

文章编号:0253-4339(2017)03-0070-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2017.03.070

冰箱冷量损失的实验测定与保温性能的改进

和鹏¹ 粘权鑫^{1,2} 方文振¹ 陶文铨¹

(1 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室 西安 710049;

2 东风柳州汽车有限公司 柳州 545000)

摘要 本文通过实验的方法研究了冰箱空载时的冷量损失规律,提出一种减小冷量损失的冰箱结构改进方案。首先将冰箱各壁面的散热问题简化为一维导热模型。在全天候模拟实验平台上,为得到环境温度对冰箱冷量损失的影响,设置环境相对湿度为 80%,环境温度分别为 5~40℃(间隔为 5℃);为得到环境相对湿度对冰箱冷量损失的影响,设置环境温度为 25℃,环境相对湿度分别为 55%~95%(间隔为 10%)。在冰箱空载状态下分别测量以上两组条件下各壁面的内外表面温度,再根据傅里叶导热定律计算各壁面的热流量,进而得到冰箱冷量损失与环境温度和相对湿度的关系。结果表明:环境温度升高时冰箱冷量损失增大;环境相对湿度对冰箱冷量损失几乎没有影响;样本冰箱冷藏室后壁面的冷量损失明显高于其他壁面,顶部冷量损失较小;对后壁面采取加厚绝热层厚度的措施后降低了冰箱整体的冷量损失,同时为了保证冷藏室容积,减小冷藏室顶部绝热层的厚度,最终各壁面冷量损失接近一致。

关键词 冰箱;冷量损失;导热;改进

中图分类号:TB61⁺1; TM925.2; TK124

文献标识码:A

Measurement of Refrigerator Cooling Capacity Loss and Improvement of Its Thermal Insulation

He Peng¹ Nian Quanxin^{1,2} Fang Wenzhen¹ Tao Wenquan¹

(1. Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou, 545000, China)

Abstract In the present paper, the cold loss of a fridge when unloaded was studied through an experiment, and an improvement was proposed. First, the heat transfer process between the fridge interior and the external environment was simplified into a one-dimensional heat conduction process. On an all-weather simulation experiment platform, to investigate the effect of ambient temperature on cooling capacity loss, the ambient temperature was set to 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40℃ with a fixed ambient relative humidity of 80%. To investigate the effect of ambient humidity on cooling capacity loss, the ambient relative humidity was set to 55%, 65%, 75%, 85%, and 95% with a fixed ambient temperature of 25℃. The temperature of the inner and outer walls for every combination of the above two series of parameters was measured when the refrigerator was unloaded. According to the Fourier heat conduction law, the heat flux of each wall can be obtained, and then the cold loss is calculated. The results show that the cold loss of the refrigerator increases with ambient temperature, and the ambient humidity has no effect on cooling capacity loss. The cold loss of the refrigerator back wall is obviously greater than that of the other walls, while that of the top wall is smaller. The insulation of the refrigerator back wall is thickened to decrease the entire cold loss, and the insulation of the refrigerator top wall is made thinner to guarantee the refrigerator storage capacity. This leads to an approximately uniform cold loss distribution of the refrigerator walls.

Keywords refrigerator; cooling capacity loss; heat conduction; improve

随着生活水平的提高,冰箱作为常见的家用电器已进入很多家庭,冰箱又是持续工作的家用电器,其电力消耗在家庭用电中占了较大的比例。所以对冰

箱节能降耗方面的研究具有重要意义。

D. P. Traviss 等^[1]将除霜控制系统操作过程与冰箱门的开合次数和持续时间进行了关联,提出了优

化除霜系统开启过程和时间的方法。H. Tuo 等^[2]提出了用闪蒸气消除 A/C 系统来优化微通道蒸发器内制冷剂的分布,减少压降,从而提高系统效率。杨大海等^[3]通过理论计算与反向热泄漏测量、冰箱实际运行热泄漏测量相结合的方法来测算冰箱的热负荷,根据压缩机、冷凝器、蒸发器的相应参数,进行发泡层厚度配置,得到冰箱各工况下各部位最佳发泡层厚度。此外,还有采用 CFD 模拟的方法研究冰箱的传热特性^[4-6],对冰箱内部结霜和除霜的研究^[7-9],对冰箱局部结构的设计和控制策略的研究^[10-15]。上述各种方法虽取得了不错的成果,但现有文献中对冰箱在各种运行条件下各部位绝热层的散热大小及其相对的比例研究不够,缺少可供设计参考的可靠数据。因此用实验方法研究冰箱各个部分绝热层厚度对冰箱散热的影响具有重要意义。

本文采用实验的方法研究冰箱冷量损失与环境温度和相对湿度的关系,利用全天候模拟实验平台模拟环境条件,通过热电偶测得冰箱内外壁面的温度和传热学的基本关系式,获得各部位的散热量,在此基础上提出改变冰箱壁面绝热层厚度的改进方案并加以验证。

1 实验方法

1.1 实验原理

当环境温度高于冰箱内部温度时,由于工作时冰箱是封闭的,外界热量只以导热的形式传递到冰箱内部。冰箱保温材料的导热系数随着温度变化而变化,本实验中首先测定了所测试冰箱保温材料的导热系数随温度的变化关系,如图 1 所示。根据传热学的基本知识,冰箱壁面的传热现象可以简化为变导热系数的一维导热问题,如图 2 所示。

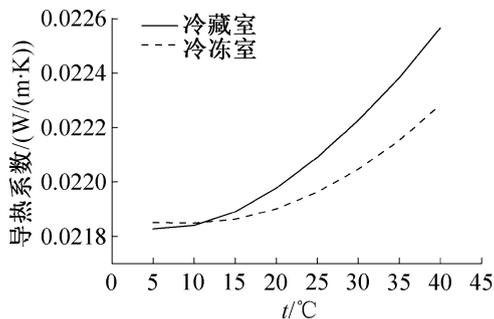


图 1 冰箱隔热材料导热系数随环境温度的变化关系
Fig. 1 Variations of effective thermal conductivity of insulation materials with ambient temperature

在导热系数和换热面积已知的前提下,若测得冰箱壁面的内外侧温度,则单位时间内冰箱一个壁面的

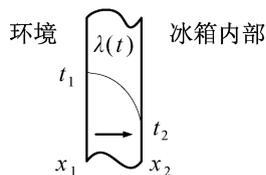


图 2 变导热系数一维导热示意图
Fig. 2 One-dimensional heat conduction model with the variable thermal conductivity

导热量可用傅里叶定律表示为^[16]:

$$q_i = -A_i \lambda_i(t) \frac{dt}{dx} \Big|_i \quad (1)$$

$$\text{令 } \bar{\lambda}_i = - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_i(t) dt}{(t_2 - t_1)_i}, \text{ 则:}$$

$$q_i = - \frac{\bar{\lambda}_i (t_2 - t_1)_i}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A_i}} \quad (2)$$

冰箱整体冷量损失计算:

$$q = \sum q_i \quad (3)$$

冰箱一个壁面动态稳定运行 24 h 的总导热量 Φ_d, J :

$$\Phi_d = 86\,400q \quad (4)$$

式中: $(t_2 - t_1)_i$ 为冰箱某个壁面内外侧的平均温差,系将同一壁上相对应各个点温差做平均而得。例如某一区域有相对应的 3 对热电偶 101-201、102-202、103-203,则:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{3} [(t_{201} - t_{101}) + (t_{202} - t_{102}) + (t_{203} - t_{103})] \quad (5)$$

1.2 实验平台

实验设备主要包括全天候模拟实验平台、样本冰箱、铜康铜热电偶、吉时利 (Keithley)、带吉时利测试软件的计算机,整体布置如图 3 所示。

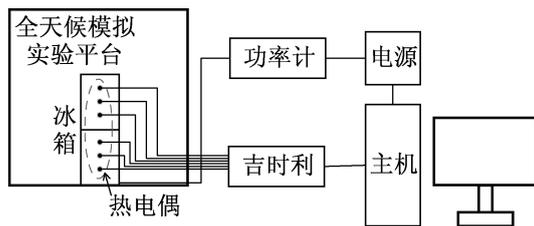


图 3 实验平台
Fig. 3 Experiment platform

全天候模拟实验平台的技术参数为:1) 工作室尺寸:20 m³; 2) 温湿度技术要求:35% ~ 95%; 3) 温度控制范围:-60 ~ 100 °C; 4) 相对湿度控制范围:

30% ~ 98% ; 5) 温度波动度: $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$; 6) 温度均匀度: $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$; 7) 湿度均匀度: $\pm 3\% \text{ RH}$; 8) 太阳辐射技术要求: 辐射强度为 1120 W/m^2 、 840 W/m^2 、 560 W/m^2 、 280 W/m^2 四档; 9) 风速调节范围: $0.7 \sim 1.5\text{ m/s}$ 。

本次实验研究采用的样本冰箱为美的 BCD-310 WM 冰箱, 技术参数如表 1 所示。

表 1 冰箱技术参数

Tab. 1 Technical parameters of fridge

技术指标	参数
型号	BCD-310WM
气候类型	SN/N/ST/T
总有效容积/L	310
冷冻室有效容积/L	96
冷冻能力(24 h)/kg	14
电源	220 V/50 Hz
耗电量(24 h)/(kW·h)	0.73
能效等级	1 级
额定电流/A	0.7
外形尺寸(宽×深×高)/mm	625×681×1830
发泡材料	环戊烷

1.3 实验方案

实验前用精度为 0.03 K 的铂电阻对热电偶进行了标定。热电偶在冰箱上的布置如表 2 所示, 表中每个数值乘以 2 表示壁面内外侧布置等量的热电偶, 并且位置相对应。

表 2 冰箱内外部温度测试点布置

Tab. 2 Temperature test points of fridge

部位	测试点个数		备注
	冷藏	冷冻	
顶部	4×2	-	线盒
左侧	4×2	4×2	-
右侧	4×2	4×2	-
背部	3×2	4×2	压机舱
门	3×2	3×2	-
底部	-	4×2	压机舱

具体实验方案为:

1) 冰箱空载, 环境湿度为 80%, 环境温度分别

设置为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 测量冰箱工作状态处于动态稳定时每个壁面内外侧温度的变化曲线;

2) 冰箱空载, 环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 环境湿度分别设置为 55%、65%、75%、85%、95% 时, 测量冰箱工作状态处于动态稳定时每个壁面内外侧温度的变化曲线。

2 实验结果

设定环境湿度为 80%, 环境温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时冷藏室后侧温度变化如图 4 所示, 图例中 3 位数字的热电偶编号中第一位表示冰箱的内外侧, 其中 1 代表内侧, 2 代表外侧, 后两位则代表热电偶标号。例如编号 101 就代表内表面标号为 1 的热电偶。可以看出冰箱壁面外侧温度近似等幅波动, 这刚好对应冰箱的工作状态, 即冰箱压缩机工作, 冰箱内壁面温度下降, 使外壁面温度随之降低; 压缩机停止工作, 内壁面温度上升, 使外壁面温度回升。环境温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时冷藏室后侧各测点温差如图 5 所示。

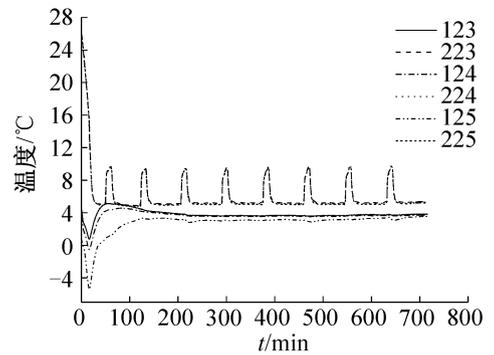


图 4 环境温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时冷藏室后侧温度变化

Fig. 4 Temperature variation of the refrigerator back wall at ambient temperature being $5\text{ }^\circ\text{C}$

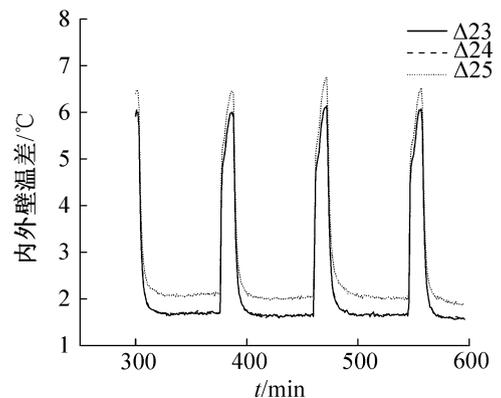


图 5 环境温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时冷藏室后侧各测点温差

Fig. 5 Temperature difference of the refrigerator back wall at ambient temperature being $5\text{ }^\circ\text{C}$

图 5 中 Δx 代表样本冰箱壁面两侧标号为 x 的这对热电偶所测温差。例如: $\Delta 12$ 代表对应于编号为 112 和 212 的这对热电偶的温差。

由此两图可见在冰箱启动后约 300 min 后其运行就进入周期性稳态(即动态稳态)的工况。

文中定义动态稳定为冰箱在某一工况下运行 300 min 后的状态,取 300 ~600 min 之间测量所得数据用于计算。

图 6 所示为冰箱整体冷量损失随环境温度的变化曲线。冰箱整体冷量损失是各壁面损失的和,而各壁面冷量损失根据测点温度计算。由图 6 可知,当环境温度大于冰箱内部温度时,冰箱的整体冷量损失随环境温度的上升而增大。这是因为导热系数 λ 和内外壁温差 ($t_2 - t_1$) 随着环境温度的升高而上升,所以冰箱的整体冷量损失随环境温度的上升而增大。

表 3 所示为冰箱各壁面热流量实验结果。温度是指测试时的环境温度。可以看出,各个壁面的热流

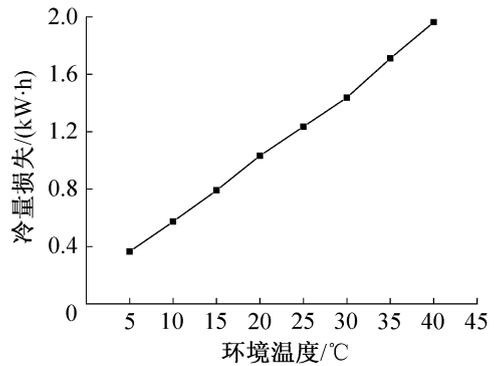


图 6 冰箱整体冷量损失随环境温度的变化曲线
Fig. 6 The relation between the total cold loss of fridge and ambient temperature

量随着环境温度的上升而上升,冰箱左右两侧的热流量相差不明显,冷藏室后侧的热流量变化较大,特别是环境温度上升到 15 °C 以上时,其热流量显著大于冰箱其他壁面。

表 3 改进前冰箱各壁面热流量实验结果(W/m^2)

Tab. 3 The calculated heat flux among different walls before improvement (W/m^2)

部位及厚度 温度 /mm /°C	冷藏	冷藏	冷藏	冷藏	冷藏	冷冻	冷冻	冷冻	冷冻	冷冻
	室门	室左	室右	室后	室上	室门	室左	室右	室后	室底
40.0	49.0	49.0	35.5	31.5	70.0	69.2	69.2	74.4	81.8	
5	0.48	0.53	0.53	0.86	0.24	2.82	2.46	2.46	2.85	2.18
10	1.40	1.57	1.53	2.51	1.16	3.49	3.16	3.13	3.60	2.62
15	2.54	2.68	2.68	4.29	2.14	4.16	3.68	3.66	4.21	3.07
20	3.85	4.05	4.02	6.37	3.31	4.86	4.27	4.21	4.83	3.46
25	5.00	5.02	5.08	8.02	4.16	5.50	4.83	4.77	5.47	3.85
30	6.06	6.19	6.19	9.73	5.02	6.03	5.33	5.27	6.00	4.24
35	7.59	7.70	7.70	12.12	6.18	6.75	6.00	5.94	6.75	4.72
40	8.96	9.24	9.18	13.90	7.53	7.45	6.61	6.56	7.48	5.19

图 7 所示为环境温度为 25 °C 时,样本冰箱冷量损失随湿度的变化曲线。可知冷量损失基本为一条平行直线,说明样本冰箱冷量损失随湿度变化不大。由于冰箱的绝热材料被表层包裹,湿度变化不直接作用于绝热材料,故湿度的变化过程对绝热材料导热系数 λ 没有影响。所以冰箱的整体冷量损失随环境湿度的变化基本可以忽略。

3 分析及改进

通过分析样本冰箱工作过程中内部气流的流动规律,发现冰箱冷藏室制冷作用由冷冻室的冷空气通过风扇从冷藏室后侧吹到冷藏室内产生,导致冷藏室后侧存在强制对流的现象。由于从冷冻室吹来的风

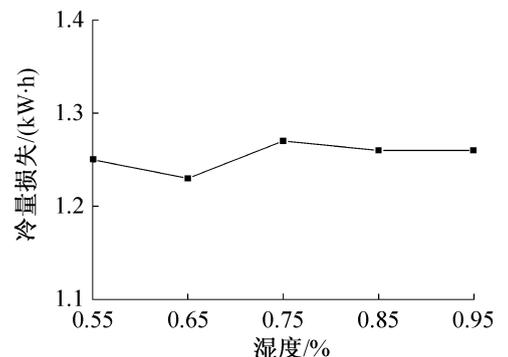


图 7 整体冷量损失随环境湿度变化曲线
Fig. 7 The relation between the whole cold loss of fridge and the ambient humidity

温要低于冷藏室温度,所以冷藏室后侧的壁面温度要普遍低于冷藏室其他各壁面。导致冷藏室后侧壁面的内外温差加大,对应导热热流量增大。由热阻的概念分析可知当壁面两边温度一定时,壁面的厚度会影响热流量的大小。所以,通过增加冰箱冷藏室后壁面中绝热材料的厚度,可以减少冷量损失。因此,取冷藏室后壁面内外壁温度为定值,改变绝热层厚度,由计算得到如图 8 所示通过后壁面的冷量损失随绝热层厚度的变化关系曲线。

由图 8 可知,通过冰箱后壁面的冷量损失随绝热层厚度增加而减少,但考虑到绝热层厚度不能无限制的增加,因此选择将冷藏室后侧的绝热层厚度由 35.5 mm 增加至 55.5 mm。同时由于冷藏室顶部的热流量较小,为了弥补冷藏室后侧增厚导致的冷藏室容积的减少,将冷藏室顶部的绝热层厚度从 31.5 mm 降低至 25 mm。

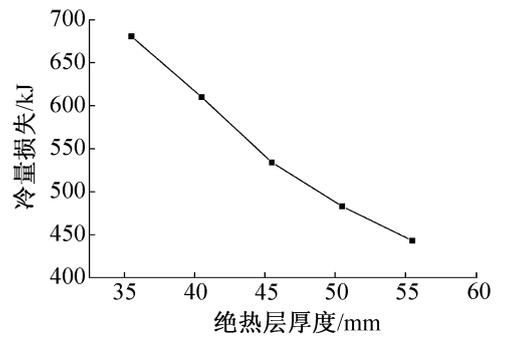


图 8 25 °C 时冷量损失随冷藏室后壁绝热层厚度变化
Fig. 8 The relation between the thickness of refrigerator back wall and the cold loss at ambient temperature being 25 °C

改进后冰箱各壁面热流量分布如表 4 所示。可看出冷藏室后侧热流量大幅度减小,并且冰箱各壁面散热的均匀性有显著改善。

表 4 改进后冰箱各个壁面热流量 (W/m²)

Tab. 4 The heat flux of each wall after improvement (W/m²)

部位及厚度 温度 /mm /°C	冷藏	冷藏	冷藏	冷藏	冷藏	冷冻	冷冻	冷冻	冷冻	冷冻
	室门	室左	室右	室后	室上	室门	室左	室右	室后	室底
	40.0	49.0	49.0	35.5	31.5	70.0	69.2	69.2	74.4	81.8
5	0.48	0.53	0.53	0.51	0.36	2.82	2.46	2.46	2.85	2.18
10	1.40	1.57	1.53	1.59	1.44	3.49	3.16	3.13	3.60	2.62
15	2.54	2.68	2.68	2.77	2.72	4.16	3.68	3.66	4.21	3.07
20	3.85	4.05	4.02	4.05	4.10	4.86	4.27	4.21	4.83	3.46
25	5.00	5.02	5.08	5.13	5.18	5.50	4.83	4.77	5.47	3.85
30	6.06	6.19	6.19	6.26	6.36	6.03	5.33	5.27	6.00	4.24
35	7.59	7.70	7.70	7.74	7.74	6.75	6.00	5.94	6.75	4.72
40	8.96	9.24	9.18	8.87	8.67	7.45	6.61	6.56	7.48	5.19

图 9 所示为改进后冰箱整体冷量损失减少率随环境温度的变化关系。定义冰箱整体冷量损失减少率为改进前后整体冷量损失的差值与改进前整体冷量损失的比值。可以看出,改进后冰箱整体冷量损失在温度区间 5 ~ 40 °C 的范围内均减少,并且随着环境温度的升高冷量损失减少率明显增大,环境温度为 40 °C 时,冷量损失减少率达到 10.9%。冰箱一般在室温(25 °C)条件下工作,这时的冷量损失减少率为 6.67%,冰箱的使用年限为 12 ~ 15 年^[17]。按 12 年计算,室温为 25 °C 时冷量减少量换算成电量为 184 kW·h。

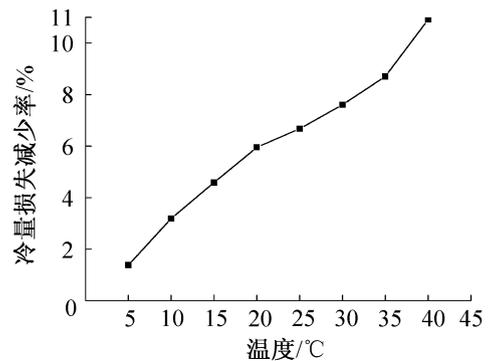


图 9 改进后冰箱整体冷量损失减少率随环境温度的变化
Fig. 9 The relation between the total cold loss decrease rate of fridge and the ambient temperature after improvement

4 结论

本文利用全天候模拟实验平台模拟环境条件,在冰箱空载状态时,设置环境相对湿度为80%,环境温度分别为5℃、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃;设置环境温度为25℃,环境相对湿度分别为55%、65%、75%、85%、95%。在以上条件下采用热电偶测量冰箱各壁面的内外表面温度,根据傅里叶导热定律计算各壁面的热流量进而得到冰箱各壁面的冷量损失量。在分析及改进后,得到如下结论:

- 1) 环境湿度对冰箱冷量损失几乎没有影响。
- 2) 样本冰箱左右两侧冷量损失没有较大差别,冷藏室后壁面冷量损失明显大于其他各壁面。
- 3) 对后壁面采取增加绝热层厚度的措施降低了冰箱的冷量损失,同时为了保证冷藏室容积,减小冷藏室顶部绝热层的厚度,最终使各壁面冷量损失接近一致,使总的冷量损失有所减小。

参考文献

[1] Traviss D P, Rohsenow W M, Baron A B. Forced-convection condensation inside tubes: a heat transfer equation for condenser design[J]. *Ashrae Trans*, 1973, 79(1): 157-165.

[2] Tuo H, Hrnjak P. New approach to improve performance by venting periodic reverse vapor flow in micro-channel evaporator[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(8): 2187-2195.

[3] 杨大海,韩丽丽,王书科,等. 家用直冷冰箱泡层优化研究[J]. *电器*, 2013(Suppl. 1): 134-137. (YANG Dahai, HAN Lili, WANG Shuke, et al. Research on foam optimization of direct cooling refrigerators [J]. *China Appliance*, 2013(Suppl. 1): 134-137.)

[4] 钟明,陈开松,尚殿波,等. 新标准下冰箱节能方法研究[J]. *轻工标准与质量*, 2015(4): 15-19. (ZHONG Ming, CHEN Kaisong, SHANG Dianbo, et al. Study of fridge energy-saving method under new standard [J]. *Standard & Quality of Light Industry*, 2015(4): 15-19.)

[5] 陈旗,晏刚,方忠诚,等. 直冷冰箱冷藏室门封传热特性研究[J]. *制冷学报*, 2015, 36(6): 66-73. (CHEN Qi, YAN Gang, FANG Zhongcheng, et al. A study on the transfer characteristics of refrigerating cabinet gasket [J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(6): 66-73.)

[6] 刘永辉,王晶,李标,等. 基于CFD技术的大容量风冷冰箱流场分析及改进设计[J]. *流体机械*, 2014, 42(7): 69-73. (LIU Yonghui, WANG Jing, LI Biao, et al. Numerical analysis of air flow field in air-cooled refrigerator

with large capacity and its design improvement [J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(7): 69-73.)

[7] 罗超,黄兴华,陈江平. 不同环境参数对间冷式冰箱蒸发器结霜换热性能的影响[J]. *制冷学报*, 2008, 29(1): 17-22. (LUO Chao, HUANG Xinghua, CHEN Jiangping. Effect of different parameters on frosting of evaporator in frost-free refrigerator[J]. *Journal of Refrigeration*, 2008, 29(1): 17-22.)

[8] 李智强,赵丹,丁国良,等. 间冷冰箱回风道的优化除霜设计[J]. *制冷学报*, 2016, 37(1): 77-83, 118. (LI Zhiqiang, ZHAO Dan, DING Guoliang, et al. Return air duct for indirect cooling refrigerator based on defrosting optimization[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(1): 77-83, 118.)

[9] 廖云虎,丁国良,林恩新,等. 间冷式冰箱蒸发器结霜模拟[J]. *制冷学报*, 2007, 28(6): 7-12. (LIAO Yunhu, DING Guoliang, LIN Enxin, et al. Simulation of evaporator for indirect cooling refrigerator under frosting conditions [J]. *Journal of Refrigeration*, 2007, 28(6): 7-12.)

[10] 李倩,欧阳新萍. 冷凝铜管排列方式对箱壁式冰箱换热性能的影响[J]. *制冷学报*, 2016, 37(4): 101-105. (LI Qian, OUYANG Xinping. Influence of condensation copper tube arrangement on the heat transfer performance for hot-wall refrigerator [J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(4): 101-105.)

[11] 万博闻,赵丹,丁国良. 间冷冰箱风道系统流量分配特性的模块化计算方法[J]. *制冷学报*, 2015, 36(3): 61-65. (WAN Bowen, ZHAO Dan, DING Guoliang. A modular computation method for flow distribution characteristics of air in duct system of indirect cooling refrigerator [J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(3): 61-65.)

[12] 王正,刘志峰,白连社,等. 冷凝风机导流罩对冰箱性能的影响[J]. *制冷学报*, 2014, 35(6): 114-118. (WANG Zheng, LIU Zhifeng, BAI Lianshe, et al. Effect of deflecting rings for condenser fan on performance of refrigerator [J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(6): 114-118.)

[13] 段焕林,陈爱东,苗翠平,等. 电冰箱制冷循环优化措施[J]. *计量与测试技术*, 2007, 34(3): 18-21. (DUAN Huanlin, CHEN Aidong, MIAO Cuiping, et al. Optimum measure of refrigeration cycle of refrigerator[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2007, 34(3): 18-21.)

[14] 唐琼辉,何国庚,郑贤德. 间冷式冰箱箱体的漏热与节能研究[J]. *流体机械*, 2002, 30(5): 56-58. (TANG Qionghui, HE Guogeng, ZHENG Xiande. The heat-leaking and energy-saving researches on cabinet of indirect-cool refrigerator [J]. *Fluid Machinery*, 2002, 30(5): 56-58.)

(下转第95页)

algorithm based on BP neural network[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2015, 44(6): 39-44.)

[11] 陆森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 13-18. (LU Sen, REN Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 13-18.)

[12] 苏李君,王全九,王铎,等. 基于土壤物理基本参数的土壤热导率模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 127-133. (SU Lijun, WANG Quanjiu, WANG Shuo, et al. Soil thermal conductivity model based on soil physical basic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 127-133.)

[13] Gori F, Corasaniti S. Theoretical prediction of the soil thermal conductivity at moderately high temperatures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(6): 1001-1008.

[14] Tarnawski V R, Gori F, Wagner B, et al. Modelling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures [J]. International Journal of Energy Research, 2000, 24(5): 403-423.

[15] 王铎,王全九,樊军,等. 土壤导热率测定及其计算模型

的对比分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 78-84. (WANG Shuo, WANG Quanjiu, FAN Jun, et al. Soil thermal properties determination and prediction model comparison[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 78-84.)

[16] 刘晨晖,周东,吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1877-1886. (LIU Chenhui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1877-1886.)

通信作者简介

王洋浩,男,教授,博士生导师,西安交通大学建筑节能研究中心主任,13227006940,E-mail: fhwang@mail. xjtu. edu. cn. 研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

About the corresponding author

Wang Fenghao, male, professor, Ph. D. supervisor, Head of Building Energy Research Center, Xi'an Jiaotong University, + 86 13227006940, E-mail: fhwang@mail. xjtu. edu. cn. Research fields: building energy efficiency and renewable energy technology.

(上接第 75 页)

[15] 曹云勤,刘瑞贞. 电冰箱制冷系数的提高[J]. 潍坊学院学报, 2006, 6(4): 72-73. (CAO Yunqin, LIU Ruizhen. Raising of the refrigeration coefficient [J]. Journal of Weifang University, 2006, 6(4): 72-73.)

[16] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.)

[17] “超龄”家电隐患多——家电安全使用年限[J]. 家用电器, 2013(4): 35-37. (More hidden troubles to overage household appliances—household appliances safe service life[J]. Electrical Appliances, 2013(4): 35-37.)

通信作者简介

陶文铨,男,教授,西安交通大学,能源与动力工程学院,热流科学与工程教育部重点实验室,(029)82669106,E-mail: wqtao@mail. xjtu. edu. cn. 研究方向:先进的传热与流动数值模拟方法及其工程应用;强化传热与节能技术及其工程应用;能源与环境工程问题的多尺度模拟;微细尺度结构中的流动与传

热问题;航天航空工程中的热流科学问题;新能源与可再生能源的应用基础研究;湍流模型及工程应用;能效评估与能源经济。

About the corresponding author

Tao Wenquan, male, professor, Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, + 86 29-82669106, E-mail: wqtao@mail. xjtu. edu. cn. Research fields: advanced computational methods in fluid flow and heat transfer and their engineering applications; heat transfer enhancement & energy-saving techniques and their applications; multiscale simulations of problems in energy and environmental engineering; fluid flow and heat transfer in mini-micro-nano structures; thermal and fluid science problems in aerospace engineering; fundamental studies of sustainable and renewable energy; turbulence modeling and its engineering applications; energy-efficiency evaluation and energy economics.