

# 天然气管道球阀内漏发声机理及检测试验\*

李振林<sup>1,2</sup>, 张海峰<sup>3</sup>, 郝一博<sup>4</sup>, 张宁<sup>1,2</sup>, 雷红祥<sup>1,2</sup>, 陈鑫<sup>1,2</sup>, 刘治超<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 北京, 102249)

(2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室 北京, 102249)

(3. 中石油管道科技研究中心 廊坊, 065000) (4. 中石油东部管道有限公司 上海, 200120)

**摘要** 球阀作为高压天然气输送管道的主要设备,其内漏时的喷流气体会产生声发射信号,通过研究该声发射信号特征规律将有助于阀门内漏流量量化检测。针对这一问题,进行了天然气输送管道球阀内漏发声机理和检测试验研究,分析了阀门内漏声发射现象产生的机理和内漏流量检测评价方法。在此基础上,应用声发射检测系统对 3 种不同尺寸内漏球阀进行了检测试验,通过试验分析了球阀在不同内漏流量下的声发射信号频谱特征分布规律,并采用小波包分析方法进行信号特征参数(信息熵、均方根、频域峰值)提取。拟合特征参数与内漏流量关系曲线,采用  $R^2$  (确定系数)指标对曲线拟合程度进行评价,评价结果表明,采用均方根值(root mean square,简称 RMS)的曲线拟合程度最高( $R^2$  为 0.979),可以用于天然气输送管道球阀内漏流量的量化检测。

**关键词** 天然气管道;球阀;发声机理;检测实验

**中图分类号** TH48

## 引言

据国家安全生产监督管理总局统计,2014 年我国陆上油气输送管线总长度约 12 万公里,其中天然气管道为 7.54 万公里,输气管道运行的安全性在很大程度上取决于所安装阀门的性能<sup>[1-2]</sup>。BP 公司对相关阀门失效统计分析表明,输气管道存在 5%~10% 的泄漏阀门。因此,进行管道阀门的内漏试验规律研究将对管道运行安全起到重要的保障作用。

目前,国内外学者对阀门内漏研究主要分为以下 3 个方面:内漏流场和声场仿真模拟研究、不同工况下的内漏声学时频域特征研究以及声发射检测技术和特征参数计算研究。戴光等<sup>[3]</sup>采用 Lighthill 方程进行了闸阀的喷流声场仿真研究。杨晶等<sup>[4]</sup>以水为介质进行了低压力(<1MPa)条件下的 DN80 球阀内漏声学频域特征分析。文献[5-7]以空气为介质进行了压力<1MPa 下 DN80 球阀内漏声发射特征参数(RMS)与内漏流量关系模型的建立及检测仪器开发研究。Meland 等<sup>[8]</sup>进行了 DN100 球阀在 4MPa 压差下的以空气、水为介质的内漏声学频域谱特征研究。文献[9-11]进行了阀门内漏诊断及

机理分析。文献[12]进行了 DN80 球阀的内漏声发射信号特征参数计算和不同内漏程度的分类识别研究。从国内外近期的研究成果来看,阀门内漏过程中声学特征变化主要与阀门压差、内漏孔径以及阀门尺寸有关,内漏检测方面的研究主要集中在低压力(压差<1MPa)、小口径(尺寸<DN100)条件下。由于在天然气管道领域中,阀门多为大口径(DN150~DN1016),同时运行压力最高可达到 10MPa,因此,针对输气管道中的阀门内漏特征分析还需要进行高压条件下的大口径阀门内漏试验研究。

笔者在结合前期国内外研究结果的基础上,依托中石油西气东输公司进行现场高压力球阀内漏声发射检测试验研究,分析球阀在高压力条件下发生天然气内漏时声学特征,并在此基础上进行了阀门尺寸、压差以及内漏流量等参数与声发射信号特征关系的研究。

## 1 阀门内漏噪声产生机理及其特征

### 1.1 阀门内漏噪声产生的机理

阀门内漏过程产生的噪声本质为气动噪声,起

\* 国家自然科学基金资助项目(51106180);中国石油天然气股份科技专项资助项目(2012E-2802)  
收稿日期:2015-10-08;修回日期:2016-04-18

因于气体内部的脉动质量源、作用力的空间梯度以及应力张量的变化。输气管道阀门内漏过程中的压力分布曲线如图 1 所示。在阀门内漏孔及附近,由于截流效应会造成较大的压力降,形成最高的流动速度,内漏噪声也主要存在于该区域。阀门处于关闭状态,泄漏为微小泄漏,可以认定为阀门上游压力  $P_1$  为定值。当下游压力  $P_0$  降低,会使在泄漏孔处达到较高速度而出现喷流现象。如果达到声速或者超声速,则会在孔口附近产生强烈的湍流运动,同时有可能会伴随激波的产生。此时,当喷流噪声辐射进入阀门周围和下游管道时,会通过脉动压力与阀门和管道连接系统相互作用产生噪声。文献[13]指出:对于简单孔口,离该泄漏孔 3 倍管径内噪声由湍流占主要地位;当距离孔口 10 倍管径之外,则是由声波激励管壁产生的振动,而不是由压力脉动湍流产生。

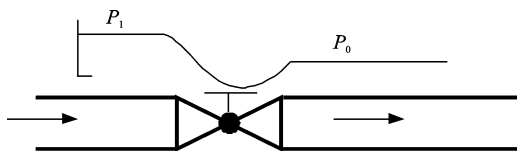


图 1 阀门内漏过程管线压力分布

Fig. 1 The static pressure along pipeline

对于阀门内漏过程中产生的噪声,其声源主要包括以下 3 个方面:

- 1) 阀门内漏过程中高速气体射入到静止或者相对低速的阀门下游管道而产生的喷流噪声;
- 2) 内漏流体在流道中受到复杂固体流道边界影响而产生的强涡流噪声,高速气流与阀门和管道内壁相互作用而产生的噪声;
- 3) 当内漏流道截面积发生变化成收缩喷口,同时气流的驻点压力大于临界面压力时会形成阻塞喷注噪声,此时由于阀门喷注附近压力的不连续性将会产生冲击波的相互干涉,进而形成阻塞喷注中的冲击气室,此时的喷注过程除了会产生湍流混合噪声之外也会产生冲击伴随噪声,冲击伴随噪声则是阻塞喷注噪声的主要组成部分。

## 1.2 阀门内漏声发射信号评价参数的选取

阀门内漏喷流过程复杂,声传播衰减以及检测过程中受环境噪声干扰的影响,如何准确地从检测到的声发射信号中提取有效声发射源信息将对阀门内漏流量的准确预测起到决定性作用。因此,针对输气管道阀门内漏的非平稳性,笔者采用了信息熵、均方根和频域峰值 3 种特征参数进行阀门不同内漏工况下的声发射信号特征规律研究。

熵概念来自于统计热力学,也称之为热熵,用来表达系统中分子状态的混乱程度。在信息理论中也有熵的概念,该熵称之为信息熵或者 Shannon 熵<sup>[14]</sup>。在信息论中,信息熵可以理解为某种特定信息出现的概率,当一个系统表现的越有序时,其所对应的信息熵值就会越低。同样,当一个系统表现出越混乱时,对应的信息熵值就会越高。对于阀门泄漏过程中产生的声发射信号随内漏流量的增加,声发射信号越为混乱,因此阀门内漏声发射信号强度与内漏流量对应变化规律可以采用信息熵进行分析和评价。信息熵的定义为  $H = - \sum_{i=1}^L p_i \log p_i$ , 其中:  $L$  为信号源状态的总数;  $p_i$  为信号取值的概率,  $\sum_{i=1}^L p_i = 1, p_i \in [0, 1]$ 。

笔者根据阀门内漏中声发射信号为连续型信号的特点,除提取信息熵参数外,还在时域内提取均方根值,在频域范围内提取峰值参数进行内漏特征规律研究。假设一个声发射样本为  $x[0], x[1], \dots, x[N-1]$ , 其对应特征参数可表示为

$$\text{均方根} \quad \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2}$$

$$\text{峰值} \quad P = \max[\text{DFT}(x)]$$

## 2 高压、大口径球阀内漏声发射检测方法及其试验

### 2.1 球阀内漏声发射检测原理

输气管道阀门内漏所产生的声发射源主要为阀门出现磨损、腐蚀及划伤等损伤情况时,阀门的密封面密封不严导致内漏而产生的弹性波声发射源。因此,可以通过吸附在阀门上的声发射传感器检测内漏声发射信号,分析处理后进行阀门内漏的定性、定量和定位识别。建立声发射检测信号与阀门内漏流量的对应关系,需要考虑影响声发射信号的相关因素,包括阀门类型、流体密度、声音在流体中传播速度、阀门压差、介质温度、流速、内漏孔结构尺寸及阀门结构尺寸等。上述影响因素中,阀门类型、阀门压差、阀门结构尺寸和内漏孔结构尺寸对声发射信号的变化起到了主要的影响作用。笔者将天然气管道常用的球阀作为研究对象,以天然气为试验介质进行试验研究,分析球阀在不同阀门尺寸、压差及流量下的声发射信号特征,分析信号特征参数与阀门内漏流量间的对应关系,为后期球阀内漏流量量化检测提供有效的检测参数。

## 2.2 高压、大口径球阀内漏检测试验

输气管道实际运行过程中多为高压工作状态,且球阀尺寸使用范围广(DN50~DN1016)。为了分析高压条件下不同尺寸球阀内漏过程中气体喷流噪声声学特征变化规律,以及特征参数与内漏流量对应关系,本试验在中国石油西气东输南京分站(国家大流量天然气计量中心)进行,对常用 DN150, DN200, DN250 这 3 种口径球阀进行试验研究。试验场地见图 2,选择其中 3 条管线安装待测球阀,管线基本参数见表 1。



图 2 试验现场条件

Fig. 2 Field experiment conditions

表 1 管线基本参数

Tab. 1 Basic parameters of pipeline

上游管线 基本参数	管线尺寸		
	DN150	DN200	DN250
长度/m	39.650	36.690	63.200
管径/m	0.152	0.203	0.254
面积/m <sup>2</sup>	0.018	0.032	0.051
体积/m <sup>3</sup>	0.723	1.189	3.201
介质	天然气		

试验过程中采用本实验室所开发的声发射检测系统进行输气管道球阀在不同尺寸、压差以及内漏孔径下内漏声发射信号的特征检测。该检测采用宽频双通道声发射传感器(SR150N),检测信号经 40dB 放大器进入高速数据采集器进行 A/D 转换采集(采样频率为 200kHz),采集后的内漏声发射信号上传至上位机进行声发射信号的特征参数计算。声发射检测系统基本性能参数如表 2 所示。对每种球阀,分别建立不同压差下(2,4,5MPa)内漏流量与声发射特征参数对应关系。由于试验过程中球阀内漏流量微小,计算球阀内漏流量需通过读取安装在靠近待测球阀上游的数字压力计、温度计、测量时间以及上游管道容积,应用气体状态方程计算在标况下气体内漏流量。

表 2 采集系统性能指标

Tab. 2 Performances of the system

部件	性能参数
声发射传感器	型号为 SR150N,工作频率为 20 kHz~220 kHz,中心频率为 150 kHz
前置放大器	放大增益为 40 dB
数据采集器	型号为 MCC-1208HS,采样频率为 200 kHz,采样精度为 12 bit

本实验具体检测过程如图 3 所示,其详细检测过程如下:

- 1) 将声发射传感器 A 和 B 置于空气中,检测环境噪声并进行传感器初始化标定;
- 2) 如图 3 所示,将声发射传感器 A 与阀门上游管道 A 处表面经耦合剂耦合后采用磁性夹具进行固定,声发射传感器 B 固定于下游 B 处;
- 3) 分别给定球阀上游压力为 2,4,5MPa,下游为放空状态;
- 4) 每种测试压力下依次调节球阀进行模拟阀门内漏;
- 5) 调试准备好后,每分钟记录 1 次球阀压差、温度以及声发射检测时域数据,待压力计计数下降至 20kPa 时停止采集数据,完成一个试验周期;
- 6) 通过气体状态方程计算该压力下球阀内漏流量;
- 7) 提取声发射信号特征参数建立特征参数与内漏流量对应关系。



图 3 检测示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of detection

## 3 试验数据结果分析

### 3.1 阀门内漏声发射信号频谱特征分析

设定 DN150 球阀压差为 2MPa,阀体未内漏和发生内漏两种工况,其中内漏工况下内漏流量分别为 10.81,19.89 和 41.14L/min,内漏过程中声发射检测时域信号及频域信号如图 4 所示。从图中可以

看出:图 4(a)为阀门在未发生内漏情况下检测的管道基准背景噪声信号,该环境噪声为一非平稳波动信号,通过傅里叶变换后管道基准噪声为一宽频带的白噪声;图 4(b)为球阀发生小泄漏时检测到声发射信号,可知阀门开始发生泄漏时主要会产生 30kHz 以下的低频喷流噪声信号,高频信号部分没有明显变化;当阀门内漏流量增加到 19.89L/min 时,如图 4(c)所示,虽然信号频率范围变化不大,但是其幅值由 10.81L/min 时频率峰值的 5.5dB 增加到 10dB;当内漏流量继续增大到图 4(d)所示的 41.14L/min 时,则不仅产生的 30kHz 以下喷流噪声强度开始急剧加强,同时在 30kHz~70kHz 的高频部分也会出现强烈的喷流噪声。

通过阀门不同内漏流量下的声发射信号变化特征可以发现,阀门内漏过程中产生的喷流噪声为一宽频信号,且在不同内漏流量下,内漏声发射信号不同频率范围内信号幅值变化有所不同。因此,可分析内漏声发射信号频谱特征寻求内漏流量与声发射信号间对应关系。

### 3.2 基于小波包分解下的特征参数分析

如何准确地从检测到的声发射信号中提取有效声发射源信息,将对阀门内漏特征分析起到决定性作用。小波包分析由于其具有独特的变时窗性能使其对信号的时/频域分析都具有优越的分析能力,是分析复杂声发射信号的有效工具。笔者采用小波包变换和信息熵、均方根和频域峰值相结合的方法进行声发射信号处理,采用该方法对检测声发射信号进行不同频带的小波包分解处理,对分解后频带内信号进行特征参数计算,分析阀门在不同内漏工况下声发射信号变化规律。声发射信号的小波包分解的核心问题为小波基函数的选择,根据球阀内漏声发射信号特点和数据处理的要求,需要小波基在时域范围内具有紧支性、在频域具有快速衰减性特点,

笔者参照文献[15]采用 db5 小波基进行 3 层小波包分解。

基于小波包分解下的特征参数计算过程具体流程为:首先,对声发射信号进行 3 层小波包分解,在第 3 层中得到  $S(3,0) \sim S(3,7)$  共 8 个小波包频带,其分别对应(单位为 kHz):  $0 \sim 12.5, 12.5 \sim 25, 25 \sim 37.5, 37.5 \sim 50, 50 \sim 62.5, 62.5 \sim 75, 75 \sim 87.5, 87.5 \sim 100$ ;然后,对每个小波包频带系数进行信号重构;最后,对 8 个频带内的重构信号在时域范围内分别提取信息熵、均方根值和频域范围内的频域峰值参数值。由于阀门内漏信号为一非平稳信号,不同小波包频带内特征参数变化规律有所不同,因此需要获取最具有变换规律的那组频带信号进行分析。笔者对 DN150 球阀在 2MPa 压差下内漏声发射信号进行 3 层小波包分解后计算特征参数(均方根值)的变换规律,如图 5 所示。对每个小波包频带内的计算所得均方根值采用幂指数( $y = ax^b + c$ )进行拟合,并计算拟合曲线的确定系数( $R^2$ )作为评价指标,判断其拟合程度。确定系数本身是通过数据的变化来表征拟合程度的好坏,其正常取值范围为  $[0, 1]$ 。当数值越接近 1 时,其模型对数据的拟合程度越好。

图 5 为不同小波包频带内声发射信号均方根值与内漏流量对应关系,其中  $S$  为原始信号,不同小波频带拟合曲线  $R$  方如下: $R = 0.932, R_0 = 0.917, R_1 = 0.971, R_2 = 0.985, R_3 = 0.956, R_4 = 0.969, R_5 = 0.989, R_6 = 0.993, R_7 = 0.994$ 。从中可以看出:未采用小波分解前的原始信号  $S$  的拟合曲线  $R = 0.932$ ,拟合程度较低,在内流流量小于 5L/min 时拟合曲线出现负值,与真实结果不符;而采用了小波分解后选取特定频带如  $S(3,7)$ ,拟合  $R^2$  可达到 0.994。因此,采用小波分解方法可以提高内漏流量曲线拟合程度,提高了内漏流量量化检测准确度。但是由于  $S(3,7)$  频带内声发射信号均方根值幅值

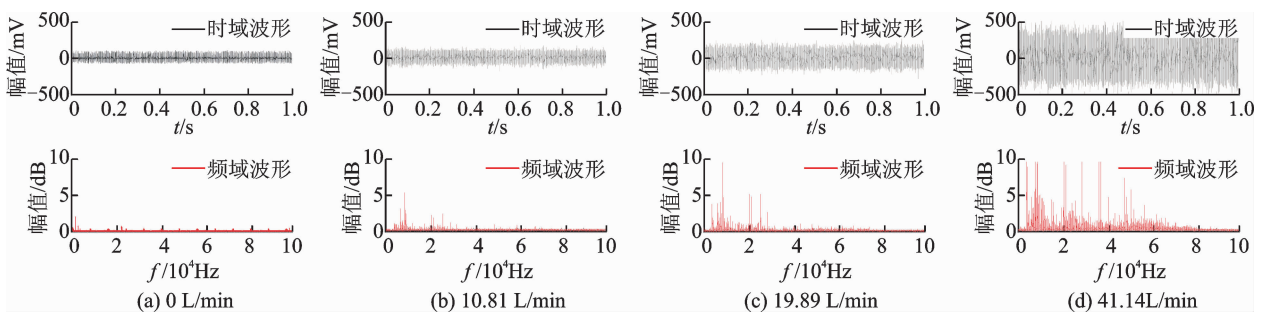


图 4 2MPa 压差下球阀内漏声发射信号特征

Fig. 4 Ball valve leakage acoustic emission signal characteristic under 2MPa

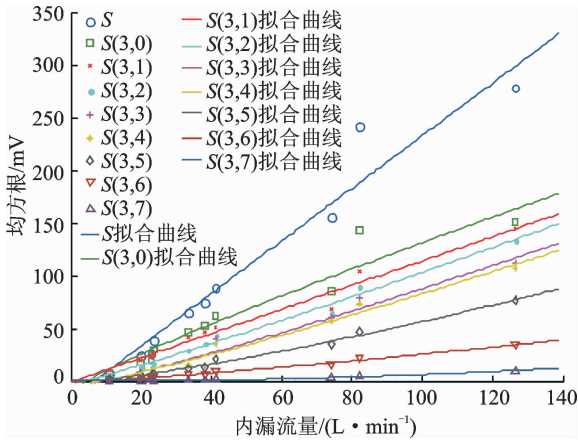


图 5 不同小波包频带内漏均方根值

Fig. 5 RMS values of different wavelet packet frequency bands

变化范围较小,变化规律不明显,因此笔者采用  $R^2$  为 0.993 的  $S(3,6)$  小波包频带信号进行重构后求取信息熵、均方根和频域峰值,并采用幂指数 ( $y = ax^b + c$ ) 进行拟合,寻求对应关系。设定球阀压差分别为 2,4,5MPa,每种工况下通过调节阀门关闭程度进行不同内漏流量声发射检测。其中:DN150 球阀在  $S(3,6)$  频带内的特征参数变化规律见图 6; DN200 球阀特征参数变化规律见图 7; DN250 球阀特征参数变化规律见图 8。

从图 6(a)~图 8(a)中可以看出,信息熵可以反映球阀内漏喷流噪声波动性的稳定程度,在同一压差下,随着气体内漏流量的增加,内漏的气体噪声波动性越为剧烈,其表现出信息熵值越高。图 6(b)~

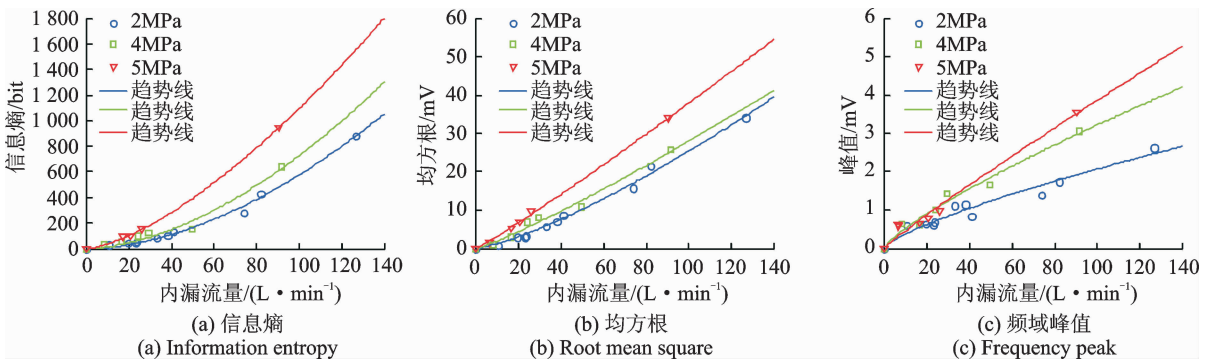


图 6 DN150 球阀声发射信号特征参数与内漏流量对应关系

Fig. 6 Acoustic emission signal characteristics-leakage flow curve for ND150 ball valve

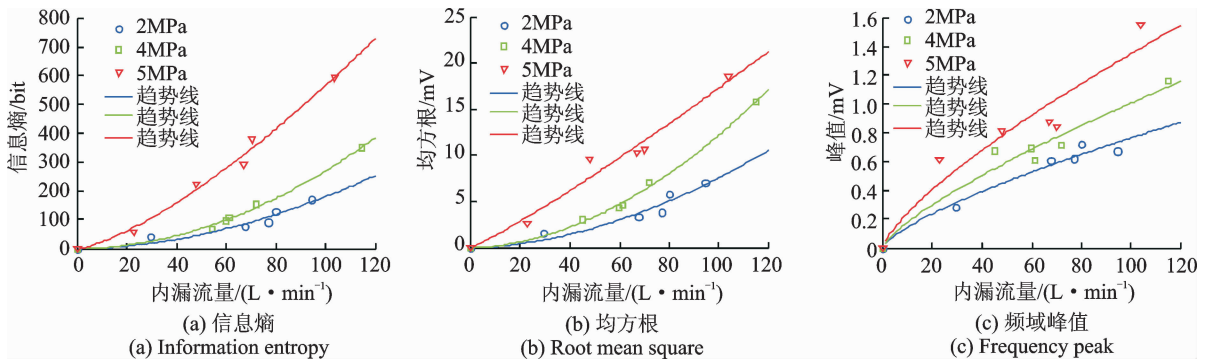


图 7 DN200 球阀声发射信号特征参数与内漏流量对应关系

Fig. 7 Acoustic emission signal characteristics-leakage flow curve for ND200 ball valve

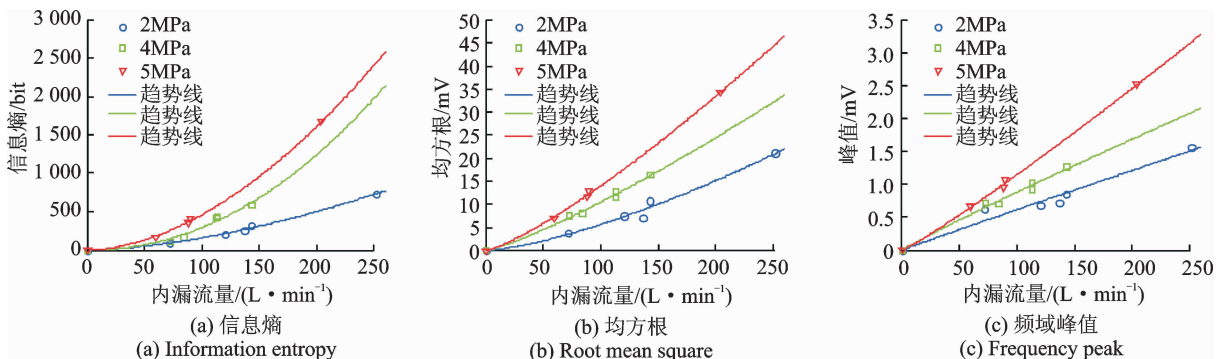


图 8 DN250 球阀声发射信号特征参数与内漏流量对应关系

Fig. 8 Acoustic emission signal characteristics-leakage flow curve for ND250 ball valve

图 8(b)为声发射信号均方根值,表现为同一压差下,内漏流量增加时,声发射信号均方根值也随之增加。图 6(c)~图 8(c)是在频域范围内分析内漏声发射信号与内漏流量对应关系,表现为流量增加时,频域信号峰值随之增加,与图 4 中随流量增加声发射信号频域峰值变化规律相一致。

对比内漏流量相同而压差不同的工况,试验设定原理为:对高压差(如 4MPa)的阀门给定较小的内漏孔尺寸,而较低压差(如 2MPa)的阀门给定较大的内漏孔尺寸,通过调整合适的内漏孔尺寸,实现两种不同压差的阀门达到同一内漏流量。通过检测声发射信号可以看出,高压差下的内漏声发射信号幅值会高于低压差下信号幅值,这是由于阀门上游气体静止,动能为零。对于相同质量的气体,当压强越高时产生的气体压能就越大,此时相同质量流量气体内漏到下游管道时,压能越高的气体发声做功越多,从而检测到的声发射信号幅值越高。

图 9 为 2MPa 压差下, DN150, DN200, DN250 这 3 种尺寸球阀声发射特征参数均方根与内漏流量关系曲线。从图中可以看出,相同流量下 DN150 球阀测得特征参数高于 DN200 球阀和 DN250 球阀。分析其本质为:若阀门尺寸增加,阀门泄漏孔处产生的喷流噪声随着下游混合区空间的增大,内漏喷流噪声通过管壁传播能量减小,因此当球阀尺寸增加时其表现出的声发射信号强度随之减弱。

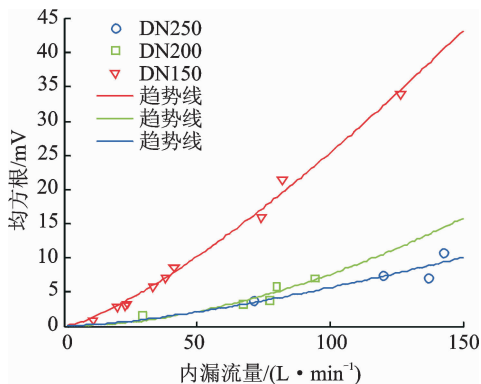


图 9 2MPa 压差下不同尺寸球阀声发射均方根变化关系  
Fig. 9 Ball valve acoustic emission signal RMS for different sizes under 2MPa

为了对比 3 种不同特征参数与内漏流量拟合关系,笔者计算所得 3 种声发射信号特征参数拟合模型确定系数( $R^2$ )如表 3 所示。其中:采用均方根值的特征参数拟合模型确定系数的平均值最高(均为 0.979),其拟合程度最好;其次是信息熵;最后为频率峰值。

表 3 不同参数拟合曲线确定系数

Tab. 3 Determination coefficients for different fitting curves

尺寸/ mm	压差/ MPa	确定系数( $R^2$ )		
		信息熵	均方根	频率峰值
DN150	2	0.990	0.993	0.942
DN150	4	0.970	0.980	0.965
DN150	5	0.995	0.999	0.970
DN200	2	0.960	0.918	0.964
DN200	4	0.971	0.996	0.946
DN200	5	0.952	0.965	0.889
DN250	2	0.986	0.975	0.949
DN250	4	0.947	0.990	0.981
DN250	5	0.924	0.999	0.998
平均值		0.966	0.979	0.956

通过高压大口径球阀检测试验可以得出,球阀内漏过程产生的喷流噪声频率分布为一宽频率,且随着内漏流量的增加,信号不仅在低频范围内有所增加,而且在高频部分内同样有所增加。声发射信号特征参数与内漏流量、压差及阀门尺寸存在一定的对应关系。信息熵、均方根、频率峰值能够分别从不同角度反映了阀门泄漏特征,可为后期阀门内漏量化检测提供检测评价参数,其中均方根值最能反映内漏流量变化。

## 4 结论

1) 本研究针对天然气输送行业中的大口径球阀进行内漏噪声源特征分析,总结了输气管道阀门内漏噪声主要来源。试验结果表明,球阀在高压条件下的内漏过程所产生的喷流噪声的频率分布为一宽频范围,当阀门发生小泄漏时会产生 30kHz 以下的低频喷流噪声信号,当内漏流量继续增大到 40L/min 时,不仅产生的 30kHz 以下喷流噪声强度开始急剧加强,同时在 30kHz~70kHz 的高频部分也会出现强烈的喷流噪声。

2) 声发射信号特征参数与内漏流量、压差及阀门尺寸呈现出一定的对应关系,通过计算对比拟合曲线计算拟合程度确定系数( $R^2$ )表明,均方根值为最佳球阀内漏流量表征参数(确定系数的平均值最高为 0.979)。采用以上特征参数分别从不同角度反映了球阀内漏声学特征,可为后期采用多参数融合技术对球阀内漏流量进行量化检测确定了可行性。

3) 本试验采用阀门尺寸较大,且上游稳压管道较长,试验过程繁杂,声发射信号与内漏关系拟合采用的数据点数较少,若要获得更为准确的对应关系,

在后期的试验中可继续补充数据点数。另外,本研究只采用天然气为介质进行试验,后期可继续采试氮气为介质进行试验,对比两种介质测试结果的差异性。

## 参 考 文 献

- [1] 梁伟,张来斌,郭磊. 大口径天然气管道声波信号的降噪方法[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(6):970-974.  
Liang Wei, Zhang Laibin, Guo Lei. Noise reduction for large-diameter gas pipeline acoustic signals [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012,32(6):970-974. (in Chinese)
- [2] 朱喜平. 天然气管道球阀的维护及故障排除技术[J]. 天然气工业,2005(7):102-104.  
Zhu Xiping. Maintenance and troubleshooting of ball valves for gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2005(7):102-104. (in Chinese)
- [3] 戴光,王兵,张颖,等. 闸阀气体内漏喷流声场的数值模拟[J]. 流体机械,2007(3):29-32.  
Dai Guang, Wang Bing, Zhang Ying, et al. Numerical simulation of the sound field generated by gate valve inner leakage [J]. Fluid Machinery, 2007(3):29-32. (in Chinese)
- [4] 杨晶,李录平,饶洪德,等. 基于声发射检测的阀门内漏故障模式诊断技术研究[J]. 动力工程学报,2013(6):455-460.  
Yang Jing, Li Luping, Yao Hongde, et al. Diagnosis of valve leakage fault patterns based on acoustic emission detection [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013(6):455-460. (in Chinese)
- [5] Prateepasen A, Kaewwaewnoi W, Kaewtrakulpong P. Smart portable noninvasive instrument for detection of internal air leakage of a valve using acoustic emission signals[J]. Measurement,2011, 44(2): 378-384.
- [6] Kaewwaewnoi W, Prateepasen A, Kaewtrakulpong P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage[J]. Measurement,2010, 43(2): 274-282.
- [7] Noipitak M, Prateepasen A, Kaewwaewnoi W. A relative calibration method for a valve leakage rate measurement system[J]. Measurement,2011, 44(1): 211-218.
- [8] Meland E, Henriksen V, Hennie E, et al. Spectral analysis of internally leaking shut-down valves [J]. Measurement,2011, 44(6): 1059-1072.
- [9] Seong S, Hur S, Kim J, et al. Development of diagnosis algorithm for the check valve with spectral esti-

mations and neural network models using acoustic signals[J]. Annals of Nuclear Energy,2005, 32(5): 479-492.

- [10] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等. 输气管道气体流经阀门气动噪声产生机理分析[J]. 振动与冲击,2014,33(2):152-157.  
Liu Cuiwei, Li Yuxing, Wang Wuchang, et al. Analysis on the mechanism of aero-acoustic noise generated by gas flow through valves of natural gas pipelines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(2):152-157. (in Chinese)
- [11] 李振林,张海峰,夏广辉. 基于声发射理论的阀门气体内漏量化检测研究[J]. 振动与冲击,2013,15:77-81.  
Li Zhenlin, Zhang Haifeng, Xia Guanghui. Quantitative detection of valve internal air leakage based on acoustic emission theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,15:77-81. (in Chinese)
- [12] Zhang Haifeng, Li Zhenlin, Ji Zhongli. Intelligent leak level recognition of gas pipeline valve using wavelet packet energy and support vector machine model[J]. Insight,2013, 55(12): 670-674.
- [13] Izmit A, McDaniel O H, Reethof G. The nature of noise sources in control valves[C] // Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings. New York:Institute of Noise Control Engineering, 1977.
- [14] Shannon C E. A note on the concept of entropy[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423.
- [15] 宗福兴,税爱社,汪辉,等. 基于CCA和WT的油库阀门内漏声发射信号去噪[J]. 仪器仪表学报,2014,9(35):2004-2011.  
Zong Fuxing, Shui Aishe, Wang Hui, et al. Denoising method for acoustic emission signal in oil depot internal valve leakage inspection based on CCA and WT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,9(35): 2004-2011. (in Chinese)



**第一作者简介:**李振林,男,1967年9月生,博士、教授。主要研究方向为石油、天然气计量技术及输气管道设备故障诊断技术。曾发表《基于声发射理论的阀门气体内漏量化检测研究》(《振动与冲击》2013年第15卷)等论文  
E-mail:zhenlinli@263.net

**通信作者简介:**张海峰,男,1986年2月生,工程师。主要研究方向为输气管道阀门内漏检测技术。  
E-mail:haifengzhang1986@163.com