

文章编号: 0253-4339(2015) 01-0030-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.030

碳氢制冷剂在大中型商用设备的研究现状

钟志锋¹ 胡杰浩² 李小燕¹ 冯 卉¹ 吴建华²

(1 环境保护部环境保护对外合作中心 北京 100035; 2 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

摘 要 碳氢制冷剂的 ODP=0, GWP 极低, 环保性能优良, 热物理性质良好, 可以作为未来制冷剂的备选方案。主要从商用热泵、超市复叠系统以及其他商用设备几个方面对碳氢应用于大中型商用设备的研究现状进行了综述。研究表明: 碳氢制冷剂在系统实际运行中总体性能表现优良, 对于其可燃性, 国内外学者采取了减少充注量的措施, 如采用微通道换热器、板式换热器等紧凑式换热器, 采用间接式制冷系统, 以确保碳氢制冷系统的安全运行。

关键词 制冷剂替代; 大中型商用设备; 碳氢制冷剂; 降低充注量

中图分类号: TB64; TB657.2

文献标识码: A

Research Status of Hydrocarbons as Refrigerants on Large and Medium-sized Commercial Equipment

Zhong Zhifeng¹ Hu Jiehao² Li Xiaoyan¹ Feng Hui¹ Wu Jianhua²

(1. Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100035, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract Hydrocarbons, whose environmental performance (ODP=0, GWP is extremely low) and thermophysical properties is excellent, can be selected as future alternative refrigerants. The research status of the application of HCs on large and medium-sized commercial equipment is introduced from aspects of commercial heat pumps, cascade system for supermarkets and other commercial equipment. Researches indicate that hydrocarbons behave well in the actual operation of the refrigeration system. Measures of reducing the refrigerant charge due to flammability, such as using micro-channel, plate heat exchanger, adopting indirect systems, are taken to make sure safe operation of refrigeration system.

Keywords refrigerant substitution; large and medium-sized commercial equipment; HCs; reducing refrigerant charge

1987 年国际社会签订了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》, 首次定量的提出了淘汰 CFCs 制冷剂计划。2007 年, 《蒙特利尔议定书》又进一步的提出加速淘汰 HCFCs 制冷剂, 对于发展中国家, 2013 年 HCFCs 消费和生产水平冻结在 2010 年的平均水平基准线上, 削减进度为: 2015 年累计削减 10%, 2020 年累计削减 35%, 2025 年累计削减 67.5%, 2030 年实现完全淘汰, 仅保留 2.5% 的维修量^[1], 为此国内外学者及相关从业人员加紧寻求更加环保的制冷剂替代品。

有学者提出采用氢氟烃(以下简称 HFCs), 如 R134a、R410A 等, 作为 R22 替代制冷剂, 虽然它们的热物理性质良好, ODP(消耗臭氧潜能值)为 0, 然而其 GWP(温室效应潜能值)较高, 只能作为过渡制冷剂。天然制冷剂如 R744、R717 以及碳氢(Hydrocar-

bons, 以下简称 HCs), 由于优良的环保性能重新受到人们的关注, 其中 HCs 制冷剂, 包括 R290、R1270、R600a 等, 热力学特性优良, ODP=0, GWP 极低(如 R290 只有 3, R600a 小于 10^[2]), 唯一需要注意的是可燃性, 但可以通过采取相关措施减小风险。

本文对 HCs 应用于大中型商用设备的现状进行介绍, 主要从几个应用场合如商用热泵、超市复叠式制冷系统以及其他商用设备进行论述, 着重对制冷剂充注量减少措施和制冷剂性能对比进行介绍。

1 HCs 应用于商用热泵

商用热泵相对于家用热泵, 其功率、体积均较大, 所以商用热泵的制冷剂充注量要比家用热泵大得多。国内对 HCs 商用热泵鲜有研究, 而国外学者将其与其他制冷剂进行了性能对比实验^[3-5], 对 HCs 热泵

的研究多集中在如何减少充注量上^[6-8]。

B Purkayastha 等^[3]做了 R290 以及 LPG(液化石油气)(98.95% 的 R290, 1.007% 的 R170, 0.0397% 的 R600a)对 R22 热泵替代性实验研究。以一台最大制热量为 15 kW 的热泵为实验平台,在一定条件下(冷凝温度分别维持在 35 °C、45 °C 和 55 °C,蒸发温度在 -15 ~ 15 °C 的范围内变化,过热度为 1 °C,过冷度为 8 °C)测试充注各工质时系统的 COP、制热量、排气温度以及质量流量。对比后发现 HCs 制冷剂总体性能优于 R22,制热量略微小于 R22,而且 HCs 制冷剂的质量流量及压缩机排气温度要比 R22 低得多。虽然 LPG 工质系统性能要略优于纯 R290,但由于 LPG 中还含有硫或其他腐蚀性物质,对系统各个原件的影响还需要进一步研究。

此外, J M Corberán 等^[4-5]开发了一台名义制冷量为 16 kW(制热模式为 20 kW)的 R290 可逆水-水热泵并与 R407C 单元进行了对比实验。开发的原型机采用板式换热器来减少制冷剂充注量,最后获取制热量为 17 kW 左右,而充注量只有 550 g。通过对比实验发现,该 R290 热泵系统不管在制热还是制冷模式, COP 均优于 R407C 单元。由于 R290 低压比的性质,如采用涡旋式压缩机系统可能获得更优的性能。J M Corberán 等^[5]指出系统的最佳充注量取决于换热器设计、液相管线容积、润滑油的量及种类等因素,还与蒸发器中制冷剂的密度密切相关,即取决于蒸发器水温及过热。

由于热泵系统的制冷剂充注量较大,如采用 HCs 制冷剂,考虑到安全性应该减少其充注量,因此,如何减少 HCs 充注量是值得研究的课题。瑞典皇家理工学院的 Primal Fernando 等^[6-7]对低 R290 充注量的热泵进行了开发研究。建立实验平台来模拟制热量为 5 kW 的水-水热泵系统,采用自己开发设计的微通道换热器来减小制冷剂的充注量。研究表明,使用微通道换热器后系统充注量只有 201 g(瑞典气候条件下),而且其换热效率很高,不会造成 COP 损失。由于制冷剂主要集中在冷凝器和压缩机中,故可以通过选择合适的压缩机润滑油或者使用少油量的压缩机可进一步减少制冷剂的充注量。Bjorn Palm^[6]又对设计的微通道换热器做进一步介绍,给出其具体结构。Bjorn Palm 还指出在系统的热端和冷端均使用二次制冷剂的间接式系统可以大大减少充注量,但可能会导致系统性能稍有降低。

意大利的 Alberto Cavallini 等^[8]也对 100 kW 低 R290 充注量水-水热泵系统进行开发和性能研究。系统设备如图 1, 1 台半封闭式压缩机, 5 台换热器, 3

台微管径(内径 2 mm)壳管式换热器(1 台蒸发器, 1 台冷凝器, 1 台回热器), 2 台板式换热器(1 台蒸发器, 1 台冷凝器), 通过开合手动阀, 可以实现多种组合, 本实验始终以板式换热器作为蒸发器, 研究冷凝器不同形式时(板式或壳管式)以及回热器的有无对系统性能的影响。实验发现, 使用微管径壳管式换热器 COP 略微减少(大约 2%), 制冷剂侧体积有很大减少, 使用回热器后 COP 略有增加, 作者指出使用回热器主要是为了减少 R290 在润滑油内的溶解度以及避免因润滑油粘度降低导致的问题。去除贮液器并缩短管长后, 使用板式换热器作为冷凝器时, 充注量为 3 kg, 而使用微管径换热器充注量为 2.4 kg。

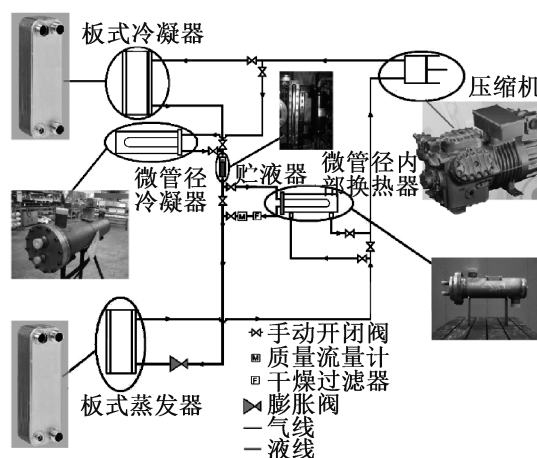


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

为减少制冷剂充注量, 各国学者采用微通道换热器、板式换热器以及微管径壳管式换热器等紧凑式换热器, HCs 制冷剂充注量有很大的减少, 与其他工质对比, 发现使用 HCs 制冷剂后系统总体性能更优。

2 HCs 应用于超市复叠制冷系统

传统超市复叠系统中常采用 R22/R13, 由于 R22、R13 均已被限制使用, 所以应寻求新的制冷剂替代系统。王亮等^[9]介绍了 NH₃/CO₂ 和 R290/CO₂ 新型环保复叠式制冷系统, 二者都以 CO₂ 作为低温级, 另一制冷剂作为高温级制冷剂, 对两个系统在不同蒸发温度、不同冷凝温度、不同传热温差下的 COP 进行理论计算后, 发现 NH₃/CO₂ 系统的 COP 最高, R290/CO₂ 系统的 COP 与传统 R22/R13 系统相当。然而, 作者并没有对超市复叠式系统做详细介绍。

宁静红等^[10-12]进一步介绍了 R290/CO₂ 复叠式超市制冷系统, 如图 2 所示: 该系统中 R290 为高温循环, CO₂ 为低温循环, 用于超市食品冷冻柜和冷冻间, 盐水在板式换热器中与 R290 换热后, 被输送到

食品冷藏展示柜和冷藏间。在对该复叠式制冷系统各部分的能量损失做理论分析后,发现 R290 高温循环压缩机所占能量损失比例最大,并随低温循环冷凝温度升高而降低,据此,提出各环节的节能途径。另外,对该系统做了性能实验,高温循环分别采用 R22 和 R290,低温循环采用 CO₂,发现随着高温循环压缩机入口温度的升高,R290 压缩机功耗略高于 R22,但 R22 的 COP_h 要低于 R290。所以,宁静红等^[10-12]指出可将传统的复叠式系统中的 R22 高温循环直接灌注 R290,不仅安全上没问题,而且性能略有提高。

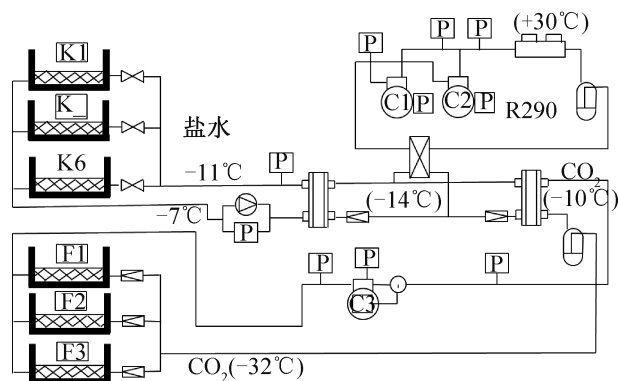


图 2 R290/CO₂ 超市制冷系统循环图

Fig. 2 R290/CO₂ supermarket refrigeration system

此外,宁静红等^[13]还在该 R290/CO₂ 超市制冷系统的基础上设计出冷热组合型超市系统。现有的超市通常采用冷水机组作为夏季供冷,锅炉作为冬季供暖,单独的制冷系统用于食品保鲜储存,而该研究利用 CO₂ 跨临界循环为超市空间夏季供冷和冬季供暖,采用 R290/CO₂ 复叠式循环对食品冷冻冷藏,并吸收 CO₂ 跨临界循环的冷凝热及复叠系统中 R290 的冷凝热。

Kauffeld M^[14]在介绍超市制冷发展趋势时,提到为减少制冷剂充注量可采用间接式制冷系统,如图 3 所示,MT 主制冷系统封闭在机房中,而 LT 系统使用

通常的直接蒸发技术,所以 MT 制冷系统可以采用 HC_s 或 R717 等易燃或有毒的制冷剂。

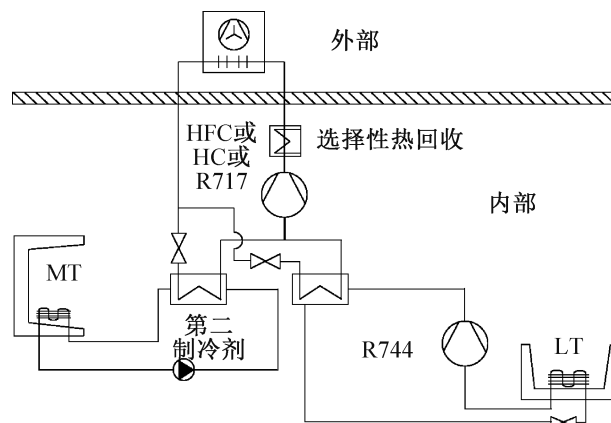


图 3 MT 制冷系统的二级回路也叫间接制冷系统,低温回路作为 MT 系统的复叠系统

Fig. 3 Secondary loop MT refrigeration system also called indirect refrigeration system, the low temperature loop is built as a cascade system to the MT system

3 其他商用设备研究进展

新西兰的 D J Cleland 等^[15]对新西兰农场牛奶冷却系统常用的 R22 采用 HC_s 做了替代性实验研究。实验室系统如图 4 所示,包括带有搅拌器的标准 4500 L 奶桶,空冷器,封闭式压缩机等。为模拟 HC_s 直接灌注实验,除了做必要的防护措施外,系统不做任何改变,实验发现,丙烷乙烷混合物(Care-50)相比于 R22,耗能减少 6%~8%,系统制冷量与其相当;丙烷(Care-40)耗能减少 5%,但制冷量低 9%。对于 HC_s 做为牛奶厂制冷系统制冷剂的可燃性问题,作者指出,新西兰奶牛场制冷系统通常 HC_s 少于 5 kg,而且该系统往往放置于户外或者被围栏围住限制进入,所以满足新西兰相关标准。

印度尼西亚万隆技术研究所的 Aryadi Suwono^[16]

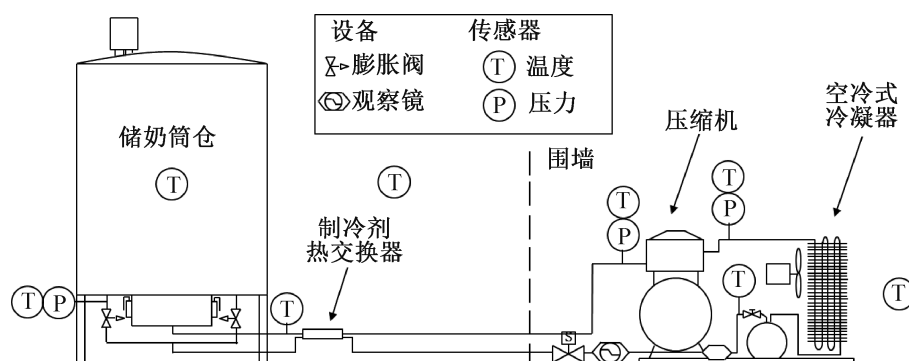


图 4 典型的垂直式储奶筒仓及配套制冷系统

Fig. 4 A typical vertical milk silo and its associated refrigeration system

也对几种 R22 系统向 HCs 转换后的性能做了比较分析,发现 Tanjungsari 和 Cikajang 合作社的牛奶冷却系统使用 R290 后,压缩机电流降低,排气温度降低,能耗降低,制冷量有所提高。雅加达的 Grand Melia 旅馆 420 kW 大型冷水机组的能耗对比实验显示,R290 耗能 161.82 kW,R22 耗能 194.40 kW,显然 R290 系统的能耗更低。另外,HCs 对已有系统来说是一种直接灌注(drop-in)替代物,对于其可燃性,需重新设计电机,而且润滑油可能需更换粘度更高的油,尤其是在压缩机低温运行的条件下。

对于大型碳氢冷水机组,蒸发器一般采用壳管满液式蒸发器,制冷剂充注量往往超过 1000 kg,所以对于其可燃性风险绝对不能忽略。澳大利亚的 Amir Tadros 等^[17]对于冷水机组机房安全问题进行了分析。从制冷剂处理方式、泄露最小化、混合稀释以及发生火灾后的超压和排气等几个方面来减小制冷剂泄漏和起火风险,并给出一些新的建议,诸如:防火墙和蒸汽防渗墙将冷水机组和锅炉与其它机房设备隔离;如果环境最小设计温度不超过制冷剂沸点温度 5℃,隔离区地板应该形成一个能容纳两倍于制冷剂液体容量的水池。此外,作者给出了通风区域与最大升压的关系式:

$$\Delta p_m = \frac{K_{tot} \rho_r}{2} \left[\frac{A_{fm}}{A_v} \left(\frac{v_p}{v_r} - 1 \right) v_r \right]^2 \quad (1)$$

据此,已知通风区域,可以预测出最大升压。

Ladas Taylor 等^[18]也对新加坡大型冷水机组 HCs 制冷剂替代案例进行研究,冷水机组的名义制冷量为 700 kW,对于 HCs 制冷剂充注量,可由原始 R22 充注量除以 3,再乘以 90%,充注后再进行微调如每次增加 5~10 g,直到获得最佳性能为止。最后改造的系统能耗降低 16.1%,冷却效率提高 16.88%。可见碳氢制冷剂的制冷机可以降低能耗并提高制冷效率,冷却速度通常更快且排气压力更低。

4 结论

随着制冷剂使用量的不断增加,HCFCs 和 HFCs 等破坏臭氧层和加剧全球变暖的副作用越来越受到人们的重视,此类制冷剂的替代已刻不容缓。HCs 类制冷剂由于其良好的环保性能以及热力学性能而重新受到人们的关注,唯一需要注意的是其易燃易爆性。对于大中型上用 HCs 制冷系统而言,国内外研究均表明使用 HCs 制冷剂后系统性能得到提升,但大中型商用设备充注量较大,需采取一定措施减少其充注量,主要从两个方面:1)原器件方面,使用紧凑型换热器如微通道换热器、板式换热器等,使用优化

过的压缩机,并减少压缩机的含油量。2)系统方面,使用二次回路(secondary loop)系统,也称间接式系统,不仅可以减少充注量,还可以将制冷系统与使用区域隔离开,可有效降低危险性。总而言之,HCs 制冷剂可以在大中型商业制冷中应用,但在设计、安装、维修以及回收过程中需要特别注意其可燃性。

参考文献

- [1] Khalid G, Miroslav S. Decisions adopted by the nineteenth meeting of the parties to the montreal protocol on substances that deplete the ozone layer [EB/OL]. (2010-02) [2014-04]. <http://www.ozone.unep.org/>.
- [2] Chen X, Omer S, Worall M, et al. Recent developments in ejector refrigeration technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 629-651.
- [3] Purkayastha B, Bansal P K. An experimental study on HC290 and a commercial liquefied petroleum gas (LPG) mix as suitable replacements for HCFC22 [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(1): 3-17.
- [4] Corberán J M, González J, Martínez I O, et al. Development and performance characterisation of a water to water reversible heat pump working with propane [C]//Eighth IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. Copenhagen, 2008.
- [5] Corberán J M, Martínez I O, González J. Charge optimisation study of a reversible water-to-water propane heat pump [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(4): 716-726.
- [6] Fernando P, Palm B, Lundqvist P, et al. Propane heat pump with low refrigerant charge: design and laboratory tests [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(7): 761-773.
- [7] Palm B. Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(10): 1693-1701.
- [8] Cavallini A, Da Riva E, Del Col D. Performance of a large capacity propane heat pump with low charge heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 242-250.
- [9] 王亮, 刘妮. 自然工质在小型超市制冷系统中应用的理论分析 [J]. 制冷技术, 2008, 28(4): 58-60. (Wang Liang, Liu Ni. Theoretical analysis of natural refrigerants used in small supermarket refrigeration systems [J]. Refrigeration Technology, 2008, 28(4): 58-60.)
- [10] 宁静红, 彭苗, 李慧宇. 新型环保超市制冷系统 [J]. 制冷, 2006, 25(1): 57-59. (Ning Jinghong, Peng Miao, Li Huiyu. The new supermarket refrigeration system of environmental protecting [J]. Refrigeration, 2006, 25(1): 57-59.)

- [11] 宁静红, 马一太. R290/CO₂ 制冷循环的能效分析与节能探讨[J]. 流体机械, 2006, 33(7): 70-72. (Ning Jinghong, Ma Yitai. Energy efficiency analysis and energy-saving discussion of R290/CO₂ refrigeration cycle [J]. Fluid Machinery, 2006, 33(7): 70-72.)
- [12] 宁静红, 李惠宇, 彭苗. R290/CO₂ 复叠式制冷系统的性能实验[J]. 制冷学报, 2008, 28(6): 57-60. (Ning Jinghong, Li Huiyu, Peng Miao. Performance experiment of R290/CO₂ cascade refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 28(6): 57-60.)
- [13] 宁静红, 李惠宇, 彭苗. 冷热组合型超市系统的设计与经济性分析[J]. 上海节能, 2007(4): 16-20. (Ning Jinghong, Li Huiyu, Pengmiao. Design and economics analysis on CCHHR system in supermarket [J]. Shanghai Energy Conservation, 2007(4): 16-20.)
- [14] Kauffeld M. Trends and perspectives in supermarket refrigeration [C]//Natural refrigerants sustainable ozone-and climate-friendly alternatives to HCFCs. Germany: GTZ, 2008: 161-172.
- [15] Cleland D J, Keedwell R W, Adams S R. Use of hydrocarbons as drop-in replacements for HCFC-22 in on-farm milk cooling equipment [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1403-1411.
- [16] Suwono A. Experience in conversion of various HCFC22 systems to hydrocarbon [C]//Documents of the 28th Open-Ended Working Group Meeting of the Parties. Thailand: UNEP, 2008.
- [17] Tadros A, Maclaine-cross I L, Leonardi E. Safe plant rooms for large hydrocarbon chillers [C]//Natural Refrigerants Sustainable Ozone and Climate Friendly Alternatives to HCFCs, GTZ Prokli-ma, Eschborn, Germany, 2008.
- [18] Taylor L, Ong J. Application of hydrocarbon refrigerants in existing large systems [C]//Natural refrigerants sustainable ozone-and climate-friendly alternatives to HCFCs. Germany: GTZ, 2008: 343-354.

通信作者简介

吴建华, 男, 副教授, 西安交通大学压缩机研究所, (029) 82663786, E-mail: jhwu@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: 小型制冷空调压缩机及其系统的环保、节能与可靠性。

About the corresponding author

Wu Jianhua, male, associate professor, Institute of Compressor, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82663786, E-mail: jhwu@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: small refrigeration and air conditioning compressor, environmental protection, energy saving and reliability research for small refrigeration system.