

# 利用室内自然风的风冷式冰箱除霜性能实验研究

刘忠宝<sup>a</sup>, 亓新<sup>b</sup>, 闫家文<sup>a</sup>, 贾宇博<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> 北京工业大学, 北京朝阳区 100124; <sup>b</sup> 中国家用电器研究院, 北京西城区 100053)

**摘要:** 风冷式无霜家用冰箱因其体积大、无霜冻而在市场上受欢迎。然而, 蒸发器除霜过程所消耗的大量电能限制了这种电冰箱的广泛应用。本研究开发了一种利用室内空气(DUIA)的新型除霜系统。提出了整个系统的运行模式(制冷和除霜周期)。构建实验原型机, 并进行实验研究不同温度范围(12°C-22°C, 22°C-45°C, 和 0°C-12°C)。结果表明, 在相同的除霜时间下, DUIA 新型除霜系统的电耗比电热除霜系统的功耗降低 77.6%-98.2%。

**关键词:** 化霜; 室内自然风; 无霜; 冰箱; 除霜时间; 除霜能耗

## Experimental study on new type of defrosting system using outdoor air for frost-free household refrigerators

Zhongbao Liu<sup>a</sup> Xin Qi<sup>b</sup> Jiawen Yan<sup>a</sup> Yubo Jia<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> Beijing University of Technology, 100 Pingleyuan Road, Chaoyang, Beijing 100124, PR China; <sup>b</sup> China Household Electric Appliance Research Institute, 29 Xiaxie Road, Xicheng, Beijing 100053, PR China)

**Abstract** Air-cooled frost-free household refrigerators have become popular in the market because of their large storage volume and frost-free compartments. However, the large amount of power consumed by the defrosting process of the evaporator restricts the widespread application of such refrigerators. In this study, a new type of defrosting system using indoor air (DUIA) is developed. The operation modes (refrigeration and defrosting cycles) of the overall system are proposed. An experimental prototype is built, and an experimental study is conducted for different temperature ranges (12°C–22°C, 22°C–45°C, and 0°C–12°C). Results show that the power consumption of DUIA is 77.6%–98.2% less than that of the electric heater defrosting system under a similar defrosting time.

**Keywords** Defrosting Indoor air Frost-free Household refrigerator Defrosting time Defrost power consumption

## 1 研究背景

风冷无霜冰箱以其特有的容量大、“多温区”、自动化霜等优点, 被行业公认为冰箱发展的必然趋势。其主要是通过蒸发器风机使冷藏室与冷冻室回风流经蒸发器并与其换热, 在这个降温过程中空气中水蒸气在蒸发器表面析出凝结成霜, 之后蒸发器运行时间增长, 霜层逐渐增厚, 使得换热过程热阻和空气的流通阻力增加, 空气流量减小, 蒸发温度下降, 蒸发器换热性能降低。因此当蒸发器表面霜层达到一定厚度时, 需要进行定期化霜。

目前国内外学者对冰箱化霜的相关过程进行了大量研究。Pradeep<sup>[12]</sup>使用传热模型来分析化霜过程中的热量分配, 指出钢管辐射对流式电加热器产生的热量仅有 30%用于化霜。文中将辐射管形式的加热器改装, 降低其加热温度, 延长加热管长度, 改善其与蒸发器的接触情况, 取得了一定的节能效果, 但不明显。文中最后的展望中指出, 如果加热器能够充分接触霜层, 或者采用空调热泵的逆循环化霜, 能够有效提高化霜效率。

Fernando<sup>[13]</sup>研究了冰箱蒸发器上的霜层分布情况。文中，作者建立了一个霜层分布数学模型，并搭建了一套实验装置用于验证其数学模型。实验装置通过九个瞬态实验，验证系统压降和结霜，实验和模型误差在 10%以内。最后，通过模型分析，针对蒸发器上疏下密的分布规律，设计了两根功率不同的电加热器分别对蒸发器上、下管排进行化霜，提高了化霜效率。

P. Bansal<sup>[14]</sup>等建立了间冷式冰箱蒸发器内结霜时的数学模型，分析了结霜时各位置的能量分配情况，并进行了除霜性能实验，比较了不同霜层厚度下蒸发器除霜时蒸发器翅片表面温度的变化特性。结果表明，不同的霜层厚度下，蒸发器翅片表面温度在 52~56°C 之间波动，化霜加热器的效率为 30.3%，化霜电耗最高占冰箱总耗电量的 17.7%。

李玉祥<sup>[15]</sup>等人总结了无霜冰箱常用的化霜技术，对电加热器化霜技术、热气化霜技术、超声波化霜和吸附化霜技术的优缺点进行了分析。文中指出，超声波化霜是节能明显、最能保湿保鲜的化霜方法，但其缺点也十分明显，超声波化霜的化霜程度受蒸发器和风道结构影响大，容易在化霜水的排水口产生二次结霜现象。

宋新洲<sup>[16]</sup>等人针对单蒸发器的风冷冰箱，利用冷藏室回风对霜层进行预热处理，优化了回风的时间和风量，可以降低化霜过程中电加热器的电量消耗。文中实验表明，利用这种方法，可以降低 27% 的化霜电耗，降低 6.7% 的整机电耗。

刘志成<sup>[17]</sup>等人基于化霜过程中热量利用率逐渐下降的现象，提出化霜过程中电加热器功率先高后低的运行模式，并实验验证了该模式可以有效降低化霜过程能耗和减少冷冻室温度回升。

程学全<sup>[18]</sup>通过对多温区冰箱无霜间室自动化霜设计的实验分析，对化霜加热器的分布和功率、化霜传感器放置位置、化霜控制规则和控制参数的设计进行优化改进，实现了良好自动化霜性能。

汤晓亮<sup>[19]</sup>提出了一种新型的时间-温差法的风冷冰箱的化霜控制方法。该方法通过比较蒸发温度和冷冻室内空气温度来控制冰箱的化霜时间。进行试验验证后，改进后的化霜能耗占冰箱总能耗的比重在 5% 以下。

对于蓄热化霜这种新技术，目前还多应用于空调冬季工况化霜方面<sup>[20-22]</sup>。

韩志涛<sup>[20]</sup>提出了用于空调冬季工况的蓄能化霜新系统，将系统供热后的余热热量蓄存进蓄能器中，当化霜开始时，蓄热器中储存的热量首先传递给反向运行的制冷剂，用于室外蒸发器化霜。文中提出了双套筒内置螺旋盘管相变蓄热器强化了化霜时蓄热材料与制冷剂的换热。添加了蓄热器的冬季热泵系统，化霜效率提高，化霜后恢复正常工况的时间缩短。

周中华等<sup>[21]</sup>对以压缩机废热为热源的蓄热化霜循环原理、装置进行了设计、研究，并同步在空调产品上进行了相关实验验证，发现空调的低温制热量、化霜时间和舒适性方面都有较好的改善效果。并由于压缩机蓄热槽的特殊结构的保温效果，使压缩机在低温环境下化霜后能快速启动，制热时间相比普通机型提前了 3 分钟。

从近年来的冰箱化霜以及蓄热化霜技术的研究中可以看出，冰箱结霜是影响风冷冰箱性能的重要因素之一，但对于冰箱化霜技术的研究多集中在对冰箱化霜控制模式或加热器位置分布的改进研究上，少见提出的新型化霜方法。这是由于现有化霜方法中，电热化霜的结构简单，但能耗大，安全性差；自然对流化霜多用于直冷式冰箱，风冷冰箱的霜层在风道内蒸发器上，自然对流除霜需要时间很长，会大幅提高冰箱箱室内的温度；热气流化霜是由内而外化霜，效果好，但增加制冷管路的复杂性，降低系统可靠性；超声波化霜功率小，不影响制冷系统运行，但增加了超声波发生设备，而且容易在排水孔造成二次结霜。对于蓄热化霜技术，目前主要应用在空调冬季工况，作为辅助热制冷剂化霜的方法。这种方法虽然有一定的借鉴作用，但是由于冰箱和空调的结构差异，其最终应用于冰箱工况还不成熟，所以目前并没有一种非常适合于冰箱工况的节化霜方法来代替现行的电热化霜。

## 2 利用室内自然风的风冷式冰箱结构和流程

### 2.1 利用室内自然风的风冷式冰箱结构

采用一种壁龛式除霜装置，采用引入房间环境空气的方式用于冰箱化霜，引入的房间环境空气通过强

迫对流方式与蒸发器表面霜层进行热交换，实现化霜目的。见图 1。

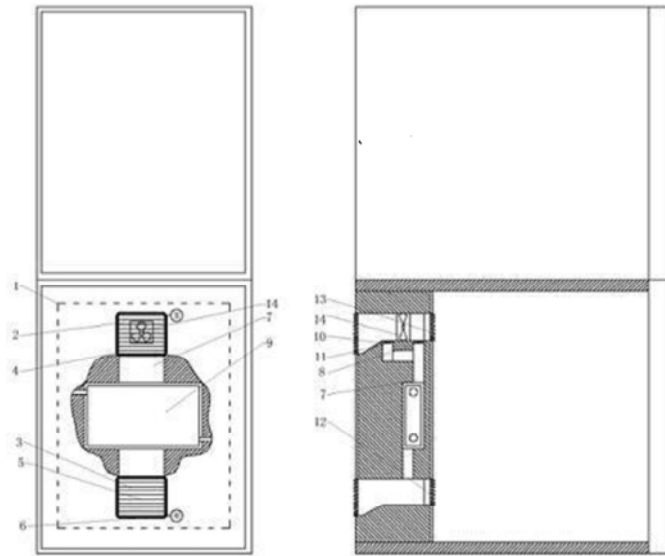


图 1 壁龛式除霜系统结构图

图中各部分名称见表 1

表 1 壁龛式除霜系统结构图各部分名称

序号	名称	序号	名称
1	布局空间	8	融霜风道阀门
2	融霜进风口	9	蒸发器
3	融霜出风口	10	制冷风道
4	防凝露电加热器	11	制冷风道阀门
5	进出风电动风门	12	制冷回风口
6	进出口风门电机	13	制冷送风口
7	融霜风道	14	风机

## 2.2 利用室内自然风的风冷式冰箱制冷和除霜流程

除霜装置的融霜进风口（2）和融霜出风口（3）设置在冰箱背板上，采取上下对称布置，融霜进风口（2）和融霜出风口（3）上设置有进出风电动风门（5），其通过进出口风门电机（6）控制开关。融霜进风口（2）和融霜出风口（3）四周设置有一圈防凝露电加热器（4），其作用是加热融霜风门四周防止制冷工况时在风门上的凝露造成风门无法正常开启。融霜进风口（2）和融霜出风口（3）与融霜风道（7），通过融霜风道（7）将室外房间热风引到蒸发器表面从而实现化霜。融霜风道（7）上设置有融霜风道阀门（8），用于转换连接的风道实现冰箱在的制冷工况与化霜工况间的切换，化霜和制冷过程中空气的驱动通过同一个风机（14）为之提供动力。进出风电动风门（5）采用隔热材料，以减少制冷工况冷量的泄露，风门的四周有严格密封，并且风门采用高级别的密封工艺，以保证其在关闭状态不会有空气泄露和渗透，从而消除冰箱制冷运行过程中漏风造成的冷量损失。融霜进风口（2）和融霜出风口（3）四周设置的防凝露电加热器（4），其控制逻辑如下：在冰箱开始化霜运行时，进出口风门电机（6）控制进出风电动风门（5）打开，若进出风电动风门（5）无法正常打开则反馈信号使防凝露电加热器（4）开始工作，同时进出口风门电机（6）继续控制进出风电动风门（5）尝试开启，若风门正常打开则防凝露电加热器（4）停止工作。

此系统制冷工况如图 2 所示。

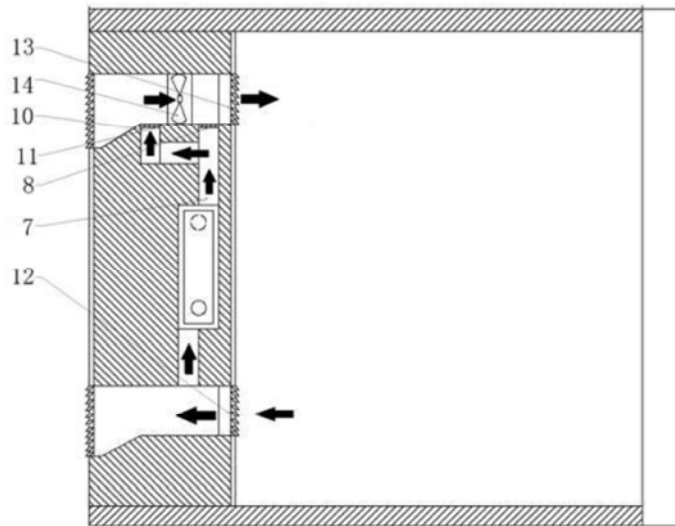


图 2 制冷工况示意图

如图 2 所示为带有壁龛式除霜装置的冰箱在制冷工况时的运行方式，此时融霜进风口（2）和融霜出风口（3）的进出风电动风门（5）关闭，融霜风道阀门（8）关闭，此时制冷风道阀门（11）关闭，制冷回风口（12）以及制冷送风口（13）打开，冰箱内空气在风机（14）的驱动下进入风道，按照图中将头方向通过制冷风道（10）吹过低温的蒸发器（9）表面被冷却后最后通过制冷送风口（13）送入冰箱箱室，从而实现制冷过程。

此系统制热工况如图 3 所示。

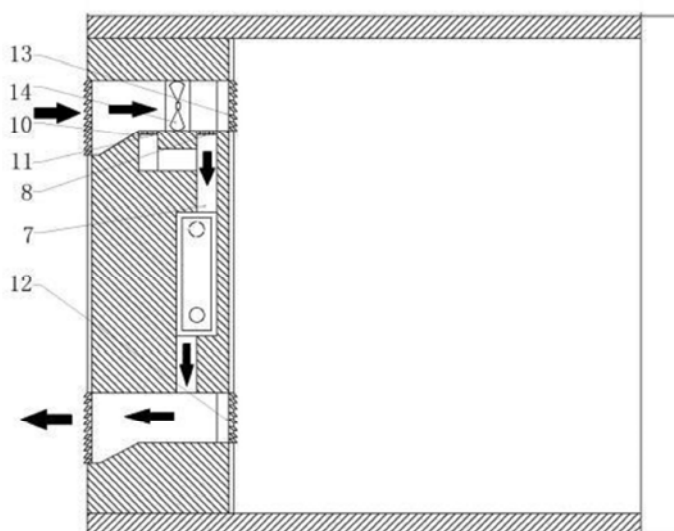


图 3 除霜工况示意图

如图 3 所示为带有壁龛式除霜装置的冰箱在除霜工况时的运行方式，此时融霜进风口（2）和融霜出风口（3）的进出风电动风门（5）打开，此时融霜风道阀门（8）打开，制冷风道阀门（11）关闭，制冷回风口（12）以及制冷送风口（13）关闭，房间空气在风机（14）的驱动下进入风道，按照图中将头方向通过融霜风道（7）吹过蒸发器（9）表面，最后通过融霜出风口（3）排除，从而实现引入房间空气的强制对流化霜过程。

### 3 利用室内自然风的风冷式冰箱模拟实验系统

#### 3.1 冰箱主体部分

冰箱主体包括箱体内部（增加热载荷系统，比 135w 压缩机所对应的冰箱的实际箱体尺寸小很多。蒸发器所在部分为模拟的风冷式冰箱的风道）、透明上盖和箱体外部，其中箱体内部包括实验用保温箱箱体，保温箱内部送风风扇和风道，放置在箱体内部的蒸发器。和透明玻璃做的上盖便于观察（上面可加保温）。而箱体外部包括：实验用功率为 135w 压缩机；冷凝器；冷凝器降温用 30w 风扇；节流毛细管等管路。冰箱主体部分如图 4 所示。

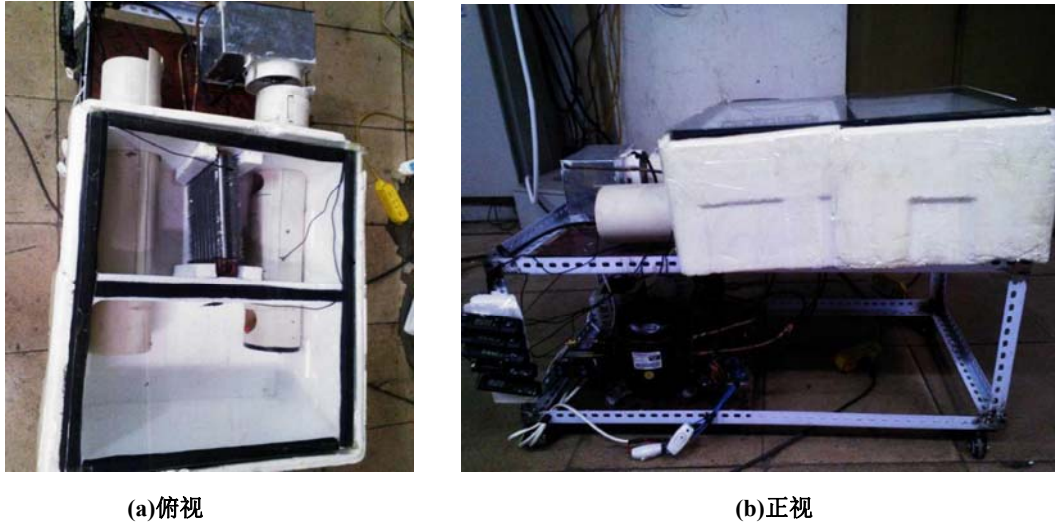


图 4 自然风的风冷式冰箱除霜实验台

### 3.2 升温降温风道

升温降温风道分为辅助制冷装置和辅助加热装置，本实验将这两个装置集合在一小段外置风道中，在风道外侧安装辅助降温的蒸发器，风道里侧则安装辅助升温用的电加热器。其中辅助制冷装置采用在制冷剂通过冷凝器节流后，在进入蒸发器前分流一条回路通往冰箱蒸发器，而另一路则通往辅助降温蒸发器，两条路前分别安装电磁阀，在辅助制冷旁边则是辅助加热装置，冰箱正常运行时，通往冰箱蒸发器的支路打开，辅助降温支路关闭，此时制冷剂专供冰箱制冷。当除霜且需要空气辅助降温时，压缩机继续运转，通过电磁阀关闭通往冰箱蒸发器的支路，同时打开辅助降温支路，对进入风道的自然风进行降温。当除霜且需要空气辅助加热时，压缩机正常停机，打开电加热器，对进入风道的自然风进行升温。辅助升温降温风道如图 5 所示。



图 5 升温降温风道

### 3.3 温度测量系统

温度测量本实验选取多个单一测点的数字显示温度计，测量精度为  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，温度测量范围  $-50^{\circ}\text{C}$ - $70^{\circ}\text{C}$ ，在实验测试温度的实验精度为  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。测温器测点布置在辅助升温/降温风道出口；风扇进风口前；冰箱蒸发器表面；冰箱冷冻箱室内；体统回风口前。测温器测点布置如图 6 所示。

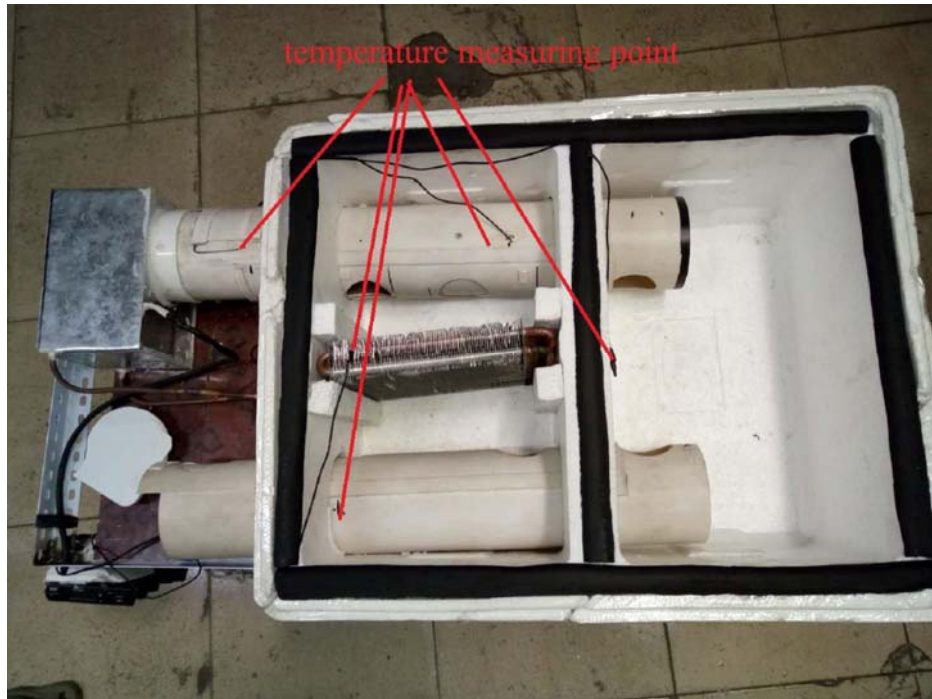


图 6 冰箱的制冷系统温度测点

### 3.4 风速测量

本实验在实验过程中风速分为 5 档，需对每一个档位在风道内的风速进行测量。本实验所取风速为回风口出风速，实验所得风速为当除霜实验进时测量 30 秒内回风口平均风速，相同情况系测量 5 次，取 5 组数据平均值为最终风速。采用 testo 410-1 风速仪进行测试，其参数如表 2 所示。

表 2 testo 410-1 风速仪参数

	参数
量程	$0.4 \sim +20 \text{ m/s}$ , $80 \sim 4000 \text{ fpm}$ , $-10 \sim +50^{\circ}\text{C}$ , $+14 \sim +122^{\circ}\text{F}$
精度	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , $\pm 0.9^{\circ}\text{F}$
测量速率	0.5 秒

### 3.5 功率测量

通过把系统接在 PF9830 三相智能电量测量仪上实时测量功率，可分别单独测出压缩机、融霜系统送风风扇、冷凝器降温风扇、电加热器等功耗。功率测量仪的测量精度为  $0.1\text{W}$ 。



表 3 PF9830 三相智能电量测量仪参数

参数	
三窗口显示	V、A、W、VA、var、PF、Hz、kWh、TIME、deg、ORD、CF
输入电压	600V/300V/150V
输入电流	20A/4A/0.8A
量程切换	自动/手动 均可
频率范围	基频 45Hz 到 65Hz，带宽 5kHz。
电压、电流、功率测试精度	$\pm(0.4\% \text{读数} + 0.1\% \text{量程} + 1 \text{字})$
谐波分析	可分析电压电流的总谐波失真和 2-50 次各次谐波的有效值和相对值
电能量积分模式	标准积分模式、手动积分模式、连续积分模式
电能量积分范围	-99999kWh~999999kWh
变比功能	可外接互感器，电压/电流/功率变比系数可设置
锁存功能	数据波动使用，方便读数
通讯方式	RS-232 接口
锁存功能	数据波动使用，方便读数
体积(长×宽×高)	426mm×132mm×400mm

## 4 实验方法

### 4.1 实验中蒸发器表面风速的估算

本实验用风速仪测量的风速为自然风进风系统的风道风速，需要对实验中蒸发器表面风速进行估算，实验中自然风的流动方式和蒸发器的受风面积如图 7 所示。

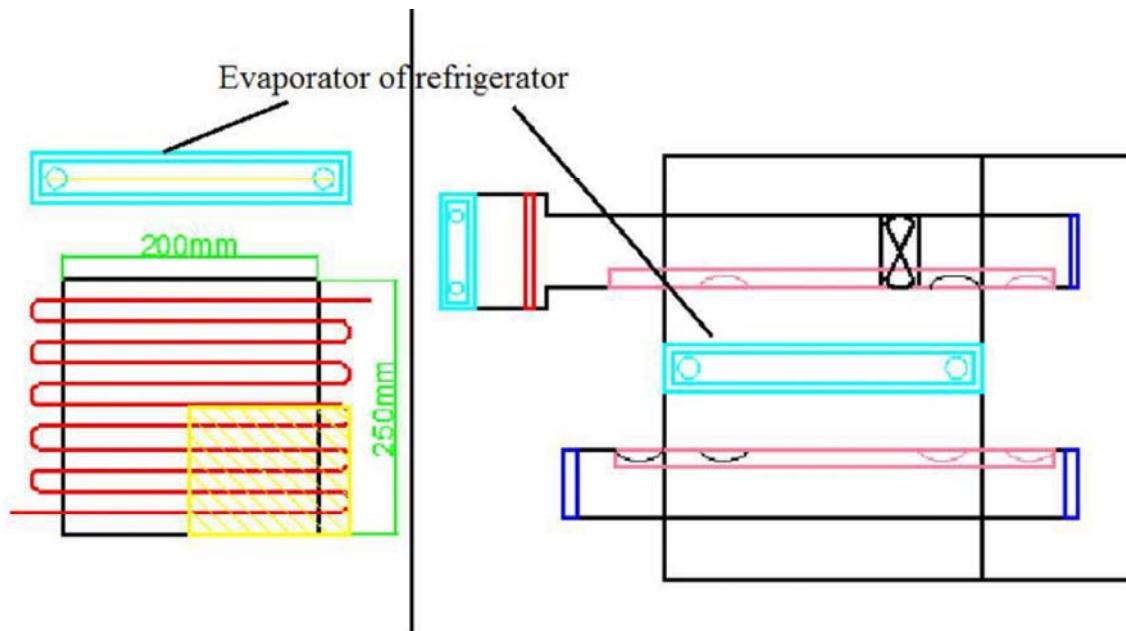


图 7 除霜实验中自然风的流动方式和蒸发器的受风面积

试验台利用自然风除霜时自然风流动方式如图右半边箭头所示，实验中试验台的蒸发器大小为 250mm\*200mm，面积为 50000mm<sup>2</sup>；自然风出口直径为 60mm，面积为 900πmm<sup>2</sup>；然而由于风口的大小

和布置等问题，化霜风扇抽取的自然风只能够直接吹到试验台蒸发器的一部分，其面积大小大约为整个试验台的 1/4，面积为 12500mm<sup>2</sup>（具体见图 3.17 左打剖面线位置），实验中蒸发器表面瞬时风速为系统瞬时流量与蒸发器化霜受风面积之比，计算得：蒸发器表面瞬时风速=自然风风道瞬时风速/4.42。

#### 4.2 自然风除霜的操作步骤

测试过程在北京工业大学制冷实验室中进行，实验室室温一般在 18-25℃的左右的区间波动，冰箱进行化霜前，开启压缩机和风扇，在冷冻室放一杯热水以增加实验冰箱内部水蒸气含量，以促进冰箱蒸发器结霜，中途每 20 分钟换一杯热水结霜时间为 1 小时。1 小时后当蒸发器挂满霜时（1 小时运行作为化霜开始时间），开始除霜。当冰箱以室温除霜时，压缩机关闭，辅助升降温风道蒸发器（1）和辅助升降温风道电加热器（2）关闭，系统以室温除霜。当需要以低于室温温度除霜时，压缩机继续运行，电磁阀 1 关闭，电磁阀 2 打开，辅助升降温风道蒸发器（1）打开，辅助升降温风道电加热器（2）关闭，辅助升/降温装置以制冷工况工作，系统以低于室温的温度除霜。当需要以高于室温温度除霜时，压缩机关闭，电磁阀 1 打开，电磁阀 2 关闭，辅助升降温风道蒸发器（1）关闭，辅助升降温风道电加热器（2）打开辅助升/降温装置以升温工况工作，系统以高于室温的温度除霜。冰箱蒸发器温度上升到 5℃为霜完全除净的时间。

#### 4.3 化霜工况的分类

本实验控制的实验变量分为两个：实验进风温度与实验进风风速。

##### 4.3.1 实验进风温度

如表 4 所示，实验测试温度为 0-45℃，实验中将工况按季节分为三部分，其中冬季工况自然风温度为 0-12℃，选用测点温度分为 4 个，分别为 0℃，3℃，6℃，10℃；春秋季节自然风温度为 12-22℃，选用测点温度分为 6 个，分别为 12℃，14℃，16℃，18℃，20℃，22℃；夏季工况自然风温度为 22-45℃，选用测点分为 5 个，分别为 25℃，30℃，35℃，40℃，45℃。

表 4 实验测试温度工况

实验进风温度区间	0-45℃	
春秋季工况	12-22℃	12℃，14℃，16℃，18℃，20℃，22℃
夏季工况	22-45℃	25℃，30℃，35℃，40℃，45℃
冬季工况	0-12℃	0℃，3℃，6℃，10℃

##### 4.3.2 实验进风风速

实验进风风速和功率分布如表 5 所示，由于本实验抽取自然风风扇为冰箱送风风扇，因为此风扇功率较大所以将风扇与调压器串联，通过调节调压器电压从而控制风速大小。试验中将冰箱风扇电压分为 5 档，风扇电压分别为 50V，75V，100V，125V，150V，用 testo 410-1 风速仪在回风口处测得平均风速分别为 3.6m/s，5.8m/s，7.5m/s，8.5m/s，9.8m/s，所对应的除霜风扇平均功率分别为 16.1W，27.4W，39.6W，57W,79.8W。试验中蒸发器的尺寸为 250mm\*200mm，实验中出风口直径约为 60mm，风口距离蒸发器表面约为 100mm。

表 5 实验进风风速和功率分布

调压器电压	50V	75V	100V	125V	150V
回风口风速	3.3m/s	5.8m/s	7.5m/s	8.5m/s	9.8m/s
风扇功率	16.1W	27.4W	39.6W	57W	79.8W

##### 4.3.3 冬季自然风实验方法

此处测量数据的方法与之前（春秋季和夏季）略有不同，因为冬季所取点的温度相对于室温温差太大，仅凭辅助降温装置很难达到所需进风温度，故采取冰箱内循环方式模拟室外冬季低温风。此组实验数据仅供参考。风扇关闭，打开实验台压缩机时系统运行结霜；待蒸发器结满霜后调节电压器调节风扇电压为 25V，是风扇微风启动，并根据假设自然风温度不同向冰箱冷冻室内加入对应量冰块的使原冷藏室降温。原冰箱冷藏室降温至所假设实验自然风温度时关闭压缩机，开始除霜。



## 5 结果和讨论

### 5.1 春秋季工况自然风除霜

表 6 为 10-22°C 的温度段内不同风速对应消耗的能量, 此处除霜时间使冰箱蒸发器温度上升到 5°C 为霜完全除净的时间。在同等条件下测得使用电加热化霜使蒸发器温度上升到 5°C 所耗时间为 520 秒, 消耗电功为 216300J=0.0601kw/h。

表 6a 风扇功率分别为 16.1W, 27.4W, 39.6W 时除霜时间和功耗

温度 (t)	风扇电压 50V, 功率 16.1W, 风道风速 3.6m/s		风扇电压 75V, 功率 27.4W, 风道风速 5.8m/s		风扇电压 100V, 功率 39.6W, 风道风速 7.5m/s	
	除霜时间(s)	除霜功耗(J)	除霜时间(s)	除霜功耗(J)	除霜时间(s)	除霜功耗(J)
12	985	15859	907	24851	850	33660
14	930	14973	839	22989	800	31680
16	848	13653	721	19755	694	27482
18	770	12397	575	15755	510	20196
20	557	8968	457	12521	410	16236
22	530	8553	400	10960	335	13266

表 6b 风扇功率分别为 57W, 79.8W 时除霜时间和功耗

温度 (t)	风扇电压 125V, 功率 57W, 风道风速 8.5m/s		风扇电压 150V, 功率 79.8W, 风道风速 9.8m/s	
	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)
12	627	35739	474	37825
14	570	32490	380	30324
16	441	25137	335	26733
18	345	19665	310	24738
20	303	17271	285	22743
22	262	14934	214	17077

选取春秋季工况的温度段为 10-22°C, 所测量温度点为 12°C, 14°C, 16°C, 18°C, 20°C, 22°C。调节调压器当电压分别为 50V, 75V, 100V, 125V, 150V 时; 冰箱风扇功率经测功率仪测量分别为 16.1W, 27.4W, 39.6W, 57W, 79.8W; 风道风速经 testo 410-1 风速仪测量风道风速分别为 3.6m/s; 5.8m/s; 7.5m/s; 8.5m/s; 9.8m/s。此处所取测试点风温的温度适中, 故除霜时间也相对适中, 当蒸发器温度到达 0°C 以上后温度上升较快, 为保证冰箱蒸发器化霜完全, 取蒸发器温度上升到 5°C 时为除霜结束时间。所取测试风温除霜所消耗功耗运用公式:  $W=P*t$  分别计算。

根据表 6 做出以春秋季工况除霜自然风温度为自变量, 除霜所用的化霜时间因变量, 分别表示出在除霜风扇功率为 16.1W, 27.4W, 39.6W, 57W, 79.8W 时除霜自然风温度与除霜时间和自然风温度与除霜功耗的走势曲线图。具体见图 8。春秋季工况在不同除霜风扇功率下除霜温度与除霜时间变化图; 图 8 春秋季工况在不同除霜风扇功率下除霜温度与除霜功耗变化图。

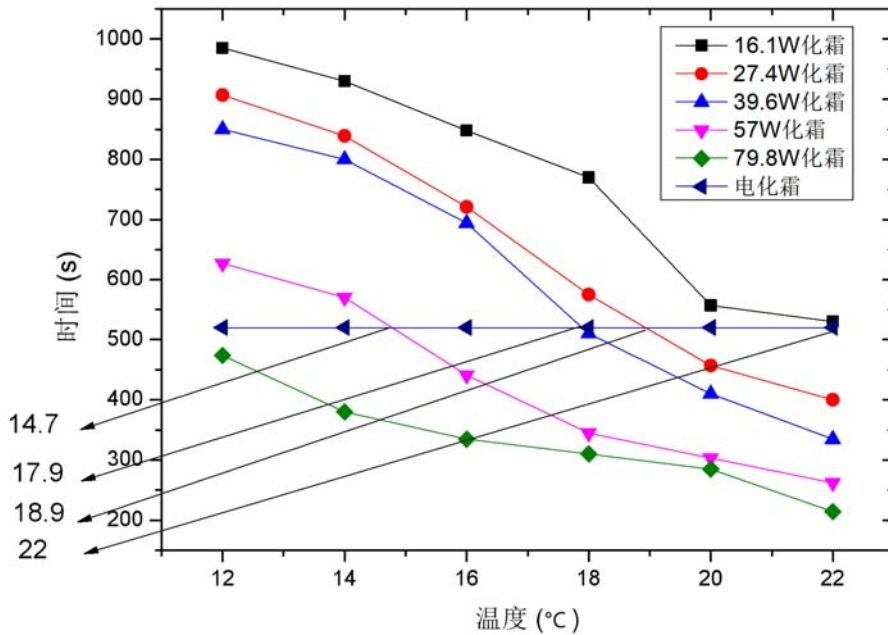


图 8 春秋季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜时间关系

在图 8 中从总体上看随着除霜风扇功率的增加，每个温度点的除霜所消耗的时间均有所减少，但随着温度的增加，不同风扇功率的化霜曲线在春秋季温度段每个温度点的化霜时间差尽管未成明显比例，但都存在着逐渐减少的趋势。说明随着温度的上升，风扇功率大小对除霜时间产生的作用在逐渐减弱，而温度的升高渐渐成为影响除霜时间的主要因素。就单一曲线来说，当以除霜风扇功率为 16.1W 化霜时，在除霜自然风温度由 12-22°C 时，化霜时间在曲线上基本以一个较陡峭的斜率降低，但直到最后化霜时间也没有低于电化霜除霜时间，仅仅大约 22°C 接近与电化霜曲线重合，说明在此时电化霜在时间上还是比较有优势的；当以除霜风扇功率为 27.4W 和 39.6W 化霜时，在除霜自然风温度由 12-22°C 时，化霜时间在曲线上降低的相比上一曲线要更快一些，两条曲线分别在大约 17.8°C 和 18.9°C 时与电化霜化霜时间持平，所以在此风扇功率下由图可推断当除霜自然风温度在 19-22°C 区间均可超越电化霜的化霜速度；当以除霜风扇功率为 57W 化霜时，在除霜自然风温度由 10-22°C 时，化霜时间在曲线上降低趋势虽然不如上面明显，但由于本身从最低自然风温度测量点 12 度时除霜时间就较短所以提升空间相应的也就小了，在此时风道风速为 8.5m/s，电化霜化霜时间在自然风温度大约为 14.7°C 就被赶上，说明此工况下电化霜基本不存在化霜时间上的优势；当以除霜风扇功率为 79.8W 化霜时，在除霜自然风温度由 10-22°C 时，可以明显的看到在化霜时间上自然风化霜以全面领先于电化霜，且曲线随温度的变化波动不大。

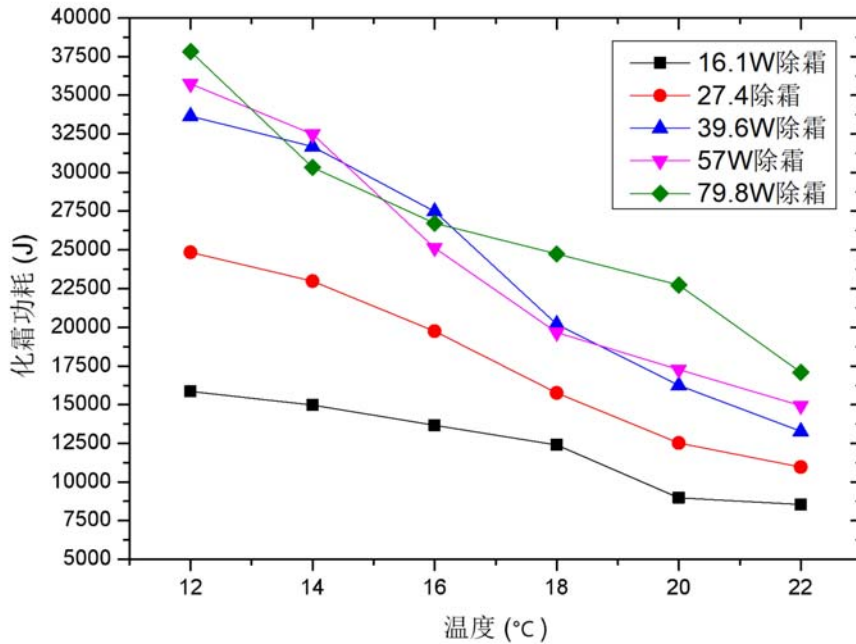


图9 春秋季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜功耗关系

在图9中从总体上看随着除霜风扇功率的增加，每个温度点的除霜所消耗的能量大体都有所增加，但随着温度的降低耗功增加的量有所逐步减少，甚至在自然风温度为在14°C和16°C时除霜风扇功率为39.6W和57W实现了在耗功上对最高除霜风扇功率79.8W的局部反超，整体来看除霜风扇功率为39.6W，57W和79.8W在化霜耗功上是非常相似的这说明在它们在风扇耗功上的差距基本可以通过化霜时间的差异来互补。而除霜风扇功率为16.1W和27.4W在化霜耗功上则显著低于前三者。单一分析的话，随着自然风除霜风温的不断提升，除霜功耗降低是毋庸置疑的，但从降低趋势来看除霜风扇功率为16.1W时，随着除霜自然风温度升高化霜功耗降低趋势最缓而，除霜风扇功率为57W时，随着除霜自然风温度升高化霜功耗降低趋势最陡峭。

将图8和图9一起对比，从化霜功耗和化霜时间上综合考虑，可以得出以下结论。随着除霜功率的提高，除霜时间都有不同程度的提高，但是随着温度的升高，提升除霜功率的效果先升增大后减少，在温度为16°C-18°C时最明显，除霜风扇功率16.1W提升至79.8W，除霜时间有大约900秒降低到大约350秒，除霜时间降低了超过60%。从功耗来看，在此温度区间，提升除霜风扇风速，除霜时间减少较快，导致除霜风扇功率39.6W到79.8W期间除霜耗功相似（提升除霜风扇功率，总除霜功耗仅增加7.9%-28%。），若此时提高除霜风扇功率（风速增加）可在少量增加功耗的同时以有效缩短除霜时间。

## 5.2 夏季工况自然风除霜

如表7为25-45°C的温度段内不同风道风速，不同冰箱风扇功率，所对应的除霜时间与除霜功耗表。此工况，每隔5°C记录一次温度数据，共分5组。

表 7a 风扇功率分别为 16.1W,27.4W,39.6W 时除霜时间和功耗

风扇电压 50V, 功率 16.1W, 风扇电压 75V, 功率 27.4W, 风扇电压 100V, 功率 39.6W,						
风道风速 3.6m/s		风道风速 5.8m/s		风道风速 7.5m/s		
温度 (t)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)
25	442	7116	389	10658	282	11167
30	368	5925	343	9398	278	11008
35	322	5184	295	8083	260	10296
40	270	4347	257	7041	230	9108
45	237	3816	219	6001	200	7920

表 7b 风扇功率分别为 57W,79.8W 时除霜时间和功耗

风扇电压 125V, 功率 57W, 风道风速 8.5m/s					风扇电压 150V, 功率 79.8W, 风道风速 9.8m/s	
温度 (t)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)		
25	230	13110	250	19950		
30	213	12141	208	16598		
35	193	11001	190	15162		
40	187	10659	130	10374		
45	170	9690	81	6464		

选取夏季的温度段为 22-45℃, 所测量温度点为 25℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃。调节调压器当电压分别为 50V, 75V, 100V, 125V, 150V 时; 除霜风扇功率经测功率仪测量分别为 16.1W, 27.4W, 39.6W, 57W, 79.8W; 风道风速经 testo 410-1 风速仪测量风道风速分别为 3.6m/s; 5.8m/s; 7.5m/s; 8.5m/s; 9.8m/s。此处所取测试点风温的温度偏高, 故除霜时间也相对较快, 当蒸发器温度到达 0℃以上后温度上升较快, 为保证冰箱蒸发器化霜完全, 和春秋季节工况一样取蒸发器温度上升到 5℃时为除霜结束时间。所取测试风温除霜所消耗功耗运用公式:  $W=P*t$  分别计算。其中在同等条件下测得使用电加热化霜使蒸发器温度上升到 5℃所耗时间为 520 秒, 消耗电功为 216300J=0.0601kw/h。

根据表 7 做出以夏季工况除霜自然风温度为自变量, 除霜所用的化霜时间因变量, 分别表示出在除霜风扇功率为 16.1W, 27.4W, 39.6W, 57W, 79.8W 时除霜自然风温度与除霜时间和自然风温度与除霜功耗的走势曲线图。具体见图 10 夏季工况在不同除霜风扇功率下除霜温度与除霜时间变化图; 图 11 夏季工况在不同除霜风扇功率下除霜温度与除霜功耗变化图。

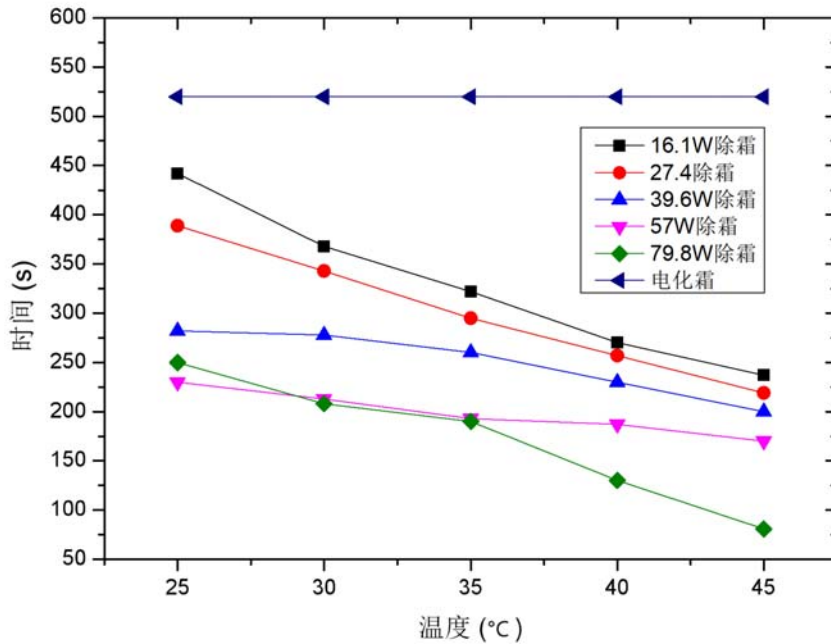


图 10 夏季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜时间关系

在图 10 中从总体上看随着除霜风扇功率的增加，每个温度点的除霜所消耗的时间均有所减少，且随着温度的增加，除霜风扇功率为 16.1W，27.4W，39.6W 的化霜曲线在夏季温度段在自然风温度 35-45°C 温度段除霜所耗时间近乎等差，而在除霜风扇功率为 57W，79.8W 时在化霜时间上有一段短暂的重合。从图中可以大概看出各个除霜温度下，大风扇功率与小风扇功率除霜时间差先近乎平行后不断逼近，而同时同一风扇功率下，自然风温度 45°C 与自然风温度 25°C 除霜所相差的时间差不段减小，曲线越来越趋于平缓。说明随着温度的不断上升，温度变化对于除霜的影响程度先增大后减小，由于普遍除霜时间较短，风扇功率大小对除霜时间产生的作用在明显减弱，就单一曲线来说，在夏季工况下，每一条曲线的化霜时间都低于电化霜时间，电化霜在温度高于 25°C 时对于自然风化霜已没有时间上的优势。

在图 11 可以看出 从总体上看随着除霜风扇功率的增加，每个温度点的除霜所消耗的能量大体都所增加，但是除霜风扇功率为 79.8W（风道风速为 9.8m/s）的一组数据在自然风温度高于 35°C 时由于除霜时间的降低功耗反而降低，但从除霜风扇功率为 16.1W 到风扇功率为 57W（风道风速从 3.6m/s 到风道风速为 8.5m/s）四组曲线近乎处于平行的关系，及随着温度的升高，功耗近似于成比例的减少。在自然风温度 25°C 时，风扇功率为 79.8W 的功耗远远超过了其他四组，但是在自然风温度到达 40°C 时，除霜功耗迅速下降，最后在自然风温度为 45°C 甚至变成了第三，可以考虑当风速足够大时，自然风温度又很高时，霜层可能会以非常快的速度融化。

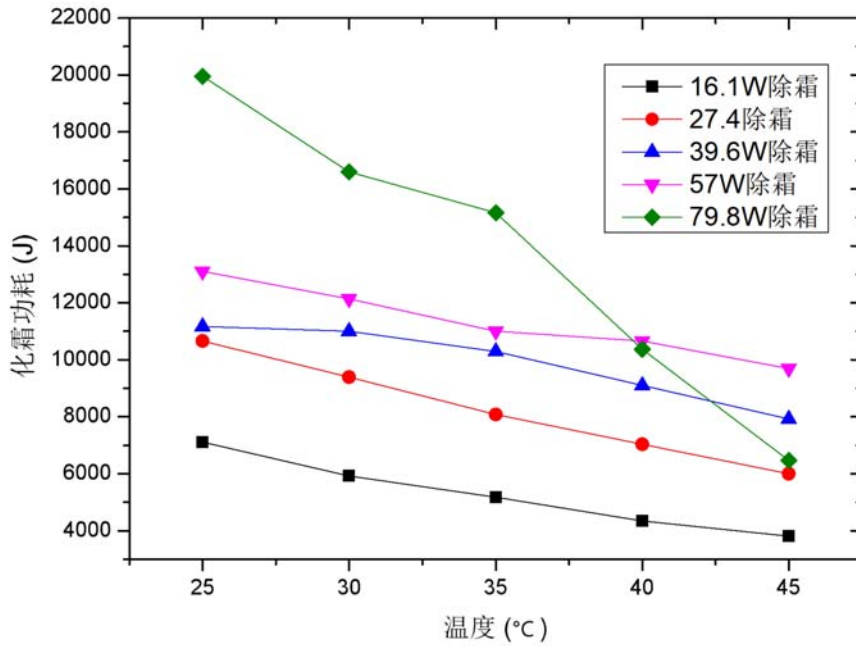


图 11 夏季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜功耗关系

将图 10 和图 11 一起对比，从化霜功耗和化霜时间上综合考虑，由于在夏季工况下，室内自然风温度较高，除霜时间本来就较快，领先于电化霜，大除霜风扇功率耗电大，而除霜时间又无法较大领先较低功率，如图 4.5 中当除霜风扇功率分别为 16.1W，79.8W 时（风道风速分别为 3.6m/s 和 9.8m/s）二者的除霜时间差约占除霜风扇功率为 16.1W 的除霜时间的 40%-43%（差值范围为 132-192s），而二者的除霜功耗差约占除霜风扇功率为 16.1W 的除霜功耗的 69%-180%，所以在对除霜速度没有特别要求下，在夏季工况中除霜推荐选择小功率风扇除霜。

### 5.3 冬季工况自然风除霜

如表 8 为 0-10°C 的温度段内不同风速对应消耗的能量，此处除霜时间使冰箱蒸发器温度上升到 5°C 为霜完全除净的时间。取同等条件下测得使用电加热化霜使蒸发器温度上升到 5°C 所耗时间为 450 秒，消耗电功为 184500J=0.05125kw/h。

表 8a 风扇功率分别为 16.1W，27.4W，39.6W 时除霜时间和功耗

温度 (t)	风扇电压 50V，功率 16.1W， 风道风速 3.6m/s		风扇电压 75V，功率 27.4W， 风道风速 5.8m/s		风扇电压 100V，功率 39.6W， 风道风速 7.5m/s	
	除霜时间 (s)	除霜功耗(J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗(J)
0	2443	39332	2180	59732	1528	60509
3	2192	35291	1740	47676	1290	51084
6	1440	23184	1232	33757	1136	44986
10	999	16083	850	23290	790	31284



表 8b 风扇功率分别为 57W，79.8W 时除霜时间和功耗

温度 (t)	风扇电压 125V，功率 57W，风道风速 8.5m/s		风扇电压 150V，功率 79.8W，风道风速 9.8m/s	
	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)	除霜时间 (s)	除霜功耗 (J)
	0	1434	81738	1110
3	1132	64524	962	79798
6	950	54150	801	63919
10	738	42066	519	41416

选取冬季的温度段为 0-10℃，所测量温度点为 0℃，3℃，6℃，10℃。调节调压器当电压分别为 50V，75V，100V，125V，150V 时；冰箱风扇功率经测功率仪测量分别为 16.1W，27.4W，39.6W，57W，79.8W；风道风速经 testo 410-1 风速仪测量风道风速分别为 3.6m/s；5.8m/s；7.5m/s；8.5m/s；9.8m/s。此处所取测试点风温的温度较低，故除霜时间也较长，当蒸发器温度到达 0℃以上后温度很慢，所以当温度升到 0 度以上后，蒸发器上霜基本以化净，故取蒸发器温度上升到 1℃时为除霜结束时间。所取测试风温除霜所消耗功耗运用公式： $W=P*t$  分别计算。

根据表 8 做出以春秋季节工况除霜自然风温度为自变量，除霜所用的化霜时间因变量，分别表示出在除霜风扇功率为 16.1W，27.4W，39.6W，57W，79.8W 时除霜自然风温度与除霜时间和自然风温度与除霜功耗的走势曲线图。具体见图 12 冬季工况在不同除霜风扇功率下除霜时间与除霜时间变化图；图 13 冬季工况在不同除霜风扇功率下除霜时间与除霜功耗变化图。

在图 12 和图 13 中从总体上看随着除霜风扇功率的增加，除霜时间均有所降低，其中不同风扇功率相比，功率越大，除霜时间越短。但相比之下，除霜自然风温度对于除霜时间明显起了更重要的作用，除霜自然风温度的不同所对应除霜时间差距很大（0℃最大除霜风扇功率除霜所耗时间近似等于 10℃最小风速所耗时间）；功耗上，除霜风扇功率为 16.1W 所用化霜时间最长，首次成为为最高功耗曲线。而除霜风扇功率为 79.8W 反而成为最低功耗曲线。此工况下除霜时间与电化霜对比上看，所有测试的化霜时间均落后于电化霜。总的来说对于冬季工况来说如果自然风风温相对较高（能够达到 6-10℃），此时若选用除霜风扇功率为 57W 或 79.8W，则自然风化霜大约能在 9-25 分钟结束；当除霜自然风温度低于 6℃时，除了除霜风扇功率为 79.8W 的曲线外，几乎所有的除霜时间都超过了 20 分钟（约为同标准电化霜耗时的 4 倍），而在除霜风扇功率为 16.1W 时除霜时间在自然风温度为 0-3℃时约为 37-40 分中（约为同工况电化霜耗时的 8 倍），因此建议在室温较低地区，如果运用自然风化霜，应配备适当的辅助加热装置，运用辅助电化霜和自然风化霜联合除霜模式进行除霜。

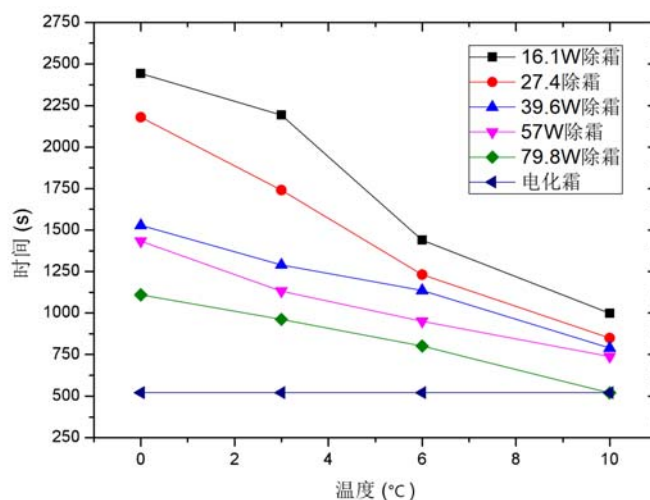


图 12 冬季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜时间的关系

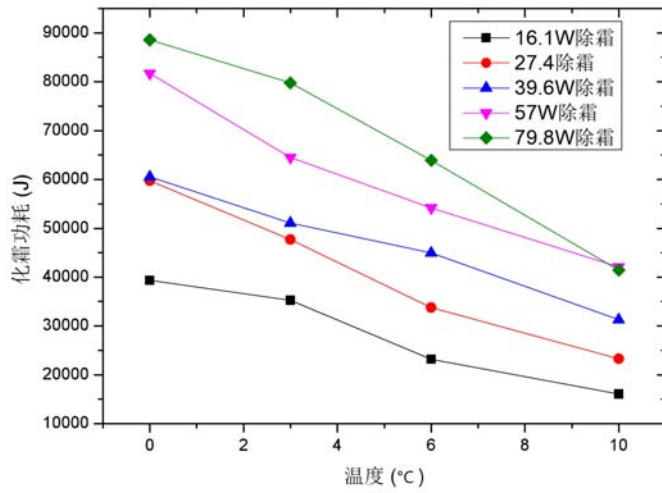


图 13 冬季工况在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜功耗关系

#### 5.4 室内自然风除霜总体耗电量与除霜时间分析

如图 14 为 0-45°C 的温度段内不同风速室内自然风除霜与电化霜化霜所耗时间对比图，图 15 为 0-45°C 室内自然风除霜与电化霜化霜功耗对比图。

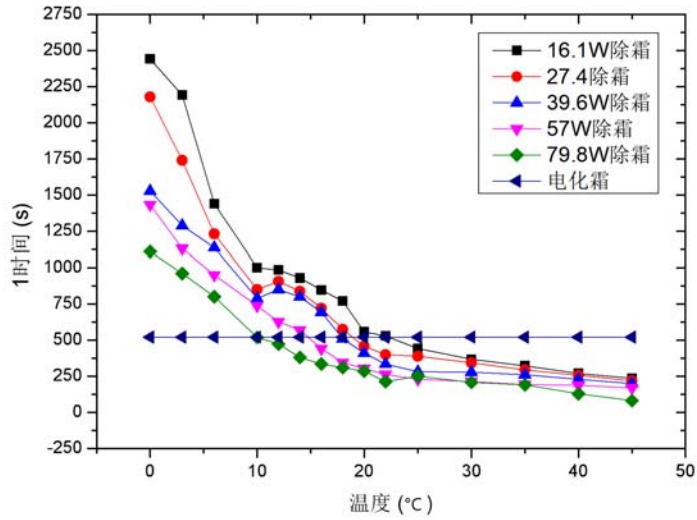


图 14 整个实验中在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜时间关系

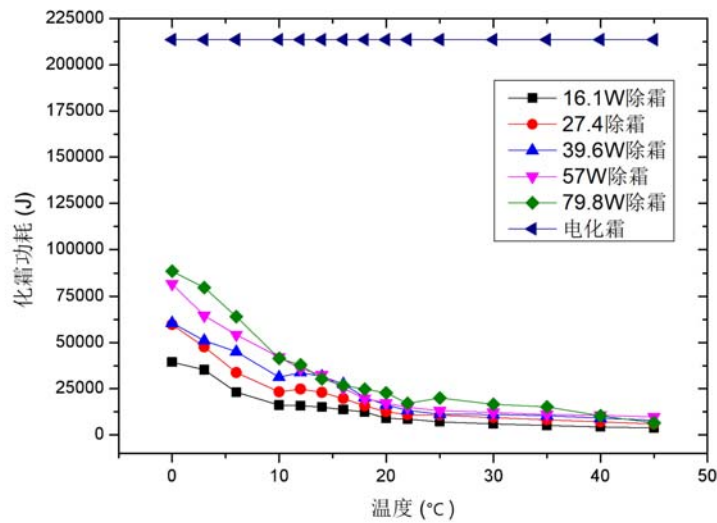


图 15 整个实验中在不同除霜风扇功率下自然风温度与除霜功耗关系

由图 14 中可以直观的看出当自然风温度高于 20°C 时，各个风扇功率下的除霜时间普遍都低于电化霜除霜时间，相反的，当自然风温度低于 10°C 时，各个风扇功率下的除霜时间普遍都高于电化霜除霜时间。除霜风扇功率对除霜时间也有影响，但相比之下并没有温度的作用大。图 15 可以看出，自然风除霜的耗电量远远低于电化霜，所以研究自然风除霜具有很大的实用价值，和环保价值。当环境自然风温度高于 20°C 时，自然风化霜的除霜时间普遍都低于电化霜除霜时间，相反的，当自然风温度低于 10°C 时，自然风化霜的除霜时间普遍都高于电化霜除霜时间。但温度处于 10°C-20°C，除霜风扇功率对化霜时间影响很大，当化霜风扇功率为 79.8W 时，除霜时间领先电化霜；当化霜风扇功率分别为 57W，39.6W，27.4W 时，化霜时间分别在大约除霜自然风温度为 14.7°C，17.9°C，18.9°C 时赶上电化霜时间；而除霜风扇功率为 16.1W 的化霜时间则一直落后于电化霜。

## 6 结论

随着我国科技发展，风冷式制冷系统已经成为未来制冷系统发展的主要潮流，风冷式冰箱已在千家万户普及，围绕风冷式冰箱的除霜节能问题逐渐受到关注。本论文以利用自然风作为风冷式冰箱的除霜热源进行除霜测试为主题，设计实验方案，包括系统的除霜流程设计，设计抽取自然风增加的风门，不同温度段（室内自然风温度：冬季 0-10°C，春秋季节 10-22°C，夏季 22-45°C）的自然风除霜实验等。现通过对不同风温的逐点测试，研究得出了以下结论：

(1) 在春秋季节工况（10-22°C），在此工况运用自然风化霜在化霜时间上处于较稳定的，同一除霜风扇功率下除霜时间差一般在 300-500 秒。随着除霜风扇功率的不同，除霜功耗不会提升太多（实验台除霜风扇功率由 39.6W 提升到 79.8W，此时除霜时间相对于风扇功率 79.8W 时的除霜时间减少 40-45%，而除霜功耗提升为 7.9%-28%），若此时提高除霜风扇功率（风速增加）可在少量增加功耗的同时以有效缩短除霜时间。

(2) 在夏季工况（22-45°C），室内自然风温度较高，除霜时间较短。与电化霜在除霜时间方面相比，自然风除霜在不同风扇功率下一直领先于电化霜。推荐在夏季工况中选测中小功率风扇除霜，因为大功率风扇耗电大，而除霜时间又无法较大领先较小功率，因为当除霜风扇功率分别为 16.1W，79.8W 时（风道风速分别为 3.6m/s 和 9.8m/s）二者的除霜时间差约占除霜风扇功率为 16.1W 的除霜时间的 40%-43%（差值范围为 132-192s），而二者的除霜功耗差约占除霜风扇功率为 16.1W 的除霜功耗的 69%-180%，所以在对除霜速度没有特别要求下，在夏季工况中除霜推荐选择小功率风扇除霜。

(3) 在冬季工况（0-10°C），除霜温度对于除霜时间起了很重要的作用，随着除霜风扇功率的增加，

除霜时间均有所缩短，但相比之下，除霜温度对于除霜时间明显起了更重要的作用，除霜自然风温度的不同所对应除霜时间差距很大（0℃最大除霜风扇功率除霜所耗时间近似等于 10℃最小风速所耗时间）。此工况下除霜时间与电化霜对比上看，所有测试的化霜时间均落后于电化霜。总的来说对于冬季工况来说如果自然风风温相对较高（能够达到 6-10℃），因为此时若选用除霜风扇功率为 57W 或 79.8W，则自然风化霜大约能在 9-25 分钟结束；当除霜自然风温度低于 6℃时，除了除霜风扇功率为 79.8W 的曲线外，几乎所有的除霜时间都超过了 20 分钟（约为同标准电化霜耗时的 4 倍），而在除霜风扇功率为 16.1W 时除霜时间在自然风温度为 0-3℃时约为 37-40 分钟（约为同工况电化霜耗时的 8 倍），因此从化霜时间上考虑，建议在室温较低地区，如果运用自然风化霜，应配备适当的辅助加热装置，运用辅助电化霜和自然风化霜联合除霜模式进行除霜。

（4）在总体耗电量与除霜时间方面，由于自然风化霜主要化霜能量取自环境中自然风的热量，本身电消耗仅为驱动除霜风扇的所耗，所以自然风除霜的耗电量远远低于电化霜，化霜电耗功仅为电化霜的 3%-40%（分别对应化霜风扇功率为 16.1W，除霜自然风温度 45℃和化霜风扇功率为 79.8W，除霜自然风温度 0℃），所以研究自然风除霜具有很大的实用价值，和环保价值。当环境自然风温度高于 20℃时，自然风化霜的除霜时间普遍都低于电化霜除霜时间，相反的，当自然风温度低于 10℃时，自然风化霜的除霜时间普遍都高于电化霜除霜时间。但温度处于 10℃-20℃，除霜风扇功率对化霜时间影响很大，当化霜风扇功率为 79.8W 时，除霜时间领先电化霜；当化霜风扇功率分别为 57W，39.6W，27.4W 时，化霜时间分别在大约除霜自然风温度为 14.7℃，17.9℃，18.9℃时赶上电化霜时间；而除霜风扇功率为 16.1W 时化霜时间则一直落后于电化霜。

通过此实验可以得出，当以电化霜的除霜时间为标准，自然风除霜化霜的除霜风扇（连接温度传感器）功率可分为三个等级：当温度大于 20℃时，选取除霜风扇功率为 16.1W（风道风速 3.6m/s）时自然风化霜可以在消耗时间少于电化霜的基础上完成除霜；当温度处于 10℃-20℃时，自然风化霜以功率为 57W-79.8W（风道风速约为 8.5-9.8m/s），可以得到近似于电化霜除霜时间的除霜效果；当温度低于 10℃，为保证除霜时间，应选用最大除霜风扇功率除霜或配备适当的辅助加热装置，运用电化霜加自然风化霜除霜模式进行除霜。

## 参考文献

- [1] 谢传胜, 董达鹏, 贾晓希, 等. 中国电力行业碳排放配额分配——基于排放绩效[J]. 技术经济, 2011, 11 (11): 57-62.
- [2] 奥维云网 (AVC). 2015 年冰箱行业上半年总结: 升级中稳健发展[J]. 家用电器, 2015, 11 (469), 38-39.
- [3] 于启武, 陈立平, 郭慧婷. 北京城镇居民节能电器消费及节能效果分析[J]. 北京工商大学学报( 社会科学版), 2012, 27 (6), 96-103.
- [4] 电器杂志记者. 冰箱技术发展方向: 节能、环保、智能化[J]. 电器, 2011, 11: 64-65.
- [5] H. Kursad Ersoy, Nagihan Bilir Sag. Preliminary experimental results on the R134a refrigeration system using a two-phase ejector as an expander[J]. international journal of refrigeration. 2014 (43): 97-110.
- [6] 吴国权. 2015 冰箱市场半年总结: 升级中稳健发展[J]. 家电科技. 2015(08): 14-15.
- [7] 韩丽. 2014 年冰箱市场消费趋势白皮书[J]. 家用电器. 2014(07): 50-53.
- [8] 中国标准化研究院. 中国用能产品能效状况白皮书(2013)[M]. 中国标准出版社, 2014.
- [9] 王永禄. 提高风冷电冰箱蒸发器传热效率的有效途径[J]. 家用电器科技. 2000(03): 55-56.
- [10] 汤晓亮. BCD-350W 风冷冰箱除霜控制技术研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
- [11] 崔乐梅. 电冰箱如何化霜好[J]. 健康. 2000(03): 27-28.
- [12] Bansal P, Fothergill D, Fernandes R. Thermal analysis of the defrost cycle in a domestic freezer[J]. International Journal of Refrigeration. 2010, 33(3): 589-599.
- [13] Knabben F T, Hermes C J L, Melo C. In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances[J]. International Journal of Refrigeration. 2011, 34(8): 2031-2041.

- [14] Bansal P, Fothergill D, Fernandes R. Thermal analysis of the defrost cycle in a domestic freezer[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION-REVUE INTERNATIONALE DU FROID. 2010, 33(3): 589-599.
- [15] 李玉祥, 李洪涛, 尹凤福, 等. 无霜冰箱现代化霜技术的研究进展[J]. 电器. 2011(S1): 48-51.
- [16] 宋新洲, 范志军. 利用冷藏室循环热进行化霜预处理的蒸发器化霜系统的试验研究[J]. 制冷技术. 2012(01): 15-18.
- [17] 刘志成, 赵渝生, 韦刚. 风冷冰箱化霜加热控制方案探讨[J]. 电器. 2013(S1): 142-147.
- [18] 程学全. 多温区冰箱无霜间室自动化霜的优化[J]. 家电科技. 2009, 267(3): 54-55.
- [19] 汤晓亮. BCD-350W 风冷冰箱除霜控制技术研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
- [20] 杨超, 苏余昌, 迟婷. 空气源热泵相变蓄能除霜方式的实验研究[J]. 山西建筑. 2014, 40(12): 140-142.
- [21] 董建锴. 空气源热泵蓄能热气除霜动态实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- [22] 张红瑞. 空调废热回收热泵关键技术的研究[D]. 山东建筑大学, 2010.
- [23] 韩志涛. 空气源热泵常规除霜与蓄能除霜特性实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [24] 周中华, 韩雷, 李俊峰, 等. 压缩机废热蓄热化霜技术在家用机上的研究及实验验证[J]. 家电科技. 2014(09): 73-75.