

飞机积冰局部脱粘现象超声回波探测*

张杨¹, 王渊¹, 王岩¹, 王逸斌¹, 朱春玲²

(1. 南京航空航天大学航空学院 南京, 210016)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 热冲击会导致飞机蒙皮表面冰层局部碎裂和脱粘, 针对目前无法有效测量冰层脱粘程度的问题, 提出采用非接触超声脉冲回波技术对冰层脱粘程度进行评估。首先, 采用PZFlex软件建立了包含超声传感器、飞机蒙皮与冰层的二维模型, 研究了冰层内部裂缝及冰/蒙皮界面脱粘区域尺寸对冰层超声脉冲回波信号影响规律, 初步获得了冰层局部脱粘超声评估方法; 其次, 基于LabVIEW软件搭建了由加热控制模块、温度采集模块、超声信号发生及采集模块组成的地面冷环境实验平台, 通过电加热膜产生热冲击造成冰层局部区域脱粘, 验证了提出的冰层局部脱粘超声评估方法的可行性。在电加热功率密度为 1.6 W/cm^2 的作用下, 铝板-冰层界面温度由 -24°C 升至 -4°C 时, 探测区域内脱粘面积达到62.8%以上。结果表明, 采用非接触式超声脉冲回波技术可以有效评估探测区域内冰层局部脱粘程度。该方法可用于评估飞机除冰系统工作时冰层脱粘面积, 为除冰控制系统提供可靠状态信息。

关键词 飞机结冰; 热冲击; 界面脱粘; 脉冲回波

中图分类号 TH89; TB553; V244

引言

飞机在飞行过程中, 当云层中的过冷水滴撞击到未受防护的迎风表面时, 会在飞机表面冻结产生积冰^[1]。飞机结冰会造成机翼的气动性能严重损失, 降低飞机操稳特性, 是影响飞机安全的主要外因之一^[2-3]。电热防/除冰技术具有结构简单、效率高、易于控制的优点, 目前广泛应用于飞机防/除冰系统中^[4]。Ding等^[5]对飞行过程中电热除冰过程进行建模仿真, 发现同一位置单位时间内温差越大, 界面温度分布不均匀, 易使冰层产生裂纹、脱粘甚至脱落。在冰发生脆性破坏过程中, 尽管有部分区域应力未超过强度值, 但局部的冰层破坏对整体冰层的黏附作用削弱会导致冰层整体脱落^[6]。获得冰层局部脱粘信号后, 可调整除冰系统控制率提升除冰效率。然而由于蒙皮表面覆冰, 无法观察到冰层与蒙皮界面的局部脱粘现象, 获得脱粘信号。

目前, 针对冰层脱粘的研究主要关注界面黏附力与脱粘机理^[7-8], 对于脱粘现象的研究较少。冰层与蒙皮界面局部脱粘可视作多层介质脱粘问题, 而超声探测技术已广泛用于多层介质无损检测领域^[9]。刘嘉同等^[10]基于纵波与横波结合的超声水浸

检测方案, 对多层粘接结构开展脱粘检测研究, 有效提取与界面脱粘相关的特征信号。Hou等^[11]对金属与橡胶粘接结构的电动车组SYS510e空气弹簧锥形粘接界面进行了超声脱粘检测, 并对不同粘接条件下回波的时频特性进行分析。在飞机结冰探测领域, 基于声波在多层介质中的传播理论, 超声探测方法可用于测量冰层厚度及冰层孔隙率, 进而识别结冰类型^[12], 但在研究冰层脱粘问题上尚未应用。

笔者利用超声脉冲回波探测技术对飞机表面冰层热冲击作用下的局部脱粘现象进行判断与评估。通过研究冰层内部裂缝及冰/铝板界面脱粘区域尺寸参数对超声脉冲回波时域信号特征参数的影响规律, 初步获得冰层局部脱粘超声评估方法。通过地面冷环境电加热作用下冰层脱粘超声探测实验进行验证, 获得准确的脱粘区域信息参数, 为除冰系统控制率设计提供参考。

1 研究原理

采用超声脉冲回波技术对飞机表面冰层在热冲击作用下的局部脱粘现象进行探测。图1为研究原理示意图。

* 国家自然科学基金重点资助项目(11832012); 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室自主研究课题资助项目(MCMS-I-0120G01)

收稿日期: 2021-12-19; 修回日期: 2022-05-17

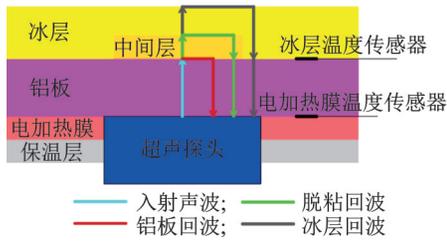


图 1 研究原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of reasearch

1.1 传热过程

电加热膜通电工作时,热量在铝板中传导,物体的瞬态导热方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda' \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda' \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中: ρ 为材料密度; c_p 为材料比热容; λ' 为材料导热系数; T 为材料温度。

铝板上表面(即冰/蒙皮界面处)随时间变化呈现出具有一定梯度的温度分布。在冰层与铝板紧密粘合处,温度的变化会引起材料内部热应力的产生,温度梯度较大处,热应力也较大,使冰层出现局部脱粘现象^[5]。

1.2 多层介质中超声波传播规律

超声脉冲在介质内传递的控制方程可用应力和速度^[13]表示为

$$\rho \frac{\partial v_j}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial y_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_k}{\partial y_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial y_j} + \frac{\partial v_j}{\partial y_i} \right) \quad (3)$$

其中: $v_{i,j,k}$ 为坐标系内速度分量; $x_{i,j,k}$ 为坐标方向; σ_{ij} 为 x - y 平面内应力张量; δ_{ij} 为克罗内克函数; λ 和 μ 为拉梅常数; t 为时间。

声波在介质中传播,透过界面时,其方向、强度、波形的变化取决于界面两侧介质的声阻抗和入射波的方向。当超声波垂直入射时,一部分声波将会透过界面,产生一个与入射波方向相同的透射波;另一部分声波能量发生反射,产生一个与入射波方向相反的反射波。如图 1 所示,在电加热膜作用下,冰/铝板界面处出现局部脱粘或裂纹时,原先冰/铝板界面处将引入第 3 种介质。在超声探头探测区域内,超声波自铝板下表面垂直入射后,根据各层介质的声阻抗特性以及中间层脱粘区域的尺寸参数,在界面处发生相应的反射与透射现象:在铝板/中间层界

面处一部分声波反射由超声探头接收,另一部分声波透射进入中间层;在中间层/冰层界面处,一部分声波反射由超声探头接收,另一部分透射进入冰层并在冰层/空气界面全部反射回到超声探头。当入射声波透过铝板至中间层未覆盖区域时,即铝板/冰层界面处,一部分声波反射回到超声探头,另一部分声波透射进入冰层,并在冰层/空气界面全部反射回到超声探头。

声压反射率 r 为反射波声压与入射波声压之比,即

$$r_{A-I} = \frac{p_{r_{A-I}}}{p_0} = \frac{Z_A - Z_I}{Z_A + Z_I} \quad (4)$$

$$r_{A-M} = \frac{p_{r_{A-M}}}{p_0} = \frac{Z_A - Z_M}{Z_A + Z_M} \quad (5)$$

声压透射率 τ 为透射波声压与入射波声压之比,即

$$\tau_{A-I} = \frac{p_{\tau_{A-I}}}{p_0} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_I} = 1 + r_{A-I} \quad (6)$$

$$\tau_{A-M} = \frac{p_{\tau_{A-M}}}{p_0} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_M} = 1 + r_{A-M} \quad (7)$$

其中: p_r, p_t, p_0 分别为反射波声压、透射波声压以及入射波声压; Z 为介质声阻抗;下标 A, I, M 分别表示铝板、冰层与中间层。

通过对比不同中间层脱粘区域尺寸情况下,冰层/铝板界面发生局部脱粘/裂纹现象前后的回波信号,可获得探测范围内冰层局部脱粘区域尺寸参数对超声脉冲回波探测信号的影响规律,进而得到冰层局部脱粘现象的超声脉冲回波评估方法。

2 仿真分析

2.1 温度均匀性仿真

由图 1 中的研究原理,以电加热膜中心为轴建立电加热膜—铝板二维轴对称模型。因粘接超声探头,在电加热膜中心需预留一个半径为 5 mm 的探头粘接孔。由式(1)可知,电加热作用下探头粘接区域正上方的铝板表面会出现温度梯度,产生热应力,可能引起冰层脱粘。故在进行超声仿真之前,先对电加热膜作用下的铝板进行热力学仿真,获得探头粘接区域上方铝板表面的温度分布和局部位移量,分析粘接超声探头对冰层脱粘的影响。

为更贴近真实情况,以实验获得的电加热膜表面温度拟合函数作为热力学边界条件输入模型进行仿真。电加热功率密度为 1.6 W/cm^2 时,探头粘接

区域温度分布与局部位移量如图2所示,图中半径5 mm的范围内为探头粘接区域。

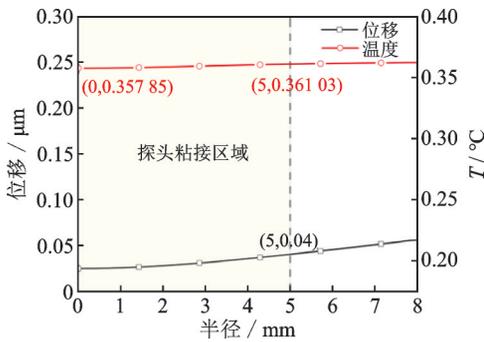


图2 探头粘接区域温度分布与局部位移量

Fig.2 Temperature distribution and Local displacement of probe bonding area

探头粘接区域温差不得超过0.01 °C,粘接处局部位移仅为0.04 μm,加热膜热均匀性较好,故超声探头的粘接不会引起冰层脱粘或产生局部裂纹。

2.2 超声仿真

建立的二维对称超声仿真模型如图3所示。其中:探头直径 D 为6 mm;基板厚度 H_A 为3 mm;冰层厚度 H_I 为1 mm;冰层和基板宽度均为10 mm,与后续实验中的参数保持一致。中间层表示脱粘/裂纹发生区域,根据式(5),两层介质声阻抗差距越大,反射回波声压越大,探头接收到的信号差异越明显。为了更清晰地显示探测区域脱粘或裂纹对回波信号的影响规律,选择空气作为中间层介质进行研究。探头加载正弦调制高斯脉冲,中心频率为15 MHz。仿真中多层介质材料属性如表1所示。

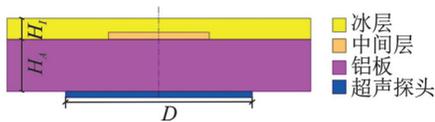


图3 超声仿真模型

Fig.3 ultrasonic simulation model

表1 多层介质材料属性

Tab.1 Physical parameters of layered materials

材料	$T/^\circ\text{C}$	弹性模量/GPa	泊松比	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
铝板	-5	71.7	0.33	2 690
冰层	-5	8.53	0.330 3	917.6
空气	-5	/	/	1.371

以模型中轴线为 z 轴,冰/蒙皮界面为 x 轴建立坐标系,超声探头对称分布在中轴线两侧,则探头最左侧坐标 $x=-3$ 。

2.2.1 超声探测区域脱粘/裂纹水平方向尺寸对超声回波信号的影响

为探究超声探头探测范围以及脱粘/裂纹宽度方向尺寸对回波信号的影响,设定空气层高度为10 μm,空气层最左侧固定在界面上 $x=-5$ 处,起始宽度为1 mm,逐次递加1 mm至空气层宽度为10 mm,模拟空气层由生成、扩展直至覆盖整个探测范围时的情况。图4为不同空气层宽度下仿真回波波形。

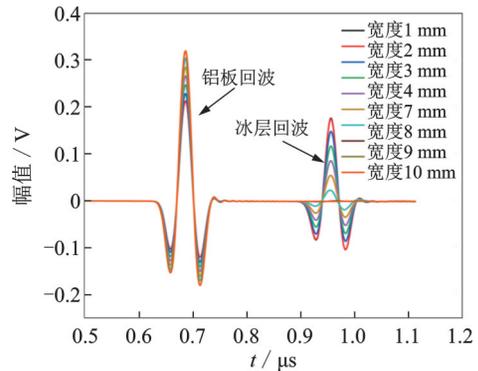


图4 不同空气层宽度下仿真回波波形

Fig.4 Simulated echo waveforms under different widths of air

不同空气层宽度时,冰层回波峰值随空气层宽度变化关系如图5所示。图中超声脉冲回波幅值不再发生变化的区域对应于空气层宽度完全覆盖超声探头直径范围的情况,这表明超声探头探测冰层脱粘的有效探测范围为其正上方的面积区域。

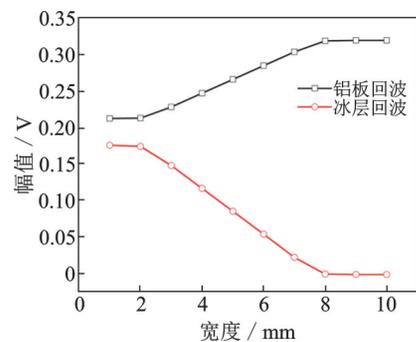


图5 冰层回波峰值随空气层宽度变化关系

Fig.5 Relationship between ice amplitude and width of air

在探测区域范围内,随着空气层的扩展,铝板结构回波峰值逐渐增大,而冰层回波峰值逐渐减小。由式(4)~(5)以及表1可得

$$r_{A-M} = \frac{p_{r_{AM}}}{p_0} = \frac{Z_A - Z_M}{Z_A + Z_M} = 95.4\% \quad (8)$$

$$r_{A-I} = \frac{p_{r_{AI}}}{p_0} = \frac{Z_A - Z_I}{Z_A + Z_I} = 66.5\% \quad (9)$$

当声波传递至空气层覆盖区域时,声波在铝板/空气界面发生反射,仅有较少部分声波透射进入冰层;在空气未覆盖区域,声波以一定比例透射入冰层。随着空气层的扩展,铝板结构回波幅值逐渐增大,冰层回波信号幅值逐渐减小。图 6 为冰层幅值衰减率与衰减系数随冰层脱粘面积比变化关系。

由于超声探头的探测结果为面内平均值,回波信号衰减率基本与脱粘面积比呈正比关系。衰减系数随脱粘率呈关系指数关系。当脱粘面积达到探测面积的 80% 以上时,声波衰减较大,直至探测区域完全脱粘后将探测不到冰层信号。

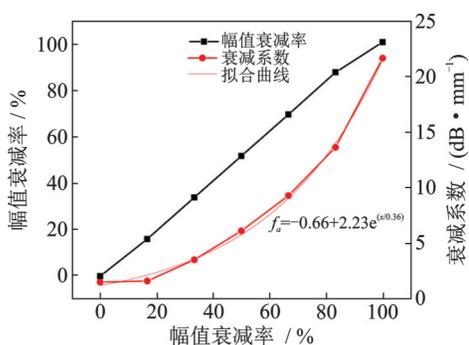


图 6 冰层幅值衰减率与衰减系数随冰层脱粘面积比变化关系
Fig.6 Relationship between decreasing rate and attenuation coefficient of ice with the ratio of ice delamination

2.2.2 超声探测区域脱粘/裂纹竖直方向尺寸对超声回波信号的影响

为研究脱粘/裂纹高度方向尺寸对回波信号的影响,设定空气层关于 z 轴对称分布且宽度方向尺寸为 3 mm,空气层高度由 10 μm 起逐次递加 2 μm,共设置 10 个计算组模拟空气层增厚的过程。

不同空气层高度下仿真回波波形如图 7 所示。不同空气层高度下的仿真回波曲线重合,说明空气层高度的增加对超声脉冲回波信号没有影响。由于

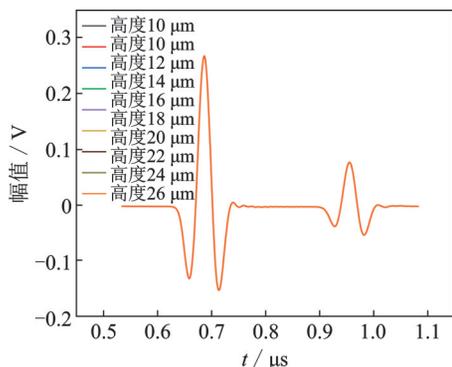


图 7 不同空气层高度下仿真回波波形
Fig.7 Simulated echo waveforms under different heights of air

空气层的存在,该区域界面处声波几乎全部反射,如式(8)所示,因此空气层一旦生成,其竖直方向增长不会对超声脉冲回波信号产生影响。

3 超声探测实验

实验在地面冷环境实验台上进行。实验台由冷环境实验箱、信号发生系统、电源、测控温系统、数据采集与传输系统以及铝板实验样件组成。冷环境箱控温精度为 ±0.5 °C;信号发生系统由可实现超声收/发功能,带宽 60 MHz 的 DPR-300 超声脉冲发生器通过 COM 端口与控制系统连接;软件中内嵌信号处理方法,实现对超声脉冲信号增益、重复频率和阻尼等参数的调节;电源为电加热膜供电,作为冰层脱粘的外部激励。实验中温度数据由图 1 中布置的 PT100 温度传感器获取,通过数据采集卡将温度数据传入控制系统中。超声高频采集模块的最大采样率为 250 MHz,信号采样频率为 100 Hz,以保证有效捕捉冰层回波信号的变化,获得冰层脱粘信息。

3.1 温度对冰层回波信号的影响

在实验过程中,冰的物性随着环境温度降低发生变化,这对冰层的超声脉冲回波信号时域特征造成一定影响。因此,首先进行温度对冰层回波信号影响规律的实验。关闭电源,电加热膜停止作用,逐渐缓慢降低冷环境温度,带冰层温度传感器显示的冰层温度保持稳定后,记录不同温度下的冰层回波信号,提取各温度下冰层回波信号峰值。图 8 为温度对冰层回波信号影响实验结果。

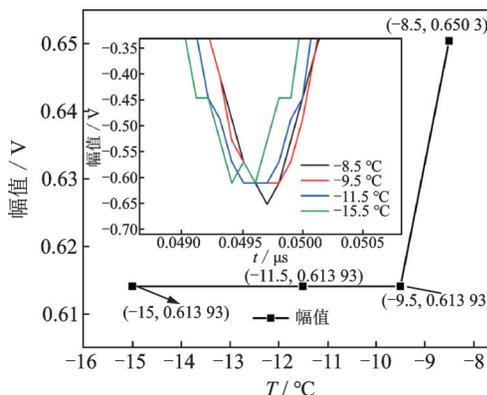


图 8 温度对冰层回波信号影响实验结果
Fig.8 Experimental waveforms under different temperatures

超声脉冲回波信号在采集传输过程中存在小幅度的跳动现象,各温度下冰层回波幅值变化小于 0.04 V。据此可认为在实验温度范围内,冰层温度

改变对超声脉冲回波信号的影响,主要体现为冰层回波相位发生偏移而回波幅值基本不变。

可见,在电加热作用下,冰层回波峰值参数的变化仅由冰层与铝板界面发生局部脱粘现象引起,可采用冰层回波信号峰值衰减率与衰减系数作为冰层局部脱粘现象的评估指标。

3.2 超声探测实验

得到温度变化对冰层回波信号的影响后,进行电加热功率密度 1.6 W/cm^2 下的飞机表面冰层热冲击下局部脱粘的超声探测验证实验,以及电加热功率密度 1.2 W/cm^2 下重复冰层脱粘超声探测实验,提取实验采集的铝板回波中与冰层回波信号峰值。 1.6 W/cm^2 和 1.2 W/cm^2 加热功率密度作用下实验结果如图 9,10 所示。

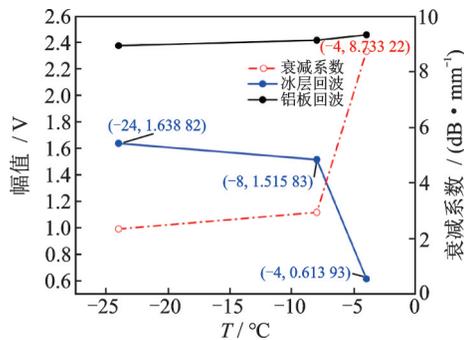


图9 1.6 W/cm^2 加热功率密度作用下实验结果

Fig.9 Experimental results of heating power density of 1.6 W/cm^2

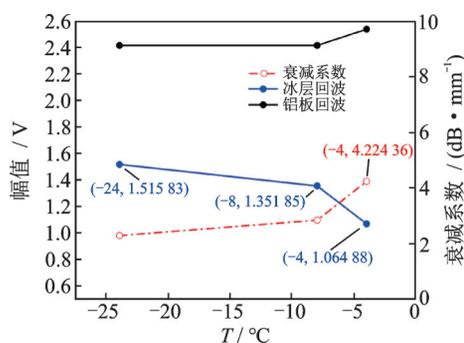


图10 1.2 W/cm^2 加热功率密度作用下实验结果

Fig.10 Experimental results of heating power density of 1.2 W/cm^2

实验结果显示:在电加热作用下,冰层/铝板界面处发生局部脱粘时,采集到的铝板回波幅值随温度升高而逐渐增大,冰层回波信号相位发生偏移且幅值减小,与仿真获得的规律与冰层物性影响实验研究结果较为吻合。

由于无法观测到冰层实际脱粘情况,以仿真获

得的衰减系数与脱粘面积比的拟合关系为参照,获得与实验衰减系数对应的脱粘面积比,实验与仿真结果对比如图 11 所示。

电加热密度为 1.6 W/cm^2 的实验条件下,当铝板/冰层界面温度由 $-24 \text{ }^\circ\text{C}$ 升温至 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,根据图 9 中的实验数据计算可得,由于热冲击导致冰层脱粘引起的冰层回波幅值衰减率为 62.8% ,计算得到衰减系数为 8.73 dB/mm 。根据图 6 得到探测区域内脱粘/裂纹面积占比为 62.8% 。根据图 11,电加热功率为 1.6 W/cm^2 的情况下,衰减系数 8.73 dB/mm 对应的脱粘面积比为 63.1% ,2 种评估方法获得的冰层脱粘面积比相对误差为 4.7% ,实验结果整体趋势与仿真结果较为一致。

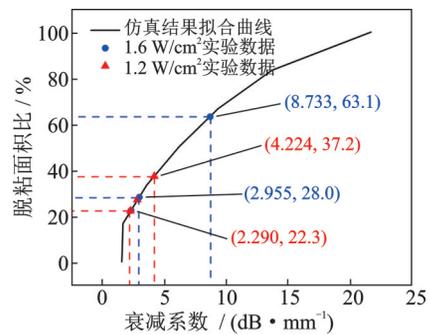


图11 实验与仿真结果对比

Fig.11 Comparison between simulation and experimental results

在电加热密度为 1.2 W/cm^2 的实验中(图 10),随着温度升高,冰层逐渐脱粘,探测信号中铝板回波峰值逐渐增大,冰层回波峰值减小,与仿真获得的趋势一致。铝板/冰层界面温度由 $-24 \text{ }^\circ\text{C}$ 升温至 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,由于热冲击导致冰层脱粘引起的衰减系数为 4.22 dB/mm ,根据图 11,探测区域内冰层脱粘/裂纹面积占比 37.2% 。

电加热功率密度不同的 2 组实验,起始温度均为 $-24 \text{ }^\circ\text{C}$,终止温度均为 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温差下, 1.6 W/cm^2 组的加热功率密度较大,铝板/冰层界面温度变化较大,热冲击作用较明显,引起探测区域的冰层脱粘面积比较大,即温度梯度较大处更容易使冰层脱粘。这与文献[5]中的研究结果相符,验证了冰层脱粘超声脉冲回波探测方法的可行性与正确性。

4 结论

1) 主要研究单个超声探头探测区域内,热冲击作用下局部脱粘对超声信号的影响。仿真结果表

明,超声探头对冰层脱粘现象的有效探测范围为其正上方面积内区域,且冰层脱粘区域尺寸参数中仅有宽度方向尺寸变化对探测信号造成影响,高度方向尺寸变化对超声回波信号基本没有影响。

2) 随着脱粘/裂纹的扩展,探测区域内冰层回波信号峰值将随之减小。冰层回波信号幅值衰减率与脱粘/裂纹面积呈线性关系,衰减系数与探测区域内冰层脱粘/裂纹面积比呈指数关系。

3) 实验结果表明,热冲击作用下冰层脱粘现象对超声脉冲回波信号的影响规律与仿真结果一致,非接触式超声脉冲回波方法可以有效评估探测区域内冰层局部脱粘面积占比。采用多路超声脉冲传感器阵列还可用于评估飞机除冰系统工作时冰层脱粘区域及脱粘面积。

参 考 文 献

- [1] OLEJNICZAK D, NOWACKI M. Evaluation of the influence of icing on wings on aircraft flight parameters [J]. *Transportation Research Procedia*, 2018, 35: 100-109.
- [2] PRINCE RAJ L, LEE J W, MYONG R S. Ice accretion and aerodynamic effects on a multi-element airfoil under SLD icing conditions[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 320-333.
- [3] ZHAO Z H, CHEN H W, LIU X L, et al. The development of electric heating coating with temperature controlling capability for anti-icing/de-icing [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 184: 103234.
- [4] LIU X L, CHEN H W, ZHAO Z H, et al. Slippery liquid-infused porous electric heating coating for anti-icing and de-icing applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 889-896.
- [5] DING L, CHANG S N, YI X, et al. Coupled thermo-mechanical analysis of stresses generated in impact ice during in-flight de-icing[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115681.
- [6] SOMMERWERK H, HORST P. Analysis of the mechanical behavior of thin ice layers on structures including radial cracking and de-icing[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 400-424.
- [7] WANG Y B, XU Y M, SU F. Damage accumulation model of ice detach behavior in ultrasonic de-icing technology [J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 1396-1405.
- [8] MARBŒUF A, BENNANI L, BUDINGER M, et al. Electromechanical resonant ice protection systems: numerical investigation through a phase-field mixed adhesive/brittle fracture model [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 230: 106926.
- [9] BIRT E A, SMITH R A. A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites[J]. *Insight*, 2004, 46(11): 681-686.
- [10] 刘嘉同, 金永, 张浩亚, 等. 基于多层界面脱粘的超声检测方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(9): 58-62.
LIU Jiatong, JIN Yong, ZHANG Haoya, et al. Multi-layer interface debonding study based on ultrasonic detection method [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(9): 58-62. (in Chinese)
- [11] HOU D W, WANG X M, NI W B. Research on ultrasonic detection of air spring rubber debonding based on CEEMDAN [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1549(3): 032154.
- [12] LIU Y, BOND L J, HU H. Ultrasonic-attenuation-based technique for ice characterization pertinent to aircraft icing phenomena[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(5): 1602-1609.
- [13] NOLET G. Quantitative seismology, theory and methods [J]. *Earth-Science Reviews*, 1981, 17 (3) : 296-297.



第一作者简介:张杨,女,1998年3月生,硕士。主要研究方向为飞机结冰超声脉冲探测技术。

E-mail: zhy222@nuaa.edu.cn

通信作者简介:朱春玲,女,1968年4月生,博士、教授。主要研究方向为飞机防/除冰技术。

E-mail: clzhu@nuaa.edu.cn