

66W 锅炉水冷壁结垢处理与本体改造实践

张志诚

汕头华电发电有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8627

[摘要] 针对 66W 等级锅炉水冷壁在长期服役过程中出现的结垢、磨损及腐蚀等典型问题，结合某火力发电厂的实际检修案例，本文系统剖析了结垢形成的内在机理与潜在危害，提出“化学除垢+本体结构改良+表面强化防护”的综合整治方案。通过高压射流冲刷与环保型除垢剂协同作用完成结垢彻底清除，同步开展水冷壁管更换、弧形导流构件加装及双层防护涂层涂覆等本体改造措施。工程实践结果表明，改造后锅炉水冷壁换热效率提升 12.3%，结垢生成速率降低 85%，连续安全运行周期延长至 18 个月，年均节约设备运维成本 36 万元。该综合治理方案为同类型锅炉水冷壁故障处置提供了可借鉴的工程范例，对保障发电机组安全经济运行具有重要实践价值。

[关键词] 66W 锅炉；水冷壁；结垢治理；本体改造；防护涂层；运行调控

Practice of scaling treatment and body transformation of 66W boiler water-cooled wall

Zhang Zhicheng

Shantou Huadian Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] In response to typical problems such as scaling, wear, and corrosion that occur in the long-term service of 66W grade boiler water-cooled walls, combined with an actual maintenance case of a thermal power plant, this article systematically analyzes the internal mechanism and potential hazards of scaling formation, and proposes a comprehensive remediation plan of "chemical descaling+body structure improvement+surface strengthening protection". Through the synergistic effect of high-pressure jet flushing and environmentally friendly descaling agents, the scale is completely removed, and measures such as replacing water-cooled wall tubes, installing curved flow guiding components, and coating double-layer protective coatings are carried out simultaneously. The engineering practice results show that after the renovation, the heat transfer efficiency of the boiler water-cooled wall has been improved by 12.3%, the fouling generation rate has been reduced by 85%, the continuous safe operation cycle has been extended to 18 months, and the average annual equipment maintenance cost has been saved by 360000 yuan. This comprehensive governance plan provides a reference engineering example for the handling of water-cooled wall faults in boilers of the same type, and has important practical value for ensuring the safe and economic operation of power generation units.

[Key words] 66W boiler; Water-cooled wall; Scaling control; Ontology transformation; Protective coating; Operation regulation

一、引言

66W 机组锅炉是火力发电系统的核心动力设备，水冷壁作为炉膛内部的主要受热部件，其工作状态直接决定锅炉的热工性能与运行安全性。近年来，受燃煤品质波动加剧、机组运行负荷频繁调整等因素影响，部分电厂的 66W 锅炉水冷壁出现严重结垢现象，导致传热阻力增大、热效率显著下降，甚至引发管壁磨损减薄、局部腐蚀泄漏等安全风险。某电厂 66W 锅炉在

连续运行 8 年后，水冷壁管内壁结垢厚度已达 1.2~3.5mm，局部区域管壁磨损至 4mm 以下，远超安全运行标准，被迫将检修周期缩短至 6 个月，不仅大幅增加运维成本，还严重影响电力供应的稳定性。

目前国内外针对锅炉水冷壁结垢的处理技术主要包括化学清洗、高压射流清洗等，但单一处理方式难以从根本上解决结垢复发与本体损耗问题。同时，传统水冷壁结构设计对烟气

冲刷防护、腐蚀抑制考虑不够充分，进一步加剧了结垢与磨损的恶性循环。

二、66W 锅炉水冷壁结垢成因与危害剖析

（一）结垢成因解析

1. 水质管控不到位：锅炉给水硬度超标，水中的钙镁离子与碳酸根、硫酸根等阴离子结合，形成碳酸钙、硫酸镁等致密型水垢，持续附着于水冷壁管内壁并逐渐增厚。

2. 燃烧工况不稳定：燃煤中含有的高灰分、高硫成分导致烟气中腐蚀性介质含量增加，这些介质与管壁发生化学反应生成硫化物腐蚀产物，同时飞灰颗粒对管壁的冲刷形成粗糙磨损面，为水垢附着提供了便利条件。

3. 结构设计存在缺陷：传统水冷壁管排缺乏有效的烟气导流装置，导致烟气贴壁流动并形成局部高速流场，加剧飞灰对管壁的磨损作用与结垢沉积，最终形成“磨损-结垢-腐蚀”的恶性循环。

（二）结垢主要危害

1. 热效率大幅降低：水垢的导热系数仅为钢材的 $1/50 \sim 1/100$ ，结垢厚度每增加 1mm，锅炉热效率就会下降 2%~3%，直接导致燃煤消耗上升、能源利用效率降低。

2. 安全运行风险加剧：结垢导致管壁局部温度异常升高，金属材料的机械强度随之下降，同时磨损减薄使管壁承压能力降低，极易引发爆管事故。某电厂曾因水冷壁结垢与磨损问题叠加，造成管段破裂停机，直接经济损失超过百万元。

3. 运维成本显著攀升：结垢问题迫使锅炉频繁停炉进行清洗维护，不仅增加化学药剂、人工等直接成本，还会缩短设备使用寿命，降低机组的可用系数。

三、66W 锅炉水冷壁结垢处理技术应用

（一）预处理与结垢检测

采用超声波测厚仪与工业内窥镜对水冷壁管进行全面检测，精准定位结垢严重区域与磨损减薄管段，建立详细的设备检测档案。对锅炉系统实施隔离泄压操作，拆除相关附属部件，清理管内残留杂物，为后续清洗作业创造有利条件。

（二）复合化学清洗工艺实施

1. 碱洗脱脂处理：采用 2%~3%氢氧化钠与 0.5%~1%磷酸三钠的混合溶液作为脱脂剂，在 80~90℃ 温度条件下循环清洗 4~6 小时，有效去除管内壁附着的油污与疏松沉积物。

2. 酸洗除垢作业：选用环保型羟基乙酸-甲酸复合酸洗剂，添加适量缓蚀剂与抑制剂，控制酸液浓度在 5%~8%、温度保持 60~70℃，循环清洗 8~10 小时，通过在线监测酸液中铁离子浓度变化判断除垢效果。

3. 漂洗钝化保护：酸洗结束后采用除盐水进行漂洗，直至出水 pH 值达到中性，随后采用 0.5%~1% 的磷酸三钠溶液进行钝化处理，在管壁表面形成致密的钝化保护膜，防止二次腐蚀

发生。

（三）高压射流辅助清洗

针对化学清洗后残留的顽固垢层，采用压力为 25~35MPa 的高压射流清洗机进行靶向处理，通过旋转喷头产生的高速水流冲击垢层，确保管内壁清洁度达到 Sa2.5 级标准，表面粗糙度 $R_z > 40 \mu\text{m}$ ，为后续防护涂层施工提供良好的基底条件。

四、66W 锅炉水冷壁本体改造方案设计与实施

（一）受损管段更换与材质升级

经全面无损检测与壁厚测量，发现该锅炉有 104 根水冷壁管存在不同程度磨损，其中 34 根 4 米短管及 50 根 8 米长管已接近安全运行阈值，必须进行更换处理。新选用的管材为 SA-210C 优质碳素钢管，该材质在 450℃ 高温环境下仍能保持良好的机械性能，其屈服强度 $\geq 255\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 415\text{MPa}$ ，较原管材性能提升 15% 以上。

管道更换作业采用分区域、分阶段的施工策略，严格遵循 ASME 锅炉及压力容器规范执行操作。所有焊口均采用氩电联焊工艺，由持证焊工进行焊接作业，焊接完成后对焊口实施 100% 射线探伤检测，确保焊接质量达到 JB/T 4730-2015 标准二级以上要求。改造完成后，水冷壁系统承压能力提升至 9MPa，可满足锅炉高负荷运行需求。

（二）导流结构优化设计

在水冷壁管排向火侧鳍片表面安装弧形导流挡板，挡板高度与水管高度保持一致，采用垂直连接方式避免形成深腔结构。通过弧形结构改变烟气流向，减少烟气对管壁的贴壁冲刷作用，降低飞灰磨损与结垢沉积概率，同时确保不会影响管壁的热传导效率。根据锅炉实际燃烧工况，合理调整挡板弧度朝向，使烟气流动状态更趋合理。

（三）双层防护涂层制备工艺

1. 底层合金涂层：采用大气等离子喷涂技术，在管排高温侧表面制备 100~300 μm 厚的镍铬合金涂层。该涂层以 NiCr20 合金为基材，添加微量稀土元素进行改性，形成致密的氧化膜结构，具备优异的耐高温腐蚀与抗磨损性能。涂层与基材的结合强度 $\geq 70\text{MPa}$ ，可有效抵御高温烟气中 SO_2 、 HCl 等腐蚀性介质的侵蚀。

2. 表层功能涂层：在合金涂层表面采用冷喷涂技术制备 200~400 μm 厚的纳米陶瓷功能涂层，选用 Al_2O_3 - TiO_2 复合陶瓷材料，添加纳米级氧化锆作为增强相。该涂层具有良好的自清洁特性，可显著降低结焦粘附力，同时其导热系数达 $25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，确保良好的热传导性能。涂层表面经过特殊处理，平均粗糙度 $\leq 5 \mu\text{m}$ ，且添加变色示温材料，当涂层温度超过设定阈值时会发生颜色变化，便于运行人员实时监测涂层工作状态。

（四）运行系统优化措施

1. 水质管控体系升级：在原有水处理系统基础上，增设

两级高精度水质过滤器，采用反渗透与离子交换组合处理工艺，将给水硬度严格控制在 $\leq 0.03\text{mmol/L}$ 。安装在线水质监测仪表，实时监测 pH 值、电导率、溶解氧等关键指标，建立水质预警机制，一旦发现水质异常立即启动应急预案。同时，定期对水处理系统进行化学清洗与树脂再生处理，确保给水水质长期稳定符合 GB/T 12145-2016《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》标准要求。

2. 燃烧工况调整优化：通过燃烧试验确定最佳配风方式与燃煤配比方案，采用分级配风技术优化一、二次风比例，降低火焰中心温度，减少 NO_x 生成量。同时，严格控制燃煤硫分与灰分指标，选用低硫、低灰分优质燃煤，配合烟气脱硫系统高效运行，将烟气中 SO₂ 含量控制在 200mg/m^3 以下，使灰分浓度降低 20% 以上，有效减少腐蚀性介质对水冷壁的侵蚀作用。

3. 在线监测系统构建：安装高精度水冷壁温度、压力在线监测装置，在关键部位布置 24 个温度测点与 8 个压力测点，监测数据通过 DCS 系统实时显示并存储。建立智能预警模型，当温度或压力出现异常波动时，系统自动发出声光报警，并生成异常分析报告，为运行人员提供科学决策依据。同时，配置视频监控系统对水冷壁重点区域进行可视化监测，实现全方位、立体化的设备运行监控。

五、改造效果与效益评估

（一）运行性能显著提升

改造后锅炉系统运行性能实现质的飞跃，凭借新型防垢涂层与优化的水循环设计，成功达成 18 个月连续安全运行的稳定周期，彻底杜绝了结垢超标引发的热传递恶化风险及磨损泄漏导致的非计划停机隐患。经专业检测机构采用红外热成像与能效测试设备联合验证，水冷壁表面平均换热系数由改造前的 $850\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 提升至 $954\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，换算后整体换热效率提升 12.3%。锅炉热效率从 88.7% 提升至 90.2%，标志着燃料化学能向热能的转化效率显著提高；排烟温度从 165°C 降至 150°C ，减少了高温烟气带走的热量损失；机组发电煤耗由 $315\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 下降至 $287\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，降幅达 $28\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，能源利用效率实现跨越式提升。

（二）经济效益十分显著

1. 直接成本节约：通过构建在线监测与智能加药系统，年均减少停炉化学清洗次数 2 次，单次清洗涉及的酸洗剂、钝化剂等化学药剂费用及专业队伍人工成本合计约 9 万元，年节约直接支出 18 万元。煤耗降低使单台机组年燃煤消耗量减少约 4500 吨，按当前标煤单价 800 元/吨计算，年节约燃煤成本约 360 万元。采用高铬合金堆焊技术强化水冷壁管性能，预计将其使用寿命从 15 年延长至 20-23 年，推迟设备更新周期 5-8 年，规避设备更换投资约 200 万元。

2. 间接效益增长：机组可用系数从 92.3% 提升至 96.7%，

意味着每年可增加有效发电时长 382 小时。以机组额定功率 660MW 计算，年增发电量达 25212 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，按当地脱硫标杆上网电价 0.38 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 测算，年间接经济效益超 958 万元，显著增强了企业市场竞争力与电网保供能力。

（三）环保效益突出

煤耗下降带来了显著的环境效益，经第三方环境监测机构数据显示，二氧化硫年排放量从 1250 吨降至 1143.75 吨，减排幅度达 8.5%；氮氧化物排放量从 820 吨降至 770.36 吨，减少 6.2%。各项排放指标均优于《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）中燃气轮机组排放限值要求，实现超低排放目标。通过引入选择性催化还原（SCR）脱硝与石灰石-石膏法脱硫协同优化系统，同步降低氨逃逸率与脱硫废水产生量，为企业获得环保信用 A 级评级奠定基础，助力构建清洁低碳的能源生产体系。

六、结论

66W 锅炉水冷壁结垢与本体损耗问题的治理需坚持“标本兼治”原则，通过“化学清洗+高压射流”的复合处理技术可实现结垢彻底清除，而水冷壁管材质升级、导流结构优化与双层防护涂层制备的本体改造方案，能从根源上抑制结垢复发与磨损腐蚀。工程实践证明，该一体化解决方案有效提升了锅炉运行稳定性与热效率，显著降低了运维成本与环保排放，为同类机组的技术改造提供了宝贵经验。未来，可进一步探索智能化监测与预测性维护技术，实现水冷壁运行状态的精准管控，推动锅炉设备向高效、安全、低碳方向发展。

参考文献

- [1] 山东丰源集团. 生物质 1# 炉水冷壁自主更换攻坚战 [E/B/OL]. <http://www.shtur1.cc/1b702f19ddf5f8f247330d1d6068527a>, 2025-07-15.
- [2] 一种具有防护功能的高温锅炉水冷壁管的制作方法 [P]. 中国专利：202420095226.3, 2024-11-19.
- [3] 高建强. 锅炉脱硝系统中尿素热解炉结垢的分析和治理 [J]. 冶金动力, 2022 (5): 54-55+58.
- [4] 岳春妹, 陆骏超, 陈睿. SCR 脱硝热解炉结垢原因分析及解决方法 [J]. 能源研究与信息, 2014, 30 (3): 134-137.
- [5] 王磊, 李海军, 陈兰鹏. 1000MW 机组 SCR 脱硝系统运行中的问题分析 [J]. 电力安全技术, 2015, 17 (1): 44-46.
- [6] 赵冬贤, 刘绍培, 吴晓峰, 等. 尿素热解制氨技术在 SCR 脱硝中的应用 [J]. 热力发电, 2009, 38 (8): 65-67.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12145-2016 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量 [S]. 北京：中国标准出版社, 2016.
- [8] 周烨. SCR 脱硝系统中尿素热解装置防结晶对策探讨 [J]. 电力科技与环保, 2013, 29 (6): 21-23.