

基于声发射的输气管道故障检测技术研究

王志春¹, 张志强¹, 张 蕾¹, 贾欢欢², 刘丁有³

(1. 内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古大学 电子信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010000;

3. 北京长城华瑞科技有限公司, 北京 100120)

摘 要: 输气管道内夹带水和固体颗粒是产生管道腐蚀和泄漏的主要原因。该文将声发射传感器置于水平输气管道外壁面上, 分别采集不同气速下, 管道内含有水滴和固体颗粒的声发射信号, 然后对采集到的声发射信号进行多尺度小波分析。通过对比发现, 声发射信号的能量、特征频率和管道气速、管道内的颗粒种类及质量有很好的相关性。声发射技术可用于输气管道夹带水滴及固体颗粒的故障检测。

关键词: 输气管道; 多相流; 声发射; 小波分析

中图分类号: TE821

文献标识码: A

Study on Gas Pipeline Fault Detection Technology Based on Acoustic Emission

WANG Zhichun¹, ZHANG Zhiqiang¹, ZHANG Lei¹, JIA Huanhuan², LIU Dingyou³

(1. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010000, China;

3. Beijing Great Wall Hua Rui Technology Ltd, Beijing 100120, China;)

Abstract: The main reason of the pipeline corrosion and leakage is that water and solid particles are entrained in gas pipeline. Sensors of acoustic emission(AE) were placed on wall of the gas pipeline, the AE signals of gas pipeline which containing water droplets and solid particles are collected with different gas velocity, then the signals are used for multi-scale wavelet analysis. It has been found that there are good correlation between the energy, characteristic frequency of AE signals and the gas velocity, particle type, particle quality in the gas pipeline. AE technology can be used for the fault detection of gas pipeline entraining water droplets and solid particles.

Key words: gas pipeline; multiphase flow; acoustic emission; wavelet analysis

0 引言

随着西气东输二线工程的竣工,天然气管网覆盖了整个中东部^[1]。然而,受益于廉价方便天然气的同时,输气管道的安全问题也不容忽视。每年因输气管道泄漏引起的安全事故都会造成重大损失。引起管道泄漏的主要原因是油气在二次生产输送过程中夹带着水和沙粒,它们长时间地腐蚀、摩擦管道,最终导致管道的泄漏。检测出管道内的液体和固体颗粒,能有效预防管道内部的腐蚀,进而提高管道的安全性。

声发射检测技术是近年兴起的一种无损检测方法,在多相流系统的参数检修、故障诊断等方面已得到广泛应用。液体或固体颗粒与管道碰撞摩擦会引起管道内部发出弹性波,弹性波最终到达管道表面,引起声发射传感器表面位移,进而将这些位移转换

成电信号,被放大记录。

采用声发射技术,对采集到的信号进行多尺度小波分析,观察不同条件下的能量和特征频率的变化趋势^[2],找到输气管道中夹带的液体和固体颗粒等物质的声发射规律。

1 实验装置和方法

本文利用的实验装置如图1所示,其中包括管道和声发射采集装置两部分。管道长30 m,内径 $\varnothing 4$ cm,管道内气速为3~9 m/s。为模拟管道中夹带的液体和固体颗粒,在管道上方安装一密闭容器,里面放置水和玻璃微珠。阀门水平位置是关闭状态,阀门开关的水平夹角分别为33°,45°,30°和42°时,水和玻璃微珠的质量流量分别为 (1 ± 0.1) g/s, (2 ± 0.1) g/s, (1 ± 0.1) g/s 和 (2 ± 0.1) g/s。通过开关不同的阀门角度,使水和玻璃微珠分别以不同

收稿日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61463042);内蒙自然科学基金资助项目(2014MS0609)

作者简介:王志春(1972-),女,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,硕士,主要从事两相流测量技术等方向的研究。

的质量流量进入管道。声发射采集装置由 SAEU2S 型 USB 声发射采集卡主机箱及计算机组成,传感器置于阀门左边 20 cm 处,声发射采样率为 1 MHz,采样时间为 1 s。

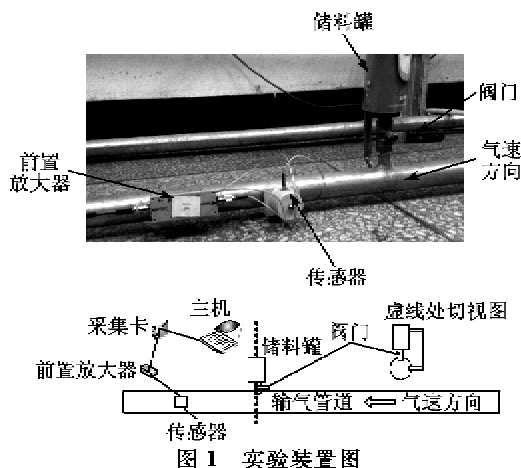


图1 实验装置图

2 实验结果分析

2.1 声信号的时域分析

图2是气速为5 m/s时,采集到的正常管道夹带水和玻璃微珠的时域波形图。由图可知,正常管道的幅值数量级最低,玻璃微珠的幅值数量级最高,液体的幅值次之。分别求出不同气速下,声发射信号的能量如图3所示。由图可知,在管道处于正常工况时,声发射信号主要来自于电流、外界因素等产生的背景噪声,其能量很小。当管道中有液体或固体颗粒存在时,声发射信号能量大于正常管道的声

发射信号能量,且由固体所引起的声发射信号能量也大于液体所引起的声发射信号能量。随着气速的增加,声发射信号能量也随之增大。

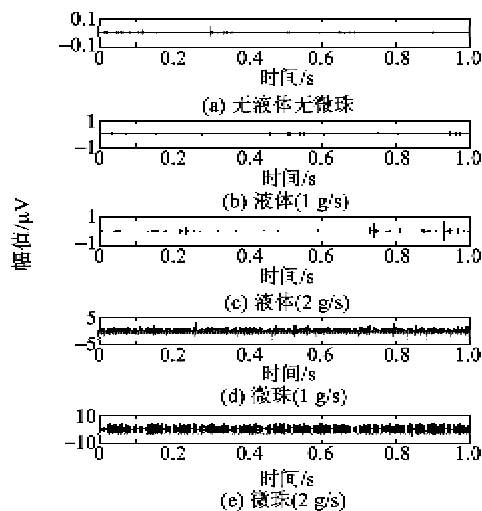


图2 时域波形图

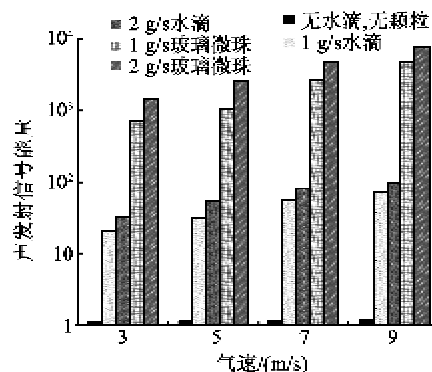


图3 声发射信号能量分布表

表1 不同工况下声发射信号能量的相对变化

气速/(m/s)	无水,无玻璃微珠能量	水的质量流量/(g/s)						玻璃微珠质量流量/(g/s)					
		1			2			1			2		
		能量	A/%	B/%	能量	A/%	B/%	能量	A/%	B/%	能量	A/%	B/%
3	1.13	20.36	—	—	32.63	38	—	730.36	—	—	1 478.19	51	—
5	1.14	32.38	—	37	55.69	42	41	1 056.39	—	31	2 583.84	60	43
7	1.15	56.67	—	43	80.31	30	31	2 687.28	—	60	4 786.35	44	46
9	1.19	71.44	—	21	95.79	29	16	4 862.87	—	44	7 904.06	38	40

注:A为同种物质在气速不变,当质量流量增加1倍时,声发射信号能量的横向对比;B为同种物质在质量流量不变,当气速增大时,声发射信号能量的纵向对比。

在相同气速下,当水和玻璃微珠的质量流量同样都增加一倍时,由玻璃微珠引起的声发射信号能量增加的更快,如表中A所示。同样,从表中B也可看出,在相同的水或玻璃微珠的质量流量下,随着气速的增加,由玻璃微珠引起的声发射信号能量增加的也更快。所以,固体颗粒引发的声发射信号能量对外界条件变化更敏感。

2.2 声信号的小波分析

为了更精确地区分液滴和固体颗粒对声信号影响的不同,对声发射信号进行小波分析。

满足下述条件的一个函数或信号被称为基本小波或者小波母函数^[3]。

$$\int_{\mathbb{R}^+} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中 $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\psi(x)$ 的傅里叶变换, $\psi(x)$ 为小波母函数。

对于实数 $a, b (a \neq 0)$, 则函数

$$\psi(a, b)(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

即为 $\psi(x)$ 生成的小波函数, 又简称小波。 a 为尺度伸缩因子; b 为时间平移因子。

对任意信号 $f(x)$, 其连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \langle f(x), \psi_{a,b}(x) \rangle \quad (3)$$

则其重构信号为

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \iint_{\mathbb{R} \times \mathbb{R}^+} W_f(a, b) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

小波变换是一种时频分析法^[4-5], 它与短时傅里叶变换(STFT)类似, 能局部化分析信号, 但小波变化能自动在信号的高频处时间细分, 在信号的低频处频率细分, 如图4所示。小波变换克服了短时傅里叶变换由于滑动窗函数固定而导致分解后的时频分辨率固定的缺点, 故其有“数学的显微镜”之称。把采集到的信号进行复 Morlet 小波变换^[6], 如图5~10所示。

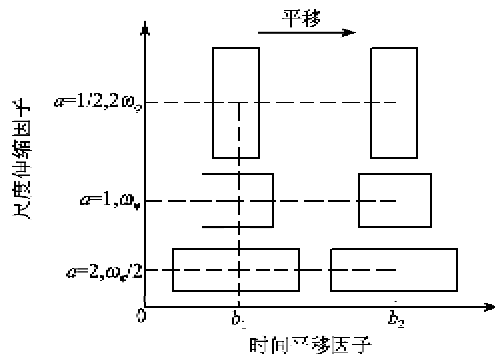


图4 小波变换时-频窗示意图

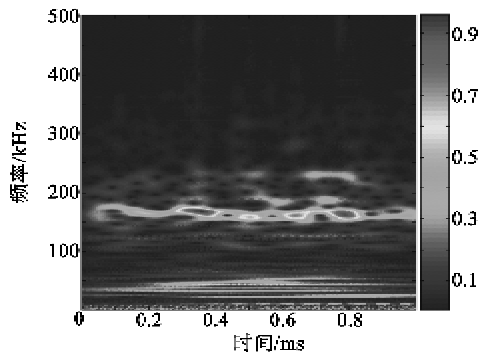


图5 气速为5 m/s下玻璃微珠为1 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

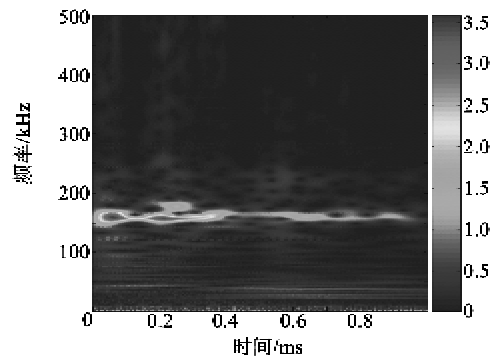


图6 气速为5 m/s下玻璃微珠为2 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

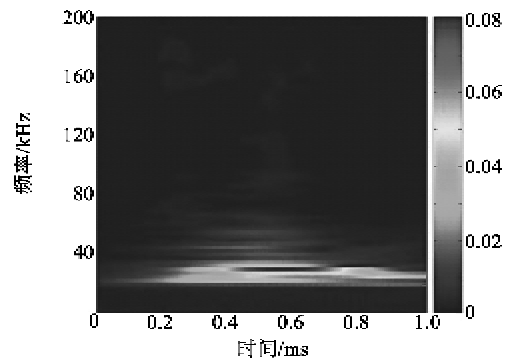


图7 气速为5 m/s下水为1 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

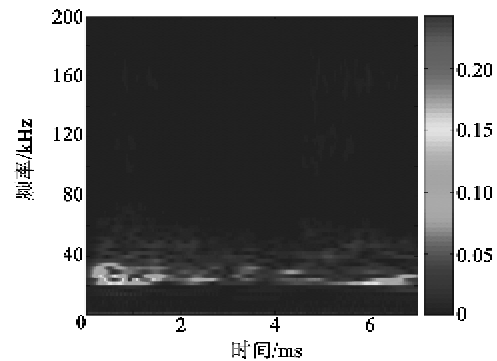


图8 气速为5 m/s下水为2 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

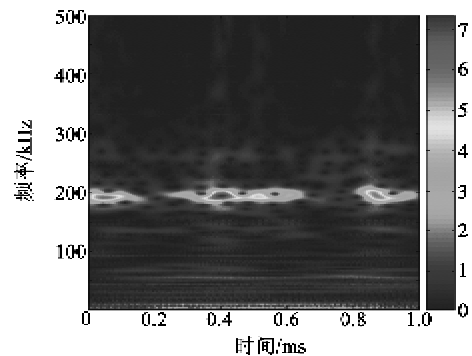


图9 气速为7 m/s下玻璃微珠为2 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

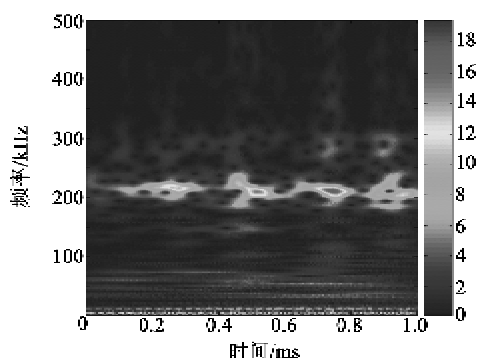


图10 气速为9 m/s下玻璃微珠为2 g/s的质量流量产生声发射信号的小波变换

对比图5,6可见,在相同气速下,质量流量较大的玻璃微珠产生的声发射信号的能量也较大,但其特征频率段都在160~170 kHz。对比图7,8可见,在相同气速,水的不同质量流量下的声发射信号时频图,能量关系和上述有相同的规律,但由水产生的信号特征频率在20~35 kHz。由此得出,在相同气速下,管道内相同物质质量流量越大,所产生的声发射信号能量也越大,但信号的特征频率段受质量流量影响很小,受物质材质影响很大,由水产生的声发射信号的特征频率小于由玻璃微珠产生信号的特征频率。这是由于液体的粘度大于玻璃微珠的粘度,当液体碰撞管壁时,液体会“吸附”管壁上^[7],液体受迫振动,导致液体和管壁间形成共振,由于管壁和液体是不同的物质,导致他们之间的共振频率很小。而流动的玻璃微珠的粘度很小,不会像水一样和管壁形成共振,接受到的声发射信号主要由管壁的单—振动引起,故其振动频率大于由液体引起的振动频率。

对比图6,9,10可发现,在加入同样质量流量固体颗粒时,不同气速下声发射信号的能量和特征频率不同。管道内气速分别为5 m/s,7 m/s,9 m/s时,其信号特征频率分别为160 kHz、190 kHz、210 kHz,且其信号的能量也随之增加。这是因为当气速增大时,管道内的固体颗粒撞击壁面的速率加快,根据Hertz的碰撞理论^[8-9],玻璃微珠与管壁碰撞所产生的声发射频率

$$f = \frac{v}{2.94 \left[\frac{5}{4} \pi \mu_1 \left(\frac{1-\mu_1^2}{M_1} + \frac{1-\mu_2^2}{M_2} \right) \rho_s \right]^{2/5} R_s} \quad (5)$$

式中: v 为玻璃微珠对管壁的垂直速度; μ_1, μ_2 分别为玻璃微珠和管壁的泊松比; M_1, M_2 分别为玻璃微

珠和管壁的弹性模量; R_s, ρ_s 为玻璃微珠的半径和密度。由此可知,碰撞时声发射频率和与小球的对壁面的垂直速度成正比,由于气体速度的增大带动玻璃微珠垂直方向的速度增大,进而导致碰撞时的特征频率也随之相应变大。

3 结束语

通过对采集的声发射信号进行时域和时频分析,发现不同工况与信号能量和频率之间的相关性,证明了声发射检测技术能检测和区分出管道中运动的液体和固体颗粒。但是考虑到实际现场环境的复杂性,外界噪声的影响,以及由于长距离而引起信号的衰减等问题,要实现在线检测还有许多的工作需要研究。

参考文献:

- [1] 李鹤林,吉玲康,田伟.西气东输一、二线管道工程的几项重大技术进步[J].天然气工业,2010,30(4):1-9.
LI Helin,JI Lingkang,TIAN Wei. Significant technical progress in the west-east gas pipeline projects-line one and line two[J]. Natural Gas Industry,2010,30(4):1-9.
- [2] 潘碧霞,徐长航,曹国梁,等.管道泄漏声发射信号的传播特性[J].油气储运,2013,32(10):1141-1145.
PAN Bixia, XU Changhang, CAO Guoliang, et al. Propagation characteristics of acoustic emission signals of pipeline leak[J]. Gas Storage and Transportation, 2013, 32(10): 1141-1145.
- [3] 杨鑫蕊.改进的小波阈值去噪算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [4] 张萍,朱佳.基于Gabor小波和阈值分析的声发射源定位方法[J].压电与声光,2014,36(4):531-537.
ZHANG Ping, ZHU Jia. A novel acoustic emission source localization algorithm based on Gabor wavelet transform and threshold analysis[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(4): 531-537.
- [5] 马丁,石立华,付尚琛,等.基于时频分析的Lamb波散射源定位方法研究[J].压电与声光,2013,35(4):483-486.
MA Ding, SHI Lihua, FU Shangchen, et al. Research on the localization method of lamb wave scattering source based on time-frequency analysis[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(4): 483-486.
- [6] 何正嘉,訾艳阳,张西宁.现代信号处理及工程应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.

(下转第182页)