

文章编号: 0253-4339(2010)05-0001-06

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2010.05.001

二氧化碳跨临界循环系统用新型膨胀机的研发

姜云涛 马一太 李敏霞 王伟

(天津大学机械工程学院 天津 300072)

摘要 由于传统的人工合成制冷剂对环境的不良影响, 环保的自然工质CO₂重新兴起。提高CO₂跨临界循环系统的效率成为CO₂制冷技术发展的一个研究重点。采用膨胀机可以提高CO₂跨临界循环系统的效率, 使其接近普通制冷系统的效率。在原有单缸滚动活塞膨胀机的基础上, 设计并加工了新型双缸膨胀机样机, 对其设计过程、运动原理等进行了介绍, 并利用CO₂跨临界水-水热泵系统对样机进行了性能测试, 测试结果显示, 在试验工况下, 膨胀机的转速为780~1100r/min, 其等熵效率的为28%~33%。

关键词 热工学; 二氧化碳; 膨胀机; 双缸膨胀机; 二氧化碳跨临界循环

中图分类号: TB652; TH455

文献标识码: A

Development of Newly-Designed Expander Used in CO₂ Trans-Critical System

Jiang Yuntao Ma Yitai Li Minxia Wang Wei

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract Improving the efficiency of CO₂ trans-critical systems has been the subject of much research in the refrigeration technologies development. In our study, a new two-cylinder expander was designed and fabricated on the basis of our previous single-cylinder rolling-piston expander. A CO₂ trans-critical water-water heat pump system was applied to test the efficiency of the expander presented. The test results show that the efficiency was 28%-33% when the rotating speed of the expander ranged from 780 to 1100 r/min under the testing conditions.

Keywords Pyrology; CO₂; Expander; Two-cylinder expander; CO₂ trans-critical cycle

CO₂作为自然界中本来就存在的制冷剂, 自上世纪九十年代开始^[1-2], 受到越来越多的关注, 国内外很多学者对CO₂作了很多的研究工作^[3-6], CO₂作为传统人工合成制冷剂的替代物重新兴起。

以CO₂作为制冷剂的循环一般采用跨临界压缩循环(二氧化碳的临界温度较低, 为31.1℃), 而人工合成制冷剂的制冷循环为亚临界循环。在空调工况下, CO₂制冷剂循环系统的制冷效率低于人工合成制冷剂的系统效率。由于CO₂跨临界循环的高低压差较大(约6MPa), 节流过程损失很大, 因此使用膨胀机可回收节流过程的有用功以提高整个系统的效率(约提高25%); 而对普通的制冷装置, 采用膨胀机回收有用功提高的系统效率约为5%~10%, 因此, 通过使用膨胀机可以使CO₂跨临界循环的效率得到提高, 以接近普通工质的亚临界

循环效率。

CO₂膨胀机一般是从压缩机发展而来的, 其类型较多。由于膨胀机出口CO₂的比容小于压缩机入口工质的比容, 膨胀机的工作腔容积不及压缩机工作腔容积的1/2, 膨胀机的尺寸小于压缩机, 因此, 膨胀机的制造成本要低于同类型压缩机的成本。到目前为止, 已经公开的类型包括自由活塞式CO₂膨胀机、铰接叶片式膨胀机、涡旋式膨胀机、螺杆式膨胀机以及转子式膨胀机等。根据最近公开的文献, 涡旋式和转子式CO₂膨胀机的进展明显。

H.J.Huff等^[7]在半封闭R134a涡旋压缩机的基础上, 先后做了两台CO₂涡旋膨胀机样机。样机1是通过将涡圈的高度由14.0mm消减到1.7mm以适应CO₂系统中压缩机的流量要求, 结果泄漏严重。后来的样机2则采用较大容量的压缩机, 以避免改

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划2007AA05Z262)和国家自然科学基金(50676064)资助项目。(The project was supported by National High-Tech R&D Program of china (863 Program No.2007AA05Z262) and National Natural Science Foundation of China(No.50676064).)

收稿日期: 2009年12月4日

变其所用旋转压缩机的尺寸,最高等熵效率达到42%。日立公司(Hitachi)介绍了其研发的CO₂涡旋膨胀机的最新进展^[8],样机的吸气容积为2.8cm³,内置容积比为2.0,测试结果显示,涡旋膨胀机的最高等熵效率为83%,最优转速在2200~3400r/min之间,膨胀机的最优压力比略大于理想压力比。松下公司(Matsushita)也开发出CO₂涡旋膨胀机样机^[9],涡旋膨胀机中存在两条泄漏路径会影响到容积效率,通过使用过膨胀和利用油膜压力,解决轴向间隙和径向间隙的问题,以提高容积效率。

日本多家公司和研究所进行了转子式膨胀机的研究,其中松下公司开发出两级转子式膨胀机^[10],将其与涡旋压缩机同轴连接,压缩机吸气容积为4.0cm³,通过动力学分析,建立了性能仿真模型,利用仿真优化设计得出最优方案,在实验中发现一级膨胀机的偏心率和二级膨胀机的高度对膨胀机的效率有相当大的影响。测试结果表明,膨胀机的效率约为45%~55%,使系统的COP提高了6%。

1 新型双缸滚动活塞膨胀机的设计

1.1 设计思路及定义

天津大学热能研究所对二氧化碳作为制冷剂的研究已有十二年的时间,于2001年开发出第一台滚动活塞式膨胀机^[11],随后不断地进行改进,效率也不断地提高。出于加工简单、安全和易于控制等原因,滚动活塞式膨胀机采用凸轮阀杆结构控制进气,该机械控制进气结构存在摩擦损失、节流损失以及噪声等问题,因此,自2006年开始了新型双缸滚动活塞膨胀机的研究^[12],在设计过程中主要考虑了以下因素:

1)已经成功研发的三代膨胀机皆为滚动活塞式,为新型CO₂膨胀机的研发积累了一定的经验。膨胀机应该和二氧化碳压缩机相匹配,同时,鉴于滚动活塞式的特点以及实验室的加工条件,该新型膨胀机仍采用滚动活塞形式。

2)膨胀机回收的有用功可以带动发电机发电,也可以和压缩机同轴相连将膨胀功传输给压缩机。

3)上下气缸的滑板存在一定的夹角 λ 。上气缸排气口与下气缸进气口之间通过连通孔相连,连通管道尽可能短以减少余隙容积。

4)上气缸与进气管相连,进气温度高;下气缸与排气管相连,排气温度低,上下气缸之间安装中间隔板,以减小上下气缸间的传热损失,隔板厚度需要优化,既要保证隔板的隔热效果又要减少连通管道的长度以减少余隙容积。

5)不需要单独进气控制装置,膨胀空间的形成不需要凸轮阀杆结构。随着转子旋转,一级转子、二级转子和两气缸滑板在两气缸之间形成密闭的膨胀空间,高压二氧化碳在密闭空间中膨胀降压。

6)上气缸与进气管相连,二氧化碳始终是流动的,因此,不存在凸轮阀杆在控制进气过程中开启和关闭造成管道中二氧化碳的停顿与畅通,降低压力脉动。

双缸滚动活塞膨胀机不需要单独的吸气控制装置,采用两套气缸,其中一级气缸始终与吸气管相连,二级气缸始终与排气管相连,其结构如图1所示。需要说明的是,双缸的含义并不是两个独立的膨胀过程,以滚动转子为对象,可称为双转子滚动活塞式膨胀机;因为原则上还是单级膨胀,存在两个膨胀腔,上下气缸都参与膨胀,因此,准确的名称为双缸单级滚动活塞式膨胀机。

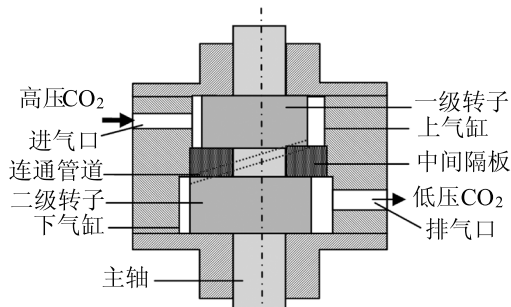
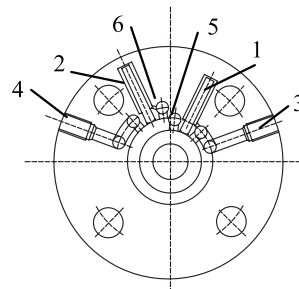


图1 双缸滚动活塞式膨胀机结构示意图

Fig.1 Diagram of two-cylinder rolling piston expander

1.2 气缸间连通的设计



1 一级膨胀机的滑板 2 二级膨胀机的滑板 3 进气孔
4 排气孔 5 一级膨胀机的排气口 6 二级膨胀机进气口

图2 两级滚动活塞膨胀机连通孔示意图

Fig.2 Diagram of connecting hole in two-cylinder rolling piston expander

双缸滚动活塞膨胀机主要由第一级膨胀机、第二级膨胀机和中间隔板组成。第一级膨胀机和第二级膨胀机的滑板相对位置如图2所示。为使双缸膨胀机的上下活塞及滑板构成膨胀腔,二级膨胀机的进气孔(6)与一级膨胀机的排气孔(5)的相对位置很关键。为减小连通孔所造成的余隙容积,连通孔

的设计要点是：1) 连通孔的孔径合理；2) 孔的长度尽可能短。

1.3 运动原理

双缸滚动活塞膨胀机相当于采用了两套膨胀机系统，因此，需要考虑两套膨胀机系统的运动规律，比单级滚动活塞膨胀机更加复杂。其运动形式需要详细说明以助理解，其运动形式分解如图3

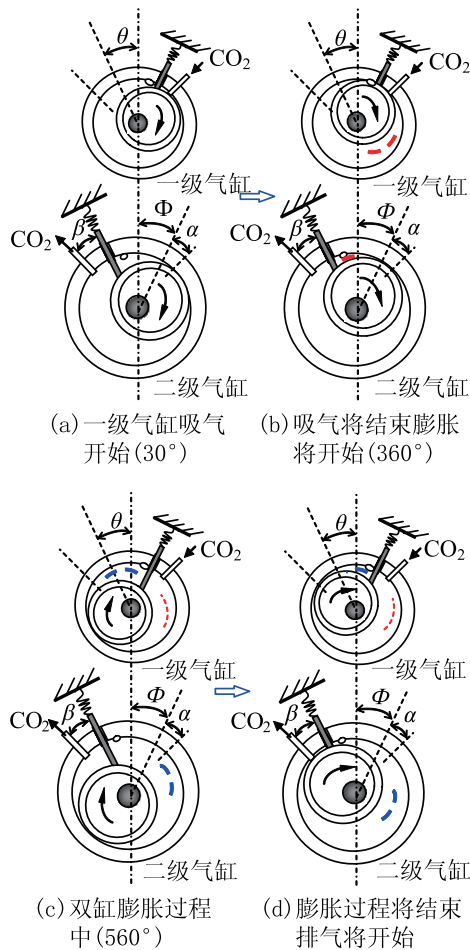


图3 双缸滚动活塞式膨胀机运动示意图

Fig.3 Diagram of moving process of two-cylinder rolling piston expander

所示，以一级气缸为参考对象，随着活塞转过进气口，开始吸气，吸气一周再次转过吸气口时吸气结束，接着开始膨胀过程，当二级活塞转过排气口时完成膨胀过程。

2 双缸滚动活塞膨胀机的实验结果及分析

2.1 实验系统

加工完成的双缸滚动活塞膨胀机样机由三部分组成，膨胀机的上端与电动发电机连接，膨胀机的下端与底座连接，中间部分为双缸膨胀机。利用CO₂跨临界水-水热泵实验系统对双缸滚动活塞膨胀机进行试验，CO₂跨临界循环水-水热泵系统主要由CO₂跨临界热泵系统、冷冻水和冷却水系统、膨胀机测试系统以及数据测量、采集和控制系统组成，如图4所示。

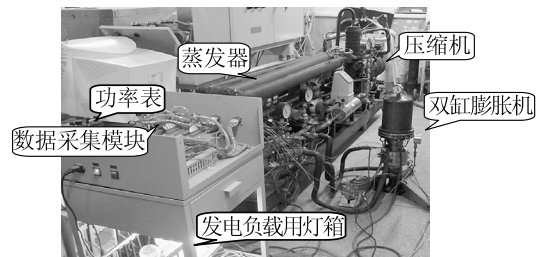


图4 带双缸滚动活塞膨胀机的水-水热泵外观图

Fig.4 Outlook of CO₂ water-water heat pump system to test two-cylinder rolling piston expander

2.2 实验结果及分析

利用CO₂跨临界水-水热泵实验系统对双缸单级滚动活塞膨胀机进行了实验，实验工况及双缸滚动活塞膨胀机的效率如表1所示。

实验结果表明，新型双缸滚动活塞膨胀机样机的研发初步成功，在实验工况下，膨胀机的转速为780~1100r/min。双缸滚动活塞膨胀机效率的主要范围为28%~33%。在实验中，双缸滚动活塞膨

表1 双缸滚动活塞膨胀机试验结果

Tab.1 Results of two-cylinder rolling piston expander

序号	冷却器进水温度/℃	冷却器出水温度/℃	蒸发器进水温度/℃	蒸发器出水温度/℃	膨胀机转速/(转/分)	CO ₂ 膨胀机入口压力/MPa	CO ₂ 冷却器出口温度/℃	CO ₂ 膨胀机出口温度/℃	CO ₂ 膨胀机效率/%
1	21.12	30.02	11.57	8.8	920	6.73	25.5	2.7	26
2	19.73	28.68	12.62	9.4	907	6.58	24.6	1.8	33
3	20.38	27.7	11.72	9.22	960	6.45	23.8	0	30
4	20.29	27.37	12.29	9.71	890	6.41	23.6	-0.2	32
5	20.18	27.46	12.02	9.62	920	6.4	23.4	-0.5	32
6	20.09	27.31	12.32	9.68	960	6.38	23.4	-0.6	32
7	20.53	27.34	11.63	9.37	940	6.38	23.4	-0.7	31.6
8	20.44	27.79	11.51	8.99	880	6.4	23.6	-0.7	31

胀机运转平稳, 噪声很小。这是由于省去了专门的进气控制装置, 因此像单级滚动活塞膨胀机的凸轮与阀杆间的撞击产生的噪声等不存在了。但是膨胀机的效率尚低于设计期望值, 膨胀机入口压力低于临界压力, 既有加工条件的因素也有设计的因素, 概括起来, 可能存在以下原因:

1) 双缸滚动活塞膨胀机旋转过程中, 存在两套膨胀机的运动, 由于加工精度等原因, 使膨胀机中的总泄漏损失和总摩擦损失等不可逆损失增大。

2) 膨胀机内部活塞与端面的间隙可能较大, 使膨胀机内部高低压工作腔之间的泄漏增大, 循环高压没有达到超临界, 膨胀机的效率也会受到影响。

3 结论

在原有单缸膨胀机的基础上开展了新型的双缸膨胀机的研究, 介绍了新型二氧化碳膨胀机的设计思路、运动原理, 研制了新型二氧化碳膨胀机样机, 并利用CO₂跨临界循环水-水热泵系统进行了性能测试, 得出了初步的测试结果, 主要结论如下:

1) 新型二氧化碳膨胀机采用双缸滚动活塞形式, 通过上下滑板和上下活塞形成密闭的膨胀空间, 在结构上采用两套膨胀机系统, 取消了进气控制装置。

2) 初步的测试结果表明, 样机初步研制成功, 膨胀机的转速为780~1100r/min。双缸滚动活塞膨胀机效率的主要范围为28%~33%。

随着泄漏等问题的分析和相关改进工作的进行, 双缸滚动活塞膨胀机效率将进一步提高。

致谢: 本文部分工作得到中国科学院低温工程学重点实验室开放课题资助。

参考文献

- [1] G Lorentzen. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCFC predicament [J]. Int J Refrig, 1995, 18 (3): 190-197.
- [2] Lorentzen G, Pettersen J. A new efficient and environmentally benign system for car air conditioning [J]. Int J Refrig, 1993, 16(1): 4-12.
- [3] Robinson D M, Groll E A. Efficiencies of transcritical CO₂ cycles without an expansion turbine [J]. Int J Refrig, 1998, 21 (7): 577-589.
- [4] MA Yitai, YANG Zhao, LV Canren. Thermodynamic analysis of CO₂ trans-critical cycle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19 (6): 665-668.
- [5] 丁国良, 张春路, 等. 跨临界二氧化碳汽车空调特性分析[J]. 制冷学报, 2001, 21 (3): 17-23. (Ding Guoliang, Zhang Chunlu, et al. Performance analysis of transcritical carbon dioxide car air-conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 21 (3): 17-23.)

- [6] Hiroshi Hasegawa, Mitsuhiro Ikoma, et al. Experimental and theoretical study of hermetic CO₂ scroll compressor[C]// Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Purdue University, USA, 2000: 347-353.
- [7] Huff H J, Radermacher R, Preissner M. Experimental investigation of a scroll expander in carbon dioxide air-conditioning system[C]// International Congress of refrigeration, Washington D.C. USA, 2003: ICR0485.
- [8] Hirokatsu KOHSOKABE, Masaki KOYAMA. Performance characteristics of scroll expander for CO₂ refrigeration cycles[C]// International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 14-17, 2008.
- [9] Akira HIWATA, Akira IKEDA, Takashi MORIMOTO, et al. Axial and Radial Force Control for CO₂ Scroll Expander[C]// International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 14-17, 2008.
- [10] Masaru Matsui, Masanobu Wada, Takeshi Ogata, et al. Development of high-efficiency technology of two-stage rotary expander for CO₂ refrigerant[C]// International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 14-17, 2008.
- [11] 魏东. 二氧化碳跨临界循环换热与膨胀机机理的研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2002. (Wei Dong. The study of heat transfer and expansion mechanism for carbon dioxide transcritical cycle[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2002.)
- [12] 姜云涛. CO₂跨临界水-水热泵及两缸滚动活塞膨胀机的研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2009. (Jiang Yuntao. Research on CO₂ transcritical water-water heat pump and two-rolling piston expander[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2002)

作者简介:

马一太, 男(1945-), 教授, 热能研究所所长, 天津市南开区卫津路92号天津大学机械工程学院, 300072, (022) 87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn。主要研究方向有: CO₂跨临界循环的机理和实验研究, 主要用能产品能效标准的研究。现在进行的研究项目有: 国家自然科学基金项目——二氧化碳压缩膨胀机的关键问题研究, 国家重大科技支撑专项计划2006BAK04A22——主要用能产品和设备节能标准与能效标识研究。

About the author:

Ma Yitai (1945-), male, Professor, head of Thermal Energy Research Institute, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 92#, Weijin Street, Tianjin, China, 300072, (022) 87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn. Research fields: mechanism and experimental research for CO₂ trans-critical cycle, research for energy efficiency standard of main energy use productions. The author takes on several projects as follows: the Natural Science Foundation of China, which is the research on key Issues of carbon dioxide expessor; the Important National Science & Technology Specific Projects2006BAK04A22, which is the research on energy efficiency standard and label of main energy use productions and facilities.