

Detection and Quality Control of Hot Fatigue Damage of Boiler Superheater Tubes

Yong Tian

Na Yong Power Generation General, Guizhou Jin Yuan Co., Ltd., State Power Investment Group Bijie, Guizhou, 553303, China

Abstract

boiler superheater is a heat exchange equipment that plays a central role in various fields such as thermal power and chemical industry. Its operation status directly determines the safety and economy of the. This paper aims to provide theoretical support and practical guidance for the safe operation and overhaul optimization of boiler superheater tubes by verifying the effectiveness of technologies and control measures based on cases.

Keywords

Boiler superheater tubes; Hot fatigue damage; Non-destructive testing; Overhaul quality control; Failure

锅炉过热器管热疲劳损伤检测与检修质量控制

田勇

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，中国·贵州 毕节 553303

摘要

锅炉过热器，此乃火电以及化工等多个领域当中发挥核心作用的换热设备，它的运行状况对于机组的安全性及经济性而言有着直接决定性意义的情况。本文结合实际所出现的案例来对技术以及控制措施的有效性进行验证，目的是为锅炉过热器管能够实现安全运行以及检修优化提供兼具理论性支撑和实践性指导方面的内容。

关键词

锅炉过热器管；热疲劳损伤；无损检测；检修质量控制；失效机理

1 引言

在诸如电力生产以及化工反应之类各式各样、林林总总的工业场景当中，锅炉一直承担着扮演能量转换这一堪称核心之关键职能的重要角色，而过热器，作为将锅炉所产出的饱和蒸汽成功加热转变成成为过热蒸汽的如此关键且不可或缺的重要部件，其所处的工作环境的严苛程度那简直超乎想象。过热器管，必须持续不断地承受来自高温烟气的反复冲刷以及高压蒸汽的严重腐蚀作用，与此同时，在机组实施启动与停止的阶段，还有负荷调整这一系列复杂且多变的过程期间，管体温度频繁地上升与下降，进而使得热应力循环作用反复施加其上，这就导致该部件极其容易遭受热疲劳损伤所带来的不利影响。

2 锅炉过热器管热疲劳损伤机理及影响因素

2.1 热疲劳损伤演化机理

热疲劳损伤本质被认为是这样一个过程，即管体处在循环热应力所施加的作用之下发生的那种渐进性失效过程，而其演化历程按一般情况能够划分成三个具体阶段；先说第一阶段也就是微观裂纹萌生期，在此期间，过热器管于启停或者出现负荷波动这样的状况之时，管体与处于内外壁的介质之间会形成温度梯度，而此温度梯度进而致使不同部位有着热膨胀量方面的差异，最终产生循环拉压热应力；当此热应力达到超过材料屈服强度这样的程度之时，管体的局部区域便会出现塑性变形的现象，在经过多次循环之后，在诸如晶界、缺陷之类的薄弱区域就会形成微观滑移带，从而进一步萌生初始微观裂纹，通常在这一阶段裂纹尺寸往往会小于0.1mm，并且多数会分布于管内壁或者应力集中的区域。第二阶段之所以被称为裂纹扩展期，是由于随着热循环次数不断有所增加，微观裂纹会在循环热应力同介质腐蚀的协同作用状况之下逐渐发生扩展；且在高温环境里，管内壁蒸气经氧化进而生成氧化层，因氧化层与基体材料热膨胀系数存在差异，使得氧化层出现开裂现象，于是腐蚀性介质渗入裂纹

【作者简介】田勇（1995-），男，土家族，中国贵州思南人，本科，助理工程师，从事锅炉本体检修研究。

内部,使得裂纹扩展得以加速。该阶段裂纹是以沿晶扩展形式为主,然而部分裂纹穿过晶界进而形成穿晶裂纹,其裂纹长度能够扩展到0.1-1mm,此时管体力学性能开始有较为明显的下降情况出现。第三阶段之所以被称作宏观失效期,原因在于当裂纹历经扩展达到临界尺寸这样一个特定状况之后,会在具有强大能量的高压蒸汽那种持续不断的作用之下,以极快的速度迅速贯穿整个管体,最终所呈现出来的则是泄漏或者爆管这两种不同的结果;而且在这一阶段当中,裂纹其扩展的速率会急剧加快,仅仅需要经过数次热循环的过程便能够完成贯穿的动作,并且裂纹拓展的具体路径还呈现出分支状的形态,从而逐渐形成一种非常复杂的裂纹网络。

2.2 热疲劳损伤核心影响因素

材质特性这一被视作影响热疲劳损伤的基础因素,而像过热器管常采用的碳钢、低合金钢以及耐热钢等诸多材质,其中材料所具备的高温强度、韧性、热膨胀系数还有抗腐蚀性能,这些方面直接对热疲劳抗性起到了决定性作用;比如碳钢材料尽管成本方面处于相对较低的状态,然而在高温的环境下强度会出现较为明显的衰减情况,热膨胀系数也较大,在频繁经历温度波动的状况之下就很容易产生较大的热应力,进而使得其热疲劳寿命比较短;与之相对的是P91、P92这类耐热钢,通过添加Cr、Mo、V等合金元素这样的操作,促使形成稳定的碳化物析出相,以此对高温强度以及热稳定性予以提升,从而显著降低热疲劳损伤的速率;另外,材料在冶炼过程当中所出现的诸如夹杂物、气孔之类的缺陷,会主动成为裂纹的萌生源,进而对热疲劳损伤进程起到加速的效果。

3 锅炉过热器管热疲劳损伤检测技术及应用要点

3.1 超声检测技术

凭借穿透能力强、检测精度高且对人体无害这般优势的超声检测技术,因其自身种种特性,得以成为过热器管热疲劳损伤检测中重要的核心技术之一,而此项技术主要被应用于对管体内部以及表面之下诸如裂纹、壁厚减薄等缺陷开展检测工作。关于它的检测原理是这样的,借助探头向着管体发射超声波之后,超声波在缺陷的界面位置会出现反射、折射等现象,然后依据反射波所传播的时间与幅值来做出对缺陷位置以及尺寸的判断。在进行热疲劳损伤检测时,超声检测需要重点将关注的方向放在检测工艺参数的优化与探头的合理选择之上。鉴于过热器管具有管径较小(通常处于30-80mm这个范围)、壁厚较薄(大致是4-12mm)的显著特点,所以应选用高频聚焦探头,其频率一般设定在5-10MHz,并且要使聚焦深度与管道壁厚实现相互匹配,以此来提升对微小裂纹的有效检出能力。在具体检测过程当中,通过采用水浸法或者耦合剂耦合的方式,目的是确保超声波能够实现有效传播,与此同时还需要对探头的移动速度

进行严格控制,避免出现漏检的情况发生。针对弯头、管夹等应力集中的特殊部位,必须采用多角度扫查,其中包含纵向、横向以及斜向扫查等多种方式,力求全面覆盖那些可能存在裂纹的区域。

3.2 渗透检测技术

渗透检测技术被应用于对过热器管表面开口裂纹展开检测,特别是对于热疲劳裂纹处在初期阶段的表面微裂纹,这种技术的检出效果堪称显著,其所能达到的检测灵敏度能够精准至0.01mm级的开口宽度。该技术的检测原理是把渗透剂均匀涂抹在管体表面,借助毛细作用让渗透剂渗入表面开口裂纹之中,在去除管体表面多余渗透剂之后再将其显像剂进行涂抹,如此一来,已渗入裂纹内的渗透剂就会被显像剂吸附从而实现显示的目的,进而确定裂纹具体所在的位置以及呈现出的形态。渗透检测的核心要点主要体现在表面预处理与检测工艺的控制这两方面。关于表面预处理,需要借助打磨、酸洗等多种不同方式将管体表面的氧化层、油污、锈蚀之类杂质进行去除,这样做是为了确保渗透剂可以充分渗入到裂纹之中。而针对高温运行后过热器管,因其表面氧化层相对较厚,所以要采用机械打磨与化学酸洗相结合的处理方式,同时还得把打磨粗糙度严格控制在Ra1.6-Ra3.2 μ m这个范围之内。在检测进程当中,渗透时间应该依据环境温度与裂纹尺寸做出相应调整,一般来说是10-20分钟,但要是温度比较低的情况下就得延长渗透时间;对于显像时间而言,则需控制在5-10分钟,避免由于显像剂涂抹过厚而使得缺陷变得模糊不清。

3.3 涡流检测技术

涡流检测技术,作为属于电磁感应这一范畴内的检测方法,以其具备检测速度快、能够实现自动化检测以及无需使用耦合剂等多样优势,特别适用于针对过热器管开展的批量检测工作,尤其是对于管体内壁所出现的热疲劳裂纹以及壁厚减薄这类情况的检测更为适宜。该技术的检测原理在于,通过探头线圈朝着管体发射交变磁场,由此在管体内产生感应涡流;当管体存在诸如裂纹、壁厚减薄等缺陷时,涡流的分布便会发生变化,进而依靠检测涡流所产生的变化信号来对缺陷情况加以判断。然而,涡流检测易受到管体材质不均、表面氧化层厚度出现变化等多种因素的干扰,致使出现虚假信号。不过,借助采用差动式探头以及信号滤波技术这种方式,能够有效降低干扰信号,以达到提升缺陷识别精度之目的。针对那些检测到的疑似缺陷,有必要采用超声检测或者渗透检测这两种方式来进行复核,以此避免发生误判现象。除此之外,涡流检测还可与机器人技术相结合,从而实现过热器管的自动化扫查,以起到提高检测效率与扩大覆盖面的作用。

4 锅炉过热器管热疲劳损伤检修质量控制体系

4.1 检修前质量控制:精准规划与准备

检修前质量控制,其核心要点明确应清晰界定检修范

围以及技术方面具体要求，并充分做好所有相关准备工作，基于检测得出的各类结果与设备运行过程中的相关数据，对设备开展详细损伤评估工作以进一步确定检修相应等级，如是轻微损伤（即裂纹长度小于0.5mm且壁厚减薄率小于5%时），需采用打磨修复这一方式来处理；当属于中度损伤（裂纹长度处于0.5-2mm之间且壁厚减薄率为5%-10%的情况），要采用补焊修复的办法进行解决；而要是重度损伤（裂纹长度大于2mm同时壁厚减薄率大于10%之时），则采用管道更换手段，之后根据损伤评估所获得结果来制定出较为详细的检修方案，该方案当中需明确规定检修具体流程、技术层面所应遵循的标准、质量方面的关键控制点以及安全防护措施。

4.2 检修过程质量控制：关键工序管控

打磨修复工序质量控制之核心在于确保缺陷被彻底清除这一关键目标的达成，对于像表面微裂纹以及轻微腐蚀之类的缺陷，会通过采用角磨机或者砂轮来展开打磨操作，在这个打磨的过程当中，必须依靠渗透检测以实现实时监测，直至将所有缺陷完全清理干净，而打磨后的管体表面理应呈现出平整且光滑之态，不容许存在沟槽、凹陷等各类缺陷，且打磨区域的壁厚也需契合设计要求，其最小壁厚绝对不能小于计算壁厚，在打磨完成之后，针对打磨区域要开展表面处理工作，

4.3 检修后质量控制：验收与跟踪

检修完毕后的质量验收所采用之方式乃“分项验收与整体验收相结合”，其目的旨在确保检修质量全然合乎相关要求；其中分项验收是针对诸如打磨修复后、补焊焊缝以及管道更换焊缝等各类不同检修工序而加以开展的，所涉及的验收内容涵盖外观质量方面、尺寸偏差领域以及无损检测结果范畴等诸多方面，只有当验收合格之后才能够进入后续的下一工序；而整体验收则是在所有检修工序均已完成的状况之下予以开展的，其项目包含检修质量复查工作、压力试验操作以及气密性试验环节等。

5 案例分析

A 火电企业 300MW 机组锅炉过热器采用 20G 碳钢与 P91 耐热钢混合材质，运行 10 年后，在机组大修期间发现多根管道存在热疲劳裂纹，主要分布于弯头与管夹接触部位。采用本文提出的“涡流检测+超声检测+渗透检测”组合方案进行全面检测，共检出缺陷管道 23 根，其中轻微损伤 12 根、中度损伤 8 根、重度损伤 3 根。根据损伤评估

结果制定检修方案：对 12 根轻微损伤管道采用打磨修复，打磨过程中采用渗透检测实时监测，确保裂纹彻底清除，打磨后壁厚满足要求；对 8 根中度损伤管道采用氩弧焊补焊修复，焊接工艺参数为：焊接电流 120—150A，电压 18—22V，预热温度 250℃，后热温度 300℃，焊后采用超声检测与渗透检测验证，焊缝无缺陷；对 3 根重度损伤管道采用 P91 耐热钢管道更换，管口组对错边量控制在 5% 以内，焊接后进行水压试验与气密性试验，均合格。检修完成后，机组重启运行 1 年，其间对检修部位进行 3 次跟踪监测，采用红外热成像检测未发现局部超温，超声检测与渗透检测未发现裂纹复发，检修部位运行状态稳定。通过本次检修，有效消除了过热器管热疲劳损伤隐患，避免了爆管事故发生，同时通过优化检修质量控制流程，缩短了检修工期，降低了检修成本。

6 结语

锅炉过热器管所遭受的热疲劳损伤这一情况，实际上是多种因素以一种相互协同作用的复杂方式而导致的结果，其中材质所具备的特性、设备运行时的具体工况以及结构设计方面存在的缺陷等诸多方面，它们共同对损伤逐步演化的进程施加着影响；而像超声检测、渗透检测以及涡流检测这类无损检测技术，每一种都分别拥有其独特的优势之处，若将它们进行组合应用的话，便能够达成对于热疲劳损伤实现精准检出这一目标；构建一个涵盖了“检修前规划准备以及检修过程关键管控还有检修后验收跟踪”如此全流程的质量控制体系，对于有效提升检修的质量并且确保过热器管能够安全运行而言可以起到积极作用；从案例实践的角度来看，基于损伤机理的检测技术以及全流程的质量控制措施，二者都呈现出显著的有效性，能够为企业的实际操作提供相应的实践指导。

参考文献

- [1] 李亚巍.煤粉锅炉过热器管应力腐蚀泄漏自动化检测系统[J].自动化与仪表,2025,40(05):100-104.
- [2] 朱珊珊,梁志远,谷学峰,薛壮磊,陈乐,周凯强.某垃圾焚烧锅炉过热器管腐蚀穿孔失效分析[J].工业锅炉,2024,(06):52-58.
- [3] 徐燕健,张炜,许龙发.某亚临界锅炉过热器管腐蚀泄漏原因[J].理化检验-物理分册,2024,60(11):79-83.
- [4] 李均昊,刘宏村,雷正义.某燃气锅炉过热器管失效分析及预防措施[J].山西电力,2024,(02):47-51.
- [5] 邓平,汤志辉,刘志丽.超超临界锅炉过热器管裂纹尖端塑性区数值研究[J].湖南电力,2023,43(02):46-52.