

# 利用声发射的往复空压机环状阀泄漏故障诊断试验

王跃飞<sup>1,2</sup>, 张振涛<sup>2</sup>, 张波<sup>1</sup>, 杨东辉<sup>1</sup>, 彭学院<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国科学院理化技术研究所, 100190, 北京)

**摘要:** 利用声发射信号对往复空压机气阀进行了故障诊断,并以某往复空压机的排气阀为例,结合有效电压和能量对气阀漏气、阀片裂纹、阀片断裂及阀片变形等故障进行了测量,从而获得了故障特征信号. 研究表明:随转角变化的声发射信号包络波形能体现排气阀启、闭的特征位置,气阀漏气、阀片变形及断裂等会导致气阀启、闭特征位置发生变化;根据启、闭特征位置偏离度及相应的有效电压和能量,可以判断气阀故障的严重程度;声发射包络波形平均幅值及相应的有效电压和能量,可以体现气阀漏气、阀片变形及断裂等故障. 通过试验结果还发现,阀片裂纹不能通过声发射信号来识别.

**关键词:** 气阀;故障诊断;声发射;往复压缩机

**中图分类号:** TH457 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0026-05

## Experiment on Fault Diagnosis of Air Compressor Ring Valve Leakage Using Acoustic Emission

WANG Yuefei<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhentao<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, YANG Donghui<sup>1</sup>, PENG Xueyuan<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The faults of self-acting valves in a reciprocating air compressor can be diagnosed using the acoustic emission. Four typical valve faults including the crack, rupture and deformation in the valve discs and the leakage through the flow passage were investigated. The acoustic emission of the failed discharge valves was collected from an air reciprocating compressor. The fault features were extracted by comparing the acoustic emission signals from the failed valves with those from the normal valves. The results show that the characteristic locations of the opening and closing of the discharge valve could easily be determined by the envelope waveform of the acoustic emission signals, and the changes in these locations were identified as the valve faults including the rupture and deformation in the valve discs and leakage. The extent to which the valve failed could be estimated by the deviation of the opening/closing locations from the standard ones, the RMS, and the energy. The rupture and deformation in the valve discs and leakage could also lead to the increase in the amplitude of the acoustic emission wave, the value of RMS, and the energy. However, the crack in valve discs could not be identified by acoustic emission signals effectively.

**Keywords:** valve; fault diagnosis; acoustic emission; reciprocating compressor

气阀是往复压缩机的易损件,其状态好坏直接影响着压缩机的热力性能和可靠性. 气阀故障约占往复

压缩机总故障的61%以上<sup>[1]</sup>,是导致非计划停机的最主要原因. 为了提高生产效率、降低维修费用,提前识

别可能导致严重后果的气阀故障是十分必要的。

利用压力信号可以监测往复压缩机状态<sup>[2-4]</sup>,但是安装传感器需要在气缸上打孔,实际应用非常不便。基于振动信号和声发射信号的诊断是一种非侵入式方法,便于使用<sup>[5-7]</sup>。基于振动信号的气阀故障诊断技术,信号频率在 10 kHz 以内,该频段也包含了一般机械噪声,信号的信噪比较低,不利于后续的分析处理。基于声发射技术的气阀故障诊断在超声波段进行,超声波频段的信号能较好地描述气阀的工作状态,大大排除了环境噪声的影响,信噪比较高,有利于后续的分析处理。该技术在柴油机气阀、压力管道泄漏及空压机故障诊断中已经取得了很好的效果<sup>[8-12]</sup>。

环状阀结构简单、制造方便、有良好的经济性和可靠性,在往复空压机、工艺压缩机中被广泛应用。环状阀与网状阀、舌簧阀等其他类型气阀在结构上存在较大差异,因此本文仅针对环状阀开展了声发射技术气阀故障诊断的可行性研究,通过对比正常气阀的声发射信号和故障信号实现故障诊断,并利用气缸内压力信号验证了诊断结果的合理性。

1 理论分析

声发射故障诊断技术是通过监听、分析机械内部发出的声发射信号来诊断机械故障的,声发射信号分为突发型和连续型。往复压缩机气阀开启和关闭时阀片会撞击升程限制器和阀座,从而产生突发型声发射信号。狭小通道中气体泄漏会产生连续型声发射信号,所以利用它可以监测气阀泄漏故障。在声发射信号参数中,有效电压值(采样时间内信号电平均值的均方根值)主要用于连续型声发射信号的评价。当气阀泄漏时,信号的能量会增强,所以信号能量(信号包络线下的面积)也可作为泄漏故障的特征参数。理论上,气阀的声发射信号可以反映气阀的工作状态,通过对比、分析,再结合有效电压值和信号能量值,可以诊断出气阀的故障。往复压缩机工作时的压力变化可以准确反映出吸排气阀开启、关闭以及阀片颤振等工作状态,也是反映气阀故障最直接、最可靠的信号。所以,本文用气缸内压力信号来验证声发射技术诊断结果的正确性。

某往复压缩机在排气阀正常工作时声发射信号及压力随曲轴转角的变化如图 1 所示。图中线段 CD、EF、MN 分别表示压缩机正常工作时膨胀结束、吸气结束和排气阀开启的位置。从图 1 可以看出:声发射信号曲线可以反映排气阀各时刻的动作,

在 MN 处气阀打开,排气开始,阀片撞击升程限制器并产生突发型声发射信号;当曲轴转角  $\theta$  为  $360^\circ$  时,排气结束,气阀关闭,阀片撞击阀座并产生突发型声发射信号。在排气结束到下一次排气开始之间,排气阀无动作,所以无明显声发射信号。压缩机工作时,气阀随着气缸内压力变化做出相应的动作。当排气结束时,气缸内气体开始膨胀,气缸内压力降低,见图 1 中  $\theta$  从  $0^\circ$  到 CD 的压力曲线;当  $\theta$  转到 CD 所示角度时,膨胀结束,吸气阀打开,吸气开始,气缸内压力变化见图 1 中 CD 到 EF 之间的压力曲线;当  $\theta$  转到  $180^\circ$  时,吸气结束,吸气阀关闭,压缩开始进行,气缸内压力开始升高,见图 1 中 EF 到 MN 之间的压力曲线;当  $\theta$  转到 MN 所示角度时,排气阀打开,排气开始进行,气缸内压力变化见图 1 中 MN 到  $360^\circ$  之间的压力曲线;当  $\theta$  转到  $360^\circ$  时,排气结束,排气阀关闭。

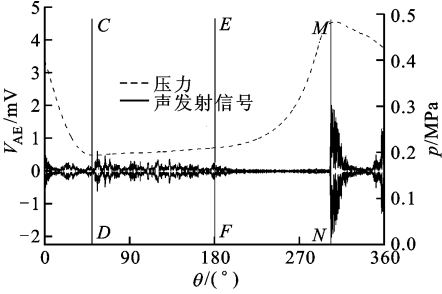


图 1 气阀正常工作时声发射信号和压力信号

2 试验研究

本文试验在 V 型双级单作用往复空压机上进行,对象是二级排气阀,气阀类型为环状阀。根据长期经验,人为制造了 4 种典型的气阀故障:阀片断裂、阀片变形、气阀漏气及阀片裂纹,如图 2 所示,其中气阀漏气故障是通过在阀座上安装螺钉使得阀片

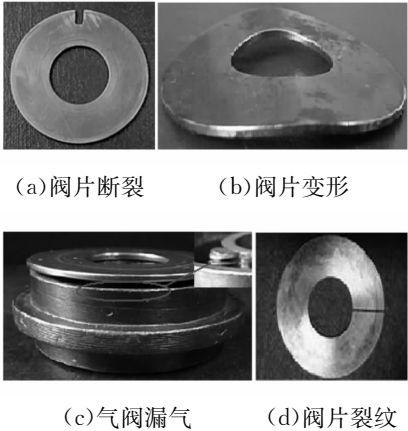


图 2 故障气阀图

无法贴合阀座密封面实现的. PXR02 型声发射传感器以磁座吸附的方式安装在二级排气阀阀盖表面, 传感器频率带宽为 10~70 kHz, 谐振频率为 20 kHz, 前置放大器的增益为 40 dB. 在二级气缸缸盖上打孔并安装压力传感器, 以采集二级气缸缸内压力信号. 压力传感器的固有频率为 380 kHz, 精度为  $\pm 0.1\%$ , 频率响应为固有频率的  $1/5\sim 1/3$ . 上止点信号用反光板和光电开关记录. 试验用传感器均由生产厂家进行了标定, 以保证测试的可靠性. 数据采集卡以 125 kHz 的采样频率采集声发射、止点和压力信号, 信号通过调理箱和采集卡放大、滤波、A/D 转换后送入计算机, 供后续分析处理. 气阀故障诊断试验台如图 3 所示.

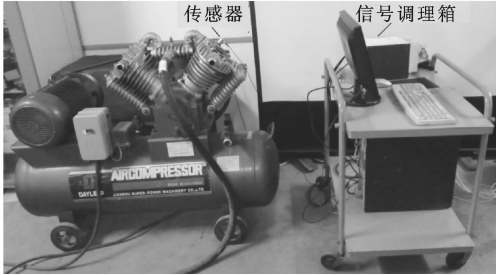


图 3 气阀故障诊断试验台

3 结果与讨论

因为气阀阀盖表面距信号源比较近, 信号传播过程中的衰减很小, 阀盖表面信号所含气阀状态信息丰富, 所以试验中分别采集了气阀正常、阀片断裂、阀片变形、气阀漏气及阀片裂纹时阀盖处的声发射信号. 往复压缩机的运行环境复杂, 采集的信号中会掺杂其他零部件的声发射信号, 如气体通过活塞环开口泄漏的信号及活塞环与气缸摩擦的信号等, 但是这些信号衰减快, 通过滤波后这些信号很微弱, 不足以影响气阀的声发射信号. 气体通过狭小通道泄漏时产生的声发射信号频率一般为几十赫兹, 本文分别用 10~20 kHz、20~45 kHz、45~60 kHz 带通进行滤波, 未滤波和滤波后的声发射信号波形如图 4 所示. 通过对比分析发现, 气阀阀盖处 20~45 kHz 之间的声发射信号能很好地描述气阀的工作状况, 所以本文对频率在 20~45 kHz 之间的声发射信号进行了分析.

为了能直观地了解各时刻气阀的状态, 本文分析了气阀在曲轴转角域的声发射信号和压力信号. 假设压缩机曲轴角速度恒定, 利用相邻止点信号, 将采集到的声发射信号和压力信号映射至转角域. 压

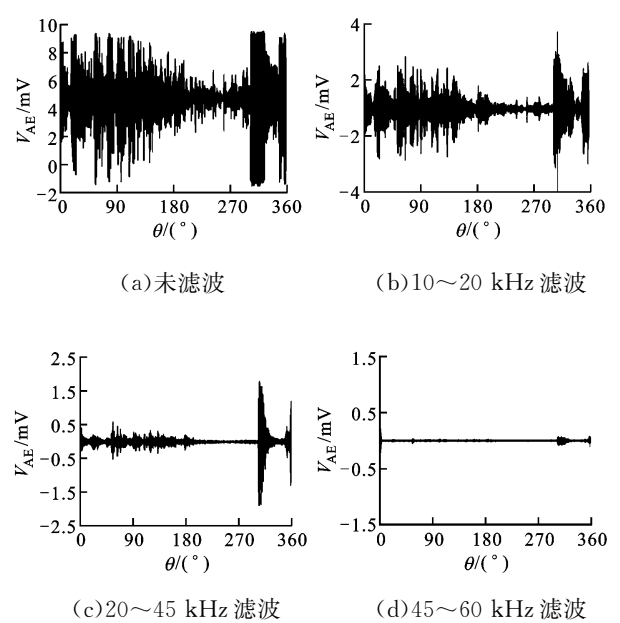


图 4 声发射信号未滤波及滤波后的波形

缩机运行时, 一个周期内的负载变化会引起压缩机转速变化, 所以本文的数据处理方法会引起阀片开启、关闭角出现误差, 但相对于阀片故障来说可以忽略不计. 正常和故障气阀的声发射信号特征参数如表 1 所示.

| 表 1 正常和故障气阀的声发射信号特征参数 |         |         |         |         |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 特征参数                  | 气阀正常    | 阀片断裂    | 气阀漏气    | 阀片变形    | 阀片裂纹    |
| 有效电压 /mV              | 0.177 4 | 0.232 0 | 0.319 7 | 0.387 5 | 0.217 0 |
| 能量 /mV·(°)            | 45.81   | 89.15   | 124.40  | 138.20  | 70.57   |

3.1 阀片断裂

气阀断裂时声发射信号和压力信号随曲轴转角的变化如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 阀片断裂时排气阀打开位置为 255°, 比正常时提前了 47°, 说明气阀存在泄漏. 因为阀片断裂时有缺口, 见图 2a, 高压气体通过缺口进入气缸, 缸内压力升高而提前达到排气压力, 所以排气过程提前, 即排气阀提前打开. 提前的角度随泄漏的严重程度而变化, 泄漏越严重, 单位时间内进入气缸的高压气体越多, 缸内压力升高得越快, 达到排气压力的时间越早, 排气阀打开的时间提前得越多. 排气结束后, 高压气体通过缺口泄漏而产生连续型声发射信号, 所以相对于正常气阀, 阀片断裂时在排气阀关闭后的连续声发射信号幅值明显增大. 阀片断裂时阀片撞击升程限制器和阀座的情况与正常气阀相同, 所以在排气过程中仍有与气阀开启、关闭相对应的明显的突发型声发射信号.

从表 1 可以看出,阀片断裂时有效电压和能量比正常时大,比气阀漏气和阀片变形时小,说明阀片断裂时泄漏程度在这 3 种故障中最小. 压力曲线体现出的气阀状态与声发射诊断结果一致. 从图 5 还可以看出,与正常情况相比,气阀断裂时吸气压力升高,膨胀过程延长. 这是因为,在膨胀阶段有高压气体进入气缸,证明排气阀泄漏,仍有明显排气过程,证明气阀漏气不严重.

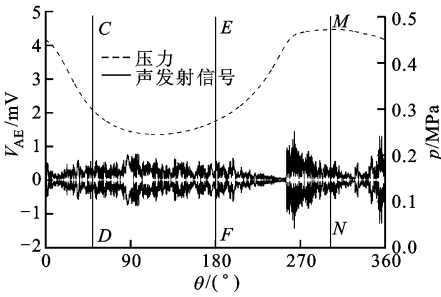


图 5 阀片断裂时声发射信号和压力信号

3.2 气阀漏气

气阀漏气时声发射信号和压力信号随曲轴转角的变化如图 6 所示. 从图 6 可以看出,排气阀打开位置比正常时提前了  $67^\circ$ ,比阀片断裂时提前  $20^\circ$ ,在排气过程结束后仍有由泄漏产生的明显连续型声发射信号,说明气阀漏气比阀片断裂时泄漏更为严重,此时气阀开启产生的声发射信号与正常时不同,有多个突发型声发射信号,如图 6 中 Q 处所示. 这是因为,阀座上有颗粒物,该颗粒使得阀片倾斜,从而导致阀片各部分到升程限制器的距离有所不同,所以气阀打开时阀片各部分撞击升程限制器的时间和速度不同. 从表 1 可以看出,气阀漏气时有效电压和能量比阀片变形时小,比阀片断裂时大,说明气阀漏气时的泄漏比阀片断裂时大,但没有阀片变形时严重. 从图 6 还可以看出,气阀漏气时吸气压力和膨胀过程的变化均比阀片断裂时大,压力曲线接近于正弦曲线,无明显排气过程,说明气阀漏气时的泄漏比阀片断裂时严重,该结果与声发射诊断结果一致.

3.3 阀片变形

阀片变形时声发射信号和压力信号随曲轴转角的变化如图 7 所示. 从图 7 可以看出,排气阀打开位置比正常时提前了  $73^\circ$ ,比阀片断裂时提前了  $26^\circ$ ,比气阀漏气时提前了  $6^\circ$ ,说明泄漏最为严重. 阀片变形时声发射信号曲线中有多个突发型声发射信号,如图 7 中 A、B 处所示,与气阀漏气相比,阀片变形撞击而产生的突发型声发射信号明显增多. 这是

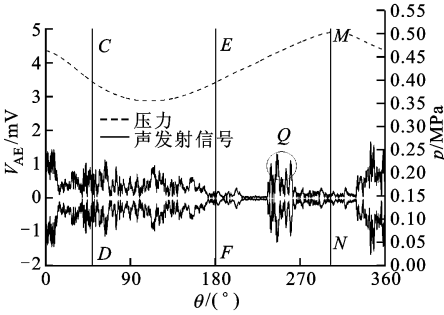


图 6 气阀漏气时声发射信号和压力信号

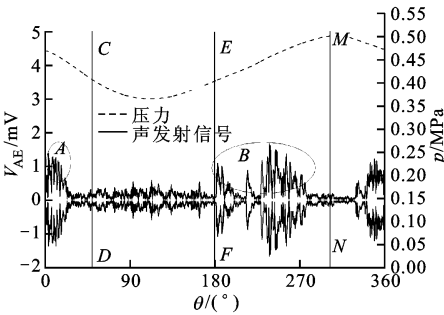


图 7 阀片变形时声发射信号和压力信号

因为,阀片表面变形使得气阀工作时阀片会多次撞击阀座和升程限制器. 从表 1 可以看出,阀片变形时有效电压和能量比阀片断裂和气阀漏气时大,说明阀片变形泄漏最为严重. 从图 7 还可以看出,阀片变形时吸气压力和膨胀过程变化比阀片断裂及气阀漏气时大,压力曲线接近于正弦曲线,无明显排气过程,说明阀片变形泄漏最为严重,该结果与声发射诊断结果一致.

3.4 阀片裂纹

阀片裂纹时声发射信号和压力信号随曲轴转角的变化如图 8 所示. 从图 8 可以看出,声发射信号与正常时大致相同,说明故障轻微,不能有效识别. 从表 1 可以看出,阀片裂纹时的有效电压和能量与气阀正常时非常接近,压力曲线与正常气阀时大致相同,证明气阀状态接近于正常. 可见,包络波形分析对阀片裂纹故障不敏感.

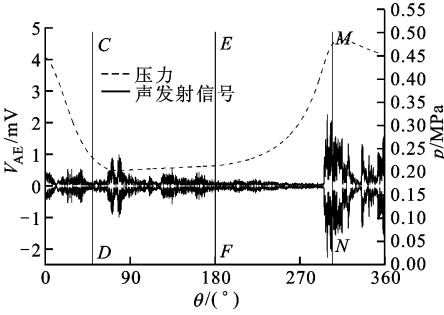


图 8 阀片裂纹时声发射信号和压力信号

## 4 结 论

本文采用声发射技术对往复空压机环状气阀进行了故障诊断研究,通过分析气缸内压力变化验证了诊断结果.研究表明,采用声发射技术诊断往复压缩机环状阀故障是可行的,得出了声发射诊断环状阀故障的如下相关特征.

(1)随转角变化的声发射信号包络波形能很好地体现排气阀开启、关闭的特征位置.气阀漏气、阀片变形及断裂等气阀故障都会导致气阀开启、关闭的位置发生变化.

(2)利用声发射信号能识别气阀是否发生故障,根据开启、关闭特征位置偏离度和有效电压、能量,可以判断气阀故障的严重程度.声发射包络波形平均幅值、有效电压和能量可以体现气阀漏气、阀片变形及断裂等故障,各种故障引起的气阀泄漏都会导致幅值升高,有效电压和能量增大.

(3)声发射技术对气阀的初始故障,如阀片裂纹是不敏感的,为了更全面地诊断气阀故障,还需要对此进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 林京,刘红星,屈梁生.功率谱谱距及其模糊测度在气阀故障诊断中的应用[J].化工机械,1997(3):168-170.  
LIN Jing, LIU Hongxing, QU Liangsheng. Fault diagnosis of valve using power spectrum distance and fuzzy measure [J]. Chemical Machinery, 1997(3): 168-170.
- [2] ELHAJ M, ALMRABET M, RGEAI M, et al. A combined practical approach to condition monitoring of reciprocating compressor using IAS and dynamic pressure [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010(39): 186-192.
- [3] MANEPATIL S S, TIWARI A. Fault diagnosis of reciprocating compressor using pressure pulsations [C] // International Compressor Engineering Conference, Purdue, USA: University of Purdue, 2006: 17-20.
- [4] 孙嗣莹,何云涛,任廷荣.往复式压缩机填料密封的机械故障诊断方法[J].西安交通大学学报,1996,30(8):51-56.  
SUN Siying, HE Yuntao, REN Tingrong. Machinery fault diagnosis of packing seal in reciprocating compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(8): 51-56.
- [5] 王晓冬,何正嘉,訾艳阳.滚动轴承故障诊断的多小波

谱峭度方法[J].西安交通大学学报,2010,44(3):77-81.

WANG Xiaodong, HE Zhengjia, ZI Yanyang. Spectral kurtosis of multiwavelet for fault diagnosis of rolling bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 77-81.

- [6] SONGPON K, PORNCHAI N. Condition monitoring of valve clearance fault on a small four strokes petrol engine using vibration signals [J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2010, 32(6): 619-625.
- [7] AHMED M, GU F, BALL A D. Fault classification using an artificial neural network based on vibrations from a reciprocating compressor [C] // Computing and Engineering Researchers' Conference. Huddersfield, UK: University of Huddersfield, 2010: 92-97.
- [8] ELAMIN F, FAN Y, GU F, et al. Detection of diesel engine valve clearance by acoustic emission [C] // Computing and Engineering Researchers' Conference. Huddersfield, UK: University of Huddersfield, 2009: 7-13.
- [9] 王潜龙,冯全科,屈展,等.基于声发射与小波包理论的压力管道泄漏检测[J].西安交通大学学报,2003,37(5):515-518.  
WANG Qianlong, FENG Quanke, QU Zhan, et al. Pressure pipe leakage detection based on the acoustic emission and wavelet packet theory [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 515-518.
- [10] 杨剑锋,李良,张斌.活塞杆疲劳裂纹声发射监测的实验研究[J].无损探伤,2007,31(4):21-23.  
YANG Jianfeng, LI Liang, ZHANG Bin. Experimental research on the piston rod fracture detection using acoustic emission [J]. Nondestructive Inspection, 2007, 31(4): 21-23.
- [11] 马波,高金吉,江志农.往复压缩机活塞杆断裂早期预警技术的研究[J].机械强度,2008,30(3):445-449.  
MA Bo, GAO Jinji, JIANG Zhinong. Research on the piston rod fracture early warning technique of reciprocating compressor [J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(3): 445-449.
- [12] 蒋旭鑫,曹军义,李锐,等.基于声发射和关联维数的空气压缩机故障诊断技术研究[J].机械强度,2011,33(6):803-808.  
JIANG Xuxin, CAO Junyi, LI Rui, et al. Fault diagnosis of air compressor based on AE signals and correlation dimension [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(6): 803-808.

(编辑 苗凌)