

基于调峰机组备用热源可靠性及经济性提升的研究——以上海华电奉贤热电有限公司 50t/h 天然气启动锅炉为例

杨骏彦 潘晓磊

上海华电奉贤热电有限公司, 上海, 202511;

摘要: 随着我国能源结构转型和“双碳”目标的推进, 燃气-蒸汽联合循环机组在电力调峰与区域供热中的作用日益凸显。备用热源作为调峰机组的重要组成部分, 其运行可靠性与经济性直接影响电厂的整体效能。本文以上海华电奉贤热电有限公司 50t/h 天然气启动锅炉为研究对象, 针对其运行中出现的对流管束焊缝泄漏、排烟温度高、效率低下等问题, 开展失效机理分析、结构优化设计与烟气余热深度利用研究。通过焊缝理化性能试验、应力数值模拟、流场仿真等手段, 揭示焊缝失效的根本原因, 并提出结构优化方案; 通过加装烟气冷凝器, 实现排烟温度降至 65℃ 以下, 提升锅炉效率约 8%。研究表明, 本项目实施后预计年节约天然气费用约 158 万元, 减少检修损失约 17 万元, 具有显著的经济效益与社会效益, 对同类型机组具有重要借鉴意义。

关键词: 调峰机组; 备用热源; 焊缝失效; 烟气冷凝器; 经济性; 可靠性

DOI: 10. 64216/3080-1486. 25. 09. 072

引言

燃气-蒸汽联合循环机组具有启停快、调峰性能好、清洁高效等优点, 已成为城市供热与电力调峰的重要装备。随着新能源发电装机容量的不断增加, 电网调峰压力日益增大, 火电机组需要承担更多的调峰任务。在这一背景下, 备用热源的可靠性与经济性显得尤为重要。

上海华电奉贤热电有限公司拥有 2×430MW 级燃气-蒸汽联合循环热电机组, 配套一台 50t/h 天然气启动锅炉作为备用热源。该锅炉自投运以来, 频繁发生对流管束与上下锅筒连接焊缝泄漏、主蒸汽管道法兰泄漏等问题, 导致锅炉出力下降、效率低下、维护成本高企, 严重影响机组供热安全与经济运行。

研究表明, 应急备用电源在长期停运状态下, 会导致冷却水系统、轴承、烟道、受热面、换热器、疏水管等部位加速腐蚀, 维护检修工作量大幅增加, 运维成本居高不下。对某 300MW 机组的测算表明, 应急备用期间的运维费用高达约 7,063 万元/年。这与上海华电奉贤热电有限公司启动锅炉面临的问题具有高度相似性。

为解决上述问题, 本研究围绕“可靠性提升”与“经济性优化”两大目标, 开展对流管束焊缝失效机理研究与烟气余热深度利用技术攻关, 旨在通过结构优化与系统改造, 实现备用热源的安全、高效、低碳运行。

1 设备运行现状与问题分析

1.1 设备概况

上海华电奉贤热电有限公司 50t/h 启动锅炉为 SZS

型双锅筒纵置式 D 型布置天然气锅炉。锅炉右侧为膜式水冷壁炉膛, 左侧为对流蒸发受热面。天然气锅炉可燃气体通过阀门组经调压后进入燃烧器, 在燃烧器的燃烧头部与加压空气强制混合, 经高压点火后在炉膛内产生火焰, 开始燃烧。燃料燃烧产生的热量主要以辐射的形式传递给包覆炉膛的膜式水冷壁内的水, 其余热量的大部分由高温烟气以对流方式传给对流管束内的水, 换热后的烟气经锅炉本体后部出口进入省煤器, 最后低温烟气由省煤器出口烟道排入烟囱, 经烟囱排到大气。

1.2 问题根源分析

通过对泄漏部位的金相组织、硬度、拉伸性能等理化试验分析, 初步判断焊缝失效原因为:

1. 焊缝结构设计不合理: D 型天然气锅炉在燃烧室后方布置密集的对流管束, 与上下汽包相连接, 因为焊缝设计和安装不合理, 存在应力集中现象。

2. 频繁启停导致热疲劳: 启动锅炉作为调峰机组的备用热源, 启停频繁, 2015 年至今投用近 10 年, 长期承受周期性热负荷作用。

3. 材料老化与腐蚀: 锅炉运行时间长, 材料性能退化, 同时未设置冷凝器, 烟气中水蒸气对受热面造成腐蚀。

4. 制造工艺缺陷: 原始制造过程中存在的焊接缺陷在长期运行中逐渐暴露并扩展。

2 研究内容与方法

2.1 研究内容

本项目主要包括两大方向：

1. 对流管束焊缝失效机理与结构优化：包括失效机理分析、焊缝结构优化设计、焊接工艺改进、动态监测与维护策略。

2. 烟气余热深度利用与效率提升：包括增设烟气冷凝器、低温腐蚀防护、高效传热结构设计、系统集成与运行优化。

2.2 研究方法

2.2.1 焊缝分析技术

1) 金相分析：观察焊缝微观组织，判断是否存在晶间腐蚀、裂纹等缺陷；

2) 硬度测试：评估焊缝区域材料硬化程度；

3) 拉伸试验：检验焊缝力学性能；

4) 有限元分析（FEA）：模拟焊缝在热-力耦合作用下的应力分布；

5) 计算流体力学（CFD）：分析炉内流场与温度场，识别局部过热区域。

2.2.2 热工性能计算与仿真

1) 热力性能保证计算：判断锅炉在操作条件下是否能维持其设计的热效率和热输出；

2) 水循环计算：判断水流分布是否会导致局部过热或冷却不足，确保换热器的均匀性和效率；

3) 疲劳应力计算：评估管道在长期周期性热负荷作用下的疲劳寿命，以预测和预防潜在的疲劳裂纹扩展；

4) 对流管束热流密度计算：确认对流管束换热器前后的均匀热负荷分布情况；

5) 振动分析与热应力分析：评估在热负荷和流体动力作用下的管束动态响应，预防由于振动引起的疲劳损伤或结构失效。

2.2.3 烟气冷凝器设计与选材

1) 选用耐腐蚀不锈钢材料：当烟气温度降至露点以下时，烟气中的水蒸气会冷凝成水，并可能形成酸性溶液，对冷凝器材料造成严重腐蚀。

2) 采用板式换热器等高效传热结构：采用高效的换热结构以最大化热量回收效率。

3) 优化流道设计：减少流动阻力，提高整体能效。

4) 冷凝水处理与系统集成设计：将冷凝器无缝集成到现有锅炉系统中，确保其运行不会对原有系统的稳定性产生负面影响，充分考虑冷凝水的处理和排放等。

3 关键技术路线与创新点

3.1 技术路线

1. 可靠性提升技术路线：失效机理研究 → 组织性能试验 → 应力计算模拟 → 结构优化设计 → 现场实施与验证；

2. 经济性提升技术路线：政策与能效分析 → 冷凝器选型与设计 → 防腐与传热优化 → 系统集成与调试。

3.2 创新点

1. 焊缝失效机理的系统性研究：综合运用理化试验与数值模拟，揭示 D 型锅炉对流管束焊缝失效的多维原因；

2. 烟气冷凝器低温防腐技术：采用不锈钢材料与高效换热结构，解决低温腐蚀与空间限制问题；

3. 全系统能效提升方案：实现排烟温度 $\leq 65^{\circ}\text{C}$ ，锅炉效率提升至约 99%，达到行业领先水平。

4 技术成果

表 2：项目预期技术指标

序号	指标名称	立项时指标值/状态	验收时指标值/状态	考核方式
1	启动锅炉对流管束焊缝结构优化	初步焊缝结构优化设计	在 50t/h 天然气启动锅炉中实施应用	采取无损检测等方式，确保管道无相关缺陷显示
2	增加一套烟气冷凝器	无烟气冷凝器，排烟温度达 150°C 以上	排烟温度降到 65°C 以下	通过测量烟气排烟温度
3	改进主蒸汽管道与阀门连接型式	主蒸汽管道与阀门法兰连接	检测主蒸汽无泄漏	检测主蒸汽管道泄漏情况
4	锅炉效率	约 90%	提升约 8%	热力性能计算与实测

5 效益分析

5.1 经济效益

通过对项目实施后的经济性进行测算，主要效益来源如下：

1. 减少检修费用：启动锅炉上下汽包对流管束焊缝发生泄漏，锅炉将必须退出运行（备用）状态转入检修状态，紧急抢修，工期至少 6 天（冷却需 2 天，冷却后

压水确认漏点 1 天，检修更换管道、无损检测、设备恢复等 3 天），检修费大约 8 万/次。年均可避免 2 次以上泄漏，节约 16 万元。

2. 避免供热损失：启动锅炉上下汽包对流管束焊缝发生泄漏，锅炉将必须退出运行状态并转入检修状态，期间造成供热损失 34.62t/h （平均负荷）6 天 7.12 小时（平均每天运行 7.12 小时），计 1479 吨供热蒸汽量，每吨蒸汽利润按 60 元/吨，可有效避免公司由于停炉检

修减少的供热营收利润约 8.87 万元。

3. 节约天然气费用：启动锅炉排烟温度高，锅炉效率低，再加上因为对流管束堵管造成排烟温度更高，再次降低锅炉效率，能耗远超同期节能型天然气，相比其他采用节能工艺的燃气锅炉，启动锅炉每吨蒸汽的气耗高 6 个立方米，天然气价格 2.93 元/m³。按照启动锅炉年均 9 万吨蒸汽计算，可减少天然气费用约 158.22 万元。

5.2 社会效益

1. 提升机组供热可靠性：保障区域工业用户用热安全，避免因备用热源故障导致的供热中断；

2. 降低碳排放：降低天然气消耗，减少 CO₂ 排放，助力“双碳”目标实现。按照年节约天然气 54 万立方米计算，每年可减少二氧化碳排放约 1,080 吨；

3. 形成可复制技术方案：推广至同类型机组，促进行业技术进步。研究表明，同类问题在调峰机组中普遍存在，本研究成果具有广泛的推广应用价值；

4. 提升能源利用效率：通过烟气余热深度利用，提高能源综合利用效率，符合国家节能政策导向。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究通过对上海华电奉贤热电有限公司 50t/h 启动锅炉的系统分析，提出了一套涵盖焊缝结构优化与烟气余热利用的综合技术方案。通过项目实施，可达到以下效果：

1. 可靠性显著提升：通过对流管束焊缝失效机理研究及结构优化，解决长期存在的泄漏问题，提高设备可用率，减少非计划停运；

2. 经济性明显改善：通过加装烟气冷凝器，降低排烟温度，提高锅炉效率，年节约运行成本约 183 万元；

3. 技术水平先进：采用 FEA 和 CFD 等先进仿真技术，结合实验验证，形成了一套完整的分析、设计、优化和验证方法；

4. 推广应用价值高：研究成果可推广至同类型调峰机组备用热源，具有广泛的应用前景。

6.2 未来展望

随着能源结构的持续转型和“双碳”目标的深入推进，调峰机组及备用热源的技术发展将呈现以下趋势：

1. 智能化运维技术：随着数字孪生、智能监测等技术的发展，备用热源的运行维护将更加精准、高效。本研究也为后续开展基于大数据分析的预测性维护与全生命周期管理奠定了基础。

2. 多能互补系统：集成太阳能、储能等新能源技术，

形成多能互补的备用热源系统。研究表明，太阳能辅助联合循环系统能够提升系统效率并降低成本。

3. 先进储能技术应用：熔盐储热等储能技术在调峰中的应用可行性已得到验证，未来可探索其在备用热源系统中的应用，进一步提升系统灵活性与经济性。

4. 全链条优化设计：借鉴“源-集-储-荷”全链条技术路线，从系统层面优化备用热源设计与运行，实现整体能效提升。

5. 政策与市场机制协同：完善调峰辅助服务市场机制，通过经济激励促进备用热源技术革新与效能提升。

参考文献

- [1] 孙孝忠. 燃气锅炉烟气余热冷凝回收技术研究及节能效益分析[J]. 热能动力工程, 2022, 8(4): 1-8.
- [2] 张健, 张健赞, 胡振广, 等. 双碳背景下应急备用电源的定位和经济性研究[J]. 洁净煤技术, 2023, (S2): 17-30.
- [3] 彭家辉, 倪永中, 王元良, 等. 基于熔盐储热的燃煤机组调峰可行性分析[J]. 热力发电, 2024, (1): 99-106.
- [4] 某火电机组供热调峰改造技术经济分析[J]. 青海电力, 2023, 42(3): 44-61.
- [5] 魏文, 姜飞, 戴双凤, 等. 计及需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 153-162.
- [6] Chen Y, Jia X, Liu P, et al. Comparison of "source-collection-storage-load" technology for low temperature industrial waste heat heating and a case application[J]. Energy Reports, 2025, 14: 4779-4796.
- [7] 王伟, 韩建龙. 基于先进检测技术的电站锅炉受热面管失效机理与防护研究[J]. 动力工程学报, 2022, 43(5): 89-95.
- [8] 魏响, 陈东娃, 赵鹏程. 典型电站锅炉受热面管爆管失效分析[J]. 新疆电力技术, 2017(3): 87-90.
- [9] 黎小秋, 赵康文, 唐因, 等. 300MW 电站锅炉后屏过热器爆管原因分析和对策[J]. 压力容器, 2012, 29(4): 68-71.
- [10] 刘军, 王刚, 陈明. 火力发电厂锅炉受热面失效分析与防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介：杨骏彦（2000.12-），男，上海市人，汉族，助理工程师，本科，研究方向锅炉和金属。

潘晓磊（1993.02-），男，上海市奉贤区，汉族，工程师，学历本科，研究方向锅炉，金属材料。