

锅炉安装中P91管道焊接质量控制措施

姜德美

中石化第五建设有限公司华东分公司 江苏 南京 210048

摘要：P91钢作为锅炉高温高压管道核心用材，具备优异的高温强度与抗蠕变性，但焊接时存在冷裂倾向大、工艺敏感性强等问题，直接影响锅炉运行安全。本文结合P91钢的材质特性与焊接特殊性，分析其焊接常见缺陷及成因，从焊前准备、焊接过程、焊后处理、缺陷返修四个环节制定全流程控制措施，明确质量检测方法与验收标准，为锅炉安装中P91管道焊接质量管控提供科学依据，保障管道焊接质量达标，规避安全隐患。

关键词：锅炉安装；P91管道；焊接质量；控制措施

引言：在锅炉安装工程中，P91管道承担着输送高温高压介质的重要职责，其焊接质量直接关系到锅炉机组的安全稳定运行与使用寿命。由于P91钢属于中合金耐热钢，焊接过程中易出现裂纹、未焊透等缺陷，且现场施工空间狭窄、工况复杂，进一步增加了焊接质量控制难度。因此，深入分析P91钢焊接特性，制定针对性的全流程质量控制措施，规范检测与验收流程，对提升锅炉安装质量、防范安全事故具有重要的现实意义。

1 P91 钢管道焊接相关理论与特性分析

1.1 P91钢的基本特性

(1) P91钢的材质成分：属于中合金耐热钢，主要成分为C、Cr、Mo、V等元素，铬含量约9%、钼含量约1%，搭配钒元素强化基体，与国产同类钢种相比，其微量元素配比更精准，纯度更高，有害杂质含量更低，耐热稳定性更优。(2) P91钢的核心性能：具备优异的高温强度，可长期在600℃左右高温工况下服役；抗氧化性突出，能有效抵御高温烟气腐蚀；抗蠕变性强，减少长期高温下的塑性变形；热传导性适中，热膨胀系数相对稳定，降低温度变化引发的应力损伤。(3) P91钢在锅炉管道中的应用要求：需适配锅炉高温高压核心工况，满足长期连续运行的强度、韧性需求，同时需具备良好的焊接兼容性，确保焊接后接头性能与母材匹配，保障管道系统密封性和安全性。

1.2 P91管道焊接的核心特性

(1) 冷裂倾向：P91钢焊接时冷裂风险较高，不预热条件下，焊接接头易因淬硬组织形成、氢致应力叠加产生冷裂纹；合理控制预热温度（通常150-200℃），可有效降低淬硬倾向，减少冷裂纹产生。(2) 工艺敏感性：焊接工艺参数对接头性能影响显著，层间温度过高易导致晶粒粗大，过低则易产生未熔合；焊接线能量过大易引发接头软化，过小则会增加冷裂风险，需严格把控参

数范围^[1]。(3) 组织不稳定性：焊后接头易形成高硬度马氏体组织，该组织脆性较大，稳定性差，若不及时进行焊后热处理，会降低接头韧性，增加后期开裂隐患。

1.3 锅炉安装中P91管道焊接的特殊性

(1) 工况特殊性：锅炉运行时管道处于高温高压环境，焊接接头需承受高温蠕变和交变应力，对其强度、韧性和密封性要求远高于普通管道。(2) 施工特殊性：现场安装空间狭窄，部分管道位置隐蔽，且管道规格多样，给焊接操作带来不便，易因操作受限导致焊接缺陷。(3) 质量特殊性：焊接缺陷（如裂纹、未焊透）会直接影响锅炉运行安全，一旦出现缺陷，可能引发管道泄漏，甚至导致锅炉停机，后果严重。

1.4 P91管道焊接常见缺陷类型及成因

(1) 裂纹类缺陷：冷裂多由预热不足、氢含量过高、焊后冷却过快导致；热裂则因焊接线能量过大、焊缝化学成分偏析，在高温下产生晶间裂纹，二者均会严重破坏接头完整性。(2) 成形类缺陷：未焊透、未熔合多因焊接电流不足、运条速度过快；夹渣、气孔则与焊条烘干不彻底、保护气体不足、坡口清理不到位相关。(3) 性能类缺陷：冲击韧性不足、硬度超标源于焊后未及时热处理或热处理工艺不当；蠕变强度下降则与焊接线能量失控、晶粒粗大有关。

2 锅炉安装中 P91 管道焊接全流程质量控制措施

2.1 焊前准备阶段质量控制

(1) 人员控制：焊工需接受P91钢焊接专项培训，重点掌握其冷裂倾向、工艺敏感性等核心特性，熟练掌握适配的焊接工艺及缺陷防控技巧，经理论考试和实操考核双重合格后，取得P91钢焊接专项上岗资格证书方可作业。定期组织技能复检与提升培训，对操作不规范、技能下滑的焊工暂停上岗，重新培训考核合格后再恢复作业，从人员源头保障焊接质量。(2) 材料控制：严格按

照设计及规范要求选型P91管材与焊材,焊材需选用与母材成分匹配的低氢型焊丝、焊条,进场时需逐一核查材料规格、材质证明、合格证书,抽样进行化学成分和力学性能检验,不合格材料严禁进场使用。储存时实行分类存放管理,焊材存放于干燥通风的专用库房,控制环境湿度不超过60%,焊条使用前需按规范进行烘干处理,避免受潮影响焊接质量^[2]。(3)设备控制:焊接前对焊接设备、温控设备、检测设备进行全面校准与调试,确保设备性能稳定、参数精准。焊接设备重点检查电流、电压调节精度及运行稳定性,温控设备校准温度显示与控制准确性,检测设备校验灵敏度和检测精度,所有设备经检验合格并做好记录后,方可投入焊接作业,杜绝因设备故障导致焊接参数偏差、温度控制失控等问题。(4)坡口与对口控制:坡口采用机械加工方式,确保坡口角度、钝边尺寸、坡口面平整度符合设计要求,加工后立即清理坡口表面及边缘20mm范围内的氧化皮、铁锈、油污等杂质,避免杂质影响焊缝结合力。对口组对时,确保管道轴线对齐,错边量不超过壁厚的10%且不大于2mm,对口间隙控制在2-4mm,组对后采用牢固的临时固定措施,防止焊接过程中发生变形或位移。

2.2 焊接过程阶段质量控制

(1)焊接工艺参数控制:严格遵循焊接工艺评定报告设定参数,预热温度精准控制在150-200℃,预热范围覆盖坡口两侧各100mm,采用温控设备实时监测并记录;层间温度控制在100-150℃,避免过高导致晶粒粗大、过低引发冷裂;焊接线能量根据管材厚度调整为15-25kJ/cm,全程保持参数稳定,严禁随意调整,确保焊接接头组织均匀、性能达标。(2)焊接操作控制:采用钨极氩弧打底、焊条电弧焊填充盖面的组合焊接方式,打底时保证焊道均匀连续,无未焊透、气孔、夹渣等缺陷,内充氩保护需确保氩气纯度不低于99.99%,流量控制合理,防止焊缝根部氧化。填充盖面时,保持焊条角度、运条速度均匀一致,避免出现咬边、未熔合、焊缝高低不平等问题,确保焊缝成形美观、质量合格。(3)多层多道焊控制:多层多道焊接时,合理控制单道焊层厚度,不超过焊条直径的1.5倍,焊条摆幅均匀适中,避免局部过热导致组织粗大。每焊完一道后,及时清理焊渣、飞溅物及表面缺陷,经焊工自检合格后,方可进行下一道焊接,确保层间结合紧密,无夹渣、未熔合等隐患^[3]。(4)过程监测控制:安排专人对焊接过程进行全程监督,实时跟踪预热温度、层间温度及焊接参数的执行情况,详细记录每道工序的关键数据。同时检查焊接操作规范性,及时纠正不规范操作,发现温度异常、参

数偏差等问题立即停止焊接,分析原因并整改到位后,方可继续作业,确保焊接过程全程可控。

2.3 焊后处理阶段质量控制

(1)后热处理控制:焊接完成后,立即对焊接接头进行保温后热处理,采用保温棉紧密包裹,保温温度控制在200-300℃,恒温时间根据管材厚度确定,一般为2-4小时,通过缓慢冷却减少焊接残余应力,有效抑制冷裂纹产生。(2)焊后热处理控制:后热处理完成后,严格按照规范进行正式焊后热处理,精准控制升温、降温速度,升温速度不超过150℃/h,降温速度不超过100℃/h,恒温温度控制在730-760℃,恒温时间按管材厚度每毫米1-1.5小时计算,确保焊接接头组织充分转变,降低硬度、提升韧性,满足工况使用要求。(3)焊后清理控制:焊后热处理完成后,及时清理焊缝表面的焊渣、飞溅物、氧化皮等杂质,采用角磨机打磨焊缝表面及接头过渡处,使其过渡平缓、表面光滑,符合外观质量要求。清理完成后,由焊工进行自检,重点检查焊缝外观是否存在裂纹、咬边、气孔等缺陷,自检合格后提交后续检测^[4]。

2.4 焊接缺陷返修质量控制

(1)缺陷检测与定位:返修前,采用无损检测、金相检测等多种方法,对焊接接头进行全面排查,精准定位缺陷的位置、大小、形状及深度,做好清晰标记,结合缺陷类型制定针对性返修方案,确保缺陷完全清除,避免遗漏或残留。(2)返修工艺控制:根据缺陷具体情况,采用角磨机、碳弧气刨等合适方式清除缺陷,清除范围需超出缺陷边缘5-10mm,确保无残留缺陷。返修焊接工艺需与原焊接工艺保持一致,严格控制预热温度、层间温度及焊接线能量,返修后及时进行焊后热处理,确保返修接头组织和性能与原接头一致。(3)返修后检验:返修完成后,对返修接头进行全面检验,采用无损检测方法检查内部缺陷,进行力学性能和硬度检测,验证接头性能是否符合设计及规范要求。返修次数不得超过2次,若第二次返修仍不合格,需更换管材或管件,重新焊接后再进行全面检验,确保返修质量达标。

3 锅炉安装中 P91 管道焊接质量检测与验收标准

3.1 焊接质量检测方法选择与应用

(1)无损检测:射线检测主要用于检测焊缝内部裂纹、未焊透、夹渣等缺陷,适用于直管段、管件对接焊缝,操作时需严格遵循规范,控制射线剂量,确保检测灵敏度,避免漏检、误检;超声波检测多用于检测焊缝内部平面缺陷,适配大厚度管道焊接接头,操作前需校准探头,确保检测结果精准,与射线检测互补使用,提

升内部缺陷检出率。(2)力学性能检测:拉伸试验需截取与母材同规格的焊接接头试样,检测接头抗拉强度,指标需不低于母材标准值,确保接头承载能力达标;高温冲击试验需在P91钢服役温度附近进行,检测接头冲击韧性,冲击功指标需符合设计要求,防止接头因韧性不足产生脆性断裂。(3)金相与硬度检测:检测焊缝及热影响区的金相组织,确保无异常粗大晶粒、裂纹等组织缺陷,保证组织稳定性;硬度检测需重点检测焊缝及热影响区,硬度值控制在200-270HB之间,避免硬度超标导致接头脆性增加,或硬度不足影响承载能力。

3.2 焊接质量验收标准

(1)外观质量验收:焊缝成形需均匀光滑,过渡平缓,无明显凹凸不平,焊缝宽度、余高需符合设计及规范要求;表面无裂纹、未熔合、夹渣、气孔、飞溅等缺陷,咬边深度不超过0.5mm,长度不超过焊缝总长的10%,且不大于100mm。(2)内在质量验收:无损检测需符合相关规范,射线检测、超声波检测合格率需达到100%,无未检出的内部缺陷;力学性能检测中,拉伸强度、高温冲击韧性等指标需全部满足设计及材料标准要求,无不合格项。(3)资料验收:需提交完整的焊接相关资料,包括焊接工艺评定报告、焊工上岗资格证书、材料检验报告、焊接记录、检测报告等,资料需真实、规范、完整,签字确认齐全,可追溯焊接全流程,满足验收归档要求^[5]。

3.3 质量检测常见问题及解决措施

(1)检测误差的成因及控制方法:误差主要源于检测设备未校准、操作不规范、检测环境干扰等。需定期校准检测设备,确保设备精度;加强检测人员专业培训,规范操作流程;控制检测环境,避免温度、湿度

等因素影响检测结果,同时采用交叉检测方式,减少误差。(2)不合格项的处理流程及整改要求:发现不合格项后,立即停止相关作业,标注不合格部位,分析不合格成因,制定专项整改方案。对缺陷部位进行彻底清除、返修,返修后重新进行检测,直至合格;对严重不合格项,需上报相关部门,评估影响范围,采取返工、更换等措施,整改完成后重新组织验收,确保焊接质量达标。

结束语

综上所述,锅炉安装中P91管道焊接质量控制是一项系统性、全过程的工作,需兼顾人员、材料、设备、工艺等多方面因素。通过严格落实焊前准备管控、规范焊接过程操作、强化焊后处理与缺陷返修,严格执行质量检测与验收标准,可有效解决P91钢焊接过程中的各类问题,确保焊接接头性能与母材匹配。未来需持续优化焊接工艺,提升管控水平,为锅炉机组长期安全、高效、稳定运行筑牢焊接质量防线。

参考文献

- [1]代永强.火电厂锅炉安装维修中焊接质量控制方式探讨[J].电力系统装备,2022,12(9):106-107.
- [2]张亮.分析火电厂锅炉安装中焊接质量控制方式[J].环球市场,2023,9(30):373-375.
- [3]樊春涛.工艺管道安装工程施工管理中的问题分析[J].化工管理,2022,21(20):173-174.
- [4]杨森,王建民,薛防震.工程工艺管道高效施工全过程创新管理研究[J].石油工程建设,2021,46(03):83-87.
- [5]罗刚.管道焊接质量控制研究[J].化工管理,2024,34(17):30-33.