

基于全年性能分析的小型制冷设备非共沸制冷剂充注量优化

胡昕昊¹, 张忠斌^{*1}, 姚喻晨¹

(¹江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室 南京师范大学能源与机械工程学院, 南京 210042)
(13515112510, E-mail:zhangzhongbin@163.com)

摘要: 小型制冷设备在制冷行业应用广泛, 其性能受制冷剂充注量影响。然而, 由于机组的匹配不同, 难以对制冷剂充注量进行准确标定以使机组性能尽可能最优。本文提出了一种基于全年性能分析的小型制冷设备非共沸制冷剂充注办法, 本文由夏热冬冷地区的环境温度特性, 从高温到低温分四种工况进行研究, 通过充注试验测试能效比、制冷量等性能参数, 并根据过冷度、过热度、排气温度等性能参数的反馈确定全年制冷剂最佳充注范围和储液器内制冷剂质量范围。这一技术办法通过一台冷风机、风冷压缩冷凝机组冷冻冷藏设备样机在变环境工况下进行的制冷剂 R404A、R407A 充注试验取得了很好的效果。结果表明, 该方法对冷冻冷藏设备及类似制冷设备的制冷剂充注具有借鉴意义。

关键词: 非共沸制冷剂充注; 小型制冷设备; 全年性能评价; 性能试验

NON-AZEOTROPIC REFRIGERANT CHARGE OPTIMIZATION FOR SMALL COOLING APPLICATION BASED ON YEAR-ROUND PERFORMANCE EVALUATION

Xinhao Hu¹, Zhongbin Zhang¹, Yuchen Yao¹

(¹Engineering Laboratory of Energy System Conversion and Emission Reduction of Jiangsu Province, School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210046, China)

Abstract This investigation aims at estimating a precise range of non-azeotropic refrigerant charge for small cooling application by experimental performance. A sample is designed of cold storage unit applies to R404A, R407A and R407F without changing the unit structure and components but adding a paralleled thermal expansion valve. Charging tests are operated on the sample under 4 typical work conditions from high to low ambient temperatures to conduct annual performance evaluation. Under each work conditions, unit performance and operation safety are both considered. Collecting performance parameters including CC(cooling capacity), EER(energy efficiency ratio) and PI(power input) and considering the feedback of sub-cooling degree, super-heating degree and DT(discharge temperature) contribute to a concluding best range of refrigerant charge. Based on the method presented, the recommended charge ranges and refrigerant mass range in liquid reservoir are respectively worked out to help produce better performance of the cold storage unit charged R404A, R407A. This method can be applied as a valuable reference for estimating refrigerant charge in refrigerating units using multi-refrigerant admixture.

Keywords Non-azeotropic refrigerant charge; Small cooling application; Annual performance evaluation; Performance test;

0 前言

小型制冷设备在制冷行业应用广泛, 而压缩冷凝机组和冷风机组成的冷冻冷藏设备的使用更是量大而

基金项目: 江苏省教育厅高校自然科学基金(15KJD470001)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0370)

作者简介: 胡昕昊(1995-), 女, 硕士研究生

广，与之匹配的末端装置更是多样。由于匹配的机组不同，所以该类机组在出厂时并不标定制冷剂的充注量，而是根据制冷侧机组样式及安装情况充注制冷剂，安装人员往往按照经验观察视镜中制冷剂状态来估计制冷剂充注量，且评价整个系统的优劣一般以系统的制冷量、能效比、输入功率等作为评价标准，因此会带来制冷剂充注量不足或充注量过多等影响机组性能的问题^[1]，亟待解决。研究人员对制冷剂充注量优化的问题进行了理论和试验上的许多研究，但仍存在一些不足。

目前制冷剂充注量的研究主要在于对充注量的标定和对机组性能的分析上，国内外的研究人员均进行了许多试验研究。在充注试验中，充注工质多为单元工质，如对热泵热水器充注 R290 的优化^[2]，没有对多元工质进行研究；充注试验如低温运输冰箱的制冷剂充注试验仅在单一工况下进行，没有考虑多点工况乃至全年性能分析研究^[3]；在对冷藏冷冻设备的性能分析研究中研究人员通过建立试验系统和模拟分析较为全面的对机组在高温太阳能制冷的应用时的性能进行了分析^[4]，但同时仅对热交换器进口流体温度和流量进行评价，仍存在评价方式较少的问题。

目前冷冻冷藏设备普遍使用的制冷剂主要是 R404A 和 R507A^[5-6]，然而随着欧洲含氟气体法的推出^[7]，R404A 和 R507A 也将逐年减少使用量直至淘汰。R407A 作为 R407 系列制冷剂，ODP 值为 0，GWP 值为 2107，低于 2150，在中温制冷系统中可作为 R404A 和 R507 制冷剂的中短期替代品^[8, 9]。R455A 是 A2L 制冷剂，相比碳氢具有更低的可燃性，其 GWP 值小于 150，是未来商业冷冻冷藏制冷剂研发的对象^[10]。由此可见，对于冷冻冷藏设备，非共沸混合制冷剂替代是未来的发展方向，他们均存在温度滑移的问题，且 R455A 更为显著^[11]，需要注意欠量充注。R404A 和 R407A 的物性参数见表 1 所示。

表 1 R404A、R407A 制冷剂物性参数

制冷剂	R404A	R407A
ODP	0	0
GWP	3750	2107
组分	R125/R143a /R134a	R32/R125/R134a
组分质量分数	44%/52%/4%	20%/40%/40%
可燃/毒性分类	A1	A1
临界温度/°C	72.1	82.0
临界压力/MPa	3.728	4.494
单位容积制冷量（中温）kW/m ³	2044.42	2315.22
单位容积制冷量（低温冷冻）kW/m ³	722.93	850.78
润滑油类型	POE	POE

因此，为了解决基于小型制冷设备非共沸制冷剂充注量的问题，本文提供了一种冷冻冷藏设备制冷剂充注量最优范围的确定方法。根据夏热冬冷地区的环境特性，从高温向低温选择四个工况对一台冷风机、风冷压缩冷凝机组冷冻冷藏设备实验机组进行制冷剂 R404A、R407A 充注和性能试验。用焓差法对其制冷量、能效比、输入功率等进行测试，最大制冷量所对应的制冷剂充注量与最大能效比所对应的制冷剂充注量初步构成了制冷剂充注量区间，在所得到的制冷剂充注量区间的基础上进一步的对制冷系统过热度、过冷度、排气温度进行测试，通过测试结果对制冷剂充注量的反馈修正所得到的充注量区间，得出最佳制冷剂充注量范围。通过高压储液器的自动调节，当环境温度达到每一工况时，使制冷器充注量达到相应的最佳范围，为同类型设备制冷剂充注量最优范围的确定提供了借鉴。

1 样机及其测试装置

试验样机装置如图 1 所示，主要由室内机和室外机组组成，包括压缩冷凝机组、冷风机、热力膨胀阀和之间的连接管道。压缩冷凝机组包括压缩机、冷凝器、高压储液器、干燥器和视镜等。由于该样机的部件是为 R404A 充注设计的，因此，本试验除了使用 R404A 制冷剂专用热力膨胀阀之外还并联了一个 R407 系列制冷剂专用热力膨胀阀，膨胀阀前后设置球阀。在进行充注试验时，通过控制膨胀阀前后球阀的通断

来实现 R407A 同 R404A 制冷剂的替换。相应的温度、压力测点分别设置在压缩机、冷凝器、膨胀阀、储液器和蒸发器进出口。

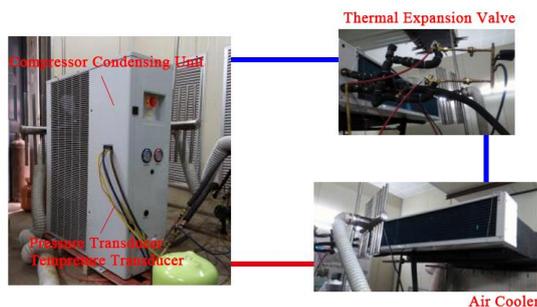


图 1 试验样机

本试验根据 GB/T 21363-2008 标准^[12]中的测试方法进行。本试验在焓差试验室中进行测试^[13]，试验室获国家压缩机制冷设备质量监督检验中心认证。测试装置包括室外测试环境间、室内测试环境间、冷风机-风冷压缩冷凝机组和相应的测量仪器。风冷压缩冷凝机组设置于室外侧测试间，冷风机设置于室内侧测试间。试验中主要采集的数据有温度、压力、风量和输入功率，试验设备的容量和精度符合国家标准，系统的重复性精度小于 2%。

2 充注试验及结果分析

2.1 试验工况

由于冷冻冷藏设备由压缩冷凝机组与冷风机组成，没有统一的试验工况，因此参考国家标准 GB/T 21363-2008、GB/T 25129-2010^[14]、欧盟能源标准^[15]以及夏热冬冷地区的环境温度，选取 4 种工况如表 2 所示。

表 2 试验工况

环境温度 (°C)	蒸发温度 (°C)*	吸气温度 (°C)
32		
25		
15	-7	/
5		

* 通过控制室内侧环境温度来实现蒸发温度

2.2 试验结果分析

以 32°C 工况下充注试验为例，从 0kg 开始对样机进行欠量充注，逐步增加，结果分析如下。

2.2.1 制冷剂充注量对制冷量、输入功率和能效比的影响

随着制冷剂 R404A 充注量的增加，输入功率先升高后基本保持不变，制冷量和能效比先升高后降低，见图 3。制冷剂充注量小于 5.0kg 时，制冷量和能效比均呈现快速增长的趋势，制冷量在充注量达到 5.5kg 时出现最大值，之后开始小幅下降。能效比在充注量达到 5.0kg 时最大，但之后急剧降低，且该转折点先于制冷量出现，虽然此时制冷量仍有小幅增加，但由于输入功率增大导致了能效比降低。虽然制冷量略有提升但运行状态开始下行^[16]。随着制冷剂充注量继续增加，制冷量和能效比均下降，且过热度已低至 20°C，不利于机组的正常运行。在最大制冷量与能效比范围内，机组能保证性能较好的同时以安全的状态运行，因此 R404A 的建议充注量范围为 5.0~5.5 kg。对于 R407A 制冷剂，制冷量、输入功率与能效比的变化规律与 R404A 相同，见图 2。对于 R407A 制冷剂，样机系统能效比与制冷量最高时对应的制冷剂充注量与 R404A 相同，建议充注量在 5.0~5.5kg 范围内。

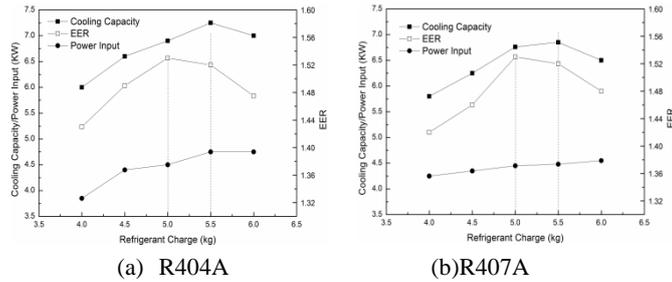


图2 能效比、制冷剂和输入功率随制冷剂充注的变化

2.2.2 制冷剂充注量对过热度 and 过冷度的影响

随着三种制冷剂充注量的增加，机组过热度逐渐降低，过冷度逐渐升高，见图3。开始充注时，由于制冷剂循环流量较小，过热度开始时处于较高数值，随着充注量的增加，过热度减小反应迅速，同时冷凝压力逐渐升高，过冷度也随之增大。随着循环流量增加有限，过热度与过冷度变化速度趋于缓慢。当充注量为5.00~5.50kg时，R404A过冷度在5~7℃之间，数值偏高，建议调整充注量范围至5.00~5.30kg；此时R407A过冷度在5~7℃范围内，建议调整充注量范围至5.00~5.20kg。

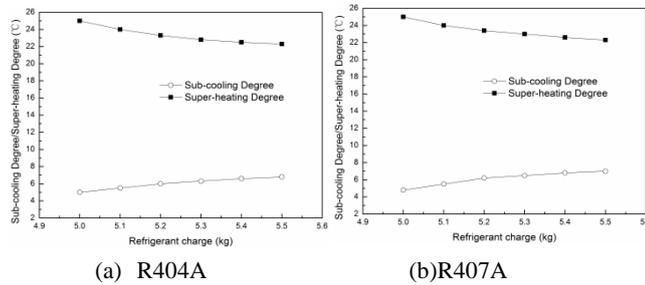


图3 过冷度、过热度随制冷剂充注的变化

2.2.2 制冷剂充注量对排气温度的影响

随着三种制冷剂充注量的增加，机组的排气温度均呈下降趋势，见图4。开始充注时，由于机组循环流量不足，排气温度处于较高数值。随着充注量增加，循环流量增加，吸气温度下降较快，而压比变化不大，排气温度也下降较快。随着充注量逐渐增大，排气温度下降放缓。当蒸发器出口达到饱和气液两相状态时，排气温度将基本保持不变。当充注量达到5.00~5.30kg时，R404A压缩机排气温度在87~89℃范围内，不利于机组安全运行，调整充注范围至5.00~5.35kg。当R407A充注量达到5.00~5.20kg时，排气温度在97~98.5℃范围内，高于R404A压缩机排气温度，不利于机组安全运行，可以适当增大制冷剂的充注量，调整制冷剂的建议充注范围为5.00~5.25kg。

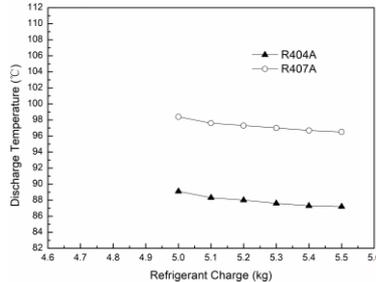


图4 排气温度随制冷剂充注的变化

通过以上各个阶段的测试与修正，最终确定32℃工况下制冷剂R404A、R407A的最佳充注范围分别为5.00~5.30kg、5.00~5.25kg。因另外三种工况25℃、15℃、5℃时制冷剂充注量的确定方法与32℃时所用方法完全一样，不再进行重复叙述，最终确定的充注范围结果见表3。考虑全年环境温度工况对机组进行全年性能评价，通过计算不同工况下的时间占比^[17]得到全年最佳制冷剂充注量，如公式1所示。

基金项目：江苏省教育厅高校自然科学基金(15KJD470001)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0370)

作者简介：胡昕昊（1995-），女，硕士研究生

$$X_i = \frac{T_i}{\sum_i^n T_i} \quad (1)$$

X_i =各工况下运行时间占全年运行时间百分比； T_i =各工况下运行时间(h)。

$$ARC = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot RC_i) = \sum_{i=1}^4 (X_i \cdot RC_i) = X_1 \cdot RC_1 + X_2 \cdot RC_2 + X_3 \cdot RC_3 + X_4 \cdot RC_4 \quad (2)$$

ARC=全年制冷剂最佳充注量(kg)； RC_i =各工况下最佳制冷剂充注量(kg)。

因此，R404A 和 R407A 全年最佳制冷剂充注范围为 5.21~5.57 kg 和 5.31~5.57 kg。由于各工况下制冷剂充注量不同，储液器内制冷剂质量调节范围由全年充注量范围下限之差和上限之差确定，如表 3 所示。

表 3 R404A 和 R407A 最佳充注范围

环境温度(°C)	制冷剂充注量(kg)		全年最佳充注量(kg)		储液器内制冷剂质量(kg)	
	R404A	R407A	R404A	R407A	R404A	R407A
32	5.00~5.35	5.00~5.25				
25	5.17~5.52	5.16~5.42	5.21~5.57	5.31~5.57	0.34~0.36	0.61~0.64
15	5.30~5.67	5.38~5.65				
5	5.34~5.71	5.61~5.89				

3 结论

本文通过充注试验测试能效比、制冷量、输入功率等性能参数，并根据过冷度、过热度、排气温度等性能参数的反馈确定制冷剂最佳充注范围，根据夏热冬冷地区环境温度特点，从高温工况到低温工况对试验机组分别进行制冷剂 R404A 和 R407A 充注试验，获得了基于全年性能评价的冷冻冷藏设备最佳制冷剂充注量的确定方法并确定了储液器内的制冷剂质量范围。

(1) 通过全年性能分析确定最佳制冷剂充注范围及储液器内制冷剂质量的方法是可行且有效的。

(2) 通过本文提出的方法确定的制冷剂充注推荐值能保证较高的能效比、制冷量，可靠的过热度和过冷度，能很好地兼顾机组性能和运行安全。

参考文献

- [1] Koronaki I P, Cowan D, Maidment G, et al. Refrigerant emissions and leakage prevention across Europe - Results from the RealSkillsEurope project[J]. Energy, 2012, 45(1):71-80.
- [2] Ghouali R, Byrne P, Bazantay F. Refrigerant charge optimisation for propane heat pump water heaters[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 76:230-244.
- [3] Vaitkus, L, and V Dagilis. Refrigerant charge reduction in low-temperature transport refrigerator with the eutectic plate evaporator[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 47:46-57.
- [4] Cheng X, Zhai X, Wang R. Thermal performance analysis of a packed bed cold storage unit using composite PCM capsules for high temperature solar cooling application[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100:247-255.
- [5] Arora A, Kaushik S C. Theoretical analysis of a vapour compression refrigeration system with R502, R404A and R507A[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6):998-1005.
- [6] Bortolini M, Gamberi M, Gamberini R, et al. Retrofitting of R404a commercial refrigeration systems using R410a and R407f refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 55:142-152.
- [7] Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing regulation (EC) no 842/2006. Off. J. Eur. Union, 2014.
- [8] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Ángel Barragón, et al. Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44(16):81-90.
- [9] Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants—A review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(1):108-119.
- [10] Mota-Babiloni A, Makhnatch P, Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic

基金项目：江苏省教育厅高校自然科学基金(15KJD470001)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0370)

作者简介：胡昕昊（1995-），女，硕士研究生

- alternatives: focus on energetic performance and environmental impact[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 82:288-301.
- [11] Liu Q, Duan Y, Yang Z. Effect of condensation temperature glide on the performance of organic Rankine cycles with zeotropic mixture working fluids[J]. *Applied Energy*, 2014, 115(4):394-404.
- [12] GB/T21363-2008 容积式制冷压缩冷凝机组[S]. 中国标准出版社, 2008.
- [13] Huang H, Li Q H, Yuan D X, et al. An experimental study on variable air volume operation of ducted air-conditioning with digital scroll compressor and conventional scroll compressor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(7): 761-766.
- [14] GB/T 25129-2010 制冷用空气冷却器[S]. 中国标准出版社, 2010.
- [15] Commission Regulation (EU) 2015/1095 of 5 May 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for professional refrigerated storage cabinets, condensing units and process chillers. Eur. Union, 2015.
- [16] 张忠斌, 杜垲, 黄虎,等. 制冷剂充注量对微通道蒸发器房间空调器性能影响的试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(3):567-572.
- [17] 国家气象信息数据中心. 中国建筑热环境分析气象数据[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.