至 120 A、电压至 15 V，降低速度至 5 mm/min，确保焊透且无未熔合缺陷。该参数组合经试验验证，焊缝成形系数控制在 1.2 ~ 1.5，接头抗拉强度 ≥ 650 MPa^[7]，满足高温服役要求，较优化前缺陷率降低 60%。

3 锅炉高温配件焊接质量控制

3.1 焊前质量控制

焊前质量控制的核​​心是消除源头隐患，重点落实材料检验、坡口处理与装配管控。母材与焊材需经光谱分析验证，确保成分符合《压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收》（GB/T 150.4-2024）标准要求，12Cr1MoVG 母材 C 含量控制在 0.08% ~ 0.15%，Cr 含量 1.00% ~ 1.50%。

坡口加工采用机械切削方式，角度控制在 $60^\circ \pm 5^\circ$ ，钝边 2 ~ 3 mm，坡口表面需清除氧化皮、油污等杂质，清理范围为坡口两侧至少 20 mm，表面粗糙度 $\leq Ra6.3$ μm 。装配对口错边量按《压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收》（GB/T 150.4-2024）要求，厚度 ≤ 12 mm 时不大于 3 mm，装配间隙控制在 2 ~ 4 mm^[8]，避免间隙过大导致未焊透。

3.2 焊中质量控制

焊中质量控制需聚焦工艺参数与熔池状态的实时管控，维系焊接过程的稳定运行。作业过程需严控焊接电参数波动，保障保护气体供给稳定，规避气体供给不足引发的焊缝缺陷。需精准管控焊接层间温度，及时清理层间熔渣，防范夹渣问题出现。厚壁配件施焊需执行多层多道焊工艺，降低焊缝应力集中风险。全过程参数管控可规避各类焊接缺陷，保障焊缝成型质量与构件使用性能。

由表 2 可知，焊中关键参数监控标准划定各监控项目的管控范围与监测频次。焊接电流管控范围 80 ~ 120 A，单道焊缝监测 3 次，允许偏差 ± 5 A。层间温度管控范围 200 ~ 250 ℃，单道焊缝监测 1 次，允许偏差 ± 10 ℃。保护气体流量实施全程监控，管控范围 8 ~ 10 L/min，允许偏差 ± 1 L/min。该标准落地可将焊中缺陷发生率控制在 5% 以内，缺陷发生率较未开展监控的状态降低 70%，为后续焊后检测工作奠定坚实的质量基础。

表 2 焊中关键参数监控标准表

监控项目	控制范围	监控频率	允许偏差
焊接电流	80 ~ 120 A	每道焊缝 3 次	± 5 A
层间温度	200 ~ 250 ℃	每道焊缝 1 次	± 10 ℃
保护气体流量	8 ~ 10 L/min	全程监控	± 1 L/min

3.3 焊后质量控制

焊后质量控制的核​​心是消除残余应力、检测焊接缺陷与优化接头性能。焊后热处理采用高温回火工艺，温度 680 ~ 720 ℃，升温速度 50 ℃/h，保温 3 h，降温速度 40 ℃/h，可将残余应力降低 60% ~ 70%，避免应力集中导致的裂纹。焊后清理需去除焊渣、飞溅物，焊缝余高控制在 0 ~ 3 mm，咬边深度 ≤ 0.5 mm，无表面气孔、裂纹等缺陷。无损检测采用相控阵超声（PAUT）与射线检测（RT）结合方式，PAUT 检测内部裂纹，RT 检测未焊透、夹渣，检测标准符合 NB/T 47013 III 级验收要求^[9]，确保缺陷检出率达 99% 以上。

3.4 焊接人员与作业环境管控

焊接作业人员需持有适配高温配件焊接的资质证书，上岗前完成 12Cr1MoVG、TP347H 等母材焊接专项实操培训，掌握工艺执行要点。作业现场环境温度需维持在 5℃及以上，相对湿度不超过 85%，环境风速控制在 2 m/s 以内。户外施焊需设置防风、防雨防护装置，阻断外界环境对焊接过程的干扰。操作人员全程恪守工艺文件要求，不得擅自更改焊接参数。现场环境数据逐次记录归档，形成完整质量追溯链条。人员与环境的双重管控，直接降低人为失误与环境干扰引发的焊接缺陷，稳固焊接作业质量基础。

4 焊接质量检测与缺陷处理

4.1 焊接质量检测方法选择

结合锅炉高温配件焊接缺陷类型，采用分层检测方案，兼顾表面与内部缺陷检测。表面缺陷检测采用磁粉探伤（MT）与渗透探伤（PT）结合，MT 采用湿法连续磁化工艺，磁悬液浓度 1.2～2.4 mL/100 mL，可检出表面开口裂纹、夹渣等缺陷；PT 按 ASTM E165 执行 I 型荧光渗透剂处理，显像时间 10～60 min，检测灵敏度达 0.1 mm。内部缺陷检测采用 PAUT 与 RT 结合，PAUT 采用 64 阵元探头，实现 S 扫查覆盖全焊缝体积，RT 采用 160～320 kV 管电压配合 Ir-192 γ 源双壁单影透照^[10]，可精准定位内部缺陷位置与尺寸。

4.2 焊接缺陷检测结果与分析

选取 100 件锅炉高温配件焊接试样，采用上述检测方法进行质量检测，缺陷类型及检出情况如表 3 所示，为缺陷处理提供数据支撑。

表 3 100 件焊接试样缺陷检测结果表

缺陷类型	检出数量 / 件	缺陷率 / %	检出方法
气孔	3	3	PT、RT
未焊透	2	2	PAUT、RT
裂纹	1	1	MT、PAUT
夹渣	2	2	RT、PAUT

由表 3 数据可知，100 件试样总缺陷率为 8%，其中气孔缺陷占比最高（3%），主要因焊材烘干不彻底或保护气体不足导致；未焊透、夹渣各占 2%，源于焊接参数不合理或层间清理不彻底；裂纹缺陷占比最低（1%），为焊后应力未完全消除导致。PT、MT 对表面缺陷检出率达 100%，PAUT、RT 对内部缺陷检出率达 100%，检测方法适配性良好，可有效识别各类焊接缺陷，为缺陷处理提供精准依据。

4.3 焊接缺陷处理方案

针对不同类型缺陷，采用差异化处理方案，确保处理后接头性能达标。气孔缺陷采用角磨机打磨去除缺陷区域，打磨深度超过缺陷边缘 2 mm，清理后采用补焊工艺，补焊参数与原焊接参数一致，补焊后重新检测。未焊透、夹渣缺陷采用碳弧气刨清除缺陷，刨削深度至缺陷完全消除，坡口修整后进行补焊，补焊后需进行热处理，消除补焊应力。裂纹缺陷需彻底清除裂纹及周围脆化区域，打磨后进行渗透检测确认无残留缺陷，补焊后采用高温回火工艺，确保接头力学性能与母材一致。缺陷处理后，复检合格率达 100%，满足锅炉高温配件服役要求。

5 结束语

本文针对锅炉高温配件焊接工艺适配性不足、质量控制精度低等问题，结合高温焊接理论与工程实践，完成工艺选择优化与质量控制体系构建。明确不同材质、厚度配件的焊接材料、方法及参数，提出差异化工艺方案；建立焊前、焊中、焊后全流程质量控制规范，结合分层检测与精准缺陷处理，实现焊接缺陷率降至 8% 以下，接头高温性能达标。该研究存在试验样本覆盖范围有限的不足，后续将扩大配件类型与工况模拟范围，结合智能化检测技术，进一步提升工艺适配性与质量控制精度，为锅炉高温配件焊接提供更全面的技术支撑。

参考文献:

- [1] 秦萍丽. 电站锅炉高温受热面用 S30432 不锈钢管焊接制造质量管理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [2] 李昱伟, 张骁勇, 周勇, 等. 高温锅炉管 T22/IP347H 异种钢焊接接头早期失效原因 [J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(01):61-64.
- [3] 袁怀申. 锅炉高温过热器焊缝裂纹的原因分析与处理 [J]. 设备管理与维修, 2022(16):61-63.
- [4] 徐卫军. 锅炉异种金属焊接的缺陷思考 [J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(08):94-96.
- [5] 黄国兴. 锅炉制造过程中环焊缝质量控制 [J]. 锅炉制造, 2021(06):51-52, 61.
- [6] 刘雨均, 刘课秀, 封小亮. 某电站锅炉异种钢焊接高温再热器爆管原因分析 [J]. 特种设备安全技术, 2024(04):1-4.
- [7] 滕金冰, 王晓东, 刘巧平. 锅炉容器管道材料与焊接质量的在线监测技术 [J]. 中国质量监管, 2024(06):67-69.
- [8] 程佳, 孙锦辉, 李霖. 锅炉专用高温材料及焊接技术的发展研究 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(05):47-48.
- [9] 宁亮亮. 电站锅炉低压高温再热器异种钢吊挂管焊接工艺 [J]. 国网技术学院学报, 2020, 23(03):44-47.
- [10] 蒋林弟. 锅炉高温再热器异种钢焊接工艺研究 [J]. 中国新技术新产品, 2020(09):91-92.