

垃圾发电锅炉受热面管道焊接质量控制技术

孙志涛

中国电建集团四川工程有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：垃圾发电锅炉受热面变径管道 P91 与 12Cr1MoV 异种钢焊接存在施工难题，本文依托某垃圾电站 SG 型锅炉主蒸汽管道工程案例，剖析管道异种钢材质属性、异形变径结构及机组复杂工况带来的焊接阻碍。以焊前预处理、现场施焊参数、施工工序环境搭建完整质量管控体系，结合分层无损检测方式，梳理异形管壁超声波检测波形干扰诱因，明确焊缝缺陷判定标准与返修管控细则。适配工况的标准化焊接工艺及检测校正手段，可解决异种钢焊缝缺陷、检测偏差等问题，稳定焊缝高温高压、耐腐蚀的服役品质，为同类垃圾发电锅炉受热面管道焊接施工提供技术借鉴。

【关键词】：垃圾发电锅炉；异种钢焊接；受热面管道；质量管控；无损检测

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.049

引言

垃圾发电锅炉受热面管道工况严苛，长期承受高温、高压与强腐蚀作用，核心承压构件的焊接质量关乎设备运行安全与使用寿命。机组变径管道常用 P91 与 12Cr1MoV 异种钢对接，二者焊接与冶金性能差异较大，异形结构受限的作业空间与不均的应力分布，易诱发微裂纹、未熔合等焊接缺陷。烟气腐蚀介质与机组冷热交变荷载叠加，进一步提升焊缝失效概率。本文结合工程实例梳理施工痛点，构建全流程质控体系，优化检测与缺陷防控技术，解决现场施工检测难题，为同类管道焊接提质提供实践依据。

1 受热面管道焊接工况与施焊难点

(1) 管材材质与异种钢焊接特性：垃圾发电锅炉受热面变径管道常用 P91 马氏体耐热钢与 12Cr1MoV 珠光体耐热钢异种对接结构，某垃圾电站 SG 型锅炉施工中，两类钢材焊接适配性较差。P91 钢淬硬倾向大、易生冷裂纹，焊后热处理温控范围窄，工艺容错率低。12Cr1MoV 钢长期高温运行易出现石墨化老化问题^[1]。两类母材热物性与相变特性差异较大，焊接熔合区易出现碳迁移堆积，生成脆性过渡组织。镍基焊材难以彻底消除熔池凝固微裂纹，异种材质冶金反应产生的焊缝隐患，提升了现场焊缝成型与力学性能控制的施工难度。

(2) 受热面结构形态带来的焊接不利因素：该垃圾电站受热面对接管道采用异形变径构造，直管段外径 568mm、壁厚 45mm，锥形变径管外径增至 625mm、壁厚渐变至 79mm，8° 锥角构成非等厚环向焊缝。高温蒸汽冲刷变径转折处，紊流交变载荷集中于焊缝，壁厚不均造成周向应力分布失衡，厚壁段拘束应力更为显著。锥形斜面改变施焊角度，8 至 11 点钟低位作业空间受限，焊缝周向散热不均，薄壁易过烧、厚壁易出现未熔合缺陷。异形结构干扰超声波传播路径，造成波形识别偏差，给现场焊接与无损检测带来双重管控难题。

(3) 机组运行工况对焊缝使用性能要求：垃圾发电锅炉常年在 17.6MPa 压力、540℃ 高温蒸汽工况下运行，服役环境远比常规火电设备恶劣。垃圾焚烧烟气中的氯盐、碱金属等腐蚀成分，让受热面焊缝长期经受高温高压、介质侵蚀、交变冲刷与冷热循环的耦合作用。焊缝需要具备可靠的高温强度、抗热疲劳及抗晶间腐蚀性能。焊缝内部夹渣、微裂纹等缺陷会在热应力与腐蚀介质作用下逐步扩展，引发结构失效和管道泄漏隐患。焊缝成型效果、内部致密性以及热处理金相组织状态有着严苛要求，普通焊接工艺无法满足该机组的服役标准。

2 受热面管道焊接施工过程质量管控方案

(1) 焊前原材料与坡口预处理管控：P91 与 12Cr1MoV 异种钢焊接需做好焊前复检与焊材预处理，母材进场核验质保资料并完成光谱检测，排除材质不符问题^[2]。镍基焊材于 350℃ 烘干一小时，存放于 120℃ 保温筒备用，减少水分引发的焊缝开裂问题。坡口选用机械铣削加工，避免火焰切割产生的淬硬层与渗碳缺陷，结合管道渐变壁厚调整坡口角度与钝边尺寸，直管段钝边设定为 2mm。坡口周边区域使用丙酮与不锈钢丝刷清理杂质，构件检测合格后进行组对，环缝间隙保持合理区间，错边量控制在标准范围内，保障管道焊接基础质量（见图 1）。



图 1 焊前原材料与坡口预处理管控

(2) 现场施焊工艺参数标准化控制: 现场采用氩弧焊打底、手工电弧焊填充盖面的复合焊接工艺, 全程采用标准化作业参数。打底使用 2.4mm 镍基焊丝, 焊接电流 85 至 95A, 氩气流量 12 至 15L/min, 管内充氩防护避免根部氧化。锥面厚薄区域差异化调节热输入, 厚壁提升电流、薄壁降低电流以规避过烧缺陷。填充层采用 3.2mm 镍基焊条, 首层电流 110 至 120A, 后续焊层逐层递减 5A, 控制单层焊道厚度。8 至 11 点钟低位区域放缓运条、拓宽摆动幅度, 盖面余高保持 0 至 2mm。焊后实行分区热处理, 250℃ 恒温 2 小时消氢后升温至 750℃ 恒温 4 小时, 延长厚壁段恒温时长, 平衡母材热处理性能, 规避焊缝质量缺陷。

(3) 焊接过程环境及操作工序管控: 垃圾锅炉炉膛作业粉尘较多、温度波动较大, 施工前搭设密闭防风保温作业棚, 环境温度保持 5℃ 以上, 氩弧焊区域风速控制在 2m/s 以内, 阴雨潮湿天气停止焊接作业。施工采取分层施焊、逐层自检模式, 每道焊道完工后清理焊渣与飞溅物, 外观检验合格后再进行后续工序。结合变径焊缝壁厚不均特征, 设置四处重点管控点位, 由持证专业焊工专项操作, 采集焊接电流、层间温度等关键数据, 层间温度不超 300℃, P91 钢材超温时采用空冷方式降温。现场搭建完整施焊台账, 记录每条焊缝施工参数, 实现施工全过程溯源, 有效稳固各工序焊接质量。

3 焊缝无损检测与缺陷甄别防控技术

(1) 常用无损检测方案选型与布控: 结合该垃圾电站异形变径焊缝检测需求制定分级无损检测方案, 焊缝冷却至常温后采用湿法荧光磁粉检测全域筛查, 排查表面开口裂纹、微裂纹等缺陷, 本次检测未发现表面损伤问题。内部缺陷借助 CTS-2020 数字超声检测仪及多规格探头组合探伤, 利用 K2、K2.5、K1 斜探头在变径 A 面与直管 B 面双面扫查, 覆盖焊缝全部区域。高频隐患区段采用多 K 值探头交叉探伤, 搭配 2.5P20 直探头复核异常波形, 搭建三级检测模式, 有效提高

焊缝缺陷检出水平。

(2) 异形管壁检测波形干扰成因分析: 本次检测锥形 A 面与直管 B 面探头波形深度数据存在偏差, 管道 8° 锥形斜面改变超声波传播轨迹^[3]。常规超声设备依据平行壁面核算声程深度, 无法适配斜面声程偏移特征, 仪器显示数值与缺陷实际埋深不符, 引发检测判别误差。A 面斜探头检测深度数值偏低, 参数校正后, 反射体真实埋深与 B 面检测数据基本一致。K1 探头折射角度有限, 锥形面最小探测深度超出 45mm 有效壁厚, 波束无法覆盖焊缝下部区域, 出现单侧无波形情况。异形管壁形成的声程畸变, 是现场产生伪缺陷波形的主要原因。

(3) 缺陷判定与返修质量管控措施: 直探头定点复核可甄别波形类型, 1 号点位仅存在底面单峰回波, 属于管道棱角反射形成的伪缺陷, 无需返修处理。2 号点位出现双峰波形, 实测深度契合校正后实际埋深, 认定为焊缝内部真实缺陷。缺陷采用机械打磨逐层清除, 打磨坡口贴合原始焊缝形貌, 打磨后通过渗透检测确认缺陷彻底消除。返修遵循既定焊接与热处理工艺, 完工后完成全套无损检测, 各项指标合格即可投入使用。本次异形管检测误判案例收录为技术资料, 同类变径焊缝检测提前校正声程深度, 区分真实缺陷与假性波形, 减少无效返修, 强化焊缝检测与质量管控效果。

4 结语

本文结合垃圾发电锅炉受热面异形变径管道焊接工程实际, 剖析异种钢材质特性、异形结构形态与恶劣工况衍生的各类焊接难点, 搭建焊前、焊中、焊后一体化标准化质量管控方案。优化复合焊接工艺参数、规范现场施工流程、落实差异化热处理手段, 切实提升异种钢焊缝成型品质。针对性处理异形管壁超声检测波形误判问题, 构建成熟的缺陷甄别与返修管控体系。研究成果化解垃圾电站异种钢变径焊缝的质控难点, 增强焊缝长期服役稳定性, 可为同类锅炉受热面管道焊接施工、质量检测及隐患治理提供可靠技术参考。

参考文献:

- [1] 杨宇曦.垃圾焚烧发电锅炉管道涂层防护性能退化机理研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [2] 鄢志鹏.垃圾焚烧发电锅炉定期检验常见问题探讨[J].特种设备安全技术,2023,(6):1-3.
- [3] 陈玲,刘鹏,陈锋利.垃圾焚烧发电锅炉省煤器吊挂装置研究[J].机械管理开发,2023,38(7):151-152+157.