

自润滑活塞环的热胀失效研究

辛电波, 冯健美, 许艳靖, 彭学院

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对无油润滑压缩机运行过程中自润滑活塞环的热胀失效问题,进行了理论分析和试验研究. 改装了现有压缩机气缸,制作了组合式活塞,测量出压缩机实际运行时活塞环间的动态压力分布. 根据活塞环前后压差载荷变化判断活塞环失效性,应用有限元方法对活塞环热胀失效过程进行了模拟分析和专项试验. 通过观察活塞环的热胀过程,对热胀失效过程进行了验证. 试验研究结果表明,活塞环因热胀而失效分为2种情况:开口间隙闭合初始时刻会产生封闭容积,形成相对平衡的压力,从而影响密封效果;随着温度的升高,开口接触面错开,活塞环侧面与活塞环槽侧面之间无法取得良好的接触,从而泄漏增加,进而影响密封效果. 因此,需采用较大的开口间隙,以防止活塞环过早热胀失效.

关键词: 自润滑活塞环;压力分布;热胀失效;有限元法

中图分类号: TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0090-04

Thermal Expansion Failure of Self-Lubricated Piston Rings

XIN Dianbo, FENG Jianmei, XU Yanjing, PENG Xueyuan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experiment and analysis were conducted to investigate the thermal expansion failure of the self-lubricated piston rings during the running of compressors. The cylinder of an existing compressor was modified and a combined piston was fabricated. The dynamic pressure distribution on each ring was measured during the running of the compressor. The process of the thermal expansion failure was simulated using the FEM software and the thermal expansion of the piston rings was observed with an observation hole in the cylinder. The results show that there were two kinds of the thermal expansion failure: when the cut was just closed, the unattached volume formed, yielding relatively balanceable pressure; when the temperature increased further, the interfaces of the cut would be stagger and the lateral face of the piston ring could not contact the lateral face of the piston ring groove, leading to the increase in the gas leakage. It is likely that bigger cut clearance should be employed to avoid the earlier thermal expansion failure.

Keywords: self-lubricated piston ring; pressure distribution; thermal expansion failure; finite element method

现代工业中,越来越多的场合要求采用无油润滑压缩机^[1],而采用自润滑材料的活塞环无油压缩技术是十多年来压缩机领域的一个研究热点. 活塞环失效的一个重要原因就是磨损过快,对于自润滑

活塞环的摩擦、磨损性能,有关文献进行了专项报道^[2-6]. 与传统金属活塞环相比,自润滑活塞环的失效主要是高温下的热失效. 自润滑材料均存在高温限制,例如填充聚四氟乙烯(PTFE)的自润滑材料

的最高使用温度为 160 ℃^[7]. 压缩机在压缩过程中会产生大量的压缩热,加上活塞环高速往复运动引起的摩擦热,活塞环温度很容易达到可靠工作允许的高温上限. 对于高温下自润滑活塞环的热失效,相关文献仅提及了自润滑材料在低温、高温时的性能^[8],或者只从材料特性的角度研究了温度对材料性能的影响^[9],很少涉及自润滑活塞环热失效的内在机理和极限温度等.

对自润滑活塞环间压力分布进行的研究^[10-11]发现,高温对自润滑活塞环的影响除了材料本身的热失效以外,还存在活塞环的热胀失效. 自润滑材料的热膨胀系数值是金属材料的 10 倍左右,如果活塞环开口过小,就会由于热胀而卡死,这种情况将影响压力分布和密封效果. 本文从实际压缩机运行中的活塞环热胀失效问题出发,通过有限元模拟和试验分析,验证了活塞环热胀卡死的现象.

1 试验装置

为了研究自润滑活塞环间的压力分布,对现有活塞式压缩机进行了改装,特制了气缸和活塞,试验装置如图 1 所示. 活塞为多个圆环形活塞片串联而成,其外圆为阶梯状,2 个活塞片组合成一道完整的活塞环槽;多个活塞片组合成的活塞是中空结构,这样动态压力传感器可以安装在活塞片上,以测量 2 道活塞环之间的压力,传感器引线可以从活塞内部引出. 本文的活塞环组共有 3 道活塞环和 1 道支撑环,支撑环仅具有导向和支撑作用,对应的压力为 p_4 ;活塞环从高压到低压依次分为 3 道环,对应的环前压力分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 .

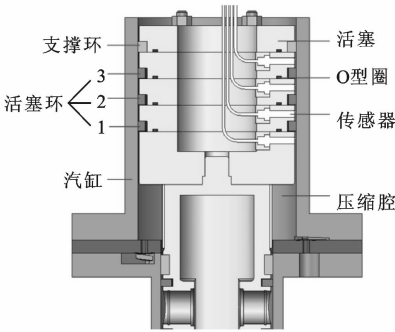


图 1 活塞式压缩机试验装置图

2 试验结果与讨论

按照开口大小分别为 3、1、1 mm 的顺序布置活塞环,来进行环间压力分布试验,并研究开口间隙为 1 mm 时活塞环的热胀失效. 活塞环的材料为填充

聚四氟乙烯,其热膨胀系数约为 1×10^{-4} ,当温度升高 40 ℃ 左右时,开口热胀卡死.

2.1 热胀失效的表现形式

正常工作下,按照开口大小分别为 3、1、1 mm 顺序布置的活塞环的环间压力分布如图 2 所示,此时活塞环间的压力差主要由第 1、第 2 道环来承受. 由于开口较小,当温度升高时,第 2、第 3 道环热胀卡死会先于第 1 道环. 由图 2 知,在活塞环热胀卡死之前,第 1、第 2 道环共同承受总的密封压力,第 1 道环承受的压力稍大一些.

活塞环热胀失效后的 2 种压力表现形式如图 3 所示.

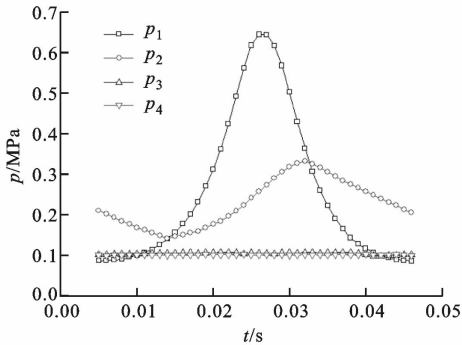
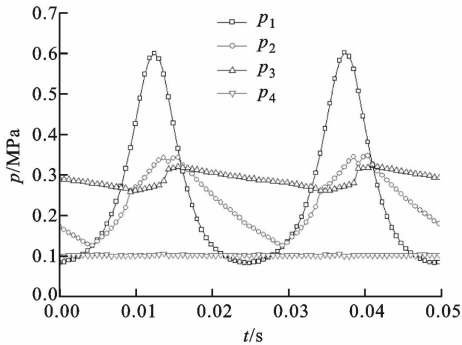
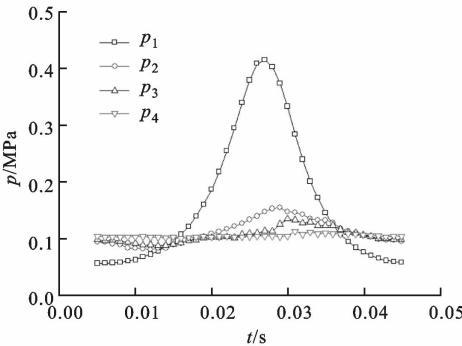


图 2 活塞环间的正常压力分布



(a) 第 1 种形式



(b) 第 2 种形式

图 3 热胀卡死后的 2 种压力表现形式

由图 3a 可知,当热胀失效后,在第 3 道环前出现了一个相对稳定的压力 p_3 ,这说明第 2、第 3 道活塞环均已热胀卡死,并在二者之间形成了一个封闭容积,其内的气体压力达到了一个相对平衡的状态.此时,在其他条件不变的情况下,同图 2 相比,压缩腔内的最高压力有所降低,说明此时密封效果变差.由图 3b 可知,热胀失效后的第 2 道活塞环的环前压力 p_2 下降,其前后的压差几乎为 0,即第 2 道环失去了密封作用.这是因为,活塞环的切口是 45° 斜切口,当活塞环受热膨胀后,切口两边开始接触,如果继续膨胀,接触面就会沿切口方向错开,以致于活塞环端面 and 活塞环槽侧面不能完全贴合,从而使泄漏加剧,密封性能下降.

2.2 热胀失效的模拟结果

应用有限元软件对活塞环热胀失效进行了模拟,活塞环的有限元模型如图 4 所示. 根据实际活塞环的参数,即开口为 45° 斜切口、间隙为 1 mm、材料的热膨胀系数为 1.2×10^{-4} 、加热温度为 $6\text{ }^\circ\text{C}$,需要约束活塞环的外圆沿半径方向上的位移为 0,即活塞环外表面受到气缸内表面的限制,其余的均为自由边界.

图 5 为活塞环在温度升高 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时的热胀模拟结果,图 6 为图 5 所示活塞环开口附近的局部放大效果.

由图 5、图 6 知,当温度升高 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 以后,开口间

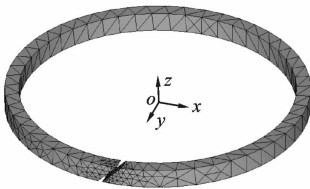


图 4 活塞环有限元模型

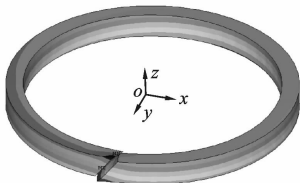


图 5 活塞环热胀模拟结果

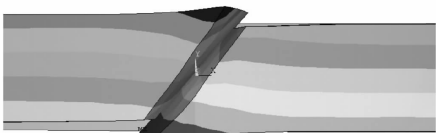


图 6 图 5 所示活塞环热胀的局部放大效果

隙已经闭合,活塞环内圆接触. 此时,开口接触面已经错开,开口两端的活塞环侧面已经不在同一平面,这样就不会与活塞环槽形成良好的接触,从而产生泄漏.

2.3 热胀失效的试验验证

本文对活塞环的热胀进行了试验,设计了特殊的活塞和气缸,气缸上开有小孔,以观察活塞环的切口状态. 活塞环热胀前的状态如图 7 所示,其中活塞环开口为 1 mm,开口侧面与活塞环槽的上侧面接触.

图 8 为放入烘箱加热到 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的活塞环. 此时,活塞环开口因为热胀而闭合. 理论上,活塞环附近已没有气体泄漏的通道,所以在两道环之间形成了封闭容积,产生了如图 3a 所示的压力分布.

随着继续加热,开口接触面开始错位,如图 9 所

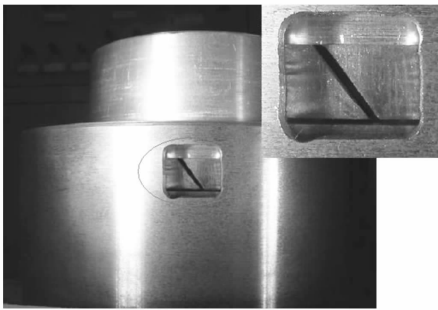


图 7 活塞环热胀前的状态

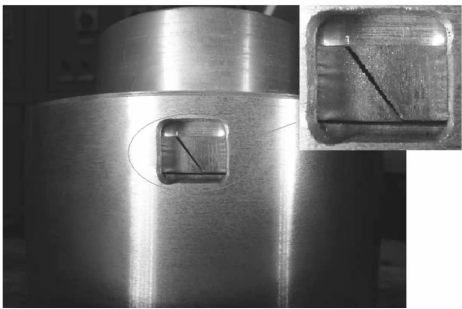


图 8 加热到 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的活塞环

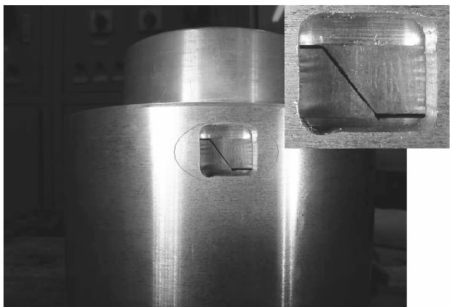


图 9 活塞环热胀后的状态

示. 这种情况下活塞环的2个侧面均无法与活塞环槽侧面紧密贴合, 因此产生如图3b所示的压力分布, 所以密封性能下降.

3 结 论

本文针对实际压缩机运行中的活塞环热胀失效问题, 通过有限元模拟和试验分析, 验证了活塞环热胀卡死的机理. 有限元模拟与试验结果吻合较好, 证实了实际工作中的热胀失效问题. 活塞环热胀卡死分为2种情况: ①封闭容积形成, 使得2个活塞环之间的气体压力达到了一个相对平衡的状态, 从而影响了密封效果; ②开口接触面错位, 活塞环侧面与活塞环槽侧面无法良好接触, 从而产生泄漏, 影响密封效果. 总之, 活塞环热胀卡死现象会影响压缩机的密封效果, 要尽量避免其发生.

参考文献:

- [1] 朱玉峰, 彭宝成. 无油润滑压缩机活塞环的研究进展[J]. 润滑与密封, 2003(6): 88-91.
ZHU Yufeng, PENG Baocheng. Research progress in piston rings for non-lubricated compressor [J]. Lubrication Engineering, 2003(6): 88-91.
- [2] 刁玉辉, 韦安和. 自润滑活塞环的摩擦磨损分析[J]. 润滑与密封, 2004(5): 103-106.
DIAO Yuhui, WEI Anhe. Friction and wear analysis of self-lubrication piston ring [J]. Lubrication Engineering, 2004(5): 103-106.
- [3] 朱友良, 金菊香. 改性聚四氟乙烯活塞环专用料研制[J]. 中国塑料, 2005, 19(2): 55-57.
ZHU Youliang, JIN Juxiang. Manufacture of modified polytetrafluoroethylene compound used in piston rings [J]. China Plastics, 2005, 19(2): 55-57.
- [4] 陈战, 王家序, 郑小光, 等. 聚四氟乙烯工程材料的摩擦

磨损性能研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 74-77.

CHEN Zhan, WANG Jiaxu, ZHENG Xiaoguang, et al. Study on friction and wear properties of PTFE [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4): 74-77.

- [5] KHEDKAR J, NEGULESCU I, MELETIS E I. Sliding wear behavior of PTFE composites [J]. Wear, 2002, 252(5/6): 361-369.
- [6] KOWANDY C, RICHARD C, CHEN Y M. Characterization of wear particles for comprehension of wear mechanisms case of PTFE against cast iron [J]. Wear, 2008, 265(11/12): 1714-1719.
- [7] 朱圣东, 邓建, 吴家圣. 无油润滑压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 郑林庆. 摩擦学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [9] 惠嘉. 温度对聚四氟乙烯材料特性的影响研究 [J]. 火工品, 2006(1): 46-48.
HUI Jia. Study on the temperature influence on the property of PTFE material [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006(1): 46-48.
- [10] WANG Y, XIN D B, FENG J M, et al. Research on sealing performance and self-acting valve reliability in high-pressure oil-free hydrogen compressors for hydrogen refueling stations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(15): 8063-8070.
- [11] XIN Dianbo, FENG Jianmei, XU Yanjing, et al. Investigation of pressure distribution and frictional heat on self-lubricated piston rings in reciprocating compressors [C]// Proceedings of the International Compressor Engineering Conference. Purdue, USA: Purdue University, 2010: 1-8.

(编辑 苗凌)