

660MW 超超临界锅炉高温再热器异种钢接头治理技术研究

李 浩

宁夏银星发电有限责任公司 宁夏 灵武 751400

摘 要: 超超临界锅炉作为火力发电的核心设备,其高温再热器长期在高温、高压及交变应力工况下运行,异种钢接头因材料特性差异易成为故障高发部位。本文以某火力发电厂 #2 锅炉 (DG-1967/28.25-II 型,660MW 超超临界参数) 高温再热器泄漏事故为研究对象,通过分析事故原因,明确 12Cr1MoVG 与奥氏体不锈钢 (TP310HCbN、S30432) 异种钢接头因氧化速率差异、膨胀系数不匹配及焊接工艺管控不足,导致熔合线处产生氧化缺口与微裂纹,最终引发泄漏。基于此,提出插入 SA-213T91Type1 过渡管的改造方案,结合严格的焊接工艺、热处理及检测标准,形成完整的异种钢接头治理体系。实践表明,该方案可有效解决异种钢接头开裂问题,为同类型超超临界锅炉高温再热器的安全稳定运行提供技术参考。

关键词: 超超临界锅炉; 高温再热器; 异种钢接头; 氧化裂纹; 过渡管改造; 焊接工艺

1 引言

随着电力行业对高效、低碳发电的需求提升,660MW 及以上等级超超临界锅炉因其高参数 (蒸汽压力 $\geq 25\text{MPa}$ 、蒸汽温度 $\geq 600^\circ\text{C}$)、高效率的优势,成为火力发电的主流设备。高温再热器作为锅炉的关键受热面,承担着将汽轮机高压缸排出的蒸汽重新加热至额定温度的重要任务,其运行环境涉及高温、高压及频繁的负荷波动,对材料性能与接头质量提出极高要求。

在高温再热器的设计中,为平衡不同区域的耐高温、抗腐蚀需求,常采用异种钢焊接结构,如低合金耐热钢 (12Cr1MoVG) 与奥氏体不锈钢 (TP310HCbN、S30432) 的对接。然而,异种钢材料在化学成分、物理性能 (如膨胀系数、导热系数) 及高温力学性能上存在显著差异,长期运行后易在焊缝熔合线处产生应力集中、氧化损伤,进而引发裂纹与泄漏事故,不仅导致机组非计划停运,还增加运维成本与安全风险。

某火力发电厂 #2 锅炉 (660MW 超超临界参数) 在 2024 年 9 月发生的高温再热器泄漏事故,正是典型的异种钢接头失效案例。本文以此事故为切入点,深入分析异种钢接头失效机理,提出针对性的治理方案,并验证方案的可行性,为同类型锅炉的异种钢接头运维与改造提供理论与实践依据^[1]。

2 工程背景与事故概况

2.1 锅炉基本参数

某火力发电厂 #2 锅炉为东方电气集团东方锅炉股份有限公司设计制造的 DG-1967/28.25-II 型高效超超临界

参数变压运行直流炉,采用单炉膛、一次再热、平衡通风、固态排渣、全钢构架全悬吊结构,II 型布置。其高温再热器核心运行参数 (BMCR 工况) 如下:

第一、再热蒸汽流量: 1664.75t/h

第二、再热器进口蒸汽压力: 5.83MPa (g), 温度: 362 $^\circ\text{C}$

第三、再热器出口蒸汽压力: 5.64MPa (g), 温度: 613 $^\circ\text{C}$

高温再热器入口段原设计采用三种管材: 集箱管接头材质为 12Cr1MoVG (低合金耐热钢), 管屏入口段设 12Cr1MoVG 过渡段,在顶棚上方与 TP310HCbN、S30432 (均为奥氏体不锈钢) 对接,形成异种钢焊接接头。

2.2 事故经过与损失

2024 年 9 月 2 日 06:30, #2 机组负荷 525MW, DCS 系统触发“锅炉四管泄漏”报警,炉膛泄漏报警仪显示 14/16 号能量柱异常偏高,现场检查发现锅炉左侧大包内有水汽冒出。经申请,机组于当日 14:17 解列停机,直至 9 月 15 日 16:00 完成检修,非计划停运时长 13 天 7 小时 30 分。

事故检查结果显示,首爆口位于 16-3 管束的 12Cr1MoVG/TP310HCbN 异种钢接头 (现场焊接), 泄漏蒸汽共损伤 11 根管束,直接经济损失 8.52 万元。^[2]

3 异种钢接头失效原因分析

通过电科院的现场勘查与实验室检测,结合锅炉运行工况,从材料特性、应力状态及工艺管控三方面,明确异种钢接头失效的核心原因如下:

3.1 材料特性差异导致的氧化损伤

12Cr1MoVG (低合金耐热钢) 与 TP310HCbN/S30432 (奥氏体不锈钢) 的高温抗氧化性能存在显著差异:

12Cr1MoVG 的铬含量约 1%, 高温下易形成 $FeO-Fe_3O_4-Cr_2O_3$ 型氧化层, 该氧化层结构疏松、附着力差, 长期运行中易剥落;

奥氏体不锈钢含铬量 $\geq 18\%$ 、镍含量 $\geq 8\%$, 可形成致密的 Cr_2O_3 氧化膜, 抗氧化能力远优于 12Cr1MoVG。

在 362-613℃ 的再热蒸汽环境中, 12Cr1MoVG 侧熔合线处氧化速率远高于不锈钢侧, 逐渐形成“氧化缺口”。检测发现, 首爆口管束的 12Cr1MoVG 母材球化等级达 3.5 级, 表明材料已发生高温劣化, 进一步降低了抗氧化能力。

3.2 膨胀系数不匹配引发的应力集中

两种材料的线膨胀系数差异是应力集中的根源:

第一、12Cr1MoVG 在 300-600℃ 区间的线膨胀系数约为 $13-15 \times 10^{-6}/\text{℃}$;

第二、TP310HCbN/S30432 的线膨胀系数约为 $17-19 \times 10^{-6}/\text{℃}$, 显著高于低合金钢。

机组运行时, 异种钢接头两侧因温度变化产生不同的热膨胀量, 形成环向热应力; 而负荷波动 (如深度调峰) 导致温度频繁变化, 使应力呈周期性交变, 即“疲劳载荷”。在氧化缺口的“应力放大效应”下, 缺口根部应力集中系数显著提升, 逐渐萌生微裂纹并扩展。^[3]

3.3 焊接工艺管控不足的辅助影响

现场焊接工艺控制存在短板, 虽未直接引发事故, 但加剧了接头的脆弱性:

第一、部分焊接接头存在未熔合缺陷, 虽检测显示

非本次爆管直接原因, 但降低了接头整体强度;

第二、12Cr1MoVG 侧熔合线处显微硬度值偏高, 表明焊后热处理工艺未完全消除焊接残余应力, 进一步叠加了热应力与疲劳应力;

第三、金属监督人员对异种钢材料特性研究不足, 缺乏对熔合线氧化损伤的针对性检测手段, 未能提前发现隐患。

4 异种钢接头治理方案设计

针对失效原因, 结合 DL438-2023《火力发电厂金属技术监督规程》等标准, 提出以“过渡管插入+工艺优化”为核心的治理方案, 从材料匹配、结构设计、工艺管控三方面解决异种钢接头问题。

4.1 改造方案核心思路

在原 12Cr1MoVG 与奥氏体不锈钢 (TP310HCbN、S30432) 之间插入 SA-213T91Type1 过渡管, 将原“12Cr1MoVG+奥氏体不锈钢”单条异种钢焊缝, 拆分为“12Cr1MoVG+T91”和“T91+奥氏体不锈钢”两条焊缝。SA-213T91Type1 (马氏体耐热钢) 的关键性能优势如下:

第一、抗氧化性能: 铬含量约 9%, 抗氧化能力介于 12Cr1MoVG 与奥氏体不锈钢之间, 可缓解氧化速率差异;

第二、膨胀系数: 300-600℃ 区间线膨胀系数约 $13-14 \times 10^{-6}/\text{℃}$, 与 12Cr1MoVG 高度匹配, 大幅降低热应力;

第三、力学性能: 高温强度优于 12Cr1MoVG, 可承受再热器入口的高温高压工况。^[4]

4.2 改造范围与材料规格

改造仅涉及高温再热器顶棚密封装置上方入口段, 单台炉需更换 960 套弯管, 具体规格如下表所示:

表1 弯管规格

序号	弯管规格	材料组合	数量 (套)	用途
1	$\Phi 57 \times 4$	SA-213TP310HCbN→SA-213T91Type1→12Cr1MoVG	96	适配原 TP310HCbN 管束
2	$\Phi 51 \times 3.5 / \Phi 51 \times 4$	SA-213TP310HCbN→SA-213T91Type1→12Cr1MoVG	192	适配原 TP310HCbN 管束
3	$\Phi 51 \times 3.5 / \Phi 51 \times 4$	SA-213S30432→SA-213T91Type1→12Cr1MoVG	672	适配原 S30432 管束

4.3 关键工艺技术要求

为确保改造质量, 需严格控制焊接、热处理及检测工艺, 核心要求如下:

4.3.1 焊接工艺控制

对口要求: SA-213T91Type1 管材对口间隙控制在 2.5-3.0mm, 内壁齐平, 不允许错口或折口; 焊口距离管子弯曲起点、支吊架边缘不小于 70mm, 直管段相邻焊缝间距不小于管子直径的 2 倍;

保护措施: 焊接时管内充氩保护, 采用漏斗型优质水溶纸封堵 (塞入深度 20-30mm), 严禁使用卫生纸, 避免残留杂物;

焊接方式: 全部采用氩弧焊, 符合 DL/T869-2021《火力发电厂焊接技术规程》要求; 焊接人员需持有效资格证, 焊前需制作试样板, 射线检验达 I 级合格方可上岗。

4.3.2 焊后热处理工艺

热处理时机：T91 钢小径薄壁管焊接接头完成后 24 小时内启动热处理；

工艺参数：严格遵循热处理工艺卡，加热宽度、保温层厚度符合 DL/T819-2021《火力发电厂焊接热处理技术规程》，并提供完整的热处理温度曲线报告；

硬度控制：热处理后 T91 侧硬度需符合标准要求，避免出现硬度过高或过低的情况。

4.3.3 质量检测要求

光谱检测：焊接前由乙方有资质人员对管材进行 100% 光谱分析，出具检测报告，确保材料无错用；

无损检测：所有焊口进行 100% 射线检验（符合 NB/T47013 标准），一次合格率不低于 98%；缺陷返修次数不超过 2 次，返修后需重新检测；

外观检验：焊缝边缘需圆滑过渡至母材，无裂纹、未焊透、气孔、夹渣、咬边等缺陷；焊缝加强面高度 1.5-2.5mm，宽度比坡口增宽不超过 4mm；

金相与力学检测：抽取部分接头进行金相分析（检查组织形态）与力学性能试验（拉伸、弯曲），确保接头性能达标。

5 治理方案实施与效果验证

5.1 方案实施流程

前期准备：采购管材物资（960 套弯管）到货后提供管材质量证明书、焊接工艺评定报告等技术文件；

现场施工：组织人员拆除原异种钢接头管段，按改造方案安装 SA-213T91Type1 过渡管，严格执行焊接、热处理工艺；

质量验收：施工完成后，双方联合进行光谱检测、无损检测、硬度检测等，所有项目合格后方可投入运行。

5.2 效果验证

短期效果：改造后机组启动运行，高温再热器入口段异种钢接头未出现泄漏报警，各项运行参数（温度、压力、流量）稳定，符合设计要求；

长期监测：结合机组检修，对改造后的接头进行定期检查（宏观外观、PT 检测、超声相控阵检测），未发现氧化缺口、裂纹等缺陷；

经济性分析：改造虽投入一定成本，但避免了非计划停运（单次停运损失远超改造费用），延长了高温再热器的使用寿命，降低了运维成本。

6 结论与建议

6.1 结论

660MW 超超临界锅炉高温再热器异种钢接头失效的核心原因是材料氧化速率差异、膨胀系数不匹配及焊接工艺管控不足，三者共同作用导致熔合线处氧化缺口与微裂纹萌生扩展；

插入 SA-213T91Type1 过渡管的改造方案，可有效缓解材料性能差异，降低应力集中，结合严格的焊接、热处理及检测工艺，能彻底解决异种钢接头泄漏问题；

该治理方案经工程实践验证，具备可行性与可靠性，可为同类型超超临界锅炉高温再热器异种钢接头的改造提供参考。

6.2 建议

加强金属监督管理：企业应提升金属监督人员的专业技能，深入研究异种钢材料特性，建立针对性的检测计划（如定期对熔合线进行 PT / 超声相控阵检测），提前发现隐患；

优化运行调整：严格控制机组负荷波动速率，尤其在深度调峰期间，避免高温再热器超温运行，减少交变应力对异种钢接头的冲击；

完善工艺管控体系：制定异种钢焊接专项工艺文件，加强对焊接人员的培训与考核，确保焊接、热处理工艺 100% 执行到位；

长期跟踪与改进：对改造后的接头进行长期跟踪监测，积累运行数据，结合新材料、新工艺的发展，持续优化异种钢接头设计与治理方案。

参考文献

- [1]朱安钰, 李延怀, 李洪涛, 等.某厂600MW锅炉末级过热器异种钢焊口泄漏原因分析及其改造[J].锅炉制造, 2021(02): 21-24.
- [2]林琳, 唐勇, 殷尊, 等.超超临界锅炉末级过热器异种钢焊接接头断裂原因分析与预防[J].热加工工艺, 2023, 52(07): :142-145.
- [3]曾勇, 邹宝诚, 陶康宁, 等.高温再热器管12Cr1MoV/TP347H异种钢焊接接头开裂原因分析[J].焊接技术, 2020, 49(S1): 7-9.
- [4]周亚明, 汤淳坡, 尹少华, 等.超超临界机组高温再热器出口爆管原因分析[J].焊接技术, 2020, 49(08): 96-99+106.