

文章编号: 2095-4980(2024)04-0445-08

管道附件影响的管道声发射信号衰减特性

丛 军, 王 薇, 牟建荣

(中石化胜利海上石油工程技术检验有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 以包含多种附件的液体和气体管道为对象, 开展复杂结构管道声发射信号的衰减特性研究。通过采集不同流量压力下管道本体的声发射信号, 分析其幅值衰减规律, 并用 DB8 小波包与快速傅里叶变换(FFT)研究管道声发射信号成分变化。通过采集阀门、法兰、流量计等 6 种管道附件前后的声发射信号并分析衰减规律, 发现对声发射信号衰减影响最大的管道部件为电磁流量计。之后重点分析了法兰上螺栓连接紧固程度对信号幅值和频率成分的影响, 实验结果表明, 螺栓紧固程度越高, 声发射信号衰减越小。本文的相关研究结论对工程中进行输油或输气管道进行声发射检测时的传感器布设决策具有集成化的参考价值。

关键词: 声发射检测; 管道; 信号衰减; 小波分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022049

Attenuation characteristics of pipeline acoustic emission signal considering the influence of pipeline accessories

CONG Jun, WANG Wei, MU Jianrong

(Sinopec Shengli Offshore Petroleum Engineering Technology Inspection Co., Ltd, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The attenuation characteristics of Acoustic Emission(AE) signals in liquid and gas pipelines with complex structures are studied. By collecting acoustic emission signals of pipe body under different flow pressures, the amplitude attenuation law is analyzed, and the composition changes of pipe acoustic emission signals are studied by DB8 wavelet packet and Fast Fourier Transform(FFT). Through collecting acoustic emission signals before and after valve, flange, flow meter and other six kinds of pipeline accessories and analyzing attenuation law, it is found that electromagnetic flow meter is the pipeline component that has the greatest influence on the attenuation of acoustic emission signals. Then, the effect of fastening degree of bolt connection on signal amplitude and frequency components is analyzed. The results show that the higher the fastening degree of bolt, the lower the signal attenuation. The relevant research conclusions of this paper have integrated reference value and guiding significance for the sensor layout decision of acoustic emission detection of oil or gas pipelines in engineering.

Keywords: acoustic emission; pipeline; signal attenuation; wavelet analysis

声发射(AE)信号作为管道本身受到载荷时在缺陷处产生的信号, 在声发射源到传感器接收位置的传播过程中, 声发射信号的幅度必然会受到材料本身和不同形状特征的影响, 从而产生不同程度的衰减^[1]。传感器接收声发射信号时, 需设定一个阈值抑制噪声, 因此这种衰减是必须考虑的, 以避免声发射信号衰减到阈值以下, 不能作为有用信号被传感器接收。此外, 传感器的检测间距也由声发射信号的衰减情况间接决定, 故衰减的规律是声发射检漏技术研究的第一步。

国内外对有关复杂管道系统中的声发射信号衰减特征的研究已进行了很多尝试。张虹等^[2]分析了引起声发射信号衰减的各种原因, 并对一个复杂特征管道中声发射信号的幅度衰减情况进行了试验测量, 得出不同管道特征对声发射信号幅度的衰减影响; 初雪娇等^[3]对采油树进行了声发射衰减的定位研究, 并通过实验和模拟得出了声发射信号在经过干式井口采油树四通、法兰、卡箍和闸阀组合件等关键部件时, 幅值衰减约为 10~20 dB。然而, 影响管道系统中的声发射信号衰减特性并不只有管道结构这一个因素, 还有存在于管道内部的气、液或气

液两相流等因素的影响；孙立瑛等^[4]对液体载荷作用下，声发射波在固体结构中的传播和衰减特性进行了理论分析和实验研究。研究表明：对于承受液体载荷的结构，应采用液体中传播的纵波波速进行定位计算；李帅永等^[5]针对管道气体泄漏中的多模态和衰减等问题进行研究，利用壳体振动理论分析管内气体与管壁之间的声学耦合作用，选择合适的导波分析模型，研究不同方向的泄漏声发射信号的模态类型和衰减特性，进而提高了定位精确度；刘翠伟等^[6]也考虑了管道内气体流动对声发射信号传播规律和衰减特性的影响，并建立了耦合黏热效应、湍流效应和气体流动的泄漏声波幅值衰减的理论模型。基于此模型，使管道声发射定位中的误差进一步减小。近年来，有关管道中的声发射信号衰减的研究大多服务于管道泄漏的定位研究。张曦等^[7]通过研究衰减系数与金属晶粒散射和热流损失的关系，建立准确的声发射能量衰减模型，并在此基础上针对声发射频带宽的特点，对传统衰减定位模型进行改进，提出宽频带声发射源定位模型；池招招等^[8]针对传统衰减定位实现前需要确定管道运行参数，以便计算衰减模型中的参数等问题，提出一种新的传感器布置方式，并通过变分模态分解和极大似然估计对泄漏位置进行了更加精准的定位；张延兵等^[9]通过研究和对比正常管道和腐蚀管道的声发射信号的衰减特性和各项参数，进而辨识出埋地管道的腐蚀情况。声发射检测技术作为一种动态无损检测方法，可在不停产的状况下对压力管道的活性缺陷，如裂纹扩展、环形焊缝位移、腐蚀等进行实时检测及判断，且对管道特殊结构的形状不敏感^[10-11]。

1 声发射检测理论

1.1 声发射检测技术原理

声发射也称为应力波发射，是指材料内部结构受到外部压力或自身由于存在缺陷产生形变时，因能量的快速释放而产生瞬态弹性波的现象^[12]。声发射是一种非常常见的物理现象，在大多数工程材料损坏时都会有声发射现象产生。声发射释放的能量一般较小，且频率范围一般在几赫兹到几百千赫兹，很难像生活中的声音一样被人耳接收，因此需要专门的设备对其采集^[13]。如图 1 所示，专门的声发射检测设备一般包括传感器、放大器、采集卡、安装有采集软件的储存和显示设备。该设备接收声发射现象产生的弹性波信号，将其转化为电信号，并由放大器放大信号，最终将信号保存并对信号进行处理，可以实现对材料状态、声发射源位置的检测，这种检测技术称为声发射检测技术。

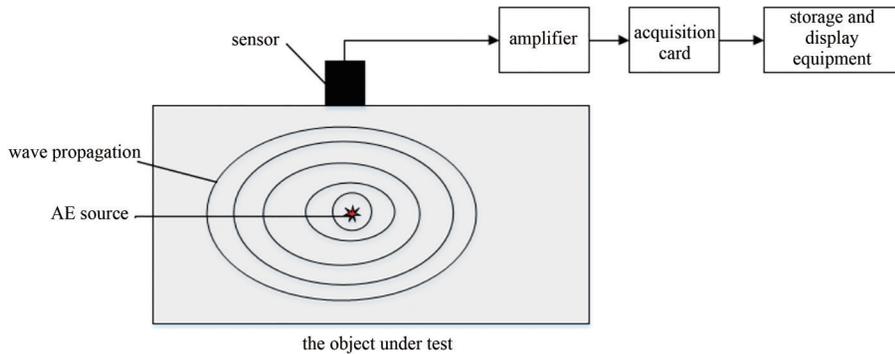


Fig.1 Basic principle of acoustic emission detection
图 1 声发射检测基本原理

1.2 小波分析方法

管道声发射衰减实验所获得的声发射信号频谱图是基于背景噪音下分析的，信号不明显。基于这一特征，介绍一种能将信号、噪音分离并提取较弱信号的方法，即小波分析。小波分析可以同时时在域和频域上表征信号的局部特征，将时域与频域结合起来，既能在某时间段表达频域信息，又可以在某一频域内描述时域信息。对于分析瞬间声发射信号具有一定的高效性。为高效提取较弱的信号，对信号进行小波变换和小波分解。

1.2.1 小波变换方法

对任意的平方可积函数 $\psi(t)$ ，傅里叶变换为 $\psi(w)$ ，当 $\psi(w)$ 满足式(1)时：

$$\int_{\mathbf{R}} \frac{|\psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (1)$$

则称其为小波基函数。将 $\psi(w)$ 伸缩和平移得到式(2)：

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbf{R}; a \neq 0 \quad (2)$$

式中： a 为尺度因子； b 为时间因子。式(2)为一个小波序列。

对任意的平方可积函数 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ，连续的小波变换定义为：

$$w_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

对参数 a 、 b 进行离散化处理，即使 $a = a_0^m (a_0 > 1), b = nb_0 a_0^m (b_0 \in \mathbf{R}; m, n \in \mathbf{Z}), a = a_0^m$ 则能定义函数 $f(t)$ 的离散小波变换。一般情况下为方便计算，尺度因子 $a=2$ 。

1.2.2 小波分解方法

小波包分解采用一组低通与高通共轭正交镜像的滤波器组，实现在相同的频率范围内对低频信号与高频信号进行不同层次的分解。经过低通滤波的下一层序列可以不用进行翻转；经过高通滤波的下一层序列则要进行翻转。本实验基于Daubechies小波基，对采集到的实验数据进行3层分解，分解过程如图2所示，得到8个不同频率段的小波能量分布。

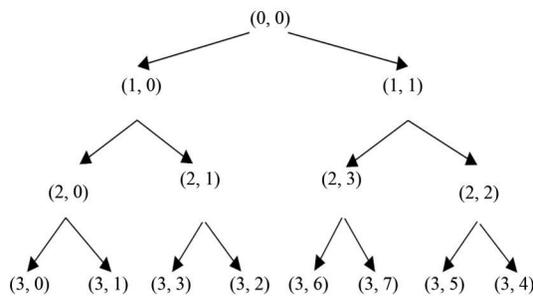


Fig.2 Diagram of wavelet decomposition(three layers)
图2 小波分解图(3层)

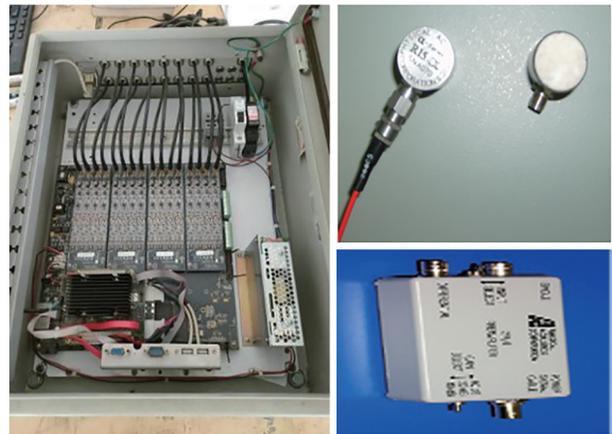


Fig.3 Main acquisition equipments and sensors, amplifier
图3 主要采集设备及传感器、放大器图

2 实验简介

2.1 实验仪器

实验使用的信号采集系统为美国物理声学(Physical Acoustics, PAC)公司的声发射检测系统，主要设备如图3所示，包括：AEWin声发射采集软件、Sensor Highway II声发射采集卡、电缆线、R15和R3声发射传感器、前置放大器等。AEWin软件是美国PAC公司开发的专门用于声发射信号采集的软件；Sensor Highway II采集卡为适用于高端声发射研究的高性能、低价位声发射采集卡；R15,R3声发射传感器最高频率可达1 MHz。传感器的具体参数如表1所示^[4]，实验之前需在传感器表面涂抹耦合剂，并利用胶带固定，目的是让传感器与管道进行良好的耦合，有效进行声发射信号采集。采用HB铅笔进行灵敏度检测，当其信号幅值达到97 dB及以上时，说明传感器与试件之间粘接良好。

表1 传感器及其参数

Table1 Sensors and their parameters

sensor type	frequency range	in-band fluctuation/dB	sensitivity/dB
R15	0.05 kHz~1 MHz	<30	120.00
R3	0~0.1 MHz	<30	77.09

2.2 实验系统

管道声发射衰减实验系统如图4所示，实验所用为液体管道与气体管道的一部分，其布置简化后如图5所示，气体管道与液体管道相似。其中液体管道水平放置，管径为4 cm，壁厚为0.4 cm，直管段长约550 cm，弯管段内径200 cm，弯管段长约350 cm；气体管道水平放置，管径为2 cm，壁厚为0.6 cm，直管段长约500 cm，弯管段内径180 cm，弯管段长约280 cm。



Fig.4 Experiment setup
图4 实验系统图

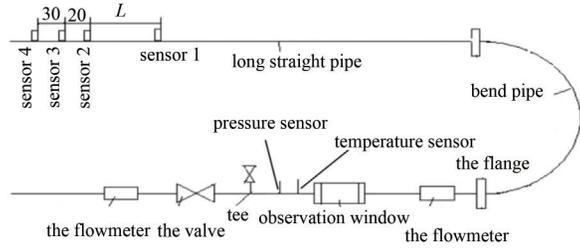


Fig.5 Schematic diagram of the experimental system
图5 实验系统简图

2.3 实验工况

实验具体工况如表2所示，“object”中的“other”表示法兰、支架、阀门、观察窗、三通等管道附件。

表2 实验工况

Table2 Experimental condition

experimental group	pipe diameter/mm	medium(Y/N)	pressure/MPa	traffic/(L/min)	object	serial number
1	40	N	0	0	straight	1
2	40/20	Y	0.43/0.46	10.2/60.0	straight	2/3
3	40/20	Y	0.43/0.46	9.2/48.8	straight	4/5
4	40/20	Y	0.43/0.46	7.5/36.6	straight	6/7
5	40/20	Y	0.85/0.56	7.5/48.8	straight	8/9
6	40/20	Y	0.24/0.22	7.5/50.0	straight	10/11
7	40/20	Y	0	0	straight	12/13
8	40/20	Y	0	0	bending	14/15
9	40/20	Y	0	0	other	-

3 传感器布置对信号衰减特性的影响

如图6所示，将2个R15传感器对称地固定在管道的上下两侧，在距管道上方传感器为L的地方开始断铅，如图7所示，每个L值处断铅10次，分别记录2个传感器所接收到的信号幅值。为了消除传感器不同带来的差异，将2个传感器对换，其他实验条件与步骤相同，再次分别记录2个传感器所接收到的信号幅值，其中具体L值的大小以及断铅所得平均幅值如表3所示。综上所述，在管道断铅点另一侧的传感器接收到的幅值比同一侧的要大，但事实上，从波的传播速度与距离上来看，应该是同一侧接收到的幅值比另一侧的大，故这个结果可能仅仅是受传感器安装时胶带固定牢固度的影响。

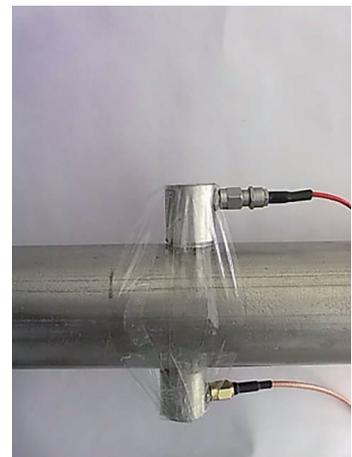


Fig.6 Arrangement of sensors
图6 传感器布设图

4 管道本体声发射信号衰减特性结果与分析

以长直管道作为管道本体对象，开展声发射信号衰减规律特性实验。具体实验方法如图4所示，在管道的一侧，安装3个传感器，布设距离如图7所示。第4个传感器随着断铅位置移动，每个点断3次，在信号处理中可将该传感器接收到的信号作为原始信号。实验所得数据经线性拟合后，结果如图8所示，其中，各编号的实验工况均与表2中相对应。

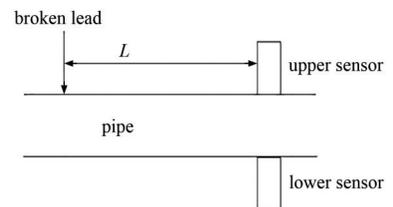


Fig.7 Schematic diagram of experiment
图7 实验简图

由图8可知，不管管径大小，衰减百分比曲线整体呈上升趋势，但随着信号源与传感器间距的增加，衰减数值曲线斜率不断减小。气体管道在管道的前150 cm衰减曲率很大，其后迅速减小，在450 cm处衰减曲率已接近最小值。在450 cm之后，管道长度的增加对衰减影响很小，需主要考虑法兰等管道特征对衰减的影响。液体管道在管

道的前 150 cm 衰减曲率比同时间的气相要平缓，但其后的曲率减小变慢，在 450 cm 后衰减增加比气相快。在流量恒定时(气 48.8 L/min, 液 7.5 L/min)，无论管内介质是气体或液体，介质压力较小时的近场区衰减曲率比压力大时要大，且介质压力最小时，信号在 450 cm 处衰减最大。在介质压力恒定时(气 0.46 MPa, 液 0.43 MPa)，气体流量大的衰减大，液体流量小的衰减大。管道直径对衰减影响很小，在 450 cm 处两者的衰减接近。对比管道内是否包含液体介质对声发射信号衰减程度的影响，发现充液管道在 200 cm 内衰减曲率比空管要大，但空管的声发射信号衰减曲率的减小速率小于充液管道，故在 200 cm 外，空管的声发射信号衰减比充液管道大。

表 3 传感器布置对信号接收的影响

Table3 Influence of sensor layout on signal reception

L/cm	sensor difference/dB	sensor difference/dB	L/cm	sensor difference/dB	sensor difference/dB
2	4.00	2.4	52	1.3	2.70
12	1.25	0.7	62	2.7	3.00
22	3.64	0.9	72	1.4	1.20
32	2.10	2.0	82	0.5	1.25
42	2.70	2.9	92	0.6	2.09

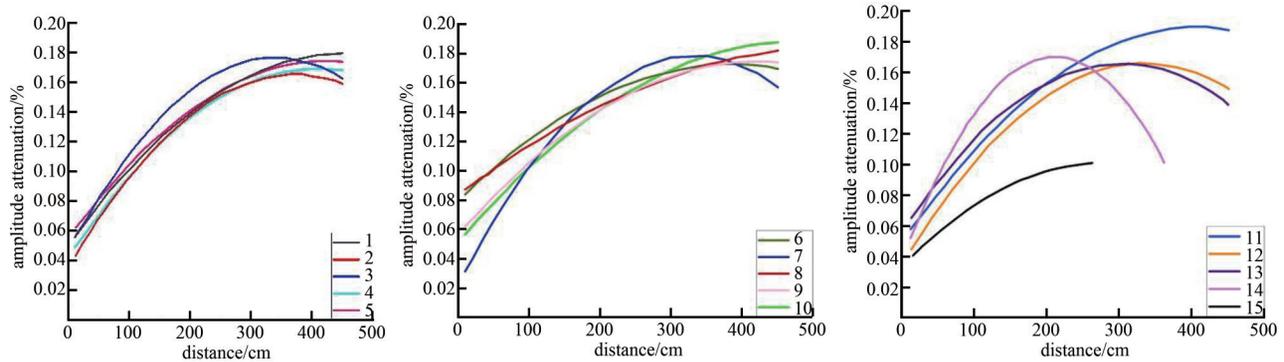


Fig.8 Attenuation curves of pipe
图 8 管道衰减曲线

5 管道附件对声发射信号衰减特性的影响

5.1 声发射信号通过管道附件前后的幅值变化

分别以液体和气体管道为对象，考察常见管道附件对声发射信号衰减特性的影响。实验涉及的管道附件具体包括阀门、法兰、三通、观察窗、有机玻璃、电磁流量计、涡街流量计、支架等。每次实验在具体附件的上游和下游分别固定一个 R15 传感器，在其中一个 R15 传感器(通道 1)处断铅，采集两侧传感器接收到的声发射信号。每个点断 10 次，取平均值，以通道 1 为信号原始强度，计算通过管件后，声发射信号幅值衰减的百分比，实验结果如表 4 所示。

表 4 声发射信号通过管道附件后衰减

Table4 Decay of acoustic emission signals after passing through the pipe attachments

liquid pipe fittings	valve	flange	tee	organic glass	electromagnetic flowmeter	stents
attenuation/%	0.295 082	0.179 798	0.050 1	0.234 995	0.468 6	0.060 13
gas pipe fittings	valve	flange	tee	observation window	vortex flowmeter	stents
attenuation/%	0.383 832	0.159 596	0.071 6	0.234 411	0.323 5	0.036 364

由表 4 可知，声发射信号在通过液相管道附件前后的幅值衰减值从大到小分别是：电磁流量计、阀门、有机玻璃、法兰、支架、三通。而气相管道声发射信号幅值衰减从大到小分别是：阀门、涡街流量计、观察窗、法兰、三通、支架。流量计造成较大声发射信号衰减的原因在于流量计内部结构采用焊接连接方式，且流量计的材质与管道材质明显不同，因此其衰减比较大。同时由于涡街流量计与电磁流量计在结构上不同，因此两者在幅值衰减数值上具有差异。气液两相管道上的阀门对声发射信号的衰减具有不同影响，可能是由于管道内部介质不同造成。为进一步证明此结论，将液体管道放空后重新检测，获得阀门前后声发射信号的衰减变为 37.36%，与气体管道阀门前后声发射信号衰减的差距明显减小，由此可见管道内介质对阀门的衰减有一定影响。

5.2 声发射信号通过管道附件前后的频率成分变化

采用小波包变换把实验所得声发射信号分解成不同频率范围的分量，由于不同的声发射信号包含的信息成分不同，经小波分解后声发射信号中的信息成分在各个分解尺度分量中的分布就存在差异^[5]。小波包分量与频带分布如表 5 所示。

表 5 小波包分量重构信号的频谱范围

Table 5 The spectral range of signal reconstructed by wavelet packet component

wavelet packet component	frequency range/kHz	wavelet packet componet	frequency range /kHz
(3,0)	0~62.5	(3,4)	437.5~500.0
(3,1)	62.5~125	(3,5)	375.0~437.5
(3,2)	187.5~250	(3,6)	250.0~312.5
(3,3)	125~187.5	(3,7)	312.5~375.0

对信号进行 DB8 小波包分解后通过液相阀门，结果如图 9 所示，将信息整合后，信号通过液相阀门前后 DB8 小波包分析结果如图 10 所示。由图 10 可知，信号经过阀门后，其成分上的变化主要是(3,0)成分分布变大，(3,1)与(3,2)成分分布变小，即高频成分减少，低频成分增加。除气液两相支架外，其他管道元件结果与液相管道阀门结果相似。本次实验中，通过气液支架的信号成分变化表现为(3,3)分布增大，(3,0)与(3,1)分布均减少，这可能是由于信号通过支架时反射与折射的影响。以(3,3)频带为分析对象，分析信号在经过管道元件后该频带的衰减大小，部分结果如表 6 所示。

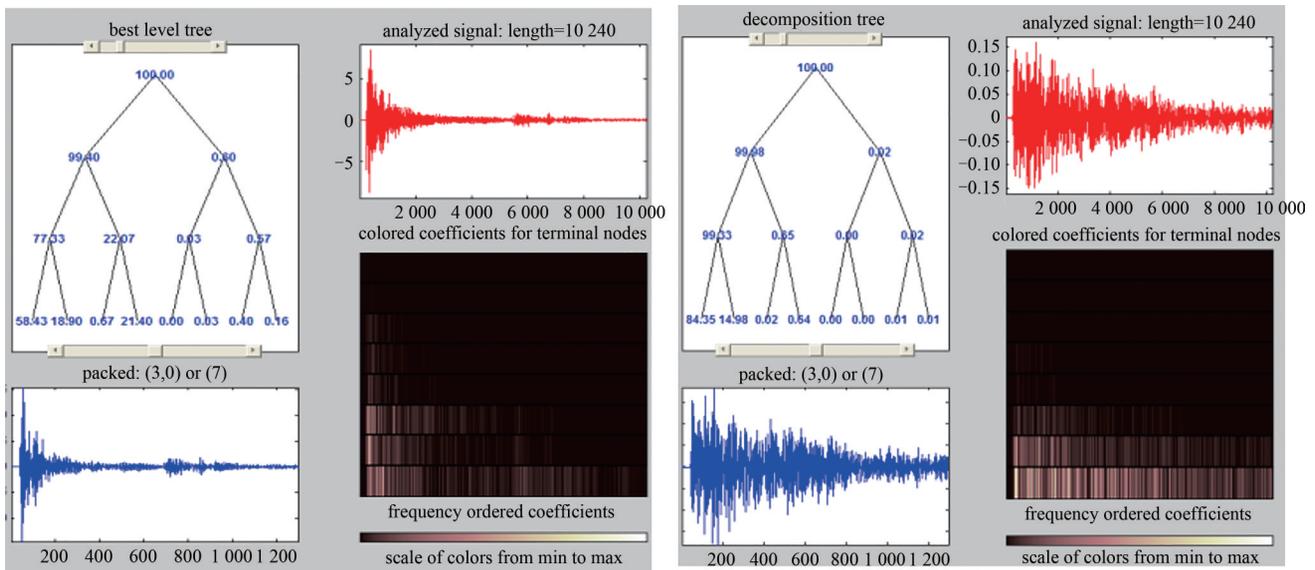


Fig.9 Signal by DB8 wavelet packet decomposition passing through the liquid phase fixed valve

图9 DB8小波包分解后信号通过液相固定阀门

由表 6 可以看出，对(3,3)成分的信号减少，气相管道元件从大到小分别是：阀门、法兰、观察窗、涡街流量计、支架；液相管道元件从大到小分别是：阀门、观察窗、电磁流量计、法兰、支架。这个大小顺序与幅值衰减大小顺序不一样，说明不同管道附件对声发射信号中不同成分的衰减特性具有较大影响。

5.3 螺栓连接紧固程度对声发射信号通过法兰前后衰减特性的影响

法兰是连接管道的常见形式之一，法兰上螺栓连接紧固程度明显不同，因此有必要研究螺栓连接紧固程度对声发射信号衰减特性的影响。如图 11 所示，在法兰两侧分别安装型号为 R15 的传感器，在连接法兰的 4 个螺栓拧紧与松开的不同状态下，在左侧传感器处断铅，采集左右两侧声发射信号。数据处理如表 7 所示，由表 7 可知，本次实验中螺栓松开时，信号通过法兰衰减大，随着螺栓紧固程度逐渐加大，信号通过法兰的衰减逐渐减小。

对通过法兰螺栓 4 个螺栓松动前后的声发射信号进行 FFT 变换，结果如图 12 所示。由图 12 可知，声发射信号通过 4 个螺栓全部松动的法兰后，信号频率分布变化不大，但信号幅值变化比较大。对其他法兰数据也进行 FFT 变换，得到结果与法兰上 4 个螺栓全部松动的结果相似，信号频率分布变化都不大。

表6 管道元件(3,3)频带变化
Table6 Frequency band variation of pipe element(3,3)

gas pipeline		flange/%		valve/%		observation window/%		stents/%		flow meter/%	
band	before	after	before	after	before	after	before	after	before	after	
(3,0)	46.14	71.00	65.26	95.91	53.48	82.61	35.90	35.37	32.41	33.58	
(3,1)	25.91	23.90	17.29	3.66	25.24	9.14	49.22	41.29	49.46	52.77	
(3,3)	20.60	4.59	15.66	0.40	18.46	7.46	13.47	22.72	16.56	12.64	
(3,3) change/%	0.777 184		0.974 457		0.595 883		-0.686 71		0.236 715		
liquid pipe		the flange/%		the valve/%		observation window/%		stents/%		flow meter/%	
band	before	after	before	after	before	after	before	after	before	after	
(3,0)	37.86	17.80	57.86	86.74	44.01	6.17	30.84	21.89	26.74	7.49	
(3,1)	26.43	11.37	17.06	14.89	23.17	4.41	51.58	34.05	50.39	12.09	
(3,3)	28.37	11.61	20.00	2.04	25.28	3.92	19.76	13.49	21.59	5.70	
(3,3) change/%	59.1		89.8		84.5		31.7		73.6		

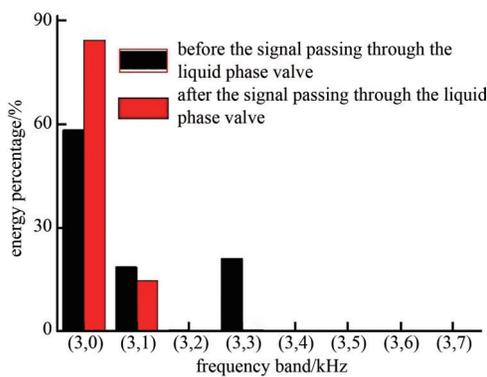


Fig.10 DB8 wavelet packet analysis results before and after the signal passing through the liquid phase valve
图 10 信号通过液相管道阀门前后 DB8 小波包分析结果

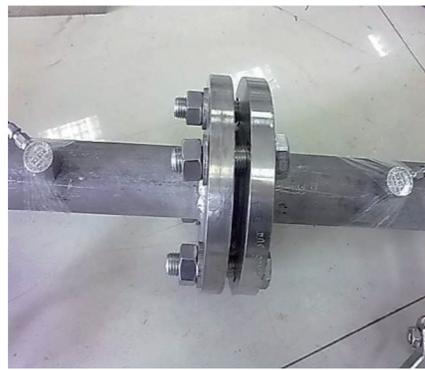


Fig.11 Sensor layout at the flange
图 11 法兰处传感器布设图

表7 螺栓松紧对法兰衰减的影响
Table7 Effect of bolt tightness on flange attenuation

state	all four bolts are loose	secure one bolt	secure 2 bolts	secure 3 bolts	secure 4 bolts
amplitude attenuation	0.283 096	0.212 825	0.203 515	0.202 778	0.189 024

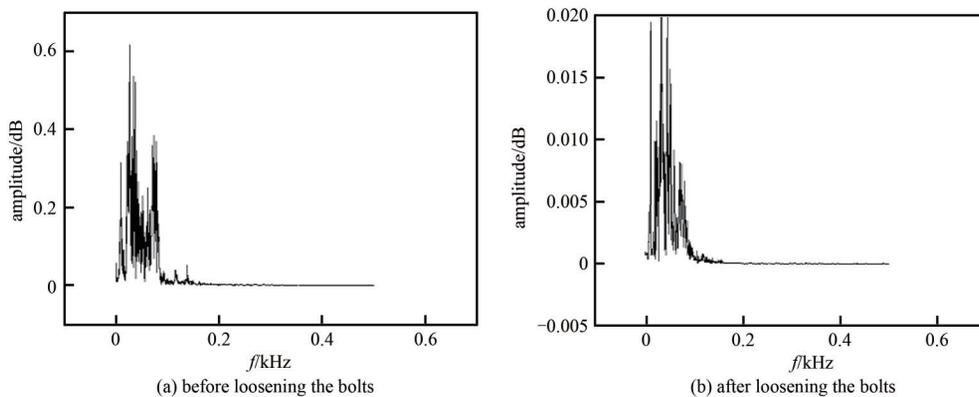


Fig.12 FFT transform of acoustic emission signal passing through the flange(four bolts are tight and loose respectively)
图 12 声发射信号通过 4 个法兰螺栓松动前后的 FFT 变换(左前右后)

6 结论

本文对输送气体和液体介质的管道进行声发射信号衰减特性实验，分析了管道本体及附加对信号衰减特性的影响，得到如下结论：

- 1) 对于外径为 4 cm 的不锈钢材质水平管道，传感器安装在管道上下侧对信号的衰减没有影响。
- 2) 管道附件对声发射信号的衰减影响较大。从信号幅值上来看，液相管道上各类附件前后的信号衰减程度从大到小分别是：电磁流量计、阀门、观察窗、法兰、支架、三通。气相管道上各类附件前后的信号衰减程度

从大到小分别是：阀门、法兰、观察窗、涡街流量计、三通、支架。从信号频率成分看，信号通过气体或液体管道上的附件后，均为信号高频成分减少，低频成分增加(通过支架除外)。

3) 螺栓紧固程度对信号通过法兰时的衰减影响较大，螺栓的紧固程度主要影响信号的幅值，螺栓紧固程度越大，信号的衰减越小。

参考文献：

- [1] 刘长春,赵建波,张陶陶. 太赫兹波导固定衰减器的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(6):963-967. (LIU Changchun,ZHAO Jianbo,ZHANG Taotao. Design of fixed attenuator for terahertz waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2021,19(6):963-967.)
- [2] 张虹,靳世久,孙立瑛. 不同管道特征对声发射信号幅度的衰减影响[J]. 管道技术与设备, 2007(3):13-14. (ZHANG Hong,JIN Shijiu,SUN Liying. Amplitude attenuation of acoustic emission from different pipeline characteristics[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2007(3):13-14.)
- [3] 初雪娇,孙伟,李风,等. 干式井口采油树声发射检测仿真与试验研究[J]. 工程机械, 2019,50(11):46-54. (CHU Xuejiao,SUN Wei,LI Feng,et al. Simulation and experimental study on acoustic emission detection of dry wellhead tree[J]. Construction Machinery, 2019,50(11):46-54.)
- [4] 孙立瑛,李一博,靳世久,等. 液体载荷对声发射波传播特性的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(8):1617-1621. (SUN Liying,LI Yibo,JIN Shijiu,et al. Analysis of fluid load influence on propagation and attenuation characteristics of acoustic emission wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(8):1617-1621.)
- [5] 李帅永,夏传强,杨丽丽. 不同方向的气体管道泄漏声发射信号模态特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(5):195-204. (LI Shuaiyong,XIA Chuanqiang,YANG Lili. Modal characteristics of leakage-induced acoustic emission in different directions of gas pipeline[J]. Journal of Instruments and Meters, 2018,39(5):195-204.) doi:10.19650/j.carol carroll nki cjsi.J1702631.
- [6] 刘翠伟,敬华飞,方丽萍,等. 输气管道泄漏声波衰减模型的理论研究[J]. 振动与冲击, 2018,37(20):109-114. (LIU Cuiwei,JING Huafei,FANG Liping,et al. A theoretical study on the attenuation model of leakage acoustic waves for natural gas pipelines [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018,37(20):109-114.) doi:10.13465/j.carol carroll nki JVS. 2018.20.017.
- [7] 张曦,章兰珠. 声发射衰减特性管道泄漏定位方法[J]. 应用声学, 2022(1):158-167. (ZHANG Xi,ZHANG Lanzhu. The pipeline leakage location method based on acoustic emission attenuation characteristics[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022 (1):158-167.)
- [8] 池招招,蒋军成,刁旭,等. 基于声波衰减模型对液体管道泄漏位置的极大似然估计[J]. 振动与冲击, 2021,40(15):238-245. (CHI Zhaozhao,JIANG Juncheng,DIAO Xu,et al. Maximum likelihood estimation for leakage location of liquid pipeline based on acoustic attenuation model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(15):238-245.) doi:10.13465/j.carol carroll nki JVS.2021. 15.030.
- [9] 张延兵,周琦,孙志涛. 局部埋地输油管段腐蚀声发射监测试验研究[J]. 装备制造技术, 2021(10):54-57. (ZHANG Yanbing,ZHOU Qi,SUN Zhitao. Study on acoustic emission monitoring for corrosion of partially underground oil pipe sections[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(10):54-57.)
- [10] LEE M R,LEE J H. Acoustic emission technique for pipeline leak detection[J]. Key Engineering Materials, 2000(183,187): 888-892.
- [11] MILLER R K,POLLOCK A A,FINKEL P,et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines[C]// Symposium on Acoustic Emission—Standards and Technology Update. Plantation,FL:[s.n.], 1999:67-78.
- [12] MOSTAFAPOUR A, DAVOUDI S. Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method[J]. Applied Acoustics, 2013,74(3):335-342.
- [13] LEE M R,LEE J H. Acoustic emission technique for pipeline leak detection[J]. Key Engineering Materials, 2000(183,187):887-892. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.183-187.887.

作者简介：

丛 军(1971-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为海上安全管理、检验检测. email: congjun391.slyt@gmail.com.

牟建荣(1981-), 女, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为检验检测.

王 薇(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为检验检测行业HSE管理.