

往复式冰箱压缩机吸气阀片失效过程研究

Research on the Process of Impact Fatigue of Suction Valves in Hermetic Reciprocating Compressors

钱建忠¹ 赵兴² 陈鹏伟¹ 杨骅¹ 李玉茜¹

(1. 加西贝拉压缩机有限公司 嘉兴 314000; 2. 南京创维家用电器有限公司 南京 211200)

摘要: 往复式冰箱压缩机吸气阀片是影响压缩机可靠性的重要部件。基于吸气阀片冲击疲劳的寿命实验, 金相观察吸气阀片和阀板在失效过程中表面形貌变化, 由此发现阀板的受冲击区域先于吸气阀片出现孔洞、表面剥落等现象, 阀板成分中的氧化铁随着冲击继续而凸显出来, 从而导致吸气阀片出现孔洞、裂纹、破碎等现象。

关键词: 吸气阀片; 阀板; 冲击疲劳; 往复式压缩机

Abstract: Suction valve is the key part that affects the reliability of hermetic reciprocating compressor. Based on the life test of impact fatigue of suction valves, and the surface appearance change of suction valves and valve plate's metallographic observation during the failure process, we found that the phenomenon of appeared pinholes and surface peeling hit areas on plates is earlier than suction valves. Iron oxides appear gradually as the impact process going on, which results in suction valves failure, such as holes, cracks, and pieces.

Key words: suction valve; plate; impact fatigue; reciprocating compressor

吸气阀片在往复式压缩机中起到至关重要的作用, 在冰箱压缩机产生故障中其又是主要失效的部件。在压缩机吸气过程中, 吸气阀片打开, 允许制冷剂流入气缸; 在压缩机排气过程, 吸气阀片关闭, 阻止制冷剂流入吸气腔, 关闭的瞬间对阀座产生冲击作用。循环往复应力的作用下, 吸气阀片的头部区域产生常见的冲击疲劳破碎, 导致压缩机性能下降, 严重时甚至停机。

国内外针对往复式冰箱压缩机吸气阀片可靠性的研究已经开展大量工作。Sandvik 公司对阀片冲击疲劳失效的研究主要集中于阀片钢带材料以及工艺的研究, 先后推出了 7C27Mo2、Hiflex 等材料, 同时对阀片钢带进行滚抛等表面处理, 以提升钢带的冲击疲劳强度^[1]。刘德基分析了弹簧刚度、曲轴转速等因素对阀片运动过程中震颤的影响, 优化吸气阀片工作环境^[2]。何国庚建立了冲击载荷下吸气阀片的数学模型, 实现对阀片动态响应的准确模拟, 快速优化了阀片形状^[3]。Seong-woo 在文献 [4] 中提到阀片故障是由于阀片加工过程中阀片自身缺口

等缺陷引起, 往复冲击应力导致缺陷扩大, 引起阀片故障^[4]。

目前, 针对吸气阀片失效过程中, 吸气阀片、阀板的微观组织形貌变化过程的观察研究较少。本文采用吸气阀片冲击疲劳寿命实验方法, 在 SEM、3D 干涉仪下观察吸气阀片在拍击过程中微观形貌变化, 掌握吸气阀片失效过程机理, 对于提升吸气阀片寿命可靠性有重要意义。

1 吸气阀片冲击疲劳特性评价方法

压缩机吸气阀片的运动过程是由气流运动决定的, 反过来吸气阀片的运动又影响气流的运动, 是典型的强流固耦合案例。吸气阀片的运动主要由气缸与阀腔之间的压差造成, 当气体作用在吸气阀片上的推力克服吸气阀片舌簧自身的弹力时, 吸气阀片开启; 当气体作用在阀片上的推力不足以克服阀片的弹簧力时, 阀片关闭。根据牛顿第二定律, 阀片的运动过程可表示为:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = F_0 - F_h \quad (1)$$

式中：

m —吸气阀片舌簧质量；

h —吸气阀片舌簧升程；

F_0 —气体推力；

F_h —吸气阀片舌簧的弹力。

吸气阀片舌簧的升程 h 是阀片设计必须考虑的一个关键因素，吸气阀片舌簧升程 h 直接影响压缩机的效率，同时影响阀片的寿命。阀片升程增大，阀片冲击阀板的速度增大。从材料力学可知，吸气阀片冲击阀板时受到的冲击应力与冲击速度有直接关系，可以表示为：

$$\sigma = v \sqrt{3E\rho} \quad (2)$$

式中，

σ —冲击应力；

v —冲击速度；

E —阀片弹性模量；

ρ —阀片密度。

公式(2)表明吸气阀片受到的冲击应力与冲击速度成正比，随着冲击速度增大，冲击应力相应增大，造成吸气阀片自身缺陷处形成微裂缝扩展，导致吸气阀片舌簧的头部破裂，发生冲击疲劳失效。从阀片运动过程方面看，对吸气阀片冲击速度对吸气阀片的冲击疲劳强度进行评价是一种较为可靠的评价方法。

2 冰箱工况下吸气阀片冲击速度计算

在本司冰箱上开展某型号压缩机吸排气压力测试，在环境室内监测冰箱的冷藏室、变温室、冷冻室的温度，待各腔室的温度达到稳定后，判断冰箱进入了稳定运行的状态，即压缩机运行稳定。在此过程中，测试压缩机的启动瞬间到压缩机建立稳定工况的时间段内的吸排气侧压力情况，如图1所示。

依次取压缩机运行的六个工况 #1~#6，相邻两工况的最小间隔为 40 s，测试吸排气两侧压力值。在一维仿真软件中，利用测得的吸排气压力值作为边界条件，计算出吸排气阀片冲击阀板速度与其两侧压力差之间的关系，见图2。由此可知，在冰箱稳定工况下，压缩机在启动过程中的初始时刻吸气阀片两侧压力差最大，吸气阀片拍击阀座的速度最大。

3 吸气阀片冲击疲劳加速寿命测试

3.1 实验装置

吸气阀片的设计寿命要保证不低于压缩机的设计寿命，通常采用加速寿命的实验方法进行快速评价吸气阀片的可靠性。本文自行设计了一个吸气阀片冲击疲劳实验台，模拟吸气阀片的工作状况。通过该实验台，可以快速激发吸气阀片的冲击疲劳失效，记录吸气阀片无故障时间，评价吸气阀片冲击疲劳可靠性。

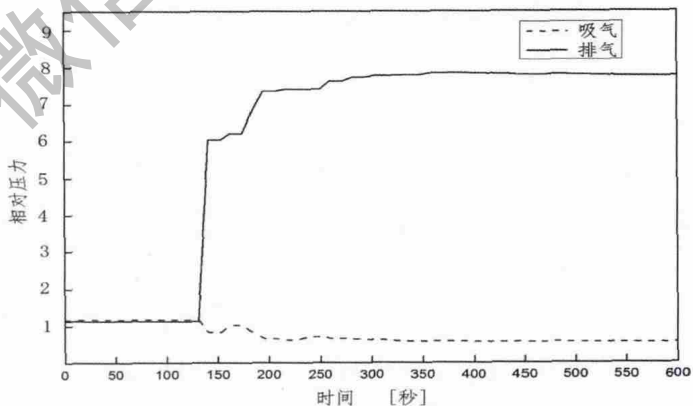


图1 压缩机启动时吸排气压力变化情况

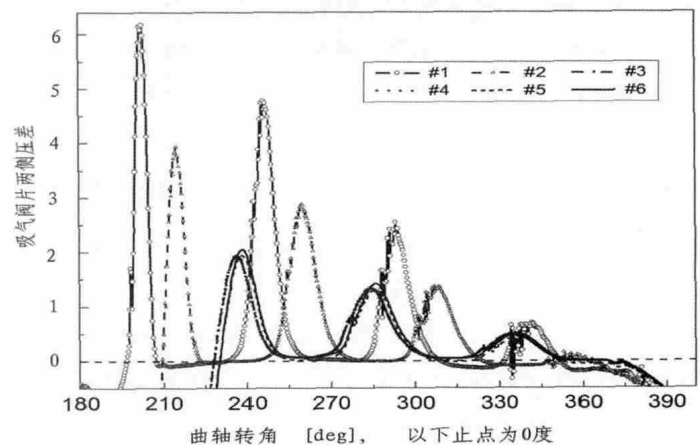


图2 吸气阀片两侧的压差与曲轴转角的关系

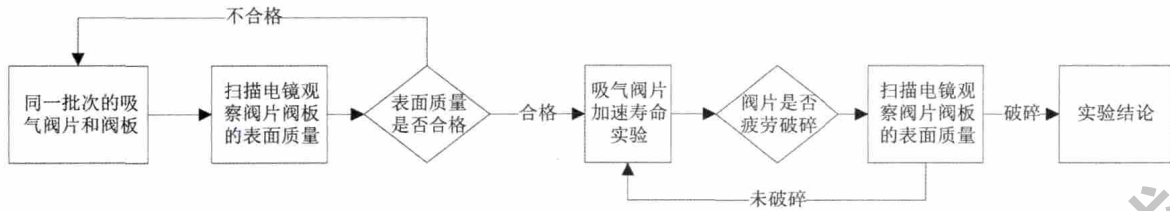


图3 吸气阀片失效过程观察流程

实验过程中，吸气阀片冲击速度的参数设定值参照冰箱稳定工况下的吸气阀片冲击阀板速度，保持吸气阀片每次以稳定的速度冲击阀板，调整吸气阀片冲击阀板的速度，加速吸气阀片的冲击疲劳，记录吸气阀片的冲击次数，以此评价吸气阀片抗冲击疲劳性能。

3.2 实验流程

借助 SEM、3D 干涉仪下观察阀板的阀口位置、阀片舌簧头部位的表面形貌，选用合格的阀板和吸气阀片进行吸气阀片的加速寿命实验，设定时间结束后，观察阀片、阀板的冲击区域微观组织的形貌变化，研究分析导致吸气阀片失效的原因，失效过程观察的流程如图 3 所示。

3.3 阀板 / 阀片失效过程观察

在 3D 干涉仪下观察阀板受冲击区域的表面形貌原始状态的磨削痕迹 (图 4a)，在 SEM 下观察吸气阀片的表面形貌原始状态 (图 4b)，选用不存在孔洞缺陷、表面磨痕均匀的阀板、吸气阀片开展实验。确认零件合格，开展第一轮冲击疲劳实验，观察阀板、吸气阀片实验后的表面形貌状态，微观观察阀板、阀片的受冲击区域，与原始状态相比，阀板受冲击区域出现较多数量的孔洞 (图 5a)，

吸气阀片出现麻点 (图 5b)。选用未发生明显破碎阀片，继续进行第二轮冲击疲劳实验，实验后观察阀板、吸气阀片实验后的表面形貌状态，发现阀板受冲击区域的孔洞局部连成片 (图 6a)，吸气阀片受冲击区域的麻点扩展成孔洞，磨痕更加明显 (图 6b)。继续进行第三轮冲击疲劳实验后，吸气阀片的受冲击区域发生破碎，微观观察下发现阀板受冲击区域出现尺寸较大的孔洞 (图 7a)、吸气阀片的受冲击区域出现大量孔洞以及磨痕 (图 7b)。在能谱仪下测试孔洞成分，测到阀板孔洞中含有氧化铁成分 (图 8)，

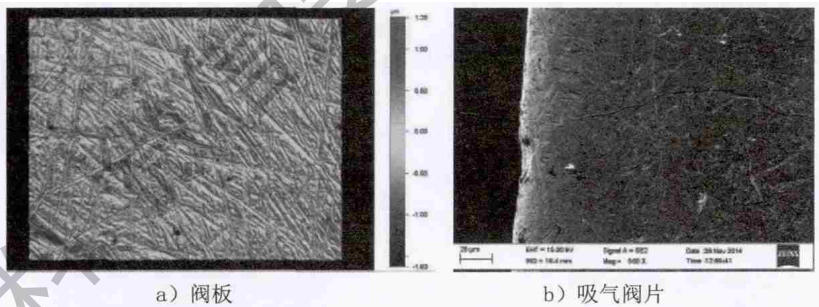


图4 零件表面原始形貌

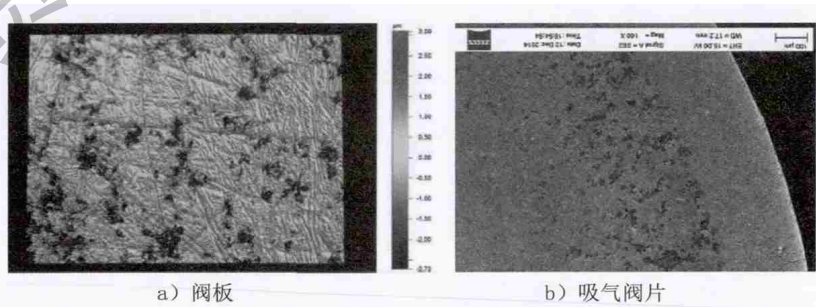


图5 第一轮实验后零件表面形貌

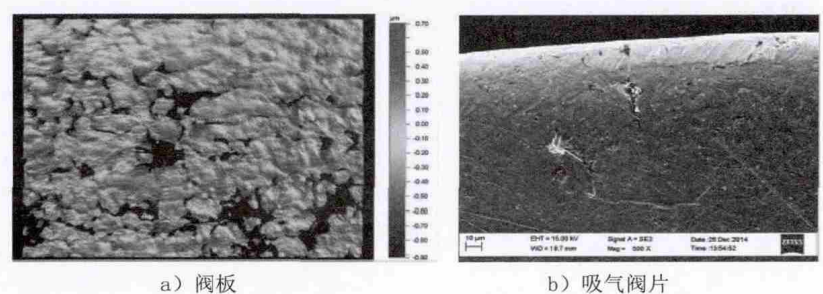


图6 第二轮实验后零件表面形貌

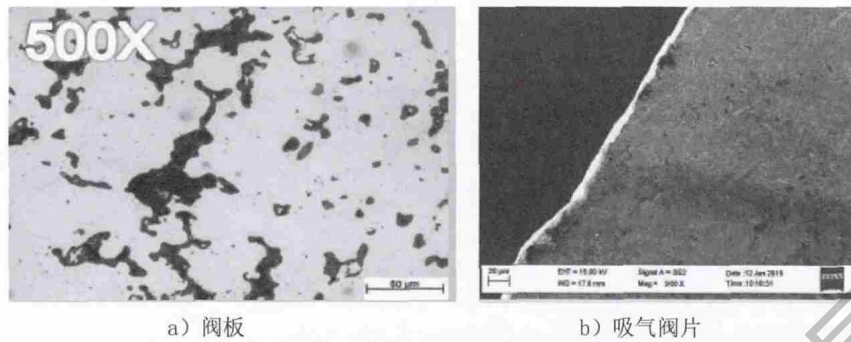


图7 第三轮实验后零件表面形貌状态

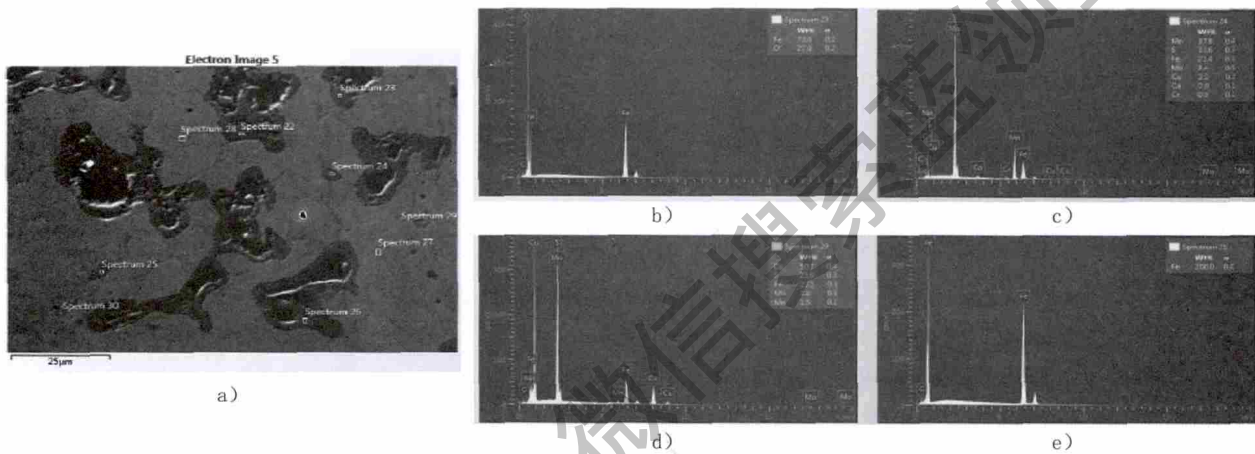


图8 阀板孔洞成分

吸气阀片的孔洞中同样含有氧化铁成分(图9),由于阀片材料成分中不含铁,可以确认吸气阀片孔洞中的氧化铁成分来自阀板。由此分析可知,阀板经过多次冲击测试后,表面剥落,硬度较高的氧化铁凸显,导致吸气阀片出现孔洞、破碎。

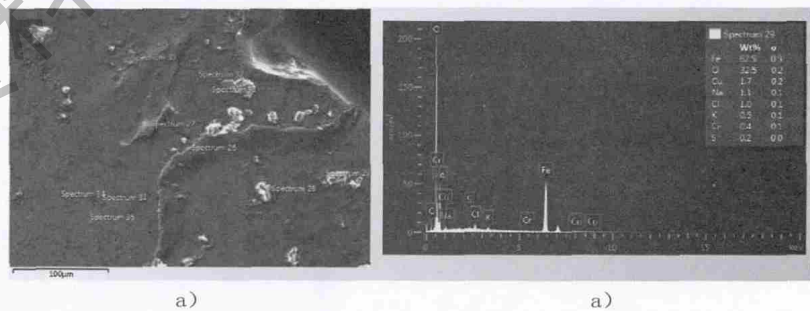


图9 阀片孔洞成分

4 结论

通过观察吸气阀片、阀板在经历多轮冲击实验后表面形貌状态的观察,发现导致吸气阀片出现碎裂主要由阀板导致,阀板经多次拍击后先于吸气阀片出现孔洞、表面剥落,阀板内高硬度的氧化铁颗粒凸显,导致吸气阀片表面出现孔洞、磨痕,最终碎裂。

参考文献:

- [1]. Martin Mueller, Gustaf Zetterholm. Influence of material orientation on the fatigue properties of flapper valve [B]. International Compressor Engineering Conference at Purdue, 2006:1-7.
- [2]. 刘德基, 张慢来. 往复式压缩机进气阀运动规律的理论研究 [J]. 石油机械, 2013, 41 (3):80-83.
- [3]. 何国庚, 肖彪. 冰箱压缩机吸气簧片阀的数值模拟与优化 [J]. 低温工程, 2005, 5:59-64.
- [4]. Seong-woo Woo, Dennis L. O'Neal. Reliability design of a reciprocating compressor suction reed valve in a common refrigerator subjected to repetitive pressure loads [J]. Engineering Failure Analysis, 17(2010)979-991.