

Reasons and Solutions for Leakage of Internal Threaded Pipe in Water Wall of 300 MW Thermal Power Unit Boiler

Yongguo Zhou

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd. Qianbei Power Plant, Bijie, Guizhou, 551800, China

Abstract

In the research process of this article, EDS energy spectrum analysis, microstructure analysis, macroscopic inspection and other methods were used to study the internal threaded tube of a 300MW thermal power unit boiler water-cooled wall, and analyze the main reasons for the leakage of the threaded tube. After analysis, it was found that there were obvious hierarchical scale layers in the inner wall of the threaded pipe that had already leaked, and a large number of microcracks appeared in the nearby grain boundaries. As the microcracks further expanded, serious cracking problems occurred in the pipeline.

Keywords

water-cooled wall; leak; Dissolved oxygen corrosion; Hydrogen damage; Intergranular cracking

300 MW 火电机组锅炉水冷壁内螺纹管泄漏原因及解决对策

周永国

贵州西电电力股份有限公司黔北发电厂，中国·贵州 毕节 551800

摘 要

在本文研究过程中，利用EDS能谱分析、显微组织分析、宏观检验等方法，研究一台300MW火电机组锅炉水冷壁内螺纹管，分析螺纹管泄漏的主要原因。经过分析发现，在已经出现螺纹管泄漏内壁中有明显的层次状垢层，并且在附近晶界中出现大量微裂纹，随着微裂纹进一步扩展，导致管道出现严重的开裂问题。

关键词

水冷壁；泄漏；溶氧腐蚀；氢损伤；沿晶开裂

1 引言

某火电厂300 MW机组锅炉最大连续蒸发量为1025 t/h，工作压力17.6 MPa，其水冷壁采用规格为 $\phi 45\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 内螺纹管设计，主要用于强化传热并防止工质偏离核态沸腾（DNB）。但在2020年9月该锅炉发生水冷壁爆管泄漏事故，给机组安全运行带来严重影响，此时水冷壁管已经累计运行约10.4万小时，并经历频繁启停机操作，全年共启动5次、停运6次，这种运行模式对管材疲劳性能和抗腐蚀能力提出严峻挑战。通过分析泄漏水冷壁管爆管性质，有利于工作人员可以初步判断其失效和多种因素相关，包括高温蠕变、氧化腐蚀、热疲劳、水动力分布不均等。特别是频繁启停机过程中产生的交变热应力，很可能导致管材内部出现微裂纹并向外逐步扩展，最终引发爆管。内螺纹管在长期运行中可能因水质管理不当进一步加剧氧化膜剥落和腐蚀产物沉积，降低管材的力学性能，所以本文深入研究此次爆管泄漏的原

因，有助于明确失效机制，制定针对性的解决对策。

2 检验方法

在300 MW火电机组锅炉水冷壁内螺纹管泄漏原因分析中，要求工作人员宏观检查泄漏的内螺纹管，初步判断泄漏模式以及出现泄漏问题的主要原因，通过目视检查和内窥镜技术可以清晰观察到管内壁的腐蚀、裂纹情况，给后期分析提供直观依据。对于部分疑似区域，采取割管解剖试验进一步获取详细的微观结构信息，为了深入研究晶粒尺寸、晶界特征以及是否存在蠕变空洞或氧化层剥落等现象，这些显微组织变化能够直接反映管材在长期高温高压运行条件下的材料性能退化情况；接着利用Sigma300型场发射扫描电子显微镜（FE-SEM）详细分析试样的微观组织和附着垢样，结合能谱仪（EDS）检测元素分布进一步明确腐蚀产物成分和形成机制。

为了进一步确认管内壁垢样的物相组成，采用X射线衍射仪（XRD）进行物相分析，XRD技术能够精确测定垢样中的晶体结构和化学成分，如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等氧化物，从而为判断腐蚀类型提供科学依据。硬度测试结果能够间接

【作者简介】周永国（1977-），男，中国贵州遵义人，本科，工程师，从事火电厂集控运行研究。

反映材料的冷作硬化、热处理状态，并和显微组织分析结果进行验证。

3 检验分析

3.1 宏观检验

宏观检查发现，泄漏管两侧水冷壁管有轻微吹损问题，表明整体结构没有完全失效，泄漏管爆口呈现折线型，边缘并未出现明显的塑性变形，该现象和材料脆性断裂、高温蠕变有直接关联。爆口处壁厚 4 mm，纵向长度 96 mm，宽度为 10 mm，进一步揭示局部区域存在严重减薄情况。通过割管取样泄漏管发现，向火侧内壁覆盖一层黑色垢层，且不同位置的垢量分布不均匀，特别是在爆口下方 1.5 m 处发现一条长达 25 mm 的裂纹，该裂纹贯穿内壁并伴随明显的壁厚减薄现象，同时内壁上形成层片状垢层，表明泄漏管可能长期受到高温腐蚀、热疲劳、水动力分布不均等多重因素的影响。在化学清洗泄漏管样时，清洗前内壁存在不均匀垢样，部分区域甚至出现点状凸起的黑色鼓包，而清洗后内壁表面变得光滑，大部分垢样被清除干净，进一步验证垢层的对管材性能的影响。

为了进一步确认泄漏管内壁异常垢层范围，工作人员利用内窥镜技术全面检查爆口区域，检查结果显示在爆口向上 2 m 位置存在黄褐色垢层，而在爆口下方 0.8 m 区域则发现层片状垢样，这些垢样形态和局部过热、氧化腐蚀、水质管理不当有直接关联。但值得注意的是，泄漏管下水包管口位置没有看见明显异物堵塞，排除由异物流动受阻的可能性，结合宏观检查结果，可以推测泄漏管的失效机制主要涉及以下几个方面：一是高温环境下形成的氧化垢层导致局部热阻增加，进而提高管壁温度；二是水动力分布不均，进一步加剧局部区域的热疲劳损伤；三是长期运行过程中产生的交变热应力促使发生裂纹，最终导致爆管。

3.2 显微组织分析

3.2.1 光学金相

在 300 MW 火电机组锅炉水冷壁内螺纹管泄漏的显微组织分析中，部分铁素体晶界出现微裂纹，可能是由于长期高温运行造成的蠕变损伤；外壁的显微组织同样为铁素体+珠光体，且珠光体形态完整，没有发现明显退化迹象；内壁附近的珠光体含量较外壁显著减少，表明内壁区域长期暴露于高温高压环境发生组织变化；在爆口上方 610 mm 处的材料金相组织显示为正常的铁素体+珠光体结构，内外壁组织均匀，未发现层片状垢层，说明该区域的金属基体受到的腐蚀情况较浅，表示爆口上方区域的材料性能处于相对良好的状态。

相比之下，爆口下方 760 mm 处的显微组织则表现出不同的特征，尽管该区域的组织仍为铁素体+珠光体，珠光体形态完整，但进一步减少内壁区域的珠光体含量，同时铁素体晶界上出现微裂纹，和长期高温腐蚀、应力集中有关。更

为严重的是，该区域管内壁覆盖一层 2.0 mm 厚层片状垢层，剩余金属层厚度 3.6 mm，显著降低了管材的承压能力，增加了局部热阻，甚至造成金属基体在高温环境下加速氧化，从而进一步加剧材料的性能退化。结合上述分析可以推测，爆口下方区域的失效机制涉及到一系列因素，包括高温腐蚀、热疲劳、蠕变损伤、水动力分布不均等，所以通过系统分析显微组织可以明确泄漏管的失效模式，有效提升锅炉运行的安全性。

3.2.2 扫描电镜分析

通过扫描电镜图像观察发现，铁素体晶界开裂最深位置距离外壁约 1.2 mm，该深度势必影响到管材的承压能力；尤其在高倍扫描下，研究人员可以清晰观察到单独的晶界微裂纹，这些裂纹存在可能和长期高温运行环境下的蠕变损伤相关；利用能谱仪（EDS）对垢层附近进行线扫描分析，结果表明在基体、垢层交界位置存在明显的元素波动，氧元素和氯元素含量大幅度提升，可以发现铁素体晶界开裂和局部腐蚀之间的潜在联系^[1]。

从腐蚀机理的角度来看，氧元素和氯元素含量提升表明该区域存在氧化腐蚀和氯化物应力腐蚀开裂（SCC）。氯离子是一种强侵蚀性离子，其在高温环境下容易渗透到金属基体内部，沿铁素体晶界扩散并引发局部腐蚀，导致晶界出现不同程度的开裂问题。同时，进一步加剧发生氧化反应，形成氧化膜剥落和再生循环，无形中降低了材料的整体性能，这种腐蚀行为不仅给管材使用性能带来严重影响，还可能导致局部区域的热应力集中，最终产生爆管事故。结合扫描电镜和能谱分析结果看出，铁素体晶界开裂主要原因是氯腐蚀和氧化腐蚀的共同作用，所以工作人员在后续运行维护中重点关注水质管理，严格控制水中氯离子浓度并定期监测管材的腐蚀情况，防止再次发生类似问题。

3.3 垢样品相分析

在试验分析中，研究人员采用 X 射线衍射（XRD）检测泄漏管内壁垢层，成功确定其物相组成。检测结果表明，垢样主要由三氧化二铁（ Fe_2O_3 ）和四氧化三铁（ Fe_3O_4 ）组成，这两种铁氧化物存在形式合锅炉长期运行中的高温氧化腐蚀有直接关联，根据颜色特征推断黄褐色垢层主要为三氧化二铁，而黑色垢层则为四氧化三铁，这种混合物形成过程是由金属基体在高温高压环境下的进行氧化所产生：初期生成的四氧化三铁在进一步暴露于富氧环境中被氧化为三氧化二铁，从而形成分层结构的氧化垢层。从热力学角度来看，三氧化二铁具有较高的稳定性，而四氧化三铁则通常作为初始氧化阶段的产物存在，进一步增加局部热阻，甚至降低金属基体强度，从而加速材料的失效速度；垢样品相组成也反映水质管理的重要性，主要原因是水中溶解氧含量和杂质浓度会直接影响氧化腐蚀速率。结合 XRD 分析结果，推测出泄漏管内壁的氧化腐蚀是造成爆管的重要原因，所以工作人员在后续运行维护中要加强水质处理，严格控制溶解氧和氯

离子浓度并定期监测管材的腐蚀情况,防止发生相同问题^[2]。

3.4 硬度检验

表 1 充分体现出试样在不同位置的布氏硬度 (HBW) 结果,发现爆口附近硬度值为 119 HBW,而爆口背侧硬度值为 133 HBW,说明爆口附近区域受到高温腐蚀、塑性变形因素影响,出现材料软化问题,而背侧区域受热应力影响较小,但一直能满足行业标准的硬度水平;爆口上方 610 mm 处硬度值为 130 HBW,爆口下方 760 mm 处为 126 HBW,而在爆口下方约 1.5 m 裂纹附近的硬度值为 130 HBW。数据表明,爆口附近及裂纹区域材料性能已经出现退化问题,尤其是在长期高温高压运行条件下局部区域可能出现晶界弱化现象。结合宏观检查和显微组织分析结果,推测这些区域硬度下降和铁素体晶界开裂、氧化腐蚀相关。

表 1 试样布氏硬度试验结果

位置	硬度 /HBW
爆口附近	119
爆口背侧	133
爆口上方 610mm	130
爆口下方 760mm	126
爆口下方 1.5m	130

进一步通过显微硬度测试 (HV 0.2), 并进行试样硬度分布, 如表 2 所示。爆口附近显微硬度从外壁到内壁为 133、130、118、106、103 HV 0.2, 有明显的变化趋势, 说明内壁区域长期暴露在高温环境发生严重的性能劣化; 同样, 爆口下方 760 mm 处显微硬度值为 143、122、108、

110、106 HV 0.2, 而爆口下方约 1.5 m 裂纹附近显微硬度值为 151、139、130、112、111 HV 0.2, 这种硬度梯度变化充分体现内壁区域材料在高温腐蚀作用下的变化规律。但值得注意的是, 裂纹附近显微硬度值相较于其他区域, 主要原因是局部应变硬化造成^[3]。

表 2 试样显微硬度试验结果

试样	硬度 /HV0.2
爆口附近	133、130、118、106、103
爆口下方 760mm	143、122、108、110、106
爆口下方 1.5m	151、139、130、112、111

4 结语

通过对上述研究内容进行分析, 发现在爆口位置没有发现异常组织, 以及超温问题, 管道泄漏和使用时间、温度关系较小; 在管子内壁垢层位置的珠光体数量持续下降, 少量微裂纹出现在铁素体晶界位置, 垢层下部被大量酸性物质腐蚀。为了防止相同问题多次发生, 在本文中提出控制锅炉给水质量, 加强停炉时间段的保养工作, 进一步加强排污处理, 保证在实际应用过程中能够正常使用。

参考文献

[1] 李勇. 300 MW火电机组锅炉水冷壁内螺旋管泄漏原因分析[J]. 工业锅炉,2021(6):54-59.

[2] 张丛生,史丹,王宏涛. 某电厂锅炉后墙水冷壁螺旋管泄漏原因分析[J]. 黑龙江电力,2022,44(6):547-549.

[3] 杨晓龙,汪强,黄德全,等. 薄壁管材特殊螺纹接头密封性能研究[J]. 焊管,2024,47(5):47-52.