

垃圾电厂余热锅炉汽包裂纹产生原因与修复方法

汪煜昊

中国电建集团四川工程有限公司 四川 成都 610051

【摘要】：垃圾电厂余热锅炉汽包服役期间长期承受腐蚀介质与交变冷热载荷，焊接接头处易萌生疲劳裂纹，故障停机将直接导致生产线中断及经济损失。本文针对汽包裂纹三类核心诱因展开系统分析，综合运用无损检测、理化检验等手段判定裂纹损伤特征，配套差异化修复工艺与长效运维管控方案。研究证实坡口焊接缺陷、给水冷冲击、受热面失效为裂纹主要成因，成套处置方案可从制造、运行、检修三个层面抑制裂纹扩展，为同类承压设备安全运维提供标准化技术支撑。

【关键词】：垃圾电厂；余热锅炉；汽包；疲劳裂纹；无损检测

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.053

引言

双碳背景下垃圾焚烧发电已成为固废资源化主流路径，余热锅炉汽包作为核心承压构件，长期腐蚀、冷热交变应力与制造运维缺陷叠加诱发的裂纹故障，持续制约机组连续稳定运行。频发焊缝开裂问题不仅抬升检修成本，还会中断垃圾无害化处置流程，与绿色低碳生产要求相悖。基于汽包实际工况，梳理裂纹产生完整诱因，规范缺陷检测、修复及全周期管控流程，有助于补齐余热锅炉承压部件安全管理短板，为垃圾焚烧行业设备长效安全运行提供创新实操依据。

1 垃圾电厂余热锅炉汽包运行基础概况

垃圾电厂余热锅炉以垃圾焚烧高温烟气为热源实现热能回收，机组普遍配置外置式单汽包作为核心承压部件，筒体选用压力容器专用钢板制造，筒节之间环向对接焊缝采用埋弧自动焊工艺成型。汽包兼具汽水分离、水位缓冲与储水蓄热功能，下部配套省煤器、蒸发器、除氧器多级受热管束，给水经各级受热面逐级升温后送入筒内，与上升管输出的高温蒸汽充分混合完成换热^[1]。日常运行中给水泵随汽包实时水位变化间歇供水，低温给水持续冲刷汽包底部汽水交汇区域，设备长期处于温度与压力周期性波动工况，焊接接头位置应力集中现象突出，长年连续服役后极易在焊缝及热影响区萌生裂纹损伤。

2 垃圾电厂余热锅炉汽包裂纹生成诱因解析

2.1 介质长期腐蚀带来的材质损伤

垃圾电厂余热锅炉给水系统配套除氧及换热构件长期存在失效风险，换热设备故障直接削弱给水加热效果，使筒内长期存在低温给水与高温饱和水汽混合共存的水环境。水体溶解氧若未充分脱除，会对汽包内壁金属产生持续电化学腐蚀，逐步削弱母材及焊接接头表层金属完整性。长期腐蚀作用下金属表面形成细微凹坑，这些凹坑位置天然构成应力集中点，大幅降低金属抗开裂能力。伴随腐蚀进程推进，金属塑性与韧性同

步下降，原本具备一定承载能力的焊缝热影响区抵抗变形能力持续衰减，后续冷热交替载荷作用下缺陷不断扩展，逐步发展为贯穿内壁的宏观裂纹，持续威胁汽包承压运行安全。

2.2 温度压力交变形成的循环应力破坏

汽包内部高温饱和蒸汽与间歇补给的低温给水持续交汇，给水供给并不具备连续性，每次补水均对筒壁局部区域形成明显冷冲击，筒壁金属在短时间内产生剧烈收缩变形，高温蒸汽持续加热又使筒壁受热膨胀，往复交替形成稳定交变热应力。机组负荷波动同步带来内部工作压力的周期性变化，热应力与压力应力相互叠加，持续作用于汽水交汇区域的焊接接头。冷热交替的循环载荷长期反复作用逐步诱发疲劳损伤，焊缝及热影响区金属内部微观缺陷不断延伸扩展，最终形成垂直于环向焊缝的纵向疲劳裂纹，补水频次越高则冷热循环次数越多，裂纹萌生与扩展速度随之同步加快。

2.3 制造安装运维遗留的结构缺陷

汽包筒节对接焊接阶段若坡口规格设置不合理，钝边尺寸偏大且未预留合理装配间隙，焊接过程中往往只能依靠提升焊接电流与降低焊接速度保证熔深，过大焊接热输入造成接头金属严重过热，晶粒异常粗大并生成脆性组织，直接削弱焊缝韧性、抬升裂纹敏感程度^[2]。焊后未落实缓冷处理会进一步加剧金属组织劣化，使接头抗疲劳性能持续下降。运维阶段若换热管束失效后仅做隔离处理而不及及时更换修复，锅炉整体水容积将缩减，只能通过提高补水频率加以弥补。焊接先天组织缺陷与运维不当带来的高频冷热冲击相互叠加，双重隐患共同作用，大幅压缩汽包焊接接头使用寿命，加速裂纹萌生进程。

3 垃圾电厂余热锅炉汽包裂纹处置工艺及落地实施

3.1 裂纹缺陷无损检测判定手段

汽包内壁裂纹集中出现在汽水交汇位置的环向焊接接头，

检测工作优先选用磁粉检测完成全范围筛查,该方式能够精准识别内壁表面及近表面细微疲劳裂纹,覆盖筒体母材、所有环向与纵向对接焊缝区域。检测过程先对汽包底部易受冷冲击区域重点扫查,再依次检测汽空间焊缝及筒体两端接头等低风险区域,依靠缺陷显示痕迹区分裂纹分布位置、延伸走向与缺陷密集程度^[3]。磁粉检测完成后配合硬度检测辅助判断金属组织状态,焊缝与热影响区硬度数值明显高于筒体母材,数值区间虽处于行业规范允许范围,但硬度差值仍可作为组织异常判定依据。针对关键缺陷区域截取试样开展金相检测,直观观察焊缝内部晶粒形态,区分单纯疲劳裂纹与伴随脆性组织产生的复合型裂纹,多类检测手段相互印证,完整判定裂纹产生范围、损伤深度以及金属基体组织劣化程度,为后续修复方案制定提供完整可靠依据。

3.2 不同类型裂纹标准化修复工艺

汽包受压元件表面疲劳裂纹不可直接补焊处理,须遵循锅炉安全规范选用挖补或整体更换两类主流修复方式。裂纹分布范围较小且筒体母材剩余厚度充足时采用挖补工艺,先通过无损检测标记全部裂纹边界,以机械打磨方式完全清除裂纹及周边存在组织劣化的金属层,打磨后确认无残余微裂纹再匹配同材质钢板制作补片,选用适配焊接参数完成焊接作业,全程控制焊接热输入避免接头再次过热生成脆性组织。若裂纹大面积密集分布或筒体多处焊缝同时受损则直接更换整台汽包,从根源消除累积损伤。修复焊接阶段优化坡口结构,选用钝边尺寸小且装配间隙合理的坡口形式,采用小电流快速焊接降低热输入,焊后配套缓冷措施稳定金属组织,焊接完工后再次开展全套无损检测,确认修复区域无新生裂纹且焊接成型质量达标,满足承压设备运行安全标准。

3.3 修复后工况管控长效保障举措

修复完成后须从设备改造、运行调节与定期检修三个维度建立长效管控机制,以规避裂纹再次萌生。换热系统改造方面,全面更换失效的省煤器、除氧器及蒸发器管束,恢复给水正常加热流程,稳定给水温度以消除筒壁大幅温差所带来的冷冲击;供水系统更换为变频给水泵,实现持续平稳供水,取消间

断式高频补水模式以减少冷热交变循环次数。日常运行管控阶段稳定机组负荷,避免压力与温度出现大幅度频繁波动,降低筒体承受的复合交变应力。设备检修层面制定周期性检验计划,定期开展无损检测排查焊缝细微缺陷,管束出现渗漏或换热效率下降时及时更换,不采用隔离失效部件的简易处理方式。同时完善焊接制造管控标准,新制汽包严格选用规范坡口并控制焊接热输入,从制造源头降低焊缝裂纹敏感性,多重管控措施同步落实,方能长期维持汽包稳定安全运行状态。如图1。



图1 汽包裂纹风险闭环管控流程图

4 结语

垃圾电厂余热锅炉汽包裂纹由介质腐蚀、交变温压应力及制造运维缺陷共同诱发,脆性焊接组织与持续给水冷冲击会大幅加速疲劳裂纹扩展进程。各类无损检测手段可精准定位缺陷损伤程度,挖补与整体更换两类工艺能够完成裂纹标准化修复作业。配套换热设备改造、连续供水调节及定期无损巡检等管控措施可有效抑制裂纹再次萌生。整套成因分析、缺陷处置与长效管控体系能够覆盖设备制造及运维全流程风险点,为垃圾焚烧余热锅炉汽包承压安全运行提供完整技术支撑。

参考文献:

- [1] 林寅.余热锅炉汽包开裂原因分析[J].化工装备技术,2024,45(6):50-53.
- [2] 陶立翔,任强,张华军,等.余热锅炉锅筒环缝及对流管孔裂纹分析[J].工业锅炉,2023,(2):56-59.
- [3] 刘磊,雷恒海,刘玉华.余热锅炉汽包下降管接管座母材开裂原因分析[J].金属加工(热加工),2023,(2):56-59.