

文章编号: 0253-4339(2017)03-0043-07

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2017.03.043

## 采用微通道冷凝器的无霜风冷冰箱系统性能提升

张成全 施骏业 陈江平

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

**摘要** 随着《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》(GB 12021.2—2015)的实施,本文将微通道换热器(MPE)引入无霜风冷冰箱,采用由部件单体到系统整体的技术路线,实验研究了无霜风冷冰箱系统中的4种典型的微通道冷凝器样件,并与原机冷凝器进行了单体性能对比测试。结果表明:最优样件的换热性能提升13%,其空气侧压降为原机的28%,制冷剂侧压降为原机的54%。将最优样件引入冰箱系统并优化了系统的充注量,按照新标准GB/T8059—2016的要求对新系统进行了标准耗电量测试,结果表明:当测试工况为25℃时,系统耗电量较原系统下降了2.8%,新国标系统折算耗电量较原机下降了2.6%,达到了新国标1级的要求。

**关键词** 冰箱; GB 12021.2—2015; 微通道换热器; 节能

中图分类号: TQ051.5; TM925.21

文献标识码: A

## Optimal Performance Research of Frost-free Air-cooled Refrigerator with Microchannel Condenser

Zhang Chengquan Shi Junye Chen Jiangping

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

**Abstract** With implementation of the Maximum Allowable Values of The Energy Consumption And Energy Efficiency Grade For Household Refrigerators(GB 12021.2—2015), this study experimentally investigated the application of four typical kinds of microchannel heat exchangers (MPE) on domestic refrigerator system. The investigation was conducted from component to system, and heat exchanger performance was compared with original condenser. The results show that for the best MPE sample, the heat transfer performance can increase by 13%, the air-side pressure drop is only 28%, and the refrigerant-side pressure drop is only 54%. The best MPE sample was introduced into a refrigerator system, and the charge of refrigerant for the system was optimized. The optimized system energy consumption was tested under national standard GB/T8059—2016. The results show that the energy consumption of the new system was 2.8% lower than the original under a test condition of 25℃, and the calculated energy consumption based on the new national standard was 2.6% lower than the original. This can meet the first-class requirements of the new national standard.

**Keywords** domestic refrigerator; GB 12021.2—2015; microchannel heat exchanger; energy conservation

家用电器作为家庭生活中能源的主要消耗点,其能效的提升可以为我国的节能减排做出重要的贡献,家用冰箱作为全天连续工作的设备,是家用电器里的用电大户。自2016年10月1日起,新国标GB 12021.2—2015《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》<sup>[1]</sup>正式实施,新版本电冰箱能效标准1级能效要求冰箱耗电大幅度降低,新1级比旧1级耗电量需下降约40%,新版本也更新了冰箱耗电量的测试方法,冰箱综合耗电测试更贴近用户实际使用情况。基于此背景,国内新一轮的冰箱系统性能提升研究正在全面展开。

J. M. Belman-Flores等<sup>[2]</sup>发现冰箱整机性能的

提升主要基于以下四个方面:1)压缩机性能的提升,2)新型保温材料的开发,3)高效换热器的设计应用,4)整机控制逻辑的优化研究。王维等<sup>[3]</sup>通过实验及模拟的方法,对采用变频压缩机的风冷冰箱在压缩机不同转速时的耗电量、功率及开机率进行了研究。同时还研究了压缩机在不同转速条件下,冰箱的冷藏室、冷冻室、果蔬室及制冰室等主要间室内的温度变化情况。M. Visek等<sup>[4]</sup>对冰箱整机能耗进行性能研究发现,冰箱冷凝器总体传热系数提高30%,系统可节能8.1%。

童蕾等<sup>[5]</sup>分析了冰箱制冷系统中起热交换作用的两器(蒸发器、冷凝器)管道材料铜、铁、铝三者的

收稿日期:2016年8月17日

性能、经济性的对比关系,探讨冰箱管材料用非铜管替代铜管的可行性和应用价值,得出用邦迪管、铝管替代在冰箱中使用最广泛的紫铜管,在工艺和技术上可行,并能有效降低冰箱的生产成本。近年来德、日、韩等国的主要家用冰箱生产企业均已开发出应用铝制微通道冷凝器的冰箱产品,主要针对大容量的对开门及三开门冰箱,其中德国企业已经批量应用微通道冷凝器多年,韩国企业也已经批量使用并且取得了不错的节能效果。国内许多企业的科研机构也已经开始对微通道换热器在家用冰箱中的应用进行了一系列探索。但有关微通道换热器在冰箱中应用的相关学术论文相对较少。李徽等<sup>[6]</sup>将微通道换热器作为冷凝器应用到饮料柜中,分别对铜管翅片式冷凝器的饮料柜和微通道冷凝器的饮料柜进行了性能实验,结果表明:用微通道换热器作为饮料柜的冷凝器具有高效、减少制冷剂充注量、成本低等优点。赵亚丽<sup>[7]</sup>对冰箱冰柜系统冷凝器热路特性进行深入分析,找出提升冷凝器性能的有效途径,为实现冰箱/冰柜节能研究和优化设计提供必要的理论依据。王颖等<sup>[8]</sup>通过将微通道换热器引入3 HP柜式家用空调,并对系统性能和充注量等进行了对比研究。

虽然前人已经做了一些相关的研究工作,但仍未有人对微通道换热器在家用冰箱中的应用进行研究。本文分别从部件性能及系统性能的角度对微通道换热器在家用冰箱中应用的可行性进行了研究,首先设计加工了21种不同的微通道冷凝器,选取4种典型样品测试单体性能,随后优选单体性能最优样品并将其装入冰箱系统进行系统性能测试,最终对微通道冰箱系统进行了工况优化。

## 1 换热器设计及单体实验

### 1.1 换热器样品

微通道换热器芯体大小根据原机尺寸及风道结构进行设计,具体结构参数按照理论模型的指导进行选择。换热器设计的理论模型将微通道换热器分成若干个不同的传热单元,对每个基本单元采用 $\epsilon$ -NTU方法计算。空气侧传热与压降参考董军启等<sup>[9]</sup>与M. H. Kim等<sup>[10]</sup>提出的传热与压降关联式。制冷剂侧单相区参考V. Gnielinski<sup>[11]</sup>与S. W. Churchill<sup>[12]</sup>提出的传热与压降关联式,制冷剂侧两相区参考M. K. Dobson等<sup>[13]</sup>与V. Gnielinski<sup>[14]</sup>提出的传热与压降关联式。

基于平行流及管带式不同的结构形式以及百叶窗翅片和平直翅片不同的翅片形式,本文共加工了21种不同结构参数级类型的微通道样品。微通道冷

凝器和丝管式冷凝器样品如图1所示。本文选取了4种典型样品,样品翅片为百叶窗翅片和平直翅片,如图2所示,具体规格参数如表1所示。

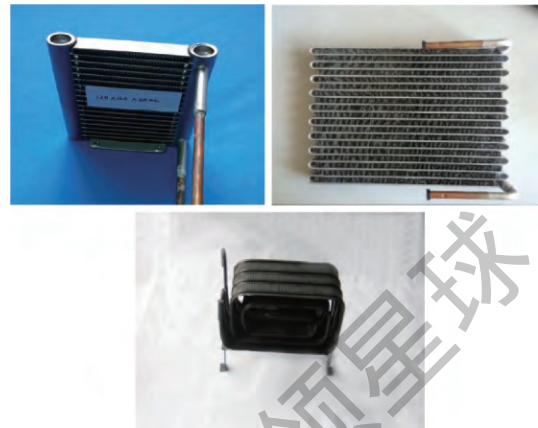


图1 微通道冷凝器(上)及传统丝管式冷凝器(下)  
Fig. 1 Microchannel heat condenser( up) wire and tube condenser( down)

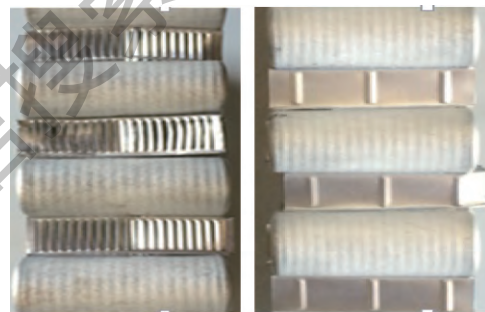


图2 百叶窗翅片(左)和平直翅片(右)  
Fig. 2 Louver fin( left) and plain fin( right)

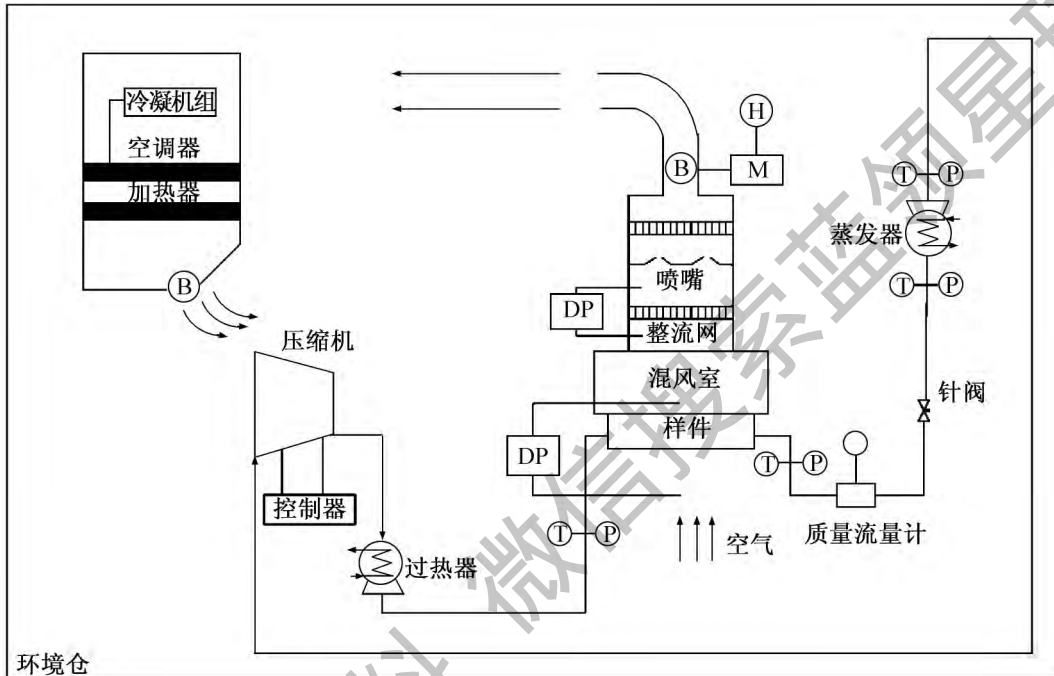
### 1.2 单体实验系统及原理

单体实验系统的原理如图3所示。冷凝器单体实验在小风洞实验台中进行,实验台专为测试较小换热面积换热器设计搭建,如图4所示。实验台包括一个环境室,环境室设有一套空调机组,用于控制房间的空气状态。制冷系统压缩机为冰箱系统专用变频压缩机,压缩机配有专用控制器调节其转速以便对系统冷凝压力进行控制。系统流量通过小口径计量调节阀(针阀)控制。冷凝器出口过冷度主要通过改变系统充注量的方式进行控制。蒸发过程以管路外缠绕电加热带的方式实现,压缩机出口到冷凝器入口管路同样缠有电加热带,用于控制冷凝器入口过热度。

单体实验工况如表2所示,系统风量为原机冷凝风机(12 V/930 r/min)工作时的风量,系统各个测量部件精度如表3所示。换热器制冷剂侧及空气侧压降由传感器直接测量得到,换热量 $Q$ 可由制冷剂侧及空气侧焓差法计算可得。

表1 样件参数  
Tab. 1 Sample specifications

样件	芯体尺寸/mm	扁管宽度/mm	翅片形式	扁管高度/mm	翅片间距/mm
原机	195 × 177 × 217	-	-	-	-
微通道 1#(平行流)	180 × 16 × 150	16	百叶窗	2	3
微通道 2#(管带式)	200 × 25 × 200	25	百叶窗	2	2.5
微通道 3#(管带式)	180 × 32 × 190	32	平直	2.5	2
微通道 4#(管带式)	200 × 25 × 200	16	平直	2	1.5



P 压力变送器; T 温度传感器; DP 压差变送器; B 风机; M 电机; H 变频器

图3 冷凝器单体实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of condenser test

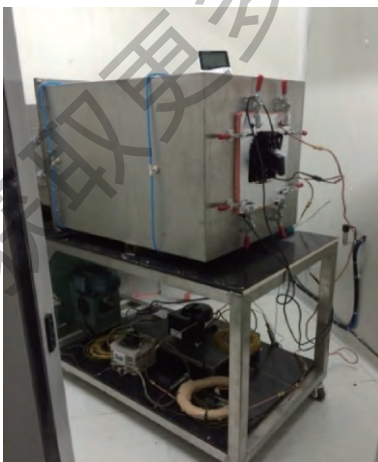


图4 实验台照片

Fig. 4 Picture of test bench

$$Q_{ref} = \dot{m}_{ref} \times (h_{cond out} - h_{cond in}) \quad (1)$$

$$Q_{air} = \dot{m}_{air} \times (h_{air out} - h_{air in}) \quad (2)$$

表2 单体实验工况

Tab. 2 Heat exchanger test condition

参数	数值
环境温度/°C	25
冷凝压力/MPa	0.43
冷凝器入口过热度/°C	5
冷凝器出口过冷度/°C	5
风量/(m <sup>3</sup> /h)	128

### 1.3 单体实验结果分析

本实验对原机丝管式冷凝器和4种不同形式的微通道换热器分别进行了单体性能实验,实验结果如

表4所示。从图5可看出,在相同的测试工况下,4种微通道换热器的单体换热量均大于原机丝管式冷凝器,2#样件单体换热量最高,相比于原机丝管式冷凝器,2#样件换热量提高了25%。这是由于微通道换热器结构紧凑,换热效率更高。

表3 实验台各参数测试精度

Tab.3 Parameter accuracy of test bench

参数	测试范围	精度
压力/kPa	0~2 000	±4
空气温度/°C	-50~50	±0.1
制冷剂温度/°C	-10~100	±0.5
风量/(m <sup>3</sup> /h)	0~300	±10
质量流量/(g/s)	0~3	±0.01
空气压降/Pa	-50~50	±2.5
制冷剂压降/kPa	0~1 000	±2

表4 换热器单体实验结果对比

Tab.4 Test results of heat exchanger test

样件	空气侧		制冷剂侧	
	换热量/W	压降/Pa	换热量/W	压降/kPa
原机	304	13.5	365	20.7
微通道1#	331	9.7	389	1.6
微通道2#	394	20.5	457	16.6
微通道3#	338	7.3	404	5.99
微通道4#	381	15.6	423	22.6

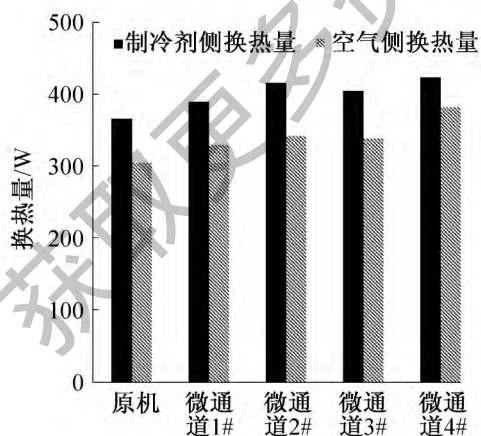


图5 单体换热能力对比

Fig.5 Heat capacity comparison of different samples

从图6可知,在相同风量的情况下,1#和3#样件的空气侧压降均低于原丝管式冷凝器空气侧压降,3#空气侧的压降最低,仅为7.3 Pa。从图7可以看出,

平行流式换热器制冷剂侧的压降最小,只有原冷凝器制冷剂侧压降的5%。管片式换热器制冷剂侧的压降则随着扁管宽度的减小而增大。4#样件的扁管宽度最小,制冷剂侧压降最大,高出原丝管式冷凝器制冷剂侧压降9.1%。

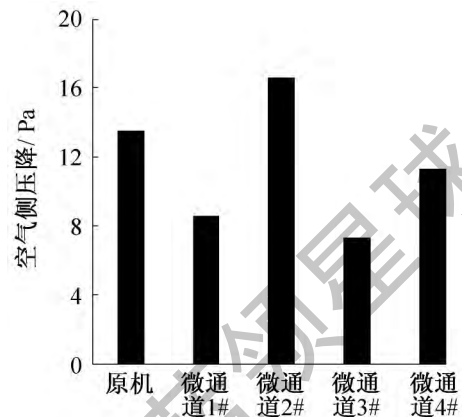


图6 单体空气侧压降对比

Fig.6 Air side pressure drop comparison of different samples

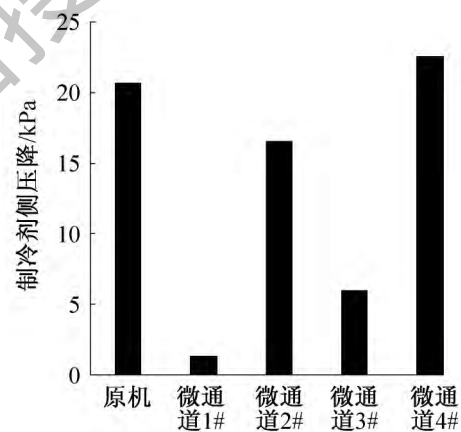


图7 单体制冷剂侧压降对比

Fig.7 Refrigerant side pressure drop comparison of different samples

综上所述:在冰箱低风速工况下,四种样品的换热能力提高程度近似,3#样件空气侧压降只有原机的28%,制冷剂侧压降只有原机的54%,其单体换热性能也比原机提高13%,因此3#样件单体性能最优。

## 2 冰箱系统实验结果与分析

### 2.1 实验系统及工况

如图8所示,系统实验基于一台国际知名品牌的大容量无霜风冷冰箱(BCD512),测试方法按照新版国标《家用和类似用途制冷器具》(GB/T 8059—2016)的相关要求进行,耗电测试为空载,降温速度

测试为冷冻满载冷藏空载,测试过程中在冷冻室上中下均匀布置三个热电偶,冷藏室距离仓体底面50 mm位置、冷藏室1/2处及上1/4处布置三个热电偶,制冷系统各个关键位置布有温度测点,用于监测系统工作时的工况变化,设置冷冻室、冷藏室温度分别为-18℃及4℃,由于冰箱的开机、停机,冷冻室、冷藏室温度会出现波动,波动范围如表5所示,耗电量测试开始前均保证冰箱稳定运行24 h以上,测试房间温度由房间空调控制,环境温度选择16℃,25℃,32℃三种不同工况。系统实验被测参数的测试精度如表6所示。



图8 实验用BCD512冰箱系统  
Fig. 8 BCD512 refrigerator test system

表5 系统实验仓体内温度波动范围

参数	最高温度/℃	最低温度/℃
冷冻室	-17	-22
冷藏室	5.5	2.0

## 2.2 实验结果及优化分析

选择单性能最优的3#样件作为系统实验测试对象,本文首先将其直接替代原机冷凝器,并在25℃

表7 25℃工况下不同冰箱系统性能对比

Tab. 7 Test results comparison of different system

系统	耗电量/ (kW·h)	降温速度/ min	压缩机功率/ W	开机比率/ %	冷凝器出口 温度/℃	冷凝器迎面风 速度/(m/s)
原机	0.691 6	270	40.84	69.70	27.2	1.1
微通道3#	0.691 7	229	39.9	70.34	27.5	2.2

表6 系统实验各参数测试精度

Tab. 6 Parameter accuracy of system test

参数	测试范围	精度
温度/℃	-50 ~ 50	±0.1
电量	-	0.1% (读数) + 0.2% (量程)

的工况及相同充注量下分别对系统进行了空箱耗电测试及满载降温测试,测试结果如表7所示,从空箱耗电量测试可以看出,微通道系统并无明显优势,从满载降温速度来看,微通道系统降温速度加快了15%,更换冷凝器后,冰箱制冷系统工况发生了变化,降温速度加快表明系统制冷量较原系统有一定程度的提高,这是微通道系统的优势所在。但在空箱耗电测试时两系统压缩机功耗相当,微通道系统制冷量提高的优势并不能转化为耗电量减少,因此冰箱整机耗电量下降很少。又因为耗电量对冰箱系统来说是更为重要的一个评价指标,因此应对整个制冷系统进行进一步的匹配和优化以达到降低耗电的目的。制冷系统整体的优化及性能提升也不能单单靠更换冷凝器实现,还需要配合节流机构、系统充注量等部件参数的调节。对系统进行部件参数的调节与匹配才能找到系统运行的最佳工况点,从而达到节能降耗的目的。

由于变换系统毛细管的样机制作较为困难,因此本文对3#样件组成的微通道冰箱系统的充注量进行了优化分析,最终系统在85 g充注量时得到了最低的耗电量(图9),充注量对系统耗电的影响与J. Boeng等<sup>[15]</sup>,W. J. Yoon等<sup>[16]</sup>学者的研究结果相同。最终确定3#样品为系统冷凝器,85 g为系统充注量,更改了冷凝器的组成结构(图10),并按照新国标GB/T8059—2016要求对新系统进行了标准耗电量测试,结果如表8所示。在25℃的测试工况下系统耗电量较原系统下降了2.8%,高温32℃及低温16℃测试工况下耗电量也有一定程度的下降,新国标系统折算耗电量较原机下降了2.6%,达到了新国标1级的要求。

表8 新国标要求下耗电量测试结果

Tab. 8 Energy consumption test results in new national standard

系统	25 °C耗电量/ (kW·h)	16 °C耗电量/ (kW·h)	32 °C耗电量/ (kW·h)	新国标折算耗电量/ (kW·h)	新国标1级耗电量/ (kW·h)
BCD512 (丝管式)	0.6916	0.4326	1.0953	0.75	0.79
BCD518(微通道)	0.6719	0.4215	1.0661	0.73	0.79

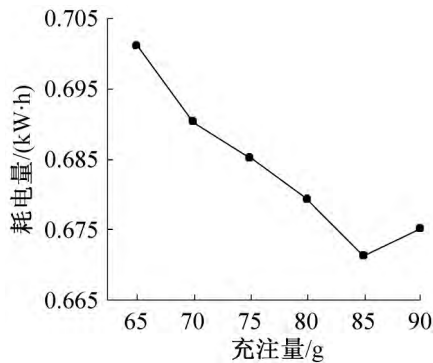


图9 充注量对耗电影响

Fig. 9 Energy consumption in different charge amount condition



图10 冰箱微通道冷凝器总成结构

Fig. 10 Structure of microchannel condenser assembly

### 3 结论

本文从单体部件到系统整机的研究方法,分析了微通道冷凝器在家用冰箱中应用的可行性,得到如下结论:

1) 设计测试了多种可用于家用无霜风冷冰箱的管带式微通道冷凝器,在冷凝压力0.43 MPa,环境温度25 °C工况下进行了换热器单体性能测试,最优样件的换热性能优于原机,提升幅度可达13%。其制冷剂侧压降及空气侧压降与原机相比也有较大程度的降低,空气侧压降只有原机的28%,制冷剂侧压降只有原机的54%。

2) 对微通道冷凝器直接替代丝管式冷凝器的冰

箱系统进行了充注量的优化,按照新国标 GB/T 8059—2016 的要求对新系统进行了标准耗电量测试:在25 °C的测试工况下系统耗电量较原系统下降了2.8%,高温32 °C及低温16 °C测试工况下耗电量也有一定程度的下降,新国标系统折算耗电量较原机下降了2.6%,达到了新国标1级的要求。

研究表明:微通道冷凝器可以实现对传统家用冰箱丝管式冷凝器的替代,并且通过配合制冷系统其他参数的优化调整,冰箱整体能效还有很大的提升空间,综合成本等因素考虑冰箱用微通道冷凝器具有良好的推广前景。

### 参考文献

- [1] 中国家用电器协会. 中国家用冰箱产业技术路线图[M]. 北京: 中国家用电器协会, 2015: 14-15. (China Household Electrical Appliances Association. China household refrigerator industry technology roadmap[M]. Beijing: China Household Electrical Appliances Association, 2015: 14-15.)
- [2] Belman-Flores J M, Barroso-Maldonado J M, Rodríguez-Muñoz A P, et al. Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator—A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 955-968.
- [3] 王维,王瑞,秦宗民. 采用变频压缩机的风冷冰箱系统性能研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(6): 90-96. (WANG Wei, WANG Rui, QIN Zongmin. An experimental analysis of a frost-free refrigerator using a variable capacity compressor [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(6): 90-96.)
- [4] Visek M, Joppolo C M, Molinaroli L, et al. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 43: 71-79.
- [5] 董蕾,陈超敏,陈清坤. 对冰箱换热器使用的管道材料的分析[J]. 制冷学报, 2004, 25(4): 60-63. (TONG Lei, CHEN Chaomin, CHEN Qingkun. Analysis of tube material for heat exchanger of refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(4): 60-63.)
- [6] 李徽,于燕,牛新朝,等. 微通道换热器在饮料柜上应

- 用实验研究[J]. 日用电器, 2014(11): 63-66. (LI Hui, YU Yan, NIU Xinchao, et al. Experimental study of micro channel heat exchanger in beverage cooler [J]. Electronic Appliance, 2014(11): 63-66.)
- [7] 赵亚丽. 冰箱/冰柜内藏板管式冷凝器热路分析与管型研究[C]//中国家用电器技术大会. 合肥, 2015. (ZHAO Yali. Thermal analysis of condensers for household refrigerators [C]//China Household Electrical Appliance Technology Conference. Hefei 2015.)
- [8] 王颖, 徐博, 陈江平, 等. 微通道换热器用于家用柜机空调时整机性能的对比实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(1): 24-29. (WANG Ying, XU Bo, CHEN Jiangping, et al. Experimental research of microchannel heat exchanger on packaged air conditioning system [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(1): 24-29.)
- [9] 董军启, 陈江平, 袁庆丰, 等. 板翅换热器平直翅片的传热与阻力性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 53-56. (DONG Junqi, CHEN Jiangping, YUAN Qingfeng, et al. Flow and heat transfer on compact smooth fin surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 53-56.)
- [10] Kim M H, Bullard C W. Air-side performance of brazed aluminum heat exchangers under dehumidifying conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 924-934.
- [11] Gnielinski V. New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. International Chemical Engineering, 1976, 16(2): 359-368.
- [12] Churchill S W. Comprehensive correlating equations for heat, mass, and momentum transfer in fully developed flow in smooth tubes [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research Fundamentals, 1977, 16: 109-116.
- [13] Dobson M K, Chato J C. Condensation in smooth horizontal tubes [J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120(1): 193-213.
- [14] Gnielinski V. New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. International Chemical Engineering, 1976, 16(2): 359-368.
- [15] Boeng J, Melo C. Mapping the energy consumption of household refrigerators by varying the refrigerant charge and the expansion restriction [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 41: 37-44.
- [16] Yoon W J, Jung H W, Chung H J, 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.
- [17] 董军启, 陈江平, 袁庆丰, 等. 板翅换热器平直翅片的传热与阻力性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 53-56. (DONG Junqi, CHEN Jiangping, YUAN Qingfeng, et al. Flow and heat transfer on compact smooth fin surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 53-56.)
- [18] Kim M H, Bullard C W. Air-side performance of brazed aluminum heat exchangers under dehumidifying conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 924-934.
- [19] Gnielinski V. New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. International Chemical Engineering, 1976, 16(2): 359-368.
- [20] Churchill S W. Comprehensive correlating equations for heat, mass, and momentum transfer in fully developed flow in smooth tubes [J]. Industrial and Engineering Chemistry
- (上接第29页)
- 60-65. (QU Minglu, LI Fengshu, YU Qian, et al. Impact on the indoor thermal comfort of an ASHP unit using different novel TES-based reverse cycle defrosting forms [J]. Fluid Machinery, 2016, 44(1): 60-65.)
- [14] 项招鹏. 复叠式蓄热型空气源热泵热水器性能优化分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (XIANG Zhaopeng. Optimization design on cascade air source heat pump water heater with thermal storage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)
- [15] 朱玉娟. 复叠式蓄热型空气源热泵热水器动态特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (ZHU Yujuan. Dynamic thermal characteristics research on cascade air source heat pump water heater with PCM [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)
- [16] 曲明璐, 李天瑞, 樊亚男, 等. 复叠式空气源热泵蓄能除霜与常规除霜特性实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 34-39. (QU Minglu, LI Tianrui, FAN Yanan, et al. Experimental study on characteristics of energy storage defrosting and conventional defrosting for cascade air source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1): 34-39.)
- 通信作者简介  
曲明璐, 女, 副教授, 硕士生导师, 上海理工大学环境与建筑学院, 13795377789, E-mail: quminglu@126.com. 研究方向: 空气源热泵, 建筑设备热质交换过程。
- 通信作者简介  
陈江平, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, (021) 34206775, E-mail: jpchen\_sjtu@163.com. 研究方向: 制冷及低温工程、车用空调技术。现在进行的研究项目有: 上海市科委项目(16Z111190001)——电动汽车热泵空调系统开发。
- About the corresponding author  
Chen Jiangping, male, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206775, E-mail: jpchen\_sjtu@163.com. Research fields: research for refrigeration and cryogenics, application research for automotive air conditioner system. The author takes on project supported by the Science Foundation of Shanghai (No. 16Z111190001): development of heat-pump air conditioning system for electric vehicle.
- About the corresponding author  
Qu Minglu, female, associate professor, School of Environment & Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13795377789, E-mail: quminglu@126.com. Research fields: air source heat pump, heat and mass transfer process of building equipment.