

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.016

基于 R404A 的圆形冷凝器小管径化实验研究

胡良玉¹, 柳建华^{1,2}, 张 良¹, 宋 吉³

- (1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;
3. 国际铜业协会(中国), 上海 200020)

摘 要:针对当前冷藏集装箱制冷系统中冷凝器换热效率低、耗铜量大及成本高等问题,为某冷藏车设计了管径为 5.00 mm 的内螺纹铜管换热器,用于替代原管径 9.52 mm 圆形冷凝器。根据 R404A 制冷剂在小管径中的传热特性及其热力状态的变化,设计了替代换热器并做了优化流路设计;通过对 5.00 mm 小管径换热器样件与原冷凝器进行多个蒸发温度工况下的整机测试对比试验,检验设计的合理性。结果表明:小管径换热器耗电量有所增加,大、小管径换热器的整机制冷量偏差在 10% 以内,制冷性能系数偏差在 6% 以内;新的小管径圆形换热器耗铜量减少了 37.7%。

关 键 词:圆形冷凝器;内螺纹管换热器;换热效率;耗铜量;R404A 制冷剂

中图分类号:TK124 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)03-0085-04

Experimental Study on Small Tube Diameter of Circular Condenser Based on R404A

HU Liangyu¹, LIU Jianhua^{1,2}, ZHANG Liang¹, SONG Ji³

- (1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Shanghai Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. International Copper Association (China), Shanghai 200020, China)

Abstract: Aiming at the problems of low heat exchange efficiency, high consumption of copper and high cost of condensers in the refrigerating system of refrigerated container, specially designed a inner threaded copper tube heat exchanger with 5.00 mm diameter for a refrigerated truck, which was used to replace 9.52 mm diameter circular condenser. According to the change of heat transfer and thermal state of R404A refrigerant in small diameter, designed a heat exchanger to replace and optimized the design of flow path; compared the test under the conditions of multiple evaporation temperature based on 5.00 mm small diameter heat exchanger sample and original condenser, tested the rationality of the design. The results show that the power consumption of small diameter heat exchanger increases. The cooling capacity deviation of large and small diameter heat exchangers is less than 10% and the coefficient deviation of refrigeration performance is less than 6%. The consumption of copper in new small diameter circular heat exchanger is reduced by 37.7%.

Keywords: circular condenser; inner spiral tube heat exchanger; heat exchange efficiency; copper consumption; R404A refrigerant

降低制冷系统中换热器的耗铜量一直是各空调企业减少成本的方向^[1]。小管径换热器的核心是在传统的铜管铝翅片换热器中采用小管径高效内螺纹铜管

替代原有管径较大的铜管,并对翅片和流路进行优化设计,从而提高换热器的换热效率^[2-3]。高屹峰等采用 5.00 mm 铜管来替代原有换热器中的 9.52 mm 铜管,

收稿日期:2017-12-28;修回日期:2018-02-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA05Z211);上海市科委建设项目(13DZ2260900)。

第一作者简介:胡良玉(1993),男,安徽芜湖人,硕士,主要研究方向为制冷与低温工程、汽车空调。E-mail:903783883@qq.com

通过流路优化及调节膨胀阀的开度,达到了原有机组相同的性能^[4]。当前在小管径研究方面有很多针对单管或螺旋管的数值模拟和实验研究^[5-9]。针对不同的制冷剂也有很多相关传热与压降关联式的研究^[10-13]。但是却少有换热器整体替换的研究,对于圆形换热器的替换研究更少,而对换热器整体小管径化,以获得经济效益、提高生产力是进行研究的最终目的。课题组在前人研究的基础上,设计了一款小管径圆形冷凝器用来替代9.52 mm冷凝器,并对制作出的样件做了整机测试,实验印证了理论研究的结论,也为小管径换热器的推广提供了参考。

1 圆形冷凝器的结构

1.1 原9.52 mm管径冷藏集装箱冷凝器

如图1所示为冷藏集装箱冷凝器的模型,该9.52 mm圆形冷凝器为立式换热器。换热器的工作原理:①换热器制冷剂由1个进气管进入后被分为5股均匀流,通过5个通路进行初步换热,每个通路换热管圈数为4圈;②制冷剂汇合在一起,被均分为3股均匀流通过3个通路继续进行换热,每个通路经过2圈换热管;③3个分路的制冷剂又汇合在一起,被均分为2股均匀流通过2个通路进行再一次换热,每个通路为2圈换热管,最后制冷剂汇合在一起由1根总的出液管引出。换热器流路具体如图2所示。换热器进气管和出液管布置在同一侧。换热器换热管有3层,共有30圈换热管,各层均为10圈。换热管分内、中、外3层,内圈圆管中心线所成圆直径 d_i 为588 mm,中圈圆管中心线所成圆直径 d_m 为640 mm,外圈圆管中心线所成圆直径 d_o 为691 mm。所用铜管为光管,铜管外径为9.52 mm,壁厚0.43 mm,翅片上孔径为9.52 mm,竖直方向上下相邻两管间距 S_1 为24 mm,水平方向相邻两管间距 S_2 为25.78 mm、翅片厚度 δ_f 为0.18 mm,片距 S_f 为2.0 mm。



图1 冷藏集装箱冷凝器模型

Figure 1 Condenser model of refrigerator container

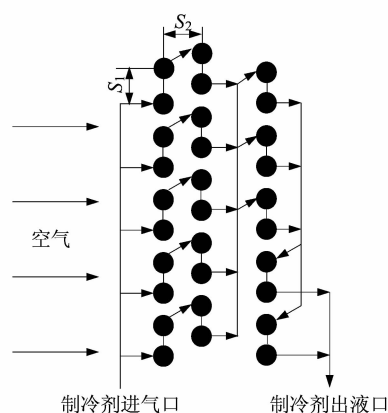


图2 原9.52 mm管径冷凝器流路示意图

Figure 2 Flow schematic diagram of 9.52 mm tube condenser

1.2 5.00 mm管径冷藏集装箱冷凝器

各蒸发温度下,5.00 mm管径冷凝器机组制冷量需要达到9.52 mm管径冷凝器机组的制冷量,并且冷凝器在环境温度为38℃时,机组能长时间正常运行。采用的5.00 mm管径铜管为内螺纹铜管,依据设计原则,分路数随着冷凝过程的进行依次减少。制冷剂气体进入冷凝器后先分为7个通路,每个通路的制冷剂流过4圈;汇合后再分为5个通路,每个通路制冷剂流过2圈换热管;然后制冷剂汇合后分为2个通路,每个通路制冷剂流过2圈换热管;最后汇合由一根出液管流出。具体流路如图3所示,翅片参数与原换热器相同。

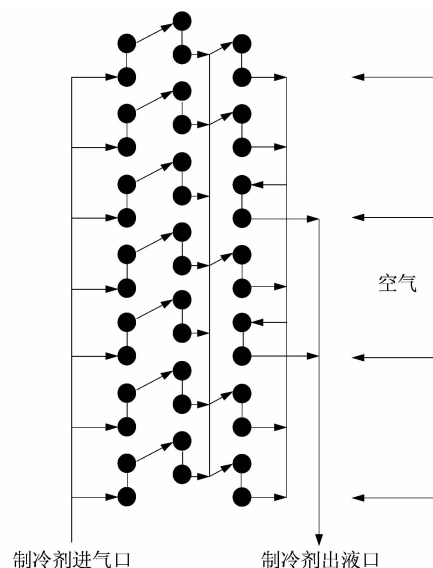


图3 5.00 mm冷凝器流路示意图

Figure 3 Flow schematic diagram of 5.00 mm tube condenser

2 实验过程

2.1 实验装置

实验台主要包括 2 个部分:第 1 部分为一个大环境室,可容纳一个冷藏集装箱,环境室的温度、湿度等参数由独立的空气调节机组控制;第 2 部分为冷藏集装箱,可以分成冷藏集装箱内部和制冷机组 2 个部分:冷藏集装箱内部即为货物运输时的储物室,制冷机组各部件中除了蒸发器设置在冷藏箱内部,其它部分均暴露在 38 ℃ 的环境室内。

冷藏箱内部换热器的测试分 5 个制冷工况进行,在不同蒸发温度下测试其机组整体性能的变化。通过两款换热器运行参数的对比,验证小管径换热器与机组其它部件的匹配性。冷藏集装箱制冷机组的主要设备有压缩机、冷凝器、蒸发器、热力膨胀阀、干燥过滤器、视液镜、电磁阀、高效过冷器、热气旁通阀和各类电磁阀等。电磁阀的存在主要为了便于机组制冷、制热和除霜模式之间的切换;热气旁通阀是为了防止压缩机吸气压力过低。具体测试装置原理如图 4 所示。实验中的压缩机采用涡旋压缩机定频运行。

冷藏集装箱的外界环境温度为 38 ℃,即冷凝器的环境温度为 38 ℃,环境参数由环境室的空气调节系统进行控制。蒸发器设置在集装箱箱体内部,通过改变箱体内部的热负荷来控制蒸发温度,箱内的热负荷由电加热器提供。测试时关闭除霜功能、热气旁通阀和过冷过程,以防止其不定时除霜影响测试结果。用流量计测得机组循环制冷剂流量,蒸发器的进出口温度和压力分别由铂电阻和压力传感器测得。压缩机的耗电量由功率仪测得。其它参数由相应传感器测得,并用

LabVIEW 实时采集并记录。

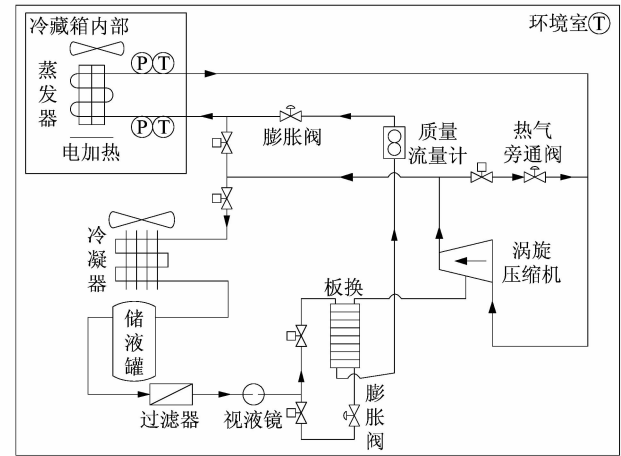


图 4 测试装置原理图

Figure 4 Test device schematic diagram

2.2 测试方法

改变冷藏集装箱内热负荷来调整蒸发温度,机组平稳运行后采集数据,蒸发温度越高,冷藏箱内热负荷越大。通过测得测试装置平稳运行时的相关参数,采用焓差法求得机组的制冷量。即通过蒸发器进口压力 P_1 和温度 T_1 、出口压力 P_2 和温度 T_2 查得相应的焓值,求出焓差,再乘以蒸发器的制冷剂流量 q_m ,求得制冷量。耗电量由电能表测量并实时采集到计算机上。依次进行在不同工况下两款换热器的整机试验。

3 实验结果与分析

机组在冷藏集装箱额定工况运行时,测出的制冷量与总的耗电量如表 1 所示。

表 1 各工况下实验数据

Table 1 Experimental data under various working conditions

实验号	管径/mm	蒸发温度/℃	环境温度/℃	压缩机电压/V	压缩机频率/Hz	试验结果					
						制冷量/kW	制冷量占比	耗电量/kW	耗电量占比	制冷系数	制冷系数占比
1	9.52	21	37.8	380	50	13.47	1.00	9.20	1.00	1.464	1.00
2	9.52	2	37.8	380	50	10.54	1.00	8.70	1.00	1.211	1.00
3	9.52	-18	37.8	380	50	6.24	1.00	6.20	1.00	1.005	1.00
4	9.52	-29	37.8	380	50	4.22	1.00	5.40	1.00	0.781	1.00
5	9.52	-35	37.8	380	50	3.51	1.00	5.00	1.00	0.703	1.00
6	5.00	21	37.8	380	50	12.23	0.91	8.92	0.97	1.393	0.94
7	5.00	2	37.8	380	50	10.48	0.99	8.85	1.02	1.150	0.95
8	5.00	-18	37.8	380	50	6.09	0.98	6.21	1.00	0.980	0.97
9	5.00	-29	37.8	380	50	4.12	0.98	5.45	1.01	0.760	0.97
10	5.00	-35	37.8	380	50	3.50	1.00	4.98	1.00	0.700	1.00

由表 1 可知,随着蒸发温度的降低制冷量和耗功逐渐减少。

图 5 所示为 5 个蒸发温度下,2 种换热器制冷量

的偏差。由图 5 可以看出大、小管径换热器的制冷量基本一致,在实验的工况下,5.00 mm 管径换热器相对于 9.52 mm 换热器存在 9% 左右的负偏差。满足换热

器替换的需求。在耗电方面,随着制冷量的减少耗电量逐渐减少,这是因为蒸发温度的降低,导致制冷剂质量流量的减少,虽然比功有所增大,但是总的耗电量还是在减少。

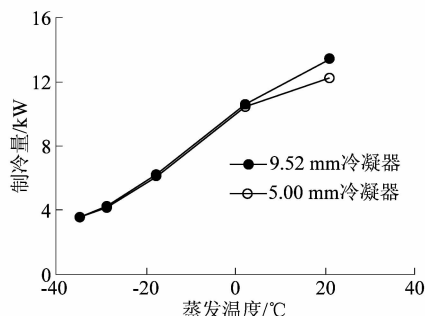


图5 5个蒸发温度下大、小管径换热器制冷量

Figure 5 Cooling capacity of large and small tube heat exchangers under five evaporation temperatures

图6所示为大、小管径换热器制冷系数对比情况,图中换热器的制冷系数随蒸发温度的降低而逐渐减小;小管径换热器的制冷系数随着蒸发温度的降低,相对于大管径换热器降低的更多。这是由于蒸发温度升高时,制冷剂流量增大,从而导致冷凝器压降增大。而小管径换热器的压降对流量的变化更为敏感,从而压缩机耗功增大,出现蒸发温度越高,小管径换热器制冷系数和大管径换热器制冷系数偏离越远的现象。由于小管径换热器进行了流路优化,流动阻力并不会随制冷剂流量的增大而增大特别多,因而耗功的增大在比较小的范围内,制冷系数的最大偏离量仅有6%。上述实验结果表明小管径的流路设计比较合理。

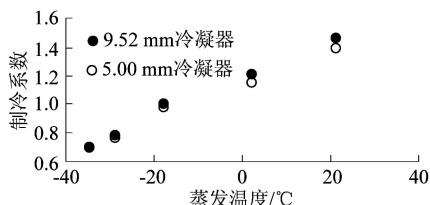


图6 大、小管径换热器制冷系数

Figure 6 Refrigeration performance coefficient of large and small tube heat exchangers

4 结论

1) 5.00 mm 管径冷凝器换热性能相对于 9.52 mm 管径冷凝器整体略有下降,基本满足机组冷凝器替换需求。虽然 5.00 mm 管径冷凝器换热管总长更长,但是由于其单位面积换热量更大,铜管管壁更薄,所以换热器整体耗铜量仍然大幅下降。

2) 根据 R404A 制冷剂的传热特性、换热器设计原则(如制冷剂逆流、均衡各通路流量等)可进行新的小管径换热器的优化设计。

3) 由于冷凝器管径减小,在蒸发温度较高时,压降增大,小管径换热器相对于原来的 9.52 mm 铜管来说,耗电量会有少量的增加,制冷性能系数因而有所降低。

4) 大、小管径换热器的整机制冷量偏差在 10% 以内,制冷系数偏差在 6% 以内。

5) 新的 5.00 mm 管径圆形冷凝器很好地满足了替换需求,可以为企业节省大量开支。同时也为大管径换热器替换成小管径换热器这一设想的实现提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨文燕,屈治国,皮秀平,等. 5 mm 小管径冷凝器替代可行性分析[C]//中国工程热物理学会. 中国工程热物理学会 2008 年传热传质学学术会议. 郑州:中国工程热物理学会,2008.
- [2] 张智,黎顺全,徐志亮. 冷凝器流程布置方式对性能的影响分析[J]. 电器,2013(增刊1):411-414.
- [3] 张智,金培耕,刘志刚,等. 不同管径组合的冷凝器换热数值研究[J]. 热科学与技术,2002,1(2):104-108.
- [4] 高屹峰,宋吉,任滔,等. 5 mm 铜管替代 7 mm 铜管窗式空调器的优化设计[J]. 家电科技,2010(8):76-78.
- [5] 谢英柏,刘春涛,论立勇,等. 水平光管内 R134a 过热蒸气凝结换热实验研究[C]//中国工程热物理学会. 工程热力学与能源利用学术会议. 绍兴:中国工程热物理学会,2007.
- [6] 韩吉田, LIN C X, EBADIAN M A. 具有蒸气过热的 R-134a 在螺旋管内凝结换热的实验研究[J]. 制冷学报,2005,26(3):6-11.
- [7] 朱立珺,柳建华,赵永杰,等. 冷藏集装箱小管径冷凝传热关联式适用性研究[J]. 能源工程,2017(2):14-18.
- [8] HUANG X, DING G, HU H, et al. Flow condensation pressure drop characteristics of R410A-oil mixture inside small diameter horizontal microfin tubes[J]. International journal of refrigeration, 2010, 33(7):1356-1369.
- [9] YU J, KOYAMA S. Condensation heat transfer of pure refrigerants in microfin tubes[J]. British journal of haematology, 1998, 139(1):281-288.
- [10] 崔文智,辛明道. 三维微肋螺旋管内 R134a 沸腾环状流区的传热与关联式[J]. 热科学与技术,2003,2(3):226-229.
- [11] 王学东,柳建华,宋吉,等. R404A 小管径冷凝换热与压降关联式的适配性[J]. 制冷学报,2017,38(2):22-28.
- [12] SCHLAGER L M, PATE M B, BERGLES A E. Heat transfer and pressure drop during evaporation and condensation of R22 in horizontal micro-fin tubes[J]. International journal of refrigeration, 1989, 12(1):6-14.
- [13] ECKELS S J, DOERR T M, PATE M B. Comparison of the heat transfer and pressure drop performance of R-134a-lubricant mixtures in different diameter smooth tubes and micro-fin tubes[J]. Ashrae transactions, 1998, 104:376-386.