

文章编号:0253 – 4339(2018) 02 – 0001 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 02. 001

R290 与 R410A 旋转式压缩机滑片-活塞摩擦副特性的对比

陈振华¹ 李盖敏² 吴建华¹

(1 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049; 2 广东美芝制冷设备有限公司 顺德 528333)

摘 要 为了模拟与压缩机工作状态尽量接近的实验条件,本文在密封的高压环境下测试了在 R290/矿物油混合物组合下的滑片-活塞摩擦副的摩擦系数、咬合力和磨损量。测试样件为压缩机中的滑片与滚动活塞量产件,根据压缩机的实际运行工况设定了滑片与滚动活塞间相对滑动速度、负载及润滑油温度等实验条件范围,采用电子扫描镜检测实验后样件的表面形态,并与目前使用量较大的 R410A/POE 油混合物组合进行对比。结果表明,在 R290/矿物油混合物组合下,滑片-活塞摩擦副的摩擦系数比 R410A/POE 油混合物组合的摩擦系数大 0. 05 ~ 0. 10,但其咬合负载高出 300 N,表明在 R290/矿物油混合物组合下,压缩机的抗磨损能力增强,但摩擦功耗也同时增加,需进一步改进。

关键词 摩擦学;摩擦系数;压缩机;润滑油;R290

中图分类号:TB65;TB61⁺2;TB652

文献标识码: A

Comparison of Tribological Characteristics of Vane-piston Interface
between R290 and R410A in Rotary Compressor

Chen Zhenhua¹ Li Gaimin² Wu Jianhua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Guangdong Meizhi Compressor Co., Ltd. , Shunde, 528333, China)

Abstract R290 has been considered for use in air-conditioning systems as a low global warming potential (GWP) refrigerant. This paper describes the tribological characteristic of the vane-piston tribopair in a R290 rotary compressor. For the purpose of simulating the tribopair working conditions, the vanes and rolling pistons of a compressor were directly adopted as test specimens. All of the tribological tests were performed under sealed high-pressure conditions, with test conditions such as the relative sliding speed, loads, and temperatures set based on actual operating conditions of a compressor, and the friction coefficients, scuffing resistances, and wear depths were measured. Furthermore, the morphological changes were investigated using a scanning electron microscope after the tests. As a comparison benchmark, tests were also conducted using R410A/polyolester oil. From these tests, it was evident that the friction coefficients and scuffing load of the vane-piston interface in the presence of R290/mineral oil were respectively 0. 05 – 0. 10 and 300 N higher than those of R410A/polyolester. On the other hand, the wear resistance ability with R290/mineral oil was better than that with R410A/polyolester.

Keywords tribology; friction coefficient; compressor; lubricant oil; R290

房间空调器大量使用的 HCFCs 及 HFCs 工质,因其对大气臭氧层消耗及温室效应的加剧作用,正逐步被淘汰,其中 HCFCs 工质已有明确的淘汰时间表。2016 年 10 月,在卢旺达进行的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》第 28 次缔约方会议中达成了关于削减 HFCs 工质的基加利修正案,将淘汰 HFCs 工质正式纳入日程。近年备受关注的碳氢工质 R290,被认为是业界的长远替代技术方案之一。

旋转式压缩机作为房间空调器的关键部件及主要耗能部件,摩擦功耗约占压缩机总功耗的 6% ~ 8%,对能效影响较大,同时摩擦副的磨损情况直接影响其可靠性。因此,研究旋转式压缩机的摩擦特性意义重大。其中,滑片-活塞摩擦副直接承受来自滑片前后端的吸排气压力差造成的巨大负载,界面处于边界或混合润滑状态且周边的润滑油同时分别受到排、吸气两个腔的高、低温,高、低压影响,使该处

的油黏度变化较为剧烈,造成摩擦副的润滑条件非常复杂^[1-2],是压缩机内多个摩擦副中最为严酷的摩擦副^[3-4],也是影响压缩机能耗及可靠性的关键。发达国家早期在 R22 旋转式压缩机基础上,研发不含利于润滑的氯元素的 R410A 压缩机时,有大量关于滑片-活塞摩擦副的摩擦磨损特性研究的论文发表^[4-6]。

R290 房间空调器的研究多集中在安全性与系统性能方面^[7-10],只有少量关于 R290 旋转压缩机的研究,如 Lin Jie 等^[11-12]研究了 R290 空调器启动过程中空调器系统与压缩机内部的压力、温度、润滑油黏度等的变化。Wu Jianhua 等^[13]研究了 R290 旋转压缩机内部热力过程与性能。但至今还没有专门研究 R290 旋转压缩机摩擦磨损特性的论文发表。现时被广泛应用于冰箱的,使用碳氢工质的 R600a 往复式压缩机的摩擦特性研究^[14-16],可作为本文的参考。

本文使用高压密封摩擦磨损实验机,对现有材料及表面处理手段的滑片-活塞摩擦副在 R290/高黏度矿物油的混合物组合下进行摩擦磨损特性研究。采用批量生产中的压缩机零件:滑片和活塞作为测试样件,并设定不同的相对滑动速度、负载、润滑油温度等实验条件以尽量模拟压缩机的实际运行工况。采用扫描电镜对测试样件的表面形貌进行考察,并且以目前使用量较大的 R410A/POE 油混合物组合作为对比基准。

1 实验设备与样件

1.1 高压密封摩擦磨损实验机

本文使用一台定做的高压密封摩擦实验机(下称摩擦实验机)来进行,其原理如图 1 所示。密封腔压力最高达 10 MPa,最高加载负载为 3 000 N,最高转速达 2 000 r/min。通过控制密封腔内的工质充灌量和腔内的加热温度来控制密封腔内的压力;通过调整密封腔内的工质压力以及油池内润滑油加热

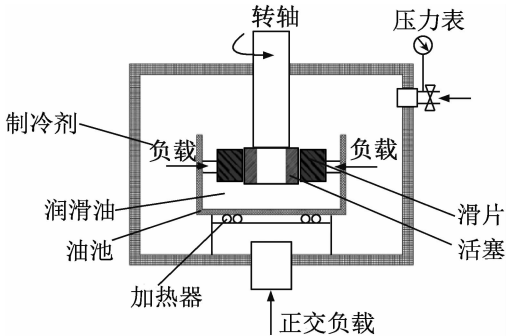


图 1 摩擦实验机

Fig. 1 High-pressure tribometer

温度,就能控制润滑油的黏度;再加上转速、负载的设置,便可模拟出压缩载机实际工作的各种运行工况。

1.2 扫描电镜

使用日立制作的 SN-3400 扫描电镜对滑片和活塞样件实验前后的形貌状态进行记录并对比分析。

1.3 实验样件

一般的摩擦磨损实验使用标准实验样件如销、盘零件来研究摩擦副^[14-16],但此情况与实际滑片-活塞摩擦副的差异较大,不利于实验结果对实际应用的判断。为了尽量模拟压缩机实际运行时的摩擦副工作状态,使用批量生产的压缩机零件作为测试样件(图 2),保证具有跟批量产品同样的机械特性及加工精度。活塞样件垂直安装于设备的旋转轴上,两滑片水平对置于活塞外圆两侧的直径延长线上,通过钳子夹紧使滑片前端与活塞外圆紧贴并施予负载。

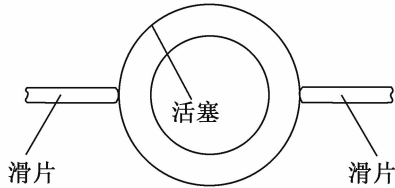


图 2 摩擦测试样件

Fig. 2 Tribological test specimen vane and roller

1.3.1 滑片

滑片厚度为 3.2 mm,高度为 12.5 mm。滑片基材为 SUS440C 不锈钢,表面进行渗氮处理,硬度约 900 HV。另外在转速与负载递增实验中还追加了基材为 SKH 高速钢、表面 CrN 处理、硬度约 1 700 HV 的滑片作为对比,研究在高速、高负荷条件下,滑片表面处理方式对摩擦系数的影响。

1.3.2 活塞

活塞基材为 Ni-Cr-Mo 铸铁,直径和高度分别为 35 mm 和 14 mm。

1.4 润滑油

制冷系统中,一般会选择与工质互溶性良好的润滑油^[17-18]。对于 HCFCs 和 HFCs,分别选择矿物油和合成油(如 POE);而 R290 极性较低,与矿物油、POE 油的互溶性都较好,均可用。本文使用了专门为 R290 旋转式压缩机开发的矿物油。由于 R290 与矿物油的互溶性较强,使工质与润滑油在工作状态下的混合物黏度较低,摩擦副间的油膜承载力降低,故选用黏度较高的矿物油(40 ℃时黏度为 100 mPa·s)以保证混合物的黏度,并加入了抗磨添加剂(Ad)以提升抗磨损能力。此外,将目前广泛应用的 R410A/POE 油混合物组合作为比较基准,该 POE 油在 40 ℃

时的黏度为 74 mPa·s,没有加入抗磨添加剂。

2 实验条件

2.1 代表工况下的摩擦磨损测试条件

为尽量真实模拟压缩机运行时的实际工况,首先需要确定摩擦实验机的实验条件,包括工质和润滑油充注量、主轴转速、加载负荷以及高压腔的压力、油池温度等。为此,实验选取两套制冷能力及能效级别相当的 R410A 与 R290 空调系统,分别确定其额定制冷及制冷过负荷工况下的压缩机吸气压力、排气压力、曲轴转速,同时测量压缩机油池中润滑油和工质的混合物温度,估算压缩机活塞转速以确定滑片-活塞摩

擦副的相对滑动速度,以及滑片-活塞接触面上的负载大小。根据上述结果,即可确定摩擦实验机的实验条件。另外,滑片-活塞摩擦副的润滑状态受压缩腔与吸气腔共同影响,而本研究的测试条件是根据承受着高温、高压的压缩腔内条件确定,此状态下的润滑油黏度更低,润滑条件更恶劣。

实验用的滑片、活塞样件,在正式实验前需要进行 30 min 的预运转。当压缩机的实际转速为 3 600 r/min,由于活塞存在自转运动,故活塞与滑片的相对滑动速度按照 1/10 的曲轴转速计算,所以设定实验机主轴转速为 640 r/min,即活塞与滑片相对滑动速度为 1.17 m/s。测试条件如表 1 所示。

表 1 代表工况下的摩擦磨损测试条件
Tab.1 The friction and wear test condition of the typical conditions

压缩机工况	摩擦测试条件						
	工质	润滑油	油温/℃	压力/MPa	转速/(r/min)	负载/N	时间/min
额定制冷	R410A	POE	60	2.77	640	80	90
制冷过负荷	R410A	POE	80	3.40	640	100	90
额定制冷	R290	矿物油 + Ad	60	1.57	640	50	90
制冷过负荷	R290	矿物油 + Ad	75	1.82	640	70	90

2.2 转速与负载递增摩擦磨损测试条件

为了研究转速(对应变频压缩机)与负载(对应不同的工作压力)的影响,分别进行转速递增与负载递增摩擦磨损测试实验。摩擦实验机的主轴转速设定为 160、640、830、1 100、1 400 r/min,即摩擦副的相对滑动线速度为 0.30、1.17、1.52、2.01、2.56 m/s 递增,分别对应压缩机的转速为 1 200、3 600、5 400、7 200、9 000 r/min 时的状态。R410A 和 R290 下的对应负载分别设置为 50 N 和 80 N。

负载递增的设定,相当于从轻负荷至超重负荷(冷凝温度为 65 ℃)的过程。对于 R290,负载依次设置为 40、50、70、85、95、115 N 递增;对于 R410A,其工作压力大于 R290,故实验负载也相应较大,依次设置为 60、80、115、145、165、200 N。转速均为 640 r/min,即相对滑动线速度为 1.17 m/s。

实验均在工质与油混合物组合下进行,采用渗氮处理的 SUS440C 不锈钢及 CrN 处理的 SKH 高速钢滑片,先进行 30 min 的预运行,再进入 90 min 实验,并开始记录数据,实验条件如表 1 所示。

2.3 咬合实验

对于旋转式压缩机,摩擦副之间的抗咬合能力很重要,主要受材料、润滑油、工质、工作温度等影响。当记录的摩擦系数发生突变,判定为咬合发生,停止实验。摩擦系数突变时的负载则为记为咬合负载。采用 SUS440C 不锈钢滑片,先以 60 N 的负载预运行 30 min 后正式递增负载,递增速率为 100 N/min,每递增 1 次,保持该负载运行 1 min 后再重复上述步骤直至咬合发生。实验转速均设置为 640 r/min,实验条件如表 2 所示。

表 2 工质与油混合环境下的咬合实验
Tab.2 Seizure test under mixture environment

压缩机工况	摩擦实验条件					
	工质	润滑油	油温/℃	压力/MPa	转速/(r/min)	负载/N
额定制冷	R410A	POE	60	2.77	640	100
额定制冷	R290	矿物油 + Ad	60	1.57	640	100

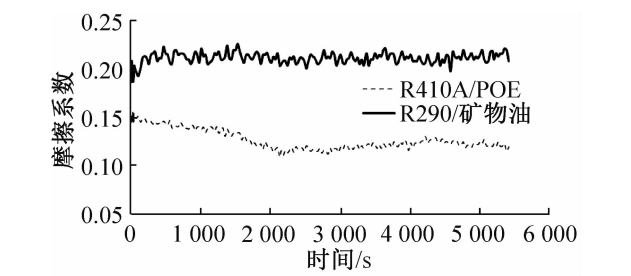


图 3 额定制冷工况下的摩擦系数

Fig. 3 Coefficient of friction under the rated cooling condition

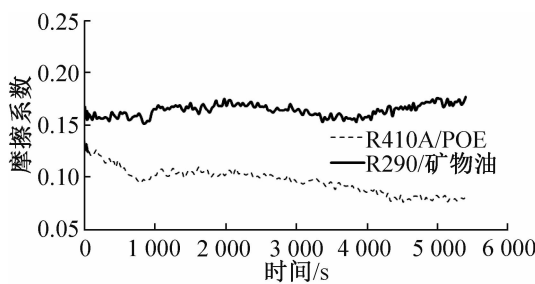


图 4 制冷过负荷工况下的摩擦系数

Fig. 4 Coefficient of friction under the over load cooling condition

3 实验结果与讨论

3.1 代表工况下的摩擦磨损测试

如图 3 和图 4 所示,无论 R290/矿物油还是 R410A/POE 油混合物组合,在具有更高负载的制冷过负荷工况的摩擦系数均比额定制冷工况的小。R290/矿物油混合物组合下的摩擦系数比 R410A/POE 油的摩擦系数高约 0.05 ~ 0.10,且呈平稳或略微上升趋势,而 R410A/POE 油则呈下降趋势。R410A/POE 油混合物组合下的实验后滑片前端磨损

量(2.5 μm)大于 R290/矿物油(2.0 μm)。
图 5 和图 6 分别为采用扫描电镜拍摄的制冷过负荷工况下摩擦实验前后的滑片前端面和活塞外径面的图片。R290/矿物油混合物组合下实验后样件表面仍然有可见加工痕迹,而 R410A/POE 油的加工痕迹已基本被消磨掉。
可知由于矿物油中的抗磨添加剂形成了边界保护膜,增加了摩擦副的润滑性能,增强了其抗磨损能力^[12]。

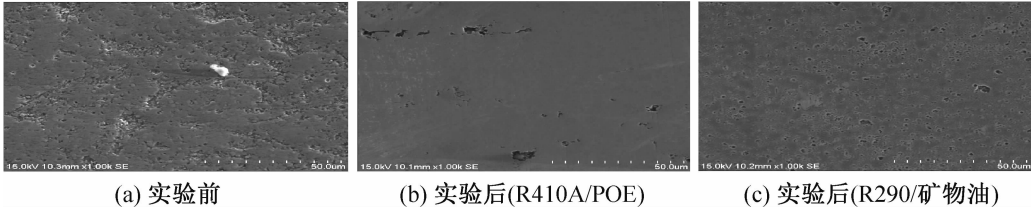


图 5 滑片前端面 SEM 图像
Fig. 5 SEM images of vane tip

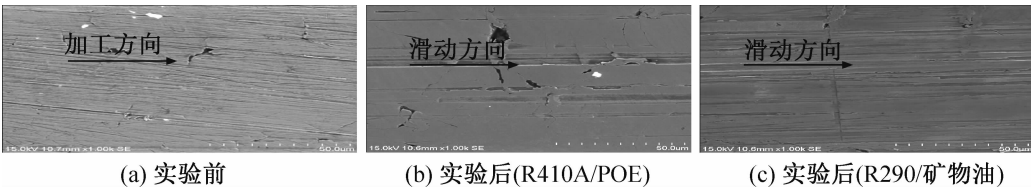


图 6 活塞外径面 SEM 图像
Fig. 6 SEM images of roller outer diameter

3.2 滑动线速度提升及负载提升时的摩擦系数测试

如图 7 和图 8 所示,摩擦系数随滑动线速度(对应于实验机转速)提升呈下降趋势,当转速达到 830 r/min 后均趋于平缓。此时,R410A/POE 油混合物组合下的摩擦系数最低,而 R290/矿物油下,具有更高表面硬度的 CrN 处理的高速钢滑片的摩擦系数比不锈钢滑片的低。

另外,当负载提升时,R290/矿物油混合物组合下,两种滑片的摩擦系数基本相当,其中高速钢 CrN

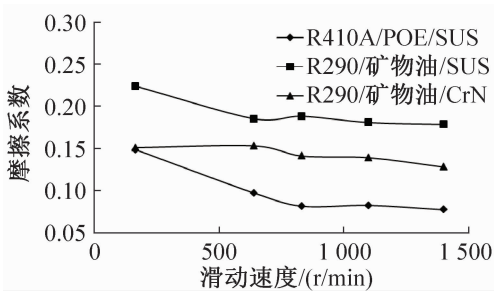


图 7 变滑动速度下的摩擦系数

Fig. 7 Coefficient of friction under the variable speed

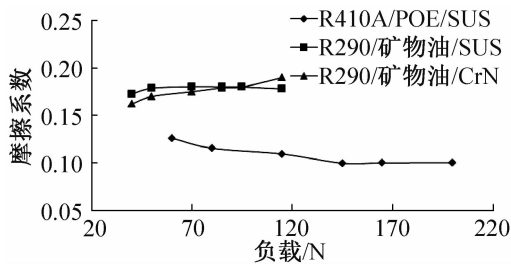


图 8 变负载下的摩擦系数

Fig. 8 Coefficient of friction under the variable load

处理滑片表现出略微上升趋势,而不锈钢渗氮滑片在 R410A/POE 油下呈下降趋势。

3.3 咬合实验

咬合实验的摩擦系数变化如图 9 所示, R410A/POE 油和 R290/矿物油混合物组合下的咬合负载分别约为 1 500 N 和 1 800 N。可见 R290/矿物油混合物组合下表现出更优良的抗咬合能力。推断这归因于与 R290 配合使用的矿物油中加入了挤压抗磨剂,加强了对摩擦副的保护,使其可承受更重的负载,延缓了咬合发生的时间。

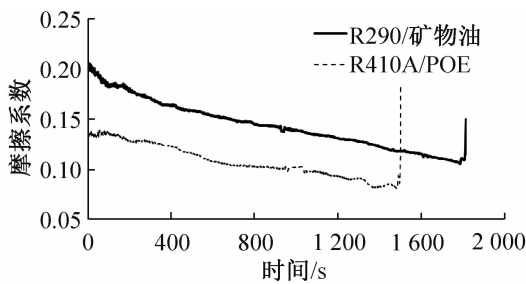


图 9 咬合实验的摩擦系数变化

Fig. 9 Coefficient of friction during the seizure test

4 结论

本文使用高压密封摩擦实验机,对现有材料及表面处理手段的滑片-活塞摩擦副在 R290/高黏度矿物油及 R410A/POE 油混合物组合下进行摩擦磨损特性对比实验研究。根据实验结果发现:

1) 材料为 SUS440C 不锈钢渗氮处理的滑片,以及 Ni-Cr-Mo 铸铁的活塞所组成的摩擦副,在 R290/高黏度矿物油混合物组合下的摩擦系数比 R410A/POE 油下的的摩擦系数明显高出 0.05~0.10。

2) R290/高黏度矿物油混合物组合下,滑片-活塞摩擦副的咬合负载比 R410A/POE 高 300 N,滑片磨耗量较低,表现出更强的抗磨损能力。

3) 在分别对应变频压缩机由 1 200 r/min 至 9 000 r/min 转速的滑动速度递增实验,以及从轻负荷至超过 65℃ 冷凝温度对应的超重负荷的负载递增

实验中,摩擦系数基本呈下降至平稳趋势。

4) 通过扫描电镜分析实验前后的滑片和活塞摩擦表面, R290/矿物油混合物组合样件的表面相比 R410A/POE 油存在更多的原始加工痕迹,推断是与矿物油中的抗磨添加剂增强了摩擦副的抗磨损能力有关。

需要下一步研究 R290 在配合其它润滑油及滑片材料下的摩擦磨损特性,寻求可以降低摩擦系数的材料、表面处理、润滑油及其添加剂。

参考文献

- [1] PADHY S K, SCHELDORF G O. Wear and tribodynamics of a rolling piston rotary compressor [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA, 1994: 79-84.
- [2] YOSHIMURA T, ONO K, INAGAKI K, et al. Analysis of lubricating characteristics of rotary compressors for domestic refrigerators[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(3): 510-516.
- [3] SUNG H C. Tribological characteristics of various surface coatings for rotary compressor vane[J]. Wear, 1998, 221(2): 77-85.
- [4] LEE Y Z, OH S D. Friction and wear of the rotary compressor vane-roller surfaces for several sliding conditions [J]. Wear, 2003, 255(7/12): 1168-1173.
- [5] KATSUMI K, SHOTARO M, AKIRA K, et al. Tribological evaluation of rotary compressor with HFC refrigerants [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA, 1996: 135-140.
- [6] SASAHARA Y, KOMINE K, OOTORI M, et al. Development of 2-cylinder rotary compressor with R410A [C]//International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA, 1998: 447-452.
- [7] 李廷勋, 杨九铭, 曾昭顺, 等. R290 灌注式替代 R22 空调整机性能研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 31-34. (LI Tingxun, YANG Jiuming, ZENG Zhaoshun, et al. Experiment on R290 substituting for R22 in a room air-conditioner [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 31-34.)
- [8] 杨林德, 吴建华, 侯杰. 分体式房间空调器 R290 和 R1270 替代 R22 实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 9-14. (YANG Linde, WU Jianhua, HOU Jie. Experimental study of split room air conditioner charged with R290 and R1270 as substitutes to R22 [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2): 9-14.)
- [9] 张网, 杨昭, 王婕, 等. 分体式空调器使用 R290 作为制冷剂的泄漏研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(6): 42-47. (ZHANG Wang, YANG Zhao, WANG Jie, et al. Leakage research of split-type air conditioner using R290 as re-

- frigerant[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(6): 42-47.)
- [10] 肖红海, 张桃, 胡艳. R290 小型家用空调器的性能匹配研究[J]. *制冷学报*, 2006, 27(4): 26-30. (XIAO Hong-hai, ZHANG Tao, HU Yan. Experimental research on performance of small room air conditioner with R290[J]. *Journal of Refrigeration*, 2006, 27(4): 26-30.)
- [11] LIN Jie, WU Jianhua, ZHANG Ze, et al. Experimental investigation of startup characteristics of R290 rotary compressor under low ambient temperature heating condition[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 77: 128-135.
- [12] WU Jianhua, LIN Jie, ZHANG Ze, et al. Experimental investigation on cold startup characteristics of a rotary compressor in the R290 air-conditioning system under cooling condition[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 65: 209-217.
- [13] WU Jianhua, WANG Gang, LI Yuyong, et al. Experimental study on P-V diagram and valve displacement of a HC290 rotary compressor[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(17): 3113-3124.
- [14] SARIIBRAHIMOGLU K, KIZILA H, AKSIT M F, et al. Effect of R600a on tribological behavior of sintered steel under starved lubrication[J]. *Tribology International*, 2010, 43(5/6): 1054-1058.
- [15] GARLAND N P, HADFIELD M. Environmental implications of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor[J]. *Materials and Design*, 2005, 26(7): 578-586.
- [16] GARLAND N P, HADFIELD M. Tribological analysis of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor[J]. *Tribology International*, 2005, 38(8): 732-739.
- [17] 赵蕾, 刘咸定. 替代工质用润滑油添加剂的作用机理研究[J]. *制冷学报*, 2003, 24(2): 61-64. (ZHAO Lei, LIU Xianding. Study on mechanism of lubricant additives for alternative refrigerants[J]. *Journal of Refrigeration*, 2003, 24(2): 61-64.)
- [18] 赵蕾, 严双志, 李树林, 等. 替代工质与润滑油的匹配性研究[J]. *制冷学报*, 2003, 24(3): 59-62. (ZHAO Lei, YAN Shuangzhi, LI Shulin, et al. Study on suitability of lubricants and alternative refrigerants[J]. *Journal of Refrigeration*, 2003, 24(3): 59-62.)

通信作者简介

吴建华, 男, 教授, 西安交通大学压缩机研究所, (029) 82663786, E-mail: jhwu@mail.xjtu.edu.cn. 研究方向: 小型制冷空调压缩机及其系统的环保、节能与可靠性。

About the corresponding author

Wu Jianhua, male, professor, Institute of Compressor, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82663786, E-mail: jhwu@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: small refrigeration and air conditioning compressor, environmental protection, energy saving and reliability research for small refrigeration system.