

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.003

超声波用于无霜冰箱除霜的研究

杨衡¹, 江斌¹, 赵锐¹, 张锐²

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥安信瑞德精密制造有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:为探究超声波在冰箱除霜中的效果,文章进行仿真和实验分别比较正常系统除霜方式与加载超声波辅助除霜方式的除霜效果。利用COMSOL软件对超声波在蒸发器表面产生的应力进行仿真分析;搭建超声波除霜实验平台,对超声波除霜的实际效果进行测试。结果表明:当超声频率为200 kHz时,蒸发器表面的应力均达到0.4 MPa以上,满足超声波除霜的应力条件;通过加载超声波使蒸发器表面产生声波应力,从而促进冰层的破裂和脱落,除霜时间从1200 s缩短至300 s,有效地缩短了除霜时间,除霜效率显著提高。该研究表明加载超声波辅助除霜具有很好的节能效果。

关键词:超声波;除霜;仿真;应力;蒸发器

中图分类号: TB657.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)12-1598-06

Research on ultrasonic defrosting in frost-free refrigerators

YANG Heng¹, JIANG Bin¹, ZHAO Rui¹, ZHANG Rui²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei Anxin Reed Precision Manufacturing Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: In order to explore the effect of ultrasonic waves in refrigerator defrosting, this paper compares the defrosting performance between normal system defrosting method and ultrasonic-assisted defrosting method through simulation and experiments. Firstly, COMSOL software was used to simulate and analyze the stress generated by ultrasonic waves on the evaporator surface. The results show that when the ultrasonic frequency is 200 kHz, the stress on the evaporator surface reaches more than 0.4 MPa, which meets the stress conditions for ultrasonic defrosting. Secondly, an ultrasonic defrosting experimental platform was built to test the actual effect of ultrasonic defrosting. The results show that by loading ultrasonic waves on the evaporator surface, sonic stress can be generated on the evaporator surface, thereby promoting the cracking and shedding of the ice layer. The defrosting time is reduced from 1200 s to 300 s, effectively shortening the defrosting time and significantly improving the defrosting efficiency. The study demonstrates that ultrasonic-assisted defrosting has a good energy-saving effect.

Key words: ultrasonic waves; defrosting; simulation; stress; evaporator

冰箱在使用过程中,由于冷冻物品含有水分,当温度降低到0℃以下,冷冻物品的水分会升华成水蒸气,当水蒸气遇到低温的蒸发器,会在蒸发器冷表面开始凝结,最后凝结成霜。

蒸发器表面有少量凝结水有助于增强蒸发器的换热,但若冷凝水积累凝结成霜,则将影响蒸发器的换热。随着霜层的不断积累,霜层会逐渐堵塞翅片间的缝隙,影响风机的正常工作,严重时无

收稿日期:2024-01-08;修回日期:2024-02-28

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2308085ME177)

作者简介:杨衡(1996—),男,河南三门峡人,合肥工业大学硕士生;

江斌(1972—),男,江苏南通人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:binjiang@hfut.edu.cn

法将冷空气输送到冷冻室。

目前除霜分为主动除霜和被动除霜。主动除霜通常使用带有疏水涂层的翅片,文献[1]研究表明,在铜表面涂抹疏水材料能够有效地延缓冷表面结霜时间,但是部分超疏水表面在冷凝过程中会出现疏水失效的现象。被动除霜一般包括电加热除霜、热气旁通除霜、逆循环除霜等^[2]。文献[3]研究了微通道蒸发器热泵系统高效逆循环除霜策略,文献[4]介绍了可以实现新型逆循环热气除霜方法的实验,通过增加压缩机吸气压力缩短除霜时间,但是逆循环除霜会使室内环境差,浪费能源;文献[5]讨论了除霜加热器采用阶梯式运行可以提高除霜效率,但存在能耗大、安全性差、效率低等问题;文献[6]研究了热气旁通除霜方法,并与无除霜设备进行了性能比较,但是热气旁通法会使压缩机寿命受到严重影响。

因此超声波除霜成为新的研究方向。文献[7]通过研究超声波在除霜中的应用得出,超声波除霜能使设备能耗降低、除霜效率提高;文献[8]验证了风力发电机叶片超声波除冰技术的可行性;文献[9]研究了在给定的位移下,超过 20 kHz 的超声波频率可以使剪切应力最大化,从而可以有效地去除冰层。

本文拟采用超声波对无霜冰箱蒸发器进行超声波除霜研究。

1 超声波除霜机理

超声波除霜主要利用的是高频振动,超声换能器中的压电陶瓷将高频电振荡转换为高频的机械振荡。超声换能器通过与蒸发器上的铝板接触,将高频的机械振动传播到蒸发器表面。振动的能量在蒸发器表面传递,当蒸发器表面存在冰霜层时,能量传递到冰霜层,由于超声波的振荡频率大于 20 kHz,每秒数以万计的振动传递到冰霜层,反复的振动使得冰霜层内的应力达到一定数值,冰层的最大黏附应力为 0.4 MPa^[10],当应力数值超过冰霜层破碎的临界值时,冰霜层就会被超声波震碎,起到除霜的作用。

由于蒸发器结构复杂,超声波在蒸发器中传播,其导波不断地与蒸发器表面发生反射与折射,从而产生不同的导波模式^[11]。Lamb 波为只沿水平方向传播的声波,SH 为水平剪切横波。超声波在自由板上传播,在厚度为 d 的各向同性材料平板中,波动控制^[12]为:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中:微分算子 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$, x_1 为平行平板方向, x_2 为垂直平板方向; μ 、 ρ 分别为剪切模量和材料密度; λ 为 Lamé 常数,即应变-应力关系中出现的与材料相关的量。

在 $x_2 = \pm \frac{d}{2} = \pm h$ 时, Lamb 的边界条件为:

$$\sigma_{33} \Big|_{x_2=\pm h} = \sigma_{31} \Big|_{x_2=\pm h} \quad (2)$$

Lamb 波对称模态和反对称模态的频散方程分别为:

$$\frac{\tan(qh)}{q} + \frac{4k^2 p \tan(ph)}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (3)$$

$$q \tan(qh) + \frac{(q^2 - k^2)^2 \tan(ph)}{4k^2 p} = 0 \quad (4)$$

其中: k 为波数; $p^2 = \omega^2 / c_L^2 - k^2$, c_L 为纵波波速, ω 为角频率; $q^2 = \omega^2 / c_T^2 - k^2$, c_T 为横波波速。

在蒸发器表面, SH 模态引起的质点振动都位于平行于表面的平面,质点的振动沿着 x_2 方向,波的传播方向沿着 x_1 方向。SH 波 2 种模态的边界条件为:

$$\sigma_{33} \Big|_{x_2=\pm h} = \tau_{13} \Big|_{x_2=\pm h} = \tau_{32} \Big|_{x_2=\pm h} = 0 \quad (5)$$

求解得到的 SH 对称模态和反对称模态的频散方程分别为:

$$\sin(qh) = 0, qh = n\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

$$\cos(qh) = 0, qh = \frac{n\pi}{2}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (7)$$

在蒸发器表面,其应力自由边界条件为:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0, \quad r = a, b \quad (8)$$

根据 Helmholtz 分析定律,位移矢量 \mathbf{u} 分解为标量势函数 φ 和矢量势函数 \mathbf{H} ,代入可得:

$$\begin{aligned} & \nabla \left[(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right] + \\ & \nabla \times \left[\mu \nabla^2 \mathbf{H} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

利用 Hooke 定律和边界条件得到蒸发器中的纵向模态以及扭转模态频散方程为:

$$D_1 = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{14} & d_{15} \\ d_{31} & d_{32} & d_{34} & d_{35} \\ d_{41} & d_{42} & d_{44} & d_{45} \\ d_{61} & d_{62} & d_{64} & d_{65} \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} d_{23} & d_{26} \\ d_{53} & d_{56} \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

通过上述公式,可以计算超声波在固体中的

传播状态。在超声波除霜中,起主要作用的为剪切应力,通过高频振动使得霜层结构破裂,从而达到除霜的效果。

2 模型建立与仿真

为了能够清楚地观察到超声应力在蒸发器表面的分布特性,根据蒸发器的结构尺寸,通过三维建模软件 SolidWorks 建立蒸发器的 3D 模型,并导入 COMSOL 中得到有限元模型,其中蒸发器翅片厚度为 0.15 mm,翅片间距为 5 mm,蒸发器三维实体图和有限元模型如图 1 所示。

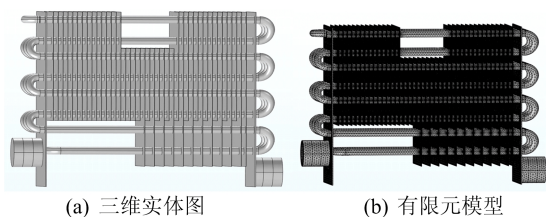


图 1 蒸发器三维实体图和有限元模型

2.1 材料参数的设定

换能器安装在蒸发器翅片表面,为了更好地计算蒸发器表面应力分布,输入的材料参数见表 1 所列。

表 1 蒸发器和压电结构材料的分析参数

材料类型	密度/ (kg/m ³)	泊松比	杨氏模量/ GPa	剪切模量/ GPa
铝	2 700	0.33	70	23
结构钢	7 850	0.30	200	80

压电材料使用的是 NEPEC6,该材料密度为 7 730 kg/m³,半径为 30 mm,厚度为 10 mm。压电材料各项参数^[13]弹性矩阵 C 、耦合矩阵 e 、相对介电常数 ϵ 分别为:

$$C = \begin{bmatrix} 128 & 68 & 66 & 0 & 0 & 0 \\ 68 & 128 & 66 & 0 & 0 & 0 \\ 66 & 66 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 21 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6.1 & -6.1 & 15.7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 993.53 & 0 & 0 \\ 0 & 993.53 & 0 \\ 0 & 0 & 993.53 \end{bmatrix} \quad (14)$$

在 COMSOL 中输入压电材料的各项参数,为确保计算速度和计算精度,蒸发器整体的网格划分采用自由四面体网格并且定义为细化,平均单元质量为 0.52。

2.2 网格无关性验证

为了研究网格数对数据的影响,这里分别对 6 685 270、6 970 705、7 016 618、7 320 281、7 828 796 网格数下的应力进行仿真对比。不同网格数下蒸发器表面点的应力如图 2 所示,可以看出,当网格数大于 7 320 281 时,蒸发器表面该点的应力变化趋势趋于稳定。为了降低计算成本,决定选取网格数为 7 320 281 的网格模型进行计算。

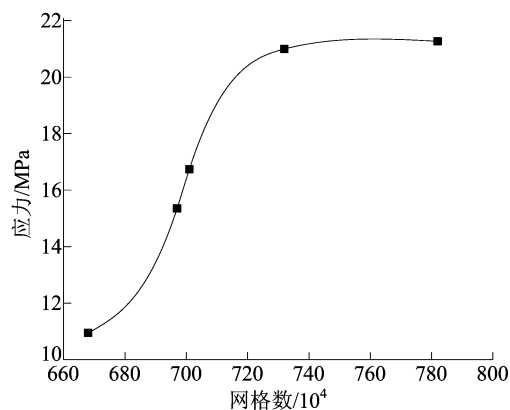


图 2 蒸发器表面某点的应力

2.3 仿真

通过 COMSOL 仿真可以获得蒸发器表面的应力云图。换能器安装在蒸发器两侧,超声波在蒸发器翅片上传播,并在翅片间不断反射以及与对向位置换能器发出的超声波叠加,因此在蒸发器表面形成了大片的应力集中区域和应力抵消区域,通过对不同频率超声波的计算仿真以及安装位置和经济性能的统筹考虑,最终确定换能器的安装个数为 2,并确定安装位置和超声频率。

蒸发器在不同频率超声波作用下的应力分布如图 3 所示。从图 3 可以看出,超声波频率为 140、180、190、200 kHz 时,蒸发器表面的最小应力分别为 1.760、1.040、0.705、0.719 MPa。

冰霜的最大黏附力为 0.4 MPa,可知不同的超声频率都可以达到除霜的应力要求,具备除霜的可行性。

考虑到冰箱蒸发器安装空间的限制,选用 200 kHz 的超声换能器进行实验。

不同厚度的翅片在 200 kHz 超声波作用下

的应力分布如图 4 所示。翅片的厚度会影响到超声应力的传播,由于普通蒸发器的翅片厚度为 0.12~0.20 mm,图 4 给出了厚度为 0.12、0.15、0.20 mm 时的应力分布。从图 4 可以看出,翅片厚度为 0.12、0.15、0.20 mm 的蒸发器表面最小

应力分别为 0.784、0.719、0.368 MPa。最小应力主要集中在换能器两端,蒸发器表面应力全部都大于 0.4 MPa,因此采用 200 kHz 超声波均可满足翅片厚度在 0.12~0.20 mm 范围内翅片的除霜要求。

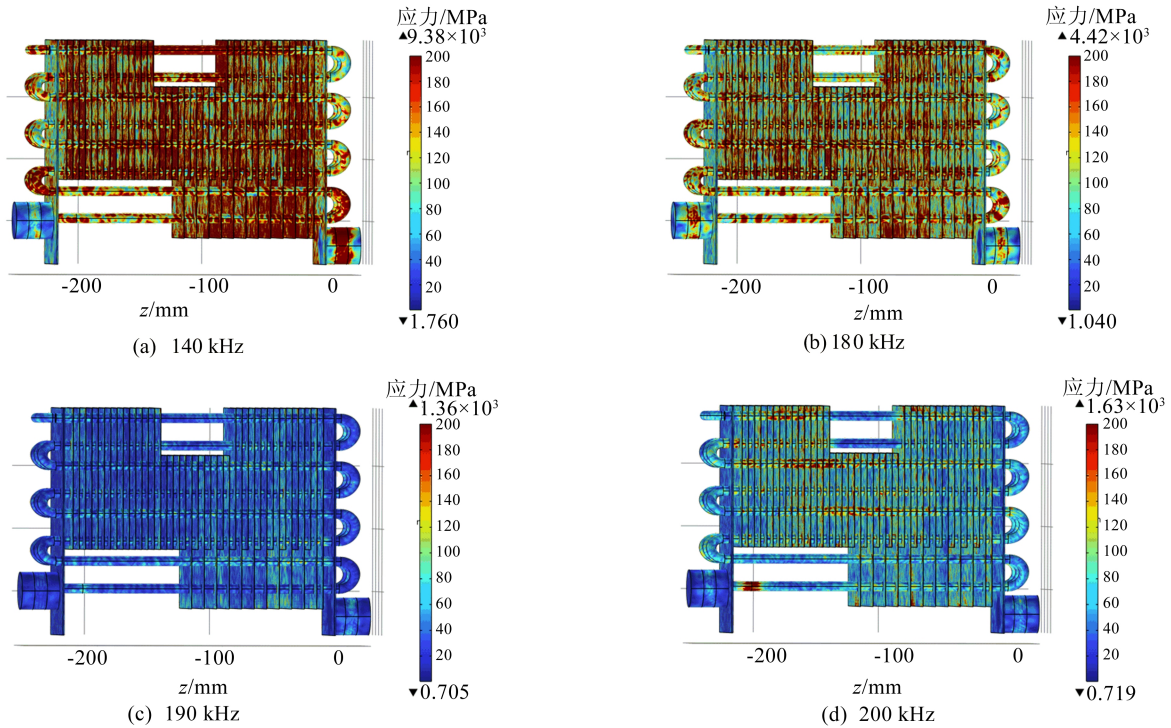


图 3 蒸发器在不同频率超声波作用下的应力分布

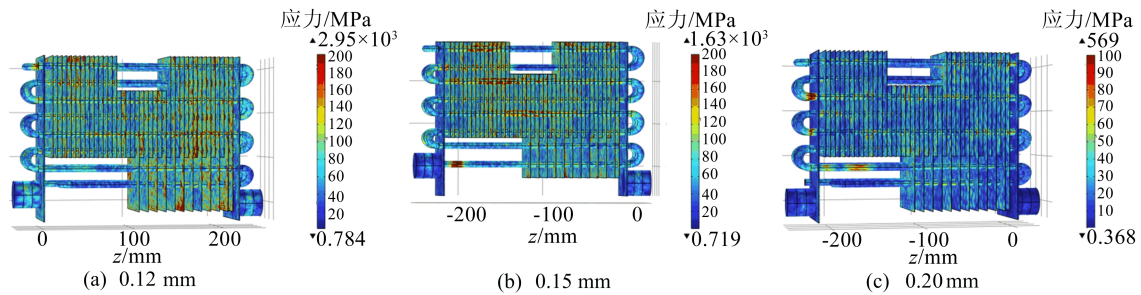
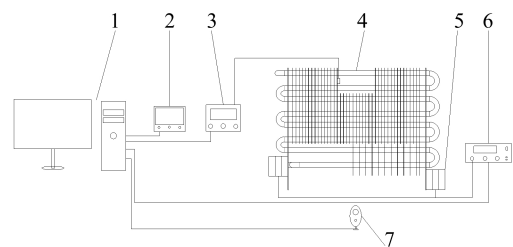


图 4 不同厚度翅片在 200 kHz 下的应力分布

3 实验与结果

为研究加载和未加载超声波的情况下蒸发器表面结霜、化霜的情况,搭建超声波除霜实验平台,主要由监测系统、结霜系统、图像采集系统以及超声振动系统 4 个部分组成。该超声波除霜实验平台示意图如图 5 所示。实验选用某家用无霜冰箱,输入总功率为 90 W,化霜输入功率为 120 W,制冷剂采用 R600a。实验在室温下进行,在冰箱的主要地方粘贴热电偶,使用无纸记录仪记录温度参数,观察加载和未加载超声波时冰箱

各部件的温度变化。通过对蒸发器表面的监测,观察超声波在除霜方面的表现。



- 1. 电脑 2. 功率监测仪 3. 温度监测仪 4. 蒸发器
- 5. 超声换能器 6. 超声发生器 7. 摄像头

图 5 超声波除霜实验平台示意图

3.1 实验方法

1) 将超声换能器用胶水固定在蒸发器两侧的翅片上,如图 6 所示,使用频率为 200 kHz 的振子,超声换能器振子安装完成后静置 24 h,使振子与翅片粘贴牢固。

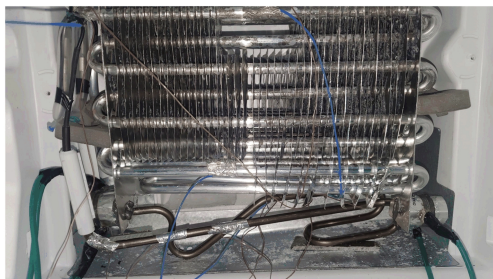


图 6 换能器安装示意图

2) 冰箱工作前期,蒸发器表面还未结霜的情况下,超声波发生器采用关闭模式;冰箱处于除霜

阶段时,超声波发生器采用持续工作模式。

3.2 实验结果

通过监控获得蒸发器表面结霜、化霜情况,如图 7 所示,可以看到蒸发器表面从未结霜到结霜再到除霜的整个过程。

经过一段时间的工作,蒸发器表面结了厚厚的一层冰霜,除霜过程使用电加热除霜,加载和未加载超声波时的温度变化如图 8 所示。由于冰箱内温度上升幅度较大,使得透明亚克力板上出现水汽。

从图 8 可以看出:未加载超声波时,电加热时长约半小时,且在电加热除霜的过程中,由于加热棒持续工作,使得冰箱冷冻室的温度逐步升高,最高可上升至 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$;而加载超声波后,除霜过程所需时间较短,温度上升幅度相较于未加载超声波时的幅度有所降低,温度最高可上升至 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

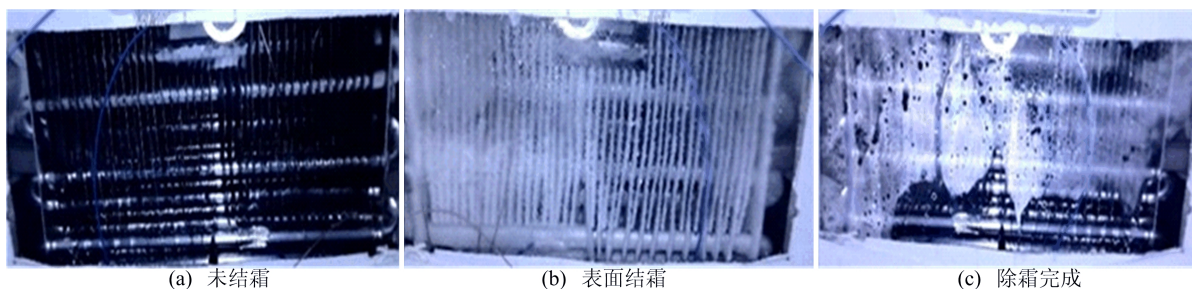


图 7 蒸发器表面从结霜到除霜过程

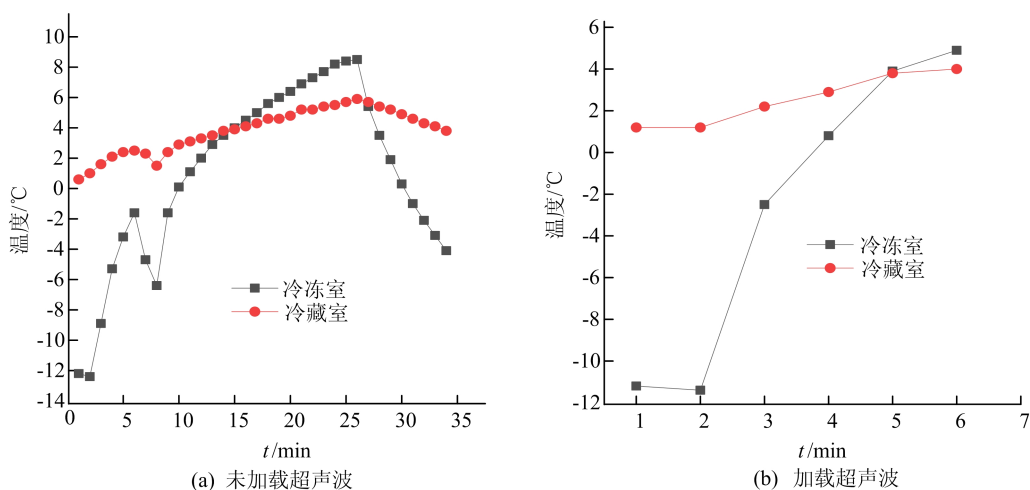


图 8 加载和未加载超声波时的温度变化

加载和未加载超声波时蒸发器表面除霜的效果图如图 9 所示。

从图 9 可以看出:在加载超声波的工况下,除霜所需时间约为 300 s,300 s 以后蒸发器表面的霜层已经完全消失,只剩下融化的液态水;而在未

加载超声波的除霜工况下,霜层明显消失所需要的时间约为 900 s,完全清除需要 1 200 s。因此加载超声波对除霜有明显的促进作用,大大减少了加热器的工作时间,从而降低了冰箱冷冻室和冷藏室的温度变化,减少了功率的消耗。

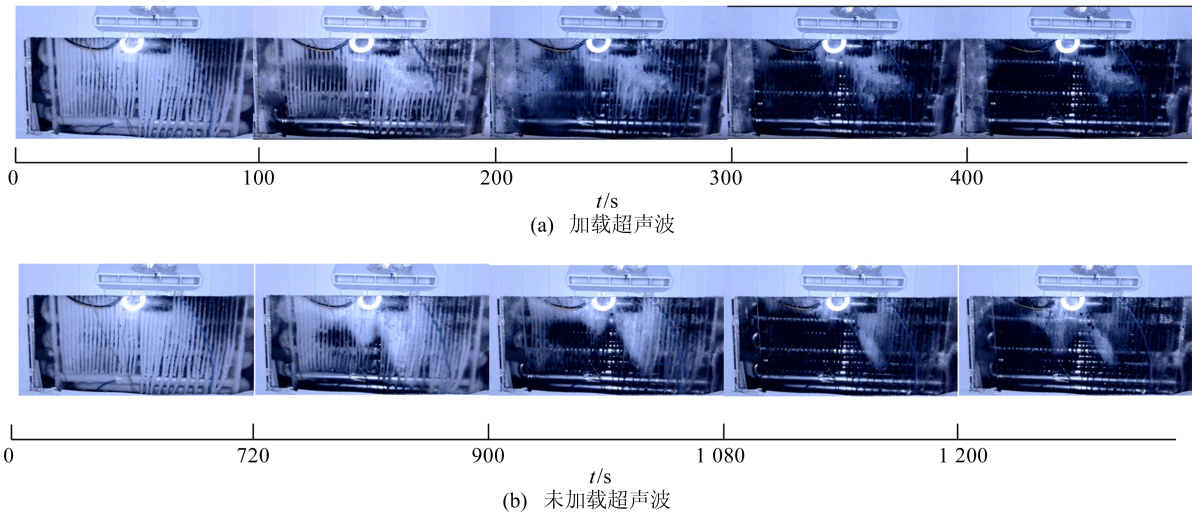


图 9 加载和未加载超声波时的除霜过程

4 结 论

本文通过仿真模拟和实验验证得出,在蒸发器表面施加 200 kHz 的超声波,应力完全可以满足除霜的要求,加载超声波在风冷式冰箱除霜过程中能够起到明显的促进作用。在冰箱开启除霜模式时,未加载超声波的工况下,霜层出现明显融化所需要的时间约为 900 s,霜层完全消失需要约 1 200 s;而在加载超声波的工况下,在 200 s 时可以观察到霜层大量融化,到 300 s 后霜层完全消失。因此,加载超声波可以大大缩短冰霜融化的时间。

[参 考 文 献]

- [1] WANG H, TANG L M, WU X M, et al. Fabrication and anti-frosting performance of super hydrophobic coating based on modified nano-sized calcium carbonate and ordinary polyacrylate [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(22): 8818-8824.
- [2] 张毅, 张冠敏, 张莉莉, 等. 空气源热泵结霜机理及除霜/抑霜技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2018, 39(5): 10-21.
- [3] XIONG T, LIU G Q, WANG S Y, et al. An investigation on the efficient reverse cycle defrosting strategy for microchannel heat exchanger heat pump system[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 71: 106537.
- [4] HU W J, JIANG Y Q, QU M L, et al. An experimental study on the operating performance of a novel reverse-cycle hot gas defrosting method for air source heat pumps[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(2/3): 363-369.
- [5] 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(1/2): 239-245.
- [6] BYUN J S, LEE J, JEON C D. Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(2): 328-334.
- [7] 谭海辉, 陶唐飞, 徐光华, 等. 翅片管式蒸发器超声波除霜理论与技术研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(9): 105-113.
- [8] WANG Z J, XU Y M, SU F, et al. A light lithium niobate transducer for the ultrasonic de-icing of wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 1299-1305.
- [9] BUDINGER M, POMMIER-BUDINGER V, NAPIAS G, et al. Ultrasonic ice protection systems: analytical and numerical models for architecture tradeoff[J]. *Journal of Aircraft*, 2016, 53(3): 680-690.
- [10] PALACIOS J L, SMITH E C, GAO H, et al. Ultrasonic shear wave anti-icing system for helicopter rotor blades [C]//Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society. [S. l.]: American Helicopter Society, Inc., 2006: 1492.
- [11] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(4): 1807-1808.
- [12] TAN H H, XU G H, TAO T F, et al. Investigation on the ultrasonic propagation mechanism and its application on air-source heat pump defrosting[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 479-492.
- [13] 左建冬, 陶唐飞, 荆棘靓, 等. 速冻冷风机超声波除霜技术理论与实验研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 1-7.

(责任编辑 胡亚敏)