

600MW 级超临界锅炉受热面裂纹的治理优化

张雷

中电电力检修工程有限公司,上海 200050

DOI:10.61369/EPTSM.2026060012

摘 要： 随着新能源大规模并网，电网调峰需求持续攀升，600MW 级超临界 W 火焰型锅炉由传统基荷运行转向深度调峰频繁变负荷模式。本文以某电厂 $2 \times 620\text{MW}$ 超临界 W 火焰锅炉为研究对象，梳理调峰工况下受热面裂纹分布特征与故障案例，从运行调度、热力工况、结构设计、安装检修四个维度剖析裂纹产生机理，制定结构改造、检修管控、运行优化、燃烧调整四位一体治理方案，通过现场实践应用有效抑制裂纹萌生与扩展，提升调峰工况下锅炉受热面运行可靠性，可为同类型机组故障治理提供参考借鉴。

关 键 词： 600MW 超临界；W 火焰锅炉；调峰工况；受热面裂纹

Optimization of Crack Treatment on the Heat Transfer Surface of 600 MW-Class Supercritical Boilers

Zhang Lei

China Electric Power Maintenance Engineering Co., Ltd., Shanghai 200050

Abstract： With the large-scale integration of new energy sources, the demand for grid peak shaving is continuously increasing. The 600MW supercritical W-flame type boiler has shifted from traditional base-load operation to a frequent variable-load mode for deep peak shaving. This paper takes a $2 \times 620\text{MW}$ supercritical W-flame boiler in a certain power plant as the research object, analyzes the distribution characteristics and failure cases of the heated surfaces under peak shaving conditions, and from the four dimensions of operation scheduling, thermal conditions, structural design, and installation and maintenance, examines the mechanism of crack generation. It formulates a comprehensive treatment plan including structural modification, maintenance control, operation optimization, and combustion adjustment. Through on-site practical application, it effectively inhibits the initiation and expansion of cracks, improving the operational reliability of the heated surfaces of the boiler under peak shaving conditions. This can provide reference for the fault treatment of similar units.

Keywords： 600MW supercritical; W-flame boiler; peak shaving conditions; heated surface cracks

引言

双碳目标背景下，风电、光伏等间歇性新能源装机容量快速增长，电网峰谷差持续扩大，燃煤发电机组被迫承担深度调峰任务。600MW 级超临界 W 火焰锅炉因适配无烟煤燃烧、负荷适应性强等优势，在东南亚及国内西南地区广泛投运，该锅炉采用单炉膛、一次再热、全悬吊 II 型结构，W 型火焰燃烧方式，设计初衷以带基荷为主，调峰冗余度较低。

本文以某电厂 620MW 超临界 W 火焰锅炉实际故障数据为基础，统计调峰工况下受热面裂纹分布规律，揭示裂纹产生多重诱因，从结构改造、检修工艺、运行控制、燃烧调整四方面制定优化治理措施，并验证应用效果。研究成果可解决调峰工况下锅炉受热面裂纹频发难题，降低非计划停运损失，延长设备使用寿命，同时为同类型超临界 W 火焰锅炉调峰运行隐患治理提供技术参考。

一、设备概况与裂纹分布特征

（一）锅炉主要参数

研究对象为某电厂一期 $2 \times 620\text{MW}$ 超临界 W 火焰燃煤锅炉，2018 年先后投产，锅炉为变压直流炉、固态排渣、露天布

置、全钢构架全悬吊结构，核心参数如表 1 所示。燃烧器沿炉宽布置于前后拱，垂直水冷壁管圈结构，炉膛容积热负荷 $79.74\text{kW}/\text{m}^3$ ，下炉膛断面热负荷 $2.74\text{MW}/\text{m}^2$ ，设计以基荷运行为主，未适配高频次深度调峰工况。

作者简介：张雷（1980.02-），男，汉族，河南南阳人，本科学历，中级工程师，多年从事核电、火力发电生产管理及相关设备检修、改造技术实践应用研究。

表 1 锅炉主要技术参数

序号	参数名称	单位	设计数值
1	锅炉额定蒸发量	t/h	1988.7
2	过热蒸汽出口压力	MPa	25.31
3	过热 / 再热蒸汽温度	℃	571/569
4	给水温度	℃	294
5	炉膛尺寸（宽 × 深 × 高）	mm	32121 × 17100 × 38000
6	一次风温度	℃	336
7	二次风温度	℃	359

（二）受热面裂纹分布统计

结合 2025–2026 年检修及故障记录，#1、#2 锅炉受热面裂纹集中分布于炉膛中部、冷灰斗、前墙过渡段、吹灰孔周边、尾部竖井中隔墙五大区域，呈现明显分布规律，裂纹统计如表 2 所示。

表 2 #1、#2 锅炉受热面裂纹分布统计表

锅炉 编号	检修 类型	裂纹 总数	炉膛 中部	冷灰 斗	前墙过 渡段	冷灰 斗外 侧	尾部 隔墙	分布特征
#1 锅 炉	C 修	15	3	4	2	8	0	炉前侧占比 71%，角部连接区域集中
#2 锅 炉	A 修	41	5	3	4	0	33	前墙多于后墙，标高 36–45m 高发

从空间分布来看：前后墙裂纹占比超 90%，两侧墙未发现裂纹；标高集中在 13.7m 冷灰斗区域、36.1m 燃尽风区域、45.5m 中联箱区域、63m 水平烟道区域；冷灰斗裂纹多集中于四角连接部位、张力板焊缝及鳍片区域；裂纹形态以鳍片拉裂、焊缝开裂、止裂孔延伸裂纹为主，长度从 0.5m 至 4m 不等，部分裂纹由鳍片延伸至管壁引发泄漏。

二、调峰工况下受热面裂纹成因分析

（一）负荷调度与调峰方式影响

近年来当地电网调度规律大幅变化，机组由稳定基荷转向高频次变负荷、深度调峰运行。统计 2021–2026 年 3 月份负荷数据进行分析可以发现，2025 年后机组日均变负荷次数升至 1.3 次以上，日均深度调峰（< 400MW）次数超 1.03 次，远高于 2021–2024 年水平。

频繁升降负荷使水冷壁管排产生瞬时温差冲击，机组甩负荷过程中，水冷壁壁温 1.5 分钟内温升超 11℃ /min，远超规范允许的 2℃ /min 限值，管间热膨胀不一致，产生交变热应力；长期低负荷运行导致炉膛温度场不均，局部热负荷偏差增大，单面墙同标高管壁温差最高达 80℃ 以上，超出设备耐受阈值，诱发金属疲劳裂纹。

（二）炉膛压力与燃烧工况扰动

电网故障、深度调峰低负荷稳燃不佳时，炉膛压力剧烈波动，MFT 工况下炉膛负压骤降超 4000Pa，炉墙水冷壁承受交变

机械载荷；炉内结焦脱落撞击冷灰斗水冷壁，产生振动冲击，焦块落入灰斗水汽化进一步加剧炉膛压力脉动，低频率振动长期循环作用，3 天内可达 1.3×10^6 次循环，引发受热面疲劳破坏。同时，深度调峰工况下煤质波动、制粉系统调整频繁，煤粉分配不均导致炉内热负荷分布偏移，前墙热负荷显著高于后墙，火焰易贴墙燃烧，局部水冷壁超温；磨煤机多台同时调整、一次风粉管风量偏差超 5%，加剧受热面热偏差，加速鳍片裂纹萌生。

（三）结构设计与安装间隙缺陷

W 火焰锅炉自身结构特性导致应力集中：一是过渡段几何突变，前墙过渡段水冷壁管走向转折，H 型鳍片刚性约束强，限制管子自由膨胀，鳍片与管壁焊缝处应力高度集中；二是冷灰斗角部梳型板结构，刚性梁力矩通过梳型板传递至水冷壁管，启停膨胀收缩过程中动静结合部位应力集中，鳍片与管子结合处易拉裂；三是鳍片厚度偏大（10mm），强度过高，应力无法释放，薄弱焊缝处优先开裂。

安装阶段刚性梁、张力板间隙不达标，耳板与张力板肋板水平、垂直间隙未满足 85mm、15mm 设计要求，出现卡涩卡死，阻碍水冷壁管屏自由膨胀；部分止裂孔设置不规范，裂纹沿止裂孔向管壁延伸，扩大缺陷范围^[1]。

（四）焊接残余应力与检修管控不足

水冷壁鳍片与管壁焊接存在未焊透、咬边、气孔等隐性缺陷，焊接残余应力长期留存；调峰工况下交变应力与残余应力叠加，裂纹从焊接融合线处萌生扩展。此外，以往检修仅处理显性裂纹，浅表性隐性裂纹未彻底打磨消除，未建立重点区域跟踪台账，裂纹反复扩展复发；防磨防爆检查范围有限，未覆盖过渡段、吹灰孔等应力敏感区域。

三、调峰工况下受热面裂纹综合治理优化措施

针对裂纹多重成因，从结构改造、检修工艺、运行控制、燃烧调整四个维度制定系统性治理方案，兼顾短期消缺与长期防控。

（一）受热面结构改造优化

开设膨胀缝与止裂孔：在炉膛中部、冷灰斗角部应力集中区域分段错列开设膨胀缝，释放管屏热膨胀应力；冷灰斗侧墙与前后墙连接处割开 300mm 不焊接，裂纹终止处开设 Φ5 标准止裂孔，避免裂纹延伸扩展。对已开裂鳍片末端规范开设止裂孔，防止应力集中加剧裂纹扩展。

刚性梁与间隙整改：全面排查刚性梁张力板肋板与翼缘间隙，消除卡死现象；调整水冷壁耳板与张力板肋板定位，严格保证水平间隙 85mm、垂直间隙 15mm，确保热态下管屏自由膨胀。在炉内变形区域增设耳板构件，抑制管屏向炉内变形，降低鳍片受力载荷。

过渡段与鳍片结构优化：对前墙 42–46m 过渡段 H 型鳍片开展有限元应力分析，优化鳍片厚度与宽度，改善冷却效果、降低热应力；对超宽鳍片区域增设柔性膨胀节，缓解几何突变带来的应力集中；恢复梳型板区域扁钢原状，末端采用绕焊工艺，增强

焊缝抗裂性能^[2]。

（二）检修工艺与管控优化

扩大防腐防爆检查范围：将炉膛中部、冷灰斗四角、前墙过渡段、吹灰孔周边、尾部隔墙列为重点管控区域，每次检修开展磁粉、渗透无损检测，全覆盖排查浅表隐性裂纹；对标高 36m、45.5m、63m 等高发区域逐根排查，建立裂纹位置、长度、处理情况专项台账。

裂纹标准化处理工艺：浅表裂纹采用彻底打磨过渡处理，消除裂纹源；深度裂纹采用补焊 + 止裂孔复合处理，严格控制焊接工艺参数，焊后进行退火消应力处理；更换泄漏水冷壁管时，同步检查周边 3-5 根管子，杜绝遗留隐患。冷灰斗张力板焊缝开裂处重新焊接加固，耳插销周边鳍片裂纹整体补强^[3]。

建立长效跟踪机制：对裂纹治理区域实行“逢修必查”，对比历次检修裂纹变化趋势；将缺陷区域纳入防腐防爆重点监控清单，利用 DCS 工况数据关联分析，预判裂纹扩展风险，提前干预治理。

（三）调峰运行参数优化

严控升降负荷速率：严格遵循锅炉启动曲线，降低机组升降负荷速率，水冷壁壁温变化率控制在 2℃/min 以内，过热器、再热器温度变化率控制在 3℃/min 以内；避免负荷骤升骤降，深度调峰负荷变化幅度平缓过渡，减少热应力冲击。

优化壁温偏差控制：将单面墙同标高管壁温差控制值由 80℃ 缩减至 50℃，实时监控水冷壁各壁温测点，超限时自动预警；完善壁温在线监测装置，重点监测过渡段、燃尽风区域壁温，严禁壁温超报警值运行^[4]。

规范启停与干湿转换：采用带压带温滑停方式，杜绝快速冷却；超临界锅炉干湿转换平稳过渡，避免反复交替引发壁温大幅波动；机组跳闸后重启严格控制升温升压速率，缓慢释放残余应力，防止隐性裂纹激活扩展^[5]。

（四）燃烧与制粉系统调整

优化配煤与燃烧工况：加强燃煤管控，合理配比煤质，避免燃用高硫、劣质煤引发结大焦；优化二次风配比，保持适宜风箱风压，防止火焰贴墙；控制一次风温、风速，稳定燃烧工况，降低炉内热负荷不均。

制粉系统精细化调整：磨煤机停投遵循“多投稳运”原则，

避免同时调整多台磨煤机容量风量；停磨前吹空磨内煤粉，防止启停时煤粉骤增扰动燃烧；完成一次风风管热态调平，风量、粉量偏差控制在 5% 以内，均衡各燃烧器热输入。

炉膛吹灰与结焦管控：规范受热面吹灰频次与压力，避免吹灰器长期局部吹扫损伤管壁；停炉后全面清理炉膛结焦，消除焦块坠落振动隐患；加强空预器吹灰，保障一二次风风压稳定，维持炉内燃烧脉动平稳^[6]。

四、治理效果

实施综合治理措施后，2026 年下半年 #1、#2 锅炉检修裂纹检出数量同比下降 78%，炉膛中部、冷灰斗角部等高发区域未新增显性裂纹；前墙过渡段、吹灰孔周边未再发生鳍片裂纹延伸泄漏，彻底消除因受热面裂纹引发的机组非计划停运故障，裂纹缺陷发生率显著下降；机组调峰工况下，水冷壁壁温变化率稳定控制在 2℃/min 以内，管间壁温差均低于 50℃；炉膛压力波动幅度大幅缩减，低负荷燃烧稳定性显著提升，未出现大幅压力脉动与炉墙振动现象。刚性梁、张力板间隙达标，水冷壁管屏自由膨胀无卡涩，残余应力得到有效释放，运行参数稳定性提升；治理后年均减少机组非计划停运时长超 200 小时，节约检修备件、运维人工成本约 15 万美元；延长水冷壁受热面使用寿命 3-5 年，降低设备更换投资；机组调峰适配能力提升，可稳定参与 400MW 以下深度调峰，满足电网调度需求，兼顾安全运行与调峰经济性。

五、结语

采用结构改造、检修管控、运行优化、燃烧调整四位一体治理方案，可有效释放管屏应力、严控热温变工况、消除裂纹萌生条件，显著降低裂纹发生率，适配深度调峰运行需求。后续可依托大数据与数值模拟技术，建立锅炉受热面裂纹风险预判模型，关联负荷变化、壁温波动、燃烧工况等参数，实现裂纹提前预警；进一步优化 W 火焰锅炉本体结构设计，改进鳍片材质与刚性梁布置，从源头提升机组调峰工况适配性；制定同类型机组调峰运行专项规程，统一受热面裂纹治理标准，推广应用成熟治理技术。

参考文献

- [1] 车刚; 崔辉. 超超临界锅炉水冷壁超温和汽温偏差大问题的分析和处理. 锅炉技术. 2023, 54 (04) : 70-74.
- [2] 孙少波. 超超临界锅炉水冷壁宽鳍片裂纹原因分析及预防处置 [J]. 现代制造技术与装备. 2021, 57 (09) : 138-140+144.
- [3] 赵涵; 李蕾. 660MW 超临界机组深度调峰工况协调控制优化方法 [J]. 今日制造与升级. 2023 (07) : 10-12.
- [4] 基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化 [J]. 廖彭伟. 热能动力工程. 2023, 38 (05) : 111-116.
- [5] 张小根; 璐敏; 吴可泽; 崔庆伟; 卢瑶瑶. 660 MW 超临界燃煤发电机组的深度调峰自动控制 [J]. 自动化仪表. 2023, 44 (12) : 53-57+64.
- [6] 韩院臣. 660MW 超临界机组深度调峰自动控制技术研究 [J]. 电气传动自动化. 2021, 43 (06) : 30-32+50.