

化工管道腐蚀泄漏监测中声发射技术的应用效果与改进方案研究

黄 飞

潞安化工丰喜集团临猗分公司 山西 运城 044100

摘 要：化工管道的安全运行对化工生产至关重要，腐蚀泄漏是化工管道面临的主要安全隐患之一。声发射技术作为一种有效的无损检测手段，在化工管道腐蚀泄漏监测中具有广泛应用。本文深入探讨了声发射技术在化工管道腐蚀泄漏监测中的应用效果，分析了该技术在实际应用中存在的问题，并针对性地提出了改进方案，旨在提高声发射技术对化工管道腐蚀泄漏监测的准确性和可靠性，保障化工生产的安全稳定进行。

关键词：化工管道；腐蚀泄漏；声发射技术；应用效果；改进方案

1 引言

化工行业中，管道作为输送各种化工原料、中间产品和成品的关键设施，其运行状况直接关系到生产的连续性和安全性。然而，由于化工管道长期处于复杂的化学、物理环境中，容易受到腐蚀作用，导致管道壁厚减薄、穿孔甚至泄漏，引发严重的安全事故和环境污染问题。因此，及时、准确地监测化工管道的腐蚀泄漏情况，对于预防事故发生、降低损失具有重要意义。声发射技术是一种动态无损检测技术，它通过检测材料或结构内部因缺陷扩展、变形等产生的弹性波信号（即声发射信号），来评估材料或结构的完整性。与传统的无损检测方法相比，声发射技术具有实时监测、能够检测动态缺陷、对线性缺陷敏感等优点，非常适合应用于化工管道腐蚀泄漏监测领域。近年来，随着传感器技术、信号处理技术和计算机技术的不断发展，声发射技术在化工管道腐蚀泄漏监测中的应用也日益广泛和深入。但在实际应用过程中，该技术仍面临一些挑战，需要进一步研究和改进。

2 声发射技术原理

2.1 声发射现象

当材料或结构受到外力作用（如压力、拉力、振动等）或内部发生物理、化学变化（如腐蚀、相变等）时，其内部储存的能量会以弹性波的形式快速释放出来，这种现象称为声发射。例如，在化工管道中，当管道壁因腐蚀而出现裂纹扩展或发生泄漏时，就会产生声发射信号。这些信号从声发射源向四周传播，通过安装在管道表面的传感器可以接收并转化为电信号，进而进行后续的分析和处理。

2.2 声发射检测原理

声发射检测系统主要由声发射传感器、前置放大

器、信号采集与处理系统以及数据分析软件等部分组成。声发射传感器的作用是将接收到的弹性波信号转换为电信号，前置放大器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。信号采集与处理系统则对放大后的信号进行采集、数字化处理，并提取相关特征参数，如信号幅度、能量、上升时间、振铃计数等。数据分析软件根据提取的特征参数，结合一定的算法和判断，对声发射源的性质（如是否为腐蚀泄漏源）、位置和严重程度等进行评估和判断。

3 声发射技术在化工管道腐蚀泄漏监测中的应用效果

3.1 腐蚀泄漏监测能力

3.1.1 泄漏检测：声发射技术对化工管道的泄漏具有较高的检测灵敏度。当管道发生泄漏时，流体从泄漏处喷射而出，与管道壁及周围介质相互作用，产生强烈的声发射信号。通过合理布置声发射传感器，可以有效地捕捉到这些泄漏信号。研究表明，声发射技术能够检测到微小的泄漏，对于一些早期的、尚未造成明显介质损失的泄漏情况也能够及时发现，为管道的维修和维护争取了宝贵的时间。例如，在某化工企业的管道监测项目中，声发射系统成功检测到了管道上一处直径仅为0.5mm的泄漏孔，避免了泄漏进一步扩大可能引发的严重事故。

3.1.2 腐蚀监测：化工管道的腐蚀过程也会伴随声发射信号的产生。在腐蚀初期，金属表面发生电化学反应，产生微小的气泡和局部应力变化，这些微观过程会引发微弱的声发射信号。随着腐蚀的发展，腐蚀坑逐渐形成并扩展，声发射信号的强度和频率也会相应增加。通过对声发射信号的长期监测和分析，可以了解管道的腐蚀发展趋势，评估管道的剩余寿命。例如，通过对一段运行多年的化工碳钢管道进行声发射监测，发现

其声发射信号的能量和振铃计数随着时间逐渐上升,结合其他检测手段(如壁厚测量),判断该管道存在较为严重的腐蚀情况,需要及时修复或更换。

3.2 定位精度

在化工管道腐蚀泄漏监测中,准确确定泄漏源或腐蚀部位的位置对于维修工作至关重要。声发射技术可以通过多种定位方法实现对声发射源的定位。常用的定位方法有线性定位、平面定位和空间定位等。线性定位适用于管道等线状结构,它基于声发射信号在管道中的传播速度已知,通过测量不同传感器接收到信号的时间差,利用几何原理计算出声发射源在管道上的位置。例如,在一条直线段管道上安装两个声发射传感器,当管道发生泄漏产生声发射信号时,两个传感器接收到信号的时间不同,设信号传播速度为 v ,时间差为 Δt ,那么泄漏源到两个传感器的距离差为 $v\Delta t$,结合传感器的安装位置信息,就可以确定泄漏源的位置。实际应用中,通过合理布置多个传感器组成传感器阵列,并采用先进的定位算法,可以进一步提高线性定位的精度,一般能够将定位误差控制在较小范围内,满足工程实际需求。平面定位和空间定位则适用于更为复杂的管道结构或大面积的腐蚀监测区域。平面定位通过在平面上布置多个传感器,利用信号到达不同传感器的时间差或信号强度等信息,采用三角定位等算法确定声发射源在平面内的坐标。空间定位则在此基础上,增加了对传感器空间位置的考虑,能够确定声发射源在三维空间中的位置。这些定位方法在大型化工装置的管道网络监测中发挥着重要作用,能够帮助维修人员快速准确地找到需要处理的问题部位^[1]。

4 声发射技术在应用中存在的问题

4.1 噪声干扰

在化工生产现场,存在着大量的噪声源,如机械设备的运转声、流体的流动声、电磁干扰等,这些噪声会对声发射信号产生干扰,导致监测结果的准确性下降。噪声干扰主要表现为两种形式:一种是与声发射信号频率相近的噪声,它会掩盖声发射信号,使信号难以识别和提取;另一种是强度较大的噪声,可能会使声发射传感器饱和,无法正常工作。例如,在一个靠近大型压缩机的化工管道监测项目中,压缩机运行产生的强烈机械噪声严重干扰了声发射信号的采集,导致监测系统频繁出现误报警,无法准确判断管道是否存在腐蚀泄漏情况。

4.2 信号衰减

声发射信号在管道中传播时,会随着传播距离的增加而逐渐衰减。信号衰减的程度与管道材料、管径、介质以及传播路径等因素有关。在长距离管道或复杂管道

结构中,信号衰减问题更为突出。当声发射源距离传感器较远时,信号经过长距离传播后到达传感器时可能已经变得非常微弱,甚至淹没在噪声中,导致无法被有效检测到。这就限制了声发射技术在一些大型化工装置中对远距离管道或复杂管道网络的监测能力。例如,在一条长达数公里的化工输送管道中,由于信号衰减,位于管道末端的传感器难以接收到来自管道起始端附近腐蚀泄漏源产生的声发射信号,影响了对整个管道的全面监测^[2]。

4.3 传感器布置

传感器的合理布置是保证声发射监测效果的关键因素之一。然而,在实际应用中,由于化工管道的结构复杂、安装空间有限以及现场环境恶劣等原因,传感器的布置往往存在困难。如果传感器布置不合理,可能会导致部分区域监测不到声发射信号,出现监测盲区;或者传感器之间的距离过大,无法准确进行声发射源定位。例如,在一些具有多层保温层或障碍物遮挡的化工管道上,难以找到合适的位置安装传感器,即使安装了传感器,也可能因为保温层或障碍物对信号的阻挡和干扰,影响监测效果。

5 声发射技术的改进方案

5.1 抗噪声干扰措施

5.1.1 硬件滤波:在声发射检测系统的前端,即传感器与前置放大器之间,增加硬件滤波器,如低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等。根据化工现场噪声的频率特性,选择合适的滤波器参数,对输入的信号进行初步滤波,去除噪声信号中频率与声发射信号差异较大的部分。例如,如果已知现场主要噪声源的频率集中在低频段,可采用高通滤波器,将低频噪声滤除,保留高频的声发射信号,提高信号的信噪比。

5.1.2 软件降噪算法:利用先进的软件降噪算法对采集到的声发射信号进行处理。常见的软件降噪算法有小波降噪、自适应滤波等。小波降噪算法通过对信号进行小波变换,将信号分解到不同的频率尺度上,然后根据噪声和信号在不同尺度上的特性差异,对小波系数进行处理,去除噪声对应的小波系数,再通过小波逆变换重构信号,达到降噪的目的。自适应滤波算法则是根据输入信号的统计特性,自动调整滤波器的参数,使滤波器的输出能够最佳地逼近原始信号,从而有效地抑制噪声干扰。例如,在实际应用中,将自适应滤波算法应用于声发射信号处理,能够实时跟踪噪声的变化,动态调整滤波参数,有效降低噪声对声发射信号的影响。

5.2 信号增强与补偿

5.2.1 信号放大技术:在声发射信号传播路径上,增

加信号放大器,对信号进行适当放大,以补偿信号在传播过程中的衰减。选择具有低噪声、高增益的放大器,并合理设置放大器的增益参数,避免信号放大过程中引入过多的噪声。例如,在长距离管道监测中,每隔一定距离安装一个信号放大器,对声发射信号进行逐级放大,确保信号在传播到传感器时仍具有足够的强度,能够被有效检测和识别^[4]。

5.2.2 信号补偿算法:基于管道材料、管径、介质等参数以及信号传播距离等信息,建立声发射信号衰减模型。利用该模型对采集到的信号进行补偿计算,根据信号衰减规律,反推声发射源处的原始信号强度和特征。例如,通过实验测试和理论分析,建立了某一类型化工管道的声发射信号衰减模型,在实际监测过程中,将传感器采集到的信号代入模型中进行补偿计算,得到更接近声发射源真实情况的信号特征,提高了对远距离声发射源的监测能力^[3]。

5.3 优化传感器布置策略

5.3.1 基于模型的传感器布置优化:利用有限元分析等数值模拟方法,建立化工管道的声发射传播模型。通过模拟不同位置的声发射源产生的信号在管道中的传播情况,分析传感器在不同布置方案下对声发射信号的检测能力和定位精度,从而优化传感器的布置方案。例如,针对一个复杂的化工管道网络,利用有限元软件建立模型,模拟了多种传感器布置方案,通过对比分析模拟结果,确定了最优的传感器布置方案,使传感器能够全面覆盖管道网络,减少监测盲区,同时提高了声发射源的定位精度。

5.3.2 考虑现场实际情况的灵活布置:在实际工程中,充分考虑管道的结构特点、安装空间、现场环境等因素,灵活调整传感器的布置方式。对于一些难以直接安装传感器的部位,采用间接安装方式,如通过安装信号转接装置等,将声发射信号传递到合适位置的传感器上。对于具有多层保温层的管道,可以在保温层上开设专门的传感器安装孔,并采取密封和防护措施,确保传感器能够正常工作且不影响管道的保温性能。例如,在某化工装置中,针对部分管道被大型设备遮挡无法直接安装传感器的情况,采用了信号转接杆,将声发射信号从遮挡部位引导到可安装传感器的位置,实现了对这些管道的有效监测。

5.4 提高数据分析与解读能力

5.4.1 开发智能化分析软件:利用人工智能技术,如机器学习、深度学习等,开发智能化的声发射信号分析软件。通过大量的已知样本数据(包括正常管道运行

时的声发射信号以及不同类型、不同程度的腐蚀泄漏声发射信号)对模型进行训练,使软件能够自动学习和识别声发射信号的特征,准确判断声发射源的性质、位置和严重程度。例如,采用深度学习中的卷积神经网络(CNN)算法,构建声发射信号分类模型,对大量的声发射信号样本进行训练,模型能够自动提取信号中的关键特征,实现对管道腐蚀泄漏信号的准确分类和识别,大大提高了数据分析的准确性和效率。

5.4.2 建立标准数据库与专家系统:建立化工管道声发射监测的标准数据库,收集和整理不同类型化工管道在各种工况下的声发射信号数据及其对应的管道状态信息(如是否存在腐蚀泄漏、腐蚀泄漏的类型和程度等)。同时,开发专家系统,将行业内专家的经验 and 知识以规则的形式融入到系统中。在实际数据分析过程中,软件可以将采集到的声发射信号与标准数据库中的数据进行对比,并结合专家系统的规则进行推理和判断,为操作人员提供准确的分析结果和决策建议。例如,当监测系统采集到一组声发射信号后,分析软件首先在标准数据库中查找相似的信号模式,然后利用专家系统中的规则对信号进行进一步分析,最终给出管道的状态评估报告和相应的处理建议。

6 结束语

声发射技术作为一种有效的化工管道腐蚀泄漏监测手段,在实际应用中已经取得了一定的成果,能够对管道的泄漏和腐蚀情况进行检测、定位和实时监测,为保障化工管道的安全运行发挥了重要作用。然而,该技术在应用过程中仍然面临噪声干扰、信号衰减、传感器布置困难以及数据分析与解读复杂等问题。通过采取一系列的改进方案,如抗噪声干扰措施、信号增强与补偿方法、优化传感器布置策略以及提高数据分析与解读能力等,可以有效提高声发射技术在化工管道腐蚀泄漏监测中的性能和可靠性。未来,随着相关技术的不断发展和完善,声发射技术有望在化工管道安全监测领域发挥更加重要的作用,为化工行业的安全生产提供更有力的支持。

参考文献

- [1]高艳丽.管道泄漏噪声信号振幅失真对相关检漏法性能影响的研究[J].声学学报,2019,44(5):682-690.
- [2]刘光晓,张东.基于快速独立成分分析的输气泄漏声波信号分离滤波[J].中国测试,2018,44(12):137-142.
- [3]宁方立,王爽.改进卷积神经网络在管道泄漏超声信号识别中的应用[J].仪器仪表学报,2020,41(2):186-194.
- [4]孟庆旭.基于残差收缩网络的管道小泄漏声发射信号识别[J].振动与冲击,2021,40(10):223-229.