

文章编号: 0253-4339(2013)01-0065-04

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2013.01.065

几何参数对引射器及两相流引射制冷系统性能的影响

裴文伟 郭宪民 王善云 郭欣炜

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘要 用两相流引射器代替膨胀阀,可回收两相流引射制冷循环中高压工质的压力能,提高制冷系统效率。对以R134a为工质的两相流引射制冷系统性能进行了实验研究,分析了喷嘴喉部直径和混合室直径对R134a两相流引射器及引射制冷系统性能的影响。实验结果表明,在固定工况条件下,存在使引射比达到最大的最佳喷嘴喉部直径和混合室直径组合。在蒸发温度为3℃、冷凝温度为55℃的工况下,当喷嘴喉部直径为2.0mm、混合室直径为16mm时引射器的引射比最大。在固定工况条件下,使引射比达到最大值的喷嘴喉部直径和混合室直径的最佳组合与使系统COP达到最大值的几何参数组合并不一致。这可能是由于在引射器中产生了激波等因素引起的,其中机理尚需要进行更深入的研究。

关键词 两相流引射循环;两相流引射器;几何参数;实验

中图分类号: TB61⁺1; TB657

文献标识码: A

Effects of Geometric Parameter on Performance of Ejector and Two-phase Ejector Refrigeration System

Pei Wenwei Guo Xianmin Wang Shanyun Guo Xinwei

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

Abstract In order to increase the coefficient of performance (COP) of the refrigeration system, the expansion valve is replaced by a two-phase ejector in the two-phase ejector refrigeration cycle to recover the potential energy of the high pressure refrigerant. The performance of two-phase ejector refrigeration system with refrigerant R134a as working fluid is experimentally investigated. The effects of the throat diameter of the nozzle and the diameter of the mixing chamber on the performance of the ejector and the two-phase ejector refrigeration cycle system were analyzed. The experimental results indicate that there is an optimal combination of the nozzle throat diameter and the mixing chamber diameter to maximize the entrainment ratio under a fixed working condition. The entrainment ratio of the ejector reaches to the maximum value with the throat diameter of 2.0mm and the mixing chamber diameter of 16mm under the conditions of 3℃ evaporating temperature and 55℃ condensing temperature. Under a fixed working condition, the optimal combination of the nozzle throat diameter and the mixing chamber diameter for maximum of the entrainment ratio is not consistent with the one for maximum of the COP of the refrigeration system. This may be caused by the shocks in the ejector, which should be investigated deeply.

Keywords two-phase ejector cycle; two-phase ejector; geometric parameter; experiment

在蒸汽压缩式制冷系统中用两相流引射器代替膨胀阀或毛细管作为节流元件,可回收高压制冷剂的膨胀功,提高制冷系统性能系数。研究表明,引射器是提高两相流制冷循环效率的关键部件,其几何参数是影响引射器性能的主要影响因素^[1]。S Wongwises^[2]等人以R134a为制冷剂研究了喷嘴尺寸对系统性能的影响,与传统制冷循环相比,两相流引射循环制冷系统压缩机压比及排气温度均下降,系统的COP及制冷量得到提高。M S Kim等人^[3]用两相流引射器代替膨胀阀,应用于CO₂系统中,主要研究了喷嘴喉部直径、混合段直径等几何参数

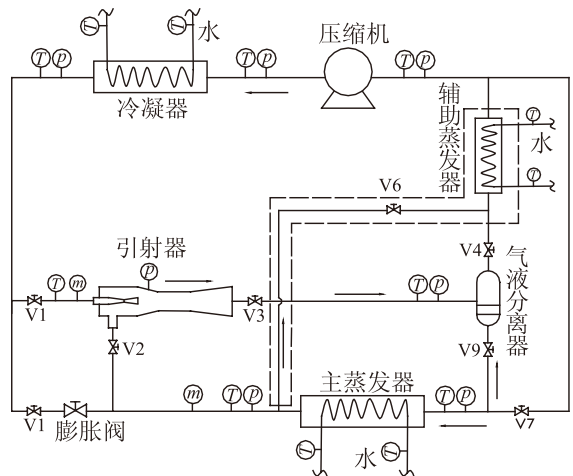
对系统性能的影响,并与传统系统比较,使用引射器的系统性能比传统系统提高了15%。Nakagawa等人^[4]用CO₂工质对两相流引射制冷循环进行了研究,研究了引射器结构参数,如扩张角、混合室长度等,对系统性能的影响,得出了一系列最佳参数;与传统制冷系统的比较表明,在特定工况下,制冷系数可提高27%。

引射器作为两相流引射制冷系统的重要部件,其几何参数对引射器及系统的影响至关重要。引射器中的工质在节流过程中存在相变,在喷嘴出口可达到超音速流动,并可能产生激波及其与混合

边界层交互作用等现象, 内部流动十分复杂。通过优化引射器的几何参数, 来减小激波等因素的影响, 提高引射器及系统性能。实验中加工了不同尺寸的引射器试件, 在R134a引射制冷循环性能实验台上进行了实验, 分析了喷嘴直径、混合室直径对引射器性能及系统性能的影响。

1 R134a两相流循环和实验装置

R134a汽液两相流引射器制冷系统实验装置示意图如图1所示, 关闭阀门V5、V6、V7, 打开其余阀门则可运行两相流引射制冷循环; 如将阀门V1、V2、V4、V9关闭, 阀门V5、V6、V7打开则该系统成为传统膨胀阀制冷循环。对于两相流引射循环, 从冷凝器出来的高压液体进入引射器喷嘴节流降压, 在其出口引射从主蒸发器出来的低压蒸汽, 二者在混合室混合, 经扩压器压力升高后排入气液分离器, 分离出的液态工质从其底部进入主蒸发器, 气体则从上部返回压缩机。



V: 阀 T: 温度 p: 压力 m: 质量流量

图1 R134a两相流引射制冷系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of R134a two-phase ejector refrigeration cycle

如图1所示, 传统的两相流引射制冷循环不包含虚线框内的辅助蒸发器部分, 自气液分离器上部分离的工质直接进入压缩机。初步实验发现, 未增设辅助蒸发器的传统引射制冷系统不能正常运行, 开机后压缩机吸气压力迅速降低, 约18s后压缩机吸气压力保护停机, 压缩机吸气压力随时间的变化曲线如图2所示。造成这种现象的主要原因是压缩机启动后被引射流流量偏小, 造成从气液分离器上部分离出的气体质量流量小, 因此压缩机吸气带液, 使得压缩机吸气压力迅速下降造成其低压保护。前期理论研究^[5]也表明, 引射器的引射比和进

入汽液分离器的工质干度是相互耦合的, 存在一个临界引射比使系统能够稳定正常工作, 当引射比低于临界引射比时, 从气液分离器上部出来的工质为汽液两相状态, 因此系统需要增加辅助蒸发器才可正常运行。根据上述理论研究和初步实验结果, 对传统引射制冷系统进行了改进, 如图1虚线框所示部分, 增加了辅助蒸发器, 自气液分离器出来的混合流体先经过辅助蒸发器换热后再回到压缩机, 以防止液态制冷剂进入压缩机。实验表明, 改进后的引射制冷系统可稳定运行。

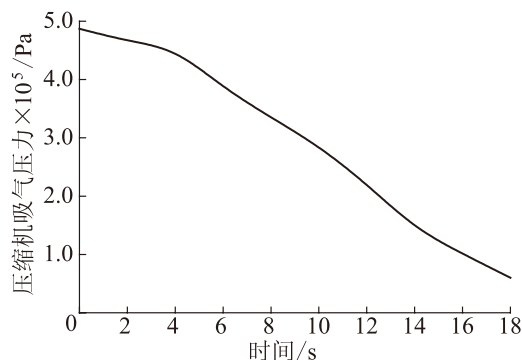


图2 压缩机吸气压力变化曲线

Fig.2 Dynamic suction pressure of compressor

通过改变水系统的进水温度和流量可控制系统的冷凝温度和蒸发温度, 而冷却水及冷冻水流量、温度通过调节水泵转速以及电加热功率来调节。系统中PT100铂电阻温度传感器精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 压力传感器精度为 $\pm 0.1\%\text{FS}$ 。制冷剂的质量流量用MASS6000型质量流量传感器测量, 精度为 $\pm 0.1\%$; 水流量用液体涡轮流量计测量, 精度为 $\pm 0.5\%$ 。系统中电气参数测量采用多功能综合电量变送器, 同时完成功率、电压、电流、功率因数、频率等参数的测量。

系统制冷量为主蒸发器和辅助蒸发器制冷量之和, 引射器的引射比、系统的制冷量及COP可通过计算水侧的换热量来确定, 也可以通过测量制冷剂比焓和质量流量来确定。

2 实验结果与讨论

为了探讨几何尺寸的影响, 加工了4个引射器喷嘴, 其喉部直径分别为1.4mm、1.7mm、2.0mm和2.2mm; 同时, 加工了3个直径分别为13mm、16mm和19mm的混合室, 与之匹配的扩压室的扩张角均为 2.5° 。在冷凝温度为 55°C 、蒸发温度为 3°C 工况下, 测量了引射器引射比及两相流引射制冷系统的COP等参数, 分析了喷嘴喉部直径和混合室直径对引射器及系统性能的影响。

2.1 引射器喷嘴喉部直径的影响

对混合室直径分别为13mm、16mm、19mm的引射器,研究不同喷嘴喉部直径对引射比及COP的影响。图3、图4分别为蒸发温度为3℃、冷凝温度为55℃的工况下,使用不同混合室直径的引射器,引射比及系统COP随喷嘴喉部直径的变化曲线。实验过程中发现,在所实验的三个混合室直径下,当喷嘴喉部直径为2.2mm时,引射器的引射比急剧下降,以至于被引射流流量很小,超出了流量计测量范围,在图中以虚线表示。

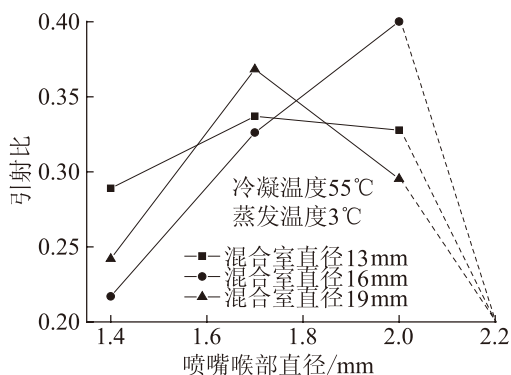


图3 引射比随喷嘴喉部直径的变化

Fig.3 Influence of nozzle throat diameter on entrainment ratio

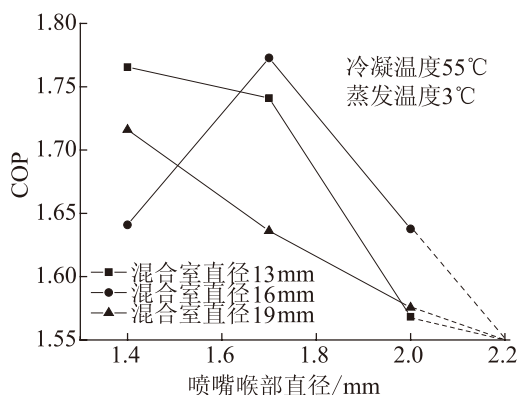


图4 COP随喷嘴喉部直径的变化

Fig.4 Influence of nozzle throat diameter on COP

从图中可以看出,对于不同混合室直径的引射器,均存在一个最佳喷嘴喉部直径使得引射比达到最大值。混合室直径不同,使引射比达到最大值的最佳喷嘴喉部直径也不相同。对于混合室直径为13mm和19mm的引射器,引射比随喷嘴喉部直径的变化趋势是一致的。对于这两组引射器,引射比均在喷嘴喉部直径为1.7mm时达到最大值;但对于混合室直径为16mm的引射器,引射比在喷嘴喉部直径2.0mm时达到最大值。比较图3中不同混合室直径与喷嘴喉部直径组合的引射器的引射比,可以发现,存在喷嘴喉部直径和混合室直径的最佳组

合,使得两相流引射器的引射比达到最大。在蒸发温度为3℃、冷凝温度为55℃的工况下,引射比在喉部直径为2.0mm、混合室直径为16mm时最大。

从图4中可以看出,使用混合室直径为13mm和19mm的引射器,系统COP随着喷嘴喉部直径的增大而降低;而对于混合室直径为16mm引射器,系统COP在喷嘴喉部直径为1.7mm时达到最大。

比较图3和图4可以看出,对于一定混合室直径的引射器,使引射比达到最大值的喷嘴喉部直径和使系统COP达到最大值的喷嘴喉部直径并不一致。例如,对于混合室直径为16mm的引射器,喉部直径2.0mm时引射比达到最高,但是COP并不随引射比的增大线性增大,在喉部直径1.7mm时达到最大值。实验中发现,当喷嘴喉部直径从1.7mm增大至2.0mm时,虽然引射比增大,但主引射流流量反而降低,使得系统COP降低。造成这种现象的原因可能是引射器内部激波的影响,其影响机理及如何控制激波的发生以使系统性能达到最优等问题,尚需要进行更深入的研究。

2.2 引射器混合室直径的影响

图5为蒸发温度为3℃、冷凝温度为55℃的工况下,喷嘴喉部直径为1.7mm和2.0mm的引射器引射比及系统COP随混合室直径的变化曲线。图6为主引射流流量和被引射流流量随混合室直径的变化曲线。

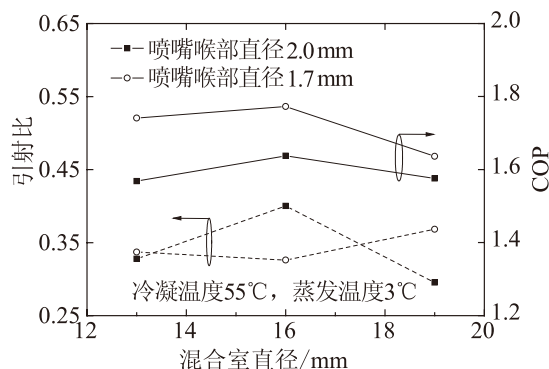


图5 COP和引射比随混合室直径的变化

Fig.5 Influence of mixing chamber diameter on COP and entrainment ratio

从图5中可以看出,在定工况条件下,对于喉部直径为2.0mm的引射器,引射比与系统COP随混合室直径的变化趋势是一致的,混合室直径为16mm时引射比最高,系统的COP也最高。实验发现,混合室直径主要影响被引射流流量,如图6所示,对于喉部直径为2.0mm的引射器,混合室直径对主引射流流量几乎没有影响,但被引射流流量

在混合室直径为16mm时最大,使得引射比和系统COP均达到最大值,而过大或过小的混合室直径都会在一定程度上降低引射器的引射比,造成系统COP下降。

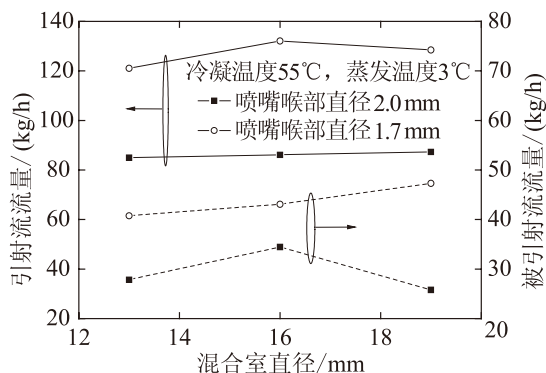


图6 制冷剂质量流量随混合室直径的变化

Fig.6 Influence of mixing chamber diameter on mass flow rate

对于喷嘴喉部直径为1.7mm的引射器,引射器的引射比和系统COP随混合室直径的变化趋势并不一致。两相流引射制冷系统的COP在混合室直径为16mm时最大,而引射比却最小。从图6看出,与喷嘴喉部直径为2.0mm的引射器不同的是,喷嘴喉部直径为1.7mm的引射器在混合室直径为16mm时主引射流流量达到最大,虽然引射比最小,但两相流引射制冷系统的COP却达到最大值。喷嘴喉部直径为1.4mm时,也有相同趋势。

实验发现,在相同的工况条件下,喷嘴喉部直径由1.7mm增大到2.0mm时,引射器主引射流流量反而减小;如前所述,这是造成使引射比达到最大值的喷嘴喉部直径和混合室直径的最佳组合与使系统COP达到最大值的最佳几何参数组合不一致的原因,其中机理尚需要进行更深入的研究。

3 结论

对应用于R134a两相流引射制冷循环及引射器性能进行了实验研究,分析了喷嘴喉部直径和混合室直径对引射比及系统性能的影响,得出了以下结论:

1) 在定工况条件下,对于不同混合室直径的引射器,均存在一个最佳喷嘴喉部直径使得引射比达到最大值。混合室直径不同,使引射比达到最大的最佳喉部直径也不相同。

2) 存在喷嘴喉部直径和混合室直径的最佳组合,使得两相流引射器的引射比达到最大。在蒸发温度为3℃、冷凝温度为55℃的工况下,引射比在

喉部直径为2.0mm、混合室直径为16mm时最大。

3) 实验发现,在固定工况条件下,使引射比达到最大值的喷嘴喉部直径和混合室直径的最佳组合与使系统COP达到最大值的最佳几何参数组合并不一致。这可能是由于在引射器中产生了激波等因素引起的,其中机理尚需要进行更深入的研究。

本文受天津市应用基础及前沿技术研究计划项目(09JCZDJC24900)资助。(The project was supported by the Research Foundation for Application Fundamentals and Advanced Technology of Tianjin (No.09JCZDJC24900).)

参考文献

- [1] P Chaiwongsa, S Wongwises. Experimental study on R-134a refrigeration system using a two-phase ejector as an expansion device[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (5): 467-477.
- [2] P Chaiwongsa, S Wongwises. Effect of throat diameters of the ejector on the performance of the refrigeration cycle using a two-phase ejector as an expansion device[J]. Int. J. Refrigeration, 2007, 30 (4): 601-608.
- [3] J S Lee, M S Kim, M S Kim. Experimental study on the improvement of CO₂ air conditioning system performance using an ejector[J]. Int. J. Refrigeration, 2011, 34 (7): 1614-1625.
- [4] M Nakagawa, A R Marasigan, T Matsukawa, et al. Experimental investigation on the effect of mixing length on the performance of two-phase ejector for CO₂ refrigeration cycle with and without heat exchanger [J]. Int. J. Refrigeration, 2011, 34 (7): 1604-1613.
- [5] 赵阳, 郭宪民, 王亚静, 等. 两相流引射循环制冷系统性能的数值模拟[J]. 低温与超导, 2011, 39 (4): 48-52. (Zhao Yang, Guo Xianmin, Wang Yajing, et al. Numerical simulation on performance of refrigeration system with two-phase ejector [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2011, 39 (4): 48-52.)

通信作者简介

郭宪民, 男(1962-), 工学博士/教授, 天津市制冷技术重点实验室, 天津商业大学制冷系, (022)26675763, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn. 研究方向: 制冷系统节能及优化研究。现在进行的研究项目: 国家自然科学基金项目-两相流引射器节流制冷循环研究。

About the corresponding author

Guo Xianmin (1962-), male, Ph.D/professor, Tianjin key laboratory of refrigeration technology, Tianjin University of Commerce, (022)26675763, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn. Research fields: Optimization of the refrigeration system and energy saving technology. The author takes on project supported by the Natural Science Foundation of China: Investigation of refrigeration cycle with a two-phase ejector.