

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220413001

文章编号:1672-9331(2023)06-0140-09

引用格式:邱尚斌,黄保,谭海辉,等.基于数值模拟与试验的超声除霜机理研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(6):140-148.

Citation: QIU Shangbin, HUANG Bao, TAN Haihui, et al. Investigation on defrosting mechanism of ultrasonic high frequency resonance based on numerical simulation and experiment[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 140-148

# 基于数值模拟与试验的超声除霜机理研究

邱尚斌<sup>1</sup>, 黄保<sup>1</sup>, 谭海辉<sup>2</sup>, 王宝福<sup>2</sup>

(1. 中山市奇力冷链设备有限公司, 广东 中山 528451; 2. 电子科技大学 中山学院 机电工程学院, 广东 中山 528400)

**摘要:**【目的】探究翅管式蒸发器超声除霜作用机制不明的问题。【方法】通过显微可视化方法得到冷表面上结霜过程和结霜规律,在此基础上建立超声除霜理论模型;利用有限元软件COMSOL计算出霜晶体共振频带及超声振动在霜晶体上激发的剪切应力值,并将该结果与霜晶体最大黏附应力进行比较,从理论上说明超声高频振动除霜技术的可行性;在风冷冰箱蒸发器上搭建超声除霜试验台,通过激光测振仪获得超声高频振动下蒸发器振动数值、实际除霜效果,并和数值仿真结果进行对比。最后对超声除霜能耗进行分析。【结果】超声高频振动激发的界面应力明显大于霜晶体与冷表面之间的黏附应力0.4 MPa,显著降低了霜晶体的力学性能,使得霜晶体松动脱落;换热器上最优的超声加载模式为间歇式加载,间歇时间受环境温湿度影响,环境湿度越高,间歇时间越短,反之则越长。【结论】超声除霜能耗约为传统热除霜能耗的1/4,具备了工程应用的可行性。

**关键词:**超声除霜;数值模拟;高频振动;COMSOL;除霜机理

**中图分类号:**TB66

**文献标志码:**A

## 0 引言

结霜或结冰在航空航天、风力发电、低温工程及制冷等领域是一个不期望发生但又无法避免的常见现象。例如,在一定工况下,制冷装置换热器工作表面会发生结霜现象,如果换热器表面结霜得不到及时有效去除,轻则影响设备的正常运行、增加能耗,重则引发机组非计划停机,甚至引发运行事故。传统冷表面结霜过程研究侧重于分析环境工况对霜层厚度和密度的影响,而对超声下霜晶体去除机理还未进行全面、深入的研究<sup>[1-4]</sup>。

超声波以其频率高、波长短且具有良好的束射性和方向性,近年来在除霜和除冰领域受到越来越多学者的关注<sup>[5-8]</sup>。相比于传统热除霜技术,超声波除霜技术能有效地避免除霜运行时系统内

部高低压冲击、热冲击等对设备造成的损害,以及融霜后翅片表面残留液滴加速蒸发器表面重结霜现象;同时,超声波除霜过程中设备仍可正常运行,不会影响存储物品品质。除此之外,超声除霜方法控制简单,对翅片表面周围空气的微扰动强化了蒸发器表面换热效果<sup>[9-14]</sup>。因此,超声波除霜技术有望在将来替代传统基于热融霜思想的除霜技术。

对超声波除霜技术的研究目前还处于可行性验证和机理探索阶段。研究虽取得了较好的试验效果,但对超声除霜机理还缺乏深刻的认识,对超声除霜能耗等关键问题还未进行分析。这些问题的深入研究,对实现超声除霜技术的工程化应用具有重要的理论意义和实际应用价值。基于此,本文针对目前超声波除霜机理和工作机制不明等问题,利用理论建模和试验验证的方法,探明超声

收稿日期:2021-08-17;修回日期:2021-09-17;接受日期:2021-10-17

基金项目:广东省青年联合基金项目(2019A1515110007);中山市社会公益科技研究项目(2019B2067);广东省普通高校青年创新人才项目(2018KQNCX331)

通信作者:谭海辉(1984—)(ORCID:0000-0002-2471-6199),男,副教授,主要从事超声波高效节能除霜技术方面的研究。E-mail:xy\_thh@163.com

除霜机理,为超声波除霜的工程应用提供理论基础<sup>[14-18]</sup>。

## 1 超声除霜机理研究方法

对超声波在翅管式复杂结构传播过程中模态转换规律认识与解释的不足阻碍了超声除霜技术在翅管蒸发器上的应用。此外,超声导波的频散和多模态特性使得单纯从理论分析或试验验证上都难以有效支持超声除霜机理研究的深入。由此,本文基于理论分析和试验验证相结合的思路,形成超声除霜技术的研究方法,构建相应的超声波分析的理论研究平台和超声除霜试验台,探索超声除霜机理<sup>[19]</sup>。

受结霜过程是一个非稳态、非线性,同时伴随相变及移动边界的复杂传热传质过程,这使得结霜物理特性参数不确定,构建动态结霜数学模型极为困难。本文在明确结霜特点的基础上,结合波动力学、弹性力学、材料力学和结构力学方面的理论体系,将霜晶体简化成圆柱体在COMSOL软件中进行理论建模和数值计算,明确超声波高频振动的除霜机理,指导进一步的试验研究。通过激光测振仪测量蒸发器在超声激励下受迫振动的振动位移、谐振频率及波动分布情况,然后在蒸发器上进行超声除霜试验,并和数值仿真结果进行对比。根据以上试验和数值模拟,明确超声高频振动除霜的可行性及机理。最后,对比数值模拟结果和试验结果,归纳超声高频振动除霜的主要因素。

## 2 超声除霜理论模型

### 2.1 蒸发器三维模型的建立

以试验用汽车换热器为研究对象,通过阵列和平移等操作在SolidWorks软件中建立蒸发器三维模型。将该三维模型导入有限元软件COMSOL中进行网格划分。蒸发器为大径厚比的翅片管式结构,因此选择壳单元进行自适应网格划分,得到离散后的有限元模型,如图1所示<sup>[20]</sup>。

图1中,蒸发器的具体尺寸为270 mm×300 mm,翅片的尺寸为240 mm×20 mm,厚度为0.2 mm,铜

管的外径设置为4 mm,翅片的间距设置为1.55 mm。12根铜管,单根铜管长为300 mm,相邻两根铜管的间距为20 mm;铜管之间设置弧度连接,直径为20 mm。蒸发器两边为护板,固定方式为螺栓固定。

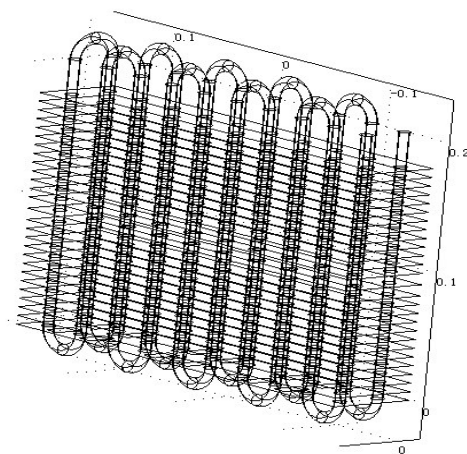


图1 车用换热器及其有限元模型

Fig. 1 Vehicle heat exchanger and its finite element model

### 2.2 数学模型

整个系统的振动有限元方程如下<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{aligned} F &= \{K_{uu} - \omega^2 M + j\omega R\}U + K_{u\phi}\Phi - \frac{I}{j\omega} \\ &= K_{u\phi}^T U + K_{\phi\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $F$ 为外部施加的机械力; $M$ 为质量矩阵; $R$ 为耗散矩阵; $K_{uu}$ 为压电刚度矩阵; $K_{\phi\phi}$ 为介电系数矩阵; $U$ 为位移矢量; $\Phi$ 为外加电势; $I$ 为外部施加电流。

### 2.3 数值计算

压电换能器的作用是将高频交变电流信号转换为高频机械振动,具有电气和机械两种端口。电气端通过电学匹配电路与超声电源相连,机械端通过声学匹配元件与负载相连。压电型超声换能器的电学和声学匹配对其性能及作用效果影响很大。当超声换能器固定于蒸发器上时,其机械端负载就已确定,只能通过电气端调谐作用来实现超声电源与超声换能器间的阻抗匹配。为此,将阵列式超声应用于蒸发器除霜时,必须对超声换能器和超声电源进行阻抗匹配,以提高超声系统的电声转换效率,实现对大型蒸发器表面高效节能除霜。

对安装在蒸发器上的超声换能器在进行阻抗匹配时,首先需找出使超声振源发生谐振的最小





$xz$ 方向剪切应力较大,对应的振动位移和形变也较大,易剥离霜层;冰层较薄时 $xy$ 方向剪切应力易激发霜层的破碎效应,适合微小霜晶体去除,二者的综合可达到除冰/除霜目的。

为明确蒸发器在超声激励下的强迫振动特性,以及分析超声高频微振幅振动对翅管式蒸发器结构的破坏作用,在有限元软件中对翅管式结构进行频率响应分析,铜管和铝片材料的物理参数如表1所示,得到的特征频率及模态振型,结果如表2和图4所示。

表1 铜管和铝片材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of copper tube and aluminum plate

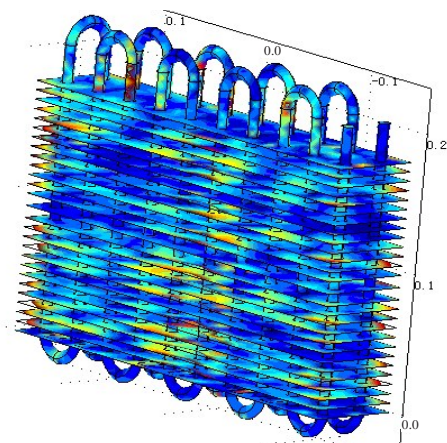
材料名称	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
铜管	8 700	$2.0\times 10^5$	0.35
铝片	2 700	$7.0\times 10^4$	0.33

表2 蒸发器不同激励频率附近的高阶模态特征频率

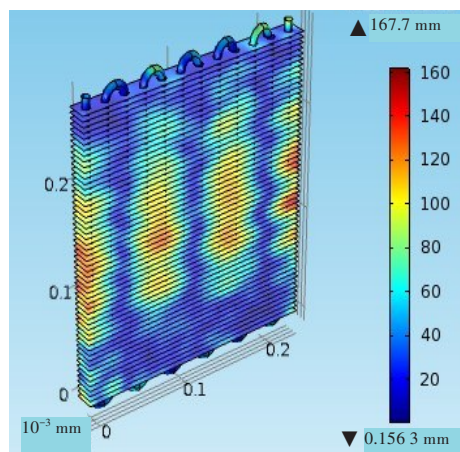
Table 2 High order modal characteristic frequencies near different excitation frequencies of evaporator

频率范围/kHz	频率/kHz	频率/kHz	频率/kHz	频率/kHz
20	20.044 58	20.168 64	20.212 91	20.252 92
28	28.008 64	28.055 93	28.131 19	28.186 06
40	40.014 77	40.077 18	40.110 96	40.150 86

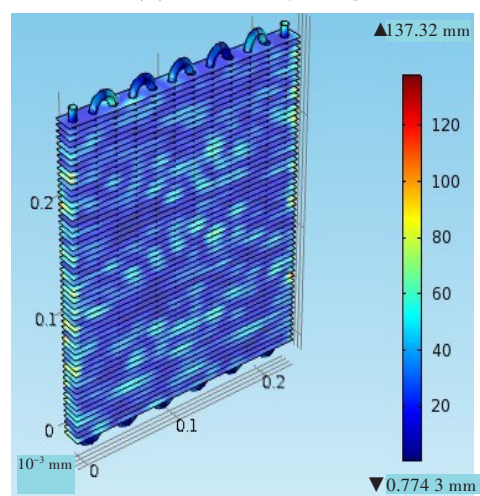
由表2和图4可知,高阶特征频率间的差异非常小,蒸发器在超声激励频率附近的振幅均匀,振动幅值为 $10^{-5}\sim 10^{-3}$  mm。蒸发器表面振动幅值呈现波动状分布,且振幅强弱交替距离随频率的增加而变短。此外,因为边界的存在,导波传播通过反射与折射的方式与边界发生相互作用,同时发生横波与纵波间的模态转换。反射波、折射波、入射波相互叠加,在蒸发器固定位置形成驻波。驻波波节处振动相消使结霜堆积,表现为除霜“驻波”效应。



(a) 20 kHz附近的蒸发器振动模态



(b) 28 kHz附近振动模态



(c) 40 kHz附近振动模态

图4 蒸发器在超声频率下的振动模态

Fig. 4 The vibration mode under ultrasonic frequency of evaporator

### 3 高频振动除霜试验研究

在理论建模研究的基础上,通过试验研究来验证超声除霜的实际有效性,并分析其内在机理。首先,通过激光测振仪获得蒸发器在超声激励下的振动特性;从显微和宏观角度分析蒸发器的实际除霜效果和除霜区域分布以对比激光测振结果,归纳超声波对蒸发器结霜作用的试验规律。

#### 3.1 蒸发器在超声激励下的振动测量

超声激励下,传振板作为超声换能器安装的载体、传振结构和振动源向蒸发器传播超声波并影响整个蒸发器,故采用激光测振仪对超声激励下的铜板作面振测量。本文将1 mm厚的紫铜板焊接在蒸发器一侧表面的铜管上,将40 kHz的压

电换能器安装在铜板中间用来驱动蒸发器做强迫振动,金属板上激光测振测点的布置如图5所示(共63个测点)。

蒸发器结构较为复杂,结构和材料存在不连续性,超声振动能否实现蒸发器表面无死角除霜,以及最优的超声控制模式能否达到最优除霜效果均需进一步试验验证。

当蒸发器在超声激励下振动时,整个结构将作超声激励频率下的受迫振动,而受迫振动的驱动力是压电陶瓷材料通过逆压电效应产生的。因此,利用超声波电源的自动扫频功能,在换能器谐振频率附近进行微调,使其在谐振频率附近工作,测得各测点振动数据如表3所示。

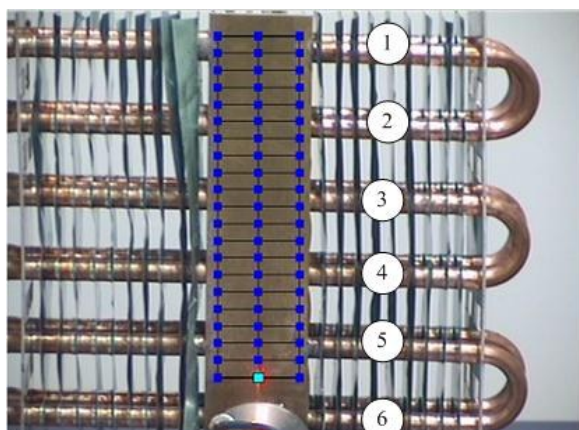


图5 蒸发器金属板上激光测振的测点分布

Fig. 5 The test point distribution of laser vibrometer on evaporator metal plate

表3 激光测振点的谐振频率及振动量

Table 3 The resonance frequency and the vibration amount of laser vibrometer point

测量点	频率/kHz	位移/ $\mu\text{m}$	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
1~2管间	42.656	1.230	0.35	88 623.32
2管上	42.672	0.285	0.08	20 505.41
2~3管间	42.625	1.046	0.29	75 083.60
3管上	42.609	0.947	0.27	67 849.12
3~4管间	42.641	1.005	0.28	72 144.62
4管上	42.609	1.070	0.30	76 540.65
4~5管间	42.625	0.600	0.17	42 930.08
5管上	42.641	0.700	0.19	50 164.64
5~6管间	42.625	1.150	0.32	82 594.56

振动测量数据表明:传振板上振动位移发生了波动式分布,位移在 $1\mu\text{m}$ 左右,但振动加速度可达重力加速度的8 000多倍,查看频谱图发现整个系统仅有一条振动谱线,呈现出超声振动模式。

### 3.2 超声高频振动对蒸发器结霜的影响

对图1中的商用小型蒸发器进行超声高频振动除霜试验。试验的环境条件为自然对流工况,试验共进行141 min。环境温度为 $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,蒸发器周围空气的相对湿度为62%。压缩机连续工作,换能器采用间歇式加载,即间隔2 min,振动5 s,停5 s,循环4次共40 s,每个作用周期为2 min40 s。在超声激发的高频振动下,蒸发器不同时间的结霜宏观表现如图6所示。

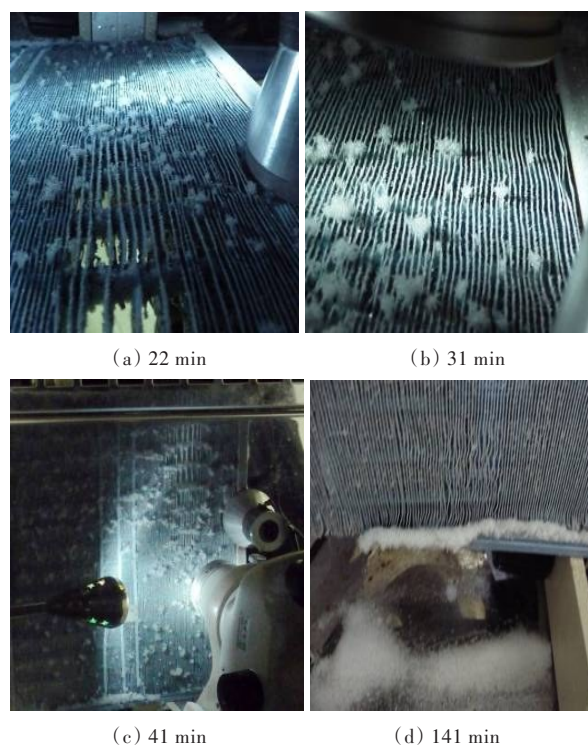


图6 蒸发器竖直放置后侧结霜宏观图

Fig. 6 The macro frost figure on the rear side of vertically placed evaporator

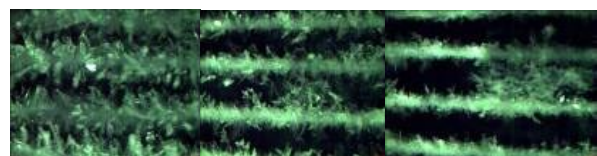
在超声高频振动下,压缩机开机30 min后,蒸发器后侧铜管对应的翅片上方开始生长茸状的小霜球。随着时间的推移,超声高频振动振下来的霜晶体被这些小霜球捕获并长大。压缩机连续工作2 h,竖直放置的蒸发器前侧翅片上除了结霜黏附层外,蒸发器前侧始终无明显结霜出现,翅片间基本保持最初状态,无霜堵现象。蒸发器下方明显可见振落的霜堆。

为验证不同超声频率对除霜效果的影响,本文采用最大功率60 W的28 kHz和40 kHz的超声换能器在一个平放的小翅片间距蒸发器上进行试验,超声的加载机制为:间隔50 s振动10 s,试验的环境温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空气的相对湿度为68%。同时,



选取自然结霜条件作为标准,对试验效果进行显微对比和宏观对比,结果如图7所示。

由图7可以看出,在超声高频振动作用下,霜晶体从根部折断,只剩下一层很薄的覆冰黏附层。有些掉落的霜晶体在翅片间相互搭接,但其与翅片表面的黏结只存在几个节点,在风力和重力的作用下,这些霜晶体会沿翅片向下掉落,使得翅片间无霜堵。



(a) 20 min: 自然结霜; 28 kHz; 40 kHz



(b) 30 min: 自然结霜; 28 kHz; 40 kHz

图7 自然结霜、28 kHz和40 kHz下结霜30 min时的显微对比

Fig. 7 Microscopic comparison of frosting 30 min under natural frost, 28 kHz and 40 kHz

#### 4 除霜机理分析

数值分析结果表明,超声对霜层的作用机理主要是超声Lamb波和SH波面内位移激发的剪切应力大于基础霜层的黏附应力,使基础霜层发生剥离;其次是离面位移激发的破碎应力大于基础霜层的抗压强度,使霜层发生破碎。翅片与霜层材料的不连续性,使超声离面位移和面内位移均在界面处发生畸变,从而增大位移的不连续性,更有利于基础霜层的去除<sup>[2]</sup>。

图8是微元体在有无基础霜层时的应力模型。对于未结霜微元体,ZY平面剪切应力在自由表面值为0,而XZ平面剪切应力在整个厚度方向上均不为0。当翅片表面结霜后,ZY平面剪切应力在界面处不为0。根据频散曲线及波结构分析结果,结霜翅片存在Lamb波S0、A0模态和SH波的SH0模态。因此,XZ平面剪切应力主要是由Lamb波S0、A0模态面内位移激发的,而YZ平面剪切应力则是由SH波激发的,当这两种应力的合力大于基础霜层黏附应力0.4 MPa时,基础霜层从翅表剥

离;而ZZ方向主应力主要是由Lamb波A0模态离面位移激发的,当该应力大于基础霜层结构强度时,霜层发生破碎,从翅表脱落。

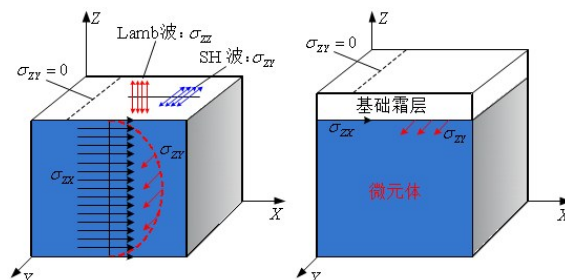


图8 微元体有无霜层时应力模型

Fig. 8 Stress model of microelement with or without frost layer

此外,由激光测振数据可知,在超声高频振动的激励下,铜板不同测点表现出不同的振动特性,总体呈波浪形状。该形状与数值计算的强迫振动模态形状基本一致,即存在一定的波节和波腹现象;蒸发器平面整体保持纵向振动特性。因此,从加速度的角度解释超声高频振动具有除霜的可行性。

从数学上分析,假设超声波在介质中按照一个标准的无衰减的余弦波传播,根据位移、速度和加速度的微分关系可知:

$$s = A \times \cos(2 \times \pi \times f_0 \times t) \quad (2)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = -A \times (2 \times \pi \times f_0) \times \sin(2 \times \pi \times f_0 \times t) \quad (3)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = A \times (2 \times \pi \times f_0)^2 \times \cos(2 \times \pi \times f_0 \times t) \quad (4)$$

相比低频振动,在同样短的时间 $t$ 内,霜晶体在超声高频振动产生的巨大加速度下承受了更大的冲击作用力。以 $0.71 \mu\text{m}$ 振幅、28 kHz的超声波为例,其加速度的峰值为 $23.39 \text{ km/s}^2$ (约为 $2339 g$ ,  $g$ 为重力加速度)。因此,虽然振幅很小,加速度所产生的力在霜晶体根部形成一个弯矩,使霜晶体有可能发生折断。基于此,认为超声高频振动具有除霜可行性,同时也说明了现有研究中低频振动除霜效果不佳的原因。

查看商用空调蒸发器在超声高频振动下的除霜效果图6,可以看到霜晶体呈现波纹状的堆积,

验证了理论分析上的波节和波腹现象。对于除霜死区,可借助风力或使用多个换能器的方法进行消除,下一步将对外力联合除霜进行深入研究。

## 5 超声振动除霜能耗分析

选取新飞风冷560 L冰箱为研究对象,在其蒸发器表面安装一个60 W的超声换能器,而机组的电加热除霜功率为270 W。蒸发器周围空气温度维持在 $-26 \sim -18^{\circ}\text{C}$ ,超声加载模式采用间歇3 min振动30 s,并在压缩机首次启动时即介入超声振动。初始和工作10 d后冰箱蒸发器表面及超声除掉的霜晶体如图9所示。

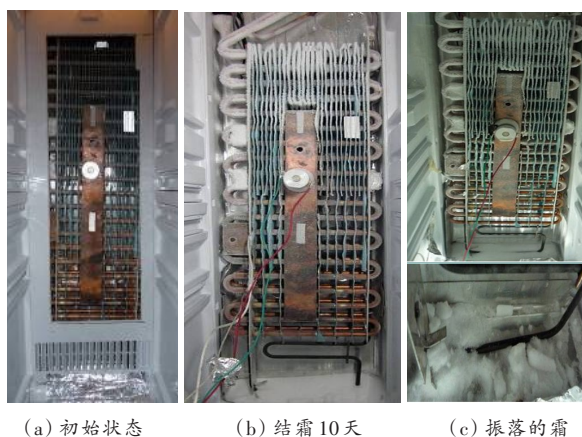


图9 蒸发器初始状态、结霜10天及底部落霜

Fig. 9 Initial state of evaporator, 10 days of frost and frost fall at the bottom

按照压缩机每工作10 h除霜一次计算除霜能耗,压缩机的启停比按1:1计算。根据冰箱压缩机工作原理,首次降温需要时间为2~3 h,此后每小时除霜一次,则冰箱压缩机从首次启动到化霜共用了16 h,每次化霜时间30 min,其中电加热18 min,然后停止加热,待蒸发器表面霜融化脱落后重启压缩机,计算得到消耗的电功率为0.081 kWh。如果考虑压缩机将蒸发器温度重新拉至电加热除霜前,则压缩机仍需做功2 h,则16 h内电加热化霜总能耗为0.241 kWh,并且融霜次数越多,能耗越大。

采用超声除霜,实际工作振幅为额定振幅的39%~52%,采用间歇50 s振动10 s的工作模式,则16 h超声除霜的能耗为0.09 kWh。如果改变超声振动间歇工作参数和功率参数,则超声除霜能耗

有可能更低。基于此,超声除霜方法是高效、低能耗的,具有工程化应用价值。

## 6 结论

1) Lamb波S0、A0模态面内位移激发的XZ平面剪切应力和SH波激发的YZ平面剪切应力对翅表基础霜层具有剥离作用,而Lamb波A0模态离面位移激发的ZZ方向主应力对基础霜层具有破碎作用。

2) 激光测振试验结果表明,超声振动在霜晶根部激发的弯矩可将部分霜晶体从根部折断,从加速度角度解析了超声高频振动除霜的可行性,从频谱角度来看,蒸发器在换能器谐振频率下作高频强迫振动。

3) 蒸发器在超声高频振动激励下,翅片间基本无霜堆积、堵塞,除霜死区处显微观察发现,与翅片黏附的霜晶体很少,可借助风力去除。

4) 面内位移激发的剪切应力和离面位移激发的面内主应力是基础霜层发生剥离和破碎的主要作用机制,也是超声除去基础霜层的主要机理。据此,基于超声高频振动的除霜技术在理论和实际是可行的。

## [参考文献]

- [1] HUANG W Z, JI J, XU N, et al. Frosting characteristics and heating performance of a direct-expansion solarassisted heat pump for space heating under frosting conditions [J]. Applied Energy, 2016, 171: 656-666. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.048.
- [2] 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.185.
- [3] TAN H H, XU T, LIU Z, et al. Investigation of ultrasonic array defrosting method based on synergism of standing wave intermittent phase-stagger and multi-frequency for finned-tube evaporator [J]. Energy and Buildings, 2020, 218: 110054. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110054.
- [4] TAN H H, ZHANG X F, ZHANG L, et al. Ultrasonic influence mechanism of a cold surface frosting process and an optimised defrosting technique [J]. Applied

- Thermal Engineering, 2019, 153: 113–127. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.094.
- [5] AMER M, WANG C C. Experimental investigation on defrosting of a cold flat plate via ultrasonic vibration under natural convection [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115729.
- [6] NI P Y, LV Z L, JIANG H Y, et al. Simulation and experiment on pneumatic defrosting of evaporators with heat storage [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 51: 103596. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103596.
- [7] XU Z J, HAN L. An experimental study on energy-storage based defrosting performance of an air source heat pump system with a micro-channel heat exchanger as outdoor coil [J]. Applied Thermal Engineering, 2023: 122067. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122067.
- [8] WANG F, XIANG M T, YANG W B. Effects of contact angle hysteresis on frosting and defrosting characteristics on vertical superhydrophobic surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121881. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121881.
- [9] SU W, MA D X, JIN X, et al. Experimental study on frosting and defrosting characteristics for inclined cold plates with surface wettability considered [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122089. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122089.
- [10] ZENG J, SONG B L. Research on experiment and numerical simulation of ultrasonic de-icing for wind turbine blades [J]. Renewable Energy, 2017, 113: 706–712. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.045.
- [11] SONG M J, LIU S C, DENG S M, et al. Experimental investigation on reverse cycle defrosting performance improvement for an ASHP unit by evenly adjusting the refrigerant distribution in its outdoor coil [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 611–620. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.206.
- [12] ZHU Y, PALACIOS J, ROSE J, et al. De-icing of multi-layer composite plates using ultrasonic guided waves [C]//49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Virginia: AIAA, 2008.
- [13] ALACIOS J L. Design, fabrication, and testing of an ultrasonic de-icing system for helicopter rotor blades [D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2008.
- [14] 李栋, 陈振乾. 超声功率对冷壁面冻结液滴脱除效果的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 751–755. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.04.013.
- LI Dong, CHEN Zhenqian. Effects of ultrasonic power on removal of frozen water droplets from cold surface [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(4): 751–755. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.04.013.
- [15] 李录平, 谭海辉, 卢绪祥, 等. 层状结构中的超声传播理论及其在风力机桨叶除冰中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 125–132, 154.
- LI Luping, TAN Haihui, LU Xuxiang, et al. Ultrasonic propagation theory in multi-layer composite structure and its application to blade de-icing of wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17): 125–132, 154.
- [16] LI D, CHEN Z Q. Experimental study on instantaneously shedding frozen water droplets from cold vertical surface by ultrasonic vibration [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 53: 17–25. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.10.005.
- [17] WANG D Y, TAO T F, XU G H, et al. Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 36: 1–11. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.03.002.
- [18] 林书玉. 超声换能器的原理及设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LIN Shuyu. Principle and design of ultrasonic transducer [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] TAN H H, TAO T F, XU G H, et al. Experimental study on defrosting mechanism of intermittent ultrasonic resonance for a finned-tube evaporator [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52: 308–317. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.10.006.
- [20] TAN H H, XU G H, TAO T F, et al. Experimental investigation on the defrosting performance of a finned-tube evaporator using intermittent ultrasonic vibration [J]. Applied Energy, 2015, 158: 220–232. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.072.



## Investigation on defrosting mechanism of ultrasonic high frequency resonance based on numerical simulation and experiment

QIU Shangbin<sup>1</sup>, HUANG Bao<sup>1</sup>, TAN Haihui<sup>2</sup>, WANG Baofu<sup>2</sup>

(1. Zhongshan Qili Cold Chain Equipment Company Limited, Zhongshan 528451, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** [Purposes] For the ultrasonic defrosting mechanism is unknown in finned - tube evaporators. [Methods] The frosting process and frosting rules on the cold surface is obtained through microscopic visualization method. The theoretical model of ultrasonic defrosting is established on the basis above, and the resonance band of frost crystals and shear stress value excited by ultrasonic vibration is calculated by using the finite element software COMSOL. The maximum adhesion stress of frost crystals is compared calculated results, and the feasibility of ultrasonic high - frequency vibration defrosting technology is theoretically illustrated. Simultaneously, an ultrasonic defrosting experimental bench is constructed on the evaporator of the air-cooled refrigerator, the vibration values of the evaporator under ultrasonic high-frequency vibration are obtained by laser vibrometer, and the actual defrosting effect is compared with the numerical simulation results. Finally, the energy consumption of ultrasonic defrosting is analysed. [Findings] The interfacial stress excited by ultrasonic high-frequency vibration is obviously greater than the adhesion stress between the frost crystal and the cold surface of 0.4 MPa, which significantly reduces the mechanical properties of the frost crystal and makes the frost crystal loose and fall off. The optimal ultrasonic loading mode on the heat exchanger is intermittent loading, and the intermittent time is affected by the ambient temperature and humidity, and the higher the ambient humidity is, the shorter is the intermittent time, and vice versa, the longer is the intermittent time. [Conclusions] The energy consumption of ultrasonic defrosting is about 1/4 of that of traditional thermal defrosting, which has the feasibility of engineering application.

**Key words:** ultrasonic defrosting; numerical simulation; high frequency vibration; COMSOL; defrosting mechanism

**Manuscript received:** 2021-08-17; **revised:** 2021-09-17; **accepted:** 2021-10-17

**Foundation item:** Youth Joint Fund Project of Guangdong Provincial (2019A1515110007); Normal Project of Zhongshan Social Public Welfare Science and Technology (2019B2067); Young Innovative Talents Project in General Universities of Guangdong Province (2018KQNCX331)

**Corresponding author:** TAN Haihui(1984—)(ORCID:0000-0002-2471-6199), male, associate professor, mainly engaged in ultrasonic high efficiency energy saving defrosting technology. E-mail:xy\_thh@163.com

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:彭卓寅)