

DOI: 10.7652/xjtuxb201509018

翅片管式蒸发器超声波除霜理论与技术研究

谭海辉¹, 陶唐飞^{1,2}, 徐光华^{1,3}, 万翔¹, 张鑫¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学现代设计和转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统逆除霜技术能耗高、热舒适度差的问题,研究应用于翅片管式蒸发器的超声波除霜新技术。结合 MATLAB 数值求解方法与有限元压电结构耦合仿真方法,分析蒸发器结构中的频散曲线,确定蒸发器结构中的超声导波类型、模态及导波传播特性,并将超声频散曲线分析结果与有限元仿真结果进行对比。研究结果表明,在激励频率小于 250 kHz 时,蒸发器翅片上存在 Lamb 波的 A0 和 S0 模态以及 SH 波的 SH0 模态,Lamb 波在翅片与霜层界面处激发破碎应力,SH 波激发剪切应力;翅片上振动以 Lamb 波的 S0 模态为主,铜管上可以清楚看到对称的纵向模态,有限元仿真结果与频散曲线分析结果完全吻合;超声除霜试验与能耗分析结果表明,超声除霜能耗不到传统逆除霜能耗的 1/22,除霜效率至少提高了 7 倍,是一种高效、低能耗的翅管式换热器除霜新技术。

关键词: 频散曲线;超声导波;界面应力;超声波除霜;翅片管式蒸发器

中图分类号: TB65 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0105-09

Ultrasonic Defrosting Theory and Technology for Finned-Tube Evaporator

TAN Haihui¹, TAO Tangfei^{1,2}, XU Guanghua^{1,3}, WAN Xiang¹, ZHANG Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the high energy consumption, low thermal comfort of traditional reverse cycle defrosting technology, a new ultrasonic defrosting technology for finned-tube evaporator, is investigated. Combining the MATLAB numerical method with the finite element analysis method of piezoelectric-structure coupling simulation, the dispersion curve in the evaporator structure is analyzed and the type, mode and transmission characteristics of ultrasonic wave in the evaporator structure are determined. The ultrasonic frequency dispersion curve analysis results and finite element simulation results are compared. It is found that the A0 and S0 mode of Lamb wave and SH0 mode of SH wave exist in the fin when the excitation is less than 250 kHz, and the crushing stress and the shear stress at the interface between fin and frost layer are excited by Lamb wave and SH wave, respectively. The vibration mode in the fin is primarily the S0 mode of Lamb wave, the symmetrical longitudinal mode obviously appears in the tube, and the finite element simulation results coincide well with the calculation results of ultrasonic dispersion curve. The ultrasonic defrosting experiments and energy consumption analysis indicates that the ultrasonic

收稿日期: 2015-02-13。 作者简介: 谭海辉(1984—),男,博士生;徐光华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划资助项目(2012k09-16)。

网络出版时间: 2015-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150710.1032.003.html>

defrosting energy consumption is less than 1/22 of the traditional reverse cycle defrosting and the defrosting efficiency is improved more than 7 times.

Keywords: dispersion curve; ultrasonic guided wave; interface stress; ultrasonic defrosting; finned-tube evaporator

湿冷地区运行的空气源热泵机组,室外蒸发器经常发生结霜现象。霜层的生长增加了蒸发器的换热热阻和气流流动阻力,使得机组的性能系数降低,运行能耗增加,甚至出现机组运行故障^[1-2]。为了保证机组的高效运行,需要对室外蒸发器进行周期性除霜。已有的除霜方法要么除霜能耗高,要么系统的热舒适性和可靠性低^[3-4]。因此,探索一种新的、低能耗的除霜技术对提高能源利用效率,实现节能减排目标具有重大意义。

近年来,文献[5-9]在超声波除霜、除冰方面做了大量的探索性研究,并得出了一些有工程应用价值的试验性结论。然而,对于超声的除霜机理、超声技术在蒸发器除霜上的应用、超声除霜的能耗特性,以及翅片管式结构蒸发器的超声波除霜效果优化均未作相应的分析。

本文通过 MATLAB 求解蒸发器结构中的频散曲线,确定了蒸发器结构中的超声导波类型及导波模态,明确了结霜翅片界面处质点的振动特性,分析了超声对不同霜层结构的作用机理。同时,在恒温恒湿箱内进行超声除霜试验,分析影响超声除霜性能的主要因素,提出相应的优化方法,实现了空气源热泵无霜运行。

1 蒸发器结构中的超声导波

蒸发器的复杂结构使得在其中传播的导波不断与界面发生反射与折射的相互作用,并产生无数种导波模态^[10]。为使超声振动能够有效地从蒸发器铜管传递到翅片上,必须在蒸发器表面加装传振板。超声在自由板问题的几何描述如图 1 所示,在厚度

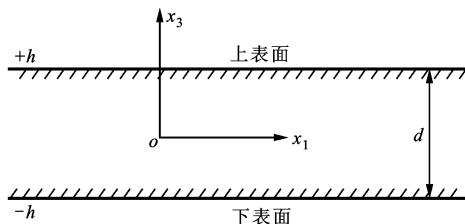


图1 超声在自由板问题的几何描述

为 d 的各向同性材料平板中,波动控制为

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

式中: μ 、 ρ 分别为剪切模量和材料密度; λ 为 Lamé 常数; 微分算子 $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x_1^2 + \partial^2 / \partial x_3^2$ 。

在 $x_3 = \pm d/2 = \pm h$ 时, Lamb 的边界条件为

$$\sigma_{33} \Big|_{x_3=\pm h} = \sigma_{31} \Big|_{x_3=\pm h} = 0 \quad (2)$$

利用势函数法求解得到板中的 Lamb 波频散方程为:

对称模态

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

反对称模态

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

$$p^2 = \omega^2 / c_L^2 - k^2, \quad q^2 = \omega^2 / c_T^2 - k^2 \quad (5)$$

式中: ω 为角频率; c_L 为纵波波速; c_T 为横波波速; k 为波数。

在板层中, SH 模态引起的质点振动都位于平行于层面的平面中, 质点振动沿 x_2 方向, 波的传播方向为 x_1 。对于 SH 波的两种模态, 其边界条件为

$$\sigma_{33} \Big|_{x_3=\pm h} = \tau_{13} \Big|_{x_3=\pm h} = \tau_{32} \Big|_{x_3=\pm h} = 0 \quad (6)$$

求解得到板中 SH 两种模态的频散方程:

对称模态

$$\sin(qh) = 0, \quad qh = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

反对称模态

$$\cos(qh) = 0, \quad qh = \frac{n\pi}{2}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (8)$$

在蒸发器铜管上, 采用柱坐标系分析导波在铜管上的传播, 其应力自由边界条件为

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{r\varphi} = 0, \quad r = a, b \quad (9)$$

根据 Helmholtz 分解定律, 式(1)中位移矢量 $\mathbf{u}$ 分解为标量势函数 φ 和矢量势函数 $\mathbf{H}$, 并代入式(1), 得到

$$\begin{aligned} & \nabla [(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}] + \\ & \nabla \times [\mu \nabla^2 \mathbf{H} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

利用 Hooke 定律及管道边界条件求得管中导波的纵向模态和扭转模态频散方程

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

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

2 蒸发器中的频散曲线

2.1 材料参数的确定

为使超声换能器能够方便安装在蒸发器上,需对蒸发器加装振动传递结构,使得超声能量能够更

多地由铜管传递到翅片上,以去除蒸发器表面结霜。为明确超声在翅片管式蒸发器中的传播特性,应对蒸发器中存在的超声导波模态进行分析,明确超声导波模态在不同介质中的转化规律。在计算结霜蒸发器中的频散曲线时,输入的材料分析参数如表 1 所示。

表 1 结霜蒸发器中各材料的分析参数

类型	密度/kg·m ⁻³	泊松比	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa	纵波波速/km·s ⁻¹	横波波速/km·s ⁻¹
铜	8 900	0.33	1.31×10 ⁵	0.43×10 ⁵	4 674	2 354
铝	2 710	0.333	0.712×10 ⁵	0.237×10 ⁵	6 270	3 140
霜	500	0.3	51	14.9	295.6	151.3

2.2 频散曲线的计算

根据理论分析,在蒸发器的翅片和传振板中存在的导波类型有 Lamb 波和 SH 波,而在蒸发器铜管中,存在着扭转、纵向和弯曲 3 种导波模态。通过在 MATLAB 中求解,得到蒸发器中的超声频散曲线如图 2~图 6 所示。

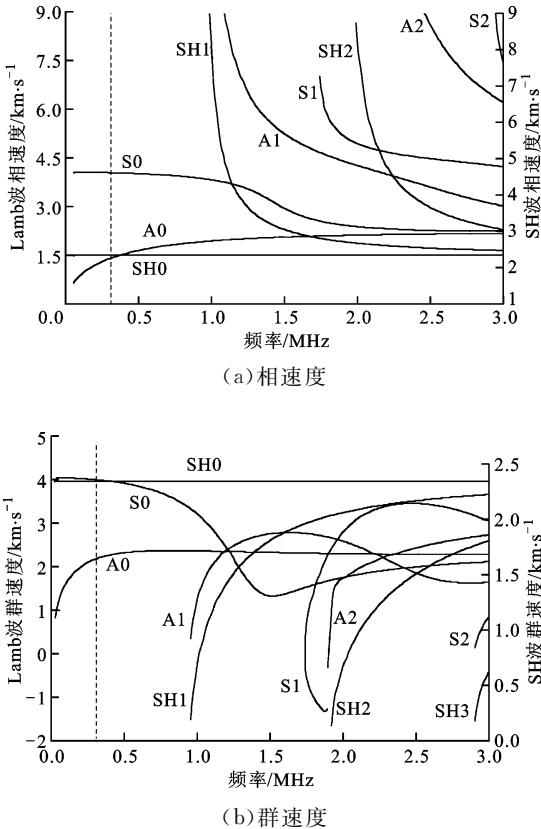


图 2 传振板上 Lamb 波与 SH 波相速度、群速度频散曲线

由图 2~图 4 可知,在超声激励频率小于 250 kHz 时,蒸发器传振板和结霜翅片上仅存在 Lamb 波的 A0 和 S0 两种模态和 SH 波的 SH0 模态。对比这 3 种模态发现,SH0 和 S0 模态在频率低于 250

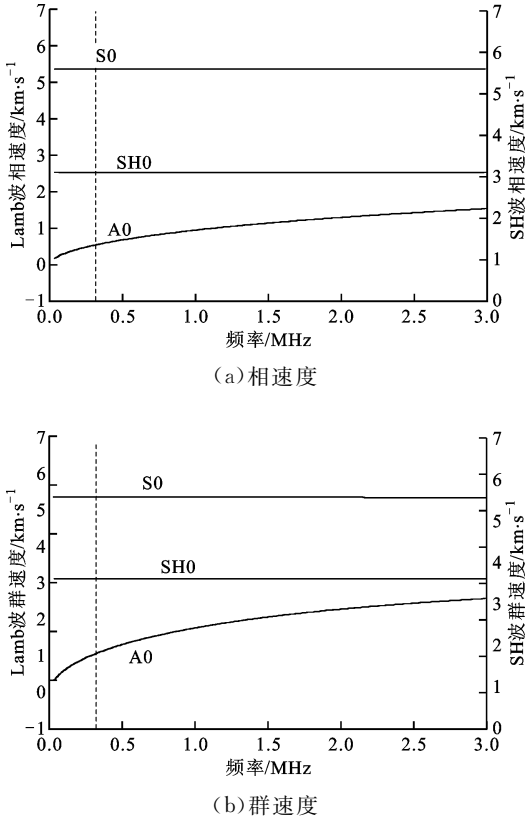
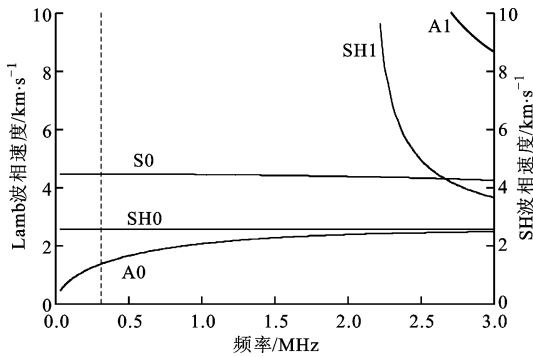
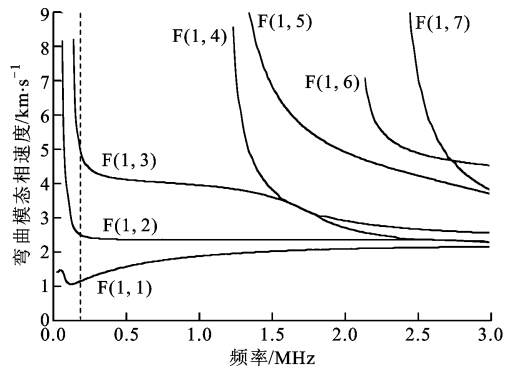


图 3 翅片上 Lamb 波与 SH 波相速度、群速度频散曲线

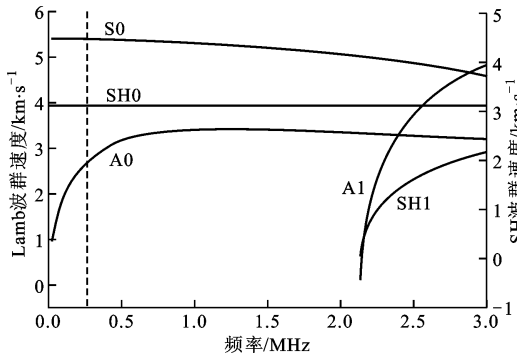
kHz 时频散较小,而 A0 模态的频散较大。因此,应选择 Lamb 波的 S0 模态和 SH 波的 SH0 模态作为蒸发器除霜的主要导波模态。因为导波在实际传播过程中随着传播距离的增加,频散较大的模态导波包络线较宽,振动幅值衰减较快,使得超声除霜的有效面积变小。为了激励 Lamb 的 S0 模态,超声换能器应以传振板中心为对称轴,在传振板上下表面对称布置。对称型 S0 模态质点的振动特点是薄板中心质点作纵向振动,上下表面质点作椭圆运动、振动相位相反并对称于中心;SH0 模态是一列随时间的



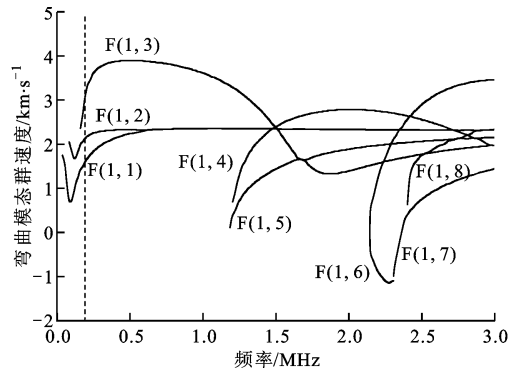
(a)相速度



(a)相速度



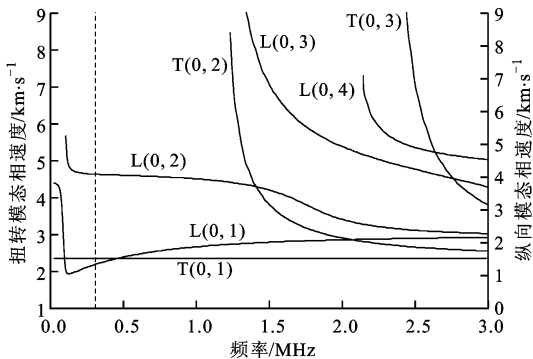
(b)群速度



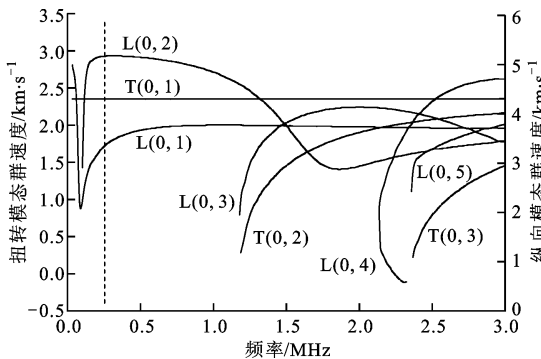
(b)群速度

图 4 结霜 0.75 mm 翅片上 Lamb 波与 SH 波相速度、群速度频散曲线

图 6 铜管上弯曲模态相速度、群速度频散曲线



(a)相速度



(b)群速度

图 5 铜管上扭转模态与纵向模态相速度、群速度频散曲线

谐波振动,其质点的振动方向垂直于翅片厚度方向,波的传播方向与 Lamb 波相同。对比洁净翅片和翅片表面结霜厚度为 0.75 mm 下的频散曲线,结霜翅片比洁净翅片中的模态数多,有 Lamb 波的 A1 模态和 SH 波的 SH1 模态。分析认为,导波的模态对结构尺寸的变化较为敏感,结霜增加了翅片厚度,使得相同频率区间内存在的导波模态数增加。

由图 5、图 6 可知,在超声激励频率小于 250 kHz 时,蒸发器铜管中存在扭转模态 $T(0,1)$,纵向模态 $L(0,1)$ 、 $L(0,2)$ 和弯曲模态的 $F(1,1)$ 、 $F(1,2)$ 、 $F(1,3)$ 6 种模态。其中,扭转模态和纵向模态为轴对称模态,而弯曲模态为非轴对称模态。扭转模态各截面绕中心旋转,且截面轴线不发生扰动,保持不变;纵向模态是圆柱体各质点作沿轴向的扩张和收缩振动,没有沿轴线的横向运动;弯曲模态是圆柱体各质点作横向运动。这 3 种模态可分别表示为:扭转模态 $T(0,n)$,纵向模态 $L(0,m)$ 和弯曲模态 $F(n,m)$ 。其中,周向阶次 n 为模态绕管壁螺旋式传播形态,模数 m 为该模态沿管道壁厚方向上的振动。当管道半径与壁厚之比较大时,管道表面近似于平面,此时导波的扭转模态 $T(0,n)$ 相当于平板中的 SH 波,纵向模态 $L(0,m)$ 相当于平板中的

Lamb 波;弯曲模态是圆柱体各个质点的横向振动,3 个位移的分量都存在,并且相互耦合,使得位移偏振矢量在三维空间(x,y,z)内。由于不同模式导波在管中的位移分布、应力分布和能量分布各不相同,因此应选择合适的超声除霜模态。超声在整个蒸发器中的传播及导波的模态的转换形式主要有:①从传振板传递到铜管上,SH 波的 SH0 模态转换为 $T(0,1)$ 模态,Lamb 波的 A0 模态转换为 $L(0,2)$ 模态,S0 模态转换为 $L(0,1)$ 模态;②从铜管传递到翅片上, $T(0,1)$ 模态转换为翅片上 SH0 模态, $L(0,2)$ 模态转换为翅片上 A0 模态, $L(0,1)$ 模态转换为翅片上 S0 模态。

2.3 界面应力分析

取结霜翅片上的微元体为研究对象,如图 7 所示, y 轴垂直于翅片横截面方向,对于 zy 平面剪切应力,在自由表面其值为 0,而 yx 平面方向的剪切应力在整个有限单元厚度上不为 0。当翅片表面结霜后,在霜层与翅片界面处同时出现 zy 和 zz 方向剪切应力。 zy 平面剪切应力对霜层具有剥离作用,而 zz 平面剪切应力对覆冰具有破碎作用,这两种应力分别是由 Lamb 波和 SH 波在霜层与翅片界面处因材料之间的不同产生波速差所致。当这两种应力的合力大于霜层的黏附应力时霜层脱落,达到除霜目的。

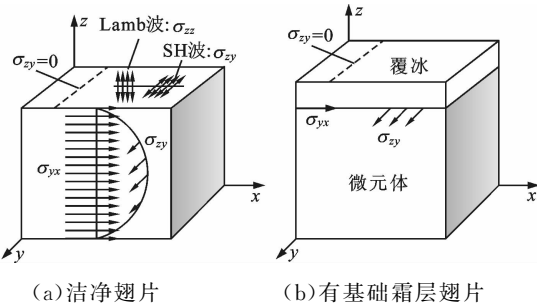


图 7 微元体应力分析

3 蒸发器有限元分析

3.1 仿真模型的建立

为了明确超声在翅片管式蒸发器中的传播特性,根据蒸发器的外部结构尺寸,翅片厚度 0.1 mm,翅片间距 1.5 mm,铜管外径 7.5 mm,铜管厚度 0.5 mm,铜管间距 20 mm。在 SolidWorks 中建立蒸发器简化模型的三维实体模型,并导入 ANSYS 中得到蒸发器的有限元模型,如图 8 所示。

3.2 数值计算结果

在数值计算过程中,铜管和翅片材料参数如表

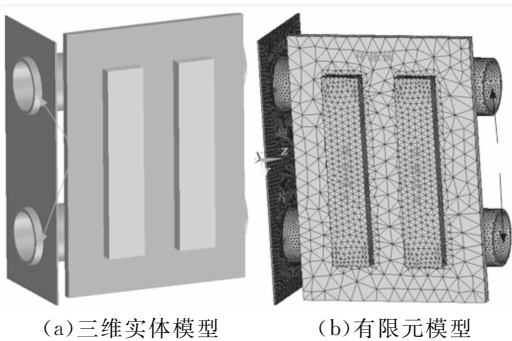
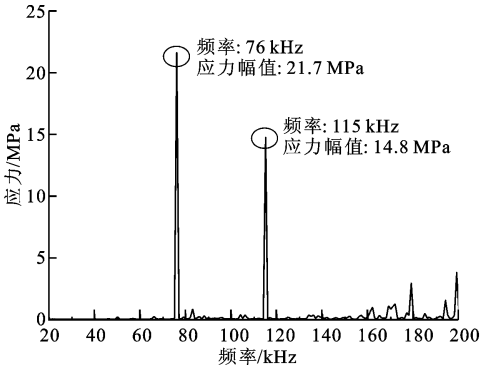
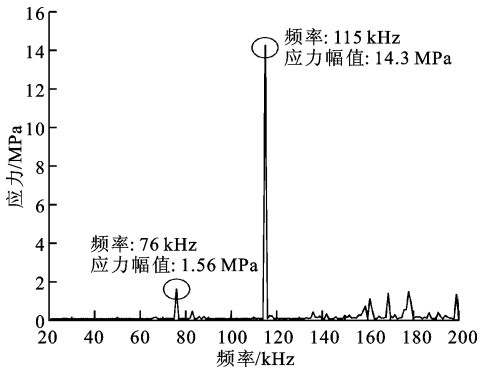


图 8 蒸发器超声除霜三维实体模型和有限元模型

1 所示,压电换能器材料参数参考文献[11-12]中的 PZT-4 压电材料参数。计算得到铜管附件翅片上 308 号节点在 xy 、 xz 平面的应力幅值随频率变化的关系曲线,如图 9 所示,得到的结果如图 10~图 12 所示。



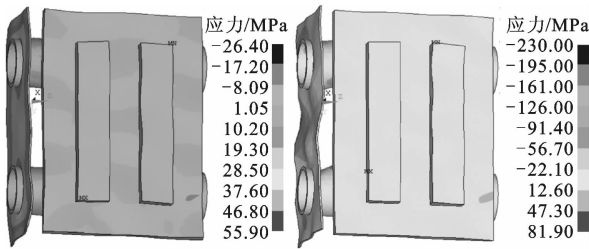
(a) xy 平面



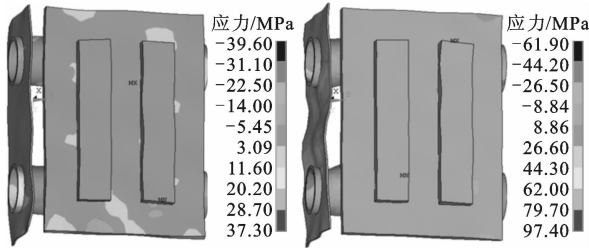
(b) xz 平面

图 9 308 号节点在 xy 、 xz 平面的应力幅值与频率的关系

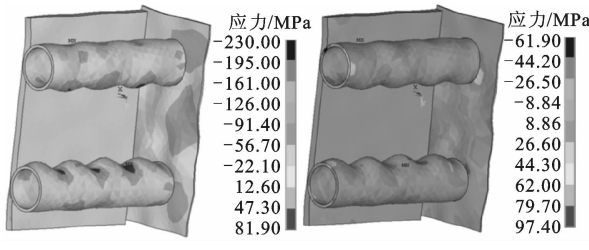
由图 9 可知,在不考虑阻尼和能量耗散、且在压电片上施加 400 V 电压的条件下,翅片上的 308 号节点在 76 kHz 和 115 kHz 处出现应力峰值,其中 xy 平面的最大应力达到 21.7 MPa, xz 平面的最大应力达到 14.3 MPa。查看 115 kHz 处两铜管间翅片表面节点的应力值,得到的结果如表 2 所示。在翅片表面,超声激发的剪切应力远大于冰的最大黏



(a) 频率 76 kHz (b) 频率 115 kHz
图 10 xy 平面应力云图



(a) 频率 76 kHz (b) 频率 115 kHz
图 11 xz 平面应力云图



(a) xy 平面 (b) xz 平面
图 12 频率为 115 kHz 时 xy 、 xz 平面应力云图

附应力 0.4 MPa^[13]。这说明理论上不考虑能量耗散的条件,超声振动能有效除去蒸发器表面的结霜,实现蒸发器无霜运行,提高了能源利用效率。

表 2 铜管间翅片表面节点的应力值

节点	应力/MPa	
	xy 平面	xz 平面
308	21.74	14.37
312	6.57	10.26
316	-12.48	2.16
320	-2.75	-7.85
324	16.75	-6.41
328	-9.82	3.26

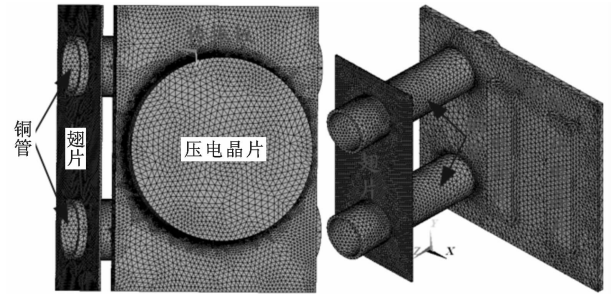
由图 10、图 11 可知,蒸发器翅片表面应力呈椭圆状分布,且正负应力交替出现。由振型可知,翅片上出现了沿 x 、 y 两个方向传播的 Lamb 波的 S_0 模态,而 A_0 模态和 SH 波的 SH_0 模态不明显。在各

种导波模态的影响下,翅片表面的某些区域出现了应力畸变现象。这是因为复杂的翅管式结构使得导波在铜管与翅片界面处通过反射和折射与界面发生作用,使得翅片上存在多个入射导波,同时入射导波的 3 种模态与翅片边界处的反射波和折射波在翅片表面进行叠加。因此,翅片表面某点的振动是一个导波波群在此处叠加的总效果,所以翅片上某些区域会出现振型的畸变。相对于翅片表面,传振板表面的振型相对简单,存在沿 z 向传播的 Lamb 波,并在传振板与铜管接触处出现了应力的极值点。

由图 12 可知,铜管上明显存在扭转、纵向和弯曲 3 种模态,而且可以清楚看到纵向模态的对称特性。铜管的最大振幅和最大应力均出现在铜管中间部位,这是因为在管端施加了边界约束。从整个有限元分析结果来看,所得结果与蒸发器频散曲线数值计算结果基本吻合。

3.3 换能器不同形状及布置方式分析

为优化超声除霜效果,本文对不同形状及安装方式的换能器进行了对比分析,建立的三维有限元模型如图 13 所示。



(a) 换能器垂直于翅片 (b) 换能器平行于翅片
图 13 换能器不同形状及不同安装方式下的有限元模型

通过对不同形状、不同布置方式换能器进行有限元分析发现,当换能器形状和安装位置发生变化时,超声除霜的最优频率也发生相应的变化。对比图 9、图 14 和图 15 可知,在频率小于 100 kHz 时,采用圆片状压电换能器能够产生较大的界面剪切应力。同时,对比每种最优除冰频率所对应的应力云图发现,翅片表面剪切应力大致呈椭圆状分布,翅片出现以 Lamb 波 S_0 模态的波浪状变化,正负应力交替出现,而在翅片表面的某些特定区域,出现应力的突变。分析认为,Lamb 波和 SH 波经过翅片边界及翅片与铜管界面处的反射和折射,在翅片表面形成叠加。在特定区域内,耦合产生的应力呈非线性,在局部会出现应力的突变。当条状压电换能器与翅片表面平行布置时,在铜管上产生的剪切应力以两

条铜管间的中心线为对称,应力分布较为规则。综合以上考虑,为方便蒸发器的加工和换能器的安装,建议采用最优频率较低的圆片状压电换能器,布置方式应与翅片表面平行,类似于图 13b。

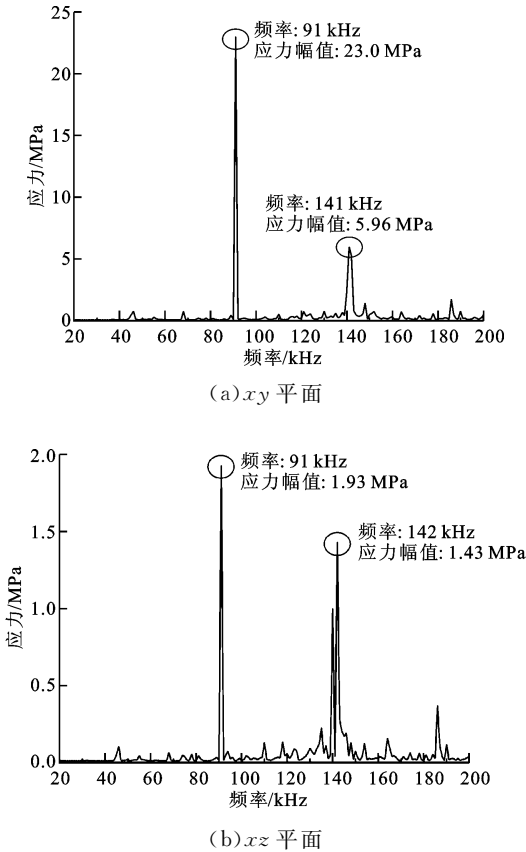


图 14 条状压电换能器 xy 、 xz 平面应力幅值与频率的关系

4 蒸发器除霜试验

通过以上分析,当超声激励频率小于 200 kHz 时,超声经传振板、铜管、翅片与霜层界面,在翅片表面主要激发了 Lamb 波的 S_0 和 SH 波的 SH_0 两种模态。这两种模态在翅片与霜层界面处产生破碎和剪切两种应力,如果这两种应力能克服霜层的黏附应力,就能实现空气源热泵的无霜运行。为验证这一假设,在焓差室中搭建超声除霜试验系统,如图 16 所示。

试验对象为海信 3.0 P 定频空调,室外侧蒸发器由 5 个循环回路组成,整个蒸发器为双层 L 型结构。通过控制焓差室内的干湿球温度来控制室内温度和湿度,试验在干球温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室外侧进行,在机组运行 1 h 后,以未施加超声的结霜蒸发器为参照对象,观察施加超声振动蒸发器表面结霜情况,如图 17 所示。

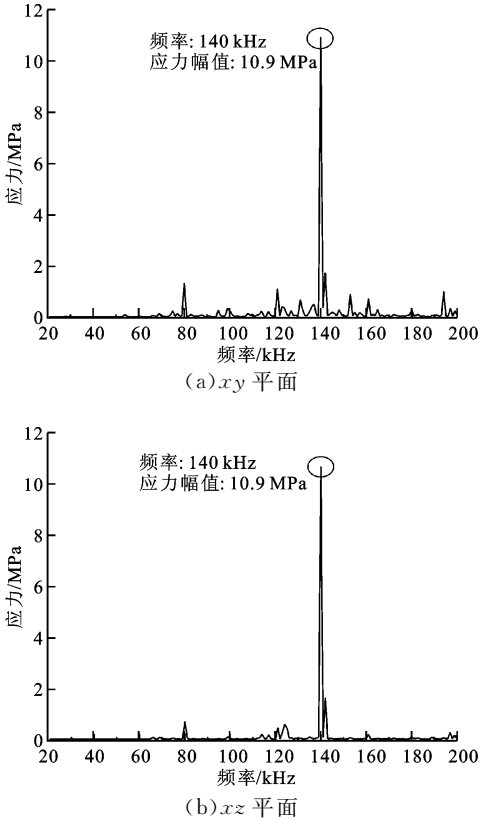


图 15 换能器垂直铜管布置的 xy 、 xz 平面应力幅值与频率的关系

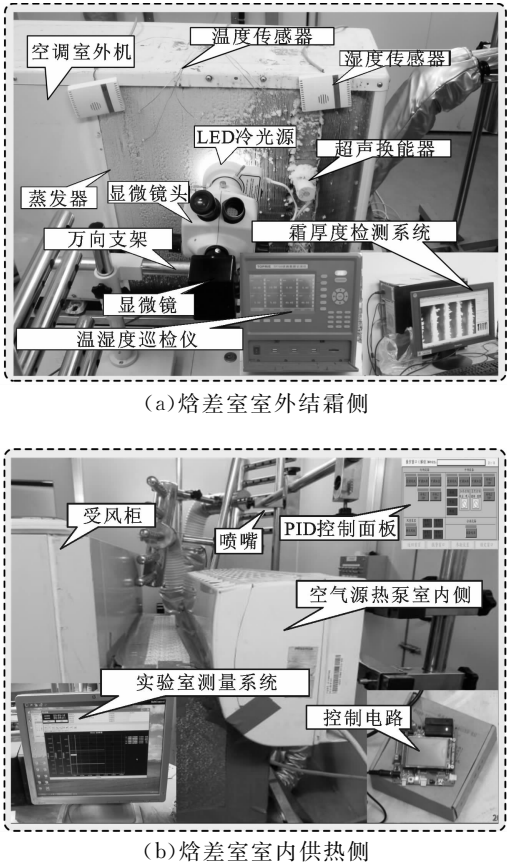
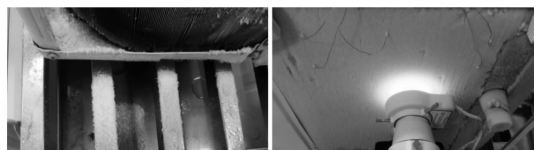


图 16 焓差室内搭建的空气源热泵超声除霜系统



(a)加超声正面除霜

(b)加超声侧面除霜



(c)加超声底面的霜

(d)未加超声正面结霜

图 17 蒸发器在施加和未施加超声下的结霜图

通过对比发现,施加超声后,掉落的霜晶体在蒸发器底下形成了霜堆,翅片表面基本无结霜。在蒸发器表面某些特定区域内,有少量霜球形成,通过显微镜观察发现,霜晶体在掉落过程中被此处生长的霜晶体捕获,在表面形成搭接结构。随着时间的推移,不断有霜晶体被捕获,最后形成霜球。

分析认为,翅片管式蒸发器的复杂结构使得超声在传播的过程中,声波的叠加在蒸发器表面形成多个驻点,霜晶体在驻点处受超声激励的影响较小,使得霜晶体快速生长形成霜球。观察整个蒸发器的结霜情况,在额定功率为 50 W 的单个超声换能器作用下,整个蒸发器表面 1/3 部分无结霜,即单个超声换能器的有效除霜面积约为 0.16 m^2 。霜晶体未除掉区域是因为超声在实际的传播过程中存在能量的衰减,在传播一定距离后,超声波在翅片表面的能量低于除霜所需的最低能量。综合优化超声加载模式、布置方式及频率选择后,超声能够实现高效、节能除霜。

在前期研究中发现,使用间歇式的超声加载模式比连续的超声加载模式除霜效果更好。对于传统的逆向除霜技术,整个除霜过程包括翅片表面霜晶体的融化和翅片表面残留液滴的蒸干。按照文献[14-15]的结论,一个完整的逆向除霜过程耗时大约 10 min,而我们所采用的超声加载模式有 4 种:加载 10 s,停 50 s;加载 10 s,停 110 s;加载 10 s,停 170 s;加载 10 s,停 230 s。以海信 3.0P 空调为例,额定功率为 2.2 kW,冬季一般 2 h 逆向除霜一次,则其 2 h 除霜能耗为 1 320 kJ,而超声在间歇 50 s,工作 10 s 模式下工作 2 h 的除霜能耗为 60 kJ。依次类推,间歇 110 s,工作 10 s 的除霜能耗为 30 kJ,间歇 170 s,工作 10 s 的除霜能耗为 20 kJ,间歇 230 s,工作 10 s

的除霜能耗为 15 kJ。

通过对比发现,传统逆除霜技术是超声除霜能耗的 22~88 倍,按照超声有效除霜面积约为整个蒸发器面积的 1/3,则整个除霜过程中,超声除霜效率约为逆向除霜效率的 7~29 倍。因此,该技术有望替代已有的除霜技术,可以解决各领域有关除霜、除冰难题,实现换热器高效、低能耗除霜,解决热除霜所带来的温度波动和能耗高等问题。

5 结 论

本文对翅片管式蒸发器的超声除霜理论和技术进行了分析,在此基础上得出以下结论。

(1)超声在翅片管式蒸发器中传播时,当超声激励频率小于 250 kHz 时,导波从传振板经两次模态转化传递到翅片上,最终翅片上存在 Lamb 波的 A0 和 S0 模态以及 SH 波的 SH0 模态,这两种类型的波在翅片与霜层界面处产生破碎和剪切两种应力。

(2)通过对不同形状、不同安装方式的换能器进行数值计算发现,翅片上振动以 Lamb 波的 S0 模态为主,而铜管上明显存在扭转、纵向和弯曲 3 种模态,且可以清楚看到纵向模态的对称特性。这一结果与理论分析结果和超声频散曲线计算结果完全吻合。

(3)整个蒸发器中存在着 3 种导波模态的转化形式,分别为传振板上 SH 波的 SH0 模态→铜管上的 T(0,1)模态→翅片上 SH 波的 SH0 模态;传振板上 Lamb 波的 S0、A0 模态→铜管上的 L(0,1)、L(0,2)模态→翅片上 Lamb 波的 S0、A0 模态。

(4)超声除霜试验表明:超声波能够除掉蒸发器表面一定区域内的结霜,其除霜能耗是传统逆除霜技术能耗的 1/88 到 1/22,其除霜效率是逆向除霜效率的 7~29 倍。

参考文献:

- [1] 董建锴,姜益强,姚杨,等. 空气源热泵相变蓄能除霜蓄能特性实验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(2): 74-79.
DONG Jiankai, JIANG Yiqiang, YAO Yang, et al. Experimental analysis on characteristics of energy storage for defrosting of air source heat pump with phase change energy storage [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 74-79.
- [2] 郭宪民,王善云,汪伟华,等. 环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究 [J]. 西安交通大学学报,

- 2011, 45(3): 30-34.
- GUO Xianmin, WANG Shanyun, WANG Weihua, et al. Effect of environmental condition on evaporator surface frost layer for air source heat pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 30-34.
- [3] 姚杨, 姜益强, 马最良. 翅片管换热器结霜时霜密度和厚度的变化 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6): 1040-1042.
- YAO Yang, JIANG Yiqiang, MA Zuiliang. Change of frost density and thickness for finned-tube heat exchanger under frosting [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(6): 1040-1042.
- [4] WU Xiaomin, RALPH L W. Investigation of the possibility of frost release from a cold surface [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 24(3/4): 151-156.
- [5] 阎勤劳, 朱琳, 张密娥, 等. 冷风机超声波除霜技术试验研究 [J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 74-75.
- YAN Qinlao, ZHU Lin, ZHANG Mi'e, et al. Study on ultrasonic defrost technology of refrigeration fan [J]. Journal of Agriculture and Machine, 2003, 34(4): 74-75.
- [6] LI Dong, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Effect of ultrasound on frost formation on a cold flat surface in atmospheric air flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1247-1252.
- [7] TAN Haihui, TAO Tangfei, XU Guanghua, 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.
- [8] OVERMEYER A, PALACIOS J L, SMITH E C. Actuator bonding optimization and system control of a rotor blade ultrasonic deicing system [C/OL] // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structural, structural dynamics, and materials conference, Honolulu, Hawaii, April 23-26, 2012 [2015-01-24]. <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-1476>.
- [9] ZHU Yun, PALACIOS J L, ROSE J L, et al. De-icing of multi-layer composite plates using ultrasonic guided waves [C/OL] // 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Schaumburg, IL, April 7-10, 2008 [2014-12-12]. <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2008-1862>.
- [10] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014: 155-275.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 谭海辉, 李录平, 靳攀科, 等. 风力机叶片超声波除冰理论与方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 112-117.
- TAN Haihui, LI Luping, JIN Panke, et al. Ultrasonic de-icing theory and method for wind turbine blades [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 112-117.
- [13] PALACIOS J L, SMITH E C, GAO Huidong, et al. Ultrasonic shear wave anti-icing system for helicopter rotor blades [C/OL] // American Helicopter Society 62nd Annual Forum, Phoenix, AZ, May 9-11, 2006 [2014-12-16]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.131.8425&rep=rep1&type=pdf>.
- [14] JANG Jingyong, BAE H H, LEE S L, et al. Continuous heating of an air-source heat pump during defrosting and improvement of energy efficiency [J]. Applied Energy, 2013, 110: 9-16.
- [15] QU Minglu, LIANG Xia, DENG Shiming, et al. A study of the reverse cycle defrosting performance on a multi-circuit outdoor coil unit in an air source heat pump: Part I Experiments [J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 122-129.

(编辑 赵炜 杜秀杰)