

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.014

## 覆冰情况对压电振动除冰效果的影响研究

张博涵, 袁浪, 王敬鑫, 朱春玲

(南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

**摘要:** 飞机飞行过程中可能遭遇不同的覆冰情况, 为研究不同覆冰情况对压电除冰系统除冰效果的影响, 采用有限元仿真与冷环境除冰实验相结合的方式, 在超声频段内开展除冰频率、振源压电器件的材料选型, 以及覆冰情况(结冰区域、分割形式、厚度)等参数变化对结构表面压电除冰效果的影响研究。结果表明: 在本文压电陶瓷布局方式下, 20.4 kHz 激励频率具有最佳除冰效果, 在 90 s 内能够完全除去结构表面覆冰; 不同压电材料的除冰效果随振源压电材料的压电系数的增大而增强; 改变不同的覆冰情况可以得出增加冰分割块数、改变覆冰面积(沿长度方向增大或沿宽度方向减小)以及减小结冰厚度都会使覆冰界面剪应力值增大, 除冰频率也会随之偏移。

**关键词:** 压电陶瓷; 除冰; 覆冰情况; 结冰区域; 结冰厚度

**中图分类号:** V244.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)02-0380-10

## Impact of Ice Coverage Situation on Effectiveness of Piezoelectric De-icing

ZHANG Bohan, YUAN Lang, WANG Jingxin, ZHU Chunling

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** During the flight of an aircraft, it may encounter various ice coverage situations. To study the impact of different ice coverage situations on the ice removal effect of the piezoelectric de-icing system, a combination of finite element simulation and cold environment ice removal experiments is adopted. In the ultrasonic frequency range, the research is conducted on the ice removal frequency, the material selection of the vibration source piezoelectric device, as well as the influence of parameter changes such as ice coverage situations (icing area, segmentation form, thickness) on the piezoelectric ice removal effect on the structural surface. The results show that under the layout method of piezoelectric ceramics in this paper, the 20.4 kHz excitation frequency has the best ice removal effect, and it can completely remove the ice on the structural surface within 90 s. In addition, the ice removal effect of different piezoelectric materials increases with the increase of the piezoelectric coefficient of the vibration source piezoelectric material. Changing different ice coverage situations can lead to an increase in the number of ice segments, a change in the icing area (increasing along the length direction or decreasing along the width direction), and a reduction in the ice thickness, all of which will increase the shear stress value at the ice interface and shift the ice removal frequency accordingly.

**Key words:** piezoelectric ceramics; de-icing; ice coverage situation; frozen region; ice thickness

飞机结冰是威胁飞机航行安全的重要因素, 当飞机穿过含有大量过冷水滴的云层时, 其蒙皮表面可能出现结冰情况<sup>[1-2]</sup>, 结冰类型可分为明冰、霜冰以及混合冰<sup>[3]</sup>。结冰现象会对飞行安全构成严重

**基金项目:** 国家重点研发计划(2024YFB4205600)。

**收稿日期:** 2025-07-28; **修订日期:** 2025-11-20

**通信作者:** 朱春玲, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: clzhu@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 张博涵, 袁浪, 王敬鑫, 等. 覆冰情况对压电振动除冰效果的影响研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(2): 380-389. ZHANG Bohan, YUAN Lang, WANG Jingxin, et al. Impact of ice coverage situation on effectiveness of piezoelectric de-icing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(2): 380-389.

威胁,特别是机翼结冰会导致关键飞行控制表面的粗糙度上升,进而破坏原有的气动外形,引发气流分离,造成机翼升力降低、阻力增大,最终影响飞机的操纵性能<sup>[4-5]</sup>。因此,关于飞机除冰技术的研究成为当前航空安全领域的重要课题。目前已有的飞机除冰技术主要有化学除冰法、热力除冰法和机械除冰法<sup>[6]</sup>,但普遍存在耗能高、体积大的问题,目前急需一种结构简单、维护和制造成本低、节能可靠的除冰方式<sup>[7]</sup>。近年来,借助压电材料特性研发的压电振动除冰技术受到了广泛关注。

压电振动除冰技术属于机械除冰的范畴,具有成本低、结构简单且节能可靠等优点<sup>[8]</sup>,其工作原理是利用压电材料的逆压电效应,使压电材料在电信号的驱动下产生机械振动,通过在需要除冰的部位按合适方式安装压电换能器,并为其提供电信号,使换能器产生机械振动,进而带动需除冰部位发生形变,以此达到除冰效果<sup>[9]</sup>。当激励频率提升到超声波的范围内,利用压电材料的压电性可在结构中激发导波,由于导波在冰层与基板中传播时存在差异(如波速、能量等),会使冰层和基板产生位移与形变,当冰层与基板界面产生的剪应力超过冰层的切向粘附强度时,冰层发生剥离<sup>[10-11]</sup>。近年来国内外大量学者对压电振动除冰进行了研究。Palacios等<sup>[12]</sup>创建了压电驱动器的有限元分析模型,得到驱动器以及冰层附近的剪应力分布和对应的频幅曲线。姚赛金<sup>[11]</sup>在平板和翼型结构中采用压电陶瓷进行激励,当积冰界面剪切应力大于冰层的粘附强度时对积冰进行去除。Xu等<sup>[13]</sup>结合低频共振和超声导波对机翼前缘进行除冰,发现低频振动可以显著提高超声导波的除冰效率。当超声激励叠加在结构的低频共振模式时,除冰效率最高。在设计压电振动除冰系统时首先需要确定最佳除冰频率,如Wang等<sup>[14]</sup>在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境箱中进行了超声波除冰实验,寻找了最佳除冰频率,实验结果表明频率为 $34\text{ kHz}$ 时除冰效果最好,与仿真得出的最优除冰频率( $37.5\text{ kHz}$ )相差很小。谭海辉<sup>[15]</sup>在研究风力机叶片超声波除冰理论与方法时对圆形压电陶瓷和不同极化方向条状压电陶瓷的最佳除冰频率进行了选择,以此进行后续除冰装置的研制。此外,覆冰情况也会对压电除冰系统的效果造成影响,石忠华<sup>[16]</sup>对积冰-涂层-基板组成的3层板状结构超声波除冰的研究中探讨了积冰厚度等参数对超声波除冰的影响规律,在验证除冰功效因子计算的准确性时对覆冰区域进行了不同形式的分割。苗波等<sup>[17-20]</sup>在设计压电驱动器阵列时考虑了结冰情况的影响,在实验中对覆冰区域进行了分

区对比。董笑宇等<sup>[21-22]</sup>采用仿真和试验的手段对平板超声除冰进行研究,研究了不同结冰厚度对激励频率和除冰效果的影响,发现当某厚度下冰层粘附面剪应力呈正负交错分布时,冰层粘附面剪应力较高,除冰面积较大。

目前国内外学者在研究压电超声除冰效果的影响因素时更多聚焦于换能器尺寸、布局、材料等参数,往往只将覆冰情况当作已知量看待,或仅对结冰区域、冰厚等某一类覆冰情况进行研究,并未详细具体地研究不同覆冰情况对除冰效果的影响。实际情况中基板上覆冰的区域、面积、厚度等覆冰情况都会对设计的压电振动除冰系统的除冰效果带来显著影响,此外在提高能源利用率的角度上了解不同覆冰情况对除冰系统的影响也利于在实际机翼除冰中,根据不同情况合理制定除冰策略,更节能高效地利用除冰系统。因此本文聚焦铝板表面不同覆冰情况对压电振动除冰效果的影响,对超声频段内压电振动除冰系统进行了有限元仿真与实验研究,计算了不同压电材料下的最佳除冰频率,以此研究结冰区域、冰分割形式、结冰厚度等覆冰情况对除冰效果及除冰频率的影响。

## 1 计算模型设置及实验台介绍

### 1.1 有限元模型建立

利用COMSOL进行有限元仿真,计算模型如图1所示,铝板尺寸为 $200\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,铝板左右两短边固定约束,铝板一侧覆冰,冰与铝板交界处定义接触对,摩擦因数设置为0.2。由于实际实验中利用夹具对铝板两端进行夹持固定,且为了在COMSOL模型设置中便于接触对设置,在计算模型中积冰尺寸长宽比铝板略小,为 $196\text{ mm}\times 78\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,冰层和铝板的材料参数如表1所示<sup>[16]</sup>。压电陶瓷材料选择实验室中现有的JC-T8、PZT-53和PZT-82三种压电陶瓷,材料参数如表2所示。

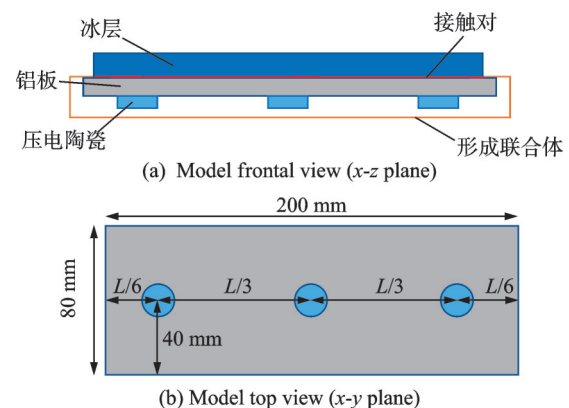


图1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the computational mode

表 1 材料属性<sup>[16]</sup>Table 1 Material properties<sup>[16]</sup>

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
冰	920	9	0.28
铝	2 700	70	0.30

表 2 压电材料参数

Table 2 Piezoelectric material parameters

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	压电系数 $d_{33}/(10^{-10} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1})$	压电系数 $d_{31}/(10^{-10} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1})$	压电系数 $d_{15}/(10^{-10} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1})$
JC-T8	7 600	9.84	-4.53	1.84
PZT-53	7 500	5.50	-2.27	7.41
PZT-82	7 600	2.40	-1.00	3.30

文献[23]中将 3 个压电圆片布置在铝板第三阶拉伸模式的波峰和波谷处时得到了很好的除冰效果,产生的剪应力值比只在铝板中心处布置一个压电片的情况高 3 倍,参考该布局,在铝板覆冰的另一侧布置 3 个压电圆片,如图 1(a)所示。压电片直径 16 mm,厚度 1 mm,布置在铝板第三阶拉伸模式的波峰和波谷处,中心距铝板左端面分别为  $L/6$ 、 $L/2$ 、 $5L/6$ ,其中  $L$  为铝板长度 200 mm。选择圆形压电陶瓷有利于各个方向导波的激发,且其边缘比矩形(任何带角的形状)承受的应力更小。令压电陶瓷与铝板的几何模型形成联合体使之界面处相对固定,压电片与铝板接触侧设置为接地,另一侧施加 300 V 电压。

## 1.2 实验装置介绍

试验件参照计算模型设置,实验用铝板尺寸为  $200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,压电圆片直径 16 mm,厚度 1 mm,材料为 JC-T8,布置方式与计算模型相同,采用 3M-DP460 型号的环氧树脂胶将压电片粘贴在铝板上,并在压电片的正极上焊接导线,负极经由夹具引出,在铝板粘贴压电片一侧放置两个温度传感器对冻冰和除冰时的温度进行实时监测,实验件如图 2 所示。



图 2 铝板上压电陶瓷布局实物图

Fig.2 Piezoelectric ceramic layout on the aluminum plate

压电除冰验证实验在地面冷环境中进行,实验台参考文献[19]。利用低温实验箱模拟地面冷环境,可达到的最低温度为  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,低温实验箱自带显示屏可显示实验箱中的环境温度,实验时将实验

件放入实验箱中进行冻冰和除冰。实验中的激励信号由信号发生器产生,型号为 AFG3022C。激励信号经功率放大器放大后输入到压电陶瓷上,功率放大器的型号为 HFVA-64,输出的频率范围为  $5 \sim 150 \text{ kHz}$ 。使用 PW6001 型阻抗分析仪对压电片上功率加载情况进行辅助判断,此外为了监测实时温度变化,利用 TP700 多路数据记录仪对铝板上温度传感器的数据进行采集显示,实验台整体结构如图 3 所示。



图 3 实验台整体结构图

Fig.3 Overall structure of the laboratory bench

将实验件铝板两短边用自制夹具夹持,如图 3 所示。为了便于确定冻冰位置且尽可能多地增加覆冰块数,将铝板粘贴压电陶瓷的背面均匀划分为  $7 \times 3$  共 21 个结冰区域,采用块状冰进行冻结,冻结温度  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,每次冻结时间 10 min,冻结温度由温度传感器监测。单个块状冰尺寸为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,铝板表面冰分布示意图如图 4 所示。



图 4 铝板表面冰分布实物图

Fig.4 Distribution of ice on the surface of aluminum plates

## 2 最佳除冰频率及压电材料选择

### 2.1 除冰频率比较及选择

以压电材料 JC-T8 的情况为例进行最优除冰频率的选择,JC-T8 压电陶瓷的密度为  $7 600 \text{ kg/m}^3$ ,其余材料参数如下

$$d^E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.84 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.84 & 0 & 0 \\ -4.53 & -4.53 & 9.84 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \text{ C/N}$$

$$s^E = \begin{bmatrix} 24.6 & -5.2 & -20 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2 & 24.6 & -20 & 0 & 0 & 0 \\ -20 & -20 & 52.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 21.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 21.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 59.6 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$\epsilon^T = \begin{bmatrix} 928 & 0 & 0 \\ 0 & 928 & 0 \\ 0 & 0 & 2626 \end{bmatrix}$$

式中: $d^E$ 为耦合矩阵, $s^E$ 为柔度矩阵, $\epsilon^T$ 为相对介电常数矩阵。

使用 COMSOL 中的频域模块对计算模型在 20~150 kHz 范围内进行谐响应分析,步长为 1 kHz,计算了积冰界面剪应力幅值随频率的变化曲线如图 5 所示。由于在 20 kHz 出现峰值点,为了使计算结果连贯,实际展示了 10~150 kHz 范围内的计算结果。参考文献[9],冰与铝板间的粘附剪切强度远低于粘附拉伸强度,且粘附剪切强度约为 1 MPa,因此剪应力值大于 1 MPa 即可将冰去除,无需再考虑粘附拉伸强度。将剪应力幅值大于 1 MPa 的频率定为满足除冰条件的除冰频率,计算得出除冰频率值以及对应频率下的剪应力幅值如表 3 所示。

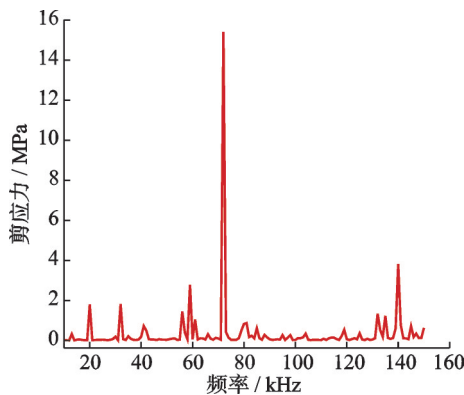


图 5 10~150 kHz 积冰界面剪应力幅值-频率曲线

Fig.5 Shear stress amplitude-frequency curve at the ice accumulation interface from 10 kHz to 150 kHz

表 3 不同频率下的剪应力幅值

Table 3 Shear stress amplitudes at different frequencies

频率/kHz	剪应力幅值/MPa
20	1.797 8
32	1.821 4
56	1.445 0
59	2.779 0
61	1.037 8
72	15.355 0
132	1.341 5
135	1.231 0
140	3.820 6

在计算所得 9 个除冰频率下进行实验,并在该频率前后 1 kHz 的频段内进行扫频以找寻更精确的频率值,若在某除冰频率附近找到效果更好的频率则将该除冰频率替换,否则保留原频率值。每组实验除冰时间 1 min 30 s,实验结果如表 4 所示。

表 4 JC-T8 压电陶瓷除冰实验结果

Table 4 Deicing experimental results of JC-T8 piezoelectric ceramics

频率/kHz	电压/V	电流/A	首次冰脱落时间/s	总掉落冰块数/个	除冰率/%	温度/°C
20.4	300	0.2	2	21	100	-10
	300	0.2	2	21	100	-10
	300	0.3	9	21	100	-8
32	300	0.4	2	17	80.95	-12
	300	0.3	2	20	95.24	-10
56	300	0.4	4	6	28.57	-10
	300	0.70		0	0	-11
	300	0.65		0	0	-10
59	300	0.70		0	0	-10
	300	0.7		0	0	-10
	300	0.7		0	0	-9
61	300	0.6		0	0	-10
	300	0.7		0	0	-9
	300	0.8		0	0	-8
72	300	0.7		0	0	-10
	300	0.90	36	1	4.76	-9
	300	0.90		0	0	-9
132	300	0.95		0	0	-10
	170	1.1	18	1	4.76	-13
	165	1.1		0	0	-10
135	170	1.0		0	0	-12
	165	0.7	62	2	9.52	-12
	165	0.7		0	0	-12
140	160	0.7		0	0	-12
	180	0.6		0	0	-10
	170	0.7		0	0	-11
	170	0.6		0	0	-10

实际扫频实验中发现 20.4 kHz 下的除冰效果优于 20 kHz,而其他除冰频率附近扫频均未得到效果更优的除冰频率,因此用 20.4 kHz 替换 20 kHz,其余频率保持不变。

由表 4 可以看出,大于 130 kHz 的频率因实验条件有限无法加到 300 V 电压,除冰效果不明显,其余 6 个除冰频率中仅有 20.4 kHz 和 32 kHz 有明显除冰效果,而 20.4 kHz 频率下的除冰效果最稳定,能多次实验短时间大面积除冰,多次除冰率达 100% 且复现性好,取一组 20.4 kHz 频率下的典型除冰实验结果如图 6 所示,可以看出 1 min 30 s 内冰被全部去除,实验表明 20.4 kHz 为最佳除冰频率。

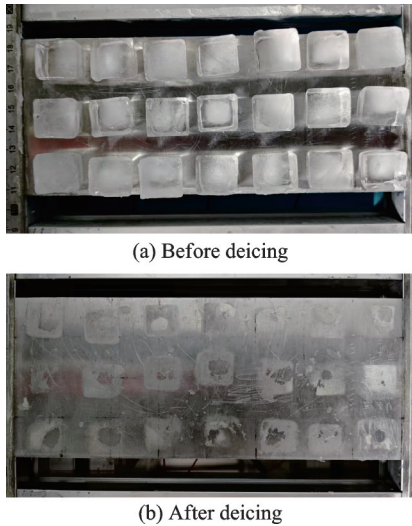


图 6 20.4 kHz 频率下除冰实验效果图

Fig.6 Deicing experimental results at the frequency of 20.4 kHz

对前述计算模型在 20.1~20.8 kHz 频段内进行谐响应分析,步长 0.02 kHz,得到积冰界面剪应力值随频率的变化曲线如图 7 所示,可以发现一个除冰频率为 20.36 kHz,与实验所得最佳除冰频率 20.4 kHz 误差仅为 0.2%。

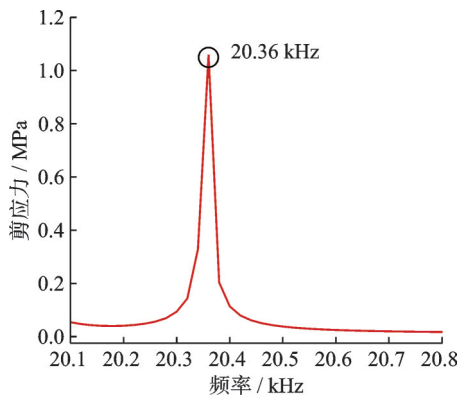


图 7 20.1~20.8 kHz 积冰界面剪应力值-频率曲线

Fig.7 Shear stress amplitude-frequency curve at the ice accumulation interface from 20.1 kHz to 20.8 kHz

由实验结果可知,大于 130 kHz 的频率因实验条件受限无法采用,余下除冰频率仅 20.4 kHz 和 32 kHz 除冰效果明显,为验证仿真结果对 20.36 kHz(对应实验得出的 20.4 kHz)和 32 kHz 两种频率下积冰界面的剪应力云图进行比较,如图 8 所示,云图代表的是积冰界面剪应力值 > 1 MPa 的区域,可以直观看出该频率下的除冰面积大小。由云图可得 20.36 kHz 频率下大于 1MPa 的剪应力覆盖面积较大,因此除冰面积大,而 32 kHz 频率下除冰区域呈点状分布,相较于 20.36 kHz 除冰面积小,因此 20.36 kHz(即 20.4 kHz)频率的除冰效果更好,这与实验结果相符。

之后将图 8(a)与图 6(b)进行对比,如图 9 所示,图中红色格栅代表铝板表面划分的 21 个冻冰区域,可以看出 20.36 kHz 频率下积冰界面满足要求的除冰区域均匀分布在铝板表面,这与实验结果铝板表面冰被完全去除的实验现象相符,验证了 COMSOL 仿真的准确性。

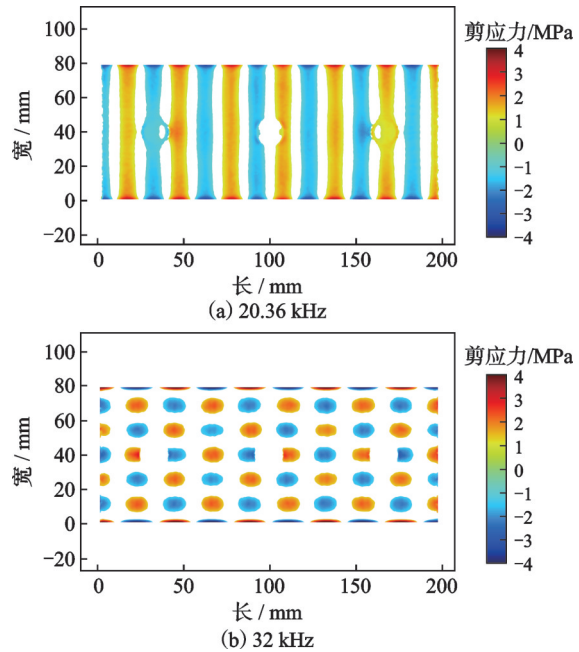
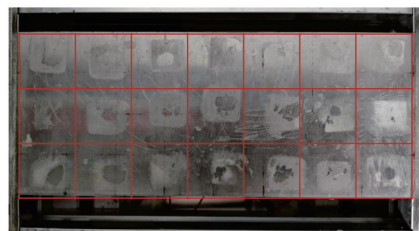
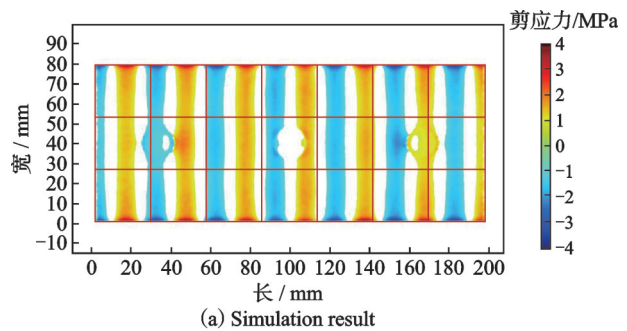


图 8 20.36 kHz 和 32 kHz 积冰界面剪应力云图对比(剪应力值 > 1 MPa)

Fig.8 Comparison of shear stress cloud maps at frequencies of 20.36 kHz and 32 kHz (shear stress value > 1 MPa)



(b) Experimental result

图 9 20.4 kHz 仿真与除冰实验结果对比

Fig.9 Comparison of simulation and deicing experiment results at frequency of 20.4 kHz

综上所述,通过仿真和实验得出在本文压电陶瓷布局下 JC-T8 压电陶瓷的最佳除冰频率为 20.4 kHz。

2.2 不同压电材料对除冰效果的影响

2.1 节得出 JC-T8 压电陶瓷的最佳除冰频率为 20.4 kHz。另外 PZT-53 和 PZT-82 两种压电陶瓷采用上述相同的流程进行除冰频率的选择,最终得出 PZT-53 压电陶瓷的最佳除冰频率为 23 kHz, PZT-82 压电陶瓷的最佳除冰频率为 90 kHz。

对 3 种压电材料下的计算模型在 20~150 kHz 范围内进行谐响应分析,3 种压电材料除冰频率如表 5 所示,可以看出 JC-T8、PZT-53 和 PZT-82 三种压电陶瓷满足要求的除冰频率数量依次减小。不同压电材料下积冰界面剪应力值随频率的变化曲线如图 10 所示,JC-T8 压电陶瓷对应频率下的积冰界面最大剪应力值最大, PZT-53 次之, PZT-82 最小。仿真结果表明,JC-T8 压电陶瓷对应的除冰频率最多,且积冰界面最大剪应力值最大,除冰效果最好。

表 5 不同压电材料的除冰频率

Table 5 Deicing frequencies of different piezoelectric materials

压电材料	除冰频率/kHz
JC-T8	20 32 56 59 61 72 132 135 140
PZT-53	23 61 105 120 136 142 143
PZT-82	90

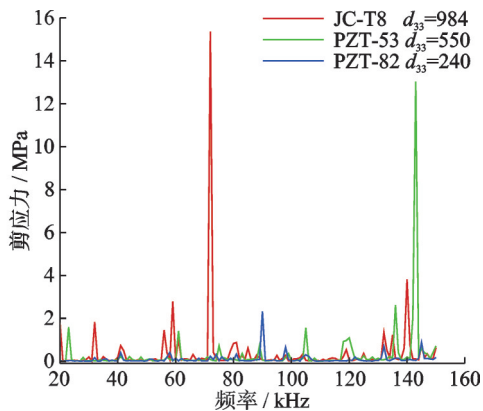


图 10 不同压电材料的剪应力幅值-频率曲线

Fig.10 Shear stress amplitude-frequency curves of different piezoelectric materials

在仿真结果中选出 3 种压电材料各自具有代表性的除冰频率,令每种材料压电陶瓷在选定的频率下进行除冰实验,选择的除冰频率包含每种压电材料下的最佳除冰频率,除压电材料不同外其余实验装置不变,环境温度 -10 °C 左右,实验结果如表 6 所示。可以看出仅 JC-T8 压电陶瓷具有明显实验效果, PZT-53 压电陶瓷的除冰效果微弱, PZT-82 压电陶瓷则无明显除冰效果,除冰效果强弱与计算结果相符,实验也证明了 JC-T8 压电陶瓷的除冰效果最好。

表 6 不同压电材料除冰实验结果

Table 6 Experimental results of deicing with different piezoelectric materials

频率/kHz	压电材料	电压/V	电流/A	首次冰脱落时间/s	总掉落冰块数/个	除冰率/%
20.4	JC-T8	300	0.2	2	21	100
	PZT-53	300	0.3		0	0
	PZT-82	300	0.2		0	0
23	JC-T8	300	0.3	2	6	28.57
	PZT-53	300	0.3	3	6	28.57
	PZT-82	300	0.2		0	0
61	JC-T8	300	0.7		0	0
	PZT-53	300	0.8		0	0
	PZT-82	300	0.6		0	0
90	JC-T8	300	1.00	9	1	4.76
	PZT-53	300	1.40		0	0
	PZT-82	300	1.35		0	0
105	JC-T8	300	1.4	3	6	28.57
	PZT-53	300	1.5		0	0
	PZT-82	300	1.2		0	0

综上所述,JC-T8 压电陶瓷的除冰效果最好,因此后续针对覆冰情况的研究采用 JC-T8 压电陶瓷。此外,由表 2 可知,JC-T8、PZT-53 和 PZT-82 三种压电陶瓷的压电系数  $d_{33}$  和  $d_{31}$  依次递减,除冰效果也逐渐减弱。 $d_{33}$  数值越大表示在厚度方向上能产生更强的纵向振动,而  $d_{31}$  数值越大表示在垂直于极化方向上能产生更大的横向应变。因此,压电材料  $d_{33}$  或  $d_{31}$  的数值增大会增强激振效果,这有利于铝板表面冰的脱落。由此可见,压电系数  $d_{33}$  及  $d_{31}$  的数值大小与最大剪应力值以及除冰效果呈正相关。

3 结冰参数对除冰效果的影响分析

3.1 相同覆冰区域不同分割形式对除冰效果的影响

由于实际机翼除冰过程会有输入功率的限制,为了满足除冰要求并提高能源利用率,采用热刀将机翼表面覆冰分割成多个区域,制定除冰策略进行分区除冰<sup>[24]</sup>。为研究不同分区形式对除冰效果的影响,对铝板表面的整块积冰进行分割,参照文献[16],4 种结冰布局如图 11 所示。

根据第 2 节的研究结果选取 JC-T8 压电陶瓷进行覆冰参数的研究,由于 20.4 kHz 频率附近除冰效果最好,因此关注不同计算模型在 20~23 kHz 频率范围内的除冰效果,在该频段内进行谐响应分析,步长 0.02 kHz,得到 4 种布局下的积冰界面剪应力幅值如图 12 所示,各自最大剪应力值对应频率下的积冰界面剪应力云图如图 13 所示。

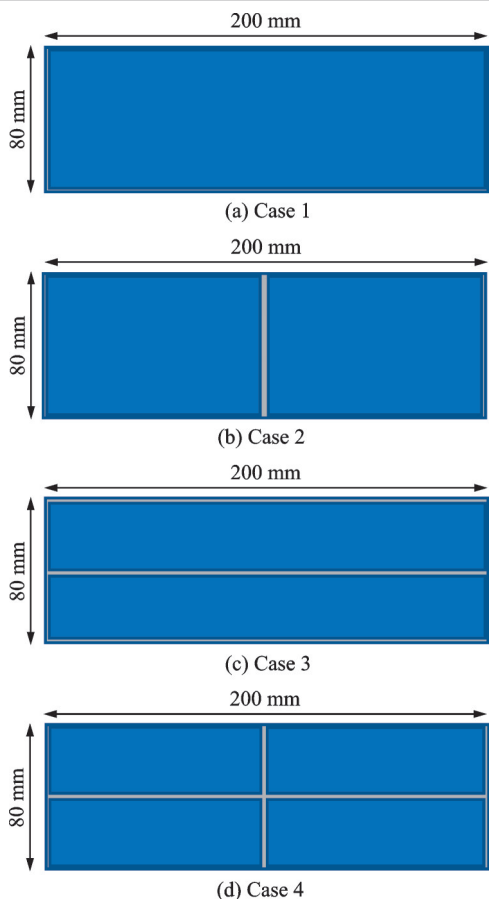


图 11 不同分割形式 4 种结冰布局示意图

Fig.11 Four types of icing layouts under different division forms

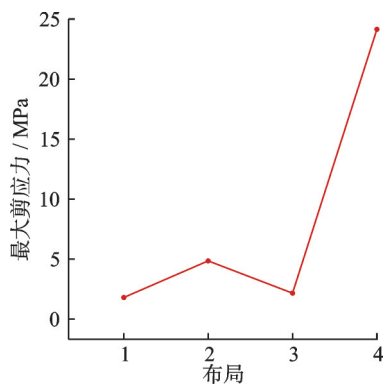


图 12 4 种布局下的积冰界面剪应力幅值

Fig.12 Shear stress amplitudes under four types of layouts

由图 12 可以看出,随着冰分割块数的增加,最大剪应力值呈增加趋势。由剪应力云图可知,分割块数增加会使积冰界面剪应力平均值增大,在云图中反映为染色的加深。这是由于铝板表面的冰层作为弹性层会分散振动能量,削弱铝板局部变形能力,在铝板振动时冰会对其产生抑制作用。当覆冰为完整的一块时,铝板覆冰区域振动受到较大抑制,而当冰分成几块时,这种抑制作用相对分散,有利于积冰界面的振动,使得剪应力幅值增大。由此可见,当整块基板表面覆冰时,增加覆冰块数更容易去除。

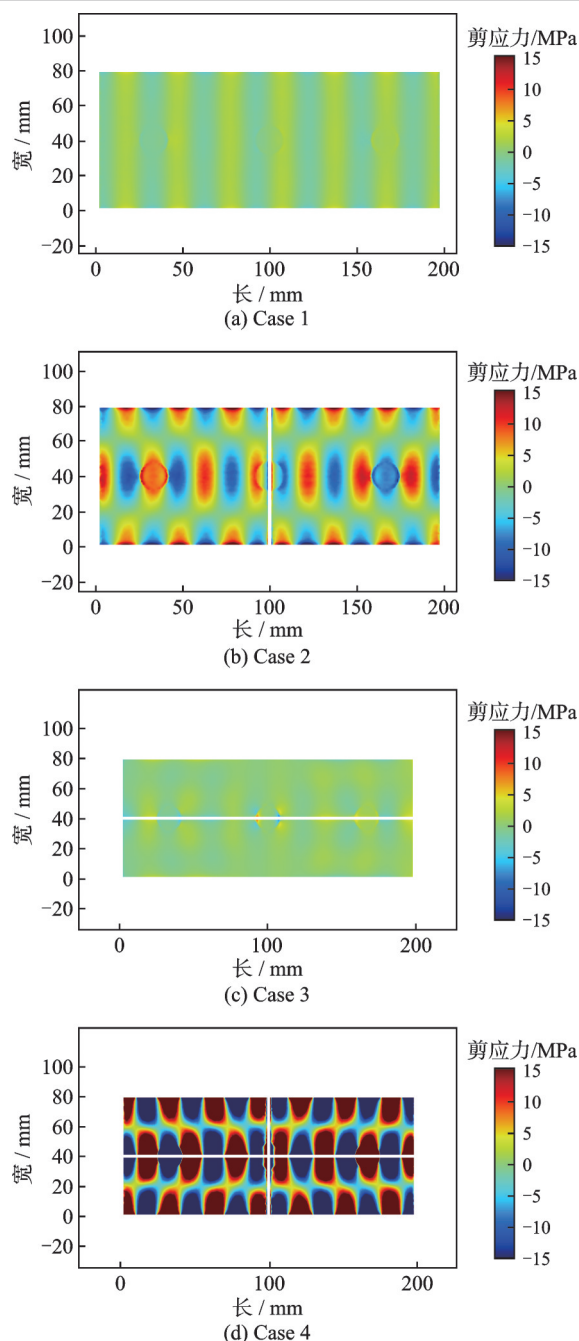


图 13 4 种结冰布局积冰界面剪应力云图

Fig.13 Cloud maps of ice interface shear stress for four ice accretion configurations

此外还能看出,同样将冰分割成两块的情况下布局 2(纵向分割)比布局 3(横向分割)的积冰界面剪应力值更大,这是由于贴片集中度越高,压电元件激励点越集中激振效果越好<sup>[19]</sup>。沿纵向分割时,压电元件分布在每块冰的中央和边缘位置;而沿横向分割时,压电元件只分布在每块冰的边缘。因此布局 2 相较于布局 3 的贴片集中度更高,激励点更集中且靠近积冰中心,积冰界面剪应力值更大。

### 3.2 不同覆冰区域对除冰效果的影响

在周期性除冰中,会对基板上划分的不同防护

区域依次进行供能,就会出现结冰区域与压电陶瓷相对位置的变化,为模拟这一情况,令覆冰区域宽度与铝板相同,长度分别为铝板长度的 1/3、1/2、2/3,分别对应结冰区域覆盖最左侧压电片、覆

盖中间压电片的一半、覆盖最左侧压电片和中间压电片。3种结冰区域布局如图 14 所示,20~23 kHz 频率范围内计算结果如图 15 所示,图中  $L$  代表铝板长度。

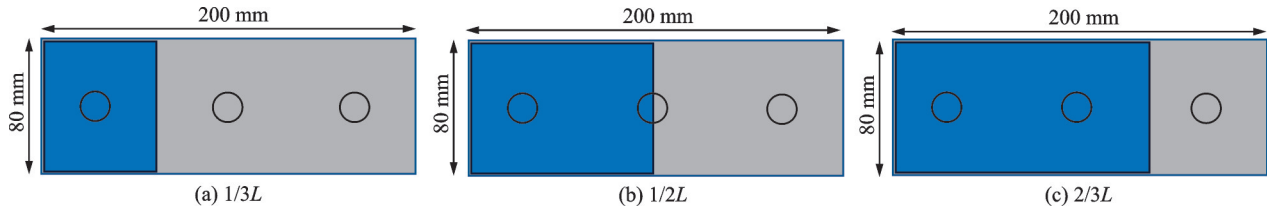
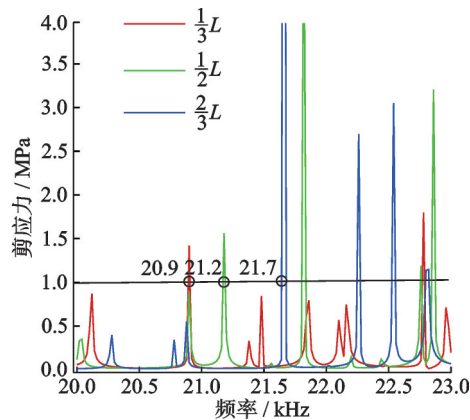
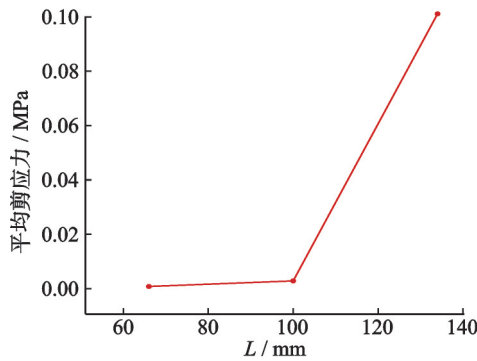


图 14 沿铝板长度方向变化的结冰布局

Fig.14 Changing icing layout along the length of the aluminum plate



(a) The first ice removal frequency



(b) Average shear stress

图 15 长度不同的 3 种结冰布局仿真结果

Fig.15 Simulation results of three ice formation layouts with different lengths

由图 15(a) 所示,20~23 kHz 频率范围内,随着覆冰面积沿铝板长度方向的增大,首次出现的除冰频率会滞后;图 15(b)代表 3 种布局首个除冰频率下的结冰界面平均剪应力值,可以看出平均剪应

力值: $2/3L > 1/2L > 1/3L$ ,即随着覆冰区域长度的增加积冰界面平均剪应力值增大。由文献[25]可知,压电陶瓷粘贴在平板内侧与冰层正对的位置时激振效果好,而随着长度方向覆冰面积的增加,冰层下方覆盖的压电元件数量增加,使得积冰界面平均剪应力值增大。

此外,将铝板看作实际机翼蒙皮的上表面或下表面,将铝板下侧长边视为机翼前缘,在实际结冰过程中由于翼型迎角的不同和气象参数的差异,机翼前缘的结冰范围也不同。为模拟这一情况令覆冰区域长度与铝板相同,而宽度分别为铝板长度的 1/3、1/2、2/3,分别对应结冰区域未覆盖压电片、覆盖压电片的一半和完全覆盖压电片,3 种结冰区域布局如图 16 所示,20~23 kHz 频率范围内计算结果如图 17 所示,图中  $H$  代表铝板宽度。

由图 17(a) 可知,20~23 kHz 频率范围内首个除冰频率: $1/2H > 1/3H > 2/3H$ ;图 17(b)代表 3 种布局首个除冰频率下的积冰界面平均剪应力值,可以看出平均剪应力值: $1/3H > 1/2H > 2/3H$ ,这与沿铝板长度方向增加覆冰面积算例的计算结果相反。在 2.1 节曾描述过铝板表面的冰层作为弹性层会分散振动能量,在铝板振动时冰会对其产生抑制作用,而铝板的长度为宽度的 2.5 倍,当覆冰区域长度与铝板相同而宽度增长时,冰对铝板振动的抑制作用强于冰层下方压电陶瓷贴片集中度的增加对铝板振动的正向促进,因此随着覆冰区域宽度的增加积冰界面平均剪应力值减小。

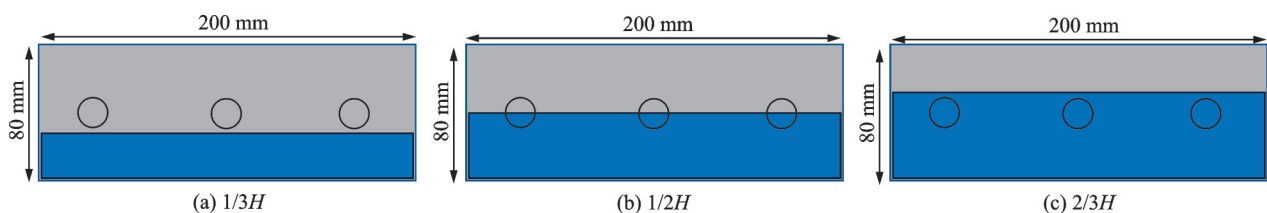


图 16 沿铝板宽度方向变化的结冰布局

Fig.16 The changing icing layout along the width of the aluminum plate

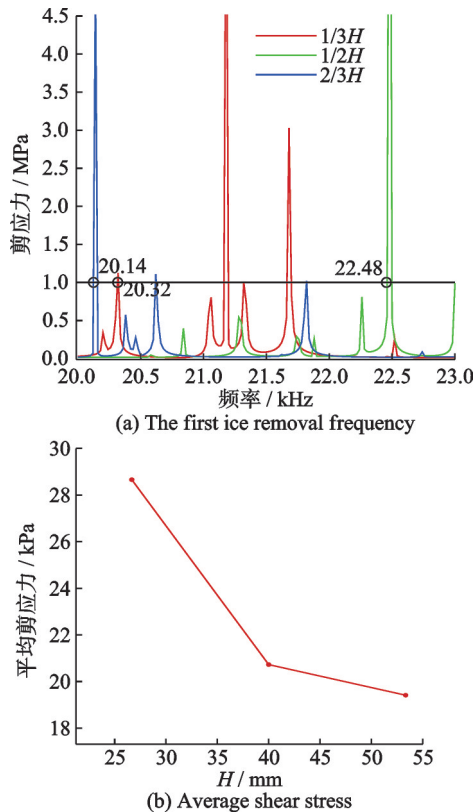


图 17 宽度不同的 3 种结冰布局仿真结果

Fig.17 Simulation results of three ice formation layouts with different widths

### 3.3 结冰厚度对除冰效果的影响

计算模型与 1.1 节相同,即冰的长宽为  $196\text{ mm} \times 78\text{ mm}$ ,仅改变冰厚,研究冰厚增长对除冰频率的影响。以冰厚  $2\text{ mm}$  下的  $20.36\text{ kHz}$  为基准,研究其随冰厚增加的偏移情况,对冰厚分别为  $2, 4, 6, 8, 10$  和  $12\text{ mm}$  的 6 种计算模型在  $20\sim 24\text{ kHz}$  下进行谐响应分析,计算结果如图 18 所示。从图中可以看出,该频率随厚度增加呈上升趋势,即冰厚增长会使原除冰频率向后偏移。

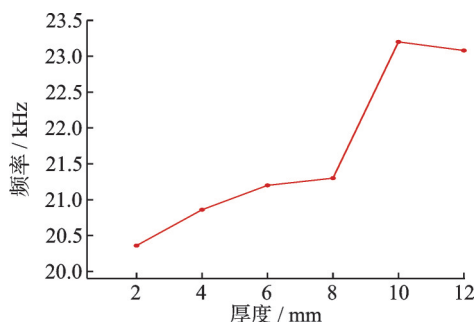


图 18 不同厚度下的首个应力峰值频率

Fig.18 Frequency of the first stress peak at different thicknesses

上述 3 种模型在图 18 对应频率下的积冰界面剪应力平均值,如图 19 所示。可以看出,随着冰厚的增加,积冰界面剪应力平均值下降,说明冰厚增加会抑制铝板的振动,使其更难被去除。

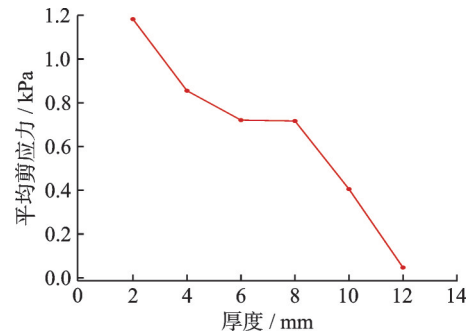


图 19 不同厚度下的积冰界面剪应力平均值

Fig.19 Average shear stress at the ice accretion interface under different thicknesses

## 4 结 论

本文以平面铝板为研究对象,对超声频段内压电振动除冰进行了仿真与实验研究,进行了最佳除冰频率和振源压电器件材料的选择,针对覆冰情况研究了相同结冰区域下冰分割形式、不同结冰区域以及结冰厚度对除冰效果及除冰频率的影响。

(1)在本文工况下, $20.4\text{ kHz}$  为最佳除冰频率,能多次实验短时间大面积除冰且复现性好。

(2)随着分割块数的增加,压电陶瓷对铝板振动产生的抑制作用减小,积冰界面剪应力值增加。

(3)在  $20.4\text{ kHz}$  频率附近随着覆冰面积沿铝板长度方向的增大,积冰界面平均剪应力值增大,除冰频率会随之后移;随着覆冰面积沿铝板宽度方向的增大,积冰界面平均剪应力值减小。

(4)随着结冰厚度的增加积冰界面平均剪应力值减小,除冰频率也呈后移趋势。

(5)在本文压电陶瓷布局方式下,压电材料除冰效果随压电系数  $d_{33}$  和  $d_{31}$  的增大而增强。

### 参考文献:

- [1] CAO Yihua, WU Zhenlong, SU Yuan, et al. Aircraft flight characteristics in icing conditions[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015,74: 62-80.
- [2] POLITOVICH M K. Aircraft icing caused by large supercooled droplets[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1989,28(9): 856-868.
- [3] GE Junfeng, LI Longteng, ZHANG Yabo, et al. Ice type identification during dynamic icing process based on ultrasonic pulse echo technique[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025,393: 116817.
- [4] ZHU Y, PALACIOS J, ROSE J, et al. De-icing of multi-layer composite plates using ultrasonic guided waves[C]//Proceedings of the 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2008. Schaumburg: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008: 2057-2070.
- [5] JIA Yuhao, LIANG Hua, ZONG Haohua, et al. Ice

- shape modulation with nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge plasma actuator towards flight safety[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 120: 107233.
- [6] REKUVIENE R, SAEIDIHARZAND S, MAZEIKAL, et al. A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123474.
- [7] VENNA S V, LIN Y J, BOTURA G. Piezoelectric transducer actuated leading edge de-icing with simultaneous shear and impulse forces[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 509-515.
- [8] GAHEEN O A, MARZOUK S A W, ELSAYED A M, et al. Experimental comparison of ultrasonic guide wave and thermal energy in deicing method[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 54: 102876.
- [9] 张海波, 罗江海, 徐志强, 等. 基于压电陶瓷及其复合材料的飞机除冰技术研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(3): 32-40, 66.  
ZHANG Haibo, LUO Jianghai, XU Zhiqiang, et al. Research status and development trends of aircraft de-icing technology based on piezoelectric ceramics and their composite materials[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(3): 32-40, 66.
- [10] XU Peiyi, ZHANG Donglai, GAO Wei, et al. A non-thermal de-icing technique using ultrasonic guided waves[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2528(1): 1742-6596.
- [11] 姚赛金. 基于压电驱动器的机翼除冰方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
YAO Saijin. Research on wing deicing method based on piezoelectric actuators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [12] PALACIOS J, SMITH E, ROSE J. Investigation of an ultrasonic ice protection system for helicopter rotor blades[C]//Proceedings of the 64th Annual Forum Proceedings. Montreal, Canada: AHS International, 2008: 609-618.
- [13] XU Peiyi, ZHANG Donglai, GAO Wei, et al. Development of de-icing method with combined excitation of ultrasonic guided waves and different types of low-frequency vibrations[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 221: 110034.
- [14] WANG Yibing, XU Yuanming, SU Fei. Damage accumulation model of ice detach behavior in ultrasonic de-icing technology[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 1396-1405.
- [15] 谭海辉. 风力机叶片超声波除冰理论与方法[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.  
TAN Haihui. Theoretical and methodology of ultrasonic ice removal for wind turbine blades[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011.
- [16] 石忠华. 板壳结构超声波除冰影响因素及功效分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.  
SHI Zhonghua. Analysis of influencing factors and effectiveness of ultrasonic ice removal in plate and shell structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [17] 苗波, 朱春玲, 朱程香, 等. 翼型曲面的压电振动除冰方法研究[J]. *实验流体力学*, 2016, 30(2): 46-53.  
MIAO Bo, ZHU Chunling, ZHU Chengxiang, et al. Research on the ice-removing method based on piezoelectric vibration of airfoil surface curves[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(2): 46-53.
- [18] 苗波, 朱春玲, 朱程香. 平板压电除冰系统中压电元件排布规律研究[J]. *空气动力学学报*, 2016, 34(6): 732-737.  
MIAO Bo, ZHU Chunling, ZHU Chengxiang. Research on the arrangement pattern of piezoelectric elements in the flat plate piezoelectric deicing system[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34(6): 732-737.
- [19] 苗波. 翼型压电振动除冰理论和实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
MIAO Bo. Theoretical and experimental research on wing-type piezoelectric vibration deicing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [20] 苗波. 机翼前缘超声振动除冰设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2024.  
MIAO Bo. Research on the design method of ultrasonic vibration ice removal for airfoil leading edges[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2024.
- [21] 董笑宇. 基于超声微振动的风力机叶片防除冰仿真与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.  
DONG Xiaoyu. Simulation and experimental research on anti-icing of wind turbine blades based on ultrasonic micro-vibration[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [22] 李岩, 董笑宇, 郭文峰, 等. 面向风力机叶片的平板超声微振动除冰[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(2): 204-210.  
LI Yan, DONG Xiaoyu, GUO Wenfeng, et al. Plasma ultrasonic micro-vibration de-icing for wind turbine blades[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(2): 204-210.
- [23] JOMAA M, LEVY P E, VASIC D, et al. Low-energy avionic piezoelectric deicing system[J]. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33(5): 055043.
- [24] 刘重洋. 飞机电热防/除冰系统数值计算及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
LIU Chongyang. Numerical calculation and experimental research on aircraft electric heating anti/deicing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [25] 包明鑫, 苗波, 朱春玲. 压电陶瓷布局对除冰效果的影响研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(4): 73-82.  
BAO Mingxin, MIAO Bo, ZHU Chunling. Research on the impact of piezoelectric ceramic layout on deicing effect[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(4): 73-82.