文章编号: 0253-4339 (2012) 03-0005-04 **doi:** 10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 03. 005

CO₂双缸滚动活塞膨胀机的实验研究

张美兰 马一太 李敏霞

(中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津大学热能工程系 天津 300072)

摘 要 通过实验研究分析了CO₂双缸滚动活塞膨胀机的中间通道对其效率及膨胀比的影响。对CO₂双缸滚动活塞膨胀机 的中间通道进行了改进,同时减小了中间通道的长度和直径,并进行了相关实验,结果表明:膨胀机的入口最优工况为 26℃,6.5MPa,回收功率最高达到200W,效率最高达到42.3%。在各种实验工况下,测得的膨胀比已经达到了2.2左右,已 经比较接近CO₂双缸滚动活塞膨胀机的设计膨胀比2.5,但仍有改进的空间。

关键词 热工学; CO₂; 膨胀机; 跨临界; 实验分析

中图分类号: TB653

文献标识码: A

Experiment Research of CO₂ Two-Cylinder Rolling Piston Expander

Zhang Meilan Ma Yitai Li Minxia

(Key Laboratory of Medium-Low Temperature Energy Efficient Utilization of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract The influence of the intermediate channel of CO_2 two-cylinder rolling piston expander on efficiency and expansion ratio is investigated in this paper. The channel is improved by decreasing its diameter and length at the same time. The experiment of the improved expander is carried out in this paper. 26°C, 6.5MPa is the optimum work condition of the test. The recovered power of the expander is up to 200W and the efficiency is 42.3%. The expander ratio has already gone to 2.2, which is very close to the theoretical ratio 2.5. However, there is still the room for improvement of the expander.

Keywords Pyrology; CO₂; Expander; Transcritical; Experiment analysis

全球变暖及臭氧层破坏现已成为一个全球性 问题。制冷行业中有关制冷剂替代问题也逐渐被 业界人士所关注,而自然工质CO,因其良好的环保 性受到越来越多的青睐。膨胀机作为提高CO₂^[1-6]制 冷循环效率的根本性措施,是推动CO,跨临界循环 走向应用的重要动力。天津大学热能研究所先后开 发了滚动活塞式膨胀机和摆动转子式膨胀机,目前 已经开发出了第四代滚动活塞膨胀机, 该滚动活塞 膨胀机^[7]在结构方面取得了一定的突破,取消了进 气控制,采用两套气缸,其中一级气缸与进气管相 连, CO,始终是流动的,减少了凸轮阀杆的摩擦损 失和噪音等问题,降低了系统的压力脉动,其结构 如图1所示。但是因为是初次设计,结构方面存在 部分不完善的地方,天津大学热能研究所^[8]已经针 对该CO₂双缸滚动活塞膨胀机出现的泄漏等问题采 取了措施并予以改进,通过测试其不同工况下的



图1 风转于浓切活墨八膨胀机结构示息图 Fig.1 The structure diagram of the expander

效率,验证了其最终效果。此次改进是有一定成效 的,但距离预期效率还是有一定差距,究其原因, 双缸滚动活塞膨胀机一级气缸和二级气缸之间的中 间通道对膨胀比的影响较大,中间通道作为余隙容

收稿日期:2011年12月4日 (2011中国制冷学会学术年会约稿论文)

基金项目:国家863计划(2007AA05Z262)资助项目。(The project was supported by the National High-Tech R&D Program of China (863 Program) (No.2007AA05Z262).)

积, 孔径应该尽可能小, 孔的长度尽可能短。原设 计可能是忽略了通道的容积, 致使理论计算的膨胀 比为2.45, 但在实验中发现原样机的膨胀比远小于 设计值。故针对此余隙容积对膨胀机的中间通道进 行了改进, 将中间通道直径由原来的8mm改为现 在的4mm,且将之前的中间隔板上长度约为40mm的 人字形通道改为长度约为20mm的直线型通道, 并 通过实验进行了验证。

1 膨胀机的实验系统介绍



1 压缩机 2 油分离器 3 气体冷却器 4 质量流量计 5 节流阀
6 膨胀机 7 截止阀 8 蒸发器 9 气液分离器 10 水泵
11 水流量计 12 水箱

图2 CO₂水-水热泵实验台流程示意图 Fig.2 The diagram of CO₂ water-water heat pump test equipment

CO₂水-水热泵实验台主要有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实 验数据的测量、采集和控制系统组成的,实验流程 如图2所示。

2 实验方法

膨胀机的等熵效率定义为:膨胀机进口处的 焓值由测得的进口处温度T_{in},压力p_{in}确定,CO₂工 质在膨胀机中等熵膨胀,出口处的焓值由熵S_{in}和出 口处测得的压力p_{out}确定。系统中的质量流量计可 以读出实时的CO₂质量流量m_{real}。膨胀机对外输出 的功直接用来发电,电功率可以用功率表直接测 量,发电机的效率是已知的。通过以上数据,即可 计算出膨胀机的等熵效率。

3 实验结果分析

图3显示了CO₂双缸滚动活塞膨胀机效率随进 出口压力的变化。膨胀机的出口压力随着进口压 力的升高而升高。进口压力最高达到了7.7MPa, 但此时出口压力也达到了4MPa。仍属于欠膨胀状 态,此时膨胀机的效率也不是最高的。膨胀机在 实验中最高效率达到了42.3%,此时进口压力在6.5 MPa,在亚临界状态。



图3 膨胀机效率随进出口压力的变化 Fig.3 The variation of the efficiency of the expander with inlet and outlet pressure



Fig.4 The flow variation with the inlet temperature of the expander

图4表示的是带膨胀机的系统工质CO₂流量随 膨胀机入口温度的变化。从图4中可以看出,流量 随着进口温度的升高而逐渐增大。





图5表示的是系统流量随膨胀机入口压力的变化。膨胀机的入口温度和压力一般是同步变化的,依靠调节冷却水的流量和温度来改变。膨胀机入口的压力升高时,则膨胀机每次吸入的CO2工质密度变大,质量增加。

图6表示的是膨胀机的回收功率随入口压力的

变化规律。可以看到,随着入口压力的增大,回收 的功是逐渐减小的。入口压力的提高,导致了流量 的增大,膨胀机可回收功减小。



图6 膨胀机回收功率随入口压力的变化

Fig.6 The recovery power of the expander variation with the



Fig.7 The variation of the efficiency with the revolution

图7显示的是膨胀机效率随转数的变化情况。 转数从600r/min增加到900r/min的过程中,膨胀 机的效率随着转数的增加而逐渐增大。当转数在 850~900r/min之间时,效率达到最高点,膨胀机的 理论转速是1500r/min,目前由于各种原因还没有 达到,但可以预计当转速达到理论值时效率最高。



图8表示的是膨胀机效率随入口温度的变化。 膨胀机入口温度从25℃增大到35℃过程中,膨胀机 的效率呈抛物线状变化,先是逐渐升高,在26℃左 右时到达最高点,后逐渐降低。所以膨胀机的最佳



图9 膨胀机效率随回收功率的变化

Fig.9 The variation of the efficiency with the recovery power



图9表示的是膨胀机效率随膨胀机回收功率的 变化情况。目前实验过程中,膨胀机的最高回收功 率达到了200W。在此范围内,膨胀机效率都是随 着回收功率的增大而增大的。可以理解为膨胀机的 摩擦、泄漏等损失几乎是一定的,随着回收功的增 多,分子、分母同时增大,而比值也是增大的。

图10显示的是实验过程中,不同工况下膨胀 机的膨胀比,根据进出口工质CO。的比容计算得 出。可以看出,膨胀比基本保持在2.2左右,较之 第一次对膨胀机改进后的膨胀比1.5^[8]已经有了一定 的提高,与设计膨胀比2.45^[9]已经很接近了,这也 是经过此次改进后CO₂双缸滚动活塞膨胀机效率提 高的最主要原因。膨胀比近似为一个不变的量也是 合乎事实的,因为膨胀比是由膨胀机的结构尺寸决 定的,与膨胀机进出口工况无关。实验中大部分 情况下测得的转数(600~900r/min)还低于设计转数 (1500r/min)。膨胀比低于理论值,说明第一、二 级气缸容积比还要大些,今后在膨胀机的改进过程 中可再将一级气缸减小些。目前膨胀机的转数相 对比较低,主要是由于工质泄漏量比较大,能推动 转子转动的工质变少了,所以减少膨胀机的内部泄 漏及外部泄漏仍是今后膨胀机改进的重要方向。 总之, CO₂双缸滚动活塞膨胀机还是有改进的空间 的。

4 结论

1)分析了CO₂双缸滚动活塞膨胀机中间通道对 其效率及膨胀比的影响。2)对CO₂双缸滚动活塞膨 胀机的中间通道进行了改进,即同时减小中间通道 的长度和直径。3)实验中膨胀机的入口最优压力在 26℃,6.5MPa左右,回收功率最高达到200W,效 率最高达到42.3%。4)在各种实验工况下,原膨胀 机测得的膨胀比已经达到了2.2左右,已经比较接 近设计膨胀比2.5。5)膨胀机的改进方向是减少膨 胀机的内部泄漏及外部泄漏。

参考文献

- [1] Yang Junlan, Ma Yitai, Li Minxia, et al. Exergy Analysis of Trans-critical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle with an Expander[J]. Energy, 2005, 30 (7) : 1162-1175.
- [2] Halozan H, Rieberer R. Heat Pump System with Ammonia as Referent[C]//The 7th HG Gustav Lorenzen Conference on Nature Working Fluids. Trondheim, Norway, 2006.
- [3] Quack H, Kraus W E, Nick J, et al. International of a Three-stage Expander into a CO₂ Refrigeration System[C] //The 6th HR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. Glasgow, UK, 2004.
- [4] Lorentzen G.Revival of Carbon Dioxide as a Refrigerant[J]. Int. J Refrig., 1994, 17 (5) : 292-301.
- [5] Zeng Xianyang, Ma Yitai, Liu Shengchun, et al. Testing

(上接第4页)

Conference, IIR Commission B1, Heattransfer issues in natural refrigerants, College Park Meeting, 127-141.

- [22] Fukushima S, Takao Shingo, Ogoshi Hdiemasa, et al. Development of high-density cold latent heat with clathrate hydrate[R]. NKK Technical Report, 1999, 166: 65-70.
- [23] Andersson V, J Steinar Gudmundsson. Flow properties of hydrate-in-water slurries[J]. Ann. N. Y. Acad.Sci.,2000, 9 (12): 322-329.
- [24] Wang Wuchang, Shuanshi Fan, Deqing Liang, et al. Experimental studyon flow characters of CH₃CCl₂F hydrate slurry[J]International Journal of Refrigeration, 2008,31 (3): 371-378.
- [25] Anthony Delahaye, Laurence Fournaison, Salem Jerbi, et al. Rheological properties of CO₂ hydrate slurry flow in the presence of additives[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2011, 50 (13):8344-8353.
- [26] 张海潮,肖睿,宋文吉,等. 动态冰浆制造系统的温度与制 冰特性研究[C]// 中国制冷学会2009年学术年会,天津, 2009.
- [27] 刘妮, 刘道平, 谢应明. 水合物法高效储存二氧化碳气体的实验研究[J].中国电机工程学报, 2009, 29(14):

and Analyzing on P-V Diagram of CO₂ Rolling Piston Expander[C]// The 22nd International Congress of Refrigeration. Beijing, 2007.

- [6] Li Daqing, Groll Eckhard A. Trans-critical CO₂ Refrigeration Cycle with Ejector-expander Device[J]. Int. J Refrig., 2005, 28 (5) : 766-733.
- [7] 姜云涛. CO₂跨临界水一水热泵及两级滚动活塞膨胀机 的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] 王伟. CO₂双缸滚动活塞膨胀机的结构改进和试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 姜云涛, 马一太, 田华. CO2跨临界循环双缸滚动活塞 膨胀机的设计与分析[J]. 天津大学学报, 2008, 41 (10): 1209-1213. (Jiang Yuntao, Ma Yitai, Tian Hua. Design and Analysis of Trans-Critical CO2 Cycle Based on Two-Cylinder Rolling Piston Expander[J]. JOURNAL OF TIANJIN UNIVERSITY, 2008,41 (10): 1209-1213.)

作者简介

张美兰,女(1985-),硕士研究生,天津大学中低温热能高 效利用教育部重点实验室,热能工程系,(022)27406040, E-mail: mlzhang@tju.edu.cn。研究方向: CO_2 热泵系统。

About the author

Zhang Meilan (1985–), female, master graduate, Thermal Energy Research Institute of Tianjin University, Key Laboratory of Medium-Low Temperature Energy Efficient Utilization of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, (022) 27406040, E-mail:mlzhang@tju.edu.cn. Research fields: heat pump system of CO₂.

36-40. (Liu Ni, Liu Daoping, Xie Yingming. Experimental study on CO₂ storage by hydrate crystalliza-tion[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (14): 36-40.)

- [28] Clarke, M A, Bishnoi. Determination of the intrinsic rate constant and activation energy of CO₂ gas hydrate decomposition using in-situ particle size analysis[J].Chem. Eng.Sci., 2004 (59): 2983-2993.
- [29] Vysniauskas A, Bishnoi P R. A kinetic study of methane hydrate formation[J]. Chem. Eng. Sci., 1983, 38(7): 1061-1072.

通讯作者简介

刘妮,女(1974-),博士,副教授,上海理工大学能源与 动力工程学院,(021)55277261,E-mail: ni-liu@hotmail. com。研究方向:二氧化碳气体排放控制及水合物蓄能技 术应用研究。

About the corresponding author

Liu Ni (1974–), female, Ph.D/associate professor, School of energy and power engineering, University of Shanghai for Science and Technology, (021)55277261, E-mail: ni-liu@ hotmail.com.Research fields: Control of CO₂ emission and cool storage technology by gas hydrate.