文章编号：1671-6612（2020）04-446-07

亲水涂层翅片应用于风冷冰箱的性能研究

刘忠宝　高嘉阳　李婧祎　李　斌

（北京工业大学环能学院　北京　100124）

【摘　要】 在制冷领域结霜现象不可避免，霜层通常会对制冷性能造成影响。由于亲水性涂层可以起到一定的抑制结霜的效果，通过搭建模拟风冷冰箱的实验台，在蒸发器翅片表面涂覆亲水材料，设计合理的实验方案，建立对照实验组，分析比较亲水涂层抑霜延缓结霜的能力、耗电量和功率的变化，对蒸发器换热能力的影响，并对涂层的稳定性进行初步研究，讨论了技术可行性和经济可行性。通过实验对比发现：亲水性翅片应用于风冷冰箱可有效延缓结霜，而且提升了蒸发器的换热性能从而提升了制冷效率。相同的工况下系统的耗电量和功率都有所降低，连续运行多个循环涂层稳定性较好，且该亲水性翅片适用范围广，经济效益好。但仍需合理控制融霜的时长和退出时间点，以保证其亲水特性。

【关键词】 亲水性涂层；风冷冰箱；蒸发器；延缓结霜；节能

中图分类号　TB69　　文献标识码　A

Study on the Performance of Hydrophilic Coated Fins in Air-cooled Refrigerators

Liu Zhongbao　Gao Jiayang　Li Jingyi　Li Bin

(College of Energy, Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

【Abstract】 Frost formation is inevitable in the field of refrigeration,frost layer usually affects the performance of refrigeration. Because hydrophilic coating can play a certain role in inhibiting frost formation, a reasonable experimental scheme is designed by setting up an experimental platform simulating air-cooled refrigerator and coating hydrophilic material on the surface of evaporator fin, and a control experimental group is established to analyze and compare the hydrophilic coating's ability to resist frost and delay frost formation, the change of electricity consumption and power, and the influence on the heat transfer ability of evaporator. The stability of the coating is preliminarily studied and the technical and economic feasibility is discussed.The application of hydrophilic fin in air-cooled refrigerator can effectively delay frosting and improve the heat transfer performance of evaporator so as to improve the cooling efficiency. Under the same working conditions, the power consumption and power of the system have been reduced to some extent. The continuous operation of multiple circulating coatings has good stability, and the hydrophilic fins have a wide range of application and good economic benefits. However, the defrosting duration and exit point should be controlled reasonably to ensure its hydrophilic characteristics.

【Keywords】 Hydrophilic coating; Air-cooled refrigerator; Evaporator; Delay frost formation; Energy saving

---

基金项目：国家自然科学基金资助项目（项目编号：No.51776006）
作者（通讯作者）简介：刘忠宝（1971-），男，副教授，E-mail：liuzhongbao@bjut.edu.cn
收稿日期：2020-09-17

0　研究背景

风冷冰箱因其温度波动小，容量大的特点被认为是今后冰箱行业的发展趋势，然而在实际运行中仍会出现蒸气在蒸发器表面凝结成霜的情况，并且

过厚的霜层使得热阻增加、空气阻力增大、气体流量减小进而使得蒸发器的换热性能受到影响。传统冰箱融霜方式为电加热融霜，化霜的同时会消耗大量能源，在节能减排的环境下，抑制结霜显得尤为重要[1,2]。

利用表面处理技术进行延缓结霜的研究是提高换热器换热效率方法之一，国内外学者也做了较多的理论和实验研究，主要集中在制作亲水性表面和疏水性表面。对于亲水性涂层抑制结霜的机理目前还存在争议，但大多数人认为是由于亲水涂料含有强吸水性物质，能够在结霜初期把凝结在冷板表面上的水珠吸附到由涂料制成的亲水涂层内部，而且涂层内含有能降低水的冰点的物质，使得吸附到涂层内部的水珠不发生冻结，从而延缓形成初始霜晶[3]。

Okoroafor[4]在高聚物的亲水表面进行了抑霜试验，试验进行了两个多小时并在表面取得了较好的抑制结霜效果，高聚物亲水表面结霜速率及霜层厚度减少了 10%～30%，然而亲水表面涂层的厚度较厚，通常大于 0.7mm 以上。所以涂层材料虽然起一定的防霜抑霜作用，涂层厚度的增加导致在实际使用过程中换热器表面的热阻增加，同时也会减少了空气流通面积，Okoroafor 并没有指出这种亲水表面涂层在重复的使用之后抑制结霜效果。

Christian J L 等人[5]研究了在强迫对流条件下亲水表面结霜的特性，提出了霜的厚度随时间、过冷度和表面接触角变化的半经验全代数表达式。对于在亲水表面结霜的不同参数（接触角、风速、过冷度、温湿度）进行了比较分析，从理论上进行一定研究，其代数表达式在能够在误差为±15%的范围内再现 90%的数据，并得到：表面温度和过冷度对亲水涂层表面结霜影响较大。

东南大学的杨剑[6]研究对比了普通金属表面以及亲水性表面结霜的过程发现吸水性涂层的表面结霜结霜时间晚，晶体稀疏且成倒立状，霜柱在短时间内还起到翅片的作用增强换热。在显微镜下观察可以看到空气中的水分子吸附到亲水性表面后直接溶入涂层。实验表明，表面涂亲水性涂层后结霜的时间延迟，结霜量以及霜层厚度都比未处理的表面要小。研究可以看出亲水性涂层在低温低湿的工况延缓结霜，涂层越厚效果越好。

北京工业大学刘中良[7]在 2004 年开发了一种新型的亲水涂料，在空气的相对湿度比较低、冷壁面温度较高的情况下抑霜的效果较好，但涂料的成膜厚度较厚。在湿度高、壁温低的条件下，其抑霜的作用不明显，此外表面比较柔软，抗冲击能力差。之后勾昱君[8]等人在之前配方的基础上对工艺和配方加以改进，使用该涂层后使得融霜的周期比之前延长 60min，并在冰箱的内壁涂上并且实际运行了六个月发现涂层形成的霜晶非常稀薄，抑制结霜的效果明显。

付德刚等[9]对超亲水性纳米二氧化钛光催化复合膜及其制备方法和应用进行了探究，制备出了一种复合膜在无光条件下仍保持超亲水性。

目前国内外的一些学者针对蒸发器的结霜导致能耗增加的问题提出了许多改进方案，亲水涂层的研究开展较早，在热泵和房间空调器上应用较多，然而在冰箱蒸发器翅片应用还较少。涂层在实际应用的过程中较为简便，根据风冷冰箱蒸发器的特点选择合适的涂层及涂层工艺，研究涂层在实际冰箱的应用是十分必要的。本文通过搭建模拟风冷冰箱的实验台，结合实际换热器的形状和特点，选择合适的亲水涂层，通过对比试验，研究亲水涂层对于蒸发器延缓结霜及对系统冷却能力、功耗的影响，分析其技术可行性与经济可行性。

1　实验装置及实验方案

1.1　实验装置

1.1.1 亲水涂层蒸发器

表 1　涂层的物理性质

Table 1　Physical properties of the coating

物理性质	具体情况
外观	透明无色
主要成分	纳米二氧化硅
PH 值	8
光泽度	普通
粘度	1.2CP（25℃）
可燃性	不可燃
涂膜硬度	4H
工作温度	−50℃～200℃
接触角	5°
耐热性	200℃

耐水性	不起泡/不剥落/不生锈

亲水涂层材料种类多，不同种材料之间加工的工艺流程不同，部分亲水涂层加工难度大，成本高，最终实验选用的亲水涂料为子西莱环保科技有限公司生产的 ZXL-CQS 超亲水型纳米自清洁涂料，该涂料为无色透明液体，操作简单，牢固度高，无毒无污染，常温干燥固化即可，涂层经测试 2000h 耐老化，耐冲刷，涂料可在经处理的物体表面形成一层高密度稳固的全透明隐形纳米超亲水透明薄膜，水滴与纳米涂层的接触角小于 5°，涂层成膜厚度 1 到 2μm。纳米薄膜超亲水性可以吸附空气中的水分，形成薄薄的水膜，而且当水珠落在薄膜表面会迅速铺开形成水膜，该涂料相关物理测试性能如表 1 所示。

使用无水乙醇及去离子水对蒸发器进行清洁处理，选用 0.3mm 以下口径的高压喷枪，流量调低，均匀喷涂于清洁后的蒸发器表面，刚好喷湿润而不流挂，以涂层形成均匀水膜为准，待纳米自清洁涂料薄膜风干 24h 后，完成亲水涂层蒸发器的制作。

1.1.2 模拟风冷冰箱试验台的搭建

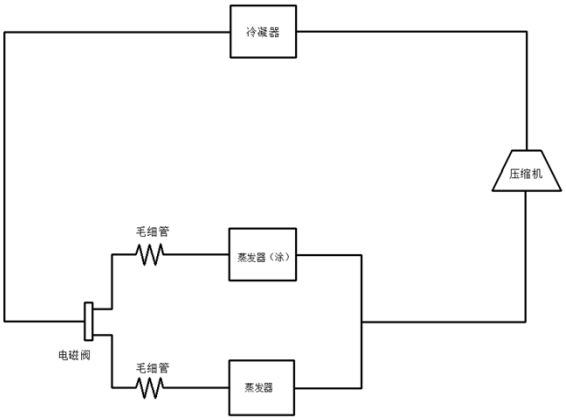

图 1　模拟风冷冰箱箱体内部结构

Fig.1　Simulated internal structure of air-cooled refrigerator cabinet

本实验台系统包括制冷四大部件：压缩机、冷凝器、蒸发器及节流装置。为模拟风冷冰箱外部保温结构，采用比重轻、耐冲击、保温性能较好、耐水、价低且容易加工的泡沫塑料制作本实验台的箱体及箱盖。实验用的箱体长 53cm，宽 51cm，高 24cm，箱壁厚 2.5cm。为便于观察，在箱盖上设置两个与蒸发器位置对应的方形窗口并加盖透明玻璃盖板。箱体内将空间平均分为两个部分，中间用保温泡沫塑料隔板隔开，两边分别放置一个蒸发器及一个风扇。两侧蒸发器及风扇的大小、规格、布置位置完全一致。蒸发器距箱体外壁面 15.5cm，风扇放置在换热器的同一横向位置，且距离右壁面 22cm，距离箱顶高 4cm，整个箱体内部结构如图 1 所示，启动风扇使得箱内空气不断循环，气流均匀的通过蒸发器翅片表面，实现模拟风冷冰箱的强迫对流换热。其中风扇规格为 12cm×12cm，高 24cm，功率为 20w，蒸发器选用优质纯铝翅片式换热器（科威力公司生产），型号为 FAN-0.38/1.2，换热面积 1.2m^2，长 205mm，宽 45mm，高 210mm，铝箔 0.2mm 厚，铝箔间隙 3mm，蒸发器传热系数高、防腐性能好。

1.1.3 温度测量系统

在温度的测量上实验选择多个单一测点数字显示电子测温度计，温度测量误差±1℃，温度计测量范围−50℃～110℃。温度计测点布置在：蒸发器的出口、蒸发器的入口、蒸发器壁面、负载。温度测点的布置具体位置如图 2 所示。

图 2　温度测量系统的测点分布

Fig.2　Measuring point distribution of temperature measuring system

1.1.4 其他装置

实验采用 PF9830 三相智能电量测量仪，测量实验系统耗电量以及功率智能功率测量仪的参数如表 2 所示。

使用高清工业内窥镜对霜层实时观测，镜头直径 8mm，焦距：3～10cm，镜头处带有可调节亮度的 LED 灯。将内窥镜正对翅片固定放置在箱体内，外连电脑。

为维持高湿度的实验条件，箱体内放置一个小型的空气加湿器，加湿器功率为 2W，大小为 78mm×78mm×105mm，可加水 200ml，喷雾量约 25～

30ml/L。为了防止加湿器内的水结冰，在加湿器外加保温棉，经实际使用验证，系统运行 3h，加湿器内部的水未冻结，仍可以正常使用。

表 2　PF9830 三相智能电量测量仪的参数

Table 2　Parameters of PF9830 three-phase intelligent electricity meter

参数	数值
型号	PF9830
三窗口显示	V、A、W、VA、var、PF、Hz、deg、ORD、CF
输入电压	600V/300V/150V
输入电流	50A/10A/2A
量程切换	自动手动均可
功率因素	-1.000～1.000
频率范围	DC/AC:45Hz～65Hz, Band 5kHz
测试精度	±（0.4%读数+0.1%量程+1 字）

1.2　实验方案

实验台准备有两套完全相同的普通铝翅片蒸发器，选择其中一套作为备用组。实验组内需放置 4 个温度传感器、1 个内窥镜、1 个加湿器及实验负载。开机前打开箱体使得箱体内温度与室温相同，通过温度传感器记录该温度，箱体内初始设定湿度 80%至 90%。

1.2.1 冷却速度试验

步骤一：为延迟负载结霜，配制 800ml 浓度为 15%的盐水，在开机运行前将盐水与外部温度传感器相连，待示数稳定后读取数据并记录。步骤二：将盐水放入箱体并开机运行。步骤三：每隔 5min 记录盐水温度，直到盐水温度降到-10℃。

蒸发器表面涂附亲水涂层后，保证盐水配比、容积及初始温度不变，重复步骤二至步骤三，将上述数据整理制成表格。

1.2.2 结霜实验

步骤一：选择箱体某一位置固定安装内窥镜，并外接电脑。步骤二：开机运行并持续观测蒸发器表面的结霜情况，待出现明显霜晶后拍照截取此时霜晶形态及记录运行时间，此后每 10 分钟拍照截取图像一次。持续实验 3 小时。

蒸发器表面涂附亲水涂层后，重复上述实验，并整理图像数据。

1.2.3 功耗实验

步骤一：在箱体内放入两瓶规格为 550mL 瓶装，温度为常温自来水作为实验负荷。将实验台接入功率计，打开加湿器。步骤二：记录下初始的蒸发器的进口温度、出口温度、壁面温度，之后每隔 5min 记录一次所有测点的温度以及功率计读数。步骤三：累计运行 90min 后停机除霜，使用电吹风强制化霜，至翅片表面温度为 15℃时停止融霜，记录下除霜所用的时间以及除霜功率。步骤四：累计停机 5min 后，再次开机运行，并取出原负荷放入新负荷，并按照之前方式记录温度和功率，仍运行 90min，共运行三个制冷—融霜的循环。

蒸发器表面涂附亲水涂层后，保证实验负载初始数据相同重复上述实验，并整理数据。

1.2.4 涂层稳定性实验

涂覆亲水涂层后，开机运行 90min，使用内窥镜截取蒸发器表面结霜图像一次。关闭制冷循环，使用电吹风强制对流融霜，蒸发器表面温度为 15℃时停止强制融霜。再次开机运行，比较每个循环的结霜情况及功耗。进行 3 次重复实验，整理并分析实验数据。

2　实验结果及分析

2.1　冷却速度实验结果

按照 1.2.1 中描述的冷却速度实验操作步骤进行实验，整理实验数据得到图 3。

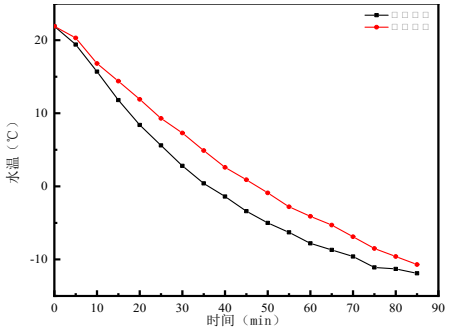

图 3　盐水冷却速度

Fig.3　Brine cooling rate

通过实验对比发现新机（装备亲水性翅片的机组）水温下降的速度更快。将 800mL 浓度为 15%的盐水冷却至-10℃，原机（装备普通翅片的机组）需要 80～85min，新机需要 70～75min，新机冷却速度是原机冷却速度的 115%。从曲线的曲率来看新机温度下降呈现先快后慢的趋势，原机曲率平缓，在运行至 50min 时两者温差达到最大，之后新机冷

却速度放缓二者温差逐步减小。

2.2　结霜效果及分析

为比较亲水性翅片延缓结霜的效果，选择工况：环境温度 17℃，初始相对湿度 80%，两种翅片选择同一加湿器，实验连续运行 3 个小时每隔 10min 拍照一次，翅片表面霜层部分照片如图 4 所示。

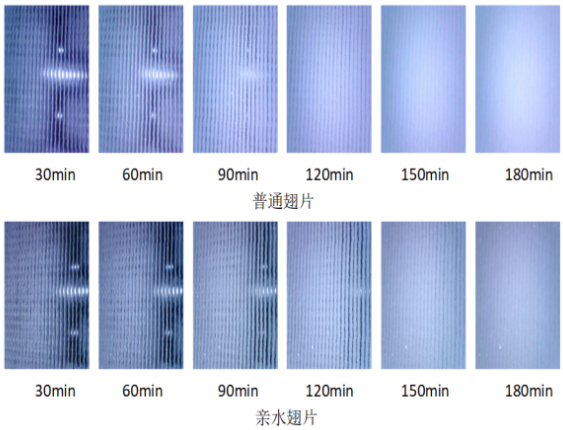

图 4　翅片表面结霜情况对比

Fig.4　The comparison of frost on the surface of fins

由图 4 所示，实验台运行 30min 时，普通翅片表面形成连续均匀的薄膜状霜层，翅片迎风侧顶部出现细小冰晶；亲水性翅片表面形成不连续的薄膜状霜层。实验台运行 60min 时，普通翅片表面被霜层完全覆盖，迎风侧翅片顶部形成形状紧密的枝状冰晶；亲水翅片形成连续均匀的薄膜状霜层，迎风侧亲水翅片顶部开始出现形状松散的枝状冰晶。实验台运行 90min 时，普通翅片表面形成较厚的霜层，气流通道减少约 50%，制冷效果受到较大影响；亲水性翅片表面霜层较同时期普通翅片薄，翅片顶部枝状冰晶形状紧密。运行 120min 时，普通翅片的气流通道几乎被霜层完全阻塞，亲水翅片气流通道减少约 60%。运行 150min 时，普通翅片气流通道被霜层完全覆盖，系统失效；亲水性翅片气流通道几乎完全被覆盖。运行 180min 时，普通翅片与亲水性翅片的气流通道均被完全覆盖。

通过以上实验结果分析可知，亲水性翅片与普通翅片相比可明显抑制霜层生长且前期抑制效果优于后期，亲水翅片可延迟化霜周期约 30min，减少化霜能耗，但仍需要根据情况及时除霜保证性能。

2.3　涂层前后蒸发器表面换热性能分析

2.3.1　理论分析

翅片管式换热器传热的基本公式为

$$Q = KF\Delta T \tag{1}$$

式中，Q 为传热量，kW；K 为传热系数，kW/(m²·℃)；F 为传热面积，m²；ΔT 为温差，℃。

亲水性涂层对于蒸发器表面可以起到延缓结霜的作用，当蒸发表面的霜层逐渐增厚，增加了导热热阻，使得蒸发器传热系数降低。在结霜的早期，由于霜层增加了热表面的粗糙度及表面积，使得总传热系数有所增加；结霜后期，热阻增加造成的影响成为影响传热系数的主要方面时，总传热系数开始下降。同时，霜层的增加也使得空气流经翅片时阻力增大堵塞通路，影响空气流量，在一定程度上阻止了与翅片表面的有效换热。上海交通大学的罗超[10]等人研究表明当进口风速为 0.45m/s，进口空气温度为−4.5℃，相对湿度为 80%时，对间冷式冰箱运行 6h 时其制冷量会衰减 46%。因此，在同一时刻，新机的制冷效果优于原机。

2.3.2　实验结果分析

实验时测定蒸发器表面温度，蒸发器进出口侧空气温度。以 90min 为一次循环，连续运行制冷−融霜三个循环，并以第一次循环为例，得到数据图 5、图 6、图 7。

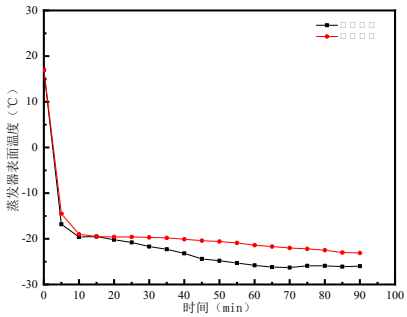

图 5　蒸发器表面温度

Fig.5　Surface temperature of evaporator

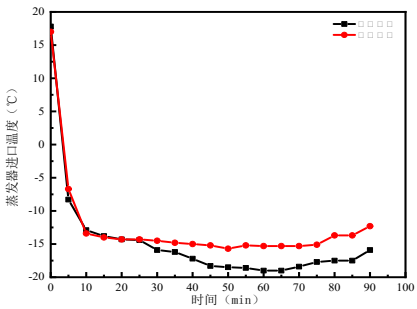

图 6　蒸发器进口温度

Fig.6　Inlet temperature of evaporator

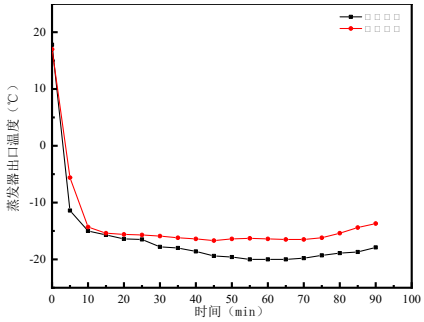

图 7　蒸发器出口温度

Fig.7　Outlet temperature of evaporator

由图可知，开机运行后，翅片表面温度迅速下降至−20℃，此后普通翅片温度缓慢下降并趋于稳定，亲水性翅片温度继续降低并在−25℃左右趋于稳定，两者表面温差最大为 4.4℃；由于普通翅片霜层增长速度快，同时期下普通翅片表面霜层厚度大于亲水性翅片，热阻更大，使得亲水性翅片表面温度低于普通翅片。

此外，系统运行前 30min 亲水翅片与普通翅片进出口温差较小；运行 70min 左右时，蒸发器进出口温度有轻微的回升，此时霜层堵塞气流通路，使空气在翅片表面温度持续缓慢降低的情况下仍未能与之实现良好换热，从而箱内的温度无法继续下降，表明霜层对热阻影响较大，对换热的影响在后期占据主导，要保证系统的制冷性能必须进行除霜操作。

通过理论及实验分析，亲水性翅片虽然经过处理增加了一层亲水膜，但涂膜对于热阻产生影响较小。亲水性翅片能够延缓结霜，同时期下使其霜层厚度小于普通翅片，进而减少由于霜层带来的热阻。但需要注意的是由于霜层过厚会使得系统的制冷性能降低，出现温度回升的趋势，因此需根据翅片的特点以及设计需求，合理选择融霜的切入点，进行融霜操作。

2.4　功耗及耗电量实验结果及分析

2.4.1　功耗实验结果及分析

实验发现，系统运行 90min 时，蒸发器表面霜层明显，压缩机功率降低，同时环境温度出现下降缓慢或不下降趋势。因此，在系统运行至 90min 时使用电吹风进行手动除霜。实验记录功率包括系统运行功率及吹风机融霜时功率，每 5min 实时读取功率计读数。实验进行三次制冷−融霜循环，每运行 90min 停机进行除霜操作，翅片表面 15℃时停止除霜。实验得到两种不同翅片的实时功率曲线，如图 8 所示。

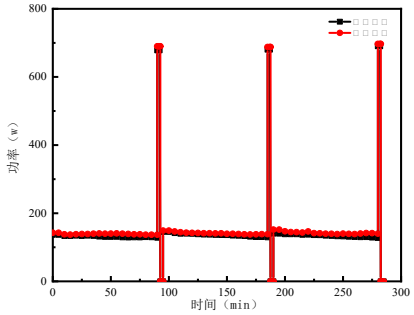

图 8　普通翅片与亲水性翅片实时功率曲线

Fig.8　Real-time power curve of ordinary fins and hydrophilic fins

结合图像分析知，新机功率略低于原机，且在制冷过程中两者功率均出现小幅下降趋势。实验选择每 95min 为一个完整的制冷-融霜循环，在制冷过程中，刚启动的箱体内环境温度高，需要制冷剂蒸发带走的热量多，导致压缩机在运行的前期功率较大；随着温度的下降，箱体内温度逐渐降低，所需要带走的热量减少，压缩机的功率降低；由于亲水性翅片相比于同时期的普通翅片结霜少，使得由于结霜造成的导热热阻少，在同一时间下压缩机做功少于普通翅片。

第二次循环时，因使用电吹风除霜，翅片温度和环境温度升高，再次开机时功率明显大于第一次开机时的功率；随着运行时间的推进，温度持续降低，功率接近第一次循环时的情况。同理，第三次循环也表现出相同的情况。另外，在除霜后蒸发器表面的霜晶化成水，部分水滴在翅片间，当再次启动时，这部分水导致霜层增加较第一次更快些，因此压缩机的功率在后期虽相近但仍略高于第一次的功率。

2.4.2　耗电量分析

实验进行三次循环，并将每个循环的耗电量整理如图 9、10 所示。

由图知，新机和原机的功耗都随时间逐渐增大；随循环周期的增加，在同一时刻下新机和原机耗电量的差异逐渐增大。第一个循环周期内二者耗电量相近，计算新机制冷结束后其耗电量比原机少 0.012kWh，相比于原机减少功耗 5.7%；第二个循环周期中新机比原机节约电量 0.014kWh，降低

5.8%的功耗；第三个循环周期中新机节约 8.2%的电量。三个循环累计运行 300min，新机共省电 0.052kWh，节省 7.2%的功耗。

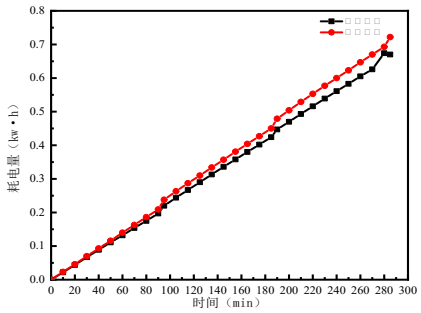

图 9　不同类型翅片耗电量随时间变化曲线图

Fig.9　Graph of power consumption of different types of fins with time

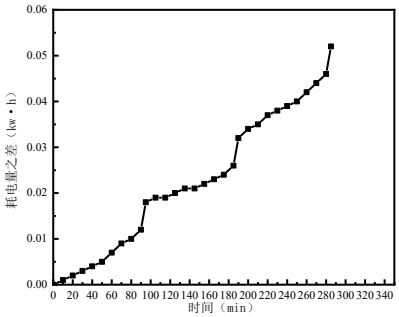

图 10　不同类型翅片耗电量之差随时间变化曲线图

Fig.10　Power consumption difference curve of different types of fins with time

实验证明，在相同工况下使用亲水性翅片可以降低冰箱功耗，减少用电量，其节能幅度约为 5%～8%。本实验中，新机比原机省电约 7%。

2.5　涂层稳定性分析

在冰箱实际运行过程中会不断进行制冷、融霜操作，因此涂层稳定性是考虑其投入实际使用的重要因素之一。实验进行三次制冷-融霜循环，并得到翅片表面温度如图 11。

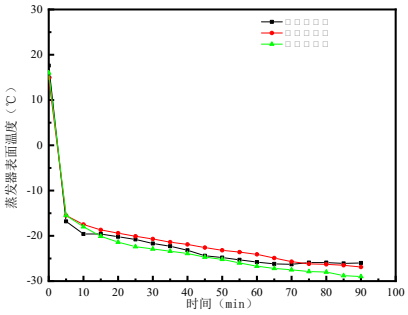

图 11　循环亲水翅片蒸发器表面温度

Fig.11　Surface temperature of new machine evaporator in continuous cycles

如图 11，三次制冷—融霜循环中蒸发器表面温度下降趋势一致，且在同一时刻蒸发器表面温差极小。证明该涂层可以在多次制冷—融霜循环后保持良好的性能，以延长融霜周期达到节能目的。

2.6　技术经济可行性分析

本文研究的亲水性翅片，即通过在风冷冰箱蒸发器的翅片表面涂覆一种超亲水涂料，实现延缓结霜和节能的目的。该涂层的涂覆工艺简单、涂层效果好可适用的范围广，在实际的加工过程采用直接喷涂或者浸渍法可很好的实现涂膜的制备。涂层材料价格成本低，加工简单可实现工业流水线生产。

在实验中该涂层可节能 5%～8%，不同体积规格的风冷冰箱耗电量上有所差异。按风冷冰箱每天耗电 0.7°计算，其一年耗电量约 255.5°，每年电费约为 128 元，则装备亲水性翅片的风冷冰箱每年可节省电费 9 元。

3　总结

通过对比试验得出一下结论：

（1）相同工况下，为达到相同温度，同型号的亲水性翅片冷却速率是普通翅片的 115%，冷却速度快，降温能力强；

（2）相同工况下，同型号的亲水性翅片具有良好的抑霜能力及优异的稳定性，可延缓融霜周期约 30min；

（3）相同工况下，同型号的亲水性翅片比普通翅片功耗低，耗电量少，节能 5-8%，具有良好的技术经济可行性，每年节约电费约 9 元。

该亲水性翅片可适用于风冷冰箱，并具有较大的应用价值，响应国家节能减排的号召，可在冰箱的设计制造过程予以采用。

参考文献：

[1]　Melo C, Knabben F, Pereira P. An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators[J]. Applied Thermal Engineering, 2013,51: 239–245.

[2]　Hermes C J L, Piucco R O, Barbosa J R, et al. A study of frost growth and densification on flat surfaces[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009,33:371–379.

（下转第 476 页）