

毛细管对冷柜系统的性能影响

刘青山¹, 丁剑波², 李靖², 李大伟², 刘迎文¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

(2. 青岛海尔特种电冰柜有限公司, 山东 青岛 266003)

(Tel: 029-82668727, Email: ywliu@xjtu.edu.cn)

摘要: 家用冷柜系统以蒸气压缩式制冷循环为工作原理, 其毛细管起着节流降压和流量调节的作用, 对于制冷系统制冷量和 COP 具有重要影响。本文基于电冰箱/冰柜性能测试新国标方法, 开展了微通道扁管冷凝器冷柜系统热力特性的实验研究, 完成了 16/32℃ 双环温下冷柜系统的能耗对比实验, 分析了毛细管规格对制冷系统最佳灌注量和能耗水平的影响关系。研究发现: 随着毛细管标称流量的逐渐增大, 系统最佳灌注量降低了 10.2%~18.6%, 能耗变化规律则因环境温度不同而有所差异: 在 32℃ 环温下, 系统耗电量先增加后减小, 16℃ 环温下则相反。

关键词: 毛细管, 性能, 冷柜, 环境温度

THE INFLUENCE OF CAPILLARY TUBES ON FREEZER SYSTEM

Liu Qingshan¹, Ding Jianbo², Li Jing², Li Dawei², Liu Yingwen¹

(School of energy and power engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

(Qingdao Haier special electric refrigerator Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266003)

Abstract The capillary tube in a domestic freezer system, which based on the vapor compression refrigeration cycle, plays the role of throttling and regulating the flow rate of the system. It has an important influence on the cooling capacity and COP of the refrigeration system. Based on the latest national standard test method of performance for refrigerators/freezers, the comparative experimental study on the thermal characteristics of freezer system with micro-channel flat-tube condenser was carried out at ambient temperature of 16℃ and 32℃, respectively. And the influence of capillary tube with different nominal flow rate on the optimal refrigerant charge and the energy consumption was studied. The result shows that the optimal refrigerant charge of the system decreased by 10.2%~18.6% with the increase of nominal capillary flow rate, and the variation of energy consumption was different due to different ambient temperature. The power consumption at the ambient temperature of 32℃, increases firstly and then decreases, and the trend is opposite at the ambient temperature of 16℃.

Keywords Capillary tube Performance Freezer system Ambient temperature

0 前言

随着社会经济的快速发展, 冷柜在冷饮速冻、冷链物流等行业的应用越来越广泛, 我国社会对冷柜的年需求量呈逐年上升趋势^[1]。冷柜市场的巨大需求促使了冷柜行业的蓬勃发展, 但是在“绿色低碳”发展的大背景下, 冷柜系统全天候运行的特点使得各个国家及地区对上市冷柜产品纷纷提出了高能效的要求, 发展冷柜节能减排技术具有巨大的经济效益和重要的工程意义^[2]。

目前家用冷柜系统以蒸气压缩式制冷循环为工作原理, 其节流装置---毛细管, 起着节流降压和蒸发器流量调节的作用, 对于冷柜系统的制冷量和 COP 具有重要影响。Yoon 等^[3]对采用冷藏/冷冻蒸发器并联循环的电冰箱进行了研究, 分析了制冷剂充灌量、毛细管规格对循环性能的影响关系, 通过毛细管的优化设

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51576150)

作者简介: 刘青山, (1993-), 男, 硕士研究生。

计以及灌注量匹配实验实现了 7.8 % 的节能效果。Björk 等^[4]基于一种带有回热循环的冷柜系统开展了一系列实验研究，获得了膨胀装置调节能力、充灌量以及环境温度对系统能耗的影响规律。

本文基于新国标测试方法，开展了微通道扁管冷凝器冷柜系统热力特性的实验研究，完成了 16/32 °C 双环温下冷柜系统的能耗对比实验，分析了毛细管形式对制冷系统最佳灌注量和能耗水平的影响关系。

1 实验系统及方法

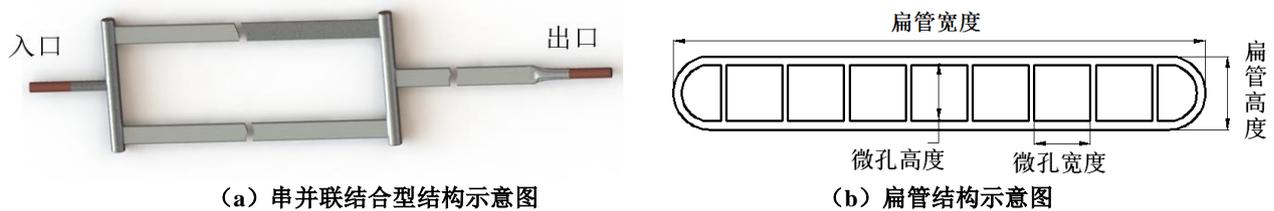
本文采用的实验样机为海尔集团生产的某型号冷柜，测试环境为恒温恒湿实验室，其环境温度控制范围为 10 °C~43 °C，试验期间其环境温度保持在设定温度的±0.5 K 以内。

该冷柜冷冻能力较大，冷库内最大下拉温度可达-32 °C，通过循环控制可以实现冷藏、微冻、冷冻和速冻等四种温区的快速切换，样机如下图 1-1 所示。



图 1-1 试验样机

该系统蒸发器为钢质箱壁式换热器，结构为圆形光管；并采用微通道扁管换热器作为冷凝器，为串并联结合型结构。如图 1-2 所示，冷凝器前半部分为双流程并联结构，后半部分为单流程串联结构，并采用柱状结构衔接前后两部分；冷凝器进出口均为铜质圆管结构，便于实现与连接管件间的焊接工艺。圆管及扁管结构尺寸如表 1-1 所示。



(a) 串并联结合型结构示意图

(b) 扁管结构示意图

图 1-2 微通道扁管换热器结构示意图

表 1-1 圆管/扁管尺寸对比

		圆管					
Φ4*0.5	高/mm	宽/mm	半径/mm	/	截面积/mm ²		
	/	/	1.5	/	7.065		
		扁管					
	高/mm	宽/mm	半径/mm	孔数	截面积/mm ²		
两侧	0.9	0.75	0.45	2	1.176	6.579	
中间	0.9	0.667	/	9	5.403		

本文通过选用不同长度及内径的毛细管，分别开展了冷柜系统在三种标称流量毛细管下的能耗实验，标称流量分别是 5.0 L/min、8.4 L/min 和 10.0 L/min。

2 结果与讨论

针对不同毛细管规格的微通道冷凝器样机，均按照“先灌注量测试，后耗电量测试”的实验模式分别

进行性能测试。首先在 32 °C 环温下开展灌注量匹配实验，采用排水法逐次放空制冷剂以获得最佳匹配值。

根据最佳灌注量判断方法：当系统内制冷剂处于过度充灌状态时，蒸发器出口温度将低于蒸发器入口温度，反之则说明系统制冷剂不足。最佳灌注量出现在蒸发器温度交叉点之前区域所对应的制冷剂充灌值。结合图 2-1 知，三种毛细管规格所对应冷柜系统的最佳灌注量分别为 59 g（5 L/min），53 g（8.4 L/min）和 48 g（10 L/min）。

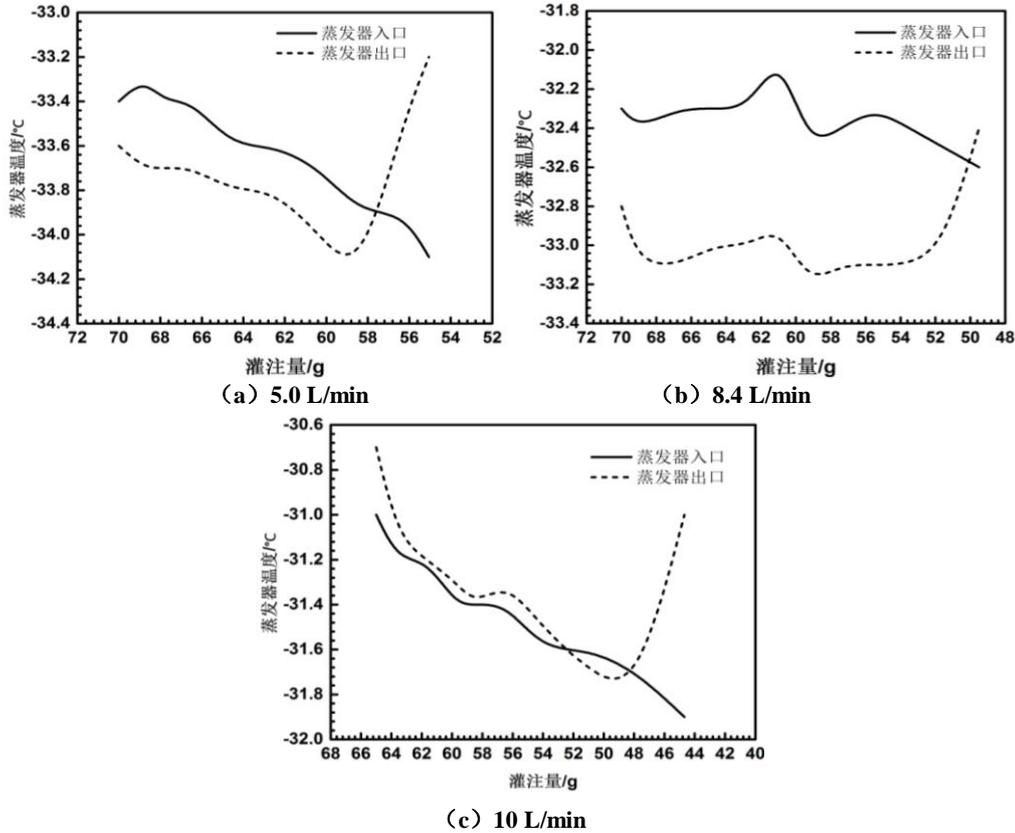


图 2-1 微通道冷凝器样机蒸发器温度变化曲线

接下来对不同毛细管规格冷柜样机进行重新抽空灌注，采用最佳灌注量分别开展 32/16 °C 环境温度下的开停机耗电量测试，冷库内工作温度设定为-18 °C。不同毛细管规格的冷柜耗电量测试结果如表 2-1 所示。表中综合耗电量计算方法如下：

$$E_{\text{total}} = f\{E_{\text{daily}-16^{\circ}\text{C}}, E_{\text{daily}-32^{\circ}\text{C}}\}$$

$$= \frac{E_{\text{daily}-16^{\circ}\text{C}} \times 192 + E_{\text{daily}-32^{\circ}\text{C}} \times 173}{365} \quad (2-1)$$

表 2-1 耗电量结果对比

	毛细管 标称流量 (L/min)	灌注量 (g)	环温 (°C)		综合耗电量 (kW h/d)
			32	16	
	10.0	48	0.7444	0.3869	0.5563
	8.4	53	0.7474	0.3881	0.5584
	5.0	59	0.7367	0.3956	0.5573

由表可知，由于毛细管的标称流量调节范围较小，因此其对系统耗电量影响较小，32 °C 环温下耗电量变化幅度为 1.45%，16 °C 环温下耗电量变化幅度为 2.24%，可进一步通过加大毛细管标称流量调节范围以增强系统各部件间的匹配程度，改善能耗。

如图 2-2 所示，通过最佳灌注量对比可以发现：随着毛细管标称流量的增大，冷柜系统的最佳灌注量逐渐减小，降幅为 10.2%~18.6%。由于本系统采用微通道扁管换热器作为冷凝器，其结构特性使得冷凝器不可避免地存在制冷剂富集的问题，而毛细管的流量调节作用对其具有削弱效果。当毛细管流量增大时，

冷凝器中制冷剂向蒸发器中迁移的阻力变小，使得蒸发器中存贮的制冷剂相对增多，从而削弱微通道冷凝器“制冷剂富集”现象，最终导致系统的灌注量降低。

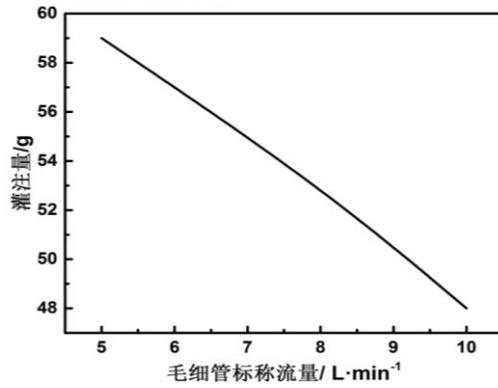


图 2-2 灌注量与毛细管标称流量变化关系曲线

如图 2-3 所示为冷柜系统单环境温度下（32/16 °C）耗电量与毛细管标称流量间的关系曲线。由图可知，通过耗电量随毛细管标称流量的变化曲线可以发现：在毛细管标称流量调节过程中，随着毛细管标称流量的不断增大，单环温下耗电量存在一个极值。特别地，对于 32 °C 环温，其耗电量先增加后减小，存在极大值；对于 16 °C 环温，其耗电量先减小后增大（由于标称流量调节范围有限，后续上升过程未能完全体现），与 32 °C 环温变化规律相反。

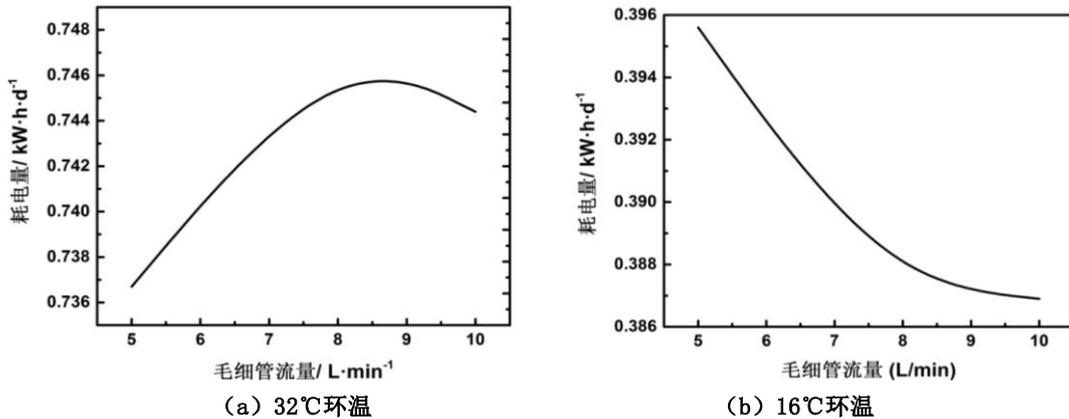


图 2-3 耗电量与毛细管标称流量变化关系曲线

接下来分析其原因。冷柜系统耗电量主要来源为压缩机耗功，而压缩机耗功取决于其工作压力比和质量流量。对于 32 °C 环温，随着毛细管标称流量增大，系统稳定运行时流量增大，而压比变化较小，因此流量占主导因素，导致压缩机功率变高，耗电量增加；当毛细管标称流量增大到一定程度后，系统压比减小且主导功率变化，因此耗电量水平逐渐降低。

对于 16 °C 环温，由于冷凝器侧换热条件发生变化，冷柜内制冷剂的分佈特性以及启停迁移特性发生较大变化，从而造成系统性能相比 32 °C 环温有所差异。表 2-2 为 32/16 °C 环温下冷柜系统温度对比情况。

表 2-2 32/16 °C 环温下系统温度参数对比结果

	环境温度/°C					
	32		16			
毛细管规格/L min ⁻¹	10	8.4	5	10	8.4	5
灌注量/g	48	53	59	48	53	59
排气管/°C	66.3	66.4	64.3	42.3	42.1	39.8
干燥过滤器/°C	43.9	45.2	44.8	28.2	28.1	25.6
回气管/°C	28.3	28.4	26.3	14.3	13.3	12.4
蒸发器入口/°C	-22.6	-22.3	-22.0	-22.8	-22.5	-22.8
蒸发器出口/°C	-22.0	-23.4	-22.1	-17.3	-19.1	-19.7
开机时间/min	6.46	5.45	5.20	4.02	3.74	3.74
停机时间/min	8.82	7.75	7.69	13.62	12.36	11.97

运行率	42.28 %	41.25 %	40.35 %	22.79%	23.21%	23.83%
平均功率/W	75.36	74.32	76.03	68.27	66.82	71.41

由表可知，环境温度降低，冷凝温度下降，进而导致排气管、干燥过滤器等高压侧温度均降低，而系统低压侧温度变化较小，因此系统压比减小，使得蒸发器因迁移较弱而出现制冷剂不足的问题，从而恶化蒸发器性能。如表 2-3 所示，环境温度由 32 °C 变为 16 °C 时，蒸发器内过热水平明显变大。另一方面，较大的毛细管流量将增加蒸发器内制冷剂驻留量，削弱因冷凝温度下降而导致的蒸发器冷媒不足的问题，因此随着毛细管流量的不断增加，蒸发器表现出较好的换热性能，降低了 16 °C 单环温下的耗电水平。当毛细管流量增大到一定程度后，制冷系统两器的制冷剂分布严重失衡，系统性能变差，能耗偏高。

表 2-3 32/16 °C 环温下蒸发器过热度对比

	毛细管规格/L · min ⁻¹		
	10	8.4	5
32 °C 环温	0.6	-1.1	-0.1
16 °C 环温	5.5	3.4	3.1

32/16 °C 环温下的综合耗电量与毛细管标称流量间的变化规律如图 2-4 所示。

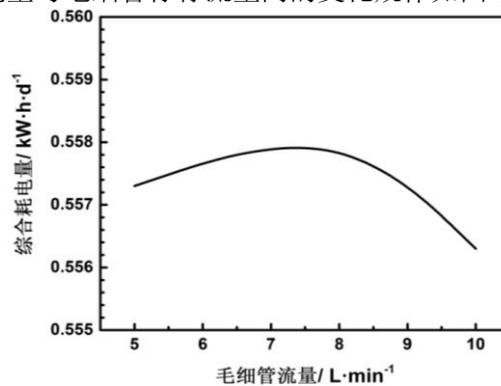


图 2-4 综合耗电量与毛细管标称流量关系曲线

可以发现：随着毛细管流量的不断增大，制冷系统的综合耗电表现为“先增加后减小”的变化趋势，与 32 °C 环温能耗变化规律一致。这表明高环温下的耗电水平对系统整体性能起主导作用。由于综合耗电量计算方法中 32/16 °C 单环温耗电量的权重并非 1:1，因此综合耗电量极值所对应的毛细管流量与单环温不同。

3 结论

本文基于新国标的双环境温度测试要求，在 16/32 °C 双环温下分别开展了微通道扁管冷凝器冷柜系统热力特性的实验研究。通过对比实验获得了毛细管标称流量对系统灌注量和能耗的影响规律：随着毛细管标称流量的逐渐增大，制冷系统两器内制冷剂的分布特性发生变化，系统最佳灌注量降低了 10.2 %~18.6 %，能耗变化规律因环境温度不同而有所差异：在 32 °C 环温下，系统耗电量先增加后减小，16 °C 环温下则相反。32/16 °C 环温下综合耗电量变化规律表明：高环温下的耗电量水平对系统整体性能起主导作用。

参考文献

- [1] 佚名. 2017年12月冷柜行业市场简析[J]. 环球聚氨酯, 2018(02): 32-33.
- [2] 李云美. 《家用电冰箱耗电量限定值及能源效率等级》新标准解读[J]. 家用电器, 2008(03):4-5.
- [3] Yoon WJ, Jung HW, Chung HJ, et al. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 216-224.
- [4] Björk E, Palm B. Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device

capacity, refrigerant charge and ambient temperature[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(5): 789-798.