

锅炉受热面焊缝超声检测在缺陷识别中的应用研究

凌源强

四川省冕宁县石龙镇双桥村1组76号 四川 冕宁 615601

【摘要】：锅炉受热面焊缝质量直接决定设备运行安全性，缺陷识别是焊缝质量管控的核心。超声检测凭借环保、灵敏、深度检测优势，成为焊缝缺陷检测的主流技术。本文分析锅炉受热面焊缝缺陷的形成特征与检测难点，优化超声检测系统与信号处理方法，构建精准识别方案，实现对典型缺陷的高效定性定位。研究通过实践验证，优化后的检测技术显著提升缺陷识别可靠性，为锅炉安全运行提供技术保障。

【关键词】：锅炉受热面；焊缝缺陷；超声检测；缺陷识别；无损检测

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.087

锅炉受热面长期承受高温高压工况，焊缝作为结构连接关键部位，缺陷易引发泄漏、爆炸等严重事故。传统检测技术存在精度不足、操作复杂等问题，难以满足现代工业对焊缝质量的严苛要求。超声检测因对内部缺陷敏感、无辐射污染等特点广泛应用，但在复杂焊缝结构中仍存在识别偏差、定性模糊等问题。开展超声检测的缺陷识别优化研究，突破技术瓶颈，对提升锅炉运行安全性、降低维护成本具有重要现实意义。

1 锅炉受热面焊缝缺陷检测瓶颈

锅炉受热面焊缝在焊接过程中，受焊接电流、电压、焊接速度等工艺参数波动，母材与焊材的成分匹配度、力学性能等材料特性差异，以及施工现场温湿度、粉尘污染等操作环境因素综合影响，易产生气孔、裂纹、未焊透、夹渣、未熔合等多种典型缺陷。不同缺陷的形成机制与演化规律各不相同，导致其形态特征、分布位置存在显著差异：气孔多为分散或密集的球形空穴，夹渣呈现不规则块状分布，而裂纹作为危害性极强的面状缺陷，易在高温高压工况的循环应力作用下持续扩展，从微观缝隙演变为宏观断裂，直接威胁锅炉结构完整性与运行安全。这些缺陷的多样性、复杂性及隐蔽性，给检测识别带来基础层面的挑战，需精准捕捉不同缺陷对应的特征信号，才能实现高效准确的识别。

超声检测技术基于超声波在介质中传播时的反射、折射与衰减特性实现缺陷探测，但其在锅炉受热面焊缝检测中面临诸多现实瓶颈。受热面焊缝涵盖对接、角接、T型接头等多种复杂形式，部分部位因设备结构限制导致检测空间狭小，探头与工件表面难以形成稳定耦合，不仅影响声能传导效率，还会造成声束传播路径偏移，无法全面覆盖焊缝关键区域，形成检测盲区。同时，焊缝余高的几何突变、表面飞溅物与氧化皮的存在，会产生伪缺陷反射信号，与真实缺陷信号相互叠加干扰，大幅增加误判风险。

传统超声检测依赖操作人员人工分析回波信号的幅值、波

形、相位等特征，识别结果受技能水平、经验积累与主观判断影响较大，不仅效率低下，还存在一致性差的问题。针对宽度微小的微观裂纹、深埋于焊缝内部或近母材区域的缺陷，传统检测方案中探头频率、聚焦深度等参数设置缺乏针对性，导致声束聚焦精度不足，缺陷反射信号微弱且易被背景噪声掩盖，难以有效捕捉，最终造成缺陷识别率偏低。这些技术瓶颈相互交织，严重限制了超声检测在锅炉受热面焊缝缺陷识别中的应用效果，亟需通过系统性的技术优化实现突破。

2 超声检测缺陷识别技术优化

针对检测瓶颈，首先聚焦超声检测系统硬件配置优化，核心采用相控阵超声检测技术，依托多晶片阵列探头的灵活调控特性，通过电子扫描技术实现声束角度的动态切换与聚焦深度的精准调节，可根据锅炉受热面焊缝的复杂结构（如对接接头、角接接头的不同形态）实时适配检测需求，确保声束能全面覆盖狭小空间、异形结构等传统检测难以触及的区域。相控阵系统搭载的二维成像功能，可将缺陷的空间形态、位置坐标以直观图像形式呈现，清晰区分缺陷与焊缝余高、结构突变等干扰因素，大幅减少人工分析回波信号时的主观误差，显著提升缺陷识别的直观性与判断准确性。

优化检测工艺参数与操作流程是提升识别精度的关键环节。结合锅炉受热面焊缝的管径规格、壁厚尺寸等核心结构参数，借助专业仿真模拟工具构建检测场景模型，反复迭代验证后确定适配的探头K值、耦合剂型号及检测入射角度，确保声束传播路径最优。检测前对焊缝表面进行系统化预处理，通过机械打磨清除飞溅物、氧化皮、锈蚀等杂质，再采用专用耦合剂均匀涂抹，强化探头与工件表面的贴合度，降低声能在传播过程中的损耗，保障信号传输质量。同时制定标准化操作流程，明确探头移动速度、扫描覆盖范围、信号采集频率等关键流程参数，从操作层面降低人为因素对检测结果的干扰。

引入智能信号处理算法进一步提升缺陷识别能力，通过专

业数据采集设备提取超声回波信号的时域峰值、频域主频、波形宽度等多维特征参数,构建涵盖气孔、裂纹、未焊透等典型缺陷的特征数据库。基于机器学习算法搭建缺陷识别模型,利用数据库样本进行模型训练与参数优化,使其能精准捕捉不同缺陷的信号差异,实现对各类缺陷的自动分类与定性判断。针对微小缺陷、弱信号缺陷易被干扰的问题,融合图像增强技术与自适应去噪算法,对检测图像进行降噪处理与特征强化,突出缺陷轮廓与细节信息,有效提升此类隐蔽性缺陷的识别率,弥补传统检测方法对弱信号捕捉不足的短板。

3 缺陷识别优化技术应用价值

将优化后的超声检测技术应用于多台不同型号、不同运行年限的锅炉受热面焊缝检测实践,通过系统性对比试验验证其实际应用效果。在针对高温高压工况下服役的锅炉设备检测中,该技术成功捕捉到传统检测方法易遗漏的微小裂纹、深埋于焊缝根部的未焊透等隐蔽性缺陷,缺陷识别覆盖范围显著扩大,识别率较传统技术大幅提升。相控阵系统的动态成像功能可清晰还原缺陷的三维形态、延伸方向及尺寸参数,配合智能算法对信号的精准筛选,有效排除焊缝余高

、表面杂质等产生的伪信号干扰,使误判率控制在极低水平,检测结果的可靠性显著增强。

优化技术的落地应用带来多重安全与经济效益。通过对焊缝缺陷的精准定位与定性,为维修方案制定提供科学依据,使修复工作更具针对性,从源头避免缺陷在工况应力作用下进一

步扩展,杜绝因焊缝失效引发的泄漏、爆炸等安全事故,保障锅炉机组长期稳定运行。同时,精准检测减少了不必要的拆检与过度维修,降低设备停机维护时间与耗材成本,避免无效检测造成的资源浪费,显著提升工业生产的连续性与整体经济性。此外,技术无辐射污染、操作便捷高效的特点,彻底改善了检测作业环境,保障检测人员职业健康,完全契合现代工业绿色安全、高效低碳的发展理念。该优化技术为锅炉行业焊缝质量检测提供了成熟可行的解决方案,其核心优化思路与技术配置方法具备较强的通用性,可顺利推广应用于压力容器、管道工程等其他工业领域的焊缝检测场景。检测过程中积累的海量缺陷特征数据、适配不同结构的参数配置经验,为超声检测技术的迭代升级提供了宝贵实践支撑,助力推动整个无损检测领域的技术创新与行业发展。

4 结语

锅炉受热面焊缝缺陷识别是保障设备安全运行的关键环节,超声检测技术在此领域具有不可替代的优势。通过深入分析检测瓶颈,从系统配置、工艺参数、信号处理等方面进行技术优化,有效提升了缺陷识别的准确性与效率。优化后的检测技术为锅炉行业焊缝质量控制提供了可靠支撑,助力降低安全风险、提升生产效益。未来,可结合人工智能、大数据技术进一步推动检测技术的智能化、自动化发展,开发适配更复杂工况的检测设备与算法模型,实现缺陷的实时监测与预测性维护,为工业设备安全运行提供更全面的技术保障。

参考文献:

- [1] 王强,李娟,张磊.相控阵超声检测技术在锅炉焊缝缺陷识别中的应用[J].无损检测,2025,47(2):35-41.
- [2] 刘敏,陈峰,王丽.锅炉受热面焊缝缺陷超声检测信号处理方法研究[J].工业安全与环保,2025,51(5):68-73.
- [3] 赵刚,黄丽,吴涛.超声检测仿真技术在焊缝缺陷检测中的优化应用[J].机械工程学报,2025,61(8):124-130.