

DOI: 10.7652/xjtuxb201711020

一种新型热压缩机运行特性实验研究

吴小华^{1,2}, 杨俊玲², 越云凯^{1,2}, 杨鲁伟²

(1. 北京石油化工学院, 102617, 北京; 2. 中国科学院理化技术研究所, 100190, 北京)

摘要: 为了克服传统热压缩机的不足,提出了一种直线电机直接驱动、以气缸壁与活塞充当回热器的新型热压缩机系统。利用搭建的实验装置,实验研究了加热温度、直线电机驱动功率、工质种类和充气压力等对新型热压缩机系统运行特性的影响。研究表明:采用比热容比更大的工质有利于提高热压缩机系统性能;增大充气压力能提高系统内压力峰值,但效果不显著。以 He4 为工质,在充气压力为 0.96 MPa、加热温度为 330 ℃ 时,新型热压缩机系统压比达到 1.14,能满足特定场合驱动脉冲管制冷机工作的需求;利用带小孔的气库进行了系统输出声功实验研究,发现存在最佳小孔开度使热压缩机系统对外输出功最大;保持工质种类和充气压力不变,当加热温度为 603 ℃、小孔气库容积为 0.518 L 时,实验测得热压缩机输出功最大为 15.6 W。

关键词: 热压缩机;实验研究;热力学;直线电机;回热器

中图分类号: TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0144-06

Experimental Research on Operating Characteristics of a New-Type Thermocompressor

WU Xiaohua^{1,2}, YANG Junling², YUE Yunkai^{1,2}, YANG Luwei²

(1. Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of the traditional thermocompressors, a new-type thermocompressor system is proposed, where a linear motor is designed as power source, and the cylinder wall and piston serve as a regenerator. The effects of heating temperature, linear motor driving power, working fluid and inflation pressure on the operating characteristics of the new thermocompressor system were investigated experimentally. The results indicate that the working fluid with larger heat capacity ratio facilitates improving the performance of the compressor system. The peak-peak pressure in the system can be heightened by increasing inflation pressure, but the effect is not obvious. Taking He4 as working fluid, when the inflation pressure is 0.96 MPa and the heating temperature is 330 ℃, the pressure ratio of the new hot compressor system is 1.14, which can meet the specific requirement for the pulse tube refrigerator. The experimental research on the output power of the new thermocompressor system is carried out by the gas reservoir with a small orifice. It is found that the thermocompressor system is endowed with a maximum external capacity corresponding to the

收稿日期: 2017-05-26。 作者简介: 吴小华(1978—),男,博士生;杨鲁伟(通信作者),男,研究员。 基金项目: 林业公益性行业科研专项基金资助项目(201504610);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51325603);北京市高水平创新团队建设计划基金资助项目(IDHT20170507);国家重点研发计划基金资助项目(2016YFD0400905)。

网络出版时间: 2017-08-22 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170822.1034.002.html>

optimum opening of the orifice. With the same working fluid and inflation pressure, when the heating temperature is 603 ℃ and the gas reservoir volume is 0.518 L, the output power of the thermocompressor reaches the maximum value of 15.6 W.

Keywords: thermocompressor; experimental research; thermodynamics; linear motor; regenerator

热压缩机是一种利用热能提升工质压力的装置,最早由 Bush 提出,随后 Arques 等采用绝热模型、等温膨胀模型、理想模型对热压缩机系统进行了热力学理论分析^[1-2];Edwards 对往复式热压缩机建立了包含余隙容积及回热器效率的模型,并进行了详细的热力学分析研究^[3]。国内纪国林最先开展热压缩机研究^[4];吴佩仪从变质量系统热力学和交变流耦合换热角度建立了热压缩机的物理模型,并揭示了热压缩机的工作特点^[5];王俊杰对不同类型的热压缩机及其特点进行了描述^[6];杨鲁伟等用节点法对热压缩机系统进行了数值分析^[7];薛小代用等温模型对平衡活塞式热压缩机进行了理论分析和试验对比^[8];饶俊峰对两相热压缩机进行了初步实验研究^[9-10];季伟对热压缩机驱动脉冲管制冷机进行了试验研究^[11];戴巍等开展了液氦温区热压缩机的理论实验研究^[12]。研究发现,热压缩机具有振动小、无污染等优点,理想情况下热压缩机效率与卡诺循环效率相等,但实验研究大多采用曲柄连杆机构驱动,系统驱动机构较为复杂,且一般采用外置回热器,系统体积较大。

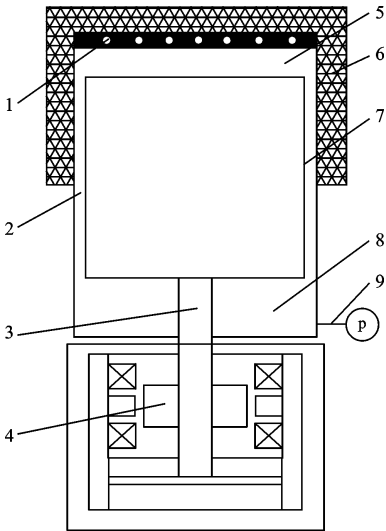
针对传统热压缩机的不足,本文提出了一种直线电机直接驱动、以气缸壁与活塞充当回热器的新型热压缩机系统,搭建了实验装置,实验研究了加热温度、直线电机驱动功率、工质种类和充气压力等对新型热压缩机系统运行特性的影响。

1 实验系统

1.1 新型热压缩机系统

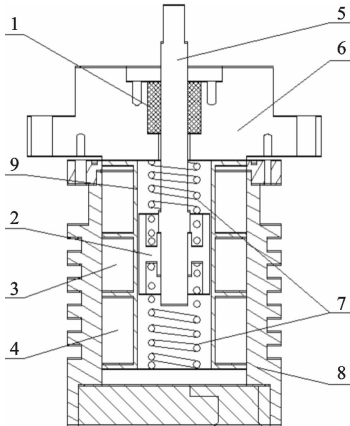
新型热压缩机结构系统如图 1 所示。系统采用直线电机直接驱动,直线电机主轴直接与热压缩机活塞连接;利用活塞和气缸之间的缝隙作为工质流通通道,活塞和气缸壁作为回热器,取代了传统热压缩机系统单独外设的回热器和连通管道,系统结构更简单、体积更紧凑。

直线电机按可动体类型分为动圈型直线电机、动铁型直线电机和动磁型直线电机。动铁型直线电机具有出力大的特点,可满足驱动热压缩机要求^[13-14],本文设计加工的动铁型直线电机装配示意



1:加热器;2:间隙;3:连接轴;4:直线电机;5:热腔;
6:保温层;7:活塞;8:冷腔;9:负载接口
图 1 新型热压缩机结构示意图

图如图 2 所示。



1:轴封;2:动铁;3:磁钢;4:线圈;5:轴;
6:连接法兰;7:弹簧;8:外壳;9:骨架
图 2 动铁型直线电机装配示意图

1.2 实验系统介绍

热压缩机系统运行特性实验研究系统由变频电源、调压器、电参数测量仪、温控器、加热器、水冷却器、热压缩机、气源、气库、压力测试系统等组成。变频电源最大输出功率为 500 W,输出频率为 0~35 Hz 且连续可调,调节精度为 ±0.1 Hz;加热系统由并

联的16支150 W加热棒组成;调压器输入电压为220 V,输出电压为0~250 V,功率为5 kW;电参数测量仪精度为读数的 $\pm 0.4\%$;压力测试系统包括动态压力传感器、数据线、信号放大器、示波器等,采用ICP® M101A05 动态压力传感器、482C 系列信号放大器,测量分辨率为0.014 kPa。

实验采用如图3所示的2种活塞。活塞1的外径为71.7 mm,长为140 mm,质量为0.528 kg;活塞2的外径为119.8 mm,长为115 mm,质量为0.859 kg。



(a) 活塞 1

(b) 活塞 2

图3 实验用活塞示意图

2 新型热压缩机系统运行特性研究

2.1 系统运行特性研究

系统热端由电加热器加热,冷端由水冷套冷却,加热器功率由调压器控制,系统运行频率由变频电源控制,压力传感器压力信号经放大器后由示波器显示。利用装配了活塞1的新型热压缩机,研究了系统冷腔压力峰值与电机功率、加热温度的关系,研究了不同工质对系统运行特性的影响。

系统以 N_2 为工质,充气压力为1.3 MPa,运行频率为20 Hz,冷却温度为23℃,冷腔压力峰值与电机功率及加热温度的关系如图4所示。由图4可知:当直线电机输入功率一定时,随着加热温度的增加,冷腔内压力峰值增加;当加热温度一定时,随着直线电机输入功率的增大,冷腔内压力峰值增大,但增幅逐渐变缓。

系统采用不同工质,冷腔内压力峰值随加热温度的变化如图5所示。在直线电机驱动功率为60 W、运行频率为20 Hz的条件下,系统中充入He4时的冷腔压力峰值比系统中充入 N_2 时的大,并且热压缩机系统性能更优。当加热温度一定时,比热容比(比定压热容与比定容热容之比)是影响系统压力峰值的关键因素之一,由于He4的比热容比比

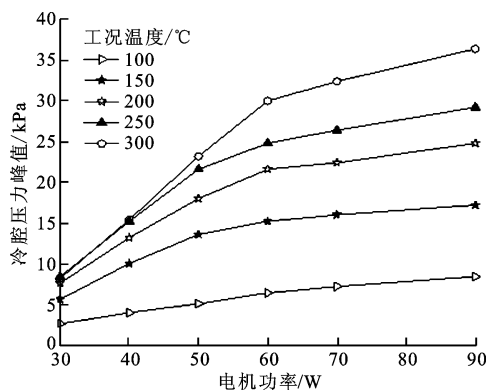


图4 冷腔压力峰值与电机功率及加热温度的关系

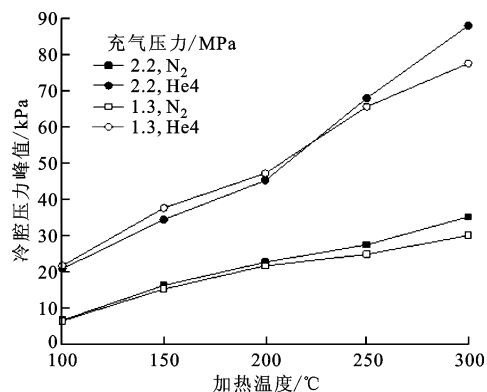


图5 冷腔压力峰值与加热温度及工质的关系

N_2 的大,在同等条件下,采用He4作为工质的热压缩机系统将比采用 N_2 的效率。在100~300℃内,对于同一种工质,增大充气压力虽能提高系统冷腔压力峰值,但效果并不显著。

为增加新型热压缩机的潜在输出功,增大了活塞直径。利用装配了活塞2的新型热压缩机系统,进行了压比与电机功率、加热温度关系及系统输出功的运行特性实验研究。系统以He4为工质,充气压力为0.96 MPa,运行频率为10 Hz。压力峰值与加热温度及直线电机输入功率的关系如图6所示。由图6可知,在一定的直线电机输入功率下,压力峰值随加热温度的升高而增大,和系统中充入 N_2 作为工质时的变化趋势相似。

压比与加热温度及直线电机输入功率的关系如图7所示。由图7可知:在一定加热温度下,压比随直线电机输入功率的增加而增大;在一定的直线电机输入功率下,压比随加热温度的升高而增大。环境温度为28℃、加热温度为330℃时,系统内压力峰值及压比与直线电机输入功率的关系如图8所示。在一定的加热温度下,压力峰值和压比都随着直线电机直接驱动输入功率的增大而增大,压比可达到1.14,能满足特定场合驱动脉冲管制冷机的需求^[11]。

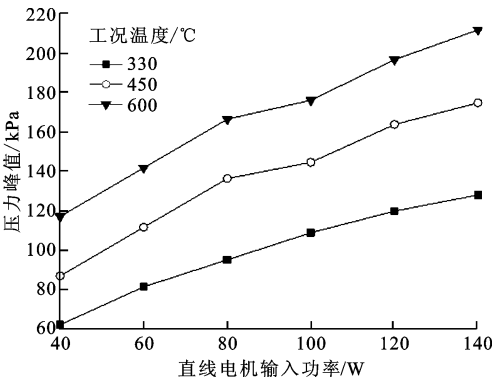


图 6 压力峰值与加热温度及直线电机输入功率的关系

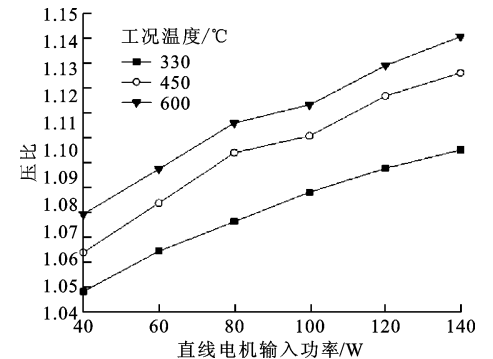


图 7 压比与加热温度及直线电机输入功率的关系

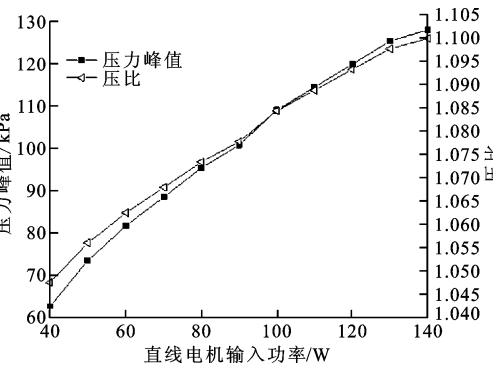


图 8 压力峰值及压比与直线电机输入功率的关系

2.2 系统输出功特性研究

采用带吸排气阀的热压缩机系统,通过测量吸排气口工质的状态和流量,可得热压缩机系统输出功,但由于热压缩机系统压比小,且工质流经吸排气阀时阻力大,不利于系统输出功的测量,因此利用带小孔气库测量了新型热压缩机系统的声功^[15]。

当小孔打开时,小孔两侧产生压差,有工质进出气库,假设进出气库的气体通过小孔时,做功量都转变为热功量

W = | PP_qsinθ | ωV/(2γP₀)

式中:P₀ 为系统平衡压力;P 为压缩机压力波振幅;P_q 为气库压力波振幅;γ 为工质比热容比;V 为气

库容积;ω 为运行角速度;θ 为气库压力波和压缩机压力波的相位差。

新型热压缩机声功测量采用的测试系统如图 9 所示。热压缩机与气库之间用一段内径为 8 mm 的带调节阀的不锈钢圆管连接,调节阀起小孔开度作用,从全关开始,每次增加开度一圈,旋转 5 圈全开。压力传感器 1 测量气库内压力变化,传感器 2 测量系统内压力变化,用压力表测量系统内平衡压力,传感器 1、2 所测得的压力波之间的相位角 θ 用示波器测得。

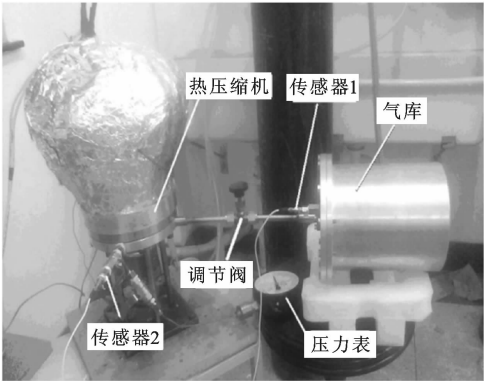


图 9 热压缩机声功测量示意图

直线电机输入功率为 40 W 时,声功与调节阀开度及加热温度的关系如图 10 所示。由图 10 可知,随着调节阀开度的增大,声功先增大,后减小。小孔开度的增大加大了通过小孔的质量流量,使得做功量增加,同时使系统内的压力波幅降低。这两方面的作用是相反的,因此存在一个最佳的小孔开度,使得热压缩机系统对外做功能力最大。在一定的调节阀开度下,声功随加热温度的升高而增大。这主要是由于随着加热温度的增大,热压缩机内及小孔气库内压力波幅均增大。

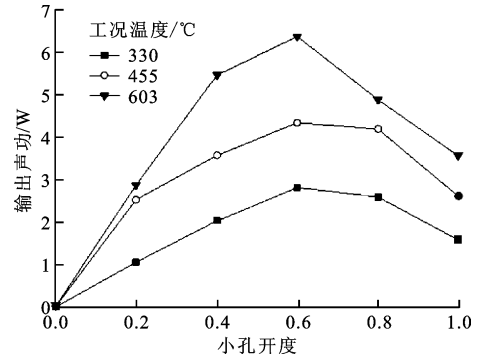


图 10 输出声功与调节阀开度及加热温度的关系

在小孔气库容积为 0.518 L、加热温度为 603℃ 的情况下,带小孔气库热压缩机输出功最大为 15.6 W,系统热效率为 3.21%,分别为文献[16]模拟结

果的4.8%和13.4%。实际测量声功和热效率与数值模拟结果相差较大,这是因为加工和安装的偏差使得实际实验装置和数值模拟模型并不完全相同,而且在10 Hz 交变流动下,狭小空间内工质与固体壁面之间的换热不充分,导致很大一部分热量通过交变流经气缸和活塞之间狭缝的工质而损失,沿气缸壁面轴向导热损失较大。

带小孔气库热压缩机系统热效率、相对卡诺循环效率与调节阀开度及加热温度的关系如图11所示。系统内压力波与气库内压力波之间的相位差通过示波器获得,实验发现,新型热压缩机系统热效率和相对卡诺循环效率并不随加热温度的增加而单调增加或减小,存在最佳加热温度,使系统热效率和相对卡诺循环效率最大。

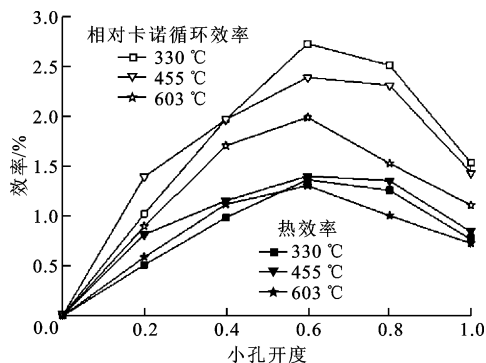


图11 热效率、相对卡诺循环效率与调节阀开度及加热温度的关系

保持调节阀开度约3圈情况下,改变加热温度和直线电机输入功率时,系统热效率与相对卡诺循环效率的关系如图12所示。在保持调节阀开度为使系统输出功最大时,随着加热温度的升高,系统输出功增加,但热效率和相对卡诺循环效率下降,表明热压缩机系统最大输出功和最高系统热效率对应的加热温度并不一定相同。

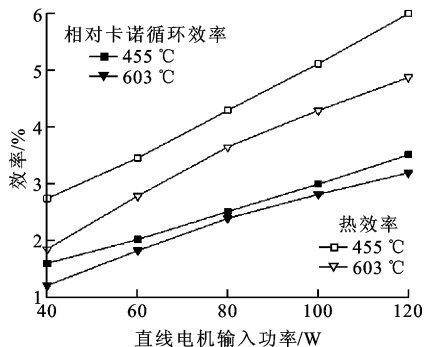


图12 热压缩机热效率与直线电机输入功率及加热温度的关系

3 结 论

对于本文提出的直线电机直接驱动、以气缸壁与活塞充当回热器的新型热压缩机系统,进行了运行特性实验研究。结果表明:系统以 N_2 、He4 为工质,当直线电机输入功率一定时,随着加热温度的增加,系统内压力峰值增加;当加热温度一定时,随着直线电机输入功率的增大,系统内压力峰值随之增大,但增幅逐渐变缓。实验验证了系统采用比热容比更大的工质时,热压缩机系统性能更优;在一定的加热温度范围内,对于同一种工质,增大充气压力虽能提高系统压力峰值,但效果并不明显。在充气压力为0.96 MPa、环境温度为28 °C、加热温度为330 °C时,新型热压缩机系统压比达到1.14,能满足特定场合驱动脉冲管制冷机工作的需求。利用带小孔的气库进行了系统输出声功实验研究,发现存在最佳小孔开度使得热压缩机系统对外做功能力最大,在一定的调节阀开度下,声功随着加热温度的升高而增大,但热压缩机系统最大输出功和最高系统热效率对应的系统加热温度并不一定相同。

参考文献:

- [1] PETERSON R B. Thermocompression engine cycle with isothermal expansion [J]. Energy Sources, 1998, 20(20): 199-208.
- [2] KARABULUT H. Thermodynamic analysis of bush engine [J]. Gazi University Journal of Science, 2003, 16(1): 135-144.
- [3] EDWARDS M J, PETERSON R B. Reciprocating thermocompressor performance with non-ideal component characteristics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power & Energy, 2007, 221(4): 459-471.
- [4] 纪国林. 无污染气体热压缩机的实验研究 [J]. 低温与超导, 1983(2): 8-13.
- [5] 吴沛宜, 朱绍伟. 热压缩机工作过程的热力学模型及计算机分析 [J]. 工程热物理学报, 1988, 9(4): 299-303.
- [6] WU Peiyi, ZHU Shaowei. The thermodynamic model and computational analysis of working process of thermocompressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9(4): 299-303.
- [6] 王俊杰, 周远, 朱文秀. 热压缩机 [J]. 压缩机技术, 1991(2): 40-43.
- WANG Junjie, ZHOU Yuan, ZHU Wenxiu. Thermal-compressor [J]. Compressor Technology, 1991(2):

- 40-43.
- [7] 吴小华, 杨俊玲, 林文野, 等. 直线电机驱动热压缩机数值模拟及实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, V32(5): 741-744.
- WU Xiaohua, YANG Junling, LIN Wenye, et al. Numerical simulation and experimental study of linear motor direct-driven thermo compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, V32(5): 741-744.
- [8] 薛小代, 王俊杰, 蔡惠坤, 等. 平衡活塞式热压缩机的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, V32(7): 1091-1094.
- XUE Xiaodai, WANG Junjie, CAI Huikun, et al. Research of balanced piston thermocompressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, V32(7): 1091-1094.
- [9] 饶俊峰, 邱利民, 陆军亮, 等. 两相热压缩机冷却方式的比较研究 [J]. 低温工程, 2012(1): 2-6.
- RAO Junfeng, QIU Limin, LU Junliang, et al. Comparison study on cooling methods of a two-phase thermocompressor [J]. Cryogenics, 2012(1): 2-6.
- [10] 饶俊峰, 邱利民, 陆军亮, 等. 基于低品位热源的两相热压缩机初步实验 [J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1596-1601.
- RAO Junfeng, QIU Limin, LU Junliang, et al. Preliminary experimental study on a two-phase thermocompressor driven by low-grade heat bourses [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(17): 1596-1601.
- [11] 季伟, 王俊杰, 周远, 等. 热压缩机驱动的脉冲管制冷机实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2013(7): 1221-1224.
- JI Wei, WANG Junjie, ZHOU Yuan, et al. Experimental study of a novel thermocompressor driven pulse tube refrigerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013(7): 1221-1224.
- [12] 赵月晶, 王晓涛, 戴巍, 等. VM 液氦温区制冷机中热压缩机性能的数值模拟与实验研究 [J]. 低温工程, 2015(6): 11-15.
- ZHAO Yuejing, WANG Xiaotao, DAI Wei, et al. Experimental study and numerical simulation of thermal compressor performance in VM refrigerator in liquid helium temperature region [J]. Cryogenics, 2015(6): 11-15.
- [13] 杨波. 稀土永磁往复式直线发电机基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006: 1-3.
- [14] 畅云峰, 张金权, 邢子文. 直线电机参数对活塞位移自传感器输出的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1382-1385.
- CHANG Yunfeng, ZHANG Jinquan, XING Ziwen,

Effect of linear motor parameters on output of piston displacement self-sensor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1382-1385.

- [15] 凌虹. 热声发动机热动力学特性的数值模拟及其重要改进: 聚能型行波热声发动机 [D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2005: 101-103.
- [16] 吴小华. 直线电机驱动热压缩机理论及实验研究 [D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2011: 83-87.

[本刊相关文献链接]

- 慕光宇, 王枫, 米小珍. 压缩机舌簧排气阀运动模型对比及动态特性影响因素分析. 2017, 51(9): 69-76. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201709010]
- 王晟旻, 琚亚平, 张楚华. 离心压缩机级通流与盘盖侧泄漏流的耦合分析. 2017, 51(7): 73-77. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201707011]
- 史云昊, 陈雪飞, 宁远钊, 等. 采用关联模型的离心压缩机喘振工况数值研究. 2017, 51(5): 128-133. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201705018]
- 武晓昆, 陈文卿, 周明龙, 等. 双螺杆制冷压缩机气流脉动衰减器的研究与开发. 2017, 51(4): 23-29. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201704004]
- 王枫, 陈征, 李花, 等. 采用多体动力学的压缩机曲轴结构优化. 2017, 51(3): 7-13. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201703002]
- 王增丽, 申迎峰, 王振波, 等. 单螺杆压缩机工作腔喷液过程几何特性及工作机理研究. 2017, 51(2): 128-134. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201702020]
- 高智勇, 董荣光, 高建民, 等. 采用聚类特征的基本概率分配生成方法及应用. 2016, 50(10): 8-14. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201610002]
- 赵永强, 赵升吨, 魏伟锋, 等. 螺杆转子磨削及计算机数控砂轮修整. 2016, 50(8): 6-14. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201608002]
- 焦玉龙, 殷翔, 王驿凯, 等. 多领域统一建模仿真下压缩机测试系统的 PI 参数整定. 2016, 50(8): 137-142. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201608022]
- 乔亦圆, 杨东方, 曹锋, 等. R134a/R23 复叠制冷系统级间容量比的优化分析. 2016, 50(2): 104-110. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201602018]
- 宋明毅, 吴伟烽, 李直. 汽车空调压缩机气阀运动规律模拟. 2015, 49(12): 144-150. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201512023]
- 孙晔晨, 田玉宝, 席光, 等. 三元叶片型面造型对离心压缩机叶轮气动性能影响的数值研究. 2015, 49(11): 135-141. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201511022]
- 周俊安, 刘立军, 肖萍, 等. 带叶片扩压器离心压缩机模型级内流研究. 2015, 49(9): 30-35. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201509006]

(编辑 赵炜 苗凌)