

文章编号:0253-4339(2019)05-0013-02
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.013

制冷剂喷入技术在空气源热泵中的应用研究现状

王超¹ 赵蕾¹ 李延² 杨柳³

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西安 710000; 2 广州哈思新能源科技有限公司 广州 510080;
3 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710000)

摘要 本文分析了常规空气源热泵在低温与高温工况下性能显著下降的原因,简述了制冷剂喷入技术优化空气源热泵性能的基本原理及系统类型。通过对现有研究领域的分类,以及对同领域内不同应用形式的对比,从系统及部件两个层面阐明了制冷剂喷入技术的研究现状和进展。总结现有制冷剂喷入技术的研究成果可得出:喷气增焓技术可显著强化空气源热泵系统的低温制热性能,而且越来越多的研究提出采用制冷剂喷入技术的新系统形式并分析其对热泵系统制热性能的提升作用,但对制冷工况下的性能研究稍显欠缺。最后,结合制冷剂喷入技术发展的热点和难点,对制冷剂喷入技术的发展进行了展望。

关键词 空气源热泵;喷气增焓技术;喷液技术;准二级压缩;性能优化

中图分类号:TB657.5; TB61⁺1; TU831

文献标识码:A

Review of Application and Research Situations on Refrigerant Injection Technology in Air Source Heat Pump

Wang Chao¹ Zhao Lei¹ Li Yan³ Yang Liu²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710000, China; 2. Guangzhou Hasi New Energy Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou, 510080, China; 3. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710000, China)

Abstract The principle and various system types for implementing refrigerant injection technology, such as the liquid injection cycle, subcooler vapor injection cycle, and flash tank vapor injection cycle, are introduced to optimize the performance of air source heat pumps operating under low-temperature and high-temperature conditions. A summary of research conducted in line with the various refrigerant injection technologies aimed at improving the system performance and related structural and operational parameter optimizations, both on the system and component level, was provided herein. Moreover, experiment and simulation studies on alternative refrigerant on R32, R410A, R417A, R1234yf, and R290/R600a for various types of system with refrigerant injection technology were also reviewed. The progress of research for compressors' structural improvement was additionally covered, involving those of scroll and rotary compressors. A commonly agreed point in vapor injection technology is its ability to enhance the heating performance of air source heat pump operating at low temperatures. Nowadays, an increasing number of researches are focusing on how new forms of system with refrigerant injection technology can improve the heating performance of heat pumps. However, seldom deal on enhancing the cooling performance operation at high temperatures can be found. Finally, in terms of the development situations and difficulties encountered in implementing refrigerant injection technology, the research and development directions of refrigerant injection technology are envisioned.

Keywords air source heat pump; vapor injection; liquid injection; quasi-two-stage compression; performance optimization

热泵可以将较低的能耗将低品位热能转化为高品位热能,用于建筑供暖和供冷,是降低建筑空调能耗的有效手段之一^[1]。其中,空气源热泵因设备制造简单、安装维护方便、高效节能等优点在工程上得到广泛应用。但我国气候多样,在冬季低温条件下,蒸发温度(压力)随室外温度降低而下降,导致压缩

机吸气比容增大,吸气量减少,制热量下降;冷凝与蒸发温差的增大还会使冷凝蒸发压力比增大,排气温度上升,润滑油黏度下降,从而偏离其正常运行工况,甚至使系统无法正常工作^[2-3]。在夏季高温条件下,又因冷凝器侧散热条件恶化,冷凝温度升高,冷凝蒸发压力比增大而导致压缩机排气温度升高,制冷量下

基金项目:国家科技支撑计划(2014BAJ01B01)资助项目。(The project was supported by National Key Technology Research and Development Program (No.2014BAJ01B01).)

收稿日期:2018-07-26;修回日期:2018-10-07

降、功耗增加,性能系数及运行可靠性降低,导致制冷量不能满足室内供冷需求^[4]。空气源热泵系统在冬季低温与夏季高温条件下出现的问题,严重阻碍了其在全国范围内的推广应用。

针对上述问题,已有研究提出了多级压缩、复叠循环、变频变容技术、制冷剂喷入技术等多种解决方法。其中,制冷剂喷入技术以其优良的综合性能成为该领域的研究热点。

1 制冷剂喷入技术应用的基本系统型式

制冷剂喷入技术根据喷入制冷剂的相态不同可分为喷液冷却和喷气增焓技术。

喷液是指冷凝器出口的制冷剂液体经节流降压后喷入压缩机的吸气侧或压缩腔,其系统原理及工作循环压焓图如图 1 所示。喷液冷却技术可显著降低压缩机吸气比焓和排气温度^[5]。但因喷液质量流量远小于主循环回路制冷剂流量,使采用喷液技术后的系统性能几乎与普通单级热泵系统相同^[6]。

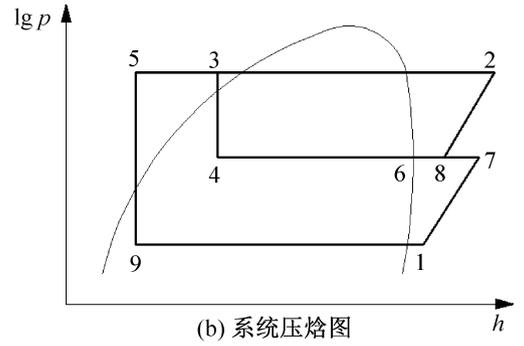
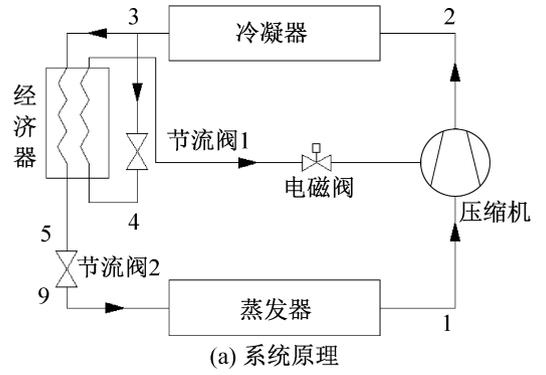


图 2 经济器系统原理与压焓图

Fig.2 Principle and $p-h$ diagram of vapor injection system with a sub-cooler

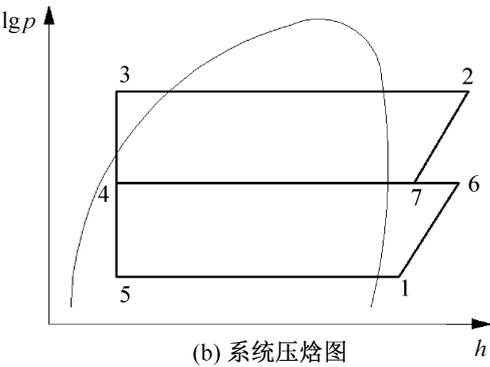
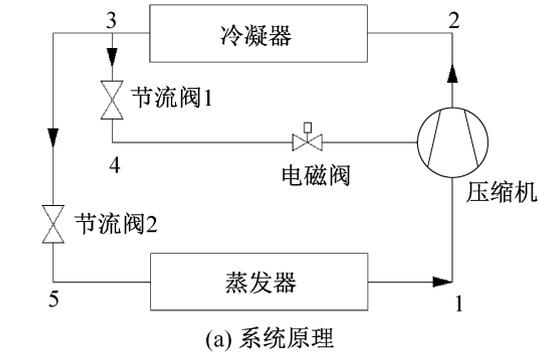


图 1 喷液技术系统原理与压焓图

Fig.1 Principle and $p-h$ diagram of liquid injection system

喷气增焓技术的系统应用型式主要分为两种:带有闪蒸器和带有经济器。其原理是将冷凝器出口的一部分制冷剂经闪蒸器闪蒸或经济器换热后喷入压缩机压缩腔。两种系统的原理和工作循环压焓图分别如图 2 和图 3 所示^[7-8]。

闪蒸器系统与经济器系统均通过两级节流、中间

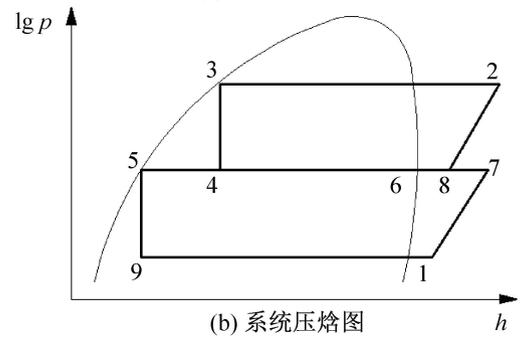
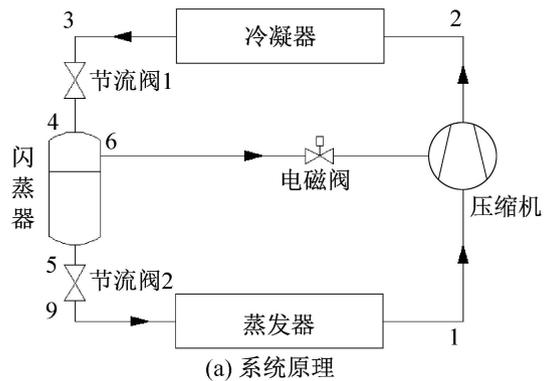


图 3 闪蒸器系统原理与压焓图

Fig.3 Principle and $p-h$ diagram of vapor injection system with a flash tank

冷却降低蒸发器的入口制冷剂的焓值,增大其在蒸发器中的吸热能力。两者的主要区别是主循环回路制

冷剂的过冷和辅助回路制冷剂的两相分离^[9]。此外,经济器系统遵循模块化独立设计原则,即蒸发器中制冷剂的流量和中间喷气流量分别由两个节流阀单独控制,易于调节,且喷气压力不会高于排气压力,不会产生回流,但系统 COP 会受经济器传热效率的影响。闪蒸器系统则遵循耦合控制原则,即任一节流阀的调节均会影响流入蒸发器的制冷剂流量和中间喷气流量,需要联合控制。闪蒸器系统中喷入压缩机的是喷气压力下的饱和蒸气,系统 COP 较经济器系统可提升 2%~5%^[10]。

图 2(a)所示的喷气增焓系统,辅助回路的制冷剂对主回路制冷剂的过冷可增大制冷剂在蒸发器中的吸热能力,且喷气可提高流经冷凝器的制冷剂流量,从而提升热泵系统低温工况下的制热量和高温工况下的制冷量。此外,流经压缩机的制冷剂流量的增加可降低其排气温度。虽然热泵系统的功耗也会有所增加,但制热量与制冷量的增加速度大于电功率的增加速度。因此,通过喷气增焓技术可有效提高热泵系统 COP 与 EER^[11-16]。

2 采用制冷剂喷入技术的性能与参数优化研究进展

针对采用制冷剂喷入技术的热泵系统,主要就其性能优化、制冷剂喷入参数优化与控制,以及工质替代等方面采用理论建模仿真和实验测试^[6]的方法开展研究。

2.1 热泵的性能优化研究

采用制冷剂喷入技术的机组性能优化研究主要从低温制热工况及高温制冷工况两个方面开展。

2.1.1 低温工况下的制热性能优化

改善低温工况下空气源热泵的制热性能是采用喷气增焓技术的初衷,相关研究成果较为丰硕。针对空气源热泵在低温条件下运行时出现的压比增大、排气温度升高、性能下降等问题,J. Heo 等^[17]实验研究了采用闪蒸器的变频热泵系统的制热性能,结果表明:在-15℃的环境下,其总制冷剂流量比普通单级热泵系统高 30%~38%,COP 和制热量分别提升 10% 和 25%。C. W. Roh 等^[18]对比了复叠式系统在低压级与高压级分别单独或同时采用喷气增焓技术对系统总体性能的影响,研究表明:在低压级应用该技术比在高压级应用对系统制热与制冷量的提升更显著;虽然低压级与高压级循环的性能均有所提升,但系统的总体性能并未得到明显提升。古宗敏等^[1,19]的实验研究表明,喷气增焓技术对热泵系统的制热量和制热性能的提升效果随环境温度降低而更加显著;与同

工况下普通单级热泵系统相比,当环境温度处于-10~2℃时,喷气增焓热泵系统平均制热量提高了 16.7%,系统平均 COP 提高了 15.7%。F. M. Tello-Oquendo 等^[20]实验对比了采用喷气涡旋式压缩机的热泵系统(a scroll compressor with vapor-injection, SC-VI)和双级压缩中间喷气热泵系统(a two-stage reciprocating compressor, TSRC)在高压比、高冷凝与蒸发温差工况下的性能,结果表明,TSRC 系统最大工作压力比高达 29,能适应蒸发温度<-25℃、冷凝温度>60℃的工况;SCVI 系统最大工作压力比为 12,适用于蒸发温度>-25℃、冷凝温度在 40~50℃的工况;而压力比<7.5 的工况,SCVI 系统的压缩机效率高于 TSRC 系统,更适用于空气源热泵空调或热水器。J. Heo 等^[21]实验测试了双膨胀阀经济器系统(a double expansion sub-cooler system,简称 DESC)和闪蒸器经济器系统(a combined flash tank and sub-cooler, FTSC)的性能(如图 4 和图 5 所示),并与传统的经济器系统(a sub-cooler system, SC)和闪蒸器系统(a flash tank system, FT)的性能进行对比,结果表明,各系统形式获得最大制热量的最优喷气比为 0.2~0.3;最优喷气比下,FT、FTSC 和 DESC 系统的制热量分别比 SC 系统高 14.4%、6.0%和 3.8%,各系统平均 COP 相近,但 FTSC 系统的稳定性更好,控制的精确性更优。

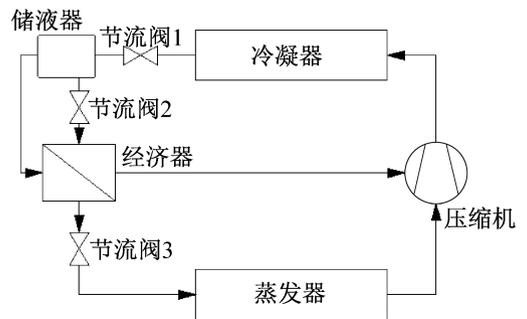


图 4 双膨胀阀经济器系统原理^[21]

Fig.4 Principle of vapor injection system with double expansion valves and subcooler^[21]

I. H. Bell 等^[22]编制了多喷气管涡旋式压缩机的开源程序,模拟分析表明双喷气管热泵系统(图 6)的制热性能优于普通系统;蒸发温度较低时,双喷气管热泵系统的 COP 通常比常规热泵系统高 20%以上;但使用多喷气管对涡旋式压缩机时,需仔细选择喷气口直径,以获得最大的系统循环效率。杨文军等^[23]分别针对采用喷气或喷液技术的空气源热泵热水器提出了低温工况下排气温度的控制策略。实测结果表明,两种热泵热水系统均可满足北方冬

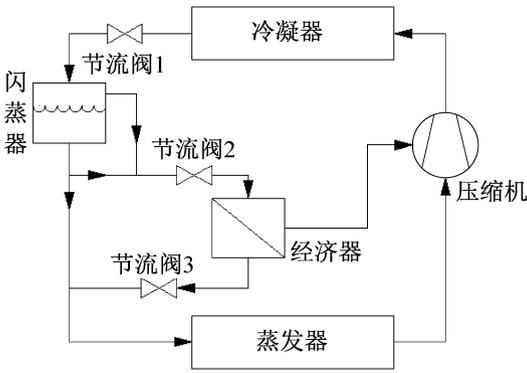


图 5 闪蒸器经济器系统原理^[21]

Fig.5 Principle of vapor injection system with a flash tank and a subcooler^[21]

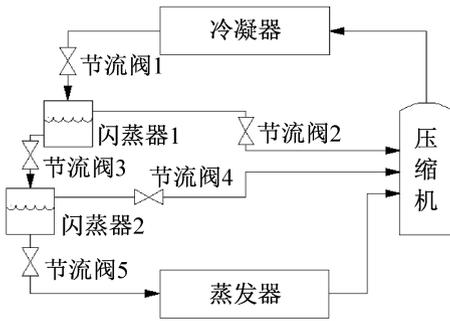


图 6 双喷气管热泵系统 (DESC) 原理^[22]

Fig.6 Principle of two-line vapor injection system (DESC)^[22]

季供暖需求;喷气系统需设定排气过热度来进行控制,过程较复杂,但在提高系统制热量和 COP 方面更有优势。

由于经济器及闪蒸器系统均存在较大节流损失, Wang Xiao 等^[24-26]通过在经济器与闪蒸器系统上增加额外的喷射器和闪蒸器,优化系统性能。基于喷射器机理建模分析指出,增加喷射器可有效降低不可逆节流损失。与普通经济器系统和闪蒸器系统相比,改进后的系统在低温环境下的单位容积制热量和系统 COP 均有所提升。Xu Shuxue 等^[27]结合喷射器提出一种新型闪蒸器系统(图 7),制热性能测试结果表明,喷射器可有效降低节流损失,在蒸发和冷凝温度分别为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工况下,制热量、COP 分别比普通闪蒸器系统高 10%、4%;且喷射器的最佳诱导比为 0.1~0.2,圆形喷气口的最佳直径为涡旋厚度的 50%~70%。

针对热泵系统冬季除霜问题, M. J. Huang 等^[28]实验研究了采用热气旁通除霜的喷气增焓热泵系统的性能,表明采用喷气增焓技术后可显著提升系统在低温工况下的制热量;若考虑除霜能耗,则外界环境温度对热泵系统的性能影响更显著,而空气相对湿度

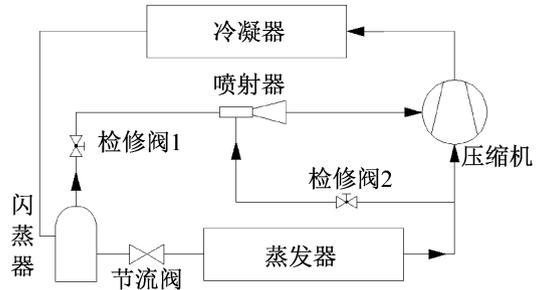


图 7 结合喷射器的闪蒸器系统 (FTSC) 原理^[27]

Fig.7 Principle of the flash tank system combined with ejectors (FTSC)^[27]

和风速等参数也具有一定的影响。若以 30 min 为除霜间隔进行 2 min/次的热气旁通除霜,则喷气增焓热泵系统完全可以替代爱尔兰冬季燃油采暖系统。赵鹏^[29]的研究表明除霜能耗约占喷气增焓热泵系统总能耗的 10%,考虑除霜能耗时的系统性能系数比不考虑除霜时低约 15%。因此,除霜能耗对系统性能的影响不容忽视。

2.1.2 高温工况制冷性能优化

提升空气源热泵高温工况下的制冷性能也是性能优化研究的重要方面。I. Y. Cho 等^[30]的实验表明:采用经济器的 R410A 和 R32 热泵系统,在环境温度为 $21\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在最优喷气比(制冷量最大且 EER 较高)下的制冷量比同等条件下的常规热泵系统高 2.1%~6.3%;环境温度为 $-15\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在最优喷气比(制热量最大且 COP 较高)下的制热量比同等条件下的常规热泵系统高 7.5%~13.9%。H. Cho 等^[31]实验研究并评价了以 CO_2 为制冷剂的喷气增焓双级压缩热泵系统的制冷性能,探索了各级膨胀阀开度的最优控制方法。结果表明,该系统的 EER 比相同条件下的普通双级热泵系统提升了 16.5%;高压级压缩机的排气温度降低了 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但文中未详细说明两级膨胀阀的控制策略,仅以部分实验数据来呈现膨胀阀开度变化对系统总体性能影响。王枫等^[32]实验研究了高温工况下喷液过程对半封闭活塞式压缩机性能的影响,结果表明,喷液可有效降低压缩机排气温度;虽然制冷量和 EER 也有所降低,但在低蒸发温度、高冷凝温度时综合效果良好。樊斌等^[33]研究表明空调高温工况下喷液技术的应用可降低压缩机的排气温度,且随喷液量的增加排气温度几乎呈线性下降;为保证排气温度处于安全范围内,且兼顾整体系统性能,需要合理设计和确定喷射毛细管的长度与直径。

2.2 制冷剂喷入技术中的参数优化研究

制冷剂的喷入参数可影响热泵系统的总体性能,

对其优化控制可使热泵系统的性能达到最优。相关研究主要涉及运行参数和结构参数的影响规律探究和优化。

2.2.1 运行参数优化研究

为了对喷气增焓热泵系统进行多工况性能分析, Zhang Dong 等^[34]提出了计算经济器系统 COP 的经验公式, 预测其在北京、兰州、乌鲁木齐和哈尔滨应用的制热性能。在兰州地区进行的实验测试表明, 热泵系统 COP 与环境干球温度、系统进水温度的差值呈线性关系, 其计算值与实测数据相对偏差在 2.5% 以内, 准确性较高。C. W. Roh 等^[35-37]研究表明喷气中间压力对最大喷气比和制热量有较大影响, 但对系统 COP 影响较小; 随着中间压力升高, 喷气量增大, 制热能力也增大。E. Navarro 等^[38]实验研究表明采用喷气涡旋式压缩机比采用相同容量的普通涡旋式压缩机热泵系统的制热量和 COP 分别高 20% 和 10%, 但喷气涡旋式压缩机的容积效率和压缩机效率在中、低压时略低于普通涡旋式压缩机; 中间过热度对喷气涡旋式压缩机热泵系统 COP 的影响不明显, 系统 COP 和制热量却随中间压力的升高而增大。D. Lee 等^[39]的分析表明高压力比工况下喷气及喷液热泵系统随着喷气比(喷气量与流经冷凝器的制冷剂量的比值)的升高, 排气温度均有所降低, 喷液系统的排气温度降幅大于喷气系统。喷气热泵系统 COP 随喷气比的升高而降低; 喷液热泵系统的 COP 在喷气比为 10% 时达到最高。

2.2.2 结构参数优化研究

谭希^[40]对经济器系统设计与运行阶段的研究表明, 喷气涡旋式压缩机的最佳喷气口位置与吸气端呈 474.5°。Wang Baolong 等^[41]采用文献[65]中的模型详细分析了制冷剂喷入参数对压缩机的性能和内部压缩、喷气过程的影响, 结果表明喷气口制冷剂的状态、制冷剂喷气的质量流量和喷气口参数可直接影响喷气压缩机的性能。各参数对喷气压缩机性能的影响规律如表 1 所示。Y. Jeon 等^[42]建立了带喷气的双滚动转子式压缩机的热泵系统模型, 研究喷液孔的最佳尺寸, 以有效降低排气温度并避免压缩机液击。结果表明, 喷液孔应位于距圆心 23 mm, 转角 30° 的位置, 最佳孔径为 0.6 mm。

2.3 采用制冷剂喷入技术的热泵制冷剂替代研究

对于采用制冷剂喷入技术的热泵, 制冷剂替代已成为新的研究热点。R32 对臭氧层无破坏 (ODP = 0), GWP = 675, 仅约为 R410A 的 32% 和 R22 的 37%^[43]。且 R32 的汽化潜热比 R410A 约高 40%, 即

为了达到相同的制冷量, 所需的 R32 充注量更少。但标准空调工况下 (蒸发温度 = 7.2 °C, 冷凝温度 = 54.4 °C, 过热度 = 11.1 °C), 采用 R32 时的排气温度比采用 R410A 时高 20 °C, 制约了其作为替代制冷剂的应用^[44]。

表 1 制冷剂喷入参数对涡旋式压缩机主要性能参数的影响^[41]

Tab.1 Effects of injection parameters on the main performance of scroll compressor

参数	喷入流量	压缩功率	排气温度	容积效率
喷入焓值 ↑	↓	↑	↑	↓
喷入压力 ↑	↑	↑	↓	↓
喷口面积 ↑	↑	↑	↓	↓
喷入位置 ↑	↓	↓	→	↑
采用单向阀	↑	↑	↓	↓
频率 ↑	↓	↑	↓	↑

2.3.1 采用喷气增焓技术的热泵中制冷剂替代研究

喷气增焓技术可以有效解决 R32 替代 R22 或 R410A 后因 R32 本身热力性质而导致的压缩机排气温度过高的问题, 保证系统安全、高效运行。汪涛等^[45-46]测试对比了以 R410A 或 R32 作为制冷剂的闪蒸器系统的性能, 指出 R32 系统最佳充注量小于 R410A 系统, 且同等条件下制热、制冷量和性能系数比 R410A 系统分别提升 2%~7% 和 1%~6%。黄俊军等^[47]进行的 R32 替代变频压缩机中的 R410A 的实验表明, 引入喷气增焓技术可使压缩机运行最低气温从 -15 °C 降至 -20 °C, 较好地解决了压缩机排气温度过高的问题, 热泵系统在 -20 °C 工况下的制热量达到 7 °C 工况下的额定制热量, 制热量增加显著。Xu Shuxue 等^[48]研究表明 R32 作为制冷剂时, 喷气增焓热泵系统的排气温度比同工况下普通单级热泵系统降低 10~20 °C, 制热量提升约 9%; 喷气质量流量的最佳范围应为流经蒸发器制冷剂质量流量的 12%~16%。为进一步提升以 R32 为制冷剂的喷气增焓热泵系统在低温工况下的制热性能, Xu Shuxue 等^[49]提出一种结合喷气过冷的喷气增焓热泵系统 (vapor injection with subcooling system, VIS)。结果表明, 蒸发温度为 -10~-2 °C 时, VIS 系统的排气温度比同工况下普通喷气增焓热泵系统低 6~8 °C, COP 比同工况下的喷液系统提高 11.2%~13.6%。藕俊彦等^[50]实验研究了以 R417A 替代闪蒸器系统中 R22 的可行性, 表明在标准工况下, 虽然 R417A 系统的制热量与

COP 低于 R22 系统,但优势随环境温度的降低而增大,即 R417A 更适合替代低温热泵中的 R22。

混合制冷剂在喷气增焓热泵中的应用研究主要从组成的优选及配比优化方面开展。Xu Shuxue 等^[51]针对闪蒸器系统进行的 R32、R1234yf 制冷剂配比优化实验研究表明,单独使用 R32 为工质,因排气温度较高而使系统只能在蒸发温度大于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时工作;单独使用 R1234yf 为工质,其运行蒸发温度可在 $-25\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,且排气温度不高于 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$,但系统 COP 低于采用二元混合工质时的情形;采用配比为 80%/20%的 R1234yf/R32 混合物为工质时,喷气增焓热泵系统的制热量比同工况下普通热泵系统高 16%~20%,且在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 COP 达到了 2.33,系统性能显著提高。J. V. H. D'Angelo 等^[52]采用仿真软件 HYSYS 模拟分析表明,工况一定时,采用配比为 40%/60%时 R290/R600a 混合制冷剂的闪蒸器系统 COP 最大,比同等条件下普通单级热泵系统高 16%~32%。

2.3.2 采用喷液技术的热泵中制冷剂替代研究

采用喷液技术可显著降低压缩机排气温度,可用于降低以 R32 为替代制冷剂的压缩机排气温度。王东博^[53]以 R32 替代热泵中 R22 的实验结果表明,采用喷液冷却技术可使热泵的冷凝、蒸发温差达到 $50\sim70\text{ }^{\circ}\text{C}$,总体运行温度范围扩大 20%~30%,良好地解决了排气温度过高的问题。Yang Minghong 等^[44]采用理论建模法对比分析了以 R32 为制冷剂时采用两相制冷剂吸入、喷入和喷液对降低压缩机排气温度的作用,表明 3 种制冷剂注入方式均有降低 R32 涡旋式压缩机排气温度的较大潜力;且喷入两相制冷剂时,系统的制冷量和 COP 比喷液或吸入两相制冷剂时分别高 11.8%、4.8%。

3 喷气增焓压缩机的研究

对于采用喷气技术的热泵系统,在部件层面主要着眼于喷气增焓压缩机的研发。

3.1 喷气压缩机优化原理的研究

采用变频和变容技术可优化压缩机在低温及高温工况下的性能。向卫民^[54]基于变频滚动转子式压缩机研发了一种变频变容喷气增焓压缩机,利用双缸变容技术提升压缩机在低温时的排气量,弥补空气源热泵低温制热能力的衰减;再结合喷气增焓技术提升压缩机的能效和制热量。对样机的实验测试表明,空调器的 APF 综合能效提升了 6%;在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温工况下,制热能力有大幅提升。王贻任^[55]提出了一种不同于变频技术的压缩机变容技术——数码涡旋技术,

通过负载和卸载状态的时间组合在较大范围内改变压缩机容量,与喷气增焓技术结合后,可在压缩机变容的同时提高压缩机的能效。

3.2 喷气涡旋式压缩机的相关研究

涡旋式压缩机因体积压缩梯度较小而不易产生液击,且具有几个独立的压缩腔,可较容易地将喷气过程合并至压缩机的压缩过程中。通过对喷气位置与喷气孔的适当设计可优化喷气涡旋式压缩机的喷气过程。I. Y. Cho 等^[56-57]采用实验验证的喷气涡旋式压缩机数学模型对喷气孔的位置进行优化,表明喷气孔最优位置应位于约 300° 处。D. Kim 等^[58]采用实验与理论建模相结合的方法,对非对称喷气涡旋式压缩机的喷气口的几何尺寸进行优化,结果表明,最佳喷气角度和喷口面积随室外环境温度的降低而增大,以增加喷气量;分散式的喷气口可使涡旋式压缩机的 SCOP 提高 2%~6%,可进一步降低压缩机的排气温度。F. M. Tello-Oquendo 等^[59]基于压缩机参数而不考虑系统形式,提出了一种具有广泛适用性的喷气涡旋式压缩机性能参数的预测方法。结果表明,采用该方法对蒸发器质量流量、喷气质量流量及压缩机耗电量的预测值与测量值的最大偏差在 5%以内。

为便于进行更深入的研究,有学者针对喷气涡旋式压缩机的建模仿真展开研究。E. L. Winandy 等^[60]针对采用制冷剂喷入技术的定频涡旋式压缩机建立了半经验模型,可用于模拟制冷剂的质量流量、压缩机电功率和压缩机的排气温度。模拟结果与实验结果相比,压缩机制冷剂质量流量偏差为 $-4.5\%\sim+4\%$,压缩机电功率偏差为 $\pm 4.5\%$,排气温度偏差为 $\pm 5\text{ K}$ 。但该模型未涉及喷气质量流量的计算。L. Dardenne 等^[61]在文献[60]模型基础上考虑压缩机内部传热过程及喷气质量流量的计算,针对变频喷气涡旋式压缩机建立了半经验模型,模拟压缩机吸气、压缩、喷气及排气过程中的质量与能量变化。实验验证表明该模型可将制冷剂流量、压缩机耗电和压缩机排气温度的偏差控制在 5%、10%和 5 K 的范围内,具有较好的准确性,但该模型的计算过程较为复杂。Ma Guoyuan 等^[62]针对喷气涡旋式压缩机建立了理论模型,分析了经济器系统中相对经济器压力(经济器压力与吸气压力和排气压力乘积的几何平均值的比值)对系统性能的影响。该集总参数模型忽略了压缩机内部传热,简单易用,但缺少压缩机吸气量的模拟计算。模拟结果与实测值的偏差在 5%以内,具有较高的准确性。柴沁虎等^[63]针对经济器系统建立了涡旋式压缩机压缩、喷气过程的分析模型,详细分析了喷气涡旋式压缩机不同压缩过程中的动态特性。

模拟结果表明,喷气开孔位置变化可显著影响压缩机的制热量;开孔最佳位置处于吸气腔刚闭合的位置时可保证系统在低温环境下的制热量,并较好地兼顾系统 COP。张科等^[64]从喷气涡旋式压缩机的实际工作过程出发,对其各个工作过程建立了分析模型,以模拟压缩机的压缩、喷气过程。模型计算结果与实测结果对比表明,系统性能参数随蒸发温度变化的规律与实测结果基本一致,各性能参数模拟值与实际值的最大误差不超过 5%,所建模型可较准确地模拟压缩机的动态性能。Wang Baolong 等^[65]首次从理论上将制冷剂喷入过程看作为“绝热节流+等压混合”的参数随时间持续变化的过程,对采用制冷剂喷入技术的涡旋式压缩机建立了一般模型,不同工况下制冷剂质量流量、喷气质量流量、压缩机功率和排气温度的模拟与实验的偏差在 $-4\% \sim +3\%$ 之间,具有较好的准确性。该模型不仅可以分析采用制冷剂喷入技术的涡旋式压缩机的宏观性能,也可以模拟其内部的压缩过程,同时具有集总参数模型快速性和分布参数模型的精确性。A. Zendeboudi 等^[66]分别采用神经网络法和自适应神经模糊推断法对喷气涡旋式压缩机的工作过程进行建模,分析了其宏观性能。实验结果表明,两种模型对于压缩机排气流量的预测值相对于实测值的最大偏差分别在 $\pm 2.54\%$ 和 $\pm 2\%$ 以内,准确性较好。此类智能模型比传统的半经验模型更加高效、简单,鲁棒性更好。

3.3 滚动转子式压缩机的喷气结构研究

滚动转子式压缩机具有独立的混合腔和固定的气缸容积比,适用于高压比运行工况。与喷气技术结合可实现单级压缩、无喷气及有喷气的准二级压缩^[67]。喷气孔的位置和孔径直接影响系统最优中间压力和流量。Liu Xingru 等^[68-69]分别提出了用于滚动转子式压缩机的新型喷气结构,喷气口分别位于滚动转子式压缩机的滑片和端板,如图 8 和图 9 所示。通过建立喷气滚动转子式压缩机的分布参数模型,对应用新型喷气结构的压缩机进行性能分析,结果表明,两种喷气结构可完全克服传统喷气回转式压缩机出现回流的缺点,并可增大喷气孔面积。与采用传统喷气回转式压缩机的热泵系统相比,采用滑片喷气结构的压缩机可使热泵系统的制热量和 COP 分别提升 $23.1\% \sim 48.9\%$ 和 $3.2\% \sim 8.0\%$;采用端板喷气结构的压缩机可使热泵系统的制热量和 COP 分别提升 $12.5\% \sim 18.2\%$ 和 $0.8\% \sim 3.5\%$ 。Yan Gang 等^[70]提出将喷气孔开设在双滚动转子式压缩机两压缩腔的隔板上,实验表明采用新型喷气双滚动转子式压缩机的热泵系统低温工况的制热量比同条件下采用普通

滚动转子式压缩机的热泵系统提升 $5.6\% \sim 14.4\%$, COP 提升 3.52% ,排气温度降低 $1.3 \sim 18.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

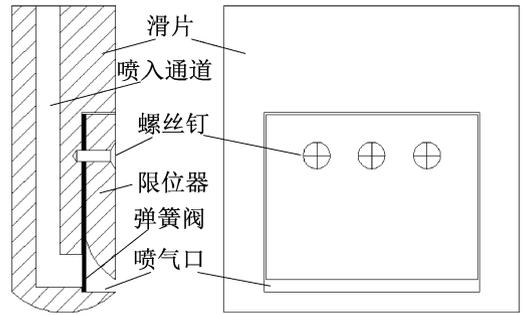


图 8 滚动转子式压缩机滑片喷气结构
Fig.8 The blade with gas injection structure of a rolling rotor compressor

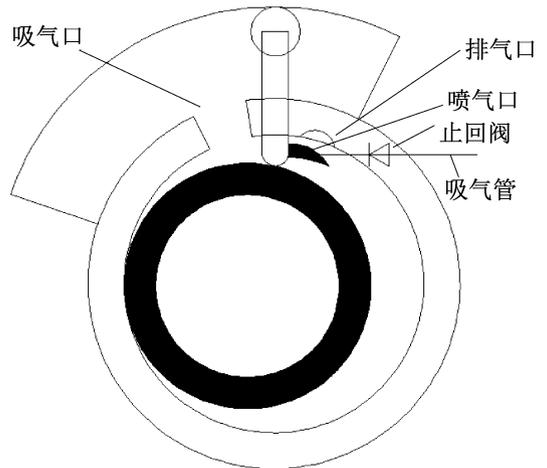


图 9 滚动转子式压缩机端板喷气结构
Fig.9 The end-plate with gas injection structure of a rolling rotor compressor

4 结论

总结课题组针对制冷剂喷入技术的部分研究内容及方法,如表 2 所示。由现有研究成果可知,多数课题组专注于制热工况下的研究,喷气增焓技术可明显强化空气源热泵系统的低温制热性能。而且越来越多的研究专注于分析对比采用制冷剂喷入技术的新系统形式及其对热泵系统制热性能的提升作用。但关于制冷工况下的研究稍显欠缺。

随着研究的深入,理论建模的研究方法越来越受到研究者的青睐。喷气或喷液热泵所用制冷剂趋于多样化,替代制冷剂成为新的研究方向。非常有必要结合喷气压缩机设计、替代制冷剂种类和充注量及系统主要部件的匹配优化等进一步深入研究。且采用制冷剂喷入技术部件的结构参数及运行参数会直接影响热泵系统的工作过程及运行性能。如何确定

各结构参数的最佳组合值及最优运行参数,也非常值得进一步研究。

表 2 部分课题组的研究内容及方法总结

Tab.2 Selection of research groups and summary of their research contents and methods

作者	年份	应用方式			系统形式				研究方法		制冷剂
		制冷	制热	热水	经济器	闪蒸器	优化系统	喷液	实验	理论建模	
E. L. Winandy 等 ^[60]	2002	✓			✓			✓	✓	✓	R22
柴沁虎等 ^[63]	2003		✓		✓					✓	—
Ma Guoyuan 等 ^[62]	2004	✓	✓		✓					✓	R22
俞丽华 ^[11]	2006	✓	✓			✓			✓		R22
唐华杰等 ^[15]	2007		✓		✓				✓		—
刘强等 ^[10]	2008			✓	✓	✓			✓		—
Wang Baolong 等 ^[65]	2008				✓	✓			✓	✓	R22
郝玉影等 ^[4]	2009	✓	✓		✓				✓		—
H. Cho 等 ^[31]	2009	✓					✓		✓		CO ₂
张科等 ^[64]	2009		✓		✓					✓	R22
Wang Baolong 等 ^[41]	2009		✓							✓	R22
王枫等 ^[32]	2010	✓						✓	✓		R22
陈骏骥等 ^[3]	2010			✓	✓				✓		R22
J. Heo 等 ^[17]	2010		✓			✓			✓		—
Xu Shuxue 等 ^[27]	2011		✓				✓		✓		R22
J. Heo 等 ^[21]	2011		✓				✓		✓		R410A
C. W. Roh 等 ^[35]	2011	✓			✓				✓		R410A
樊斌等 ^[33]	2011	✓						✓		✓	R22
谭希 ^[40]	2012		✓		✓				✓	✓	R22
I. Y. Cho 等 ^[56]	2012		✓		✓					✓	—
J. Heo 等 ^[36]	2012		✓				✓		✓		R410A
古宗敏 ^[1]	2013		✓		✓				✓		R22
I. H. Bell 等 ^[22]	2013		✓				✓			✓	纯质
E. Navarro 等 ^[38]	2013	✓		✓					✓		R407C
M. J. Huang 等 ^[28]	2013			✓	✓				✓		R407C
Xu Shuxue 等 ^[48]	2013	✓	✓		✓				✓		R32
王东博 ^[53]	2013	✓						✓	✓		R32
Xu Xing 等 ^[46]	2013	✓	✓			✓			✓		R32/R410A
黄俊军等 ^[47]	2013		✓		✓				✓		R32
C. W. Roh 等 ^[18]	2014			✓	✓				✓		R404A
赵鹏 ^[29]	2014	✓	✓		✓	✓				✓	R134A
C. Beak 等 ^[9]	2014		✓				✓		✓		CO ₂
D. Lee 等 ^[39]	2015	✓			✓			✓	✓		R22

续表 2

作者	年份	应用方式			系统形式				研究方法		制冷剂
		制冷	制热	热水	经济器	闪蒸器	优化系统	喷液	实验	理论建模	
仝高强 ^[51]	2015			✓	✓			✓	✓		R134a
董冰冰 ^[43]	2015	✓	✓				✓		✓		R32
Yang Minghong 等 ^[44]	2015	✓			✓			✓		✓	R32
L. Dardenne 等 ^[61]	2015				✓				✓	✓	R410A
He Yongning 等 ^[37]	2015			✓	✓				✓		R124
Bai Tao 等 ^[25]	2015		✓				✓			✓	CO ₂
Wang Xiao 等 ^[24]	2015		✓				✓			✓	R32/R290/R22
Zhang Dong 等 ^[34]	2016		✓		✓				✓		R22
F. M. Tello-Oquendo 等 ^[59]	2016	✓	✓				✓		✓		R407C
向卫民 ^[54]	2016		✓			✓			✓	✓	R410A
Qi Hongjie 等 ^[26]	2016	✓				✓			✓		R290
藕俊彦等 ^[50]	2016		✓			✓			✓	✓	R417
Y. Jeon 等 ^[42]	2016	✓						✓	✓	✓	R410A
Yan Gang 等 ^[70]	2016		✓			✓			✓		R410A
I. Y. Cho 等 ^[30]	2016	✓	✓		✓				✓		R410A/R32
J. V. H. D'Angelo 等 ^[52]	2016	✓				✓				✓	R290/R600A
汪涛等 ^[45]	2017			✓		✓			✓		R32
杨文军等 ^[23]	2017			✓	✓			✓	✓	✓	R410A
D. Kim 等 ^[58]	2017		✓		✓					✓	R410A
A. Zendejboudi 等 ^[66]	2017				✓	✓				✓	R410A
席战利 ^[19]	2017		✓			✓			✓	✓	R410A
F. M. Tello-Oquendo 等 ^[59]	2017		✓		✓	✓			✓		R407C
Y. U. Choi 等 ^[57]	2017		✓		✓				✓	✓	—
Xu Shuxue 等 ^[51]	2017		✓			✓			✓		R32/R1234yf
Xu Shuxue 等 ^[49]	2018		✓				✓		✓		R32
Wang Baolong 等 ^[69]	2018		✓		✓					✓	R410A

寒冷地区冬季供暖时间较长,但极端寒冷温度的持续时间相对较短。空气源热泵的系统设计应保证其在常规工况下运行的经济性及在极端工况下的可靠性,即在常规工况下须采用普通热泵运行模式。因此,喷气增焓或喷液模式与普通模式的切换控制问题值得进一步研究。

参考文献

[1] 古宗敏. 商用空气源热泵机组极端环境气温下运行性能分析及系统改进实验研究[D]. 南昌:南昌大学,

2013.(GU Zongmin. Performance analysis and system improvement study on commercial air source heat pump under extreme environment temperature [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.)
 [2] 马龙. 喷气增焓双级耦合热泵系统设计与性能分析[D]. 衡阳:南华大学, 2016.(MA Long. Design and properties analysis of enhanced vapor injection technology in double stage coupling heat pump[D]. Hengyang: University of South China, 2016.)
 [3] 陈骏骥, 杨昌仪, 蔡佰明. 低温强热型空气源热泵热水器试验研究[J]. 流体机械, 2010, 38(1): 72-74.

- (CHEN Junji, YANG Changyi, CAI Baiming. Experiment of low temperature heat-flash type air source heat pump water heater[J]. *Fluid Machinery*, 2010, 28(1):72-74.)
- [4] 郝玉影, 吴兆林, 唐华杰. 带经济器涡旋式压缩机系统的研究[J]. *制冷*, 2009, 28(3):8-12. (HAO Yuying, WU Zhaolin, TANG Huajie. Research of the refrigerators rate in three-stage auto cascade refrigeration[J]. *Refrigeration*, 2009, 28(3):8-12.)
- [5] 全高强. 进气喷液/补气增焓高温热泵热水机组的性能试验研究[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2015. (TONG Gaoqiang. Experimental investigation on performance of suction stream liquid injection or supplementing-compressing high temperature heat pump water heater unit [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2015.)
- [6] XU Xing, HWANG Y, RADERMACHER R. Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: literature review and challenges discussions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(2): 402-415.
- [7] 齐亚茹, 刘妮, 张亚楠, 等. 强化补气技术应用于空气源热泵的研究进展[J]. *制冷学报*, 2015, 36(5):74-80. (QI Yaru, LIU Ni, ZHANG Yanan, et al. Development of research on application of enhanced vapor injection technology in air-source heat pump[J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(5):74-80.)
- [8] ZHANG Long, JIANG Yiqiang, DONG Jiankai, et al. Advances in vapor compression air source heat pump system in cold regions: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(1): 353-365.
- [9] BAEK C, HEO J, JUNG J, et al. Effects of vapor injection techniques on the heating performance of a CO₂ heat pump at low ambient temperatures [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 43(7): 26-35.
- [10] 刘强, 樊水冲, 何珊. 喷气增焓涡旋式压缩机在空气源热泵热水器中的应用[J]. *流体机械*, 2008, 36(9):68-72. (LIU Qiang, FAN Shuichong, HE Shan. Application of enhanced vapor injection technology in ASHPWH[J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(9):68-72.)
- [11] 俞丽华. 准二级压缩—喷射复合热泵系统的性能模拟与实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. (YU Lihua. Simulation and experiment study on the quasi two-stage compression heat pump system coupled with ejector [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.)
- [12] 董旭, 田琦, 商永, 等. 喷气增焓涡旋低温空气源热泵制热性能的分析[J]. *流体机械*, 2017, 45(3):81-86. (DONG Xu, TIAN Qi, SHANG Yong, et al. Analysis on low-temperature heating performance of air source heat pump coupled with scroll compressor and enhanced vapor injection[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(3):81-86.)
- [13] 周东民, 胡浩, 李义. 高效强热商用涡旋技术在热泵空调中的应用[J]. *中国建设信息: 供热制冷*, 2009 (1): 46-49. (ZHOU Dongmin, HU Hao, LI Yi. Application of enhanced vapor injection technology in commercial A/C heating [J]. *China Construction Heating & Refrigeration*, 2009(1):46-49.)
- [14] 刘畅, 刘强, 秦岩. 喷气增焓空气源热泵在北方寒冷地区的应用[J]. *制冷技术*, 2015, 35(2):14-17. (LIU Chang, LIU Qiang, QIN Yan. Application of enhanced vapor injection air source heat pump in northern cold area [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2015, 35(2):14-17.)
- [15] 唐华杰, 吴兆林, 周志钢. 涡旋式压缩机经济器系统的应用研究[J]. *流体机械*, 2007, 35(9):55-58. (TANG Huajie, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang. Application research on scroll compressor with economizer for heat pump [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(9):55-58.)
- [16] 司鹏飞, 戎向阳, 侯余波, 等. 高海拔严寒地区暖通工程应用——文成公主纪念馆暖通设计[J]. *暖通空调*, 2013, 43(6):38-41. (SI Pengfei, RONG Xiangyang, HOU Yubo, et al. HVAC application case in high altitude and severe cold region: HVAC design for Wencheng Princess Memorial [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2013, 43(6):38-41.)
- [17] HEO J, JEONG M W J, KIM Y. Effects of flash tank vapor injection on the heating performance of an inverter-driven heat pump for cold regions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(4): 848-855.
- [18] ROH C W, MIN S K. Effect of vapor-injection technique on the performance of a cascade heat pump water heater [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 38(1): 168-177.
- [19] 席战利. 补气增焓技术提升空调制热量的试验研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2017, 36(5):38-41. (XI Zhanli. Vapor-injected technology promoting heat capacity experimental study [J]. *Building Energy & Environment*, 2017, 36(5):38-41.)
- [20] TELLO-OQUEENDO F M, PERIS E N, MACIA J G, et al. Performance of a scroll compressor with vapor injection and two-stage reciprocating compressor operating under extreme conditions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 63: 144-156.
- [21] HEO J, JEONG M W, BAEK C, et al. Comparison of the heating performance of air-source heat pumps using various types of refrigerant injection [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(2): 444-453.
- [22] BELL I, GROLL E, BRAUN J, et al. Simulation of a cold climate heat pump furnished with a scroll compressor with multiple vapor injection lines [C]//*Proceedings of the In-*

- ternational Conference on Compressors and their Systems 2013, 2013:87-101.
- [23] 杨文军, 邓志扬, 李敬泉. 低环境温度工况下喷液和喷气增焓空气源热泵热水机排气温度控制分析[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(10):70-73. (YANG Wenjun, DENG Zhiyang, LI Jingquan. Analysis on discharge temperature control of air source heat pump water heater with liquid injection and enhanced vapor injection under low ambient temperature condition[J]. Refrigeration and Air conditioning, 2017, 17(10):70-73.)
- [24] WANG Xiao, YU Jianlin, XING Meibo. Performance analysis of a new ejector enhanced vapor injection heat pump cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100: 242-248.
- [25] BAI Tao, YAN Gang, YU Jianlin. Thermodynamic analyses on an ejector enhanced CO₂ transcritical heat pump cycle with vapor-injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 58: 22-34.
- [26] QI Hongjie, LIU Fuya, YU Jianlin. Performance analysis of a novel hybrid vapor injection cycle with subcooler and flash tank for air-source heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74: 540-549.
- [27] XU Shuxue, MA Guoyuan. Research on air-source heat pump coupled with economized vapor injection scroll compressor and ejector[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(7): 1587-1595.
- [28] HUANG M J, HEWITT N J. The experimental analysis of the effect of ambient factors on the defrosting of economised vapour injection compressor air source heat pump in marine climates[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 820-827.
- [29] 赵鹏. 喷气增焓技术的研究与应用—除霜能耗对采用喷气增焓的空气源热泵性能的影响[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014. (ZHAO Peng. Study and research on application of blowing out gas to increase enthalpy technology—the energy of defrosting equipment has influence on using increase enthalpy technology air source heat pump[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.)
- [30] CHO I Y, SEO H J, KIM D, et al. Performance comparison between R410A and R32 multi-heat pumps with a subcooler vapor injection in the heating and cooling modes[J]. Energy, 2016, 112: 179-187.
- [31] CHO H, BAEK C, PARK C, et al. Performance evaluation of a two-stage CO₂ cycle with gas injection in the cooling mode operation[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1): 40-46.
- [32] 王枫, 郭强, 李连生. 半封闭活塞式制冷压缩机喷液的研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 29-33. (WANG Feng, GUO Qiang, LI Liansheng. Study on liquid refrigerant of semi-hermetic reciprocating refrigeration compressor [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5):29-33.)
- [33] 樊斌, 汪和平. 喷液冷却在高温空调中的应用与理论分析[J]. 制冷与空调(四川), 2011, 25(2): 175-178. (FAN Bin, WANG Heping. The theoretical analysis of liquid inject cooling method used in high temperature air-condition [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(2):175-178.)
- [34] ZHANG Dong, LI Jinping, NAN Junhu, et al. Thermal performance prediction and analysis on the economized vapor injection air-source heat pump in cold climate region of China[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2016, 18: 127-133.
- [35] ROH C W, MIN S K. Effects of intermediate pressure on the heating performance of a heat pump system using R410A vapor-injection technique[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 1911-1921.
- [36] HEO J, KANG H, KIM Y. Optimum cycle control of a two-stage injection heat pump with a double expansion subcooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(1): 58-67.
- [37] HE Yongning, CAO Feng, JIN Lei, et al. Experimental study on the performance of a vapor injection high temperature heat pump[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 60: 1-8.
- [38] NAVARRO E, REDO'N A, GONZA'LVEZ-MACIA J, et al. Characterization of a vapor injection scroll compressor as a function of low, intermediate and high pressures and temperature conditions[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(7): 1821-1829.
- [39] LEE D, SEONG K J, LEE J. Performance investigation of vapor and liquid injection on a refrigeration system operating at high compression ratio[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 53: 115-125.
- [40] 谭希. 5 kW 准二级压缩热泵系统的特性与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (TAN Xi. Theoretical and experimental study on a 5 kW quasi-two stage compression heat pumping System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.)
- [41] WANG Baolong, SHI Wenxing, LI Xianting. Numerical analysis on the effects of refrigerant injection on the scroll compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(1): 37-46.
- [42] JEON Y, SANG H L, KIM W, et al. Numerical study on the optimal design of injection-hole geometries of a twin rotary compressor in a liquid injection heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 113: 1178-1188.
- [43] 董冰冰. 带喷气喷液冷却的 R32 空气源热泵机组实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015. (DONG Bingbing.

- Experimental research on R32 air source heat pump unit with vapor injection & liquid injection cooling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.)
- [44] YANG Minghong, WANG Baolong, LI Xianting, et al. Evaluation of two-phase suction, liquid injection and two-phase injection for decreasing the discharge temperature of the R32 scroll compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 59: 269–280.
- [45] 汪涛, 王芳, 陈红群, 等. R32 用于喷气增焓热泵热水器中可行性研究[J]. 建筑节能, 2017(1): 139–144. (WANG Tao, WANG Fang, CHEN Hongqun, et al. Feasibility of R32 using in enhanced vapor injection heat pump water heater[J]. Building Energy Efficiency, 2017(1): 139–144.)
- [46] XU Xing, HWANG Y, RADERMCHER R. Performance comparison of R410A and R32 in vapor injection cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 892–903.
- [47] 黄俊军, 王石, 李庆伟. R32 制冷剂在变频喷气增焓涡旋式压缩机中的应用研究[C]//第二届中国制冷空调专业产学研讨论论文集. 北京: 中国制冷学会, 中国制冷空调工业协会, 2013: 121–125. (HUNANG Junjun, WANG Shi, LI Qingwei. Study on application of R32 refrigerant in variable frequency jet enthalpy scroll compressor [C]//Proceedings of the second China Refrigeration and air conditioning industry. Beijing: Chinese Association of Refrigeration, China Refrigeration and Air-conditioning Industry Association, 2013: 121–125.)
- [48] XU Shuxue, MA Guoyuan, LIU Qi, et al. Experiment study of an enhanced vapor injection refrigeration/heat pump system using R32[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 68(2): 103–109.
- [49] XU Shuxue, NIU Jianhui, CUI Zengyan, et al. Experimental research on vapor-injected heat pump using injection subcooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 674–681.
- [50] 藕俊彦, 王芳, 余大维. R417A 喷气增焓热泵热水器低温环境下的变流量特性分析[J]. 流体机械, 2016, 44(9): 82–87. (OU Junyan, WANG Fang, YU Dawei. Variable flow characteristic analysis of R417A enhanced vapor injection heat pump in low temperature[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(9): 82–87.)
- [51] XU Shuxue, FAN Xiusong, MA Guoyuan. Experimental investigation on heating performance of gas-injected scroll compressor using R32, R1234yf and their 20wt%/80wt% mixture under low ambient temperature[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 75: 286–292.
- [52] D'ANGELO J V H, AUTE V, RADERMACHER R. Performance evaluation of a vapor injection refrigerant system using mixture refrigerant R290/R600a [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 65: 194–208.
- [53] 王东博. 喷液技术在 R32 制冷系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (WANG Dongbo. Research on liquid injection device application to R32 refrigeration system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.)
- [54] 向卫民. 变频变容喷气增焓空调压缩机的理论与实验研究[J]. 顺德职业技术学院学报, 2016, 14(2): 1–4. (XIANG Weimin. Theoretical and experimental study on variable frequency variable volume enhanced vapor injection air conditioning compressor [J]. Journal of Shunde Polytechnic, 2016, 14(2): 1–4.)
- [55] 王贻任. 压缩机容量调节新技术——数码涡旋技术[J]. 家电科技, 2005(9): 30–32. (WANG Yiren. New technology for capacity modulation—digital scroll technology [J]. Household Appliance Technology, 2005(9): 30–32.)
- [56] CHO I Y, KO S B, KIM Y. Optimization of injection holes in symmetric and asymmetric scroll compressors with vapor injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 850–860.
- [57] CHOI Y U, KIM M S, KIM G T, et al. Performance analysis of vapor injection heat pump system for electric vehicle in cold startup condition[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 80(4): 24–36.
- [58] KIM D, CHUNG H J, JEON Y, et al. Optimization of the injection-port geometries of a vapor injection scroll compressor based on SCOP under various climatic conditions[J]. Energy, 2017, 135: 442–454.
- [59] TELLO-OQUENDO F M, NAVARRO-PERIS E, GONZA' LVEZ-MACIA' J. New characterization methodology for vapor-injection scroll compressors[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74: 528–539.
- [60] WINANDY E L, LEBRUN J. Scroll compressors using gas and liquid injection: experimental analysis and modelling [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8): 1143–1156.
- [61] DARDENNE L, FRACCARI E, MAGGIONI A, et al. Semi-empirical modelling of a variable speed scroll compressor with vapor injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 54: 76–87.
- [62] MA Guoyuan, CHAI Qinhu. Characteristics of an improved heat-pump cycle for cold regions [J]. Applied Energy, 2004, 77(3): 235–247.
- [63] 柴沁虎, 马国远, 江亿, 等. 带经济器的涡旋式压缩机制冷循环热力学分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(10): 1401–1404. (CHAI Qinhu, MA Guoyuan, JIANG Yi, et al. Thermodynamic analyses of scroll refrigeration system with economizer [J]. Journal of

Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43 (10): 1401-1404.)

[64] 张科, 吴兆林, 周志钢, 等. 涡旋式压缩机经济器系统的数学模型研究与性能分析[J]. 低温与超导, 2009, 37(5): 52-56. (ZHANG Ke, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang, et al. Research on simulation and performance of scroll compressor with economizer[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(5): 52-56.)

[65] WANG Baolong, SHI Wenxing, LI Xianting, et al. Numerical research on the scroll compressor with refrigeration injection[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 440-449.

[66] ZENDEHBOUDI A, LI Xianting, WANG Baolong. Utilization of ANN and ANFIS models to predict variable speed scroll compressor with vapor injection [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74: 475-487.

[67] 刘杨, 黄之敏, 刘春慧. 喷气增焓技术对转子式压缩机制热性能的影响[J]. 电器, 2013(增刊 1): 707-710. (LIU Yang, HUANG Zhimin, LIU Chunhui. Impact of injection technology on heating performance of rotary compressor[J]. China Appliance, 2013(Suppl.1): 707-710.)

[68] LIU Xingru, WANG Baolong, SHI Wenxing, et al. A no-

vel vapor injection structure on the blade of a rotary compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 1219-1228.

[69] WANG Baolong, LIU Xingru, SHI Wenxing, et al. An enhanced rotary compressor with gas injection through a novel end-plate injection structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 180-191.

[70] YAN Gang, JIA Qinglei, BAI Tao. Experimental investigation on vapor injection heat pump with a newly designed twin rotary variable speed compressor for cold regions [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 232-241.

通信作者简介

赵蕾, 女, 博士, 教授, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 13201861435, E-mail: leizhao0308@ hotmail.com。研究方向: 建筑及暖通空调节能新技术研究。

About the corresponding author

Zhao Lei, female, Ph. D., professor, School of environmental and municipal engineering, Xi'an University of Architecture And Technology, +86 13201861435, E-mail: leizhao0308@ hotmail.com. Research fields: energy saving technology for building and HVAC.

本期下列文章已在中国知网进行优先出版

序号	文章题目	网络出版时间
1	无霜空气源热泵系统冬季再生性能初步实验	2019-08-14
2	多支管并联的分离型热管回路传热特性实验研究	2019-08-14
3	空调工况下地铁站台 PM2.5 动态变化特性与影响因素分析	2019-07-02
4	数据中心刀片式服务器不同冷却方式的模拟对比	2019-08-14
5	圆形翅片管换热器计算模型与算法收敛性研究	2019-09-25
6	基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术研究进展	2019-08-14
7	5 mm 小管径内 R290 流动沸腾换热特性	2019-08-14
8	液氮直接蒸发制冷系统模糊 PID 控制方法的数值模拟与实验研究	2019-08-14
9	基于单类支持向量机的冷水机组温度传感器故障检测	2019-08-14
10	预冷冷库内冰浆式湿冷蒸发器的性能实验研究	2019-08-14
11	多功能军用飞机地面液冷车研制与实验	2019-08-14