

HFC410A 制冷系统能量回收用滑片 膨胀机的试验研究

夏春礼, 赵远扬, 卜高选, 王智忠, 束鹏程

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 为了减小 hydro-fluorocarbons (HFCs) 制冷系统在节流过程中的能量损失, 提高系统的效率(COP), 开发出一种代替节流阀的滑片膨胀机样机, 并对样机的性能进行了测试. 结果表明, 该样机可以满足 HFCs 工质在膨胀过程中的高容积比的要求. 在以 HFC410A 为工质的制冷系统中, 当空调工况下膨胀过程的容积比达到 7.48 时, 样机运行稳定; 在 1 100~1 200 r/min 的最佳运行转速下, 样机等熵效率最高, 对应的容积效率为 20.58%. 在滑片底部安装弹簧后, 样机的容积效率提高到 44.27%, 等熵效率由原来的 20.26% 提高到 32.07%. 与节流阀系统相比, 滑片膨胀机样机系统的 COP 提高了 6.49%, 达到了 3.59.

关键词: 能量回收; 滑片膨胀机; hydro-fluorocarbons; 容积比; 空调工况

中图分类号: TK243.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0064-05

Experimental Research on Performance of Sliding Vane Expander Used in Energy Recovery Systems with HFC410A

XIA Chunli, ZHAO Yuanyang, BU Gaoxuan, WANG Zhizhong, SHU Pengcheng

(National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressors, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A sliding vane expander was designed to replace the throttling valve used in the energy recovery systems with HFCs. Its performance and the coefficient of performance (COP) of the refrigeration system were tested. The experimental results show that the prototype operated in the HFC410A refrigeration system continuously and steadily. Under the air-conditioning conditions, the volumetric ratio of HFC410A reached 7.48 in the expansion process. The prototype had the volumetric efficiency of 20.58% with the maximum isentropic efficiency of 20.26%. When springs were installed at the bottom of the vane, the volumetric efficiency and isentropic efficiency increased to 44.27% and 32.07%, respectively. The COP was 3.59 and rose by 6.49% compared with that of a throttling valve system. In addition, the optimum rotation speed range of the sliding vane expander was 1 100-1 200 r/min.

Keywords: energy recovery; sliding vane expander; hydro-fluorocarbons; volumetric ratio; air-conditioning operation

在蒸汽压缩制冷系统中, 节流过程会产生出一种不可逆能量损失, 若使用膨胀机代替节流阀, 则可有效降低节流损失和压缩机功耗, 增加系统的制冷量, 从而提高系统性能(用制冷系数 COP 表示). 在

CO₂ 跨临界制冷系统中, 膨胀机得到了广泛、深入的研究, 其结果表明, 用膨胀机代替节流阀, 系统 COP 提高了 10%^[1], CO₂ 膨胀机等熵效率最高达 42%^[2]. 西安交通大学开发出一种用于跨临界 CO₂

收稿日期: 2011-09-14. 作者简介: 夏春礼(1983—), 男, 博士生; 王智忠(通信作者), 男, 工程师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA05Z260).

网络出版时间: 2011-12-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111229.1651.006.html>

制冷系统的容积膨胀机,通过对其 p - V 图的测定、分析,得出了影响膨胀机性能的主要因素^[3]. 在常用的 HFCs (HFC134A、HFC410A、HFC407C 等) 制冷系统中,膨胀机的研究相对较少. 文献[4-5]提出了一种速度型膨胀机——培尔顿膨胀机,其以 HFC410A 为工质的样机等熵效率达到 32.8%,COP 提高 5.8%. 制冷剂在膨胀过程中有较大的容积变化,例如在空调工况下,HFC134A、HFC410A、HFC407C 在膨胀过程中的容积比分别达到了 16.84、7.48、10.05,因此在 HFCs 制冷系统应用容积膨胀机时需满足特别的要求. 本文开发出一种以 HFC410A 为工质的单工作腔滑片膨胀机样机,并在文献[6-7]的理论基础上,从试验角度对样机的性能进行了分析.

1 试验样机

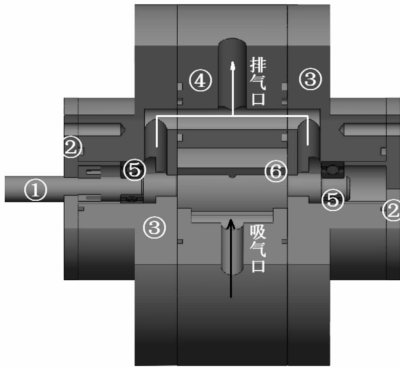
HFC410A 是目前常用的一种 HFCs 制冷剂,在空调工况下(冷凝压力 $P_c=3.4$ MPa,蒸发压力 $P_e=1.0$ MPa,液体温度 $t_l=46.1$ °C,压缩机吸气温度 $t_s=18.3$ °C),制冷剂的膨胀理论容积比为 7.48. 为了满足 HFC410A 制冷系统中容积膨胀机高容积比的要求,本文开发出一种单工作腔滑片膨胀机样机,如图 1 所示. 膨胀机转子偏心置于圆形内壁气缸中,转子上设置了滑片槽. 2 个相邻滑片、气缸内壁、转子及两端端盖共同构成一个工作腔,工作腔容积(基元容积)在工质压差的作用下规律性变化. 滑片推动转子转动,转子轴输出膨胀功,由此完成由冷凝压力到蒸发压力的膨胀过程.

为使样机顺利启动,同时尽可能消除工质压力对滑片的影响,在滑片槽的一侧开设出背压孔,滑片顶部为楔形结构,这样可以在保证工作腔与吸气口连通的同时,使得高压工质从背压孔进入滑片底部,以平衡滑片的受力.

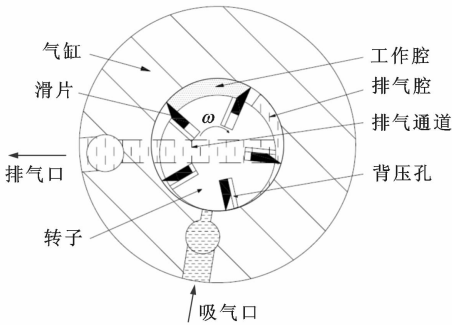
在 HFC410A 空调工况下,本文依据物性参数及制冷剂流量,通过编程计算出样机的基本参数,并按照参数加工出样机,如表 1、图 2 所示.

表 1 样机的基本参数

参数	数值
滑片数 Z	5
滑片厚度 s/mm	2.5
滑片高度 h/mm	9
气缸半径 R/mm	19.5
气缸长度 L/mm	39
转子半径 r/mm	17



①:转子轴;②:密封端盖;③:轴承座;④:气缸;
⑤:角接触轴承;⑥:滑片
(a)样机内部结构



(b)样机的工作原理

图 1 单工作腔滑片膨胀机样机结构及工作原理

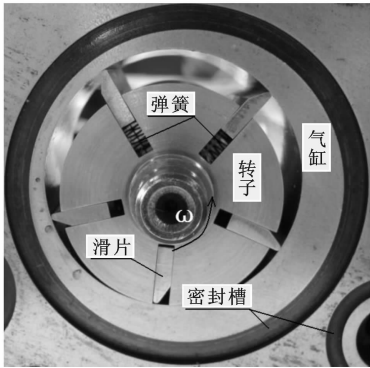
2 试验系统

为了测试样机的性能,本文搭建了与膨胀机相匹配的 HFCs 制冷系统的能量回收试验平台,如图 3 所示. 此平台是一个 $5\times 745.699\text{ W}$ (5 hp) 的小型制冷系统,其中包括压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器. 与节流阀并联安装的是样机测试平台. 冷凝器、蒸发器、节流阀进出口分别装有温度、压力等测量仪. 温度测量仪采用 Pt-100 型铂电阻传感器,测量误差为 ± 0.2 °C. 系统各节点的压力测量仪采用日本长野计器 KH15 型 HFCs 压力传感器. 系统的高、低压传感器量程分别为 5 MPa、2 MPa,传感器的精度为 0.5%. 制冷剂流量测量计采用日本フコ一セル株式会社 FT08 涡轮液体容积流量计,流量计量程为 $0\sim 0.009\text{ m}^3/\text{min}$,精度为 0.5. 各仪表在使用前均经过专业标定.

样机输出功采用扭矩传感器测量,通过调节与扭矩传感器相连的发电机负载,可以改变样机转速,从而测出样机的性能. 系统流量测量由安装在过冷水箱后的液体流量计完成.



(a)样机



(b)工作腔



(c)滑片

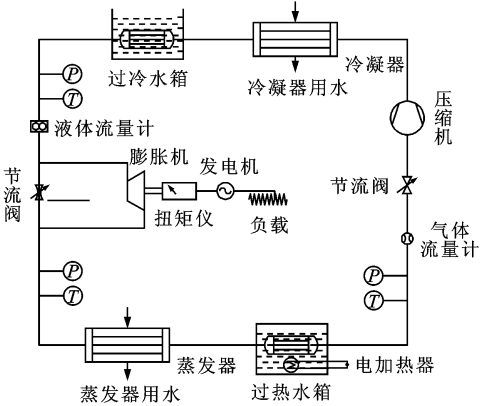
图 2 样机及其零件

为了使测量范围更大、测量精度更高,在冷凝器和蒸发器之后分别加装了过冷水箱和过热水箱,通过调节水温可以得出不同工况下的样机性能。

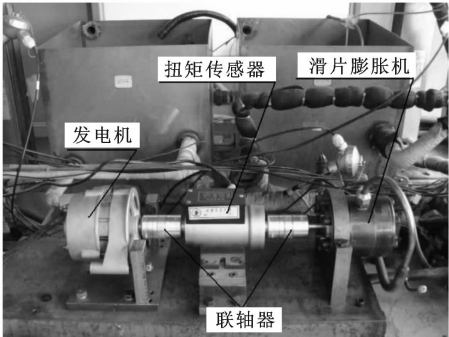
为了进一步分析样机性能的影响因素,在保持以上样机结构的基础上,对样机中的滑片进行了简单改进,主要表现为:原样机是通过背压孔的引压作用来平衡滑片顶端的气体力,改进样机是在滑片底部安装了弹簧(见图 2),通过弹簧力将滑片顶出滑片槽,从而克服了滑片顶端的气体力。

3 试验结果及讨论

以 HFC410A 空调工况为测试工况,在保持各参数不变的情况下,通过改变样机的转速来测试样



(a)能量回收平台



(b)HFCs 制冷系统

图 3 HFCs 制冷系统及其能量回收平台

机在不同转速下的输出性能,包括系统的流量、制冷量,以及样机的容积效率、等熵效率和 COP。

系统的质量流量和制冷量随转速的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出:质量流量随着转速的提高而增大,在工况不变的情况下,系统制冷量的变化和质量流量的变化几乎一致;当转速从 1 000 r/min 提高到 1 700 r/min 时,系统质量流量的变化范围为 0.085 36 ~ 0.097 31 kg/s,系统的制冷量则从 12.65 kW 提高到 14.36 kW。

容积效率与转速的关系如图 5 所示。容积效率定义为无泄漏时理想膨胀机的系统流量与实测流量的比值。它反应的是样机的泄漏情况,泄漏包括由机械加工技术引起的不可排除泄漏和由滑片与气缸内壁接触不良引起的可以消除的泄漏。

从图 5 中可以看出,样机的容积效率随着转速的提高而增大,说明样机的泄漏量随转速的提高而减少,原因是转速提高,样机中滑片受到的离心力增大,滑片顶部与气缸内壁紧密接触,从而减少了泄漏量,增大了容积效率。滑片底部安装弹簧之后,当转速低、滑片离心力较小时,受弹簧初始弹力的影响,

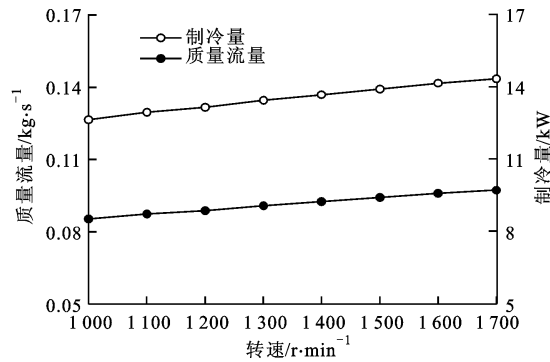


图 4 系统的质量流量和制冷量随转速的变化

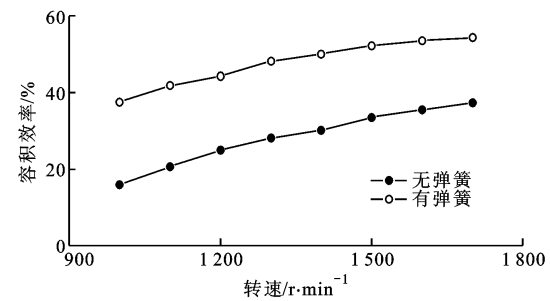


图 5 容积效率与转速的关系

滑片顶部的接触相对紧密,从而容积效率有所提高.容积效率随着转速的提高而增大,但是样机的等熵效率随转速的变化则有所不同.

等熵效率与转速的关系如图 6 所示.等熵效率是反映样机回收能力的参数,同样的工质膨胀功,等熵效率越大,回收功越大.从图 6 可以看出,在测试工况不变的情况下,工质在单位流量下的理论膨胀功保持不变,而样机的等熵效率随着转速的提高先增后减.当转速为 1 100 r/min 时,等熵效率的最大值为 20.26%,此时的容积效率为 20.58%.滑片底部安装弹簧之后,等熵效率明显提高.当转速为 1 200 r/min 时,等熵效率提高到 32.07%,此时的容积效率为 44.27%.这说明,对于低转速,随着转速的提高,容积效率增大,等熵效率提高;对于高转速,随着转速的提高,容积效率继续增大,此时滑片顶部与气缸内壁的摩擦功耗增大,等熵效率随之下降.

COP 及 COP 变化率与转速的关系如图 7 所示.从图 7 可以看出,随着转速的提高,膨胀机的系统 COP 基本不变,但用是膨胀机代替节流阀之后,无论膨胀机内是否使用弹簧, COP 均有所提高. COP 变化率可反映 COP 提高的比率.制冷系统中,用膨胀机代替节流阀之后, COP 在 1 200 r/min 时

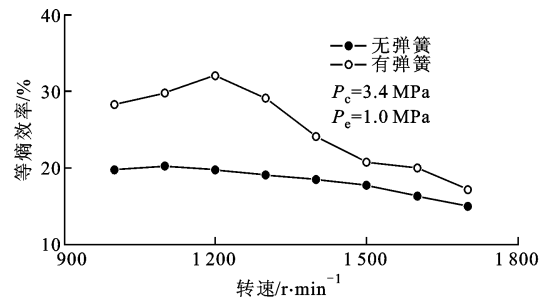


图 6 等熵效率与转速的关系

最大,为 6.49%.这说明,膨胀机应用于制冷系统是可行性.滑片底部安装弹簧之后,系统虽然存在最大的 COP 变化率,但是样机摩擦功耗带来的压缩机功耗的提高是不容忽视的,所以随着转速的提高, COP 变化率急剧下降.

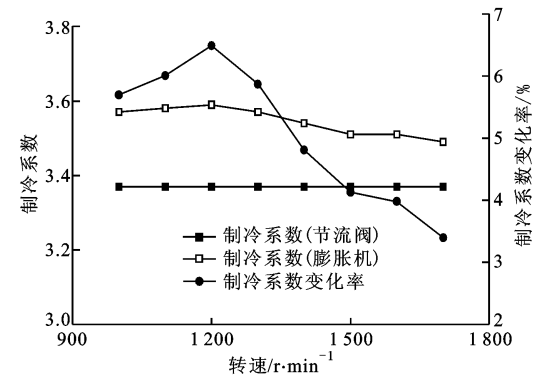


图 7 COP 及 COP 变化率与转速的关系

4 结 论

HFC410A 是目前最常用的 HFCs 制冷剂,本文以 HFC410A 为制冷工质,开发出一种滑片膨胀机样机,该样机可满足 HFC410A 工质膨胀过程中高容积比的要求.

测试结果表明,在试验系统中,样机运行平稳、可靠,用膨胀机代替节流阀可以有效提高系统的 COP,在转速为 1 200 r/min 时, COP 达到了 3.59,比节流阀系统提高了 6.49%,此时样机的等熵效率和容积效率分别为 32.07%和 44.27%.

为了改进样机性能,本文在滑片底部安装了弹簧,此举虽然可以提高 COP,但是弹簧力使得摩擦功耗增加,尤其是在高转速情况下,滑片的离心力明显增大,在弹簧力、气体力、离心力等合力的作用下,滑片与气缸内壁产生的摩擦功耗不容忽视.今后的测试工作将针对摩擦功进行,并试图通过减小摩擦功耗来提高样机的性能.

参考文献:

- [1] BAEKJ S, GROLL E A, LAWLESS P B. Piston-cylinder work producing expansion device in a transcritical carbon dioxide cycle: experimental investigation [J/CD]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28 (2): 1410-151.
- [2] HUFF H J, RADERMACHER R. Experimental investigation of a scroll expander in a carbon dioxide air-conditioning system [C/CD]// International Congress of Refrigeration. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2003: ICR0485.
- [3] 杨炳春, 郭蓓, 彭学院, 等. CO₂ 滑片膨胀机热力过程的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (3): 313-317.
- YANG Bingchun, GUO Bei, PENG Xueyuan, et al. Experimental research on internal working process of rotary vane expander in CO₂ refrigeration system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (3): 313-317.
- [4] 贺滔, 夏春礼, 束鹏程, 等. 培尔顿式膨胀机的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43 (9): 95-99.
- HE Tao, XIA Chunli, SHU Pengcheng, et al. Experimental research on a Pelton type expander used in refrigeration system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43 (9): 95-99.
- [5] HE Tao, XIA Chunli, ZHAO Yuanyang, et al. An experimental study on energy recovery by a Pelton-type expander in a domestic refrigeration system [J]. HVAC & R Research, 2009, 15 (4): 785-799.
- [6] 王猛, 赵远扬, 李连生, 等. 两级旋叶式膨胀机动力特性的理论研究 [J]. 流体机械, 2010, 38 (3): 17-21.
- WANG Meng, ZHAO Yuanyang, LI Liansheng, et al. Theoretical research on dynamic characteristic of rotary vane expander [J]. Fluid Machinery, 2010, 38 (3): 17-21.
- [7] 王猛, 赵远扬, 束鹏程, 等. 蒸汽压缩式制冷系统中能量回收旋叶膨胀机的几何理论研究 [J]. 制冷学报, 2009, 30 (6): 1-4.
- WANG Meng, ZHAO Yuanyang, SHU Pengcheng, et al. Theoretical research on rotary vane expander for energy recovery in vapor compression refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30 (6): 1-4.

(编辑 苗凌)