

文章编号:0253-4339(2014)04-0021-04

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.04.021

两段式喷嘴引射器及其引射制冷系统性能实验研究

任立乾 郭宪民 李添龙

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘要 对采用两段式喷嘴引射器的两相流引射制冷系统进行了实验研究,并将两段式喷嘴的引射比及其系统 COP 分别与拉法尔喷嘴引射器的引射比及其系统 COP 进行了比较。实验结果表明:在冷凝/蒸发温度为 45 °C/1 °C 工况下,使用不同几何尺寸两段式喷嘴引射器的引射比均大于拉法尔喷嘴引射器的引射比,最大提高了约 18%;使用两段式喷嘴引射器的制冷系统 COP 大于使用拉法尔喷嘴引射器的制冷系统 COP,最大提高了约 12%;在蒸发温度为 1 °C 条件下,两段式喷嘴引射器及拉法尔喷嘴引射器的引射比均在冷凝温度为 45 °C 时达到最大值,而在冷凝温度为 50 °C 条件下,两种引射器的引射比均在蒸发温度为 3 °C 时达到最大值。

关键词 引射器;两相流;两段式喷嘴;引射比

中图分类号:TB65;TB61+1

文献标识码:A

Experimental Study on Performance of Dual-serial-throat Nozzle Ejector and Two-phase Ejector Refrigeration Cycle System

Ren Liqian Guo Xianmin Li Tianlong

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract The two-phase ejector refrigeration cycle (TPERC) system with a dual-serial-throat nozzle ejector was investigated experimentally, and the entrainment ratio of the ejector and the COP of the system were compared with those of the ejector with Laval nozzle and the TPERC system respectively. The experimental results indicate that the entrainment ratios of the dual-serial-throat nozzle ejectors with different geometric size are greater than those of the Laval nozzle ejectors under the working condition of the evaporating/condensing temperatures 1 °C/45 °C, the maximum increment of the entrainment ratio is about 18%; and the COP of the TPERC system with dual-serial-throat nozzle ejector is greater than that of the TPERC system with Laval nozzle ejector, the maximum increment of the COP is about 12%. Under the condition of the fixed evaporating temperature 1 °C, the entrainment ratios of both the dual-serial-throat nozzle ejector and the Laval nozzle ejector achieve the maximum values as the condensing temperature is about 45 °C. Under the condition of the fixed condensing temperature 50 °C, the entrainment ratios of the two types of ejectors achieve the maximum values as the evaporating temperature is about 3 °C.

Keywords ejector; two-phase flow; dual-serial-throat nozzle; entrainment ratio

目前,回收制冷循环高压工质的膨胀能量主要有两种方法,一种是用膨胀机代替膨胀阀^[1-2],输出的功可以用来驱动风扇或压缩机,这种方法尚有许多技术难题需要解决^[3];另一方法是用引射器代替膨胀阀^[4],工质在引射器中先将高压工质膨胀能转化成动能,然后将动能转化为压力能来加以回收。这样不但降低了节流过程中流动损失产生的热量,同时可提高压缩机的吸气压力,从而提高制冷系统性能。

国内外学者把引射器应用到制冷系统中,并对其

做了大量的研究工作。G K Alexis^[5]对以 R134a 为工质由太阳能驱动的喷射制冷循环进行了研究;V M Nguyen 等^[6]在英国地区的办公室建立了上述引射制冷循环系统,并进行了实验研究;D W Sun^[7]对蒸汽引射制冷循环进行数值模拟来预测系统性能,得出了最佳的引射器几何尺寸。马一太等^[8]以 CO₂-NH₃ 为工质的压缩喷射复叠循环系统进行了数值模拟,结果表明在低冷凝温度、高引射流体温度工况下,该制冷循环性能较高。李素芬等^[9]研究了变边界条件和变

喷嘴几何尺寸对引射器内部流场的影响,探讨了了几何参数和热力参数对流场的影响。

上述这些研究工作均是针对拉法尔喷嘴引射器的引射制冷系统,本文在不同工况和不同尺寸条件下,对两段式喷嘴引射器在制冷系统中的应用进行了实验研究。

1 实验设备

R134a 两相流引射制冷循环实验装置示意图如图 1 所示,该系统由压缩机、蒸发器、冷凝器、引射器、气液分离器、储液罐及其他附件组成。该实验装置可测量两相流引射制冷系统性能及引射器引射比等参数,同时可测量传统系统的性能,以便对二者进行比较。系统工作原理详见参考文献[10]。

图 1 中同时标示出了压力、温度及流量测点。制冷剂及水系统的温度用铂电阻温度传感器,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 制冷系统压力传感器精度为 $\pm 0.1\% \text{ FS}$; 涡轮流量计的精度为 $\pm 0.5\% \text{ R}$; R134a 流量测量采用精度为 $\pm 0.1\% \text{ R}$ 的流量计测量。

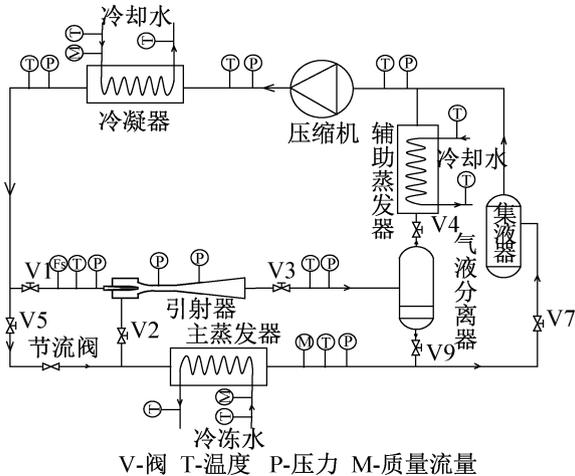


图 1 R134a 制冷系统装置示意图

Fig. 1 Equipment diagram of R134a refrigeration cycle

流经冷凝器的冷却水由冷水机组冷却,并通过电加热器调节其温度,流经蒸发器的冷冻水须由加热器调温,两路水的流量均用电磁阀来控制,这样可以提供稳定的冷凝压力、过冷度、蒸发压力及过热度。通过计算水侧的换热量得出蒸发器的换热量,也可通过 R134a 制冷剂的焓差和其质量流量计算制冷量,再根据压缩机的耗功计算系统的 COP,通过被引射流质量流量与主引射流质量流量之比算出引射比。

两段式喷嘴及引射器的结构简图如图 2 所示。由于汽液两相流中汽、液相密度相差很大,造成拉法尔喷嘴内部汽液相速度相差较大,液滴直径较大,导

致引射器的引射比较低^[2]。而对于两段式喷嘴引射器,工质在流经第一段喷嘴时,制冷剂先加速,然后在扩张段减速,这个过程中制冷剂产生压降并汽化,制冷剂经过第二段喷嘴时速度增加,制冷剂液滴破碎,从而使其接近均质流的状态,达到与单相流相近的引射效率,大幅提高了引射器的性能。

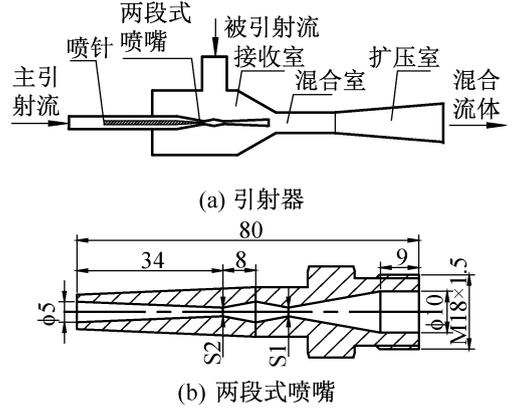


图 2 两段式喷嘴及引射器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-serial-throat nozzle and ejector

2 实验结果及分析

为了验证两段式喷嘴引射器的性能及其影响因素,分别对使用两段式喷嘴引射器和拉法尔喷嘴引射器的两相流引射制冷系统性能进行了实验。引射器设计成可拆装结构,在两种引射器比较实验时只需替换喷嘴,这样保证了其它部件的统一性。两段式喷嘴的结构尺寸如图 2(b) 所示,其喉部面积列于表 1 中。

本文分别对使用不同几何尺寸喷嘴引射器的系统在不同工况进行了实验。引射器喷嘴试件几何尺寸如表 1 所示。

表 1 引射器喷嘴几何尺寸

Tab. 1 Geometrical parameters of nozzles

| 试件序号 | 拉法尔喷嘴喉部面积/ mm^2 | 两段式喷嘴引射器 | | 扩张角 |
|------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|
| | | 第一喉部面积 $S1/\text{mm}^2$ | 第二喉部面积 $S2/\text{mm}^2$ | |
| 1 | 2.27 | 2.27 | | |
| 2 | 2.55 | 2.55 | | |
| 3 | 2.84 | 2.84 | 2.27 | 3° |
| 4 | 3.14 | 3.14 | | |
| 5 | 3.46 | 3.46 | | |

2.1 不同喉部面积引射器性能比较

分别对表 1 中试件进行了实验。图 3 为在蒸发

温度为 1 °C、冷凝温度为 45 °C 的工况条件下引射器喷嘴喉部截面积对引射比及系统性能的影响。

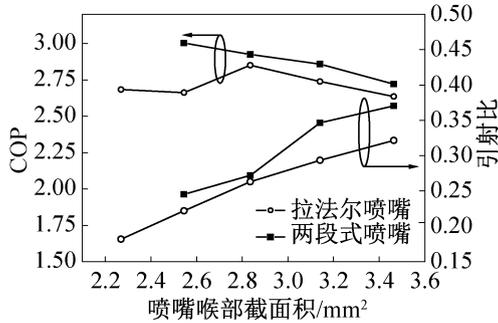


图 3 COP 和引射比随喷嘴喉部截面积的变化
Fig. 3 Variation of COP and entrainment ratio with cross-section area of nozzle throat

从图 3 中可以看出,对于两段式喷嘴引射器和拉法尔喷嘴引射器,其引射比均随喷嘴喉部截面积的增加而升高,而两段式喷嘴引射器的引射比高于拉法尔喷嘴引射器的引射比,最大提高了约 18%。拉法尔喷嘴引射器制冷系统的 COP 随着喷嘴喉部截面积的增加先升高后降低,在喷嘴喉部截面积为 2.84 mm² 时达到最大值;两段式喷嘴引射器制冷系统的 COP 随着喷嘴喉部截面积的增加而降低,但始终高于拉法尔喷嘴引射器制冷系统的 COP,最大提高了约 12%。实验数据显示 COP 提高主要是由于是两段式喷嘴引射器引射比较大,其制冷系统中通过蒸发器的制冷剂流量大于拉法尔喷嘴引射器制冷系统中的流量,因而其制冷量增大,而压缩机耗电几乎不变。

2.2 不同冷凝温度条件下两种引射器性能比较

图 4 所示为使用 5 号试件的引射制冷系统 COP 及引射器引射比在蒸发温度为 1 °C 条件下随冷凝温度的变化情况。

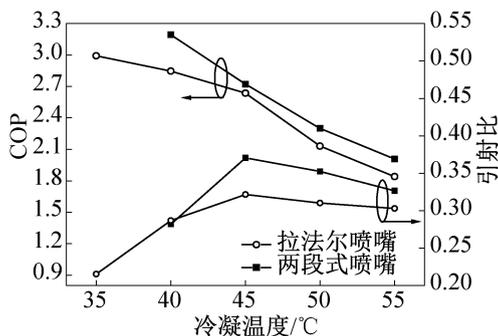


图 4 COP 和引射比随冷凝温度的变化
Fig4 Variation of COP and entrainment ratio with condensing temperature

从图 4 中可以看出,两段式喷嘴引射器与拉法尔

喷嘴引射器的引射比随冷凝温度的升高先增大后减小,均在冷凝温度为 45 °C 时引射比达到最大值;系统 COP 随着冷凝温度的升高而减小,且两段式喷嘴引射器的引射比及其制冷系统的 COP 均高于拉法尔喷嘴引射器的引射比及其制冷系统的 COP。同时可以发现与制冷系统 COP 随冷凝温度的变化趋势不同,拉法尔喷嘴引射器和两段式喷嘴引射器的引射比均在冷凝温度为 45 °C 达到最大值,造成这种现象的原因可能是随着冷凝温度增加,引射器喷嘴进出口压差增大;当冷凝温度低于 45 °C,喷嘴进出口压差较小,引射器内流动未出现激波或激波的强度较弱,喷嘴出口工质流速随压差增大而增大,引射器的引射比随之增大;而当冷凝温度高于 45 °C 时,喷嘴内部激波强度增大,随着冷凝温度的上升,产生激波的位置向喷嘴喉部位置靠近,引射器的引射比随之减小。冷凝温度升高,压缩机耗电逐渐增大,则系统的 COP 呈下降趋势。

2.3 不同蒸发温度条件下两种引射器性能比较

图 5 所示为在冷凝温度为 50 °C 工况下,引射器引射比和系统 COP 随蒸发温度的变化曲线。

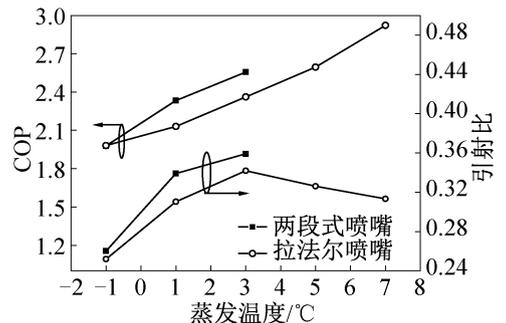


图 5 COP 和引射比随蒸发温度的变化
Fig. 5 Variation of COP and entrainment ratio with evaporation temperature

从图中可以看出,拉法尔喷嘴引射器的引射比随蒸发温度的升高先增大,并在蒸发温度为 3 °C 时引射比达到最大值;在实验工况范围内,两段式喷嘴引射器的引射比也在蒸发温度为 3 °C 时达到最大值,这是由于喷嘴进出口压差随蒸发温度的变化引起的,其机理与上述冷凝温度的影响相似。拉法尔喷嘴引射器与两段式喷嘴引射器制冷系统 COP 的变化趋势基本一致,随着蒸发温度的升高系统制冷量增大,而压缩机耗电变化不大,导致制冷系统的 COP 升高。同时,可以看到两段式喷嘴引射器制冷系统的 COP 和引射器的引射比均高于拉法尔喷嘴引射器。

以上实验结果均表明两段式喷嘴引射器性能优

于拉法尔喷嘴引射器。如前所述,这可能是因为工质经过两段式喷嘴后汽液相混合比较均匀,并且液滴更加细微,相间阻力减小,使得流动接近均质流,从而提高了引射效率。使用 CFX 软件对喷嘴内部进行的数值模拟结果^[11]亦显示与拉法尔喷嘴相比,两段式喷嘴内部及其出口界面上 R134a 工质的气相分数比较均匀,引射器的引射比较大,这与实验结果相符合。

3 结论

本文对使用两段式喷嘴引射器和拉法尔喷嘴引射器的两相流引射制冷系统性能进行了实验,比较了两种引射器在不同喉部截面积及工况条件下的引射比及制冷系统性能,得出如下结论:

1) 在固定工况条件下,不同几何尺寸的两段式喷嘴引射器的引射比均高于拉法尔喷嘴引射器的引射比,最大提高了约 18%,两种引射器的引射比均随喷嘴喉部截面积的增大而增大;两段式喷嘴引射器引射制冷系统的 COP 随着第一喉部截面积的增大而减小,拉法尔喷嘴引射器引射制冷系统的 COP 随喷嘴喉部截面积的增大先增加后减小,而两段式喷嘴引射器引射制冷系统的 COP 始终高于拉法尔喷嘴引射器引射制冷系统的 COP,最大提高了约 12%。

2) 在蒸发温度为 1 °C 的工况条件下,两段式喷嘴引射器和拉法尔喷嘴引射器的引射比均在冷凝温度为 45 °C 时达到最大值。相比于拉法尔喷嘴引射器,两段式喷嘴引射器的引射比提高了 15.17%。

3) 在冷凝温度为 50 °C 的工况条件下,蒸发温度为 3 °C 时两段式喷嘴引射器的引射比取得最大值,比拉法尔喷嘴引射器引射比的最大值提高了 5.09%。

参考文献

[1] H J Huff, Reinhard Radermacher. CO₂ compressor-expander analysis[R]. U. S. A: Maryland University, 2003.
[2] 池本彻,武内裕嗣,西山鸟,等. 新型喷射循环(Eject Cycle)车用冷冻机的开发[J]. 制冷技术,2008, 28(1):19-26. (池本彻, 武内裕嗣, 瑞山(ソサン)鳥, et al. World's first eject cycle for denso's transport refrigerator [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2008, 28(1):19-26.)
[3] 王亚静,郭宪民,刘川. 两相流引射循环制冷系统性能的研究进展[C]//第四届中国冷冻冷藏新技术、新设备研

讨会. 2009.

[4] K Sumeru, H Nasution, F N Ani. A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7):4927-4937.
[5] G K Alexis, E K Karayiannis. A solar ejector cooling system using refrigerant R134a in the Athens area [J]. Renewable Energy, 2005, 30(9):1457-1469.
[6] V M Nguyen, S B Riffat, P S Doherty. Development of a solar-powered passive ejector cooling system [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(2):157-168.
[7] Da Wen Sun. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants [J]. Energy Conversion and Management, 1999, 40(8):873-884.
[8] 马利蓉, 马一太, 管海清. CO₂-NH₃ 压缩/喷射复叠循环理论研究[J]. 流体机械, 2005, 33(10):57-60. (Ma Lirong, Ma Yitai, Guan Haiqing. Theoretical research on CO₂-NH₃ compression/ejection cascade cycle [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(10):57-60.)
[9] 李素芬,沈胜强,刘岚. 蒸汽喷射器超音速喷射流场的数值分析[J]. 中国造纸,2001, 20(6):33-35. (Li Sufen, Shen Shengqiang, Liu Lan. Numerical analysis of supersonic jet flow field in steam ejector [J]. China pulp & paper, 2001, 20(6):33-35.)
[10] 裴文伟,郭宪民,王善云,等. 几何参数对引射器及两相流引射制冷系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2013, 34(1):65-68. (Pei Wenwei, Guo Xianmin, Wang Shanyun, et al. Effects of geometric parameter on performance of ejector and two-phase ejector refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1):65-68.)
[11] 李添龙. R134a 两相流引射器性能模拟及试验研究 [D]. 天津:天津商业大学, 2013 年 06 月.

作者简介

任立乾(1987-),男,硕士研究生,天津商业大学天津市制冷技术重点实验室,15022602037, E-mail: renliqian2011@163.com. 研究方向:制冷系统节能及优化。

About the author

Ren Liqian(1987-), male, M. E., Tianjin key laboratory of refrigeration technology, Tianjin University of Commerce, 15022602037, E-mail: renliqian2011@163.com. Research fields: Energy saving and optimization technology of the refrigeration system.