

新型柔性压电薄膜在管道泄漏检测中的应用

何佳霖^{1,2}, 马登龙^{1,2}, 覃荣卓^{1,2}, 张广森^{1,2}, 解云川³, 高建民^{1,2}, 张早校⁴

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学化学学院, 710049, 西安; 4. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统固体压电陶瓷式压电探头安装结构复杂、响应频率范围窄、对于复杂曲面不适应等缺点导致的在管道泄漏检测中灵敏度不高、检测范围较近等问题,提出一种采用新型柔性压电薄膜作为声发射传感器的管道泄漏检测方法。首先,将偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物 P(VDF-TrFE) 高分子柔性压电薄膜与传统压电陶瓷式、空气耦合式 3 种传感器布置于管道表面;然后,采用软硬件结合的方式采集不同状态下的管道壁面信号;最后,通过 FFT 等时频域信号处理算法对采集信号进行分析处理,通过时域和频域波形特征判断管道泄漏状态。实验结果表明:在泄漏信号响应方面,新型 P(VDF-TrFE) 柔性压电薄膜相比传统压电陶瓷式传感器表现出了更高的灵敏度和更大的响应值,能够检测出更小的泄漏,且该类型传感器受安装以及位置角度的限制较小;随着泄漏源距离的增加,P(VDF-TrFE) 柔性压电传感器的衰减程度较压电陶瓷和空气耦合式传感器低,能够检测出更远距离的泄漏;P(VDF-TrFE) 柔性压电传感器能够作为一种新型的声发射传感器应用于埋管道泄漏等复杂结构损伤失效检测中,具有重要的研究意义和应用价值。

关键词: 管道泄漏;泄漏检测;压电薄膜;柔性;传感器

中图分类号: TH866 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302019 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0184-08

Application of New Flexible Piezoelectric Film in Pipeline Leakage Monitoring and Identification

HE Jialin^{1,2}, MA Denglong^{1,2}, QIN Rongzhuo^{1,2}, ZHANG Guangsen^{1,2},
XIE Yunchuan³, GAO Jianmin^{1,2}, ZHANG Zaixiao⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The complex installation structure, narrow response frequency range, and inadaptability to complex curved surfaces of traditional solid piezoelectric ceramic piezoelectric probes usually result in low sensitivity and small detection range in pipeline leakage detection. To address these problems, a pipeline leakage detection method using a new flexible piezoelectric film as an acoustic emission sensor is proposed. Firstly, the flexible polymer piezoelectric film of vinylidene fluoride trifluoro ethylene copolymer (P(VDF-TrFE)), a traditional piezoelectric ceramic sensor, and

收稿日期: 2022-08-10。 作者简介: 何佳霖(1998—),男,硕士生;马登龙(通信作者),男,副教授。 基金项目: 中国博士后特别基金资助项目(2021T40544);中国博士后基金资助项目(2019M653651);西安近代化学研究所开放合作创新基金资助项目(SYJJ20210421)。

网络出版时间: 2022-11-02

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221101.1720.002.html>

an air coupling sensor are arranged on the pipe surface. After that, signals from pipe wall surface under various conditions are collected by software and hardware combination. At the end, the collected signals are analyzed and processed by FFT equal time and frequency domain signal processing algorithm so that pipeline leakage can be identified according to the waveform characteristics in time and frequency domain. The experimental results show that in terms of leakage signal response, the new P (VDF-TrFE) flexible piezoelectric film yields higher sensitivity and larger response value than the traditional piezoelectric ceramic sensor, and it is capable of identifying smaller leakage. In addition, it is less limited in installation and position angle. Also, the attenuation of P (VDF-TrFE) flexible piezoelectric sensor is lower than that of piezoelectric ceramic and air coupled sensor as the distance increases, thus enabling detection of leakage from a farther source. As a new type of acoustic emission sensor, P (VDF-TrFE) flexible piezoelectric sensor is applicable to failure detection of complex structures like buried pipeline. Therefore, it has important research significance and application value.

Keywords: pipeline leakage; leak detection; piezoelectric film; flexibility; sensor

管道运输作为一种最常见的天然气输送手段,在现代工业生产中保证燃气供应,保障人民生活等方面起着重要作用^[1]。一旦天然气管道出现损伤,就会造成气体泄漏甚至燃气爆炸的危险事故,并且管道在长期使用过程中,会经常发生损伤泄漏,这不仅给会造成经济上的巨大损失,且会造成环境污染。因此,如何通过对天然气管道泄漏进行早期检测,是国内外研究热点,对于管线系统运行维护和防范重大恶性事故具有重大意义。

近年来,国内外管道泄漏检测采取的现代检测法包括压力测试法以及超声波检测法,压力测试法通过单片机控制充气、稳压、保压检测、分析报警等操作,完成对管道气密性的判断。超声波检测法通过信号发生器发出超声波进行激励,产生的信号沿着管道传播,遇到损伤时便可以反射回来,再由压力传感器接收信号,传回计算机,分析确定缺陷及其位置。现代压力检测法都具有较好的重复性和检测精度,但不具有实时检测的功能,不能对使用中的管道进行检测。

声发射技术^[2]具有动态在线检测、适用范围广的特点,因而其在管道泄漏的检测中能够实现对管道实时状态的识别,同时根据声发射信号特征对管道泄漏进行定性和定量识别。

声发射是指材料中由于外载荷或内应力作用下,在产生屈服、腐蚀、裂纹甚至于破坏的过程中,局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象。对于气体输运管道,当管道出现裂纹等发生失效时,管道内部的气体介质便会在管道损伤位置发生泄漏,在泄漏瞬间会产生气体介质快速释放的现象,从而在管

道壁面产生瞬态震动弹性波。压电传感器将释放出来的这种声发射弹性波转换为电信号,从而根据信号特征对材料或构件状态进行评价,这使得声波检测方法在泄漏检测中得到了广泛应用^[3-9]。Li 等^[8]使用胶合材料,使用经验模式分解与自适应噪声和小波分析相结合,有效降低了 AE 信号的噪声。Hunaidi 等^[9]针对管道泄漏信号的声学特性,研究了不同管道压力和季节变化引起的信号衰减问题。

目前针对声发射检测的不同声发射传感器在国内外已有很多研究^[10-25]。王延年等^[10]提出了一种分布式光纤式传感器,用于检测大范围内的管线泄漏。Feng 等^[11]通过改变声发射传感器的结构,将 PZT 薄膜沉积于悬臂上,并追加了热敏制动器,研制了一种基于悬臂梁结构的声发射传感器。这种设计使得声发射信号对压电薄膜施加的应力增加,从而提高了传感器的灵敏度。Cuadra 等^[12]采用了一种基于传感器芯片,聚二甲基硅氧烷(PDMS),印刷电路板(PCB)和 AU/CR 电极的 MEMS 声发射传感器。Cui 等^[13]将压阻式压力传感器于芯片相结合,组成了一个集成式的智能压力传感器系统。Uprety 等^[14]使用氮化铝薄膜制备了一种压电式声发射传感器。该传感器使用硅膜作为衬底,同时硅膜起到驱动压电薄膜的作用。在硅膜上沉积一层电极作为氮化铝薄膜的底电极,再在氮化铝薄膜上沉积一层顶电极。Kazari 等^[15]研制了两种基于氮化铝薄膜的压电式声发射传感器,这两种传感器分别使用正八边形和圆形的氮化铝薄膜。管道泄漏过程声发射检测方面,传统的陶瓷压电式传感器主要基于压电陶瓷材料制备。它的优点是频带宽、灵敏度

高、信噪比高、结构简单、工作可靠和重量轻等。然而,陶瓷式压电传感器存在体积较大、安装困难,对于复杂曲面无法安装等缺点,因而柔性压电薄膜传感器开始受到更多地被关注。

目前由 MEMS 工艺制备的压电传感器薄膜多是利用聚偏氟乙烯(PVDF)有机聚合材料,本身具有一定的可弯曲性。然而,以 PVDF 为代表的有机聚合材料,大都是经大尺寸拉伸工艺制得具有压电效应的 β 晶相结构,处于热力学非稳态,在环境热及应力作用下压电膜易发生链松弛而导致退极化,从而使得压电薄膜性能减弱甚至失效,寿命较低,限制了其在复杂工况中的应用。同时,由于薄膜压电传感器厚度小,大多数只在共振频率上有较好的灵敏度,在较宽的带宽内的灵敏度上存在劣势。

为了克服传统压电薄膜传感器的缺点,Wang 等^[16]提出了基于偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物(P(VDF-TrFE))的新型压电薄膜制备工艺。该工艺基于传统 PVDF 的制备工艺,通过控制三氟乙烯的单体含量和电场极化,直接获得 β 晶相。与传统 PVDF 材料相比,具有更高的压电系数,表现出更高的灵敏度;同时,由于共聚物薄膜制备的过程中没有大尺度拉伸的工艺步骤,该压电膜在使用过程中不存在应力松弛所导致的压电系数下降的问题,且该种材料在火药、爆炸等领域均有相应的应用^[17-22]。与此同时,一些新型的压电材料也在压电能量采集等方面得到了实验应用^[23-25]。

基于以上分析,本文提出基于被动声波的声发射检测技术,结合新型柔性压电薄膜,针对管道泄漏进行实时的在线检测。利用团队制备的 P(VDF-TrFE)新型压电膜材料,制造压电薄膜传感器,研究其在管道泄漏检测方面的性能。同时,采用压电探头式声发射传感器、空气耦合式声发射传感器,比较研究不同类型传感器在管道泄漏信号检测方面的特性,为新型压电薄膜材料在管道泄漏中的进一步应用提供支撑。

1 实验设计

通过模拟管道气体泄漏过程,分别采用压电探头式、空气耦合式以及新型 P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜 3 类声发射传感器采集管道泄漏时的声发射信号,比较 3 类传感器的性能。针对制备的 P(VDF-TrFE)高分子压电薄膜声发射传感器,研究在不同泄漏位置、不同泄漏流量下,高分子柔性压电传感器声发射信号的响应规律和特性。

1.1 传感器类型

本实验采用 3 种不同类型的压电传感器进行对比实验,如图 1 所示。



(a) 压电探头式 (b) 空气耦合式 (c) P(VDF-TrFE)

图 1 3 种声发射传感器

Fig. 1 Three kinds of acoustic emission sensors

作为一种传统的压电式声发射传感器,压电探头式声发射传感器结构如图 2 所示。这种结构的优点在于,体积较大的压电陶瓷块和背底反射层使得传感器具有很高的灵敏度和很宽的工作带宽。金属外壳则在提供保护的同时,起到良好的电磁屏蔽作用,这使得传感器具有极高的信噪比。

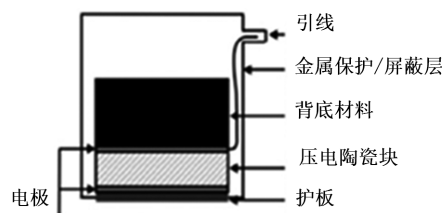


图 2 压电式声发射传感器结构

Fig. 2 Structure of piezoelectric acoustic emission sensor

空气耦合式传感器以空气为耦合剂,可以检测在空气中传播的声波振动,适合在非接触的情况下进行压力容器的泄漏检测。但是,这种传感器并没有解决传统的压电式声发射传感器的体积、刚性问题,对环境适应性较差。同时,由于声波在空气中的衰减比较严重,灵敏度较差。

本文制备的新型柔性压电薄膜-聚偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物(P(VDF-TrFE))具有更优异的灵敏度和压电性能,并且此类传感器材料制作的声发射传感器具备良好曲面适应性,克服了普通柔性压电薄膜的失效问题。

1.2 实验结构

本实验采用的测试系统由管道回路、CO₂ 气瓶、减压阀、流量控制器、气管、声发射传感、示波器等关键部分组成。

实验系统各部分功能如下:①实验采用 PVC 管

道,总长度为2 m,利用90°弯头和三通接头与送气管连接制成了环形回路,管道直径为50 mm,壁厚为3.7 mm,在管道中间处有一直径为1 mm的圆形泄漏孔,用于模拟出现损伤的管道;②CO₂气瓶作为气源供气;③减压阀用来控制气体压力,在气体压力过大时进行减压,通过安全阀来控制供气过程的安全;④流量控制器用来控制气体流量,模拟不同流量下管道泄漏状态,并进行分析;⑤送气管连接管道回路、减压阀、流量控制器以及管道回路,形成整体的被测系统;⑥压电探头式声发射传感器检测管道泄漏振动信号在管道壁面的传播,采集壁面声发射信号,空气耦合式声发射传感器用来检测管道气体泄漏振动信号在空气中的传播,采集空气中的声发射信号,新型P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜式声发射传感器同时贴在管道壁面检测管道泄漏振动信号在管道壁面的传播;⑦示波器用于接收声发射信号并进行显示与数据保存,便于后续对信号的处理与分析。实验中使用的仪器仪表如表1所示。

表1 仪器仪表主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of instruments

名称	型号	主要性能
气体流量控制器	YJ-700CF	控制范围:1~30 L/min 精度:±0.01 L/min
MFC单路显示控制仪	D90-15D	输入信号:±15 V 输出信号:0.8 A
泰克 Tektronix 数字示波器	DPO2012B	采样率:10 ⁹ s ⁻¹ 带宽:100 MHz 记录数:10 ⁶

1.3 不同传感器安装及信号采集方式

将不同声发射传感器同时安装在泄漏实验系统,3种声发射传感器安装采集方式如图3所示。

压电探头式声发射传感器的安装方式:利用老虎夹将声发射传感器与管道固定起来,并在管道上涂抹一定量的耦合剂,最大程度上保证传感器与管道壁面的接触,减小传递过程中的信号损失,从而采集管道气体泄漏在管壁上传播的声发射信号。空气耦合式声发射传感器的安装方式:将空气耦合式声发射传感器摆放在距离泄漏孔的不同位置处采集管道气体泄漏传播到空气中的声发射信号。P(VDF-TrFE)安装方式:直接利用导线连接在压电薄膜上印刷的电极,将电压引出,使用胶带把膜固定在管道上,安装方式简单快捷,很容易就能够与管道达到良

好的接触,从而采集管道气体泄漏在管壁上传播的声发射信号。



(a)压电探头式 (b)空气耦合式 (c)P(VDF-TrFE)

图3 3种声发射传感器安装采集方式

Fig. 3 Three installation and acquisition methods of acoustic emission sensors

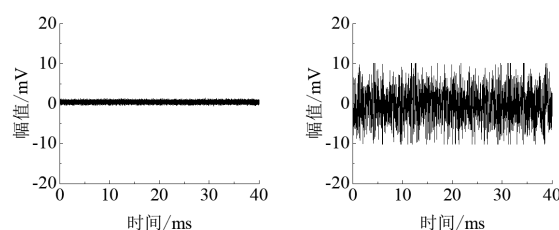
由于新型柔性压电薄膜作为传感器固定在管道上容易受到环境损伤,对新型柔性压电薄膜进行了封装处理,将新型柔性压电薄膜封在PVC薄膜之间,以延长其使用寿命。

2 实验结果

在实验过程中,采集不同声发射传感器检测管道气体泄漏的声发射信号,结合时域频域分析的方法,对各类传感器采集的管道气体泄漏信号进行处理分析,比较各类传感器之间的性能。利用傅里叶变换(FFT)将时域信号转换为频域信号,对不同状态下的时域和频域信号分别进行分析,获得泄漏与未泄漏时的特征频率,作为泄漏定性定量检测识别的依据。

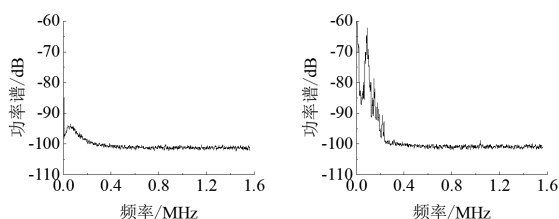
2.1 不同泄漏状态结果

分别将压电探头式传感器、空气耦合式声发射传感器(与泄漏源成90°)以及P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜分别安装在距离泄漏源500 mm的位置上,控制气体流量恒定为50 L/min,采集各传感器产生的电信号进行分析,当未泄漏、泄漏时,压电探头式声发射传感器采集到的信号如图4所示。



(a)未泄漏幅值

(b)泄漏幅值



(c) 未泄漏功率

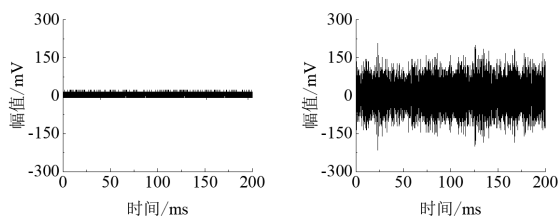
(d) 泄漏功率

图 4 压电探头式声发射传感器采集的信号

Fig. 4 Signal collected by piezoelectric probe acoustic emission sensor

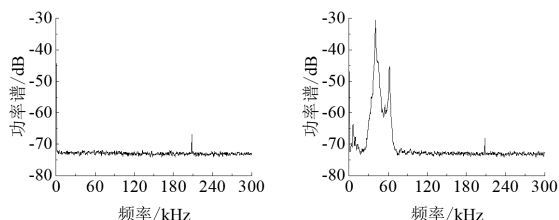
图 4(b)、图 4(d)所示为泄漏时压电陶瓷式探头探测得到的声波信号,相较于未泄漏时的信号,其信号幅值明显高于未泄漏时候的信号强度,而且在 90 kHz 附近出现了频率集中。

在未泄漏和泄漏时,空气耦合式声发射传感器采集到的信号如图 5 所示。



(a) 未泄漏幅值

(b) 泄漏幅值



(c) 未泄漏功率

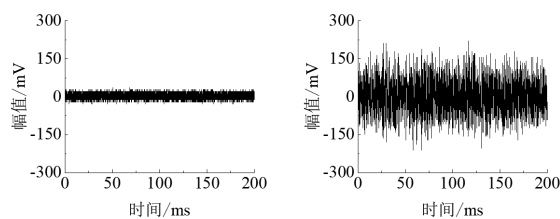
(d) 泄漏功率

图 5 空气耦合式声发射传感器采集的信号

Fig. 5 Signal collected by air coupled acoustic emission sensor

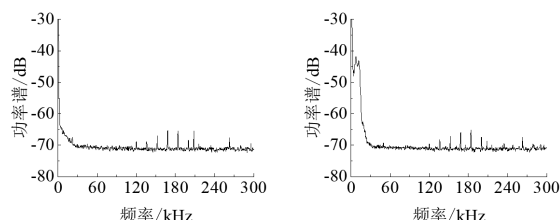
图 5(a)、图 5(c)所示为未发生泄漏时候空气耦合式声发射传感器采集得到的弹性声波信号,随时间变化背景噪声在 0 附近,其频率分布没有明显的集中区域。图 5(b)、图 5(d)所示为泄漏时得到的声波信号,信号幅值明显高于未泄漏时候的信号强度,且幅值要大于压电陶瓷式探头,而且在 40 kHz 附近出现了频率集中。

在未泄漏和泄漏时,P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜采集到的信号如图 6 所示。



(a) 未泄漏幅值

(b) 泄漏幅值



(c) 未泄漏功率

(d) 泄漏功率

图 6 P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜采集的信号

Fig. 6 Signal collected by P(VDF-TrFE) flexible piezoelectric film

图 6(a)、图 6(c)所示为未发生泄漏时 P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜采集得到的弹性声波信号。与其他传感器信号类似,无泄漏时采集的声发射信号随时间变化背景噪声在 0 附近,频率分布没有明显的集中区域。在发生泄漏后,信号幅值增加,且信号频率集中在 2~10 kHz 附近。

由图 4~6 可以看出:在管道泄漏时,压电探头式声发射传感器采集到的信号幅值为 10 mV 左右,泄漏信号频率集中在 90 kHz 左右;空气耦合式声发射传感器在管道泄漏时采集到的信号幅值为 200 mV 左右,泄漏信号频率集中在 40 kHz 左右;新型压电薄膜在管道泄漏时采集到的信号幅值为 200 mV 左右,泄漏信号频率集中在 2~10 kHz。相较于探头式、空气耦合式声发射传感器,P(VDF-TrFE)压电薄膜表现出了更高的响应电压值,能检测出更微小或是更远距离的泄漏。

2.2 不同安装位置处的声发射响应规律

当传感器安装位置距离随泄漏源距离增加时,各传感器信号会发生变化。将 3 种声发射传感器采集到的信号进行处理分析,在距离泄漏源不同位置下的响应如图 7 所示。

由图 7 可知,随着距离泄漏源距离的增加,三者采集到的泄漏信号幅值都在减小,但是采集到的泄漏声波信号频率成分没有变化。压电探头式声发射传感器整体上的响应功率谱幅值都要弱于 P(VDF-TrFE)压电薄膜。空气耦合式声发射传感器在距离泄漏源较近时,能获得较大的功率谱幅值响应,但是

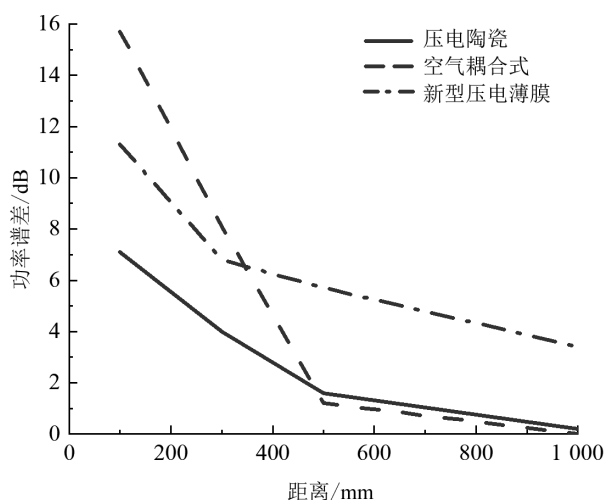


图7 3种传感器在距离泄漏源不同位置下的响应

Fig. 7 Responses of three sensors at different positions away from the leakage source

随着距离的增加,其衰减幅度较大,在距离泄漏源400 mm处响应幅值快速衰减,低于P(VDF-TrFE)压电薄膜的响应幅值,在距离600 mm处响应幅值低于压电探头式声发射传感器的,P(VDF-TrFE)随着距离泄漏源增加衰减幅度较小,整体响应幅值整体上优于其他两种传感器。

2.3 不同泄漏量下的泄漏声发射信号特征

针对3种传感器,在距离泄漏源位置600 mm处,控制泄漏量分别为0、1、3、5、10、15、20、25、30 L/min,检测出最小泄漏速率。当管道气体泄漏速率逐渐减小时,P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜及另外两种声发射传感器采集的信号如图8所示。

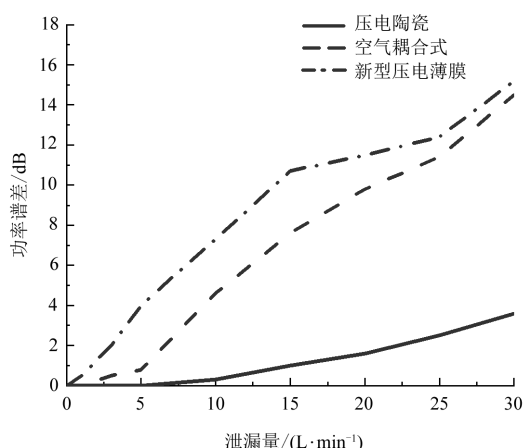


图8 3种传感器在不同泄漏量下的响应

Fig. 8 Response of three sensors under different leakage

由图8可知,3类传感器对10 L/min以上的泄漏速率都有具有响应,能分辨出泄漏的发生,其中

P(VDF-TrFE)压电薄膜和空气耦合式声发射传感器响应性能明显优于压电探头式声发射传感器。此外,P(VDF-TrFE)压电薄膜响应值较空气耦合式声发射传感器稍高,当泄漏速率低于10 L/min时,P(VDF-TrFE)压电薄膜响应值明显高于空气耦合式声发射传感器,而压电探头式声发射传感器在此泄漏量下几乎没有产生明显的响应。因此,无论在小泄漏、大泄漏的情况下,P(VDF-TrFE)压电薄膜在响应幅值和衰减幅度上都要优于其他两种传感器。

3 讨论

传统压电陶瓷探头式声发射传感器在本研究实验系统管道泄漏时采集到的信号幅值为10 mV左右,泄漏信号频率集中在90 kHz左右。随着距离的增加,信号的幅值以及能量在减小,但是信号的频率成分没有变化。这种传感器作为一种刚性传感器,需要检测管道壁面的振动信号,固定比较困难,需要较大的空间来进行夹紧与布置,与管道接触较差,从而导致传感器与管道的接触面积较小,难以利用整个传感器底部平面的压电效应来产生较多的电荷,因此采集到的信号幅值较小。同时,由于其刚性,对于曲率比较大的管道,或者表面比较复杂的装备无法安装。

空气耦合式声发射传感器采集到的信号幅值为200 mV左右,泄漏信号频率集中在40 kHz左右,随着距离的增加,信号的幅值、能量在减小,信号的频率成分也没有变化。但是,利用空气耦合声发射传感器进行泄漏过程产生声波探测时,传感器的固定位置相较于气体泄漏孔的位置有很大关系。当传感器固定方位在泄漏空气体出流方向时,能够探测明显变化的声波信号,但当传感器固定方向角度较泄漏气流流出方向相差较大时,探测到的信号十分微弱。这种传感器在较近的范围内能得到较大的响应幅值,但是其响应灵敏度低,频率响应范围较窄,受安装位置限制较大。并且,声波在空气中的传播衰减较为严重,在距离较远时难以产生较大的、便于观测的响应。由于泄漏源的位置通常是未知的,为了能有效探测到泄漏信号,在大空间范围内需要大量布置才能实现有效探测。

新型P(VDF-TrFE)高分子压电薄膜采集到的信号幅值为200 mV左右,泄漏信号频率集中在2~10 kHz,随着距离的增加,信号的幅值、能量在减小,信号的频率成分也基本稳定。新型P(VDF-TrFE)柔性压电薄膜克服了传统PVDF压电薄膜

容易失效、寿命短等缺点,并且继承了压电薄膜的特点,能与管道曲面达到良好的接触,接触面积大,从而通过压电效应产生的电荷累积更多,在对泄漏响应方面,表现出了更高的灵敏度。并且,高分子柔性传感器受安装表面、安装位置角度限制较小,在响应幅值、信号衰减、小泄漏信号探测方面表现出优异的性能,能作为一种新型的声发射传感器应用于管道泄漏的检测中。

4 结 论

本研究采用了压电陶瓷探头、空气耦合探头、P(VDF-TrFE)新型高分子柔性压电薄膜,通过搭建实验测试系统,比较研究了P(VDF-TrFE)新型高分子柔性压电薄膜相较于其他两种传感器在管道泄漏检测方面的优异性能,可得如下结论。

(1)不同类型声发射传感器对于同一泄漏事件的信号特征参数各异,对压电陶瓷式的声发射传感器,在本研究实验的响应幅值在10 mV左右,对于空气耦合式发射传感器、P(VDF-TrFE)新型高分子柔性压电薄膜的响应幅值在200 mV左右。不同声发射传感器探测到泄漏信号频率集中范围不同,对压电陶瓷式的声发射传感器,响应特征频率在90 kHz左右,对于空气耦合式发射传感器的响应特征频率在40 kHz左右,对于P(VDF-TrFE)新型高分子柔性压电薄膜的响应特征频率在2~10 kHz左右。

(2)新型P(VDF-TrFE)压电薄膜和空气耦合式发射传感器的性能在各方面都要优于传统压电探头式声发射传感器,而新型压电薄膜无论在距离泄漏源位置的衰减,还是随着泄漏量的衰减程度,都要小于空气耦合式发射传感器,能检测到更远距离以及更小的泄漏。

(3)新型压电薄膜相较于其他两种传感器,体积更小,并且柔性特点能与管道达到更好的接触,安装方便。新型压电薄膜对管道泄漏的响应相较于其他两种传感器更好,能获得更高的响应信号幅值,但是也对背景噪声产生了较大的响应,后续依赖于较好的降噪等信号处理方法,实现对新型压电薄膜在管道泄漏检测方面精准的定性、定量、定位识别。

参考文献:

- [1] 王立贵,席西民.石油产品管道运输定量研究[J].管道技术与设备,2008,15(6):13-17.
WANG Ligui, XI Youmin. Overview of the quantitative research on petroleum pipeline transportation [J].

- Pipeline Technology and Equipment, 2008, 15(6): 13-17.
- [2] 吴畏,张国庆,衣粟,等.声发射信号在输气管道中的传播特性研究[J].科技风,2021,33(9):85-86.
WU Wei, ZHANG Guoqing, YI Su, et al. Study on propagation characteristics of acoustic emission signal in gas transmission pipeline [J]. Technology Wind, 2021, 33(9): 85-86.
- [3] 靳志鸿,李志刚,李军,等.液氧涡轮泵新型螺旋阻尼密封泄漏特性研究[J].西安交通大学学报,2022,56(8):62-72.
JIN Zhihong, LI Zhigang, LI Jun, et al. Investigation on the leakage characteristics of a novel helical damper seal for the liquid oxygen turbopump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(8): 62-72.
- [4] 向新,晏鑫,李志刚,等.迷宫蜂窝密封泄漏特性的实验测量和数值研究[J].西安交通大学学报,2022,56(11):72-82.
XIANG Xin, YAN Xin, LI Zhigang, et al. Experimental measurement and numerical study on leakage characteristics of labyrinth honeycomb seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 72-82.
- [5] 王永泉,杨朝旭,周淳,等.应用LabVIEW软件开发的气体绝缘金属封闭开关设备声振联合检测系统[J].西安交通大学学报,2021,55(6):131-140.
WANG Yongquan, YANG Zhaoxu, ZHOU Chun, et al. A GIS acoustic and vibration joint detection system developed via LabVIEW software [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 131-140.
- [6] 王跃飞,张振涛,张波,等.利用声发射的往复空压机环状阀泄漏故障诊断试验[J].西安交通大学学报,2012,46(9):26-30.
WANG Yuefei, ZHANG Zhentao, ZHANG Bo, et al. Experiment on fault diagnosis of air compressor ring valve leakage using acoustic emission [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(9): 26-30.
- [7] 王潜龙,冯全科,屈展,等.基于声发射与小波包理论的压力管道泄漏检测[J].西安交通大学学报,2003,37(5):515-518.
WANG Qianlong, FENG Quanke, QU Zhan, et al. Pressure pipe leakage detection based on the acoustic emission and wavelet packet theory [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 515-518.
- [8] LI Yang, XU Feiyu. Signal processing and identification on the surface of Pinus massoniana Lamb. glulam using acoustic emission and improvement complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. Measurement, 2019, 148: 106978.

- [9] HUNDAI O, CHU W T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes [J]. *Applied Acoustics*, 1999, 58(3): 235-254.
- [10] 王延年, 赵玉龙, 蒋庄德, 等. 油气管线泄漏监测分布式光纤传感器的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(9): 933-936.
- WANG Yannian, ZHAO Yulong, JIANG Zhuangde, et al. Study on the distributed optical fiber sensor for long-distance natural gas pipeline leakage detection [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(9): 933-936.
- [11] FENG Guohua, CHEN Weiming. Micromachined lead zirconium titanate thin-film-cantilever-based acoustic emission sensor with poly(N-isopropylacrylamide) actuator for increasing contact pressure [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(5): 055046.
- [12] CUADRA J A, BAXEVANAKIS K P, MAZZOTTI M, et al. Energy dissipation via acoustic emission in ductile crack initiation [J]. *International Journal of Fracture*, 2016, 199(1): 89-104.
- [13] CUI Mengjia, SHANG Erwei, JIANG Shouqian, et al. Design, fabrication and implementation of a high-performance compliant nanopositioner via 3D printing with continuous fiber-reinforced composite [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021, 31(12): 125012.
- [14] UPRETY B, KIM S, MATHEWS V J, et al. A comparative evaluation of piezoelectric sensors for acoustic emission-based impact location estimation and damage classification in composite structures [C]//AIP Conference Proceedings. Melville, NY, USA: AIP, 2015: 1146-1154.
- [15] KAZARI H, KABIR M, MOSTAVI A, et al. Multi-frequency piezoelectric micromachined ultrasonic transducers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11090-11099.
- [16] WANG Jian, XIE Yunchuan, ZHANG Yifei, et al. The ultrahigh discharge efficiency and energy density of P(VDF-HFP) via electrospinning-hot press with St-MMA copolymer [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5(9): 3646-3656.
- [17] 赵继波, 谭多望, 张远平, 等. PVDF 计在水中爆炸近场压力测试中的应用 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(3): 1-4.
- ZHAO Jibo, TAN Duowang, ZHANG Yuanping, et al. Application of PVDF sensor in underwater explosive shock wave measurement at near-field [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 1-4.
- [18] 赵煜华, 闫光虎, 张玉成, 等. 基于多点压力测试系统的发射药腔内燃速测试技术 [J]. *火炸药学报*, 2019, 42(3): 303-307.
- ZHAO Yuhua, YAN Guanghu, ZHANG Yucheng, et al. Testing technology for burning rate in bore of gun propellant based on multi-points pressure measurement system [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(3): 303-307.
- [19] 郭伟, 俞统昌, 李正来, 等. 冲击波压力传感器灵敏度的动态校准 [J]. *火炸药学报*, 2006, 29(3): 62-64.
- GUO Wei, YU Tongchang, LI Zhenglai, et al. Dynamic calibration of sensitivity of shock wave pressure sensor [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(3): 62-64.
- [20] 高鸣, 任海峰. 固体仪器发动机粘接界面应力检测系统设计 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(4): 69-73.
- GAO Ming, REN Haifeng. Design of the bond stress monitoring system of instrumented motor [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(4): 69-73.
- [21] 杨明, 黄卫东, 李高春, 等. 基于 PVDF 传感器的固体推进剂冲击应力测量 [J]. *火炸药学报*, 2018, 41(5): 496-500.
- YANG Ming, HUANG Weidong, LI Gaochun, et al. Measurement of the impact stress of solid propellant based on PVDF sensors [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(5): 496-500.
- [22] 李嘉旭, 杜静, 郑冬芳. PVDF 薄膜压电特性在不同领域的研究进展 [J]. *浙江化工*, 2020, 51(4): 7-9, 12.
- LI Jiaxu, DU Jing, ZHENG Dongfang. Research progress of piezoelectric properties of PVDF thin films in different fields [J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2020, 51(4): 7-9, 12.
- [23] MA Longtao, FAN Huiqing, WEI Xinyi, et al. Towards high areal capacitance, rate capability, and tailorable supercapacitors: CO_3O_4 @ polypyrrole core-shell nanorod bundle array electrodes [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2018, 6(39): 19058-19065.
- [24] REN Xiaohu, FAN Huiqing, ZHAO Yuwei, et al. Flexible lead-free BiFeO_3 /PDMS-based nanogenerator as piezoelectric energy harvester [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(39): 26190-26197.
- [25] MA Jiangwei, FAN Huiqing, LI Zhexin, et al. Multi-walled carbon nanotubes/polyaniline on the ethylenediamine modified polyethylene terephthalate fibers for a flexible room temperature ammonia gas sensor with high responses [J]. *Sensors and Actuators: Chemical*, 2021, 334: 129677.

(编辑 赵炜 刘杨)