

DOI:10.7652/xjtuxb201411014

风冷冰箱蒸发器除霜特性及箱温回升的实验研究

唐学强¹, 黄东¹, 龚勤勤¹, 白连社², 魏邦福²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 合肥美菱股份有限公司, 230601, 合肥)

摘要: 为了探究风冷冰箱除霜过程动态特性及其对箱温回升的影响,对某单循环风冷冰箱稳定运行时的除霜过程进行了实验研究,结果表明:在蒸发器温度升高到 0℃ 的预热阶段,霜层堵塞翅片间隙,箱温基本无回升;在温度维持在 0℃ 左右的融霜阶段,除霜电加热被布置在蒸发器下方以及霜层“上疏下密”分布使底部霜层最早开始融化,融化结束时刻比顶部提前 8 min,融霜时翅片间空气流通面积逐渐增大,进入箱体内部的热空气量增多,箱温在 9.34 min 内平缓上升 5.7℃;在温度高于 0℃ 的排水阶段,因蒸发器右上方冷藏送风风道存在凸起,热空气会积聚在此处,导致阶段结束时该部位比左上温度高 17.1℃,此时翅片间空气流通面积达到最大,箱温在 6.5 min 内快速上升 6.6℃。

关键词: 风冷冰箱;除霜;箱温回升

中图分类号: TB 657.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)11-0081-05

Experimental Investigation for Dynamic Characteristics of Defrosting Process and Effect on Freezer Compartment Temperature in Domestic Frost-Free Refrigerator

TANG Xueqiang¹, HUANG Dong¹, GONG Qinqin¹, BAI Lianshe², WEI Bangfu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hefei Meiling Co. Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The defrosting process of a frost-free refrigerator is investigated experimentally, and the effect on the freezing compartment temperature is analyzed. The results show that in the pre-heating stage of the defrosting, the bottom temperature of the evaporator firstly rises to 0℃, and the freezing compartment temperature almost remains unchanged because the evaporator is blocked up by frost. In the melting-frost stage, the frost on the evaporator bottom begins to melt firstly and totally melts 8 min earlier than that on the top of the evaporator because the defrost heater is placed under the evaporator and the frost distribution is non-uniform, in fact, the frost on the evaporator top is greatly thinner than that on the bottom. During this stage, the frost melting results in increasing flow area between adjacent fins and the freezing compartment temperature gently rises by 5.7℃ in 9.34 min. In the draining-water stage beyond 0℃, the top-right temperature of the evaporator gets higher than the top-left temperature because the embossment of the air-supply duct of the refrigerating compartment leads to the warm air gathering there, and at the end of this stage the temperature difference between them increased significantly to 17.1℃. The freezing compartment temperature sharply rises by 6.6℃ in 6.5 min because the flow area increases to the maximum.

Keywords: frost-free refrigerator; defrost; the freezing compartment temperature rising

收稿日期: 2014-06-11。 作者简介: 唐学强(1988—),男,硕士生;黄东(通信作者),男,副教授。

网络出版时间: 2014-08-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140813.1008.002.html>

风冷无霜冰箱以其特有的容量大、多温区、自动除霜等优点,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与冷冻室回风流经蒸发器并与之换热,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,需要进行定期除霜。

目前国内外学者对除霜相关过程进行了大量研究。Huang 指出,当管路的当量直径小于临界热绝缘半径时,霜层的积聚促进制冷剂与空气之间的换热,当其大于临界热绝缘半径时霜层阻碍制冷剂与空气之间的换热^[1];Inan 的研究表明,相对湿度越大,蒸发器表面霜层厚度增加越快,翅片间空气流通面积就越容易被堵塞^[2];Ozkan 发现,随着蒸发温度的降低,霜从针形向致密形转变,霜层密度增加^[3];Claudio 通过实验对比分析了不同功率模式下铝管导热式、钢管辐射对流式和玻璃管辐射对流式 3 种电加热器的除霜效率,并指出在综合考虑除霜效率、电加热器价格及其安装使用等因素时,钢管辐射对流式电加热器更适合在实际生产中使用^[4];Pradeep 使用传热模型来分析除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 30.3% 用于化霜^[5];Fernando 的实验表明,由于霜层“上疏下密”分布,使用两根功率不等的电加热器分别对蒸发器上、下管排进行除霜可以提高除霜效率^[6];李成武指出,除霜过程主要通过除霜电加热器工作消耗

电能,以及除霜过程中大量的热量进入箱体内使得在下一制冷过程中冰箱运行时间增长来影响耗电量^[7];宋新洲等人利用冷藏室回风对霜层进行预热处理,可以降低除霜过程中电加热器的电量消耗^[8];汤晓亮等人研发了一种以冷冻室温与蒸发器温度之间的差值为主要参数的除霜控制技术,将除霜能耗占总能耗的比重降低了 40% 左右^[9];刘志成等人基于除霜过程中热量利用率逐渐下降的现象,提出除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除霜过程能耗和减少箱温回升^[10]。

以上研究主要集中在结霜过程、除霜电加热器的电量消耗及其优化的分析,缺乏对除霜过程动态特性和对箱温回升影响的论述。本文以风冷冰箱 BCD-537WPB 为载体,对除霜过程及其与箱温回升的关系进行实验研究,探究其动态过程和变化机理。

1 实验对象和测试系统

实验样机为一台单循环风冷变频冰箱,主要是由全封闭往复变频压缩机、叉排蒸发器、毛细管和鼠笼式丝管冷凝器组成。其中,蒸发器共有 2 排 9 列管路,其翅片呈“上密下疏”式分布,进出口位于右侧同一水平高度的内外两排管上,制冷剂流动方向为“上进上出”,具体结构如图 1 所示。冷藏和冷冻室共用一个蒸发器,各自有单独的送、回风风道,箱温均由各自的感温包控制,冷藏感温包控制冷藏风门的开关,并与冷冻感温包共同控制压缩机的启停。冰箱的主要部件参数如表 1 所示。

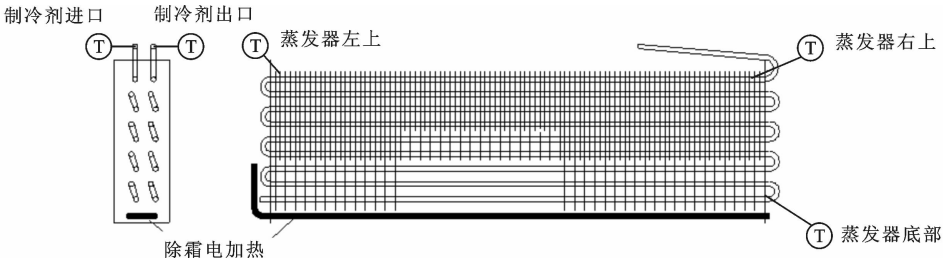


图 1 样机中蒸发器结构和电加热器安装位置示意图

表 1 被测冰箱主要技术参数

项目	技术参数	项目	技术参数
冰箱型号	BCD-537WPB	星级	***
能效等级	1	外形尺寸/mm×mm×mm	6 695×905×1 765
质量/kg	97	执行国标	GB/T8059.4
气候类型	ST	发泡剂类型	环戊烷
电动机额定功率/W	110	冷冻空间/L	140
节流方式	毛细管节流	冷藏空间/L	397
制冷剂	R600a	冷冻能力/kg·d ⁻¹	6
制冷剂充灌量/g	65	耗电量/kW·h ⁻¹	0.98

冰箱使用钢管辐射对流式电加热器进行除霜,其布置方式如图 1 所示,电加热器为 U 型并被安装在蒸发器的下方,其长度与蒸发器铝管长度相同,除固定用的两个接触点外,电加热器与蒸发器无其他接触点。

实验工况:环境温度为 $(25\pm0.8)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 65%。温度测量使用铜-康铜热电偶,精度为 $\pm0.2^{\circ}\text{C}$,实验过程中蒸发器左上、右上和底部等位置均布置有测点,具体如图 1 所示。同时,采用青智 8775A 数字电参数测试仪测量冰箱的运行功率,精度为 0.5 级。整个实验过程中冰箱空箱运行,其冷藏室与冷冻室温度分别设定为 5°C 和 -18°C 。

2 除霜过程动态特性分析

冰箱采用固定压缩机累计运行时间的方式来控制除霜过程的开始,即压缩机运行 43 h 之后自动除霜,直到除霜终止感温包(布置在制冷剂出口处)温度升至 8°C 时停止除霜过程。实验中冰箱共完成 4 次除霜,过程基本相同,取第 3 次除霜过程进行分析,图 2 和图 3 显示了第 3 次除霜的完整过程,将电加热启动时刻记为 0 min,第 19.17 min 时电加热器停止工作,即除霜过程结束,整个过程用时 19.17 min,按蒸发器温度变化将整个过程划分为预热、融霜和排水 3 个阶段。

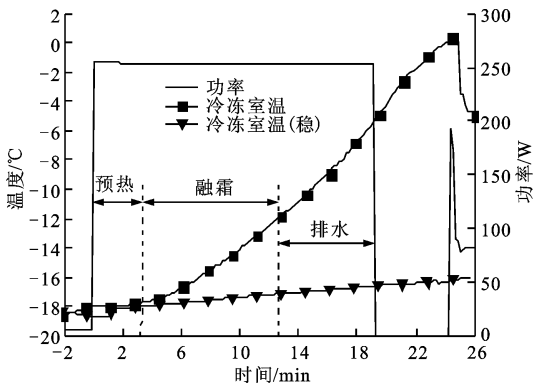


图 3 除霜过程中蒸发器上下和左右温差变化

时,除霜电加热器及其周围空气温度较低,其产生的热量大部分用来提高自身以及周边空气温度,很少一部分被霜层吸收;其次,霜层附着在蒸发器表面增加了换热过程的热阻,二者共同作用使得初期蒸发器温升速度较小。1 min 之后蒸发器底部温度快速升高,而顶部温升速度依然较小,到第 3.33 min,底部温度升高到 0°C ,而左上和右上部温度分别上升到 -12.5°C 和 -12.1°C ,同时上下温差增大至 11.5°C 。这是因为电加热器产生的热量主要通过辐射和自然对流换热的方式传递给霜层,因其被布置在蒸发器下方,使得大部分辐射热量被底部霜层吸收。同时,由于霜层堵塞了翅片间空气流通面积并呈“上疏下密”分布,造成热空气只能在蒸发器底部和电加热器之间的空间流动,与底部霜层换热,两者共同作用使底部温度最先升高到 0°C 。另外,由于底部霜层的堵塞,使热空气不能流动到顶部,此处霜层吸热量较少,温升速度较小,故蒸发器上下温差逐渐增大。

2.2 融霜阶段动态特性分析

融霜阶段从蒸发器底部温度高于 0°C 开始到右上部温度升至 0°C 以上结束,用时 9.34 min。如图 2 和图 3 所示,融霜阶段开始后,蒸发器底部霜层开始融化,温度维持在 0°C 左右,到第 4.67 min 时,底部温度升高到 0°C 以上,表明此处霜层已融尽。在此期间,左上和右上部温度缓慢升高到 -8.3°C 和 -7.8°C ,上下温差逐渐减小到 8.6°C 。其原因在于:霜层融化增加了翅片间空气流通面积,但增加量较小,使得传递到蒸发器顶部的热空气量缓慢增多,顶部温度缓慢升高,加上底部霜层融化使其温度维持在 0°C 左右,造成上下温差逐渐减小。

蒸发器底部霜层完全融化后,温度快速上升,第 8.83 min 时升高至 20.9°C ,而此时顶部温度才缓慢

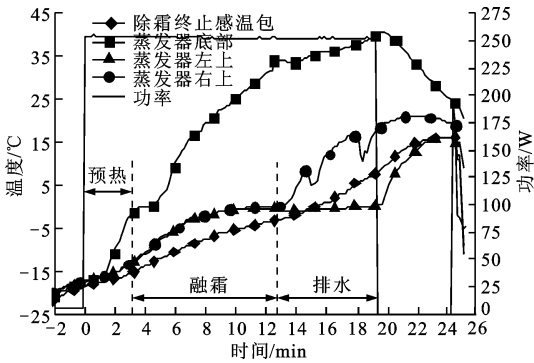


图 2 除霜过程中蒸发器表面温度变化

2.1 预热阶段动态特性分析

预热阶段从电加热启动开始到蒸发器底部温度升至 0°C 结束,用时 3.33 min。如图 2 和图 3 所示,预热阶段开始后,蒸发器温度缓慢升高,到第 1 min 时左上、右上以及底部的温度从 -17.4°C 、 -17.2°C 、 -17.3°C 分别上升至 -16.6°C 、 -16.4°C 、 -16.1°C ,此时蒸发器上下温差(因蒸发器右上测点处于底部测点正上方,故用其与底部的温差表示蒸发器上下温差)仅为 0.3°C 。其原因在于:除霜过程刚开始

升高到 0°C ,上下温差增大到 22.6°C 。这是由于底部霜层已融尽,该部位吸收的热量大部分用来提高自身温度,因此温升速度较大,同时蒸发器底部以及中部霜层融化使得流动到顶部的热空气量增多,顶部霜层吸热量增加,其温度逐渐升高到 0°C ,但由于顶部温升速度远小于底部的,故蒸发器上下温差迅速增大。第8.83 min到12.67 min,底部温升速度有所降低,而顶部始终维持在 0°C 左右,上下温差增大到 35.2°C 。其原因在于:霜层融化增加了翅片间空气流通面积,使得热空气带走的热量增多,底部温升速度略有降低,而顶部霜层融化使其温度保持在 0°C 左右,因此上下温差迅速增大。

第12.67 min时,蒸发器右上部温度升高到 0°C 以上,表明此处霜层已融尽,比底部滞后8 min,而此时左上部温度依然低于 0°C ,说明此处仍有霜未融化,由此蒸发器顶部出现霜层融化不同步的现象。其原因在于:蒸发器右上方冷藏送风风道存在凸起,减少了热空气向上流动的空间并使热空气积聚在此处,进而增大了热空气与霜层之间的换热温差,使大部分热量被此处霜层吸收,因此霜层融化较快,而左侧相应位置无凸起,无热空气积聚,换热温差较小,故左上部霜层吸收的热量较少,霜层融化所需时间比右上部长。

总之,融霜阶段中,霜层逐渐向上融化,使得翅片间空气流通面积增加,进而流动到顶部的热空气量增加,顶部霜层开始融化。另外,右上比底部的霜层融化结束时刻滞后8 min,占整个融霜阶段用时的85.7%。

2.3 排水阶段动态特性分析

排水阶段从蒸发器右上温度升至 0°C 以上开始,到除霜终止感温包温度高于 8°C 结束,用时6.5 min。如图2、图3所示,进入排水阶段之后,蒸发器底部温度先缓慢降低到 33.5°C ,之后缓慢升高至 39.6°C 。其原因在于:12.67 min之后,由于大部分霜层已经融化,翅片间空气流通面积增大,使热空气流速增大,带走的热量增加,同时霜层融化产生的水在排走的过程中吸收大量的热,两者共同作用使得蒸发器底部比周围空气温度高,热空气从该部位吸热,因此底部温度先缓慢降低,之后随着融霜水被排走,吸收的热量减少,使得此处温度逐渐低于附近空气的,进而从周围热空气吸热,导致此处温度缓慢升高。

从12.67 min到18.17 min,蒸发器右上部温度在波动中快速上升,而左上部温度仍维持在 0°C 左

右,蒸发器左右温差(即蒸发器右上与左上测点之间的温度差值)在波动中快速增大。这主要是因为:第12.67 min时右上部霜层已完全融化,之后其吸收的热量主要用来提高自身温度,加上霜层融化过程中产生的水蒸气凝结成的水珠滴落到该部位,使得此处温度在波动中快速上升,同时左上部霜层仍未融尽使温度一直保持在 0°C 左右,因此左右温差在波动中快速增大。第18.17 min左上部温度升高到 0°C 以上,表明此处霜层已融化完全,比右上部滞后5.5 min。

排水阶段主要目的是除去残留在蒸发器上的融霜水,同时防止在恢复制冷后水滴被冻结成“顽冰”。由于蒸发器右上部冷藏送风风道存在凸起,使得此处温升速度大于左上部,进而导致该部位排水结束时间早于左上部。为了防止左上部出现“顽冰”,只有当温度升高到 0°C 以上,除霜过程才能停止,而此时底部温度已升至 39.6°C ,右上部温度上升到 17.4°C 。

3 除霜动态特性对箱温回升的影响

冰箱稳定运行时,箱体以及门封等存在漏热,使停机过程中箱温升高。除霜过程中这些漏热依然存在,加上部分除霜电加热器产生的热量通过风道进入箱体内部,使箱温快速回升。为了准确分析除霜对箱温回升的影响,特选择冰箱稳定运行过程中某一单周期内的停机过程中箱温回升过程为基准进行对比分析。为方便对比,将单周期内压缩机停机瞬间记为0 min。

霜层融化使得翅片间空气流通面积增大,进入箱体内部的热空气增多,箱温回升速度加大。如图4所示,0~3.33 min,除霜过程中箱温从 -18°C 回升到 -17.7°C ,仅回升 0.3°C ;正常停机过程中箱温从 -18.7°C 回升至 -17.9°C ,表明预热阶段中除霜过程对箱温回升几乎无影响。其原因在于:此阶段中蒸发器底部结霜量多以致翅片间隙被堵塞,且霜层未开始融化,使得热空气不能向上流动到箱体内部,故此时箱温回升主要是由箱体以及门封等处的漏热引起的,与稳定运行停机过程的基本相同。3.33~12.67 min,除霜过程中箱温从 -17.7°C 逐渐升高到 -12°C ,且回升速度逐渐增大;正常停机过程中箱温仅从 -17.7°C 回升至 -17.1°C ,说明融霜阶段中除霜过程的进行使得箱温回升速度逐渐增大。其原因在于:此阶段中霜层逐渐向上融化,使翅片间空气流通面积增大,流动阻力降低,进而流入箱体内部的热

空气量增加的速度逐渐增大,因此箱温回升速度越来越大。12.67~19.17 min,除霜过程中箱温线性快速回升,从 -12°C 回升到 -5.4°C ,而正常停机过程中箱温仅从 -17.1°C 回升到 -16.6°C ,表明排水阶段中箱温快速回升。其原因在于:此阶段中蒸发器表面霜层已经基本融化,翅片间空气流通面积增大到最大,进入箱体内部的热空气量迅速增多,箱温快速升高。

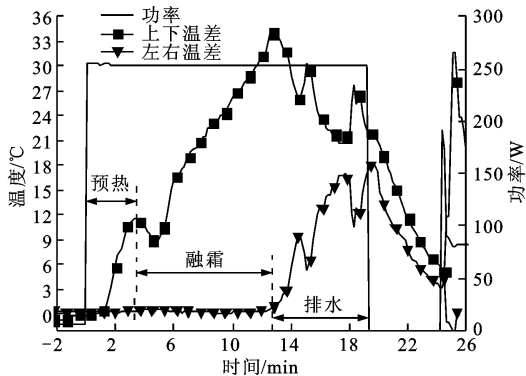


图 4 除霜过程中与稳定周期停机过程中箱体温度变化对比

蒸发器左侧霜层融化滞后右侧对除霜过程结束时的箱温值影响较大。从图 2 可以看出,蒸发器右上部分霜层在第 12.67 min 时就已完全融化,而左上部的则一直持续到第 18.17 min,为了防止左上部出现“顽冰”,除霜过程到第 19.17 min 才停止。结合图 4 可知,12.67 min 后箱温处于线性快速上升阶段,因此蒸发器左上部分除霜过程滞后右上部的时间越长,进入箱体内部的热空气就越多,除霜结束时的箱温也会越高,最终会严重影响冰箱整体性能,增加耗电量。

综上所述,除霜电加热器被安装在蒸发器下方使得风冷冰箱蒸发器除霜过程中的同步性较差,特别是在蒸发器底部霜层融化后,随着翅片间空气流通面积的增大,热空气向上流动过程中的阻力减小,这使得大量热量进入冷冻室内,冷冻箱温迅速回升,因此在设计电加热器安装位置时尽可能使其靠近或者镶嵌到蒸发器中,同时降低除霜过程后期电加热器的功率。但是,功率降低的幅度以及开始的时间需要通过实验来确定,还可以适当增加蒸发器顶部翅片数量以减少进入箱体内部的热空气。除霜过程的同步性又容易受到蒸发器附近空间特别是左右空间对称与否的影响,故应合理设计蒸发器与附近部件之间的相对位置及配合关系,尽可能使得蒸发器左右空间对称分布,减弱除霜过程的不同步。

4 结 论

(1)在预热阶段,霜层堵塞了翅片间隙,热空气积聚在蒸发器底部并加热此处霜层,使其温度最早上升到 0°C ,箱温基本无回升。

(2)在融霜阶段,除霜电加热器被布置在蒸发器下方以及霜层“上疏下密”的分布使底部霜层最先开始融化,霜层融尽时刻比顶部提前 8 min,融霜时翅片间空气流通面积逐渐增加,进入箱体内部的热空气量增多,导致箱温在 9.34 min 内平缓上升 5.7°C 。

(3)排水阶段中,因蒸发器右上方冷藏送风风道存在凸起,热空气会积聚在此处,使得该部位在阶段结束时的温度比左上部高 17.1°C ,此时翅片间空气流通面积达到最大,箱温在 6.5 min 内快速上升 6.6°C 。

参考文献:

- [1] HUANG J M, HSIEH W C, KE X J, et al. The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(7): 728-737.
- [2] AYNUR T N, INAN C, KARATAS H, et al. Real time upright freezer evaporator performance under frosted conditions [C]//9th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. West Lafayette, USA: IRACC, 2002: 675-681.
- [3] ÖZKAN D B, ÖZIL E, İNAN C. Experimental investigation of the defrosting process on domestic refrigerator finned tube evaporators [J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(6): 548-557.
- [4] MELO C, KNABBEN F T, PEREIRA P V. An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1): 239-245.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李成武, 钟金华, 陈星. 无霜冰箱化霜可靠性设计 [J]. 电器, 2012(增刊): 142-147.

(下转第 108 页)