

文章编号:1000-8055(2012)02-0350-07

电脉冲除冰系统的除冰实验与数值模拟

李清英, 朱春玲, 白 天

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 搭建了电脉冲除冰实验台, 完成了脉冲放电 500 V 时的除冰实验, 获得了三次除冰激励后的除冰效果。同时, 为数值模拟除冰过程, 求解了除冰动力即铝板在涡流场作用下的脉冲压力分布, 建立了冰-铝板三维有限元分析模型, 利用 ANSYS 单元生死技术瞬态非线性分析了冰层的失效单元, 比较了 Labeas 冰层失效准则与第一强度理论分析冰层失效的效果。结果表明: 加载除冰激励后, 利用第一强度理论数值仿真去除冰层范围的结果更符合本次除冰实验。

关 键 词: 电脉冲除冰系统; 除冰实验; 除冰激励; 单元生死; 冰层失效

中图分类号: V244.15

文献标志码: A

De-icing experiment and numerical simulation of the electro-impulse de-icing system

LI Qing-ying, ZHU Chun-ling, BAI Tian

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An electro-impulse de-icing system was developed to undertake the de-icing experiments. De-icing occurred when the circuit was triggered three times with the discharge voltage 500 V. Meanwhile, the de-icing excitation exerting on the aluminum plate was numerically simulated in the eddy current field. A three dimensional finite model of ice and aluminum plate was introduced to analyze the ice failure in the nonlinear transient method by killing elements of the ANSYS FE (finite element) code. The ice failure criterion was checked by comparing the Labeas de-icing criterion with the first strength theory. It concludes that the latter is more suitable for simulating the de-icing process by loading the de-icing excitation in this test.

Key words: electro-impulse de-icing system; de-icing test; de-icing excitation; kill elements; ice failure

为确保飞机在结冰气象条件下的安全运行, 各种防除冰方法开发应用在不同机型上。就除冰技术而言, 根据其能量利用方式的不同, 可分为热力除冰系统、化学除冰系统以及机械除冰系统等^[1]。飞机电脉冲除冰系统是一种机械除冰方法,

该系统从 20 世纪 70 年代起成功在前苏联伊尔系列飞机上安装运行, 并显示了能耗低、通用性强与安全性高等特点。由此, 该技术从 80 年代起受到美国及欧洲部分国家的重视, 并展开了大量研究工作^[2], 而我国对该项技术的研究起步较晚^[3]。

收稿日期: 2011-08-01; 修订日期: 2011-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(10972106)

作者简介: 李清英(1982—), 女, 湖南浏阳人, 博士生, 研究方向为飞机防除冰技术。

通讯作者: 朱春玲(1968—), 女, 江苏南京人, 教授、博士生导师, 研究方向为飞机环境控制与防除冰技术等。

E-mail: clzhu@nuaa.edu.cn

尽管研究电脉冲除冰系统的实验颇多,但其理论仍待进一步深入与完善.本文以电脉冲除冰系统的除冰实验为研究对象,在文献[4]所做的电脉冲除冰系统电磁场分析的基础上,后处理求解该系统的除冰动力,并建立冰与其黏附铝板的三维实体模型,在模型上加载除冰激励后,利用ANSYS 单元生死技术瞬态非线性求解除冰范围.

1 除冰实验

1.1 电路原理

飞机电脉冲除冰系统的电路原理是基于脉冲放电技术,在金属蒙皮的下方,安装数个用铜导线绕制的脉冲电感线圈.当探测到除冰需求时,控制系统触发可控硅,脉冲除冰电路导通,储能电容器向整个电路放电,电感线圈在数毫秒内可产生上千安培的脉冲电流,变化电流激发周围的强磁场,金属蒙皮在该变化磁场中产生感应涡流电,因此蒙皮与线圈在瞬间形成几千甚至上万牛顿相互作用的电磁力,该瞬态脉冲力导致了蒙皮小振幅高加速度的衰减振动.在脉冲力的作用下,冰层与蒙皮之间的黏附条件以及冰层自身的粘结条件发生改变,从而使得冰层破裂或者直接从蒙皮上脱落,飞行中的气动力可进一步将蒙皮上残留的冰层去除^[5].其原理简图如图1所示.

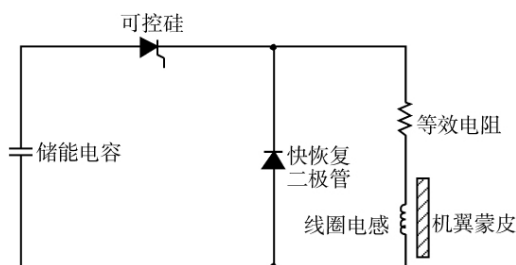


图1 电脉冲除冰系统放电电路简图

Fig. 1 Schematic of the discharge circuit of the electro-impulse de-icing system

1.2 除冰实验台

为研究电脉冲除冰系统的除冰能力,搭建了电脉冲地面除冰实验台,如图2所示.将电脉冲除冰实验机架放置在保温仓内,冰的黏附基体材料即实验蒙皮采用 Al1100,总尺寸为 $960\text{ mm} \times 340\text{ mm}$.在铝板正下方安装多个脉冲除冰线圈,铝板下方靠近支架两侧安装冷气管道以便向保温仓输送冷气,冷气管道上按一定规律布置喷气孔以保证铝板上温度分布均匀,铝板表面铺设6个

温度传感器监测温度变化.采用二流体雾化形式喷雾,通过控制空气与水的压力以及喷头的开度(空气与水的比例)控制水滴直径及喷雾量.本次实验中水滴直径约为 $30\text{ }\mu\text{m}$,铝板的结冰温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,铝板表面全部被冰覆盖,冰层厚度约为 5 mm .

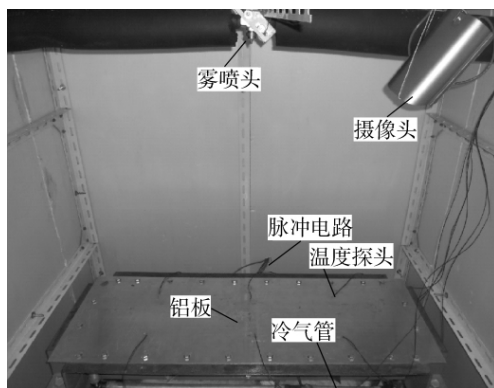


图2 电脉冲除冰实验系统

Fig. 2 Electro-impulse de-icing experimental system

电脉冲除冰实验时,打开电脉冲除冰系统的控制电路,采用单个线圈激励方式,仅开启正对铝板中心的一个脉冲线圈,设定放电电压,激发脉冲电路,拍摄得到除冰全过程,如图3所示.首先,进行第一次脉冲激励,脉冲放电电压为 500 V ,受冲击后冰层有破裂的现象,但极少数冰从铝板上脱落下来(图3(a));接着,继续设定放电电压为 500 V ,间隔为 1.5 min 后,进行第二次脉冲激励,冰层依然以破裂为主,但可以观察到冰从铝板上脱落的范围增大(图3(b)),冰层脱落位置并没有出现在脉冲线圈所对应的铝板正中心地方,而偏离该中心;再次间隔为 1.5 min ,继续脉冲放电为 500 V ,冰层受第三次脉冲冲击后冰层脱落范围急剧增加(图3(c)).由于铝板水平放置,较难直观地看出冰层实际去除的范围,因此人工清扫铝板上脱落的冰块可最终得到冰层在三次电脉冲除冰激励下的除冰效果(图3(d)).在本次实验中,单个脉冲线圈经三次脉冲冲击可使整块铝板上的冰层去除率达 70% .

2 除冰动力的数值模拟

2.1 除冰激励分布求解原理

由于蒙皮上形成的涡流并不均匀,传统电脉冲除冰动力的求解方法通常只考虑求解蒙皮上的总电磁力,在进行除冰结构动力分析时,在脉冲线圈底面正对蒙皮位置处施加恒定的电磁力,然后

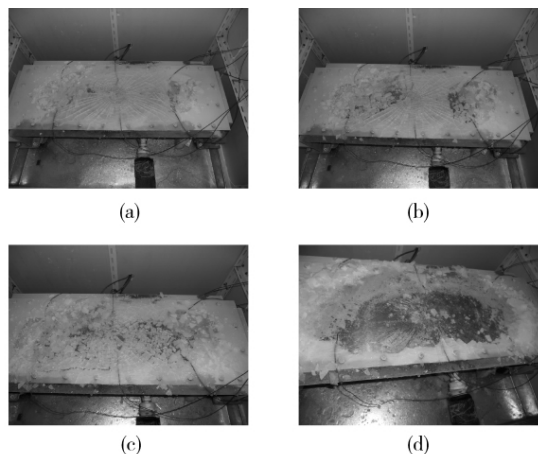


图 3 除冰效果图

Fig. 3 Photos of the de-icing results

加载的电磁力从脉冲线圈外径至 1.5 倍外径位置处按斜率衰减为 0^[6-7]. 为准确分析电磁涡流场作用下的蒙皮上电磁力的分布, 根据文献[4]所求铝板各单元矢量磁位与磁感应强度的方法, 后处理求解实验铝板上的分布压力.

铝板在脉冲电流的作用下形成脉冲力的基本原理图如 4 所示, 铝板沿径向(X 向)所在的平面所形成的涡流可等效为环形线圈(图 4(a)), 此涡流可使铝板产生法向(Z 向)作用力(图 4(b)), 该作用力是去除冰层的主要动力因素.

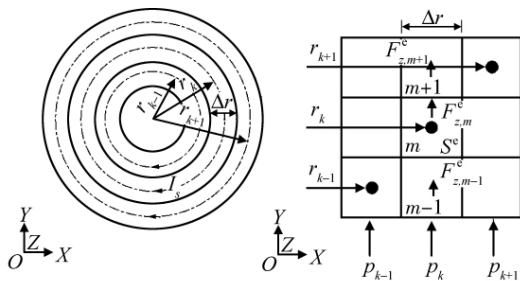


图 4 压力分布求解示意图

Fig. 4 Schematic of the pressure distribution

忽略铝板径向方向电磁力箍缩效应的影响, 铝板法向电磁力可用安培力公式表示为

$$F_z = B_x IL \quad (1)$$

式中 F 为安培力, B 为磁感应强度, I 为电流, L 为导线长度.

由于实验蒙皮产生的涡流分布不均匀, 这将使得实验蒙皮上冰层受除冰激励的效果不一, 因此将计算得到的电磁力转换为实验蒙皮表面的面力, 即求解实验蒙皮上表面的压力来确定实验蒙皮不同位置所受的除冰激励.

沿铝板 X 向的单元的磁感应强度的表达式为

$$B_x^e = \frac{\partial A^e}{\partial z} = \sum_{i=1}^{N^e} A_i \frac{\partial N_i}{\partial z} \quad (2)$$

式中 A 为矢量磁位(在二维涡流场中, 只存在于铝板的法线即垂直于 xOz 平面的方向, 以标量形式表述), N_i 为该单元的形函数, 上角标 e 为给定单元, N^e 为该单元总节点数.

利用后退欧拉法求解涡流区单元的感应涡流密度为

$$J_z^e = -\sigma \frac{A^{e(n+1)} - A^{e(n)}}{\Delta t} = -\sigma \sum_{i=1}^{N^e} N_i \frac{A_i^{(n+1)} - A_i^{(n)}}{\Delta t} \quad (3)$$

式中 J 为电流密度, σ 为电导率, t 为时间, 下角标 e 代表涡流.

于是, 该单元上的感应涡流 I_z^e 的计算公式为

$$I_z^e = J_z^e S^e \quad (4)$$

式中 S^e 为单元面积.

在实验蒙皮等效线圈半径为 r_k 处, 单元所受的 Z 向的电磁力公式为

$$F_z^e = B_x I_z^e \cdot 2\pi r_k \quad (5)$$

当铝板 Z 向半径为 r_k 处的单元数为 N_m 时, 则该处所受 Z 向的总电磁力为

$$F_{zk} = \sum_{m=1}^{N_m} F_{z,m}^e \quad (6)$$

因此可以得到半径为 r_k 处 Δr 范围内实验蒙皮在 n 时刻所受压力 p_k^n 为

$$p_k^n = \frac{F_{zk}^n}{S_k} = \frac{F_{zk}^n}{2\pi r_k \cdot \Delta r} \quad (7)$$

将式(2)~(6)代入到式(7)中, 可得

$$p_k^n = \frac{\sum_{m=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N^e} A_{i,m}^n \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \left(-\sigma N_i \frac{A_{i,m}^{n+1} - A_{i,m}^n}{\Delta t} \right) \cdot S^e}{\Delta r} \quad (8)$$

根据式(8)可依次得到实验蒙皮上的瞬态压力分布.

2.2 实例求解

实验中所采用的脉冲线圈呈短圆柱状, 其内径为 4 mm, 外径为 80 mm, 线圈高度为 5 mm, 脉冲线圈与铝板间的间距为 2 mm, 铝板材质为 Al1100. 设定脉冲放电电压为 500 V, 获得脉冲电流如图 5 所示, 结合文献[4]求解磁感应强度与节 2.1 求解铝板表面压力分布的方法, 可得铝板上正对脉冲线圈位置处所受的瞬态压力曲线, 如图

6 所示. 同时可得任意时间上铝板的压力分布, 如图 7 所示.

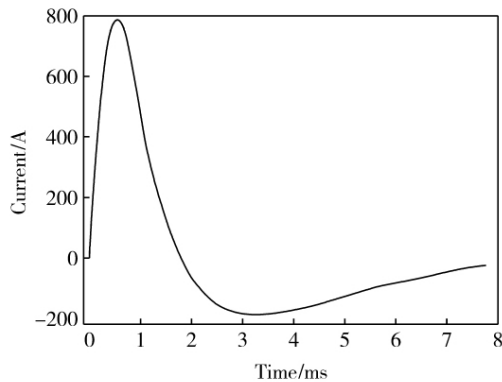


图 5 放电电压为 500 V 时的脉冲电流曲线

Fig. 5 Impulse current with the discharge voltage 500 V

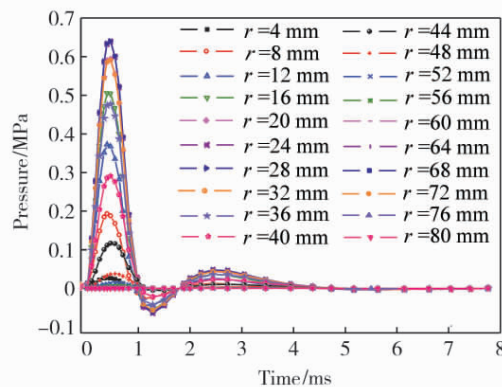


图 6 铝板表面瞬态压力曲线

Fig. 6 Transient pressures exerting on the aluminum plate

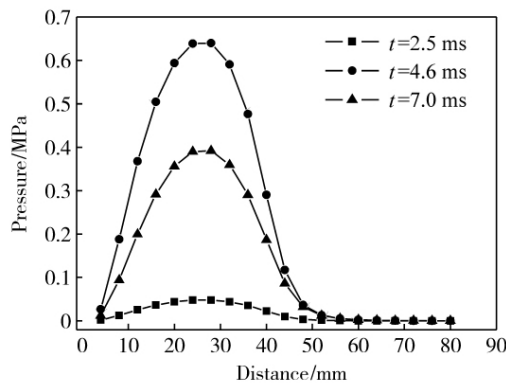


图 7 不同铝板位置等时刻处的压力分布曲线

Fig. 7 Pressure distribution on the different positions of the aluminum plate at the same time

图 6、图 7 中所示的距离指的是铝板表面不同位置距其正中心的距离. 图 6 所示的瞬态压力

在两个周期内衰减为 0; 图 7 选取了第一个正向周期时间内不同位置处的压力分布曲线, 该图说明压力最大值发生在脉冲线圈半径 $1/2 \sim 3/4$ 之间的位置处, 在脉冲线圈外径 1.5 倍所对应的铝板以外的范围脉冲压力衰减为 0. 该法计算的除冰动力将作为下文除冰分析中的加载载荷.

3 除冰范围的数值模拟

3.1 冰的物性与除冰准则

在进行冰层破坏分析时, 需要了解冰的物理属性. 但由于冰的物性参数受环境温度、湿度、水滴直径、空气流速等因素的影响, 同时冰-铝板间的黏附强度还受基体材料、表面粗糙度等约束, 因此不同实验下测得的冰的物性参数差别很大. Xian 等的研究认为飞行过程中所结撞击冰的拉伸强度范围为 $0.827 \sim 1.172 \text{ MPa}$ ^[8]. Reich 的统计表明: 霜冰的拉伸强度要小于明冰, 霜冰的拉伸黏附强度为 0.12 MPa 左右, 明冰的拉伸黏附强度为 $0.62 \sim 2.3 \text{ MPa}$ ^[9]. Cole 在冰的逆向正应力实验中显示, 在低周应力测试下, 冰的拉伸应力强度为 2.3 MPa ^[10]. Gupta 等总结出冰的拉伸失效应力为 $6 \sim 8 \text{ MPa}$ ^[11]. 分析蒙皮的机械除冰时, 除了了解冰自身的粘结强度, 还需要了解冰在其黏附基体上的黏附强度. Archer 等在地面环境实验中将水凝结在铝 6061 上, 统计出所结静态冰的黏附强度为 274 MPa ^[12]. Kandagal 等关于压电振动除冰一文中提及的冰的拉伸黏附强度为 $7 \sim 70 \text{ MPa}$, 剪切黏附强度范围为 $0.14 \sim 1.52 \text{ MPa}$, 其分析时将拉伸黏附强度设定为 10 MPa 以此作为冰是否去除的界限^[13]. Zhu 等人在超声波除冰研究中主要关注冰的剪切强度的破坏, 认为当铝板表面上的冰层所受的载荷超出给定剪切黏附强度 2 MPa 时, 冰层将发生剪切破坏^[14]. 进行冰层破坏分析的数值模拟时, Scavuzzo 等人采用梁单元建立了蒙皮-冰层模型, 认为只要冰的界面压力值大于冰的剪切黏附强度, 冰就发生破裂, 并认为行进中的气动力能将破碎的冰块吹走^[5]. Scavuzzo, Kandagal 与 Zhu 等人的研究只考虑冰层-蒙皮为固定不变的模型时的应力状态^[5,13-14]. Labeas 等人则以一个特定平板上的冰层为模型, 加载正弦脉冲力, 模拟除冰范围, 建立了剪切强度与拉伸强度之间的冰层失效准则. 该文在计算中逐步删除失效的冰层单元并更新模型再继续加载计算^[7].

由于冰层的破坏实验并未清晰地阐明冰层失效是源于外应力超过冰层的黏附强度还是冰的粘

结强度,因为在进行冰层黏附强度的破坏实验时难以避免冰层自身粘结强度的破坏对该实验造成影响;同时文献研究中冰层的破坏失效多指冰从表面上破坏脱落,而破裂却并不一定能说明冰被彻底去除,因此下文冰在铝板上的失效分析中统一用冰的黏附强度来描述,且只将冰的脱落视为冰层最终失效。

目前冰层失效分析的判据主要有两种:一种只考虑冰单一强度因素,认为只要冰的受力达到冰的最大黏附应力强度,冰层就会从基体上脱落,即最大应力失效准则,用公式表述为

$$\frac{\sigma_r}{[\sigma]} \geq 1 \quad (9)$$

式中 σ_r 为最大相当应力, $[\sigma]$ 为冰层黏附应力强度。

另一种综合考虑正应力与剪应力的影响,如 Labeas 等根据除冰实验中冰层去除的范围所提出的冰层失效的判定准则如下^[7]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_u} + \left(\frac{\tau_{\max}}{\tau} \right)^2 \geq 1 \quad (10)$$

式中 $\sigma_{\max}$ 与 $\tau_{\max}$ 分别为最大正应力与最大剪应力, σ_u 与 τ 分别为拉伸黏附强度与剪切黏附强度,其中 $\sigma_u = 1.44 \text{ MPa}$, $\tau = 0.4 \text{ MPa}$ 。

鉴于上述两种冰层失效判定方法并结合本次电脉冲除冰实验,以下进行该过程的数值模拟。

3.2 除冰过程的数值模拟

在除冰分析过程中,部分冰层在冲击载荷作用下发生脱落,若载荷继续加载在几何模型上,此时失效的单元并不能继续用线性单元求解分析,而应该删除失效单元后再进行加载。ANSYS 的单元生死技术可以实现这一要求。该程序可将选定的单元杀死,原理是将其刚度(或传导等其他分析特性)矩阵乘以一个很小的因子[ESTIF]。在模型求解过程中,死单元的质量、阻尼、应变、载荷等被设定为 0 而不参与计算^[15]。

该除冰模拟过程是一个三维瞬态非线性问题,利用 ANSYS APDL 编写冰层单元失效分析程序,其基本流程如图 8 所示。图中 i 代表脉冲加载的载荷步,由于该实验中加载脉冲激励三次,同时包括间歇次数,因此此处设定载荷步 $i = 6$ 。当启动脉冲电路时,铝板上施加相应时间的压力载荷;当停止脉冲激励时,铝板所受的压力值设定为 0。 n 代表单次加载子步时冰层失效的单元数, S_{um} 为计算载荷步内的总冰层失效单元数, j 代表载荷步中的子步数, $D_{\max}$ 代表冰层的总单元数。

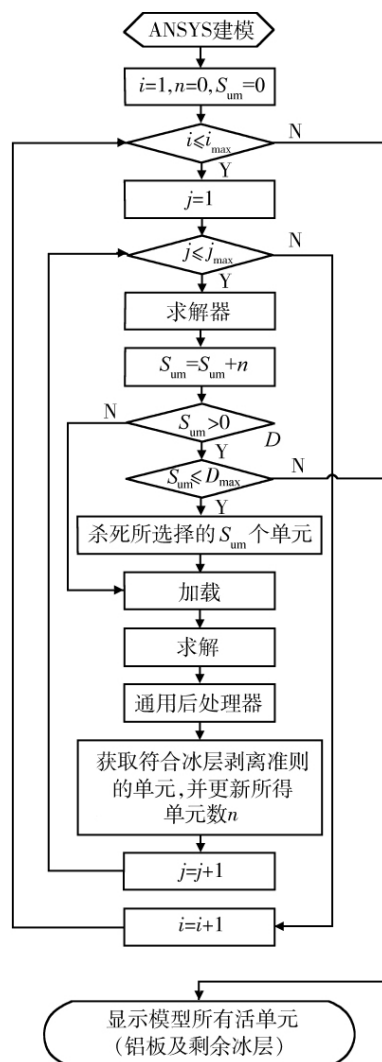


图 8 冰层失效分析流程图

Fig. 8 Flow chart of ice failure analysis

分析过程中,由于铝板与支架的固定连接,铝板的有效计算尺寸为 $900 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。铝板的物性参数如下:密度为 2710 kg/m^3 ,弹性模量为 69 GPa ,泊松比为 0.33,厚度为 2 mm 。对冰的模型做如下限制:冰层覆盖均匀,厚度为 5 mm ,单次脉冲激励过程中铝板上各冰层的黏附强度一致。冰的物性参数:密度为 890 kg/m^3 ,弹性模量为 5.5 GPa ,泊松比为 0.3。根据实体模型的对称性,采用冰层与铝板的 $1/4$ 尺寸建模以减少计算成本,如图 9 所示,冰层单元的总数为 3378。约束铝板外边缘的所有自由度,模型中心处设置对称边界条件。铝板及冰层中心加密网格以便于脉冲载荷在柱坐标系下的加载。将 2.2 节计算的瞬态压力值定义成表格型数组,在每个计算时间子步内,压力载荷均以柱坐标系方式施加在铝板表面对应节点上。由于分析杀死冰层单元很容易出现结构尖角而产生不收敛的情况,因此采用全局的牛顿拉夫

逝方法,并适时调整计算载荷子步时间。

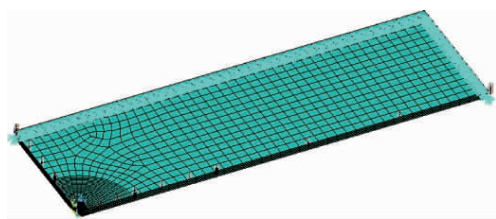


图 9 冰层-铝板有限元模型

Fig. 9 Finite element model of the ice-aluminum plate

3.3 除冰模拟结果与讨论

3.3.1 Labeas 冰层失效准则下的模拟结果

首先采用 Labeas 提出的冰层失效准则进行冰层的失效分析,需要求解冰层的正应力为 σ_z , 剪应力为 τ_{yz} 与 τ_{xz} 。在第一次脉冲激励下,得到的除冰效果图如图 10 所示,由图可以看出加载一次脉冲激励去除的冰层约占整个冰层的 1/4。然而本实验在第一次脉冲激励后,尽管可见冰层裂纹,但脱落的冰层却很少。从冰的物理属性来看,冰的剪切黏附强度要远小于冰的拉伸黏附强度,若在电脉冲除冰系统失效分析中考虑剪切强度的影响,冰层开裂现象说明冰层所受的剪切力超过冰的剪切黏附强度,也即式(10)中不等式左边的第二项(剪切力与剪切强度之比)值大于 1,此时理论上应认为冰层脱离黏附基体,但实际除冰现象表明冰层仅开裂却并不发生脱落,这说明 Labeas 所提出的冰层失效准则与本次除冰实验去除的冰层结果相矛盾,因此 Labeas 冰层失效准则的通用性有待进一步考究。

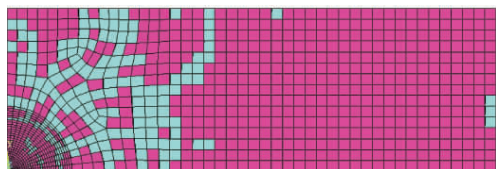


图 10 Labeas 失效准则求解下的除冰范围

Fig. 10 De-icing scope is solved in the Labeas de-icing criterion

3.3.2 最大应力准则下的模拟结果

电脉冲除冰系统中除冰的动力主要表现为拉力。从本次实验冰层的断裂面来看,该冰层在 -15°C 与 5 mm 的厚度条件下以解理形式断裂,可看成一种理想的脆性材料,因此采用第一强度理论判断冰的断裂失效,即当冰层所受的拉应力大于冰的拉伸黏附应力强度时,冰从蒙皮上发生

脱落。在冰层失效分析中读取冰层的第一强度应力值。从除冰现象来看,当冰层受到多次脉冲激励后,冰层与铝板基体会逐渐发生分离,而使得冰的拉伸黏附强度发生改变。于是考虑不同冲击下采用不同的应力强度值作为冰层失效的判断标准。为模拟去除冰层的范围,在拉伸强度的参考范围内,不断调整三次脉冲冲击时的拉伸黏附应力强度值,使得每次激励后的冰层失效范围与实验结果吻合。分析时,首先将三次激励时冰层的拉伸黏附强度设为相同,所得的模拟结果不理想,然后按比例减小每次激励时的冰层黏附强度,对比模拟的冰层失效范围与实验结果,最终确定三次脉冲冲击的拉伸黏附强度分别为 6.9, 4.6 MPa 和 2.3 MPa,所得冰层失效模拟结果如图 11~图 13 所示。

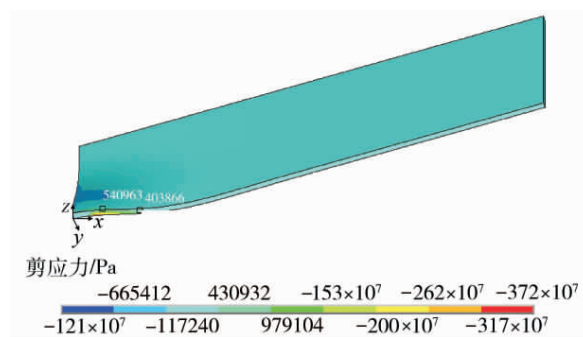


图 11 第一次除冰激励 $t=400\mu\text{s}$ 时冰层 τ_{yz} 的剪应力云图

Fig. 11 Contour plot of the shear stress τ_{yz} of the ice layer when the time is $400\mu\text{s}$

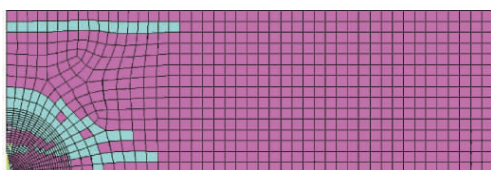


图 12 第二次除冰激励后的除冰效果

Fig. 12 Simulated de-icing effect after the second de-icing excitation

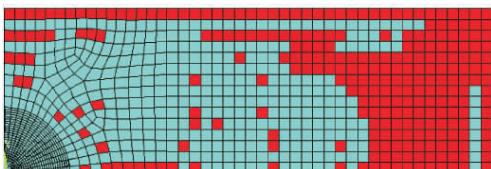


图 13 第三次除冰激励后的除冰效果

Fig. 13 Simulated de-icing effect after the third de-icing excitation

因为在第一次脉冲激励下只有少数冰层发生脱落,冰层主体仍然覆盖在铝板上,所以图 11 仅读取了第一次脉冲激励发生时 $t=400\ \mu\text{s}$ 时的冰层剪应力 τ_{yz} . 由该应力云图可以看出部分冰的剪应力已超过冰的剪切应力强度值,这也说明了用 Labeas 冰层失效准则做分析出现大偏差的原因,但当以第一强度理论作为冰层失效的判断准则,此时冰层并不会从铝板上脱落,这与实验情况较吻合. 图 12 为第二次脉冲激励后的除冰效果图,该图深灰色单元为剩余冰层,浅灰色单元为铝板,反映了在该除冰激励后,脱落的冰层出现在偏离铝板中心的单元,也正好体现了图 3(b)的实验现象. 图 13 为第三次脉冲激励后的除冰数值仿真图,该图深灰色单元为剩余冰层,浅灰色单元为铝板,所得的死单元的总数 $S_{\text{um}} = 2\ 230$,采用以下公式计算冰层的去除范围 d

$$d = \frac{S_{\text{um}}}{D_{\text{max}}} \times 100\% \quad (11)$$

由式(11)可计算出三次脉冲激励后数值模拟冰层失效的范围为 66%,与 1.2 节中所述的实验除冰范围 70%较吻合,同时与实验终图 3(d)相比较,可发现靠近固定位置处的冰层难以去除,电脉冲线圈所产生的电磁力无法影响到铝板长度方向 2/3 的范围外,且除冰边缘曲线均为椭圆轮廓形式,由此可知,利用设定拉伸黏附强度值随脉冲激励次数呈线性递减与第一强度理论作为冰层失效分析准则以数值模拟除冰范围所得的结果与经三次脉冲激励后的实验除冰基本一致.

4 结 论

根据以上分析可以得到如下结论:

1) 按照飞机电脉冲除冰系统除冰原理所设计搭建的电脉冲除冰实验台,在特定结冰条件下开启脉冲放电电路,当放电电压为 500 V 并实施三次脉冲激励时,可去除实验铝板上 70%的冰层.

2) 基于电磁场涡流分析模型数值模拟所得的矢量磁位而后处理求解除冰动力,可以准确获得铝板受涡流作用时的瞬态压力分布.

3) 通过比较 Labeas 冰层失效准则与最大应力准则(本文采用第一强度理论),后者所得出的模拟结果更吻合本次实验情况;因此,数值模拟除冰过程时,由于冰层物性参数的不确定性而需要慎重选择冰层失效准则.

4) 在数值求解冰层失效分析时,需要考虑多次脉冲冲击对冰层强度的影响.

5) 根据实验现象与冰层失效的数值模拟结果表明 ANSYS 单元生死技术可以有效用于分析除冰过程.

6) 尽管有待更多实验数据以判定冰层失效准则的通用性,但该除冰失效分析方法可为除冰系统性能参数设计提供一定参考.

参考文献:

- [1] Thomas S K, Cassoni R P. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 1996, 3(5):841-854.
- [2] Zumwalt G W, Schrag R L, Bernhart W D, et al. Electro-impulse de-icing testing analysis and design[R]. NASA CR-4175, 1988.
- [3] 裘雯纲, 郭宪民. 电脉冲除冰系统参数的合理选择[J]. 南京航空航天大学学报, 1993, 25(2):211-217.
QIU Xiegang, GUO Xianmin. Parameter selection of electro-impulse de-icing systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1993, 25(2):211-217. (in Chinese)
- [4] 李清英, 白天, 朱春玲. 电脉冲除冰系统的电磁场分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(1):95-100.
LI Qingying, BAI Tian, ZHU Chunling. Electromagnetic field analysis for electro-impulse de-icing system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(1):95-100. (in Chinese)
- [5] Scavuzzo R J, Chu M L, Kellackey C J. Impact ice stresses in rotating airfoils[J]. Journal of Aircraft, 1990, 28(7):450-455.
- [6] Smith S O. Modeling and strain gauging of eddy current repulsion deicing systems[R]. AIAA 93-0296, 1993.
- [7] Labeas G N, Diamantakos I D, Sunnaric M M. Simulation of the electroimpulse de-icing process of aircraft wings[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(6):1876-1885.
- [8] Xian X, Chu M L, Scavuzzo R J, et al. An experimental evaluation of the tensile strength of impact ice[J]. Journal of Materials Science of Materials Science Letters, 1989, 8(10):1205-1208.
- [9] Reich A D. Ice property/structure variations across the glaze/rime transition[R]. AIAA 92-0296, 1992.
- [10] Cole D M. Reversed direct-stress testing of ice: initial experimental results and analysis[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 18(3):303-321.
- [11] Gupta V, Bergstrom J S. A progressive damage model for failure by shear faulting in polycrystalline ice under biaxial compression[J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18(4):507-530.
- [12] Arccher P, Gupta V. Measurement and control of ice adhesion to aluminum 6061 alloy[J]. The Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(10):1745-1771.
- [13] Kandagal S B, Venkatraman K. Piezo-actuated vibratory deicing of a flat plate[R]. AIAA 2005-2115, 2005.
- [14] Zhu Y, Palacios J L, Rose J L, et al. De-icing of multi-layer composite plates using ultrasonic guided waves[R]. AIAA 2008-1862, 2008.
- [15] 李围. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.