

基于声发射技术的锅炉管道裂纹早期监测与寿命预测模型构建

张亚辉

宁夏银星发电有限责任公司 宁夏 银川 750000

摘要: 本文聚焦基于声发射技术的锅炉管道裂纹早期监测与寿命预测模型构建。阐述了声发射技术原理、检测系统组成及在工业检测中的应用现状。分析锅炉管道裂纹声发射信号的采集处理、特征提取及与裂纹类型的关系。设计裂纹监测算法,实现了监测系统并优化。对系统性能进行测试验证。构建基于材料损伤和可靠性理论的寿命预测模型,提出基于声发射信号的预测方法,并阐述了模型验证与改进策略,为锅炉管道安全运行提供支持。

关键词: 声发射技术; 锅炉管道; 裂纹监测; 寿命预测模型

1 声发射技术基础

1.1 声发射技术原理

声发射(AE)技术基于材料内部结构变化释放弹性波实现检测。当材料受外力或内部应力,发生塑性变形、裂纹扩展、相变等过程时,会以弹性波形式释放能量,此即声发射信号。从微观层面,晶格错位滑移、位错交互、裂纹尖端破裂等现象,均会引发能量释放并产生弹性波。声发射信号频率覆盖次声波到超声波频段,波形因材料特性、缺陷类型和产生机制而异。该技术通过捕捉弹性波信号,获取材料或结构内部损伤信息。相较于超声、射线等传统无损检测技术,声发射技术具有实时性与动态性,能在设备运行时及时监测内部损伤,为设备安全运行提供保障。

1.2 声发射检测系统的组成与工作原理

声发射检测系统主要由声发射传感器、前置放大器、信号处理器、数据采集卡和计算机等部分组成。声发射传感器是整个系统的关键部件,其作用是将弹性波信号转换为电信号。常用的声发射传感器为压电式传感器,它基于压电效应工作,当弹性波作用于传感器时,压电材料产生机械变形,进而在其表面产生电荷,实现了声-电信号的转换。前置放大器的作用是对传感器输出的微弱电信号进行放大,以提高信号的信噪比,并进行阻抗匹配,便于信号的长距离传输。信号处理器则对放大后的信号进行滤波、整形等处理,提取有用的信号特征。数据采集卡将模拟信号转换为数字信号,以便计算机进行存储、分析和处理。计算机通过相应的软件对采集到的数据进行分析,实现对声发射源的定位、信号特征提取以及损伤状态的评估^[1]。声发射检测系统的工作原理是:当材料内部产生声发射源时,弹性波向四周传

播,被布置在材料表面的声发射传感器接收。传感器将弹性波转换为电信号后,经过前置放大器放大、信号处理器处理,最终由数据采集卡采集并传输至计算机。计算机利用定位算法确定声发射源的位置,通过分析信号的特征参数,如幅值、频率、持续时间等,判断材料内部损伤的程度和类型。

1.3 声发射技术在工业检测中的应用现状

声发射技术在工业领域应用广泛。石油化工行业中,用于检测压力容器、管道的裂纹与腐蚀,监测设备在恶劣工况下的运行状态,如定位储罐底板缺陷。电力行业里,可监测发电机、变压器的局部放电,通过分析声发射信号判断绝缘材料老化与缺陷,预防设备故障。航空航天领域则用于飞行器结构健康监测,检测复合材料的分层、脱粘等缺陷。随着技术发展,声发射技术不断革新,新型传感器与先进算法提升了检测性能。但实际应用中仍面临挑战,复杂工业环境的噪声干扰,以及信号特征与缺陷类型对应关系不明确等问题,亟待进一步研究解决。

2 锅炉管道裂纹声发射信号特征分析

2.1 锅炉管道裂纹声发射信号的采集与处理

锅炉管道在高温、高压、高腐蚀等恶劣工况下运行,容易产生裂纹等缺陷。为采集锅炉管道裂纹产生的声发射信号,首先需要合理布置声发射传感器。通常根据锅炉管道的结构特点和可能出现裂纹的部位,采用阵列式布置方式,确保能够全面捕捉到声发射信号。传感器应与管道表面紧密耦合,以提高信号的传输效率。采集到的声发射信号中往往包含大量的噪声,因此需要对信号进行处理。常用的信号处理方法包括滤波、降噪和信号增强等。滤波可以采用带通滤波器,根据声发射信

号的频率范围,去除低频和高频噪声干扰;降噪技术如小波降噪,能够有效地抑制随机噪声,保留有用信号;信号增强方法则可以提高微弱信号的可检测性,便于后续的特征提取和分析。

2.2 裂纹声发射信号的特征提取

裂纹声发射信号的特征提取是分析裂纹状态的关键步骤。常见的特征参数包括幅值、频率、持续时间、能量等。幅值反映了声发射信号的强度,一般来说,裂纹扩展越剧烈,产生的声发射信号幅值越高;频率特性可以揭示声发射源的物理机制,不同类型的裂纹产生的声发射信号频率分布存在差异;持续时间表示信号从产生到消失的时间长度,与裂纹扩展的过程相关;能量参数则综合考虑了信号的幅值和持续时间,能够更全面地反映裂纹释放的能量大小。除了这些传统的特征参数,近年来,一些先进的特征提取方法也被应用于裂纹声发射信号分析,如时频分析方法(短时傅里叶变换、小波变换等)、高阶统计量分析方法等。时频分析方法可以同时展示信号在时域和频域的特征,清晰地呈现信号频率随时间的变化情况,有助于分析裂纹动态扩展过程;高阶统计量分析方法则能够提取信号的非线性特征,对于复杂裂纹信号的分析具有独特优势。

2.3 裂纹类型与声发射信号特征的关系

不同类型的裂纹在产生和扩展过程中,产生的声发射信号特征存在明显差异。例如,疲劳裂纹是在交变应力作用下逐渐形成和扩展的,其声发射信号通常具有周期性,且在裂纹扩展初期,信号幅值较小,随着裂纹的不断扩展,幅值逐渐增大;应力腐蚀裂纹是在应力和腐蚀介质共同作用下产生的,声发射信号表现出低频、连续的特点,且信号强度与腐蚀程度和应力水平相关^[2]。通过大量的实验和实际检测数据积累,建立裂纹类型与声发射信号特征的对应关系数据库,对于准确判断裂纹类型和评估裂纹状态具有重要意义。在实际检测中,根据采集到的声发射信号特征,与数据库中的典型特征进行对比分析,即可推断出锅炉管道裂纹的类型和发展阶段,为后续的维修和维护决策提供依据。

3 基于声发射技术的锅炉管道裂纹早期监测方法

3.1 裂纹监测算法设计

为实现锅炉管道裂纹的早期精准监测,设计一套行之有效的监测算法至关重要。基于声发射信号的裂纹监测算法通常涵盖信号特征提取、模式识别和异常检测等多个关键部分。在信号特征提取环节,传统方法往往依赖于人工选取的特征参数,如幅值、能量等,但这些特征可能无法全面反映信号的复杂特性。为弥补这

一不足,可结合深度学习方法,尤其是卷积神经网络(CNN)。CNN具有强大的自动特征学习能力,它能够从原始的声发射信号数据中自动挖掘深层次的特征信息,这些特征更能体现信号与裂纹之间的内在联系,为后续的准确分析提供有力支持。模式识别部分承担着将提取到的特征向量进行分类的重要任务,以判断管道是否存在裂纹以及裂纹的具体类型。支持向量机(SVM)和人工神经网络(ANN)是常用的分类算法。SVM能够在高维空间中寻找最优分类超平面,具有良好的泛化能力;ANN则通过模拟人脑神经元的工作方式,对复杂的非线性关系进行建模。异常检测算法则聚焦于实时监测声发射信号的变化情况。一旦检测到信号特征偏离正常状态,系统将及时发出预警。

3.2 监测系统的实现与优化

基于声发射技术的锅炉管道裂纹监测系统的实现,需要巧妙地将硬件设备和软件算法进行有机结合。在硬件方面,选择性能优良的声发射传感器、前置放大器和数据采集卡是确保信号准确采集和传输的关键。声发射传感器需具备高灵敏度和宽频带特性,以捕捉到微弱的裂纹信号;前置放大器则用于放大传感器输出的微弱信号,提高信噪比;数据采集卡要具备高采样率和足够的存储容量,以满足对大量信号数据的实时采集需求。在软件方面,开发友好的人机交互界面是提升用户体验的重要举措。该界面应实现信号采集、处理、分析和显示的一体化操作,方便操作人员实时掌握管道的运行状态。为提高监测系统的性能,还需对系统进行全面优化^[3]。一方面,通过合理调整传感器的布置位置和数量,优化信号采集方案,能够提高声发射源定位的准确性,为后续的裂纹定位提供可靠依据。另一方面,对软件算法进行优化,采用并行计算、分布式处理等技术,可显著提高数据处理的速度和效率,实现对大量声发射信号的实时分析和处理,确保系统能够及时响应裂纹的出现。

3.3 监测系统的性能测试与验证

在监测系统开发完成后,对其进行全面的性能测试与验证是确保系统可靠性和有效性的关键环节。性能测试主要包括系统的灵敏度、准确性、可靠性和实时性等方面。灵敏度测试通过在实验室环境下对模拟裂纹样本进行检测来实现。通过改变裂纹的类型和尺寸,评估系统对不同情况的检测能力,从而确定系统的灵敏度水平。准确性验证则将监测系统的检测结果与其他无损检测方法(如超声检测)的结果进行对比。超声检测作为一种成熟的无损检测技术,具有较高的准确性,通过与超声检测结果的对比,可以客观地评估监测系统的准确

性。可靠性和实时性评估则需要在实际工业现场进行长期运行测试。在实际工业环境中,管道面临着复杂的工作条件,如高温、高压、振动等,这些因素都可能对监测系统的性能产生影响。通过长期运行测试,观察系统在复杂环境下的运行情况,及时发现并解决可能出现的问题。根据测试结果,对监测系统进一步的改进和完善,确保系统能够满足锅炉管道裂纹早期监测的实际需求,为锅炉的安全运行提供有力保障。

4 锅炉管道寿命预测模型的构建

4.1 寿命预测模型的理论基础

锅炉管道寿命预测模型的构建紧密依托材料损伤理论和可靠性理论两大基石。材料损伤理论指出,在服役过程中,管道持续承受内压、热应力、机械振动等载荷,同时遭受高温、腐蚀介质等环境因素侵蚀,致使材料内部微观结构逐渐劣化,损伤不断累积。当损伤程度突破临界阈值,管道便会发生失效。常见的线性累积损伤模型假定损伤随时间或载荷线性叠加,适用于简单应力工况;而非线性累积损伤模型则考虑了载荷交互、环境耦合等复杂因素,更贴合实际工况。可靠性理论从概率统计角度出发,对锅炉管道在不同工作条件下的可靠度进行评估。通过建立寿命分布函数,如指数分布常用于描述恒定失效率的设备寿命,威布尔分布能灵活拟合多种失效模式,来刻画管道寿命的统计特性。借助对管道失效概率的量化分析,可预测其在未来特定时间段内的剩余寿命,为设备维护决策提供重要的理论支撑。

4.2 基于声发射信号的寿命预测方法

基于声发射信号的锅炉管道寿命预测,需系统性地分析信号特征与管道损伤程度的内在联系,进而构建精准的预测模型。首先,依托大量实验室模拟实验与现场实际检测数据,深入探究声发射信号特征参数,如能量、幅值、频率等,与管道裂纹长度、扩展速率之间的定量关系。例如,裂纹快速扩展时,声发射信号能量会显著跃升,通过建立两者的数学关联,可直观反映裂纹发展状况。随后,融合材料损伤理论和可靠性理论,将声发射信号特征参数深度嵌入寿命预测模型。运用灰色预测模型,能基于少量数据挖掘裂纹扩展规律;采用神经网络预测模型,可凭借强大的非线性拟合能力,处理复杂工况下的信号特征。同时充分考量温度、腐蚀介质

浓度等环境因素对管道寿命的影响,动态修正模型参数,实现对管道裂纹未来扩展趋势的精准预测,从而科学估算管道的剩余寿命。

4.3 寿命预测模型的验证与改进

寿命预测模型构建完成后,验证与改进是确保其准确性和可靠性的关键环节。将模型预测结果与长期积累的实际运行数据进行细致比对,从多个维度评估模型的预测精度,如裂纹扩展速率预测误差、剩余寿命预测偏差等^[4]。若出现较大偏差,需深入剖析原因,可能涉及模型假设与实际工况脱节、输入参数测量误差、未涵盖关键影响因素等。针对上述问题,多维度对寿命预测模型进行改进。调整模型结构,优化算法参数,提升模型对复杂工况的适应性;引入新的影响因素,如管道安装应力、介质流动状态等,完善模型输入体系;采用更先进的预测算法,如集成学习算法,综合多个模型优势,提高预测准确性。通过持续的验证与迭代改进,使寿命预测模型能够精准预判锅炉管道的剩余寿命,为设备的科学维护和合理更换提供坚实的科学依据,保障锅炉系统安全、稳定运行。

结束语

本文围绕声发射技术在锅炉管道裂纹监测与寿命预测中的应用展开研究,从技术原理、信号分析到监测系统构建与寿命预测模型设计,形成了一套较为完整的体系。通过实验与实际数据验证,所提方法和模型展现出一定的有效性和可靠性。然而,实际工业环境复杂多变,未来仍需进一步深入研究,不断优化监测算法和寿命预测模型,提高其适应性和准确性,以更好地保障锅炉管道的安全稳定运行,降低事故风险。

参考文献

- [1]张翼,李延兵,张军亮,等.电厂锅炉管道位移应力模拟与试验研究[J].传感技术学报,2023,36(12):1900-1907.
- [2]邱燕飞,李瑞宇,蔡琼珂,等.电厂锅炉管道堵阀裂纹缺陷的数值模拟仿真研究[J].冶金能源,2019,38(05):20-23.
- [3]蔡斌.基于激光超声波技术的锅炉管道裂纹检测分析[J].机械管理开发,2025,40(2):257-258,261.
- [4]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(8):142-145.