

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.015

降低制冷系统压缩机排气温度的方法研究

何俊,陶乐仁,虞中旻

(上海理工大学制冷与低温工程研究所,上海 200093)

摘要:针对R32制冷系统排气温度高的问题,课题组从系统性能、可行性等方面分析讨论了目前主流的4种方法(中间补气法、两级压缩法、喷液法以及湿压缩法)的优劣,建立了小型变流量冷水机组,采用湿压缩的方法来优化R32制冷系统压缩机排气温度过高的问题。研究表明:对于R32制冷系统,采用湿压缩的方法来降低排气温度为较好选择;滚动转子式压缩机的结构特性使得针对R32制冷系统的排气温度降低的问题有了很好的解决方案;标准空调工况下,湿压缩的方法可显著改善R32排气温度。实际工程中可通过控制压缩机吸气口干度值来降低R32的排气温度,获得最优系统性能系数。

关键词:R32制冷系统;中间补气;两级压缩;喷液;湿压缩;排气温度

中图分类号:TB651.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)02-0077-05

Research on Method of Reducing Compressor Exhaust Temperature in Refrigeration System

HE Jun, TAO Leren, YU Zhongyang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the problem of high exhaust temperature of R32 refrigeration system, the feasibility of the advantages and disadvantages of four methods of the current mainstream (second gas-injection, two-stage compression, liquid spray and wet compression) was analyzed and discussed from the aspects of system performance. A small variable flow chiller was set up, emphasizing the use of wet compression to optimize the exhaust temperature of the R32 refrigeration system. The results show that: the wet compression method is the best choice to reduce the exhaust temperature for R32 refrigeration system; the structural characteristics of the rolling rotor compressors make a good solution to the problem of the exhaust temperature of the R32 refrigeration system; under the condition of standard air conditioning, the wet compression method can significantly reduce the R32 exhaust temperature. In practical engineering, the exhaust temperature of R32 system can be reduced by controlling the suction dryness of the compressor, and the optimal system performance coefficient can be obtained.

Keywords: R32 refrigeration system; second gas-injection; two-stage compression; liquid injection; wet compression; exhaust temperature

R32作为针对当前的环境问题提出的主要替代制冷剂之一,由于其良好的热工性而备受关注,但较之发达国家所推广的R410A制冷剂,R32的压缩机排气温度要高出20%^[1]。所以,解决R32排气温度较高的问题成为了将其迅速在市场推广的关键。同时,随着高

效节能、控温精度高的变制冷剂流量制冷系统VRF^[2]投入市场,相应地,作为制冷系统的“心脏”,压缩机如何在变频调节下更好地降低其排气温度,实现更高性能的运行也成为了亟待攻破的研究壁垒。目前主要提出了补气、两级压缩、喷液冷却以及湿压缩等方法来降

收稿日期:2017-08-24;修回日期:2018-01-10

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室(13DZ2260900)。

第一作者简介:何俊(1993),男,四川梓潼人,硕士研究生,主要研究方向为制冷系统的优化与仿真。E-mail:735353105@qq.com

低排气温度。

1 补气降低压缩机排气温度

中间补气即在制冷循环中,通过补气增焓的技术在压缩机腔内喷入适量的中压制冷剂蒸气以增加排气量,从而能在一定程度上增加换热量提高能效比 C_{COP} ,同时达到降低压缩机排气温度的目的。常用的补气增焓技术如图 1 所示,其循环 $p-h$ 图如图 2 所示。图 2 中,1~7 为循环状态点,“1-2-3-4”为一个制冷主循环,“3-5”为补气回路产生蒸气及补气前自身预热过程,“5-6”为蒸气喷射过程,“6”点为喷射点,“6-7”为补气前后焓差。

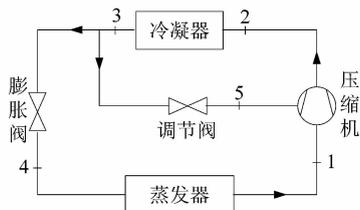


图 1 补气增焓循环原理图

Figure 1 System diagram of Vapor-injected method

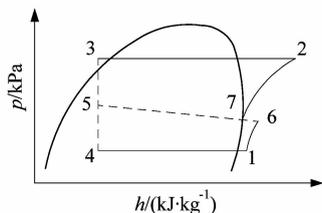


图 2 补气增焓循环的 $p-h$ 图

Figure 2 $p-h$ chart of Vapor-injected method

张妍等^[3]对压缩机功率为 4 kW 的空调器利用焓差室从理论和实际两方面分析了补气对于降低压缩机排气温度的效果,通过实验得出了在是否补气这两种情况下的压缩机的运行性能。结果表明:在蒸发温度接近 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,补气后系统换热量有一定程度的增加,但排气温度只能降低 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。张新玉^[4]对涡旋压缩机制冷系统补气时的压缩过程进行了理论分析,实验结果表明:补气压力愈大,排气温度愈小;当吸气内压缩容积比在 1 左右时,系统具有较低的排气温度。张剑飞等^[5]对采用补气功能的涡旋式制冷系统压缩机的循环性能进行了实验测试,结果表明:在蒸发温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,通过中间补气可以降低排气温度约 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,但是耗功增加, C_{COP} 无明显提升。

中间补气法在降低了压缩机的排气温度同时也带来了一些无法回避的缺点,如由于中间补气使得制冷剂充注量增加,引入了额外的不生产冷量的气体,增加

了对压缩机的耗损力度,系统荷载随之增大,继而造成设备成本的增加,难以推广应用。

2 两级压缩降低压缩机排气温度

将系统分为两级压缩从而达到系统所需要的总压比。通过低压级先压缩降温后再至高压级压缩降温,从而使得系统整体温度不会大幅度增加,这种方式被称为两级压缩降温,循环原理如图 3 所示,其循环 $p-h$ 图如图 4 所示。图 4 中,1~8 为循环状态点,“1-2-3-4-5-7-8-1”为制冷系统主循环,“2-3”为低压级压缩机排气在中间冷却器内的冷却过程,“5-6”为中间冷却器节流阀的节流过程,“6-3”为部分制冷剂液体在中间冷却器内的蒸发过程。

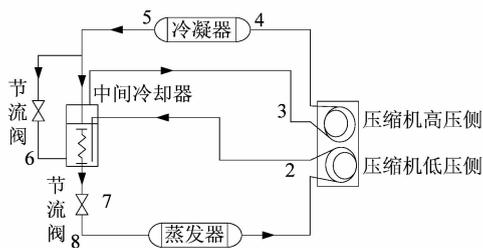


图 3 两级压缩制冷循环

Figure 3 System diagram of two-stage compression refrigeration cycle

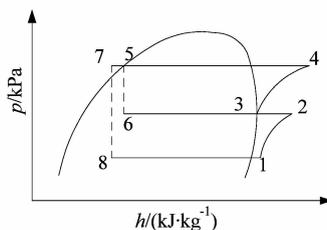


图 4 两级压缩制冷循环的 $p-h$ 图

Figure 4 $p-h$ chart of two-stage compression refrigeration cycle

张倩等^[6]采用双缸滚动转子式压缩机实现了两级压缩制冷循环,实验中通过对比 R32 单级压缩及两级压缩制冷系统的循环性能,研究并得出了在热泵以及制冷工况下的压缩机排气温度理论数据。结果表明:不管是热泵循环还是制冷循环,其压缩机排气温度最多只能降低 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, C_{COP} 也无明显提高,同时考虑到两级压缩带来的占地面积、操作复杂程度、功耗增加量以及成本加大等问题,所以两级压缩本身是难以在普适性市场进行推广的。张健一等^[7]通过对比并分析单级和双级压缩制冷循环在工程实例中的应用得出:压缩比大于 8 的工况下,采用双级压缩制冷循环,制冷系数有所提高,压缩机的排气温度有一定的降低,电耗

降低,投资费用减少。

3 喷液冷却法降低排气温度

喷液冷却法即将冷凝器出口的制冷剂液体直接喷入压缩机内腔,与中间补气法相似,均采用了补气增焓技术以在优化系统性能的同时达到降低排气温度的目的。

董冰冰^[8]建立了带有喷液系统的空气源热泵机组,通过喷液技术来降低压缩机排气温度。经过大量的实验,得出采用喷液模式对系统性能有着立竿见影的改善效果,一般在数分钟内可将压缩机的排气温度降低 13~20℃。殷翔等^[9]建立了带有喷液冷却的制冷系统回路,研究了喷液量与 C_{COP} 、压缩机排气温度以及制冷量的相对变化,结果表明:系统喷液量越大,压缩机的排气温度降低程度越大,而 C_{COP} 随喷液量的增大最后仍有下降趋势。Park 等^[10]与 Cho 等^[11]采用喷液冷却对变转速的工况进行了实验研究,结果表明:转速越高,喷液对系统的冷却效果越显著,而当压缩机处于低转速时由于制冷剂泄漏等原因将降低系统性能。

研究发现:喷液冷却的确可以有效地降低排气温度,但在实际运行当中,喷液量的大小并不好控制,因为一旦喷液量过大,这些并不产生冷量的液体将导致潜在的压缩机“液击”危害以及 C_{COP} 的大幅度下降,而且压缩机喷液的冷却方式由于额外引入了不产生冷量的制冷剂液体,增加了不必要的系统能耗。

4 控制压缩机吸气口干度降低排气温度

陶宏等^[12]采用第 2 制冷剂热量器法对 R22 制冷系统进行了测试,主要研究了在压缩机不同的吸气状态下相关性能的变化,结果表明,在定内压比工况下,当吸气过热时,只有吸气密度对转子式压缩机的质量流量有影响;但在湿压缩时,压缩机的容积效率与吸气口干度相关,且是随着湿压缩量的增大而降低。王乐民等^[13]建立了变频滚动转子制冷实验机组,采用少量吸气带液的状态对压缩机的各项性能进行了实验分析,总结了湿压缩时排气温度与吸气干度的相互影响,并总结规律得出:对于 R22 制冷系统,当吸气干度为 0.95 时,压缩机的排气温度有显著的降低,较之吸气过热在 5~10℃ 时降低了 15~20℃。张利等^[14]通过探究 R32 压缩机专用冷冻油并与压缩机湿压缩量进行平衡并得出结论:R32 制冷压缩机具有一个最佳干度值,如果干度过小,将会导致冷冻油黏度下降,从而增加系统泄漏量,加重压缩机磨损。Yang 等^[15]比较了蒸发器出口两相流型时的吸气带液、液体喷射等方法对系统性能的影响,结果表明:吸气带液的制冷量以

及 C_{COP} 略低于两相喷射,但吸气带液法、液体喷射法及两相喷射法 3 种方法均可有效降低排气温度。对于当今的中小型市场,平衡冷量与成本后应当优先选择成本提升不高但各项性能指标更加均衡的吸气带液技术。

以上实验均指出了利用吸气带液来降低排气温度的一个研究关键点是为寻求压缩机最佳吸气干度,同时,滚动转子压缩机的抗湿压缩特性使得利用吸气带液来降低排气温度不再困难,其更低的成本,更简易的操作,对中小型市场更优的普适性使得这种方法更为的可行。

4.1 滚动转子式压缩机湿压缩机理及性能

由于高背压设计的转子式压缩机具有较好的抗湿压缩特性^[16],所以可降低系统的吸气过热度,将其控制在少量吸气带液状态以增加蒸发器两相换热区从而提高换热效率,降低压缩机的排气温度^[17-18]。

滚动转子式压缩机具有结构紧凑、噪音小以及性能优等特点,其主要由气缸、转子、滑片和排气阀等部件组成,圆柱形的气缸与转子形成的月牙形空腔即为压缩机的工作容积。当转子的主轴在原动机拖动下旋转时,偏心转子紧贴着气缸内壁面回转,造成工作容积的大小变化以完成压缩机的不间断运行。滚动转子式压缩机通常采用高背压设计,即蒸发器回气直接进入压缩机气缸,压缩后的气体排到电机腔体内,流过电机后从排气管排出^[19]。通常在转子式压缩机的吸气口都会附带一个气液分离器,这也表明了其能够进行湿压缩的结构特性,但吸气带液量过大会导致 C_{COP} 和制冷量等大幅度下滑,甚至会因“液击”的出现而致使压缩机严重损坏,所以如何调节湿压缩量在恰当的范围成为了平衡 C_{COP} 及排气温度的关键。为此,需要通过大量的实验验证系统性能,从而获得一个压缩机最佳吸气口干度的范围,优化系统性能。

4.2 实验机组的建立

图 5 所示为小型变流量冷水机组实验装置。通过实验对 R32 制冷系统在不同吸气口干度及过热度下的热力性能进行研究,以期求得湿压缩的最佳吸气干度范围,实现系统性能的最优化。

实验管路中布置了精度为 $(\pm 0.15 + 0.002|t|)$ ℃ (t 为测量温度)的铂电阻,铂电阻斜插嵌入循环管路,避免了边界层的破坏,使得测量数据更为精准;机组中布置了精度为 0.5% 的压力变送器力求实验的精准与全面;冷却水与冷冻水循环温度由 PID 进行控制并在水循环中内置电加热器以实现更大范围、更精确的温

最大,且在 $0.80 < x < 0.95$ 降至最小值;而 R410A、R22 的下降速率仅为 R32 的一半左右。由此可知,R32 制冷剂不仅在湿压缩区间具有较大 C_{COP} ,同时压缩机吸气干度对 R32 排气温度有显著影响。所以在一定条件下,可通过控制压缩机吸气口干度的方法来解决 R32 排气温度过高的问题,同时获得较好的 C_{COP} ,但具体的最佳压缩机吸气口干度范围仍需要进一步实验验证。

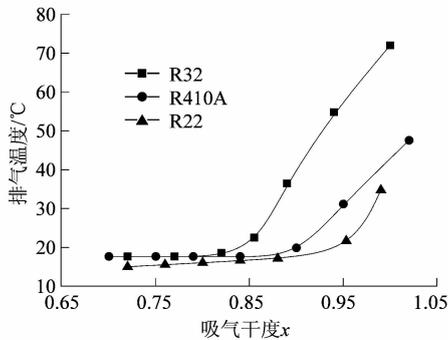


图 8 排气温度随吸气干度的变化

Figure 8 Changes of exhaust temperature with air - suction dryness

5 结论

文中分析了 4 种降低排气温度的方式,讨论了 4 者在平衡运行性能及经济效益上的优劣,并主要研究了吸气带液方式在降低转子式压缩机排气温度上的应用,得到以下结论:

1) 对于 R32 制冷系统,较之前 3 种降温方法,同时考虑到操作成本、运行成本、中小型市场推广难易度以及系统循环性能等因素,采用吸气带液的方法来降低排气温度为平衡所有因素的最佳选择。

2) 滚动转子式压缩机的结构特性所决定其在湿压缩上的优势,加上噪音小、结构紧凑等实用的特点,使得针对 R32 制冷系统的排气温度降低的问题有了很好的解决方案,并为其迅速推广增加了可行性。

3) 针对吸气带液控制排气温度的方法建立了小型变流量冷水机组实验台,在定压比或水温的工况下,通过改变压缩机不同的吸气状态的方法能够寻求最佳湿压缩量,从而在改善排气温度的同时优化系统性能。

4) 标准空调工况下,R32 具有最大的 C_{COP} 峰值与最高的排气温度,且 R410A、R22 制冷剂仅为 R32 排气温度的一半左右。但实验验证,湿压缩量的大小对 R32 排气温度的变化有显著影响,故实际工程中可通过控制压缩机吸气口干度值来降低 R32 的排气温度,获得最优系统性能系数。

参考文献:

- [1] 矢岛龙三郎,吉见敦史,朴春成. 降低 R32 压缩机排气温度的方法[J]. 制冷与空调,2011,11(2):61.
- [2] 石毅登,田怀璋,陈林辉,等. 采用变频技术的制冷装置的优势分析[J]. 制冷与空调,2004,4(5):59.
- [3] 秦妍,张剑飞. R32 制冷系统降低排气温度的方法研究[J]. 制冷学报,2012,33(1):17.
- [4] 张新玉. R32 中间补气压缩空气源热泵性能研究[D]. 天津:天津商业大学,2015:59.
- [5] 张剑飞,秦妍,秦海杰. 涡旋式压缩机中间补气技术[J]. 制冷与空调,2012,12(2):23.
- [6] 张倩,晏刚,白涛. 一种新型 R32 两级压缩热泵空调器的理论研究[J]. 低温与超导,2011,32(2):36.
- [7] 张建一,宋怡梦. 单级压缩或双级压缩制冷的技术经济分析[J]. 低温与超导,2009,37(12):28.
- [8] 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,2015:68-69.
- [9] 殷翔,孙帅辉,曹锋,等. 吸气喷液对涡旋压缩机及系统性能的影响[J]. 制冷学报,2015(5):15.
- [10] PARK Y C, KIM Y, CHO H. Thermodynamic analysis on the performance of a variable speed scroll compressor with refrigerant injection[J]. International journal of refrigeration,2002,25(8):1082.
- [11] CHO H, JIN C J T, KIM Y. Influence of liquid refrigerant injection on the performance of an inverter-driven scroll compressor [J]. International journal of refrigeration,2003,26(1):94.
- [12] 陶宏,杨军,刘春慧,等. 吸气过热度对滚动转子压缩机性能影响的实验研究[J]. 制冷学报,2011,32(6):29.
- [13] 王乐民,陶乐仁,杨丽辉. 转子式压缩机吸气带液时排气状态的变化[J]. 能源研究与信息,2015,31(3):135.
- [14] 张利,杨敏,张蕾. 滚动转子式 R32 压缩机开发[J]. 制冷与空调,2015,15(2):78.
- [15] 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,2015,59:279.
- [16] Liu Z, Soedel W. An investigation of compressor slugging problems [C]//International Compressor Engineering Conference at Purdue University. West Lafayette:Purdue University,1994:439.
- [17] ELLIOTT M S, RASMUSSEN B P. On reducing evaporator superheat nonlinearity with control architecture [J]. International journal of refrigeration,2010,33(3):607-614.
- [18] 韩磊,陶乐仁,黄礼浩,等. 变频滚动转子压缩制冷系统‘0’过热度性能影响试验研究[J]. 流体机械,2010,38(10):53-57.
- [19] The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2008 ASHRAE handbook-HVAC system and equipment [M]. Atlanta, America:ASHRAE,2008.
- [20] Air Condition, Heating and Refrigeration Institute (AHRI). Positive displacement refrigerant compressors and compressor units: ANSI/AHRI standard 540[S]. La Grange Park, Illinois, American Nuclear Society Specification,1999.
- [21] VORSTER P P J, MEYER J P. Wet compression versus dry compression in heat pumps working with pure refrigerants or non-azeotropic binary mixtures for different heating applications [J]. International journal of refrigeration,2000,23(4):292-311.