

锅炉检验检测中裂纹问题分析

于淘, 杨湘, 梁晶

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060029

摘 要 : 工业生产体系中, 保障锅炉运行安全是企业安全管理重中之重。由于锅炉压力容器运行环境特殊性, 长期处于高温、高压环境, 加之锅炉内部介质腐蚀性, 可能导致锅炉产生裂纹, 影响锅炉运行安全。因此, 应高度重视锅炉检验检测工作, 选择合适的检测方法掌握锅炉运行状态, 从而及时发现和处置裂缝问题, 创设安全稳定的作业环境。文章围绕锅炉检验检测中裂纹问题进行分析, 总结相应的处置措施提升锅炉检测检测水平。

关 键 词 : 裂纹; 锅炉; 检验检测

Analysis of Crack Problems in Boiler Inspection and Testing

Yu Tao, Yang Xiang, Liang Jing

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

Abstract : In the industrial production system, ensuring the safe operation of boilers is a top priority for enterprise safety management. Due to the special operating environment of boiler pressure vessels, which are subject to long-term exposure to high temperatures and high pressure, coupled with the corrosiveness of the internal media of the boiler, cracks may occur in the boiler, affecting its operational safety. Therefore, it is imperative to attach great importance to boiler inspection and testing, select appropriate testing methods to monitor the boiler's operating status, so as to promptly detect and address crack issues, and create a safe and stable working environment. This article analyzes the crack problems encountered during boiler inspection and testing, and summarizes corresponding measures to improve the level of boiler inspection and testing.

Keywords : cracks; boiler; inspection and testing

经济社会蓬勃发展背景下, 工业领域逐步转型升级, 现阶段锅内锅炉压力容器已经趋近发达国家水平。锅炉作为一种特种压力容器, 根据生产需要设置锅炉参数, 将燃料燃烧产生的热量转化为蒸汽, 从而满足生产需要。锅炉压力容器的运行安全是企业安全管理的核心, 而威胁锅炉运行安全的一个典型缺陷即裂纹, 需要日常维护中重点检验检测, 并选择合理措施有效处置锅炉裂纹问题。

一、锅炉检验检测的主要方法

(一) 外观检查

锅炉检验检测中, 外观检查是一种常规且简单的检验方法。检验人员现场通过肉眼、触摸, 或使用放大镜、手电筒等简单工具检查锅炉可见区域。外观检查重点在于锅炉表面是否有磨损、腐蚀以及明显裂纹痕迹; 焊缝区域重点检查焊缝是否存在气孔、咬边或夹渣等缺陷, 此类缺陷若未及时处理, 可能发展为尺寸不一的裂纹。例如, 某工厂锅炉外观检验时, 检验人员使用放大镜观察锅炉焊缝区域是否存在细小裂纹, 经过检查确认属于早期裂纹, 需要及时处置。由此看来, 外观检查方式尽管较为宽泛、简单, 但是一些明显的裂纹能够及时发现, 为后续深入、细致检查提供支持^[1]。

(二) 无损检测方法

1. 射线检测

射线检测是一种对锅炉设备外观或内部构造不会产生损坏的

检测方式, 通过发射 x 射线或 γ 射线, 穿透锅炉部件, 根据不同材质、不同缺陷位置的射线吸收程度, 确定缺陷位置、大小和形状, 并且在人机交互界面中可视化呈现。使用射线检测对接焊缝区域, 能够精准描绘出裂纹长度、宽度和延伸方向, 检测精度较高^[2]。具体检测中, 检测人员需要根据锅炉部件材质、厚度、大小等参数信息, 选择适宜的射线源、曝光参数, 并且将底片放置在另一侧接受射线, 为裂纹处置提供精准数据支持。

2. 超声检测

超声检测方式的无损检测优势鲜明, 在诸多行业领域中得到了广泛应用。采用超声检测锅炉裂纹, 根据材料传播特性反馈锅炉设备缺陷。超声波传播过程中遇到裂纹缺陷, 会出现不同程度的折射与反射, 接收探头获取反射波信号后, 通过分析确定缺陷大小、位置以及形状^[3]。对于部分厚度较大的锅筒等部件, 超声检测是首选方式, 检测灵敏度高、结果精度高。实际操作中, 检测人员在锅炉检测表面涂抹适量耦合剂后, 超声探头紧贴锅炉探测

区域,转动探头对锅炉进行全方位扫描检测。

3. 磁粉检测

磁粉检测方式,重点检测锅炉铁磁性材料表面裂纹缺陷,部件磁化后,表面或表面如果存在裂纹会产生漏磁场,导致表面上吸附大量磁粉,可视化呈现磁痕位置与形状。对于锅筒以及管板等铁磁性部件检测中,需要对其磁化后均匀喷洒磁粉到表面,能够实现多条表面裂纹检测,为锅炉运行安全提供坚实保障^[4]。

4. 理化性能检验

理化性能检验形式多样,涵盖力学性能测试、化学成分分析等方式,其中化学成分分析是检测锅炉材料构成部分,分析材料是否满足设计标准。如果化学成分存在偏差,则会导致材料性能下降,增加锅炉表面裂纹出现几率。力学性能测试包括冲击试验、拉伸试验等,能够精准检测材料韧性、强度等指标,从而客观反映不同工况下表面抵抗裂纹的能力。

二、锅炉检验检测中的裂纹问题分析

(一) 疲劳裂纹

疲劳裂纹是一种常见的锅炉裂纹问题,在锅炉压力容器和管道试验中频频出现,多表现为应力集中区域,初期的裂纹普遍较小,随着后期发展逐渐延伸扩大^[5]。疲劳裂纹包含热疲劳裂纹、机械疲劳裂纹等,其中机械疲劳裂纹多出现在叶片、齿轮等机械零部件表面,裂纹形状为直线形,如果未能及早处置,后期逐渐蔓延形成一段细长裂纹。此类裂纹多出现在机械加工连接区域、刀痕区域以及细小孔洞等区域。热疲劳裂纹则是材料表面拉伸强度下降,在反复应力作用下产生金属裂纹。疲劳斜纹适合选用磁粉检测等无损检测方式,在表面形成明显的磁痕,直观展示裂纹具体形状大小、走向。

(二) 蠕变裂纹

蠕变裂纹的产生,由于应力作用和环境温度变化影响导致,伴随着锅炉运行时间延长,锅炉压力容器以及管线性能下降,受外力破坏下金属原子逐渐扩散,使得材料内部晶体结构改变^[6]。随着时间延长,晶界区域会产生大量微小空洞,并持续聚集、长大,最后形成蠕变裂纹,如图1。蠕变裂纹多产生于集箱、管线等应力聚集区域,或是热力膨胀的管线外表区域,受应力作用下导致材料形变、变质,最终形成裂纹带,围绕主裂纹平行分散众多细小裂纹。蠕变裂纹是一个长期过程,一旦形成,锅炉材料承载力随之下降,威胁锅炉运行安全。通过对锅炉金相分析,能够直观了解材料内部晶界变化、裂纹形态。如,某台锅炉的过热器管金相检验时,晶界区域有着显著的空洞聚集现象,部分空洞连接成为蠕变裂纹,说明过热器管长期处于高温、高压环境,材料性能已经不符合技术标准。



图1 炉管蠕变裂纹

(三) 应力腐蚀裂纹

应力腐蚀裂纹的产生,原因在于锅炉金属材料在氯离子、碱

性溶液环境以及应力作用导致,通常出现在水冷壁、省煤器等部件区域,如图2。应力腐蚀裂纹产生环境中, Cl^- 浓度超标,或是 pH 值 >10 的高浓度 NaOH 溶液。例如,锅炉内部介质为准,氯化物含量过高,受到高压、高温环境影响,使得大量氯离子吸附在金属表面,使得金属钝化膜手术,表面产生阳极区,未破坏钝化膜区域属于阴极区,相互作用下形成腐蚀微电池。拉应力下,阳极区金属持续溶解,在金属表面产生大量的腐蚀坑洞,并随着时间推移腐蚀坑底部应力集中,诱发应力腐蚀裂纹。裂纹多呈树根状分布,沿着晶界扩展,并且表面上存在一定量的腐蚀产物。应力腐蚀裂纹检测中,适合选择此份检测、超声检测等方法,能够精准检出表面区域应力腐蚀裂纹问题,通过分析裂纹周围化学成分、腐蚀产物,客观反映腐蚀介质类型,从而为后续裂纹问题处置提供有效参考依据^[7]。



图2 应力腐蚀裂纹

(四) 温度裂纹

锅炉运行期间,温度裂纹产生原因在于部件温度分布失衡,或是在剧烈温度波动下形成。锅炉是工业生产中的热交换设备,锅炉运行中不同位置温度大小不一,在初期启动时炉膛内部火焰温度高,邻近水冷壁管外部受热后温度快速升高,内部工质升温速度缓慢,管壁内外温度呈梯度变化产生热应力,随着热应力逐步升高,一旦材料屈服强度,则会产生温度裂纹。锅炉热交换频繁区域,属于温度裂纹产生的主要区域^[8]。例如,过热器区域由于高温烟气和蒸汽的热交换,使得内部热负荷过高,与正常温度区域存在显著温差,在热胀冷缩作用下产生温度裂纹。锅炉炉墙和金属部件连接区域,二者热膨胀系数不一,同样会产生较大的热应力,成为温度裂纹形成的主要区域。锅炉温度裂纹检验检测时,多选择红外热成像技术完成表面裂纹初步筛查,快速检测锅炉表面温度分布情况,进而精准定位温度裂纹位置。随后可以联合使用超声检测技术,进一步探寻裂纹深度、扩展情况。

三、锅炉检验检测中裂纹问题处置策略

(一) 优化裂纹检验检测流程

锅炉检验检测中,为了及时发现和处置裂纹问题,优化裂纹检验检测流程显得尤为必要。首先,明确裂纹检验检测重点区域,根据不同区域产生裂纹的几率、严重程度,精准划分检测区域。对于疲劳裂纹频繁出现的部件,如,蒸汽管道、启动分离器的弯头区域,或是温度裂纹影响较大的再热器等区域,每次检测

时需要适当的增加检测点数和市场^[9]。锅炉的启动分离器检测时，使用超声波全面检查，随后对于疑似裂纹区域使用磁粉检测方式进一步确认，从而精准探寻具体的裂纹。其次，制定标准的检测流程，检测人员需严格遵循标准化流程操作，检测前期设备校准和部件表面灰尘清理等，设置合理的检测仪器参数，以及探头检测时的移动速度。例如，射线检测时射线源、与待检测部件距离、曝光时间等，提高检测结果精准性。对于检测人员应当定期培训考核，熟练掌握操作规范，尽可能规避人为出现检测误差。最后，根据锅炉运行工况和年限，确定最佳的检测周期。不同锅炉运行工况以及运行环境等有所不同，部分锅炉存在裂纹处置历史，因此要因地制宜，有计划的制定检测周期。新投入运行的锅炉，运行工况稳定，并无裂纹修复历史，裂纹检测周期适当延长；长期运行，并且频繁出现裂纹的锅炉，适当缩短锅炉检测周期^[10]。

（二）建立锅炉压力容器检验系统

锅炉压力容器检验系统架构搭建，其中涵盖了软硬件综合检验系统。硬件设备配备高分辨率超声相控阵检测仪或是智能磁粉探伤仪等，实现各类裂纹精准检测；设置多个传感器，设置采集锅炉压力、温度、流量等运行参数。软件层面，建立统一数据采集和分析平台，收集整合传感器数据。平台采用分层架构，数据采集层负责整合无损检测设备、传感器以及运行参数；数据分析层融合 AI 算法和大数据平台，关联锅炉运行工况、裂纹特征进行数据分析；决策支持层，智能生成裂纹检验报告，并给出裂纹处置建议。系统设计多个功能模块，实时监测模块借助各类传感器实时监控锅炉运行状态，一旦某项参数异常波动，及时发出预警信息；裂纹分析模块，整合数据分析算法、图形识别技术，深度剖析裂纹图像数据，精准判断裂纹类型、尺寸规格以及未来发展趋势等。在人工智能时代背景下，现阶段许多工厂已经建立了锅炉裂纹智能诊断技术，收集过往历史裂纹数据，建立 CNN、SVM 等分类模型，从而精准识别应力腐蚀、热疲劳以及蠕变裂纹等缺陷；基于数字孪生技术建立锅炉三维模型，模拟分析锅炉裂纹的发展路径、危害程度以及锅炉的使用寿命。

锅炉检验检测数据管理方面，分类存储，并且提供数据索引，输入关键词即可快速检测锅炉裂纹数据。例如，建立云平台数据库记录和存储检测数据、历史维修记录等；结合裂纹类型、尺寸和扩展速度，按照低、中、高划分具体风险等级，根据不同

等级确定最佳的检验周期；运用三维模型，可视化展示锅炉各类裂纹分布情况。

（三）严格把控锅炉容器质量

为了降低锅炉裂纹出现几率，延长锅炉设备的使用寿命，前期锅炉设备制造环节需要严格把控制造质量。根据锅炉设备类型、使用场景等情况，选购优质原材料，各类钢材、管材的力学性能指标满足国家标准。例如，锅炉承压元件制造中需要运用大量的钢材，应重点监测钢材中磷、硫、碳等元素含量，避免各项元素超标降低材料抗裂性能。原料进厂后抽样检测，使用拉伸试验以及光谱分析等手段，为每批次材料质量提供坚实保障。在锅炉制造环节，采用冷加工、焊接以及热处理等核心工艺，严格遵循工艺流程进行执行。例如，锅炉焊接环节，结合不同材料特性和厚度，选择适宜的焊接方法，合理化控制焊接电压、电流和焊接速度等参数，提高焊缝质量。部分冷加工部件应做好变形量控制，避免过度加工导致应力集中，有效规避裂纹风险。

（四）定期检验维护锅炉设备

企业应制定设备巡检计划，组织人员定期巡检锅炉设备运行状况。巡检人员使用测厚仪、测温仪等设备检测锅炉运行压力、水位、温度等指标，通过日常巡检检查锅炉是否有变形、泄漏、裂纹等缺陷。工作人员应重点检查焊缝、弯头以及接管等区域，此类区域属于容易出现裂纹区域，及时发现，并选择合理措施修复处理，避免裂纹恶化造成严重的安全事故。另外，根据技术标准定期检验锅炉运行状况，通常每年一次内部检验，间隔6年一次水压试验，及时发现锅炉是否存在潜在裂纹，组织技术人员及时、有效处置。

四、结论

综上所述，裂纹是锅炉运行中常见缺陷，如果裂纹处置不及时，可能诱发燃烧、爆炸、泄漏等安全事故，为企业带来重大经济损失与人员伤亡。因此，企业日常生产中应当提高锅炉检验检测力度，确定适宜的检验周期，优化检验检测流程，并根据实际工作要求选择不同的检验检测技术和设备，便于裂纹缺陷精准检出，为后续裂纹及时处置提供支持。通过锅炉裂纹有效处置，有助于保障锅炉运行安全、稳定，助推企业持续发展。

参考文献

- [1] 李建，张剑，陈昕，等. 母管制电站锅炉主蒸汽管道典型裂纹分析 [J]. 中国特种设备安全，2024，40 (11): 84-87+93.
- [2] 吴琦. 目视检测技术在锅炉管道裂纹检验中的应用 [J]. 设备管理与维修，2024，(08): 142-145.
- [3] 李孝梁，韩海江，魏民. 中心回燃卧式燃气锅炉前管板贯穿性裂纹损伤机理分析研究与处置 [J]. 工业锅炉，2024，(02): 56-59.
- [4] 吴超，朱承正. 锅炉、压力容器与压力管道裂纹及预防分析 [J]. 中国机械，2023，(06): 91-95.
- [5] 章捷. 锅炉压力容器裂纹的形成原因及预防措施探索 [J]. 中国设备工程，2022，(23): 179-181.
- [6] 吴祖利. 对于承压特种设备检验检测中裂纹问题的思考 [J]. 化学工程与装备，2022，(11): 266-267.
- [7] 刘召东，崔维刚，杨忠杰，等. 在用电站锅炉主蒸汽阀门安全隐患问题的探讨 [J]. 中国特种设备安全，2022，38 (08): 51-54.
- [8] 李波. 锅炉、压力容器、压力管道检验中的裂纹问题及预防 [J]. 新型工业化，2022，12 (02): 116-119.
- [9] 徐惠刚，周龙海. 燃气热水锅炉管板和烟管开裂原因分析及处理 [J]. 特种设备安全技术，2020，(05): 1-4.
- [10] 王欣. 锅炉、压力容器、压力管道检验中的裂纹问题解析 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2020，40 (14): 55-56.
- [11] 庄国华，张德超，孙磊. 电站锅炉主蒸汽管道中喷嘴流量计的检验检测方法探讨 [J]. 特种设备安全技术，2020，(03): 6-9+62.