

文章编号: 0253-4339(2013)02-0049-06  
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.049

# 风冷冰箱除霜控制技术研究与应用

汤晓亮<sup>1</sup> 王铁军<sup>1</sup> 杨帆<sup>2</sup> 江斌<sup>1</sup> 王正<sup>1</sup>

(1 合肥工业大学 合肥 230009; 2 合肥美菱股份有限公司 合肥 230601)

**摘要** 研发了一种可间接辨识冰箱制冷能力变化的时间-温差法自动除霜控制技术,在剔除非稳态扰动的条件下,以压缩机累计运行时间为基本约束要素,根据蒸发温度与冷冻室温度的差值变化预估冰箱制冷能力的衰减程度。进行了典型环温、热湿负荷的实验研究,测量了风门启闭、开关门等扰动条件下冰箱内部温度参数的变化,以此为基础建立了时间-温差法自动除霜控制规则。该除霜控制技术在BCD-350W冰箱的应用结果表明:冰箱能够在较宽的环境温度和不同的热湿负荷条件下正常工作,抗干扰能力和环境适应性强,化霜能耗占总能耗的比重下降了40%左右,节能效果明显。

**关键词** 热工学; 除霜控制; 风冷冰箱; 蒸发温度; 温差

**中图分类号**: TM925.21

**文献标识码**: A

## Study on Defrosting Control Technology of Air Cooled Refrigerator

Tang Xiaoliang<sup>1</sup> Wang Tiejun<sup>1</sup> Yang Fan<sup>2</sup> Jiang Bin<sup>1</sup> Wang Zheng<sup>1</sup>

(1. Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China; 2. Hefei Meiling Co., Ltd., Hefei, 230601, China)

**Abstract** A kind of automatic defrosting control technology, named time-temperature difference method, was developed, which can indirectly identify the change of refrigerating capacity of refrigerator. Based on the compressor running time, degree of attenuation of the refrigerating capacity was estimated according to the change of the difference between the evaporation temperature and freezer temperature, while unsteady-state disturbances were removed. Experiments of typical ambient temperature and heat and moisture load were carried out, internal temperatures were measured when electric air door and box door was opening or closing. Then the automatic defrosting control rule was established under above results. The application of this new kind of defrosting control technology in the BCD-350W shows that the refrigerator can work properly in wide range of ambient temperature and different heat and moisture loads, the anti-interference ability and adaption ability to environment is strong, the percentage of defrosting energy consumption in total energy consumption is decreased by about 40% and energy saving effect is obvious.

**Keywords** pyrology; defrosting control; air cooled refrigerator; evaporating temperature; temperature difference

风冷式冰箱采用强迫对流换热方式使储藏室内的空气流经蒸发室进行热湿交换,通过箱内空气循环维持各储藏空间的温度稳定在设定范围。冰箱运行时循环空气中的水分在蒸发器翅片表面上析出并冻结成霜,随着冰箱的持续运行霜层不断增厚,增加了蒸发器换热热阻和循环空气的流通阻力,引起循环空气流量减小、蒸发温度下降、冰箱制冷能力衰减和压缩机启停比增大,因此除霜控制技术对提高冰箱保鲜品质、降低运行能耗有重要的影响<sup>[1-4]</sup>。

影响风冷冰箱蒸发器结霜的主要因素是热、湿负荷,除霜控制的核心技术是除霜切入点的识别方法,基本上可归纳为直接测量霜层厚度<sup>[5-6]</sup>和间接测量预估<sup>[7-9]</sup>2类方法。由于直接测量法受制于传感器成本及其他干扰因素,至今难以在冰箱产品中商业化应用,因而间接测量预估方法成为目前除霜控制技术设

计的主流。早期流行的定时除霜法根据制冷压缩机累计运行时间 $t_c$ 确定除霜切入点,由于不能较好地反馈热湿负荷的影响,易出现过早或过迟除霜操作而被淘汰。目前广泛应用的时间-温度法在累计运行时间 $t_c$ 的基础上,增加了一个识别参数蒸发温度 $T_0$ ,由于 $T_0$ 的降低与霜层厚度的增长相关联,当 $t_c$ 条件满足并检测到蒸发温度达到下限值时,进入除霜工况;引入间接参数 $T_0$ 在一定程度上可反映湿负荷对结霜速度的影响,避免湿负荷较小时过早除霜,但其不足之处主要表现在:不能反映冰箱环境温度变化,在大容量冰箱中易受到风门启闭等扰动的影响,不能较为客观地反映蒸发器的传热状况,难免无法找到理想的除霜切入点,容易产生除霜延迟,导致除霜不净或除霜时间过长影响保鲜质量。臧润清等<sup>[10]</sup>提出基于冷凝压力与蒸发压力比值、Lawrence和Evans<sup>[11]</sup>提出基于蒸

收稿日期: 2012年5月28日

蒸发器表面结霜时管内制冷剂流动的不稳定性、Han等<sup>[12]</sup>提出通过检测箱内空气湿度的变化等预估模型,虽然具有一定的科学性,但在冰箱上实施存在传感器选择与安装、成本、预估模型可靠性和非稳态干扰等技术和经济性问题。综合环境适应性、可操作性、可靠性和成本等技术经济因素,选择温度和时间物理量作为除霜控制的识别参数较为理想。在进行冰箱动态仿真和实验研究的基础上,研发了一种可间接辨识冰箱制冷能力变化的时间-温差法自动除霜控制技术。

### 1 时间-温差法的基本原理

当蒸发器翅片表面结霜时,若忽略管壁热阻和管内垢层热阻,蒸发器的传热系数  $K$  可表示为:

$$K = \left[ \frac{1}{\alpha_{a,e}} + R_f + \frac{\tau}{\alpha_b} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_{a,e}$  为结霜工况下翅片外表面的当量换热系数;  $R_f$  为外表面积灰等所形成的附加热阻;  $\alpha_b$  为管内制冷剂沸腾换热系数;  $\tau$  为肋化系数。

结霜工况下的翅片管外表面当量换热系数  $\alpha_{a,e}$  可表示为:

$$\alpha_{a,e} = \eta_{f,b} \left[ \frac{1}{\xi \alpha_a} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中:  $\eta_{f,b}$  为翅片管效率;  $\xi$  为析湿系数;  $\alpha_a$  为空气侧换热系数,对于结构特性参数一定的翅片管而言,空气侧换热系数一般与迎面风速的  $n$  次方成正比,即  $\alpha_a \propto v_a^n$  ( $n$  为小于1的正数);  $\delta_s$ 、 $\lambda_s$  分别为霜层厚度和导热系数,  $\lambda_s = 0.001202\rho_s^{0.963}$ ,  $\rho_s$  为霜层的密度,文献[3]的研究认为:水蒸气结霜主要影响霜层厚度,而对密度的影响较小,故在此忽略密度的变化。

由式(1)和(2)可知,当蒸发器翅片表面霜层增厚时,换热热阻和空气流通阻力均增大,蒸发器过流空气量减小,导致空气侧换热系数  $\alpha_a$  和蒸发器的传热系数  $K$  减小,使得冷冻室温度与蒸发温度的差值  $\Delta T$  逐渐增大,即呈现“霜层增厚→传热系数  $K$  减小→ $\Delta T$  增大”的变化规律。

$\Delta T$  间接反映冰箱制冷能力的衰减程度,并可作为除霜控制规则的一个识别参数,其依据是:冰箱正常工作时,冷冻室温度随蒸发温度  $T_0$  下降而下降,  $\Delta T$  相对稳定;随着霜层厚度增加,  $\Delta T$  逐渐增大;霜层增厚到一定程度,送风冷量小于冷冻室的热负荷,冷冻室温度不降反升,如不及时除霜,低压保护致使压缩机停机,并频繁启停。

## 2 时间-温差法除霜控制规则

### 2.1 实验设计

实验样机:风冷冰箱 BCD-350W,上藏下冻结构;上层为对开门冷藏室,有效容积 249L,温控范围 2~8℃;下层为抽屉型冷冻室,有效容积 101L,温控范围 -16~-24℃。压缩机输入功率为 120W,化霜加热器输入功率为 137W,控制规则采用时间-温度法。

实验设备:温度采集仪选择 DAS-IV 型温度巡检仪,示值误差为  $\pm 0.5\% F \cdot S$ ;温度传感器选用 Pt100 铂电阻,标定测量范围为 -50℃~+100℃,精度  $\pm 0.2\text{℃}$ ,分别安装在蒸发器管壁、送风口、冷冻室回风口、冷藏室回风口,测量蒸发温度、送风温度、冷冻室温度和冷藏室温度。

冰箱负载:冷藏室内存放 20kg 水果、蔬菜和饮料,冷冻室内存放 75% 负载包。

表1 实验工况表

Tab. 1 The experiment table

工况	环境温度/℃	相对湿度/%	有无化霜
1#	38	85	无
2#	25	45	无
3#	38	85	有
4#	25	45	有
5#	12	85	有

实验工况:如表1所示。

实验方法:根据测得的冷冻室温度、蒸发温度和冷藏室温度,计算出冷冻室温度和蒸发温度的差值  $\Delta T$ ,绘制温度-时间曲线图,观察曲线特性,对不同工况进行对比分析,提出适应于环境变化的除霜控制规则。

### 2.2 实验结果与分析

图1和图2分别为1#、2#实验工况各特征点的温度-时间曲线。从图中可以看出,0~800min 时间内  $\Delta T$  值缓慢变化,而 800min 后速率明显加快,冷冻室温度先降低后反而升高。这是由于冰箱开始制冷时,蒸发器表面的霜较少,传热热阻小,传热效果好,且早期的霜层增大了换热面积和表面粗糙度,从而增加了换热量,提高了换热器的传热性能<sup>[13]</sup>,冷冻室温度随着蒸发温度的下降而下降,两者之间的差值变化缓慢;随着霜层厚度的增加,导热热阻随之增大,  $\Delta T$  趋势性增大,当霜层厚到一定程度时,制冷性能恶化,压缩机频繁启停。图中温度多次出现波动主要是由于压缩机的停机和冷藏风门的开闭。

图3为3#实验工况下的时间-温度曲线,图中

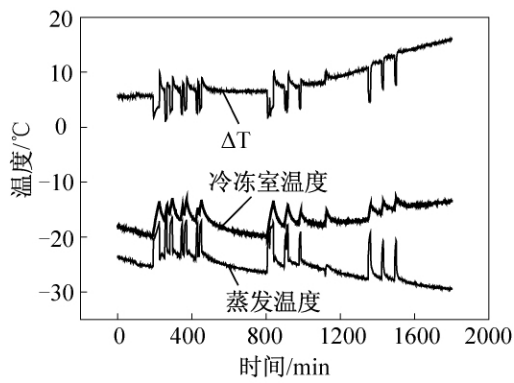


图1 1#工况下温度随时间的变化曲线  
Fig. 1 Curves of temperature variation with time in No. 1 operating condition

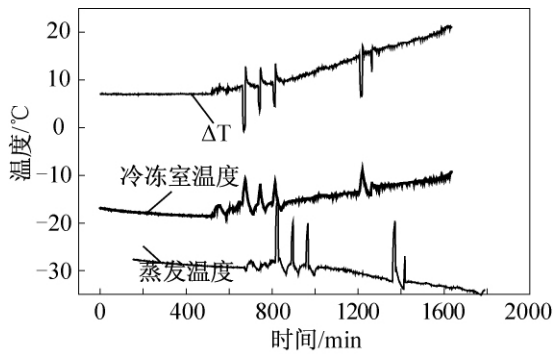


图2 2#工况下的温度随时间的变化曲线  
Fig. 2 Curves of temperature variation with time in No. 2 operating condition

100 ~ 600min 为一个制冷周期,其中 100 ~ 250min 为化霜周期,化霜加热器先启动,待检测点温度达到设定值停止加热,进入滴水时间; 250 ~ 600min 为制冷时间,压缩机启动,制冷循环开始。

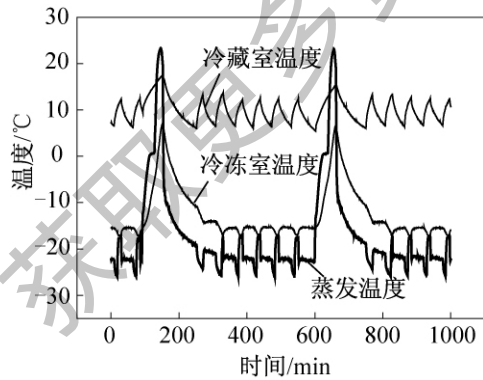


图3 3#工况下的温度随时间的变化曲线  
Fig. 3 Curves of temperature variation with time in No. 3 operating condition

为了更细致地分析冰箱具体运行情况,分别选取 3# ~ 5#工况一时间段内的时间-温度曲线,如图 4 ~ 6 所示。由图可以看出,不同工况的  $\Delta T$  值不同,环境

温度越高  $\Delta T$  值越小,其原因为环境温度越高时,冷凝温度越高,导致蒸发温度相对提高,而冷冻室温度是由用户要设定的,变化相对不大,因此高环境温度下的  $\Delta T$  值要比低环境温度时的  $\Delta T$  值小。

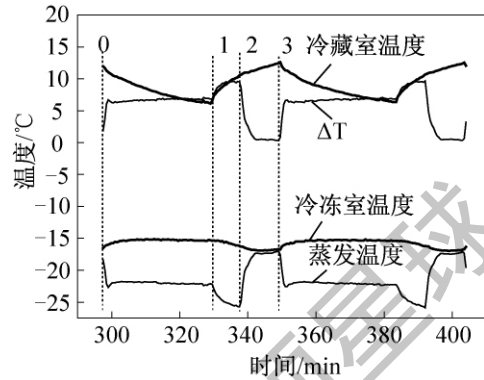


图4 3#工况下一段时间内的温度随时间的变化曲线  
Fig. 4 Curves of temperature variation with time in a period of time of No. 3 operating condition

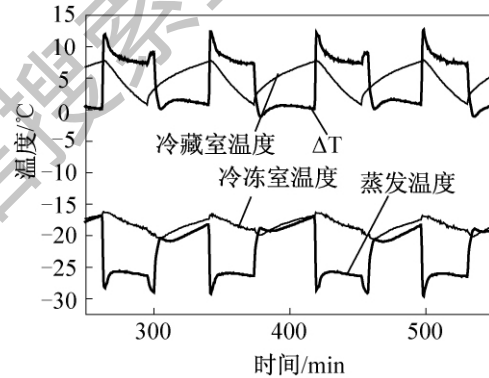


图5 4#工况下一段时间内的温度随时间的变化曲线  
Fig. 5 Curves of temperature variation with time in a period of time of No. 4 operating condition

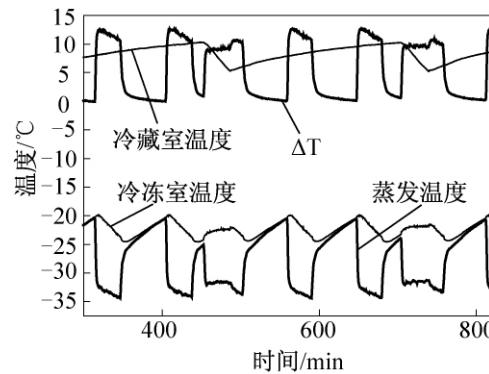


图6 5#工况下的温度随时间的变化曲线  
Fig. 6 Curves of temperature variation with time in No. 5 operating condition

图4中 0-1 段为压缩机工作、冷藏风门打开时的曲线,冷藏室温度、冷冻室温度和蒸发温度同时下降;

1-2 段为压缩机继续开启而冷藏风门关闭时的曲线,冷藏室温度升高,而冷冻室温度和蒸发温度继续下降;2-3 段表示压缩机停机,冷藏风门仍然关闭的曲线,由于停止制冷,导致箱内温度均上升。可以看出,冷藏风门开启时的  $\Delta T$  值要比关闭时的值小,这是因为冷藏室温度高于冷冻室温度,当冷藏风门开启时,蒸发室内的温度迅速上升,而冷冻室温度变化缓慢,导致  $\Delta T$  值变小。同样,图5、图6中  $\Delta T$  值的变化规律类似。

### 2.3 时间-温差法除霜控制规则

根据上述实验,可归纳为:1)  $\Delta T$  值随压缩机累计工作时间的增长而变大;2) 冷藏风门开启时的  $\Delta T$  值比关闭时的小;3) 运行工况不同, $\Delta T$  值不同,且  $\Delta T$  值随环温的升高而变小。

若用参数表示,1) 当冷藏风门开启时,25℃环境温度下的  $\Delta T$  值(用参数  $\alpha_1$  表示)比12℃环境温度工况下的  $\Delta T$  值低  $\Delta\alpha$ ,而比38℃时的  $\Delta T$  值高  $\Delta\alpha$ ;同样,当冷藏风门关闭时,25℃环境温度工况下的  $\Delta T$  值  $\alpha_2$  (其中,  $\alpha_2 > \alpha_1$ ) 比12℃环境温度工况下的  $\Delta T$  值低  $\Delta\alpha$ ,而比38℃时的  $\Delta T$  值高  $\Delta\alpha$ 。2) 相同环境温度下, $\Delta T$  增大  $\Delta\beta$  值后制冷效率显著下降,对于不同型号的风冷式冰箱,参数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\Delta\alpha$  和  $\Delta\beta$  的值不同,可通过实验得出,表2为冰箱正常制冷时的  $\Delta T$  值。

表2 3种环境温度下冰箱正常工作时  $\Delta T$  的理论值

Tab.2 The theoretical values of  $\Delta T$  with 3 kinds of ambient temperature when refrigerator works normally

环境温度/℃	冷藏风门开启时的 $\Delta T/℃$	冷藏风门关闭时的 $\Delta T/℃$
12	$\alpha_1 + \Delta\alpha$	$\alpha_2 + \Delta\alpha$
25	$\alpha_1$	$\alpha_2$
38	$\alpha_1 - \Delta\alpha$	$\alpha_2 - \Delta\alpha$

根据表2给出的三种环境温度下的  $\Delta T$  值,若认为  $\Delta T$  的理论值随环境温度呈线性变化,则绘制出  $\Delta T$  随环境温度的变化曲线,如图7所示,由此可得出  $\Delta T$  关于环境温度的函数关系式,将此  $\Delta T$  值作为冰箱正常工作时的理论值存储于控制规则中,当运行过程中检测到  $\Delta T$  值比理论值高  $\Delta\beta$  时,便可认为蒸发器结霜严重,及时进入化霜程序<sup>[14]</sup>。

### 3 应用研究

进行了化霜控制规则改进前后的实验对比,根据表3的实验数据计算的化霜能耗占总能耗的比值如图8所示,改进前后冰箱蒸发器的结霜照片如图9、

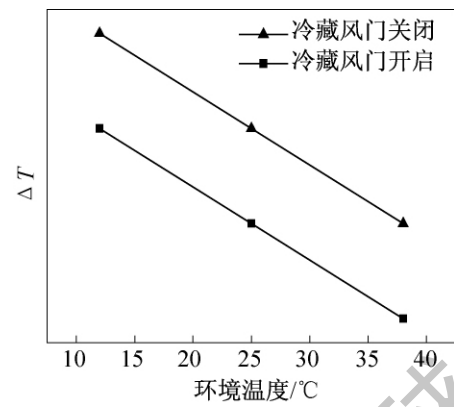


图7 冰箱正常工作时  $\Delta T$  的理论值随环境温度的变化曲线  
Fig.7 Curves of theoretical values of  $\Delta T$  variation with ambient temperature at normal working of refrigerator

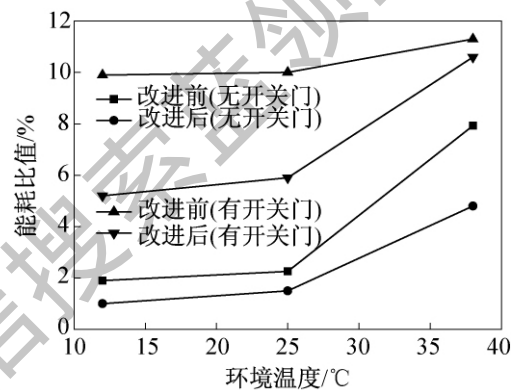


图8 改进前后化霜能耗占总能耗的比值  
Fig.8 The percentage of defrosting energy consumption in total energy consumption

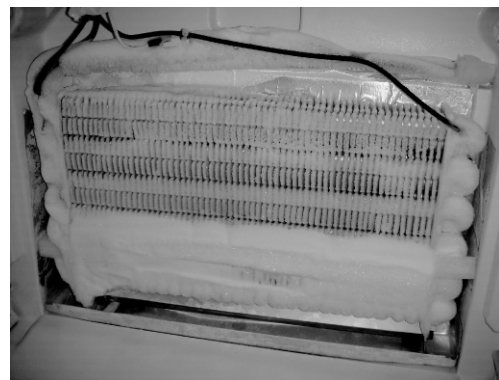


图9 改进前蒸发器结霜情况

Fig.9 Evaporator frost condition before improvement

10 所示。

对比表3中除霜控制规则改进前后冰箱在有无开关门情况下的化霜周期及加热时间,可以看出,改进后的化霜周期在不同情况下均有所延长,且无开关门时的化霜周期比有开关门时的长,实现不开门少化霜,多开门多化霜,说明新型除霜控制方法能够适应不同环境温度下的运行要求,且除霜切入及时。由图

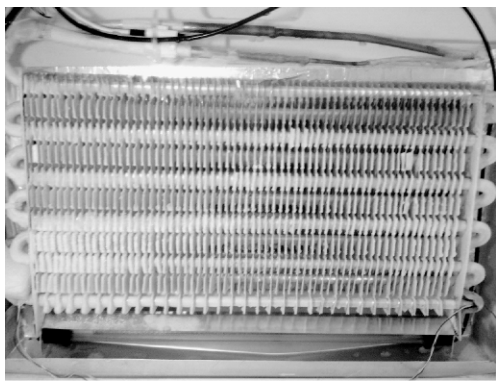


图 10 改进后蒸发器的结霜情况

Fig. 10 Evaporator frost condition after improvement

8 可以看出,改进后化霜能耗占总能耗的比值相对改进前的比值明显减小,且在无开关门的情况下的能耗比值小于 5%,达到除霜节能设计指标。

表 3 改进前后化霜性能实验数据

Tab. 3 The experimental data of defrosting performance before and after improvement

环境温 度/℃	化霜周期/min		加热器启动时间/min	
	无开门	有开门	无开门	有开门
改进前	12	2700	512	45
	25	2315	485	45.9
	38	509	397.6	35.7
改进后	12	4400	1010	38
	25	3200	826	42
	38	1072	467	45

注:开关门频率为冷藏门 30min 一次,冷冻门 60min 一次,且开 12h 停 12h。

对比图 9、图 10 所示的改进前后蒸发器结霜图片,可以看出改进后的化霜效果明显好于改进前,这是因为改进前除霜控制规则未能准确找出除霜切入点,蒸发器需要化霜时未能及时进入化霜循环,使得霜层越积越厚,在下一轮制冷周期内形成“二次结霜”;而改进后的除霜控制规则能够准确判断出除霜需要,化霜及时,无成形冰块。

## 4 结论

1) 风冷冰箱结霜实验表明,蒸发器表面的结霜速度与热湿负荷相关,环境温度越高,热湿负荷越大,结霜速率越快;蒸发温度和冷冻室温度的差值  $\Delta T$  与蒸发器表面的结霜程度相关,可间接预估风冷冰箱制冷能力的衰减程度;

2) 应用  $\Delta T$  作为除霜控制参数,能够较准确判断除霜的切入点,除霜对比实验显示:应用时间-温差法

除霜控制技术的能效明显提高,环境适应性好。

3) 时间-温差法除霜控制技术具有普遍的适应性,针对不同型号的风冷冰箱,通过实验确定特征参数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\Delta\alpha$  和  $\Delta\beta$ ,即可使用。

4) 该时间-温差法除霜控制技术已在 BCD-350W 冰箱中投入使用,目前该技术正在向 BCD-500W 冰箱转化研究。

## 参考文献

- [1] Sekera D, Karatas H, Egrican N. Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part I, II [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 367-377.
- [2] 张兴群,袁秀玲,黄东,等.强制对流翅片管式换热器结霜性能的研究[J].西安交通大学学报,2006,40(3):353-356. (Zhang Xingqun, Yuan Xiuling, Huang Dong, et al. Study on Performance of Forced Convection Finned-Tube Exchanger under Frosting Conditions [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2006, 40(3): 353-356.)
- [3] 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.)
- [4] 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.)
- [5] Xiao J, Wang W, Zhao Y H, et al. An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost-control [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1350-1357.
- [6] Xiao J, Wang W, Guo Q C, et al. An experimental study of the correlation for predicting the frost height in applying the photoelectric technology [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 1006-1014.
- [7] 许东晟,陈汝东.除霜和除霜控制研究[J].流体机械,2006,34(1):69-73. (Xu Dongsheng, Chen Rudong. Study on Defrost and Defrosting Control [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(1): 69-73.)
- [8] 秦倬吉,赵杏根,唐鲁彦,等.间冷冰箱的除霜控制方法:中国,CN101726152A [P]. 2010-06-09.
- [9] 王铁军,刘向农,吴昊,等.风源热泵模糊自修正除霜技术应用研究[J].制冷学报,2005,26(1):29-32. (Wang Tiejun, Liu Xiangnong, Wu Hao, et al. Research on Fuzzy Self-tuning Defrosting Technology of Air Source Heat Pump Air conditioners [J]. Journal of Refrigeration, 2005

- (1): 29-32.)
- [10] 方箐, 臧润清, 车晶. 恒温恒湿系统最佳除霜时刻控制的研究[J]. 制冷与空调, 2004, 4(2): 45-49. ( Fang Zheng , Zang Runqing , Che Jing. Experimental Study on The Optimal Defrosting Point of The Contant Temperature and Humidity System [J]. Refrigeration and Air-conditioning , 2004 ,4( 2) : 45-49. )
- [11] Lawrence J M W , Evans J A. Refrigerant flow instability as a means to predict the need for defrosting the evaporator in a retail display freezer cabinet [J]. International Journal of Refrigeration , 2008 ,31( 1) : 107-112.
- [12] Han J H , Shin Y S , Han J S , et al. Refrigerator and defrost control method thereof: US , US8033124B2 [ P ]. 2011-10-11.
- [13] Tassau S A , Datta D. Influence of supermarket environmental parameters on the frosting and defrosting of vertical multideck display cabinets [ J ]. ASHRAE Transactions Symposia , 1999 ,105 ( 1) : 491-496.
- [14] 杨帆, 魏邦福, 汤晓亮, 等. 无霜冰箱自动除霜控制方法: 中国, CN102297565A [P]. 2011-12-28.

作者简介

汤晓亮 男( 1988 - ) 在读硕士研究生, 合肥工业大学制冷与低温工程专业, 13956075862, E-mail: nttangxiaoliang@ 126.com。研究方向: 制冷空调装置现代设计与制造技术。

About the author

Tang Xiaoliang( 1988 - ) , male , Master candidate , Refrigerant and Cryogenics Engineering , Heifei University of Technology , 13956075862 , E-mail: nttangxiaoliang @ 126. com. Research fields: modern design and manufacturing technology of refrigeration and air conditioning device.

获取更多资料 微信搜索 蓝领学术