

气体管道泄漏声源特性研究

闫成稳, 韩宝坤, 鲍怀谦, 蒋相广, 牛家鹏

(山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 气体管道泄漏声源的特性决定了声波法气体管道泄漏检测的精度和适应性。为探究气体管道泄漏声源的特性, 建立了气体管道泄漏的物理模型, 研究了相应的声波产生机理。分析了不同泄漏口径、不同管道压力下的泄漏声源特性并与实验结果进行了对比。结果表明: 气体管道泄漏产生的声源以四极子声源为主, 泄漏声波能量主要集中在 50 Hz 以下, 声压级均值随管道内压和泄漏口径的增大而增大。仿真结果与实验结果对比表明, 基于该仿真方法对输气管道泄漏的声源特性分析是可行的。

关键词: 气动声学; 管道泄漏; 声波法; 声源特性

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-02-0110-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.003

Research on acoustic source characteristics of gas pipeline leakage

YAN Cheng-wen, HAN Bao-kun, BAO Huai-qian, JIANG Xiang-guang, NIU Jia-peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: The acoustic source characteristics of gas pipeline leakage determine the accuracy and adaptability of acoustic leak detection for gas pipelines. In order to explore the acoustic source characteristics of gas pipeline leakage, the physical model of gas pipeline leakage is established and the corresponding acoustic wave generation mechanism is studied. Then the acoustic source characteristics under different leakage apertures and different pipeline pressures are analyzed and compared with experimental results. The results show that the acoustic source of gas pipeline leakage is mainly the quadrupole source and the generated acoustic energy is mainly concentrated below 50 Hz. The average value of sound pressure level is increased with the increase of pipeline pressure and leakage aperture. The comparison between the simulation results and experimental results shows that the simulation method is feasible to analyze the acoustic source characteristics of gas pipeline leakage.

Key words: aero-acoustics; pipeline leakage; acoustic method; acoustic source characteristics

0 引言

使用管道输送天然气等气体具有安全、经济、高效、便于管理等优点, 因此管道在气体输送中占有重要的地位^[1]。但是由于管道设备的老化、地理条件的变化、人为破坏等原因, 管道泄漏事故时常发生。为了最大限度地减小气体管道泄漏带来的人员伤亡、经济损失和环境破坏, 需要及时地发现并准确定位泄漏点。目前, 用于气体管道泄漏的检测方法主要有: 负压波法、分布式光纤法、质量/体积平衡法、低频声波法等, 分布式光纤法铺设成本高, 维护困难; 质量/体积平衡法误判率高, 定位精度差; 负压波法在液体管道中应用较多, 但是由于气体的

可压缩性大, 输送压力范围宽, 泄漏时产生的负压波相对于管道内原始压力的波动不明显, 这就使得负压波法在气体管道泄漏检测中失去了优势; 而声波的传播受管内压力的影响相对较小, 同时相对于低频成分, 高频成分在传播过程中衰减较快, 不适用于远距离检测^[2]。故次声波法与其他方法相比, 具有定位精度高、灵敏度高、监测时间短、误报率低、适应性强等优点^[3]。

鉴于声波法泄漏监测技术的优点, 国内外进行了大量的研究。Mostafapour A 等^[4]将管壁中传播的泄漏声发射信号应用于城市埋地高压燃气管道的泄漏检测与定位中, 并结合小波变换、数字滤波和互相换技术开发了一种新的泄漏检测算法。Jirarungsatian C 等^[5]将声发射技术应用于无法靠近的排水管道泄漏点的检测中, 在时域和频域中分别分析了泄漏声波信号和背景噪声的特性。冯雪松等^[6]使用供水管道泄漏声信号的随机性和频谱分布特性作为泄漏特征, 并提出使用样本熵和功率谱分

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012AM011)资助项目。

作者简介: 闫成稳(1989—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为隔声减噪与声学应用。

通讯作者: 韩宝坤, E-mail: bk_han@163.com

布特征的组合来识别供水管道的泄漏准确度最高。李帅永等^[7]针对输气管道泄漏声发射信号的频散特性，提出了基于模态声发射时频分析的定位方法，有效地抑制了泄漏信号的频散，提高了定位精度。但对于气体管道泄漏声源特性随泄漏口径和管道内压的变化的研究还存在不足，进而影响检测的精度和适应性。本文首先分析了气体管道发生泄漏时声波的产生机理，然后采用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法，计算出了管道泄漏流场，并采用 Lighthill 声类比方法，对泄漏孔径在 5 mm 及以下的气体管道泄漏声源特性进行了仿真研究，最后将仿真结果与实验结果进行了对比，证明了仿真方法的可行性和仿真结果的准确性。

1 气体管道泄漏声波法检测原理

气体管道发生泄漏时，在管道内压差的作用下，气体从泄漏口喷射而出，产生强烈的速度和压力脉动，从而产生以四极子声源为主的气动噪声。Lighthill 波动方程，从 N-S 方程出发，推导出了湍流流场中分布的声源特性，描述了气动噪声的产生机理，Lighthill 波动方程^[8]如式(1)、(2)、(3)所示

$$\frac{\partial^2(\rho-\rho_0)}{\partial t^2}-c_0^2\nabla^2(\rho-\rho_0)=\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

$$T_{ij}=\rho v_i v_j+\delta_{ij}[(p-p_0)-c_0^2(\rho-\rho_0)]-e_{ij} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \delta_{ij}=1, & i=j \\ \delta_{ij}=0, & i \neq j \end{cases}$$

$$e_{ij}=\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\right) \quad (3)$$

式中： e_{ij} 为粘性应力张量的第 (i, j) 个分量； ρ 为气体密度； ρ_0 为自由流体密度； t 为时间； δ_{ij} 为克罗内克符号； v_i 、 v_j 为速度分量； p 为流体的压强， p_0 为流场静压。式(1)表达了全空间气体密度的动态情况。 $\partial^2 T_{ij}/\partial x_i \partial x_j$ 为 Lighthill 四极子声源， T_{ij} 为 Lighthill 湍流应力张量矩阵中的元素，如果该应力张量中的各项等于零，则表示无声波产生；气体管道泄漏时，由于气体射流， $\rho v_i v_j$ 项为有限值，必然会产生声波。

气体管道泄漏时产生的声波信号，一部分沿着管壁传播，但是由于管壁和外部介质(如土壤、空气等)的互相作用，这部分声波在传播一定距离后就基本衰减掉了，另一部分则沿着管道内的气体传播，相比于高频成分，低频成分衰减比较慢，可传播较远距离，安装在管道两端的低频声波传感器检测到泄漏声波后传送给数据处理系统^[3]。其中管道

低频声波传感器可采用变极距型电容式传感器，传感器安装在管道内部，并不接收管壁的振动信号和管内气体压力的波动信号，这样可以大幅提高系统的抗干扰能力；输气管道没有发生泄漏时，传感器将接收到的信号看做背景噪声，当管道发生泄漏时，泄漏声波信号和背景噪声就会同时被传感器接收，通过信号的变换和滤波^[3]，提取并分析出泄漏声波的特征量(如声压级、声功率等)即可判断泄漏是否发生以及泄漏口的大小、形状。同时，根据两端传感器接收到同一泄漏信号的时间差及声速，即可定位泄漏口。其基本原理如图 1 所示。

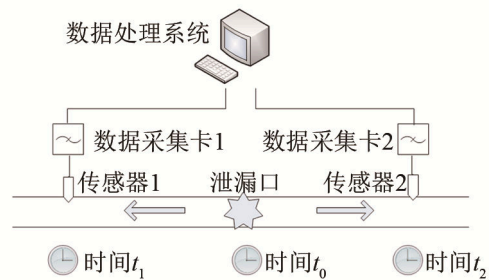


图 1 声波法气体管道泄漏检测原理
Fig.1 Principle of acoustic leak detection for gas pipelines

2 管道泄漏的模型建立

2.1 几何模型建立与网格划分

气体管道泄漏模型如图 2 所示，包括泄漏喷流区和管道内部气体两部分^[9]，管道总长度为 200 mm，管内径为 50 mm，壁厚为 5 mm，泄漏口位于管道中间。采用 ANSYS ICEM CFD 软件建立模型并划分结构网格，为提高流场仿真的精度，对泄漏喷流区进行了网格加密，总的网格数量在 55 万左右。如图 3 所示。

2.1 流体仿真参数设置及结果分析

为进行声学特性分析，需获得泄漏喷流区的流速，故将 CFD 仿真分为两部分：先采用标准 $k-\epsilon$ 方程进行稳态计算初步得到稳态流场，然后采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方程进行瞬态计算^[10]，最终获得泄漏喷流流场和泄漏喷流区流速，

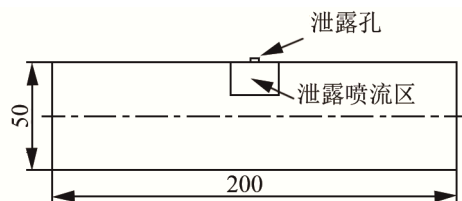


图 2 管道物理模型
Fig.2 Physical model of pipeline

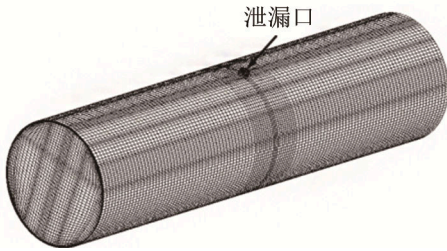


图 3 管道有限元模型
Fig.3 Finite element model of pipeline

流场仿真模拟的关键参数设置如下：管道内介质为空气，设定为可压缩理想气体，其温度为 22℃；管道压力设置为 0.3、0.4、0.5、0.6 MPa 四种情况；管道入口边界条件为压力入口，管道出口边界条件为压力出口，泄漏口末端边界条件为压力出口；管道壁面为绝热壁面，其粗糙度为 0.05 mm，

泄漏的气体管道产生的声波信号沿着管道内气体传播，声波的高频成分迅速衰减，低频成分可传播较远的距离，所以本文研究了 500 Hz 及以下的低频声波的声源特性。为了能精确获得整个研究频段上泄漏声源的特性，瞬态 CFD 仿真时间步长设置为 0.001 s，总共计算 500 步，每一步迭代 200 次。

CFD 瞬态计算过程中每一时间步输出一个泄漏喷流区的流速数据文件，然后将这些流速文件一起导入到 Virtual.Lab Acoustics 软件中，经过傅里叶变换后，便得到频域的四极子声源。完成从流场到声场的数据转移。

图 4 和图 5 是压力为 0.3 MPa、泄漏口径为 2 mm 时，泄漏流场的速度云图和压力云图。

从图 5 可以看出，在泄漏口附近，管道压力迅速由 0.3 MPa 降低至 0.1 MPa，压降区域比较小，但压力脉动比较大，且在泄漏口中间处产生了负压。在该处产生负压的主要原因是：气体绕过凸角会形成膨胀波系，流经膨胀波，气体的压力、密度、温度都会进一步下降，流速则会进一步上升^[11]。这也是在图 4 中对应位置处喷流速度比较高的原因。

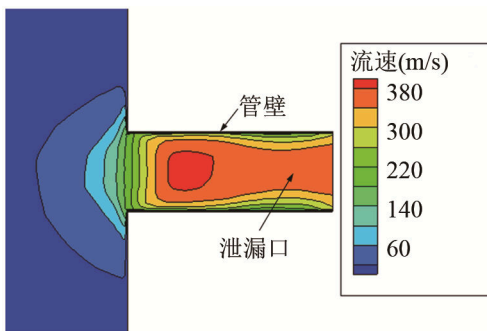


图 4 泄漏口附近流场速度云图
Fig.4 Velocity contour near the leak hole

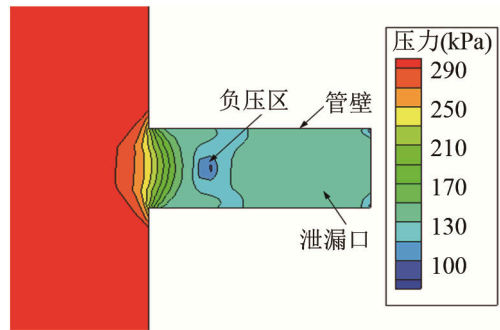


图 5 泄漏口附近流场压力云图
Fig.5 Pressure contour near the leak hole

且从图 4 可以看出，在泄漏口附近的喷流速度比较高，最高已经到达 380 m/s，属于超音速流动。较高的喷流速度，较大的压力脉动，将引起较大的气动噪声，这为基于声波法的气体管道泄漏检测提供了可能。

3 仿真结果及分析

3.1 场点选择

泄漏喷流区为四极子声源区域，管道内部为声传播的区域。但是由于管道泄漏口中心处的喷流速度太大，无法将声波传感器布置在泄漏口中心处，为与实验结果进行对比，将场点设置在实验过程中安装传感器的位置，其距泄漏口中心处的水平距离为 50 mm，轴向距离和径向距离均为 0，如图 6 所示，用虚拟麦克风对场点处的声压级进行监测。仿真结果表明，在该场点所测得的声源特性与在管道泄漏口中心点处所测得的声源特性是一致的。

仿真时将管道两端面和泄漏口端面定义为无反射边界条件。

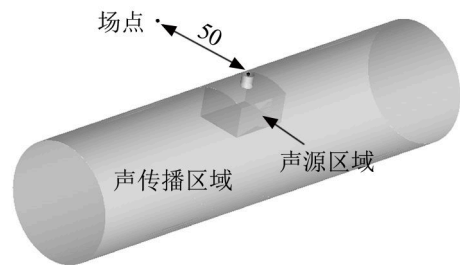


图 6 仿真模型
Fig.6 Simulation model

3.2 仿真结果及分析

图 7 和图 8 分别为场点处在相同压力、不同泄漏口径和不同压力、相同泄漏口径下的声压级频域特性，图 9 和图 10 分别为不同泄漏口和不同管道

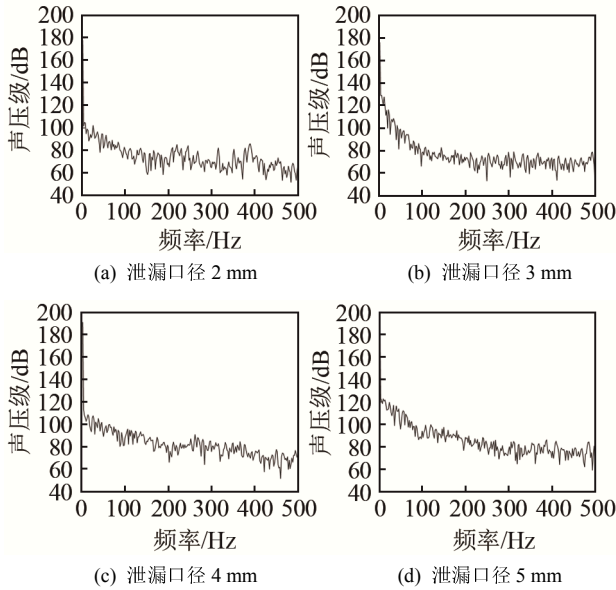


图 7 不同泄漏口径下声源特性
Fig.7 Characteristics of acoustic source under different leakage apertures

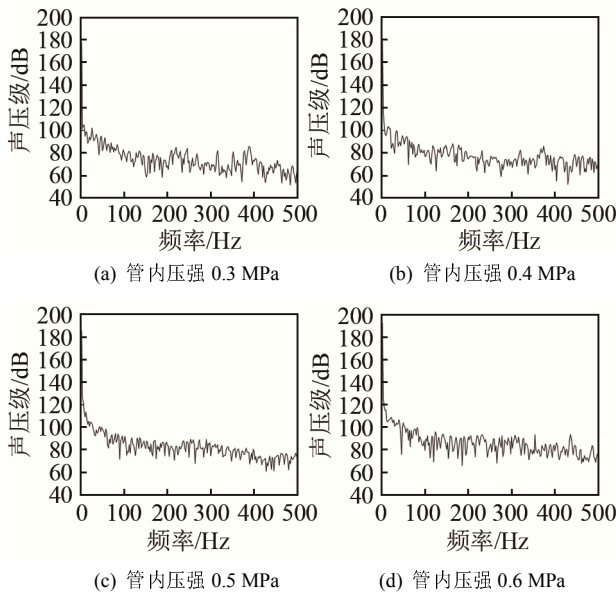


图 8 不同管道内压下声源特性
Fig.8 Characteristics of acoustic source under different pipe pressures

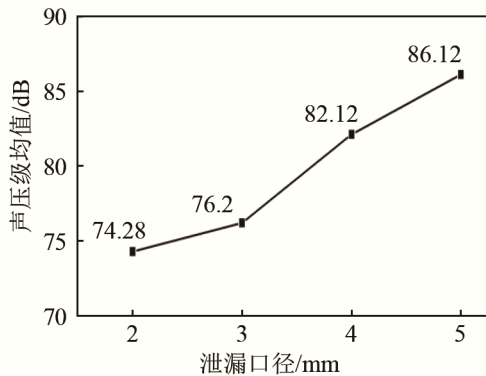


图 9 声压级均值随泄漏孔径的变化曲线
Fig.9 The change of average sound pressure level with leak aperture

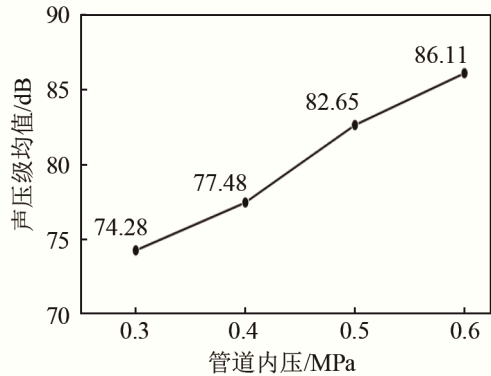


图 10 声压级均值随管道内压的变化曲线
Fig.10 The change of average sound pressure level with pipe pressure

内压下声压级均值的变化曲线。对仿真结果进行分析可得：

(1) 气体管道泄漏声源属宽频噪声，但 50 Hz 以下的声波能量较为集中，且频率越低，声压级越高，声波能量越高，声压级随着频率的增加而震荡衰减。

(2) 气体管道泄漏的声压级均值随泄漏口径和管道内压的增大而增大，主要原因在于：泄漏口径越大，泄漏速度越大，湍流强度也就越大，故声压级越高；管道内压越大，泄漏口处的内外压差越大，湍流强度越大，故声压级越高。

(3) 输气管道泄漏产生的气动噪声的声压级比较大，且随着泄漏声波的传播，在管内气体的黏性不太大且声波频率不太高时，声波吸收系数和频率的平方成正比^[12]，故低频声波可传播较远的距离。所以采用低频声波信号来检测输气管道的泄漏是可行的。

4 实验验证

为验证仿真方法的可行性和结果的正确性，利用相似原理搭建了气体管道泄漏声源特性实验系统，其原理框图如图 11 所示。

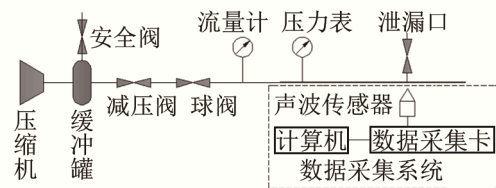


图 11 气体管道泄漏实验系统框图
Fig.11 Experimental system of gas pipeline leakage

气体管道泄漏实验系统的管道为内径 50 mm、管壁 5 mm、末端封住的无缝钢管，在管道上等间

隔布置直径分别为 2、3、4、5 mm 的圆形泄漏口，两孔间隔 300 mm，管道两端与泄漏口的距离均为 500 mm。压缩机、缓冲罐和减压阀为系统提供压力稳定的清洁气源。

试验过程：压缩机提供的高压空气通过缓冲罐稳定并滤除多余的水分、杂质后，经过减压阀和球阀输送到管道中，最后从泄漏口处泄漏出去，调节减压阀，使管道中的相对压力分别为 0.2、0.3、0.4 MPa 和 0.5 MPa，在不同的压力下测量泄漏口径分别为 2、3、4、5 mm 时泄漏声源的频谱特性，如图 12~15 所示。

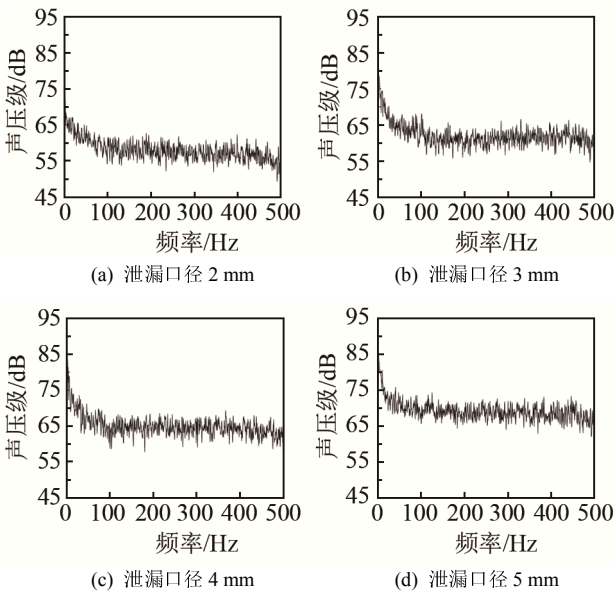


图 12 实测不同泄漏口径下声源特性特性
Fig.12 Measured characteristics of acoustic source under different leakage apertures

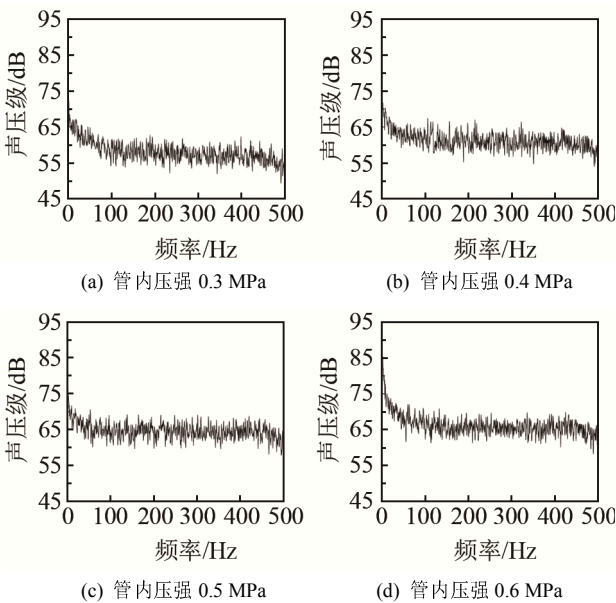


图 13 实测不同管道内压下泄漏声源特性特性
Fig.13 Measured characteristics of acoustic source under different pipe pressures

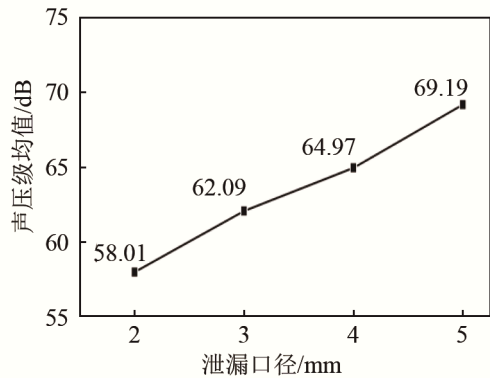


图 14 声压级均值随泄漏孔径的变化曲线(实测)
Fig.14 The change of average sound pressure level with leak aperture (measured)

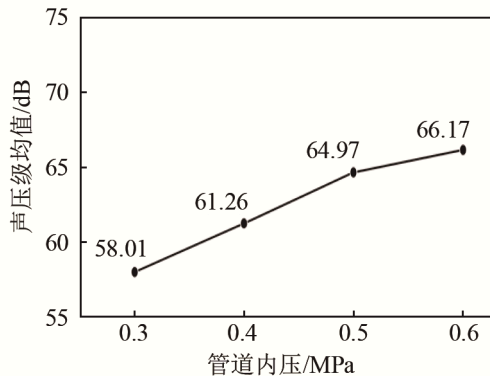


图 15 声压级均值随管道内压的变化曲线(实测)
Fig.15 The change of average sound pressure level with pipe pressure (measured)

信号采集系统为 LMS 信号采集系统，数据采集前端为 LMS SCADASIII 数据采集箱，软件为 LMS Test.lab 9A；声波传感器为美国 PCB 公司的 378B02 自由场声波传感器，频响范围为 3.75 Hz~20 kHz。

对比图 12~15 和图 7~10 可以看出，管道泄漏声波频谱特性的实验结果与仿真结果是一致的。实验结果较好地体现了仿真得到的泄漏声源的特性，说明本仿真结果是比较准确的，可以为气体管道泄漏声波法检测实验平台的搭建和泄漏定位系统的开发提供理论依据。但是仿真得到的声压级均值高于实验得到的声压级均值，分析原因主要有：(1) 在仿真过程中定义的壁面粗糙度和实际管道的壁面粗糙度相比，存在一定的偏差；(2) 仿真过程中假设壁面类型为绝热壁面，即不存在管道和外界空气的热交换，因而能量损失比实际管道要小。(3) 实验过程中，空气介质中存在水蒸气、固体小颗粒等杂质，对试验结果造成了一定的影响。

实验结果和用四极子声源作为泄漏声波的声源所获得的仿真结果的良好一致性，也证实了气体管道泄漏产生的声源是以四极子声源为主的。其主

要原因在于，由于膨胀波的影响，在泄漏口中间位置处产生了负压，且气流的速度也比较大，导致泄漏口中的压力和速度脉动比较大，进而产生了较大的以四极子声源为主的气动噪声。

5 结 论

本文针对气体管道在不同压力、不同泄漏口径下的泄漏声源特性进行了深入的研究，建立了泄漏气体管道的物理模型。

通过对气体管道泄漏流场的分析研究，发现：气体管道泄漏口处的喷流速度已经超过声速。故气体管道泄漏声源以四极子声源为主。

在流场计算结果的基础上进行了声学计算，得到了场点处声压级的频谱特性，并对不同压力、不同泄漏口径下的泄漏声源特性进行了分析，发现：在 50 Hz 以下的低频段泄漏声波能量较高，声压级均值随管道内压和泄漏口径的增大而增加，

通过与实验结果的对比，验证了仿真方法的可行性和结果的准确性。并进一步证实了基于次声波法检测气体管道泄漏的可行性。

参 考 文 献

- [1] 王桂增, 叶昊. 流体输送管道的泄漏检测与定位[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [2] 万顺. 基于次声波法的输气管道泄漏检测技术研究[D]. 保定: 河北大学, 2014.
- [3] 刘翠伟, 李玉星, 王武昌, 等. 输气管道声波法泄漏检测技术的理论与实验研究[J]. 声学学报, 2013, **38**(3): 373-381.
- LIU Cuiwei, LI Yuxing, WANG Wuchang, et al. Theoretical study and experimental study on leak detection for natural gas pipelines based on acoustic method[J]. Acta Acustica, 2013, **38**(3): 372-381.
- [4] Mostafapour A, Davoodi S. Leakage locating in underground high pressure gas pipe by acoustic emission method[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, **32**(2): 113-123.
- [5] Jirarungsatian C, Jomdecha C. Acoustic emission application for unapproachable pipeline drain point leakage detection[J]. Springer Proceedings in Physics, 2015, **158**: 459-467.
- [6] 冯雪松, 文玉梅, 甄锦鹏, 等. 管道泄漏声振动信号的特征分析[J]. 声学技术, 2015, **34**(5): 413-418.
- FENG Xuesong, WEN Yumei, ZHEN Jinpeng, et al. Feature analysis of pipeline leakage acoustic signals for leak identification[J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(5): 413-418.
- [7] 李帅永, 王鹏飞, 严冬, 等. 输气管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, **37**(9): 2068-2075.
- LI Shuaiyong, WANG Pengfei, YAN Dong, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, **37**(9): 2068-2075.
- [8] Goldstein M E. 气动声学[M]. 闫再友译. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [9] Ben-Mansour M, Habib M A, Khalifa A, et al. Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction [J]. Computers&Fluids, 2012, **57**(30): 110-123.
- [10] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [11] 张鸣远, 景思睿, 李国君. 高等工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [12] 金浩, 张来斌, 梁伟, 等. 天然气管道声源特性及传播机理数值模拟[J]. 石油学报, 2014, **35**(1): 172-177.
- JIN Hao, ZHANG Laibin, LIANG Wei, et al. Simulation research on leak source characteristics and propagation mechanism for natural gas pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, **35**(1): 172-177.