

管道声发射信号衰减特性随管道壁厚变化研究

王 瑶, 刘才学, 何 攀, 李朋洲, 陈祖洋

(中国核动力研究设计院 成都, 610041)

摘要 为了建立压力管道泄漏声发射衰减定位模型,需要开展压力管道泄漏声发射试验研究。由于试验管道无法按 1:1 比例采用核电站压力管道原型,有必要针对相同材质和加工工艺、不同壁厚和外径的金属管道,获取声发射信号在不同壁厚的金属管道中的传播特性规律及差异,揭示金属管道壁厚对声发射波传播衰减的影响。分别采用 3 种不同尺寸规格的金属管道作为试验对象,运用声发射探测技术获得声发射信号沿着不同壁厚的金属管壁传播的衰减规律,揭示了金属管道壁厚对声发射波传播的影响。结果表明,管道声发射信号的衰减特性随着管道壁厚的不同而变化,在薄壁管中声发射波在传播路径中会产生模式转换,即发生频散现象,各种模式的波相互叠加使信号幅度沿着传播路径未呈单调衰减趋势,用声发射信号的衰减特性做定位时须考虑这一点。

关键词 声发射信号;壁厚;传播;衰减

中图分类号 TL362

引 言

三代压水堆核电站压力管道普遍采用了破前漏(leak before break, 简称 LBB)技术,要求对用到 LBB 技术的压力管道增设泄漏监测系统。目前,国际公认的 LBB 标准规定必须使用 3 种独立的泄漏监测系统^[1],分别采用 3 种不同的监测方法:①压力边界泄漏声发射监测;②压力边界环境相对湿度和温度监测;③环境放射性监测。联合 3 种方法对核反应堆主回路系统压力边界泄漏进行监测和评估,对泄漏位置进行定位,并对泄漏情况进行量化。压力边界相对湿度监测和环境放射性监测这两种方法可以反映压力边界是否发生了泄漏,但工程上更为关心诊断泄漏发生的位置和泄漏率大小,单纯依赖数学物理模型是无法实现这一技术要求的。因此,采用这两种方法无法对泄漏位置和泄漏率的大小进行准备评估。

目前,泄漏声发射监测技术是公认最佳的 LBB 泄漏监测方法,不仅可以实现对泄漏点位置快速定位和对泄漏量大小进行量化评估,并且克服了反应堆压力边界泄漏监测只能分区分段设点监测的局限,实现了压力边界的整体泄漏监测。高温高压管道水泄漏产生的声波在管壁中传播,会产生反射、折射和相互干涉,也会产生各种模式的波,以不同波

速、波程和时序到达传感器,因而波源所产生的一个尖脉冲波到达传感器时,多种模式的波以复杂的次序到达,传感器接收到的是能量最大的波包。声发射波在管壁中传播发生模式转换取决于管道的壁厚。由于声发射信号随着传播距离的增加会发生衰减,若管道的形状、材料和加工工艺相同,那么导致衰减的因素主要取决于管道的大小。

核电站压力管道泄漏监测系统的研制需要开展声发射信号衰减特性试验研究,掌握声发射信号在金属管道上的传播特性,建立泄漏声发射衰减定位模型。由于试验管道无法按 1:1 比例采用核电站压力管道原型,有必要针对相同材质和加工工艺,不同壁厚和外径的金属管道,采用声发射探测技术,获取声发射信号在不同壁厚的金属管道中的传播特性规律及差异,揭示金属管道壁厚对声发射波传播衰减的影响。

1 声发射波的传播衰减原理

声发射检测是一种在役、实时、动态的检测方法,管道介质在泄漏过程中,往往存在着介质与容器壁之间的摩擦冲击,且流体的动能会部分转化为壁面的振动(波动信号)。该波动信号沿着容器壁面和介质向远处传播,被贴放在容器壁面的传感器接收

* 中国核动力研究设计院市场开发基金资助项目

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2020-12-22

到。根据不同传感器接收的时间以及接收的信号能量大小,可以定性及定量地监测出是否泄漏以及泄漏的位置,有利于远距离判断泄漏源,减少工作量,特别适合于一些无法接近的管道。目前,声发射泄漏广泛应用于管道泄漏的检测工作中^[2]。

声发射波沿着管壁传播的模式有纵波、横波、瑞利表面波和板波这4种形式^[2]。假如管道的壁厚小于声波波长,那么声波在管道中传播就会产生3种模式的板波,即纵向模态、横向模态和扭转模态。3种模式的波都具有频散现象,即波的相速度是频率的函数,随着波的频率的变化而变化。由于频散现象,在薄壁的钢管中,各种模式的波在传播过程中波形也会发生变化,幅度也随之发生变化,且无一定规律可言,情况复杂。对于非轴对称模态振动,传感器在同一轴向位置的不同周向位置接收到的信号幅度是不同的,所以无法由布置在同一轴线上的传感器接收到的信号幅度来表征其随距离的变化趋势,因为其结果是随机波动的。通常只要管道的壁厚大于声发射波的波长,声发射信号就不会以板波的形式传播,声发射信号的幅度也就不会因频散现象发生变化。核电站的管道属于大型厚壁材料结构,声波在其管壁传播时通常都是以瑞利波的形式传播,当声发射信号以瑞利表面波沿管壁表面传播时将发生衰减,并具有随距离指数衰减的特性^[3]。假设声发射传感器 S_i 在压力管线上的位置坐标为 X_i ,泄漏

位置 P 的坐标为 X_p ,根据声发射信号在金属压力管道表面近似按指数衰减的特性,则存在以下关系

$$U_i = U_p \exp(-\alpha L_i) \quad (1)$$

其中: U_p 为泄漏点的声发射信号值; U_i 为距离泄漏位置 L_i 处的声发射信号值; α 为距离衰减常数。

笔者将分别采用不同尺寸规格的管段,来揭示管段尺寸对声发射信号沿着管壁传播时的影响。

2 试验内容

2.1 试验管道

分别采用3种不同尺寸规格的金属直管段作为试验对象,管道规格参数和材料化学成分含量分别如表1,2所示。

表1 试验管道规格参数

Tab.1 The parameters of testing pipe

编号	材料	外径/mm	壁厚/mm
1#	TP316LN	168	15
2#	X2CrNiMo18-12	300	38
3#	X2CrNiMo18-12	790	80

2CrNiMo18-12和TP316LN材料的化学成分和力学性能见表2,3。通过对比可知,管道的材质特性差异很小,在本试验中可以忽略材料对声发射信号的影响。

表2 材料化学成分含量

Tab.2 Materials and chemical element

材料	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
TP316LN	≤0.035	≤2.00	≤0.045	≤0.030	≤1.00	16~18	11~14	2~3	0.1~0.16
X2CrNiMo18.12	≤0.035	≤2.00	≤0.03	≤0.015	≤1.00	17~18.2	11.5~12.5	2.25~2.75	≤0.08

表3 声发射传感器位置

Tab.3 The position of acoustic emission sensors

测点	距离声发射源位置/mm	
	声发射传感器A	声发射传感器B
1	0.4	0.9
2	0.5	1.0
3	0.5	1.5
4	0.5	2.0
5	0.5	3.0
6	0.5	4.4
7	0.5	5.7
8	1.5	5.7
9	2.0	4.4

2.2 传感器的选择和布置

在每个金属管段上布置3个声发射传感器,其中1个传感器作为信号激励设备,用真空树脂耦合剂粘贴在信号源处,另外2个传感器(标记为声发射传感器A和声发射传感器B)作为信号接收设备,同样采用真空树脂耦合剂粘贴在管道表面。为了更好地将声发射传感器A和B贴合在管道表面,减小信号的损失,各自增加一个砝码(砝码质量一致)将传感器紧紧压贴在管道上,如图1所示。泄漏声发射信号是一个宽频的随机噪声信号^[4],最强的泄漏声发射信号都集中在相对低频范围0~400 kHz^[5]。考虑到反应堆背景噪声和信号衰减,实际的泄漏探测



图1 传感器安装示意图

Fig.1 The diagrammatic sketch of installing sensors

频率范围为 50~150 kHz,因此选择声发射传感器型号为 PAC R15;工作频率范围为 50 kHz~200 kHz;谐振频率为 150 kHz^[6]。

用信号发生器产生一个电压为 7 V、频率为 10 kHz 的电脉冲信号触发信号源处的声发射传感器,该声发射传感器受迫振动,在管道上产生仿真声发射事件。同时检测 2 个声发射传感器接收到的信号幅度。每个位置触发 4 次。声发射传感器 A 和 B 的位置如表 3 所示,3 个管段的声发射传感器布置距离相同。

根据式(1)可分别计算出在距声发射源相同距离下,声发射信号沿着 3 种管段表面传播的衰减常数 a ,可对比分析声发射信号沿着 3 种管段传播的幅度衰减特性。其次,通过对比同一管段不同位置处的声发射信号频谱和不同管段同一位置处的声发射信号频谱,对比分析声发射信号的频率特性。

3 试验结果分析

3.1 声发射信号幅度衰减特性

以信号发生器产生幅度和频率都相同的声发射信号作为模拟源,声发射信号沿着主管道、波动管和试验管道表面传播时分别进行测试,每个位置进行 4 次测量,取平均值。1#~3#管道声发射信号幅度衰减曲线如图 2~4 所示。

由图 2~4 可知,声发射信号沿着 3 种管道表面传播在不同的测量距离内呈现不同的上升或者下降趋势。在距离信号源 1 m 内,3 个管道的声发射信号幅度均呈现急剧下降趋势,这是因为在离泄漏源较近的近场区,声发射信号以理想的柱面波形式沿着管道表面传播,主体声波近似于瑞利波波速,此时声发射信号的幅度衰减非常迅速^[7]。在远场区域(传

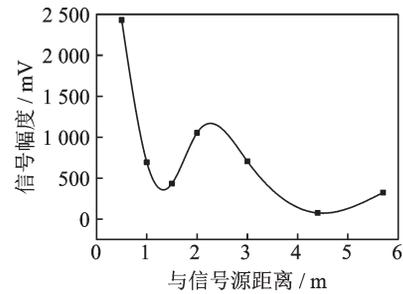


图2 1#管道声发射信号幅度衰减曲线

Fig.2 The amplitude attenuation diagram of acoustic emission signal of pipe 1

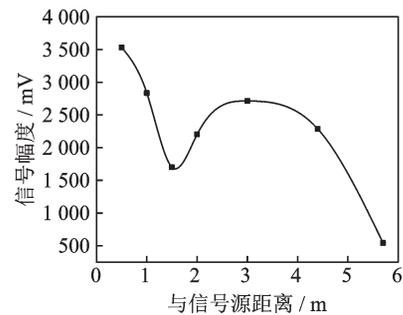


图3 2#声发射信号幅度衰减曲线

Fig.3 The amplitude attenuation diagram of acoustic emission signal of pipe 2

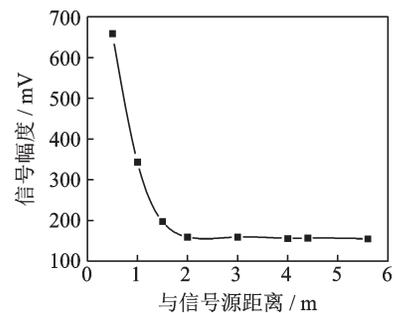


图4 3#管道声发射信号幅度衰减曲线

Fig.4 The amplitude attenuation diagram of acoustic emission signal of pipe 3

播距离大于 1 m),由于各种多路径信号的叠加和柱形波阵面的扩展,信号的传播路径可以看作是一维的,此时信号的衰减程度迅速减小,衰减变得平缓。

1#管道和 2#管道的声发射信号在传播过程中幅度均出现了不规则的波动,并不是单调下降趋势,这是由于声发射波在沿着管道传播过程中会发生模式转换,3 种管道的壁厚不相同,波源所产生一个尖脉冲波到达传感器时,可以纵波、横波、表面波或板波等复杂次序到达,不同模式的波相互叠加,从而使得信号幅度沿着传播路径没有呈单调下降状态。不同模式的波传播速度也有不同。用时差法分别测量声发射信号沿 3 根金属管道的传播速度,具体方法如下:以管道中心为原点,在管道表面沿轴向方向左右

各布置3个声发射传感器,采用直径为0.5 mm、硬度为HB的铅笔芯折断信号作为模拟源,检测各通道响应的声发射信号幅度,一共选取5个位置折断,以3#管道为例,声发射信号沿3#管道表面传播速度记录如表4所示。信号的传播速度 $V = \Delta L / \Delta T$,其中: ΔL 为铅笔芯距离两个传感器之间的距离差; ΔT 为信号到达两个传感器的时间差。表5为频厚积。

由表4,5可知,用时差法测得声发射信号沿3#管道的传播速度为2 957.06 m/s,3#管道壁厚×传感器频率(即频厚积) $\approx 12 \text{ mm}\cdot\text{MHz}$ 。用同样方法测得的声发射信号沿1#管道和2#管道的传播速度分别为5 924.90 m/s和4 991.52 m/s,1#管道和2#管道的频厚积分别为2.25 $\text{mm}\cdot\text{MHz}$ 和5.7 $\text{mm}\cdot\text{MHz}$ 。当频厚积大于8 $\text{mm}\cdot\text{MHz}$ 时,在该情况下声发射信号沿

表4 声发射信号沿3#管道表面传播速度记录

Tab.4 The propagation velocity of acoustic emission signals of pipe 3

断铅位置/mm	通道	传感器位置/mm	信号到达时间/us	幅值/V	传播速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-2 490	1	-2 980	46 797	0.741 6	2 767.34
-2 490	2	-2 000	46 797	0.481 3	2 767.34
-2 490	3	-400	46 855	0.241 8	2 767.34
-2 490	4	150	47 448	0.371 5	2 767.34
-2 490	5	1 020	48 150	0.085 2	2 767.34
-2 490	6	5 000	54 435	0.022 8	2 767.34
-1 300	1	-2 980	47 199	0.375 0	2 959.49
-1 300	2	-2 000	46 880	0.415 8	2 959.49
-1 300	3	-400	46 897	0.236 5	2 959.49
-1 300	4	150	47 142	0.222 6	2 959.49
-1 300	5	1 020	47 762	0.062 4	2 959.49
-1 300	6	5 000	51 759	0.015 0	2 959.49
-200	1	-2 980	49 345	0.199 0	3 175.36
-200	2	-2 000	48 647	0.184 2	3 175.36
-200	3	-400	48 618	0.799 0	3 175.36
-200	4	150	48 652	1.172 4	3 175.36
-200	5	1 020	48 940	0.101 6	3 175.36
-200	6	5 000	50 689	0.040 5	3 175.36
350	1	-2 980	47 657	0.245 3	3 067.95
350	2	-2 000	47 124	0.184 2	3 067.95
350	3	-400	46 982	0.188 9	3 067.95
350	4	150	46 826	1.294 4	3 067.95
350	5	1 020	47 020	0.172 0	3 067.95
350	6	5 000	48 747	0.045 1	3 067.95
4 200	1	-2 980	47 494	0.051 5	2 815.16
4 200	2	-2 000	47 231	0.045 8	2 815.16
4 200	3	-400	46 293	0.098 9	2 815.16
4 200	4	150	46 137	0.097 4	2 815.16
4 200	5	1 020	45 884	0.149 6	2 815.16
4 200	6	5 000	44 978	0.087 6	2 815.16

表5 频厚积

Tab.5 The wall thickness of pipes×the frequency of sensors

传感器谐振频率/ kHz	管道壁厚/ mm	管道壁厚×传感器频率/ ($\text{mm}\cdot\text{MHz}$)
150	15(1#)	2.25
150	38(2#)	5.7
150	80(3#)	12

着管道传播的主体波速约为3.0 m/ms,相当于瑞利表面波的波速,其他模式的波虽然也会被激发而存在,但是其幅度通常比瑞利波的幅度小20 dB^[8]。3#管道声发射信号传播以瑞利表面波为主,因此幅度衰减曲线没有出现不规则的增大现象,而薄壁管1#和2#管道声发射信号在1.5 m处左右,信号幅度都出现了突增。因此,利用声发射信号的衰减特性进行定位时须考虑这一点,以免影响定位精度。

3.2 声发射信号频率衰减特性

图5~7分别为1#,2#和3#管道的声发射传感器距离声发射源4.4 m和0.5 m时,采集到的信号频

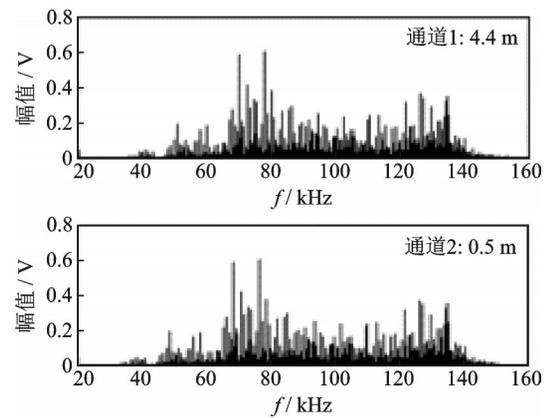


图5 1#管道声发射信号频谱特征

Fig.5 The frequency of acoustic emission of pipe 1

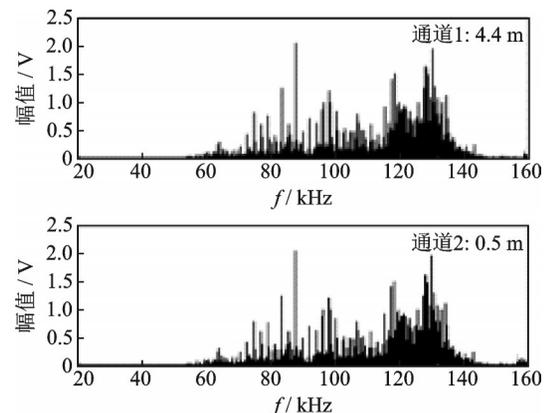


图6 2#管道声发射信号频谱特征

Fig.6 The frequency of acoustic emission of pipe 2

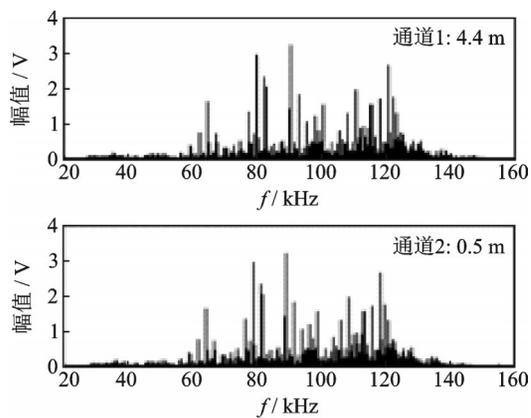


图7 3#管道声发射信号频谱特征

Fig.7 The frequency of acoustic emission of pipe 3

谱特征。

由图5~7可以看出,声发射信号的频率并不会随着传播距离的增加而有所变化,频率成分主要集中在80 kHz~140 kHz,这是因为信号的频率只与传感器的频带特征有关^[9-10]。另外,管道壁厚越大,外径越大,信号频谱的峰值越小,信号衰减越大。

4 结论

1) 管道声发射信号的衰减特性随着管道的壁厚的不同而变化,在薄壁管中声发射波在传播路径中的会产生模式转换,即发生频散现象,各种模式的波相互叠加使得信号幅度沿着传播路径未呈单调衰减趋势,用声发射信号的衰减特性做定位时须考虑这一点。

2) 声发射波沿着管壁传播时,其频率成分和声发射传感器本身的频谱特征密切相关,不会随管道壁厚的变化而变化。

参 考 文 献

- [1] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.45, guidance on monitoring and responding to reactor coolant leakage[R]. [S. l.]: Regulatory Guide Office of Nuclear Regulatory Research, 2008.
- [2] 汪文有. 压力管道泄漏的声发射检测技术[J]. 无损检测, 2016, 38(3): 22-24.
WANG Wenyou. Acoustic emission testing technique in leak detection of pressure pipeline [J]. Non-destructive Testing, 2016, 38(3): 22-24. (in Chinese)

- [3] 胡玉蝉. 埋地钢管腐蚀及检测技术研究现状[J]. 管道技术与设备, 2017(1): 43-46.
HU Yuchan. Research status of buried steel pipeline corrosion and inspection technology [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(1): 43-46. (in Chinese)
- [4] SMITH J R, RAO G V, GOPAL R. Acoustic monitoring for leak detection in pressurized water reactors [J]. American Society for Testing and Materials, 2017(697): 149-164.
- [5] SMITH J R, OLEX M B, CRAIG J. Acoustic monitoring systems tests at Indian point unit 1, WCAP-9324 [R]. [S. l.]: Westinghouse Nuclear Energy Systems, 1978.
- [6] 何攀, 刘才学, 杨泰波, 等. 泄漏声发射传感器性能检测技术研究[J]. 机械与电子, 2016, 34(1): 60-66.
HE Pan, LIU Caixue, YANG Taibo, et al. Study on performance calibration technology of acoustic emission sensor for leak monitoring [J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(1): 60-66. (in Chinese)
- [7] KUPPERMAN D, SHACK W J, CLAYTOR T. Leak rate measurements and detection systems [C]// CSNI Leak-Before-Break Conference. Monterey, CA: [s.n.], 2014.
- [8] KUPPERMAN D S, CLAYTOR T N. NDE of stainless steel and on-line leak monitoring of LWRs [R]. Illinois: Argonne National Lab, 1991.
- [9] VOTAVA E, JAX P. Inspection of nuclear reactors by means of acoustic emission during hydrostatic test [J]. Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems, 1979(697): 177-204.
- [10] 柳志忠, 王瑶, 艾琼, 等. 压力管线缺陷声发射信号频谱特性试验研究[J]. 核动力工程, 2010(5): 8-11.
LIU Zhizhong, WANG Yao, AI Qiong, et al. Test research on spectral characteristics of acoustic emission from pressure pipe defect [J]. Nuclear Power Engineering, 2010(5): 8-11. (in Chinese)



第一作者简介: 王瑶, 女, 1982年8月生, 硕士、副研究员。主要研究方向为反应堆故障诊断, 压力管线缺陷声发射信号频谱特性试验。
E-mail: 27260676@qq.com