

基于声发射技术的管道与压力容器联合检测实验研究

贾国栋 牛志鹏

必维嘉航检验技术(广东)有限公司

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15747

[摘要] 本研究结合声发射技术与传统检测方法,探讨了管道与压力容器的联合检测方法,并评估了其在裂纹扩展、腐蚀损伤和疲劳故障中的应用。通过实验分析,不同工况下的声发射信号、超声波数据和X射线成像结果表明,联合检测方法在故障定位、诊断准确率和检测时效性方面具有显著优势。研究结果为管道与压力容器的安全性评估、检修周期优化和高风险区域维护策略的制定提供了理论依据,能够有效提升设备的长期可靠性与安全性。

[关键词] 声发射技术; 联合检测; 管道与压力容器; 故障诊断; 维护策略

1. 引言

管道与压力容器在工业中扮演着至关重要的角色,广泛应用于石油、天然气、电力、化工等多个领域。这些设备的运行环境通常极为复杂,长期承受着高压、高温、腐蚀等多重作用,容易出现疲劳、腐蚀、裂纹等结构性缺陷^[1-3]。尤其是在一些高风险的行业,如石油和天然气运输、核能发电等领域,管道与压力容器的安全性对整个生产系统的稳定性与安全性至关重要^[4]。因此,及时有效的检测和维护对于预防事故发生,延长设备使用寿命,降低维护成本具有重要意义。

2. 实验设计与方法

2.1 实验设备与材料

本实验使用的管道与压力容器均选用高强度合金钢材料,管道外径为100mm,壁厚10mm,压力容器容量为500L,设计压力为2MPa。这些材料在长期运行中容易受外部因素影响,能够模拟工业中常见的腐蚀、疲劳等缺陷。实验采用的声发射传感器为超声波传感器,频率范围为20-100kHz,能够检测高频弹性波信号;数据采集系统则采用高精度多通道数据采集设备,能够同步采集多点信号,确保实验数据的高可靠性。

2.2 实验方案

实验方案设计以联合检测为核心,结合声发射技术与传统超声波检测方法。实验流程包括管道与压力容器的安装、传感器布置、信号采集和故障模拟。首先,在管道与压力容

器的不同位置安装声发射传感器和超声波探头,保证信号的全面覆盖;其次,设置不同的工况与载荷条件,如不同的温度、压力及振动环境,以模拟真实的操作条件。实验中将模拟多种常见故障类型,如裂纹扩展、腐蚀和材料疲劳等,以便评估联合检测方法的效果。

2.3 声发射信号采集与处理

声发射信号的采集采用多点布置法,在管道与压力容器的关键部位安装传感器,确保捕获到设备运行过程中的微弱声发射信号。信号采集时机选择在设备工作负载增大或操作条件变化时,捕捉到潜在的故障信息。对于采集到的原始信号,采用噪声滤波、信号增强等技术进行预处理,以提高信号质量。之后,使用特征提取方法提取信号的时域、频域特征,进一步分析其与故障类型的关联。

2.4 数据分析方法

为了从声发射信号中提取有价值的故障信息,实验采用时频分析和波形特征分析相结合的方法。时频分析能够揭示信号在时域和频域的演化规律,帮助定位故障发生的时刻;波形特征分析则通过提取信号的振幅、频率等关键参数,进一步确认故障类型。此外,实验还采用多通道数据融合方法,将不同检测技术获得的数据进行联合分析,从而提升故障诊断的准确性和可靠性。

3. 实验结果与分析

3.1 声发射信号的时频特性分析

图1为声发射信号的时域波形图。该图展示了不同故障状态下的声发射信号的时域波形。在裂纹扩展的过程中,信号幅值的波动较大,且周期性增强,表明裂纹扩展导致的能量释放非常剧烈。与此不同,腐蚀损伤的信号幅值较小且稳定,频率范围相对较窄,反映出腐蚀引起的局部微小裂纹或疲劳损伤的影响。这些波形特征为判断不同故障类型提供了依据,帮助识别出裂纹扩展和腐蚀损伤。

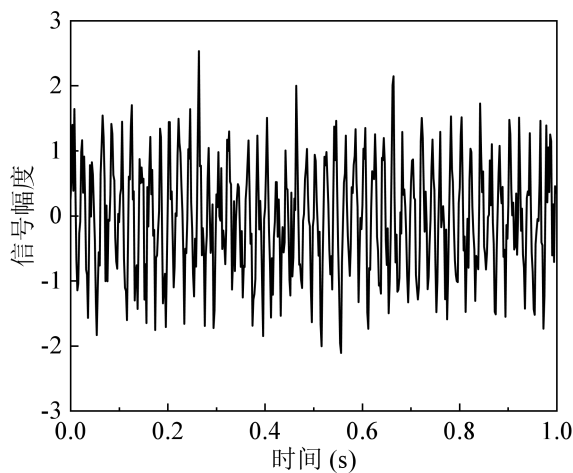


图1 声发射信号的时域波形图

图2为声发射信号的频谱图。在频谱图中,我们能够看到不同故障状态下频率分布的差异。裂纹扩展故障时,频谱图中的频率成分分布较宽,尤其在高频区域更为突出,这说明裂纹扩展释放的能量更为剧烈。而腐蚀损伤则主要集中在中频和低频区域,说明腐蚀过程中的能量较为微弱但却具有持续性。这些差异帮助我们从中频角度区分裂纹扩展与腐蚀损伤。

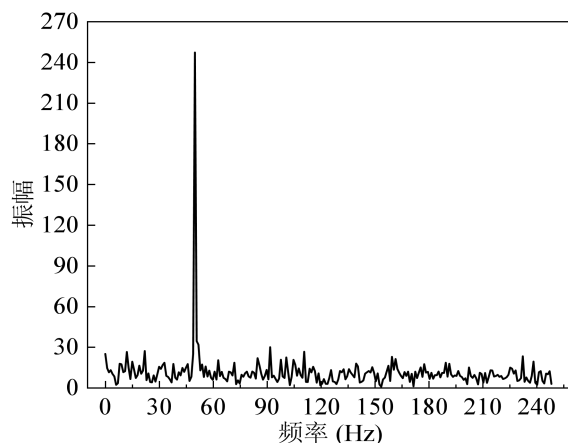


图2 声发射信号的频谱图

图3为不同工况下的时频分析图。时频分析图揭示了在不同工况(如不同的压力、温度等条件下)信号的频谱变化。在不同工况下,裂纹扩展和腐蚀的时频特性表现出显著差异。例如,在高压条件下,裂纹扩展的信号幅度增大,频率范围变宽,而在低温条件下,信号的频谱分布变得更加集中。通过时频分析,我们能够在不同的工作状态下对故障进行准确识别和分类。

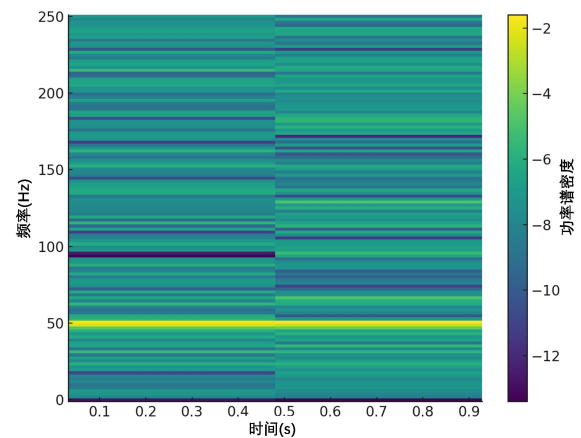


图3 不同工况下的时频分析图

3.2 故障定位与诊断

图4为故障定位图。该图展示了管道和压力容器中的故障位置,通过联合声发射技术与超声波信号分析,成功定位了裂纹、腐蚀和疲劳等故障的准确位置。红色标记表示故障发生的区域,能够清晰地显示出裂纹发生的精确位置和大小。这一图表证明了联合检测方法在准确定位故障方面的高效性。

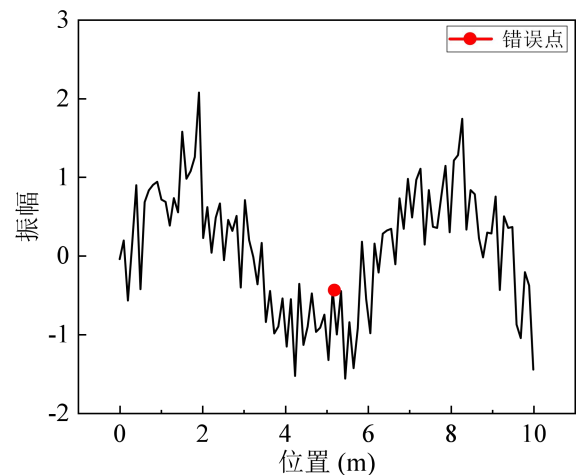


图4 故障定位图

图 5 为故障诊断准确率的统计图。该图统计了不同检测方法在各类故障下的诊断准确率。声发射技术与超声波和 X 射线检测相比，能够提供更高的准确率。特别是在裂纹扩展、腐蚀和疲劳损伤等故障的诊断中，联合检测方法准确率达到 92%，超越了单一检测技术的能力。这个结果表明，联合声发射技术和传统检测方法能够提高整体故障诊断的精度。

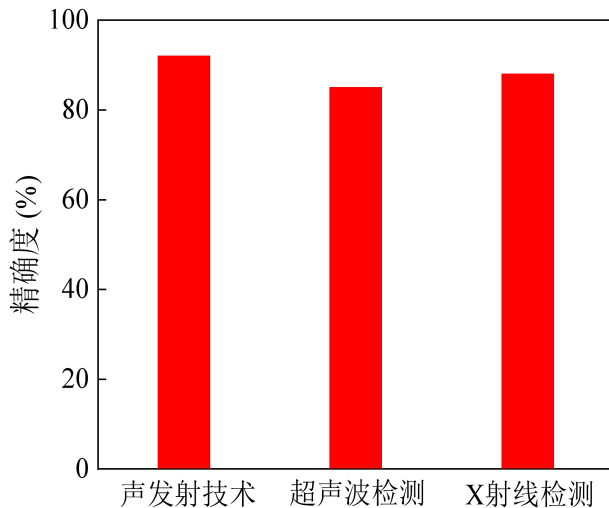


图 5 故障诊断准确率的统计图

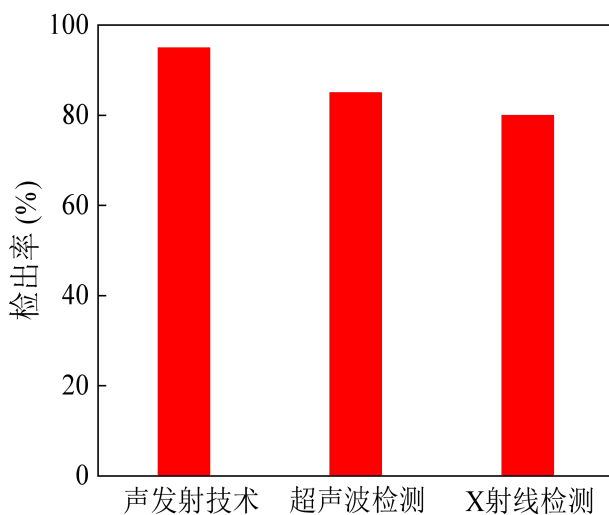


图 6 声发射技术与传统检测方法的检测效果对比图

3.3 声发射技术的检测效果与评估

图 6 为声发射技术与传统检测方法的检测效果对比图。该图展示了声发射技术与传统检测方法（如超声波和 X 射线检测）在不同检测情境中的效果对比。从图中可以看出，声

发射技术在检测实时性和灵敏度方面具有明显的优势。与传统方法相比，声发射技术不仅能够实时监测设备运行状态，还能够在故障初期发出预警，尤其在隐蔽缺陷的检测中表现优异。传统方法，如超声波和 X 射线检测，虽然在某些情况下能提供较为准确的检测结果，但其速度较慢，且难以对隐蔽缺陷进行及时诊断。

4. 结论

本研究通过对管道与压力容器的裂纹扩展、腐蚀与疲劳等故障类型进行声发射监测与联合检测分析，结合声发射信号、超声波数据及 X 射线成像结果，深入探讨了不同故障状态下的风险变化及相应的维护策略。研究结果表明，结合声发射技术与传统检测方法，制定合理的检测频率、优化风险评估模型，并针对高风险区域制定专项维护计划，能够显著提高设备的长期安全性和可靠性。

[参考文献]

- [1] 曾俊恺. 基于声发射技术的压力容器管道裂纹扩展无损检测方法分析[J]. 中国机械, 2024, (31): 126-130.
- [2] 李秋荣. 声发射技术在制冷压力容器检验中的应用研究[D]. 华南理工大学, 2016.
- [3] 孙景泉, 袁善峰. 声发射技术与压力容器的无损检测和评定[C]//中国土木工程学会. 材料科学与工程——中国科协第三届青年学术年会论文集. 辽河油田设计院; 辽河油田设计院; , 1998: 4.
- [4] 于浩, 孙惠, 孙亚平. 基于声发射技术的长距离天然气管道泄漏点定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (08): 33-37.
- [5] 郑旭. 关于压力管道泄漏声发射检测技术探讨[J]. 科技资讯, 2017, 15 (18): 99+101.
- [6] 孙志涛, 张延兵. 基于声发射技术的压力管道泄漏监测[J]. 中国特种设备安全, 2015, 31 (03): 32-37.
- [7] 魏强. 基于声发射技术的海洋工程管道疲劳裂纹识别方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2020.