

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413214

# 面向高能效电热除冰的冰结合状态感知方法研究\*

周翼<sup>1</sup>, 郭玉东<sup>2</sup>, 桂康<sup>1,3</sup>, 葛俊锋<sup>1,3</sup>, 叶林<sup>1,3</sup>

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院 武汉 430074; 2. 中航工业武汉航空仪表有限责任公司 武汉 430074;  
3. 多谱信息智能处理技术全国重点实验室 武汉 430074)

**摘要:**针对飞机电热除冰过程中冰结合状态的感知难题,提出了基于弛豫极化效应的原位在体探测方法,首先,揭示了相态和分子热运动对冰粘附作用的影响机制,阐明了基于复阻抗测量的4种冰结合状态的检测机理。然后,设计了一种探除冰一体化功能薄膜,并在融冰实验中对界面相态的动态变化过程进行了表征,确定了冰结合状态感知的核心特征,进而建立了覆冰结合状态弱化的判断准则。在预应力脱冰实验中,该准则可有效确定覆冰脱落的时间范围,有望显著提升电热除冰过程中冰结合状态感知的准确率,并为航空器高能效电热除冰提供关键技术支撑。

**关键词:** 结冰探测;复阻抗结冰感知;冰结合状态;探除冰一体化

中图分类号: TM934.73 TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Research on ice bonding state sensing method for energy-efficient electro-thermal de-icing

Zhou Yi<sup>1</sup>, Guo Yudong<sup>2</sup>, Gui Kang<sup>1,3</sup>, Ge Junfeng<sup>1,3</sup>, Ye Lin<sup>1,3</sup>

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Wuhan Aviation Instrument Co., Ltd, Wuhan 430074, China; 3. National Key Laboratory of Multispectral Information Intelligent Processing Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To address the difficulty of sensing the ice bonding state during aircraft electrothermal deicing, an in-situ in-body detection method based on the relaxation polarization effect is proposed. First, the mechanism of the influence of the phase state and molecular thermal motion on the ice adhesion effect is revealed, and the principle of detecting the four ice bonding states based on the complex impedance measurement is elucidated. Then, an integrated functional film for detection and de-icing is designed, and the dynamic change process of the interfacial phase state is characterized in ice melting experiments, which identifies the key features of the ice bonding state sensing, and then establishes the recognition method for the weakening of the ice bonding state. In the pre-stressed de-icing experiment, the method can effectively determine the time range of the ice shedding, which is expected to significantly improve the accuracy of the ice bonding state sensing in the electro-thermal de-icing process and provide key technical support for the energy-efficient electro-thermal de-icing of aircrafts.

**Keywords:** ice detection; complex impedance ice sensing; ice bonding state; ice detection and deicing integration

## 0 引言

机翼结冰会对飞机气动性能造成影响,严重威胁飞行安全,因此需要采取合适的除冰措施。飞机的除冰系统可分为主动式和被动式两类<sup>[1]</sup>,主动式除冰技术采用电热式和电脉冲式等除冰手段去除覆冰,主动克服冰与

蒙皮间的结合力。被动式技术在材料表面预先涂覆超疏水材料从而降低冰的结合力<sup>[2]</sup>,两种除冰方式都与冰与蒙皮的结合状态密切相关。冰结合状态根据冰的微观相态特征定性描述了覆冰与基底表面粘附的紧密程度。

目前,电加热除冰方式广泛应用于飞机结冰防护领域。通常采用预先仿真计算以确定电加热控制律或通过蒙皮位置传感器反馈温度进行加热控制等方式<sup>[3-4]</sup>。然

收稿日期:2024-08-26 Received Date: 2024-08-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(62101196)、中国博士后科学基金(2021M691138)项目资助

而,由于实际工况复杂,现有的电加热除冰方案难以获取覆冰与蒙皮的结合信息,除冰效果的实时反馈能力差,存在过加热的能量损失以及溢流结冰情况。因此,实时感知冰结合状态对提升除冰效率具有重要意义。

当前研究对冰结合状态的探测方法主要有两类,直接方法是采取推杆拉动或者离心旋转等方式分离冰层并通过测力装置测量所施加载荷的变化,从而获取基底与冰层的剪切粘附力<sup>[5-6]</sup>,这种方法是侵入性的,且难以机载使用。间接方法包括保守结冰脱落准则,载荷显微和激光裂变技术以及传感器测量手段等。保守结冰脱落准则通过测量温度表征冰层结合情况<sup>[7-8]</sup>,但是测量的空间范围有局限性并且在加热除冰过程中存在相变换热以及传热过程的温度波动,受外界干扰程度高;载荷显微与激光裂变技术等可实现微观层面冰结合状态的测量,但依赖精密检测仪器,局限于实验室环境使用<sup>[9-10]</sup>;使用传感器测量不同覆冰情况下光学<sup>[11]</sup>、机械<sup>[12]</sup>、电学<sup>[13]</sup>等物理特性的差异进而实现状态感知,具备原位在体探测优势且成本较低。

复阻抗式结冰探测属于电学传感器范畴,基于水分子介电极化响应特性<sup>[13]</sup>,对于冰结合状态具备微观感知能力。为减小除霜能耗,Inanlu 等<sup>[14]</sup>利用电容参数对霜更为敏感的特性,提出了一种霜密度和厚度的电容探测方法。Rahman 等<sup>[15]</sup>提出了一种自动除冰式电容结冰探测器,设计镍铬合金电极进行探测和除冰。试验结果表明,探测器冰厚探测范围为 1~4 mm,误差仅为 7.5%,除冰装置在 1 min 内去除 2 mm 的冰层功耗为 35 W。上述研究体现了复阻抗式结冰探测方法具有结冰探测和加热除冰的双重潜力,但目前局限于冰厚、相态区分和开环加热,仍需进一步探索融冰过程中结合状态的原位在体感知方法。

为此,提出一种面向高效电热除冰的冰结合状态感知方法,设计了探除一体功能薄膜,将复阻抗结冰探测和电加热除冰功能统一,在电热融冰过程中实时感知覆冰和基底的结合状态,并通过实验验证了方法的有效性。

## 1 冰结合状态探测理论研究

冰结合状态探测理论的研究分为冰结合状态定义、基于弛豫极化的结冰探测原理和热力学介电影响机理 3 个方面的内容。

### 1.1 冰结合状态定义

冰与蒙皮的结合状态与冰的晶体结构密切相关,大致可分为 4 个阶段:温度低于冰点时,静态固体冰层的晶体结构未出现明显瑕疵,称为固密态;当温度升高,分子热运动更加剧烈,晶体结构开始出现瑕疵,但仍未发生相

变,称为预融化状态;当温度高于冰点,相变开始大面积发生,冰与水的界面处出现极薄的微观液态水膜,称为过渡层状态;当相变的晶体体积进一步扩大,出现宏观水膜,称为水膜态。

对于固密态、预融态及过渡态,冰粘附的本质是冰和蒙皮界面密切结合在一起时,分子间互相吸引而产生的相互作用。冰的粘附力形成于液态水向固态冰转换的过程,类似于焊接过程焊锡丝受热熔化后与焊盘表面的浸润以及冷却粘附过程<sup>[16]</sup>。加热除冰过程实际上是冰粘附力形成的逆过程,该过程中冰晶体的变化如图 1 所示<sup>[17]</sup>。

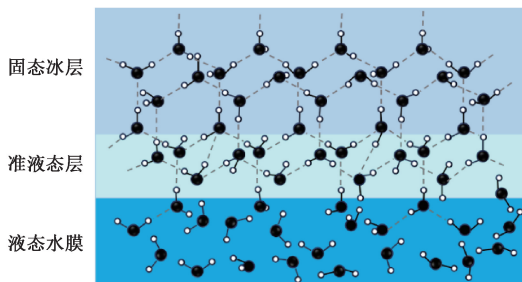


图 1 冰晶体微观结构

Fig. 1 Schematic diagram of ice crystal microstructure

在预融态阶段中,目前的实验和数值研究已经证实,冰与基底的交界面存在一个准液态层(quasi-liquid layer, QLL)<sup>[18-19]</sup>,QLL 层的厚度为纳米级别,需要通过 X 射线等方式观测<sup>[20]</sup>。在相变时,伴随着蒙皮表面的传热和冰层的融化吸热,QLL 层将逐渐转变为微米级过渡层,过渡层中一部分晶体转变为液态水。随着冰层融化,冰结合位置出现明显的水膜。根据 Emelyanenko 等<sup>[19]</sup>的研究,水对固体单位面积的附着功最大仅有 0.15 J/m<sup>2</sup>,粘附力较弱。当加热持续,冰层内部水分子之间的化学键逐渐受到破坏,准液态层扩大,因此冰粘附力也会减小。在飞行气动剪切力的作用下,部分位置的覆冰会在加热后自行脱落,但由于现有方式难以感知区域性的覆冰结合情况,为保证除冰效果采取了周期性加热策略,因此过加热能量损耗和溢流结冰情况无法避免。

总结冰结合状态的描述,如表 1 所示,用以说明粘附力大小和达到该状态所需的加热能耗。

### 1.2 基于弛豫极化的结冰探测原理

水分子结构中两个氢原子和氧原子之间呈现有 104.45°的角度,由于正负电荷中心不重合,形成了固有偶极矩,因此 H<sub>2</sub>O 是极性分子。H<sub>2</sub>O 晶体在外界电场的作用下,会发生极化现象,该极化现象还受到晶体缺陷的影响。

为描述交变电场作用下的极化过程,引入复相对介电常数物理量  $\varepsilon^*$ ,根据德拜弛豫方程(Debye relaxation

表1 冰结合状态定性描述

Table 1 Qualitative description of ice bonding state

冰结合状态	特征	粘附力大小	电能消耗
固密态	静态冰层晶体结构无明显瑕疵	最大	-
预融态	受热后晶体结构开始出现瑕疵及纳米级 QLL 层扩大	较大	较小
过渡态	受热后发生相变, 出现微米级过渡层	较小	较大
水膜态	受热后发生相变, 出现完整宏观水膜	微弱	最大

equation), 定义如下:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_s$  是静态介电常数;  $\varepsilon_\infty$  是光频介电常数;  $\tau$  为弛豫时间;  $\omega$  为角频率; 复介电常数的实部  $\varepsilon'$ 、虚部  $\varepsilon''$  以及损耗角正切值可表示为:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty + \omega^2\tau^2} \quad (4)$$

冰、水和空气的弛豫极化参数决定了其介电常数的频域特性<sup>[21]</sup>, 具体参数如表2所示, 并以此绘制冰、水和空气的介电常数频率特性曲线如图2所示。基于电介质极化损耗理论, 建立待测物质的 RC 等效电路模型如图3所示。从宏观的复阻抗测量层面表征微观复介电常数的频率特性。即通过频率扫描的方式测量冰层的复阻抗谱<sup>[22-23]</sup>, 从而进行结冰状态的探测<sup>[24-25]</sup>。在此基础上, QLL 层、过渡层及水膜均会影响测量结果, 因此, 4 种冰结合状态能够通过弛豫极化现象的测量进行识别。

表2 0°C时冰、水和空气的弛豫极化参数

Table 2 Relaxation polarization parameters of ice, water and air at 0°C

物质	静态介电常数 $\varepsilon_s$	光频介电常数 $\varepsilon_\infty$	弛豫时间 $\tau/s$
冰	97	3	$2.2 \times 10^{-5}$
水	88	5	$1.7 \times 10^{-11}$
空气	1.000 59	1.000 055	-

### 1.3 热力学介电影响机理

考虑到加热除冰过程中的温度波动, 需要厘清温度对极化作用的影响机理<sup>[26-27]</sup>, 明确复阻抗频谱特性曲线在温度和相态作用下的变化特性<sup>[28-29]</sup>。

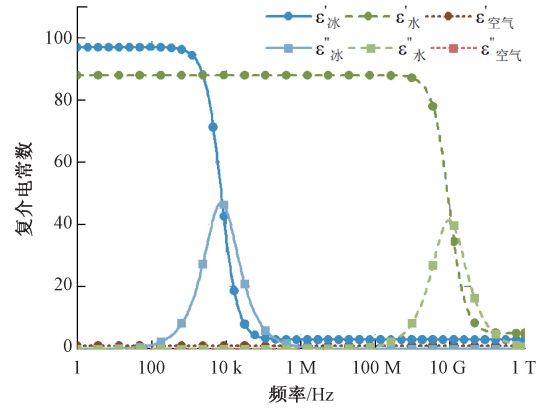


图2 冰、水和空气的介电常数对数频率特性

Fig. 2 Logarithmic frequency characteristics of permittivity of ice, water and air

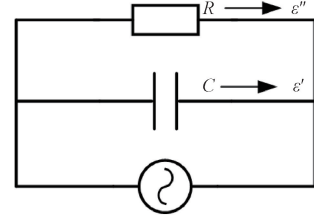


图3 电介质的等效 RC 电路模型

Fig. 3 Equivalent RC circuit model of dielectrics

首先, 基于居里-韦斯定律, 可得静态介电常数  $\varepsilon_s$  和光频介电常数  $\varepsilon_\infty$  随温度的变化关系:

$$\varepsilon_s - \varepsilon_\infty = \frac{A_c}{T - T_c} \quad (5)$$

式中:  $A_c$  为物质的常数;  $T_c$  为冰的居里温度;  $T$  为温度变量, 由于光频介电常数  $\varepsilon_\infty$  受温度影响极小可以忽略不计, 因此可视为常数。

然后, 根据阿伦尼乌斯公式和玻尔兹曼输运方程, 给出弛豫时间  $\tau$  与温度  $T$  的函数关系。

$$\tau = C_\tau \exp\left(\frac{E_\tau}{k_B T}\right) \quad (6)$$

式中:  $C_\tau$  为常数;  $E_\tau$  为活化能;  $k_B$  为玻尔兹曼常数。

最后, 将式(5)和(6)代入式(2)和(3)中, 即可将温度变量  $T$  引入德拜弛豫方程。

$$\varepsilon'(\omega, T) = \varepsilon_\infty + \frac{A_c}{T - T_c} \times \frac{1}{1 + \omega^2 C_\tau^2 \exp\left(\frac{2E_\tau}{k_B T}\right)} \quad (7)$$

$$\varepsilon''(\omega, T) = \frac{A_c}{T - T_c} \times \frac{\omega C_\tau \exp\left(\frac{E_\tau}{k_B T}\right)}{1 + \omega^2 C_\tau^2 \exp\left(\frac{2E_\tau}{k_B T}\right)} \quad (8)$$

由此得出温度对复介电常数的影响规律,冰的相关热力学参数如表 3 所示。

表 3 冰的相关热力学参数

Table 3 Relevant thermodynamic parameters of ice

参数	数值	单位
$A_c$	24 620	K
$T_c$	6.2	K
$C_\tau$	$5.3 \times 10^{-16}$	S
$E_\tau$	0.571	eV
$k_B$	$1.380\ 649 \times 10^{-23}$	$J \cdot K^{-1}$

将热力学和弛豫极化参数等常数代入式(7)和(8)中,即得出冰的复介电常数随温度和频率的变化关系,如图 4 和 5 所示。

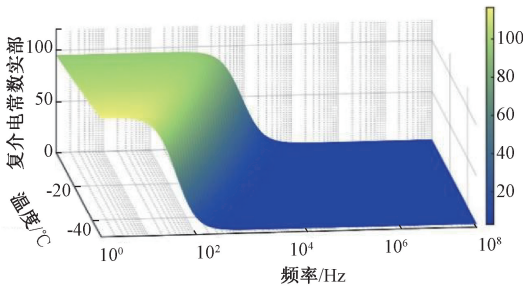


图 4 复介电常数实部温度频率特性曲线

Fig. 4 Temperature-frequency characteristic curve of the real part of the complex dielectric constant

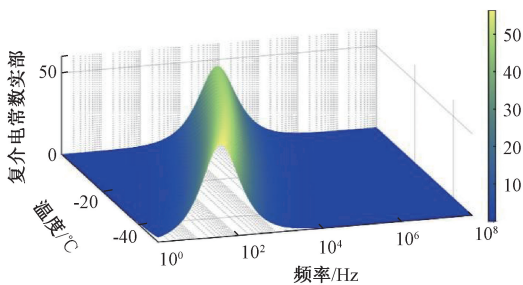


图 5 复介电常数虚部温度频率特性曲线

Fig. 5 Temperature-frequency characteristic curve of the imaginary part of the complex dielectric constant

复介电常数的温度频率特性曲线表明,当温度升高时,弥散区间和损耗峰值均向高频方向移动。复介电常数实部低频段随温度升高而减小,中频段则随温度升高而增大,而高频段则对温度变化不敏感;复介电常数虚部的损耗峰值随温度升高略微减小,峰值频率逐渐增加。

基于上述 3 个方面的动态结冰探测理论研究,并结合电热融冰实验,分析加热过程中复阻抗谱的变化特点,从而明确冰结合状态感知的核心特征。

## 2 实验装置设计

### 2.1 探除一体功能膜的设计

实际平行板电容器极板面积是有限的,而且考虑探测以及安装的需要,往往设计为平面电极对的形式,利用边缘效应形成边缘电场传感器 (fringing electric field, FEF)。探除一体功能薄膜作为一种边缘电场传感器,其设计重点在于电极形状和极间间隔,并同时考虑信号强度、动态范围、灵敏度以及穿透深度等性能指标。相较于矩形电极、同心圆环形电极等形状,叉指电极信号强度和动态范围较高,灵敏度分布较为均匀,被广泛应用于结冰探测场景。更重要的是,由于叉指形状能够满足较长的爬线距离,通过改变拓扑结构可以任意地在边缘电场电容器和加热电阻丝之间切换,如图 6 所示。

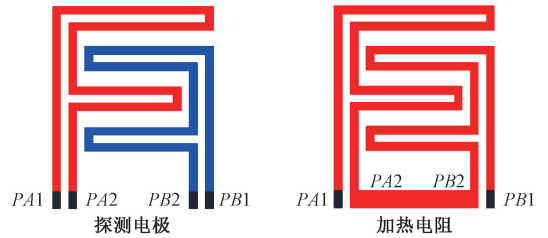


图 6 探除一体结构设计

Fig. 6 Detection and deicing integrated structure design

PA2 与 PB2 断开时形成探测电极,PA2 与 PB2 接通时形成加热电阻,从而实现探除冰一体化的功能,所设计的探除一体功能膜如图 7 所示。

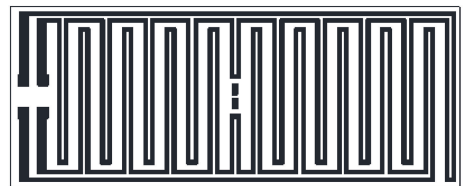


图 7 探除一体功能膜

Fig. 7 Ice detection and deicing integrated functional film

### 2.2 实验平台的搭建

实验平台的组成包括探除一体功能膜、聚甲醛基板、串口继电器、接触式调压器、功率继电器、LCR 表、功率计、Pt1000 铂电阻、温度采集卡、上位机控制平台,以及定量实验的砝码、定滑轮、矩形结冰框等工具。

探除一体功能膜齐平保型贴敷于聚甲醛基板, Pt1000 铂电阻埋入基板,并涂覆导热硅脂。实验平台的示意图如图 8 所示,拉力脱冰装置如图 9 所示。



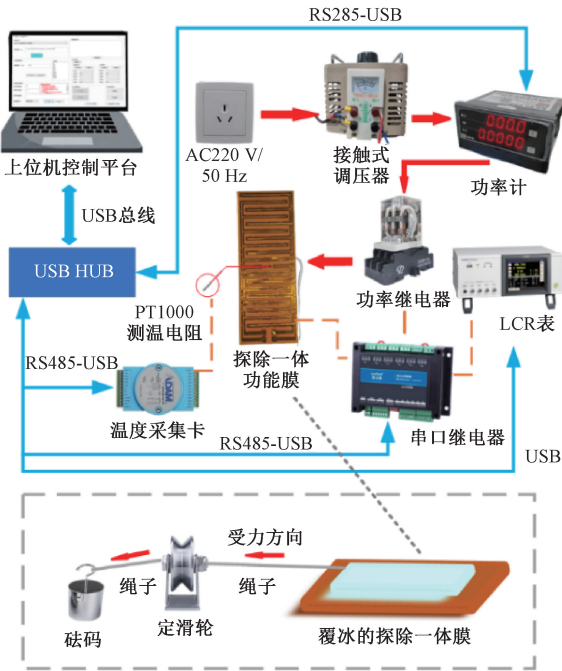


图8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform diagram

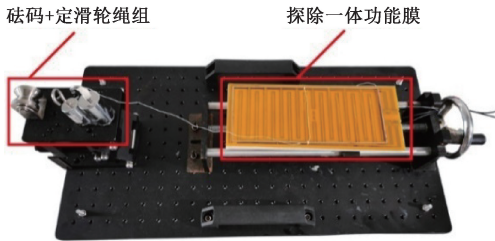


图9 拉力脱冰装置

Fig. 9 Physical representation of an external stress deicing device

上位机平台控制加热除冰和结冰探测功能在固定周期内切换,实现一体化工作流程,如图10所示。

### 3 冰结合状态感知实验研究

结冰实验从2个层面展开,其一,为比较薄膜探测、除冰功能切换对加热除冰效果和复阻抗数据的影响,分析连续加热融冰和探除冰切换实验的温度特性,并基于复阻抗探测数据总结加热融冰各阶段的特点;其二,为感知探除冰过程中冰结合状态的变化情况,进行了拉力脱冰实验,依据复阻抗特征数据以及覆冰脱落时间,建立冰结合状态的感知方法,并通过实验验证该方法的有效性。

#### 3.1 探除冰切换实验

探除冰切换实验设置如表4所示。为获取加热融冰过程中的复阻抗和温度信息,探索探除一体化机制的可

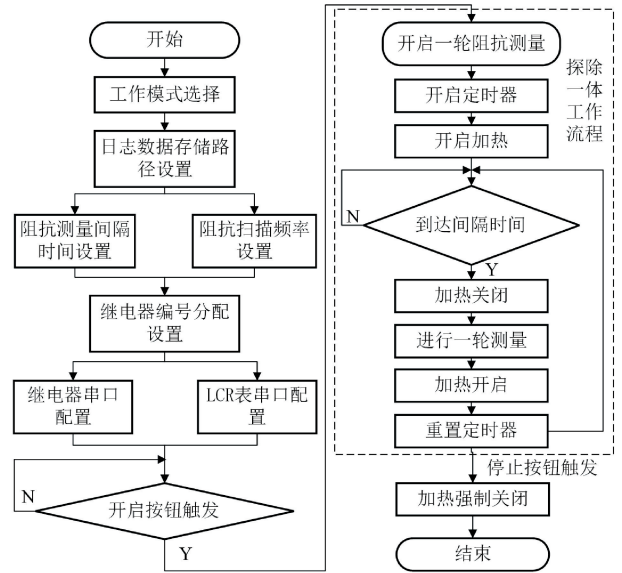


图10 探除冰一体化上位机控制平台工作流程

Fig. 10 Workflow of the integrated upper computer control platform for ice detection and heating deicing

行性,实验通过LCR表按照常用对数间隔采集500 Hz~1 MHz范围内共计12个频点的电容、相角等复阻抗数据,每轮扫描时间间隔3 000 ms;通过温度采集卡间隔1 000 ms采集一组温度数据。

表4 探除冰切换实验条件设定

Table 4 Freezing detection and heating deicing time switch experiment condition setting

实验条件	说明
加热方式	间断加热
加热间隔时间	<700 ms
加热功率密度	1.5 W·cm <sup>-2</sup>
有效加热面积	209 cm <sup>2</sup>
加热线路等效电阻	38 Ω
加热电压	AC108 V
起始温度	-15.9℃~17.9℃
测量间隔时间	约3 000 ms

与连续加热融冰不同,探除冰切换实验的加热方式是间断的,间断时间与测量频率点的数量有关,一般小于700 ms,该时间段加热膜切换为探测元件,进行复阻抗数据的采集。

连续加热和间断加热的多组重复实验如图11所示,选取40 s内的温度变化情况,相同加热方式温度特性较为一致,间隔加热方式在15 s之后温度上升速度逐渐低于持续加热方式,40 s左右最大温差约6.9℃。探除切换

引起的周期性加热间隔会导致温度上升速率减缓,但总体仍能保持上升趋势。

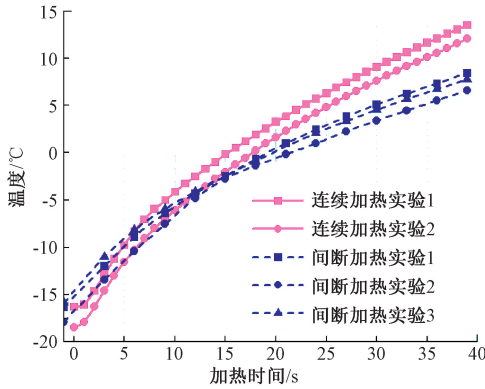


图 11 连续加热和间断加热温度趋势对比

Fig. 11 Comparison of temperature between continuous heating and intermittent heating

分析探除冰切换实验中电容和相角的频谱特性随加热时间(81 s 内)的变化情况,如图 12 和 13 所示。从加热前 1 s 和探除一体切换后的测量结果可知,电容和相角的频谱变化趋势与德拜弛豫极化理论相符,探除切换对复阻抗测量的影响较小。

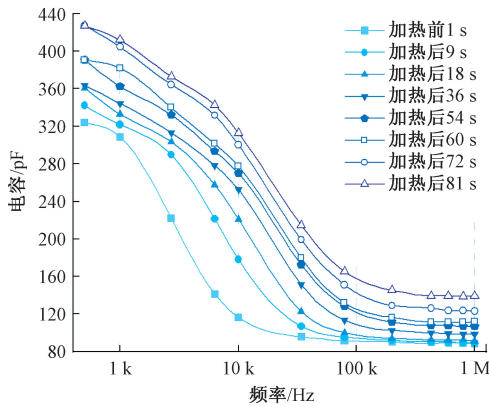


图 12 加热过程的电容频谱特性曲线

Fig. 12 Capacitance spectrum characteristic curve of heating process

随着加热时间的增加,电容频谱曲线不断抬升,弥散区间逐渐向高频移动,其右界从理论上的冰层弥散区间频率段(1~100 kHz)上升至 600 kHz 左右;相角频谱峰值持续下降。冰、水在低频段复介电常数实部和虚部差异较小;而在中频处(冰的弥散区间)冰的复介电常数实部出现显著下降,虚部出现明显的损耗峰,然而水的复介电常数基本保持不变;高频段冰的复介电常数实部和虚部都下降至较低水平,而水的介电常数实部依旧保持较高。

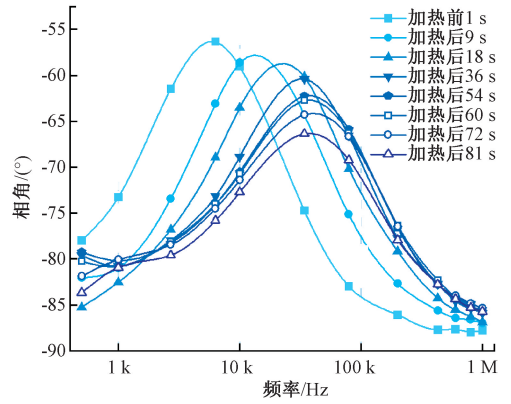


图 13 加热过程的相角频谱特性曲线

Fig. 13 Phase angle spectrum characteristic curve of heating process

受冰水相变和温度升高的双重影响,电容在低、中频段的上升反映的是过渡层扩张和温度升高的共同作用,高频段则主要受液态水增加的影响;相角峰值受水膜和温度的共同作用,但水膜引起的介电常数虚部损耗峰下降影响更为突出。

探除冰切换实验的覆冰变化情况如图 14 所示,当有明显水流溢出时停止实验,实验覆盖了整个加热除冰的过程。

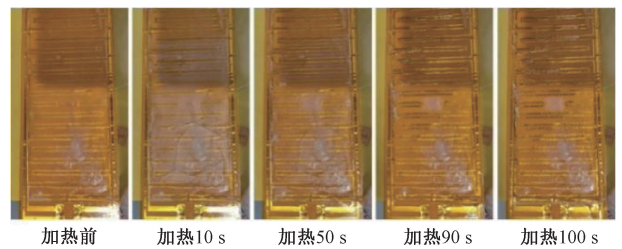


图 14 加热过程的覆冰变化情况

Fig. 14 Changes in ice cover during heating

依据冰的弛豫极化频率特性,分为低频段(频率 $\leq 1$  kHz,上方阴影),中频段(1 kHz<频率 $\leq 100$  kHz,中间阴影)、高频段(频率 $>100$  kHz,下方阴影)3 个部分,分析各频段电容以及温度随加热时间变化情况,如图 15 所示。

首先,温度随加热时间增加而上升,并逐渐趋于稳定,原因在于加热膜的持续加热与大量冰层融化吸热达到了近似热平衡的状态。

其次,各频段电容随加热时间上升,约 90 s 时出现峰值后下降。加热过程伴随着温度的上升以及冰水相变,依据复介电常数的温度特性以及冰水弛豫极化特性的差异,表征复介电常数实部的电容会随之增加,90 s 左右,水膜增加到一定程度会逐渐流出,在覆膜和冰层之间形

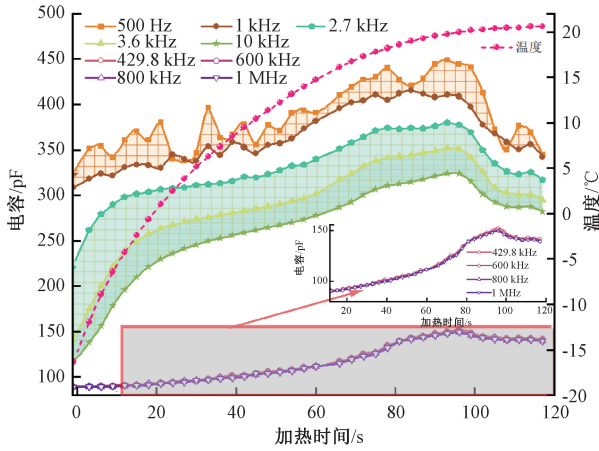


图15 加热过程各频段电容变化情况

Fig. 15 Variation of capacitance in each frequency band during heating

成“空壳”并扩大,此时待测物质相当于冰、水、空气三者的混合态,等效介电常数迅速下降而造成电容下降,此时已处于过加热状态。

最后,低频段电容随加热时间缓慢上升,但存在较大的波动,原因在于低频段易受环境因素譬如离子杂质、电磁波等干扰。加热融冰引起的冰水相变使得低频电容值抬升,而低频段温度的影响较之相比并不明显;中频段电容变化过程较为一致,加热开始30 s内快速上升阶段反映了到达冰点前温度的变化,随后与温度变化情况相似,增长速率减缓,同时水膜增加也会引起中频电容的增加,逐渐到达峰值;高频段电容变化较为缓慢,原因在于高频介电常数的温度稳定性较好,依据冰水介电常数的高频差异,电容随加热时间上升表征的是过加热厚度的不断增加。

基于电容测量结果,提取中频电容变化率和高频电容值两类特征数据,绘制温度和相角峰值曲线作为参照,如图16所示。

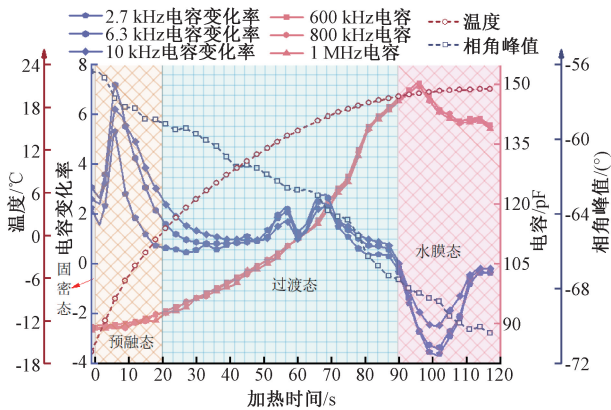


图16 加热融冰过程的冰结合情况划分

Fig. 16 Classification of ice bonding states in the process of heating and melting ice

描述加热融冰过程中的4种冰结合状态如表5所示。

表5 4种冰结合状态的电容描述

Table 5 Description of capacitance measurements for four ice bonding states

冰结合状态	复阻抗特征	宏观特征
固密态	电容曲线平稳	加热除冰前的静态冰层
预融态	中频电容变化率出现显著峰值,高频电容平稳	快速升温阶段,晶体结构开始出现瑕疵
过渡态	中频电容变化率稳定,高频电容快速上升	缓慢升温相变剧烈,覆冰粘附力显著下降
水膜态	中频电容变化率下降,高频电容达峰后下降	过加热阶段,出现大量积水

固密态为加热除冰前的静态冰层,晶体结构稳定,分子排列规则有序,极化程度低,介电常数为稳定状态且相对较小。定义固密态阶段稳定测量的中频电容  $C_{mid_0}$ , 高频电容  $C_{high_0}$ , 中频电容  $C_{mid}(t)$  和 高频电容  $C_{high}(t)$  特征为:

$$\begin{cases} C_{mid}(t) = C_{mid_0} \\ C_{high}(t) = C_{high_0} \end{cases} \quad (9)$$

预融态阶段加热开始时温度迅速上升然后逐渐变缓,分子热运动,晶体结构开始出现瑕疵但未开始相变,在弛豫极化作用下损耗峰向频率增加的方向移动,因此中频电容快速上升随后增长变缓,中频电容变化率  $\frac{dC_{mid}(t)}{dt}$  出现显著峰值,高频电容  $C_{high}(t)$  对温度不敏感,较为平稳:

$$\begin{cases} \frac{dC_{mid}(t)}{dt} \approx A \cdot C_{mid_0} \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_p)^2}{t_w}\right) \\ |C_{high}(t) - C_{high_0}| \leq \delta_{high} \end{cases} \quad (10)$$

式中:系数  $A$  表示峰值和中频电容初始值  $C_{mid_0}$  的比例,试验结果在  $[2, 4]$  范围内;  $t_p$  和  $t_w$  分别表示用于高斯函数描述的峰值时间和区间;  $\delta_{high}$  表示高频电容相对初始值的微小变化量。

过渡态阶段相变剧烈,温度缓慢上升,晶体中自由排列的分子数目增多,对外施电场的响应增强。中频电容增

长相对稳定,  $\frac{dC_{mid}(t)}{dt}$  基本保持稳定,由于高频段水的介电常数实部显著大于冰,高频电容  $C_{high}(t)$  快速上升。

$$\begin{cases} \left| \frac{dC_{mid}(t)}{dt} - \frac{dC_{mid}(t)}{dt} \right|_{t_0} \leq \delta_{mid} \\ \frac{\ln(C_{high}(t)) - C_t}{t} \approx k_t \end{cases} \quad (11)$$



式中:  $t_0$  为初始时间;  $\delta_{mid}$  表示中频变化率的较小变化量;  $C_i$  为常数;  $k_i$  为常数, 表征高频电容增长的速度。

水膜态阶段相变区域扩大, 水膜流动, 覆膜和冰层之间形成“空腔”, 由于气隙介电常数值较小, 中、高频电容均下降, 中频电容变化率  $\frac{dC_{mid}(t)}{dt}$  随之下降, 高频电容  $C_{high}(t)$  达到峰值后也开始下降。

$$\begin{cases} \frac{dC_{mid}(t)}{dt} \leq 0 \\ \frac{dC_{high}(t)}{dt} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

实验表明, 在探测、加热切换过程中, 复阻抗数据的频谱特征符合德拜弛豫理论模型, 工作模式切换对复阻抗探测造成的影响可以忽略, 验证了探除一体工作模式的可行性; 其次, 对比单点测量的温度指标, 探除一体化的复阻抗探测方法能够反映整个加热除冰区域中全过程的温度、冰水相态变化情况, 对过加热情况有一定的感知能力; 最后, 伴随冰结合状态改变, 过渡层面积和厚度的增加能够显著降低冰与基底的粘附力。

高频电容和相角峰值受温度影响很小, 更能表征水膜的变化过程, 中频电容变化率反映的是温度和水膜的共同作用, 曲线特征也能较好地表征冰结合状态。因此将基于高频电容、相角峰值以及中频电容变化率 3 个特征变量研究加热过程中冰结合状态的判别方法。

### 3.2 预应力脱冰实验

对于电磁激振等高效除冰方法, 冰紧密结合状态的消失有利于提升脱冰成功率。因此, 对于过渡态的识别是高效除冰的关键。为确定加热过程中覆冰紧密结合状态消失时刻, 进一步研究过渡态的感知方法, 开展预应力脱冰实验, 实验条件设置与探除冰切换实验一致。在加热除冰过程中, 通过定滑轮及不同质量的砝码拉动冰块, 记录冰层移动的时刻, 并以实验中砝码的重力表征该时刻冰粘附力的大小, 实验结果如表 6 所示。

表 6 砝码质量与冰块脱落时间

Table 6 Weight mass and ice shedding time

砝码质量/g	脱落时间/s
100	81
200	67
300	87

不同质量砝码作用下的冰块, 其脱落时间并不是线性的。原因可能在于结冰模具略大于加热区, 其外部的积冰难以受热融化, 对冰脱落影响较大。保守估算加热时间 90 s 后为冰脱落阶段。

为统一评估探测指标上升、下降的趋势, 减小加热融冰过程中因探测量的绝对值差异对变化规律的影响, 对高频电容和相角峰值进行无量纲化处理。高频电容选取的是远高于冰弥散区间(1~100 kHz)的 1 MHz 电容, 相角峰值是相角原始数据拟合曲线的最大值。设加热前 1 s 的高频电容值为  $C_{high_0}$ , 加热后第  $i$  时刻的高频电容为  $C_{high_i}$ , 处理后的电容相对值  $C_{high_i}^*$  为:

$$C_{high_i}^* = \frac{C_{high_i} - C_{high_0}}{C_{high_0}} \times 100\% \quad (13)$$

同理, 处理后的相角峰值相对值  $\varphi_i^*$  为:

$$\varphi_i^* = \frac{\varphi_i - \varphi_0}{\varphi_0} \times 100\% \quad (14)$$

在无量纲化后的高频电容  $C_{high_i}^*$  和相角峰值  $\varphi_i^*$  随时间的变化曲线中标识出覆冰脱落阶段, 无量纲化后高频电容的上升和相角峰值的下降可统一为相对值描述, 如图 17 和 18 所示。

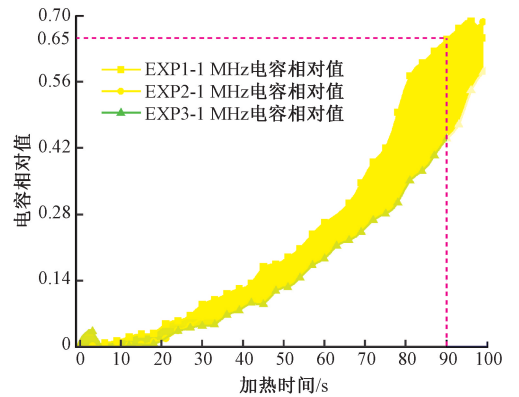


图 17 覆冰脱落阶段的高频电容相对值标定  
Fig. 17 Calibration of the relative high-frequency capacitance value during the ice-shedding stage

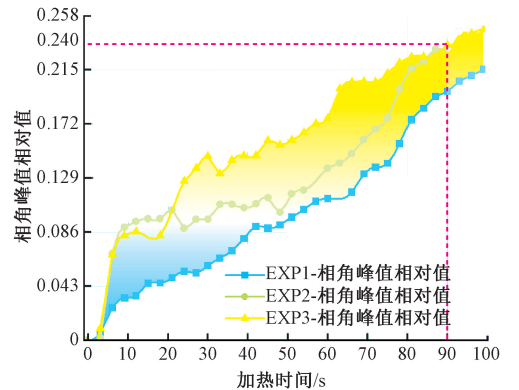


图 18 覆冰脱落阶段的相角峰相对值标定  
Fig. 18 Calibration of the relative peak value of phase angle during the ice-shedding stage



结果表明,3组重复实验的高频电容与相角峰变化趋势基本一致,EXP1实验的电容相对值略高,说明其融冰较快。覆冰脱落时高频电容相对值  $C_{high_i}^*$  最高增长至0.65以上,相角峰相对值  $\varphi_i^*$  增长至0.24以上。

然后,选取中频段频率为10 kHz的电容,计算电容-时间变化率  $\frac{\Delta C_{mid}}{\Delta t}$ :

$$\frac{\Delta C_{mid}}{\Delta t} = \frac{C_{mid_{i+1}} - C_{mid_i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (15)$$

式中:  $C_{mid_i}$  为第  $i$  时刻的中频电容;  $C_{mid_{i+1}}$  为当前第  $i+1$  时刻的中频电容;  $t_i$  和  $t_{i+1}$  分别为两个时刻的加热时间。在进行平滑滤波后的中频电容变化率曲线中标注覆冰脱落时间如图19所示。

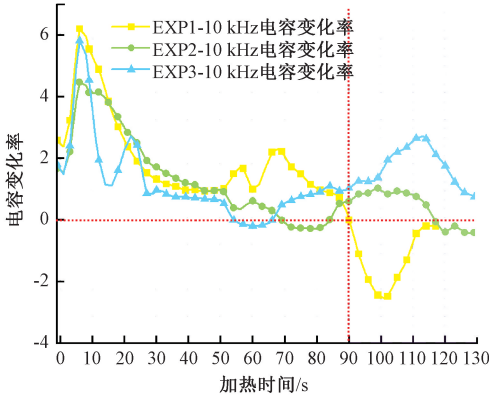


图19 覆冰脱落阶段的中频电容变化率

Fig. 19 Intermediate frequency capacitance change rate during ice shedding stage

重复实验的中频电容变化率随时间的变化特性较为一致,90 s之后EXP1较其他两组实验迅速下降至0以下,说明该组实验融冰速度较快,与高频电容反映的现象一致。其余两组实验在110 s之后出现快速下降的趋势,说明已进入过加热阶段,冰结合状态为水膜态。中频电容变化率的表明,覆冰脱落时刻在过渡态的后期,早于水膜态,并有如下特征:

$$\frac{\Delta C_{mid}}{\Delta t} < 0, \quad \frac{d \Delta C_{mid}}{dt} < 0 \quad (16)$$

综上所述,覆冰脱落阶段是加热过程中过渡层厚度和面积增加到某一程度,粘附力显著减小从而足以克服粘附作用脱落的阶段,通过复阻抗探测的高频电容、相角峰值和中频电容变化率3个特征量描述这一过程,提出覆冰紧密结合状态消失的判断准则如下:

- 1) 高频电容相对值  $\geq C_{th}^*$ , 即  $C_{high_i}^* \geq C_{th}^*$ ;
- 2) 相角峰值相对值  $\geq \varphi_{th}^*$ , 即  $\varphi_i^* \geq \varphi_{th}^*$ ;

3) 中频电容变化率  $< 0$ , 即  $\frac{\Delta C_{mid}}{\Delta t} < 0$ ;

4) 中频电容变化率的导数  $< 0$ , 即  $\frac{d \Delta C_{mid}}{dt} < 0$ 。

其中,  $C_{th}^*$  和  $\varphi_{th}^*$  分别是高频电容和相角峰相对值的判断阈值,可通过实验标定,当前实验条件下阈值分别为0.65和0.24。覆冰紧密结合状态消失判断准则确定了冰结合状态感知分类的核心特征,可作为感知过渡态的初步方法。

为验证覆冰紧密结合状态消失判断准则的有效性,进行验证实验以对比实际覆冰脱落时间与覆冰脱落准则判断结果,加热起始温度为  $-15.01^\circ\text{C}$ ,砝码质量50 g,其余实验工况与之前实验保持一致。实验结果如图20所示,依据覆冰紧密结合状态消失判断准则,覆冰脱落时间判断结果如表7所示。

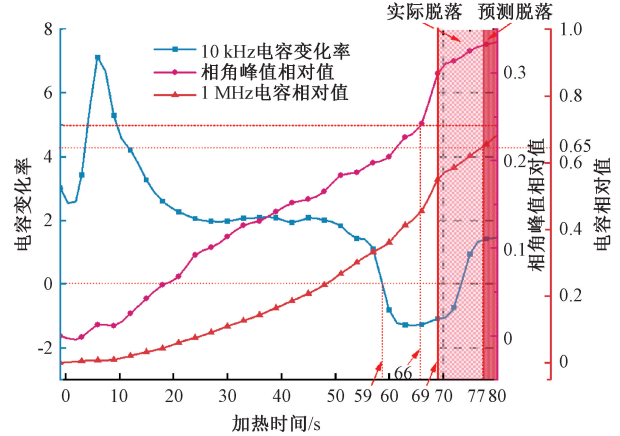


图20 覆冰紧密结合状态消失判断准则验证的实验结果

Fig. 20 Experimental results validating the criteria for determining the disappearance of tightly bonded ice states

表7 覆冰脱落验证实验的时间对比结果

Table 7 The time comparison results of the ice shedding verification experiment

表征指标	脱落时间/s
中频电容变化率	59
相角峰值	66
高频电容峰值	77
实际情况	69

选取最长的加热脱落时间,保守估算77 s后覆冰脱落,而实际覆冰于加热69 s时脱落,早于准则判断的时间,相差仅为8 s。将各判别时间取或运算后得出脱落时间段为59~77 s,实际脱落时间69 s处于该时间段,初步说明覆冰脱落判断准则能够有效识别覆冰脱落的情况并覆盖实际脱落时间。

## 4 结 论

本文针对电热除冰过程中冰结合状态的感知问题,设计了一种探除一体功能薄膜,结合冰结合状态探测理论和电热融冰实验,首先提出了4种冰结合状态的概念,并从理论角度明确了相变和温度对复阻抗测量的影响机理;其次分析了加热过程中冰结合状态的特点,从复阻抗谱层面进行了表征,确定了冰结合状态感知的核心特征;最后提出了覆冰紧密结合状态消失判断准则。初步实验结果表明,该准则可有效确定覆冰脱落的时间范围,有望显著提升电热除冰过程中冰结合状态感知的准确率,并为航空器高效电热除冰提供关键技术支撑。

探除一体功能薄膜在飞机表面贴覆的应用,还需要解决薄膜耐候性的问题,目前考虑航空领域常用的石英纤维增强氰酸酯树脂预浸料提升薄膜性能。另一方面,目前功能薄膜还处于平面冰层的探测阶段,曲面或非均匀性结冰、相变表面的测量也面临挑战,因此还需要结合实际冰风洞试验提升功能薄膜复杂工况下的适用能力。

## 参考文献

[1] 沈一洲,贺俊健,吴炳泉,等. 主被动耦合防/除冰技术及能耗控制研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35):14905-14915.  
SHEN Y ZH, HE J J, WU B Q, et al. Research progress of active-passive coupling anti-icing/deicing technology and energy consumption control[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(35):14905-14915.

[2] 朱宝. 低能耗超疏水电热蒙皮设计及防冰性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.  
ZHU B. Low power superhydrophobic electrothermal skin and its anti-icing performance[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.

[3] 熊建军,刘锡,冉林,等. 基于控制律的电加热防除冰系统设计与验证[J]. 测控技术, 2021, 40(2):130-134,139.  
XIONG J J, LIU X, RAN L, et al. Design and verification of electrical heating anti-icing/deicing system based on control law[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(2):130-134,139.

[4] 冉林,熊建军,赵照,等. 周期控制律电加热控制系统设计与应用[J]. 电气传动, 2021, 51(14):57-61.

RAN L, XIONG J J, ZHAO ZH, et al. Design and application of electric heating control system with periodic control law[J]. Electric Drive, 2021, 51(14):57-61.

[5] 刘振国. 基底与冰层界面剪切粘附力影响规律实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2022.  
LIU ZH G. Experimental study on the shear adhesion strength between substrate and ice[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[6] 王榆淞,韩亮,朱春玲,等. 考虑界面应力的高精度冰粘附力测量平台设计(英文)[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 39(5):561-568.  
WANG Y S, HAN L, ZHU CH L, et al. Design of an experimental set-up concerning interfacial stress to promote measurement accuracy of adhesive shear strength between ice and substrate(English)[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 39(5):561-568.

[7] YASLIK A, WITT K D, THEO KEITH J, et al. Further developments in three-dimensional simulation of electrothermal deicing systems[C]. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992:528.

[8] 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 CH Y. Numerical calculation and experimental study of aircraft electrothermal anti/de-icing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[9] PITTENGER B, COOK D J, SLAUGHTERBECK C R, et al. Investigation of ice-solid interfaces by force microscopy: Plastic flow and adhesive forces[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, A. Vacuum, Surfaces, and Films, 1998, 16(3):1832-1837.

[10] ARCHER P, GUPTA V. Measurement and control of ice adhesion to aluminum 6061 alloy[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(10):1745-1771.

[11] 闫泽豪,葛俊锋,叶林,等. 基于模拟导线的输电线路覆冰探测系统[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6):63-66.  
YAN Z H, GE J F, YE L, et al. Transmission line ice detection system based on the simulated wire[J].

- Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(6):63-66.
- [12] 葛俊锋,白鸿飞,毛俊伟,等. 基于阵列式压电振动频谱衰减的结冰区域定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(10):86-97.
- GE J F, BAI H F, MAO J W, et al. The icing area localization method based on piezoelectric array vibration spectrum attenuation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(10):86-97.
- [13] GUI K, LIU J, GE J F, et al. Atmospheric icing process measurement utilizing impedance spectroscopy and thin film structure[J]. Measurement, 2022, 202:111851.
- [14] INANLU M J, GURUMUKHI Y, KABIRZADEH P, et al. Capacitive sensing of frost growth dynamics on aluminum surfaces with different wettabilities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 225:125377.
- [15] RAHMAN H U, MALIK A N, LAZOGLU I. Ice growth detection and the de-icing using dual functional capacitive sensor[J]. Measurement, 2024, 237:115208.
- [16] 陈功. 飞机结冰问题中附着力的演化机理研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- CHEN G. Study on evolution mechanism of ice adhesion during aircraft icing problem [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [17] 周翼,桂康,葛俊锋,等. 一种飞行器表面冰结合状态的判别方法及系统:CN202410031431.8[P]. 2024-04-05.
- ZHOU Y, GUI K, GE J F, et al. A method and system for discriminating the ice bonding state on the surface of a vehicle; CN202410031431.8[P]. 2024-04-05.
- [18] 孙兆茹,潘鼎,徐莉梅,等. 冰表面结构及其物理特性的新探索[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2013, 43(10):1144-1150.
- SUN ZH R, PAN D, XU L M, et al. Progress in the structural and physical properties of ice surface [J]. Science China: Physica, Mechanica & Astronomica, 2013,43:1144-1150.
- [19] EMELYANENKO K A, EMELYANENKO A M, BOINOVICH L B. Water and ice adhesion to solid surfaces: Common and specific, the impact of temperature and surface wettability [J]. Coatings, 2020, 10(7):648.
- [20] SLATER B, MICHAELIDES A. Surface premelting of water ice[J]. Nature Reviews Chemistry, 2019, 3(3):172-188.
- [21] NEUMAYER M, BRETTNERKLEBER T. Ice sensing using combined capacitive and impedance spectroscopic Measurements[C]. 2023 IEEE Sensors, 2023:1-2.
- [22] ZHU Y C, HUANG X B, TIAN Y, et al. Experimental study on the icing dielectric constant for the capacitive icing sensor[J]. Sensors, 2018, 18(10):3325.
- [23] LIN T T, DU Y, MAO J. Monitoring of icing behavior based on signals from a capacitance sensor[J]. Optik, 2016, 127(11):4650-4655.
- [24] ELZAIDI A, MASEK V, BRUNEAU S. Water and ice detection in marine icing by capacitive sensor array and the artificial neural network model[C]. 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, 2019:94-97.
- [25] SHE Q H, JIANG X L, CHEN Y T, et al. Research on the monitoring method of glaze icing based on capacitance effect[C]. 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, 2023:1-5.
- [26] LEITZKE J P, MITTERER T, ZANGL H. Capacitive sensing of icing under vacuum and cryogenic temperatures[J]. Sensors, 2019, 19(16):3574.
- [27] 任宏宇,苑丹丹,桂康,等. 复阻抗式结冰探测技术的温度补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):88-94.
- REN H Y, YUAN D D, GUI K, et al. A temperature compensation method for complex impedance ice detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(6):88-94.
- [28] GUI K, BAI H, LIU Z Y, et al. Impedance ice sensor capable of self-compensating temperature drift[C]. 2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2023:118-122.
- [29] GUI K, BAI H, LIU Z Y, et al. Mixed phase measurement during icing process utilizing multi-wavelength interdigital sensor [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 242:122491.

## 作者简介



周翼,2022 年于南京理工大学获得学士学位,现为华中科技大学硕士研究生,主要研究方向为传感器及智能检测技术。

E-mail:zy2000zy0224@163.com

**Zhou Yi** received his B. Sc. degree in 2022 from Nanjing University of Science and Technology. Now he is a master student at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensors and intelligent detection technology.



郭玉东,2010 年于兰州交通大学获得学士学位,2012 年于华中科技大学获得硕士学位。现为武汉航空仪表有限责任公司高级工程师,主要研究方向为防除冰技术。

E-mail:guoyudong0641@126.com

**Guo Yudong** received his B. Sc. degree in 2010 from Lanzhou Jiaotong University, received his M. Sc. degree in 2012 from Huazhong University of Science and Technology. Now he is a senior engineer in Wuhan Aviation Instrument Co., Ltd. His main research interests include anti-deicing technology.



桂康(通信作者),2013 年于华中科技大学获得学士学位,2019 年于华中科技大学获得博士学位,现为华中科技大学博士后,主要研究方向为传感器及智能检测技术。

E-mail:guik@hust.edu.cn

**Gui Kang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Huazhong University of Science and Technology in 2013 and 2019, respectively. Now he is a post-doctor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensors and intelligent detection technology.



葛俊锋,2003 年于华中科技大学获得学士学位,2009 年于清华大学获得博士学位,现为华中科技大学副教授,主要研究方向为主要研究方向为传感器及智能检测技术。

E-mail:gejf@hust.edu.cn

**Ge Junfeng** received his B. Sc. degree in 2003 from Huazhong University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 2009 from Tsinghua University. Now he is an associate professor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensors and intelligent detection technology.