

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.02.015

复合材料表面超疏水-电热防除冰实验研究

于大川, 王敬鑫, 王 渊, 朱春玲, 王逸斌

(南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

摘要: 针对无人机复合材料蒙皮表面结冰问题, 设计了一种超疏水-电加热膜-复合材料一体化结构, 结合超疏水制备技术与嵌入式电加热膜一体化成形工艺制备多层复合结构。其中, 环氧树脂基的超疏水涂层具有优异的疏水性能, 水滴延迟结冰时间增加 18 倍, 提高防冰效果; 加热膜与复合材料的一体化结构, 增强热传导方向, 提高电热转化效率, 从而提升除冰效果。通过自主搭建试验台, 对超疏水-电加热膜-复合材料一体化构型进行防除冰实验。实验结果表明, 超疏水-电加热膜-复合材料一体化方法在达到防除冰效果的同时, 除冰节能 35% 左右, 具有高效防除冰和降低能耗的可行性。

关键词: 超疏水; 电加热; 一体化结构; 防除冰实验; 节能

中图分类号: V244.1+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)02-0327-07

Experimental Study on Superhydrophobic Electrothermal Anti-icing and De-icing on Composite Surface

YU Dachuan, WANG Jingxin, WANG Yuan, ZHU Chunling, WANG Yibin

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

Abstract: In order to solve the problem of UAV composite surface icing, an integrated structure of superhydrophobic coating, electrothermal film and composite surface is designed and prepared. The multilayer integrated structure consists of the superhydrophobic coating preparation method and the embedded electrothermal film process. The superhydrophobic coating based on epoxy resin has excellent hydrophobicity, which increases 18 times longer than untreated one for delayed icing time of water droplets, and thus the anti-icing effect is improved. The integrated structure of heating film and composite surface enhances the directivity of heat conduction, which improves the efficiency of electrothermal conversion, and thus the de-icing effect also is improved. The de-icing and anti-icing tests of integrated structure are verified by self-designed test platforms. The experimental results show that the energy consumption is cut by about 35% by integrated structure of superhydrophobic coating, electrothermal film and composite surface. The integrated structure is feasible to achieve the anti/de-icing effect and reduce energy consumption.

Key words: superhydrophobic; electrothermal; integrated structure; anti-icing and de-icing experiment; energy conservation

飞机结冰是自航空开始发展至今人们始终关心的问题, 也是对航空安全造成严重危害的问题之一^[1]。当空气中过冷水滴撞击在飞机表面上时, 机

翼等部件都有可能出现结冰现象^[2]。随着无人机开始在各个领域被广泛应用, 无人机结冰成为一个热门话题^[3]。无人机复合材料用量一般占机体结

基金项目: 国家自然科学基金(11832012)。

收稿日期: 2022-12-22; **修订日期:** 2023-06-25

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: 于大川, 王敬鑫, 王渊, 等. 复合材料表面超疏水-电热防除冰实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 327-333. YU Dachuan, WANG Jingxin, WANG Yuan, et al. Experimental study on superhydrophobic electrothermal anti-icing and de-icing on composite surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 327-333.

构总重的60%~80%,但是飞机结冰多发生在外蒙皮,外蒙皮主要是玻璃纤维和碳纤维^[4]。除此之外,考虑到无人机发动机功率有限,机载载荷小,因此提高无人机全天候工作能力要求防/除冰系统效率高、能耗低、质量轻^[5]。

现有的无人机防/除冰方法有很多种,比如航路规划^[6]、化学液防除冰技术^[7]、热力防除冰技术^[8-9]、等离子体防除冰技术^[10-11]、超疏水防除冰技术^[12-13]等。现大部分无人机型号不具备防/除冰系统,航路规划是现在主流的防冰策略,但是无法满足全天候安全飞行^[10]。热力防/除冰技术是一种能够有效降低结冰风险的系统,具有质量轻的优势,并且在航空领域得到广泛应用,提高了飞行器全天候飞行能力。但是由于复合材料的导热性较差,并且加热组件与蒙皮不能很好地贴合,导致传统的电热防/除冰系统存在电热转换效率低、防/除冰能耗高等问题^[14]。此外,超疏水涂层因其优异的疏水性、延迟结冰性^[13]和疏冰性^[15],逐渐发展成为一种新型的防/除冰技术。但是在恶劣条件下,单纯依靠超疏水表面不能完全杜绝结冰现象^[16]。通过超疏水-电热混合式防/除冰技术提高防/除冰系统效率,降低能耗,可实现无人机全天候、长航时的目标。

针对混合式防/除冰的方法研究,Pawl等^[12]研究了超疏水涂层对小型翼型防冰和除冰的影响,实验表明超疏水翼型在空气温度低至 -10°C 时抵消了冰的形成。马莉娅等^[17]使用碳纤维/环氧树脂复合材料搭建了除冰验证装置,并进行了数值模拟,研究表明该电热除冰材料具有良好的除冰性能。Antonini等^[18]在冰风洞的实验条件下研究了超疏水电热金属蒙皮的防冰性能,实验结果表明超疏水表面与电热组合的方式可降低50%防冰能耗。传统的电热防/除冰方法由于复合材料的导热性和耐高温性差,消耗大量能量且可能导致基材损坏,因此需要开发一种高效防/除冰方法。

本文将超疏水表层、电加热膜与复合材料基底进行一体化设计,增强热传导方向,提高电热转化效率。通过实验验证一体化构件在冷环境下的热力学性能影响因素。开展防/除冰试验,将一体化构件与传统构型功耗对比,验证超疏水-电加热膜-复合材料一体化防/除冰方法降低能耗的可行性。

1 材料制备与实验装置

1.1 样件制备

本文设计的一体化结构由超疏水涂层、加热膜与复合材料基底构成,如图1所示。

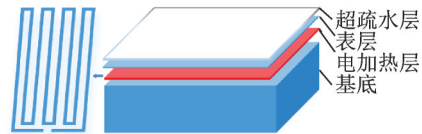


图1 一体化结构示意图

Fig.1 Structural diagram of integrated structure

基底选用0.1 mm厚的高强度玻璃纤维环氧树脂预浸料,将预浸料裁成 $5\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的大小,并进行预热处理,让预浸料中的环氧树脂部分熔化。逐层铺放压实11层作为基底。电加热膜采用镍铬合金丝制作,作为加热层固定在基底顶部,并用聚酰亚胺单侧封装粘接,防止加热丝在整体固化时构型发生改变。在电加热膜上表面再铺放一层预浸料作为表层,利用平板硫化机进行固化,得到电加热膜-复合材料一体化构件。

基于电加热膜-复合材料一体化构件,在其上表面制备超疏水涂层,制备过程如图2所示。采用环氧树脂(Epoxy resin, EP)与微米级聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, FP)颗粒结合制备超疏水涂层,将EP以1:1质量比与乙酸乙酯混合得到溶液a。FP微米颗粒($1\sim 3\ \mu\text{m}$)按照1:3的质量比与乙醇磁力搅拌得到悬浮液b。将a与b按照质量比3:16混合,用磁力搅拌混合10 min,再超声分散3 min,加入固化剂D230,磁力搅拌10 min得到超疏水溶液。在一体化构件表面喷涂6层超疏水混合液,每次间隔1 min,让溶剂中的乙醇充分挥发,最后在烘箱中 100°C 固化3 h。

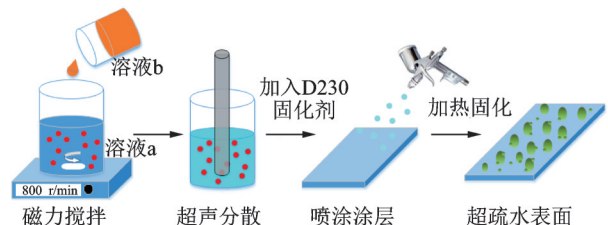


图2 超疏水涂层制备流程

Fig.2 Preparation process of superhydrophobic coating

使用静态接触角测量仪JC2000D测试EP/FP超疏水涂层在常温下的静态接触角(CA)和滚动角(RA),每次测试所用液滴的体积为 $5\ \mu\text{l}$,重复5次后取平均值。测试时环境温度为 $(23\pm 1)^{\circ}$ 。接触角大小体现水滴的疏水性能,滚动角大小体现了水在超疏水表层上运动的难易程度。接触角越大,滚动角越小,说明超疏水涂层的疏水性能越好,水滴落在表层之后越容易滚落。

通过上述步骤一共制备了3种实验构件用以测试防/除冰性能,如表1所示。其中构型1、2电加热膜通过图1的方式嵌入玻璃纤维复合材料中间。

表 1 实验件及其性能

Table 1 Test pieces and their performance

实验件	电加热膜位置	超疏水涂层	CA/(°)	RA/(°)
构型 1	内嵌	有	156±0.8	3±1
构型 2	内嵌	无	72±2	—
构型 3	背部	无	72±2	—

构型 3 采用传统的电热膜布置方式,在基板下表面(上表面为实验表面)布置电加热膜。

1.2 实验装置与方法

如图 3 所示,为测试防冰性能的实验装置,由温湿度控制系统、光源系统、数据采集系统等组成。低温箱营造冷环境,同时半导体制冷块控制并调节实验件表面温度。为了避免结霜对延迟结冰的影响,采用氮气和干燥剂进行除湿,将低温箱内环境湿度控制在 20% 以下。光源系统采用 LED 冷光源,照亮水滴,形成阴影。实验时将实验件水平放置在半导体制冷块上表面,中间用导热硅脂填充,以此增强导热和温度均匀性。实验件表面目标温度为 -15℃,低温箱环境温度为 0℃,通过铂电阻温度传感器(PT100)测温度。通过微量注射器将 7 μl 的去离子水滴落在构件表面,保证水滴无撞击初速度,通过高速相机观察记录水滴的冻结过程。采用电动滑台控制实验件能够在相同的密闭空间中进行重复性实验。

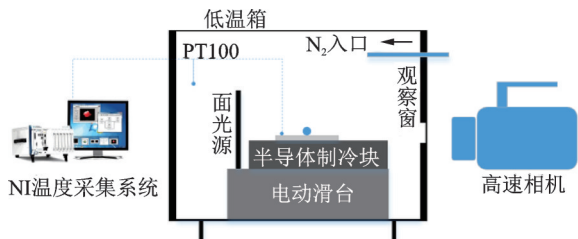


图 3 防冰性能实验装置

Fig.3 Anti-icing performance test device

图 4 所示为热力学性能和除冰性能实验装置。实验装置由温度控制系统、电加热控制系统以及数据采集系统构成。低温箱营造冷环境并为实验件降温。实验件表面布有 PT100 用以监测表面温度。通过 LABVIEW 设定表面目标温度,控制电源通断,实现实验件表面温度控制在一个小范围波动。为降低除冰功耗,应尽量降低除冰时表面温度,飞机除冰系统工作时,当界面温度达到 0℃ 时,表面与冰层界面融化,并在来流剪切力驱动下发生脱落^[19]。本次实验冰是在重力作用下脱落,为了提高冰脱落效率,增加表面温度至 5℃。通过 LABVIEW 设定表面温度,控制电源通断,实现实验件表面控制在 5℃ 小范围波动。开展热力学性能实验时,控制空气温度为 -15℃,电源通断路临界表面温度为 5℃,通过施加不同的功率密度,记录实验件表面温升过程。

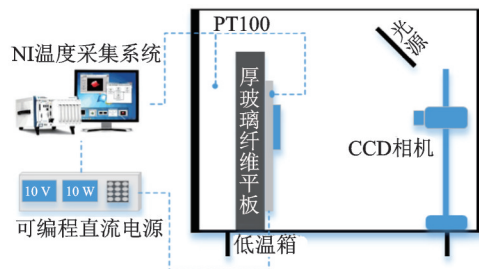


图 4 除冰性能实验装置

Fig.4 De-icing performance test device

在热力学性能实验装置的基础上,开展除冰性能测试。用注射器将去离子水(6 ml)吸入模具(模具大小为 3 cm×3 cm)中,在低温条件下结冰 1 h。待冻结完成后将实验件垂直放置,开启电源,设定电源通断路温度为 5℃,观察和记录表面温升和冰脱落过程。

具体试验工况总结如表 2 所示。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

序号	实验目的	环境温度/℃	表面温度/℃	加热密度/(W·cm ⁻²)	实验件
Case 1	防结冰性能测试	0	-15	—	构型 1
		0	-15	—	构型 3
Case 2	热力学性能测试	-15	-15	0.4	构型 1、构型 2、构型 3
		-15	-15	0.2~1.8	构型 1
Case 3	除冰性能测试	-15	-15	1.2	构型 1、构型 2、构型 3
		-15	-15	0.8,1.2,1.6	构型 1

2 实验结果与讨论

2.1 防结冰性能测试

如图 5 所示,对比测试了超疏水涂层和未处理表面防结冰性能。低温基板表面水滴经历过冷阶

段、再辉阶段、固化阶段;为了更好地比较延迟结冰时间,定义水滴接触低温表面瞬间为 0 时刻,水滴发生再辉时刻为 t_m ,冻结完成时刻为 t_f 。其中,结冰延迟时间,即过冷阶段保持时间,低温表面静置水滴保持液态。达到临界状态后,发生再辉现象,

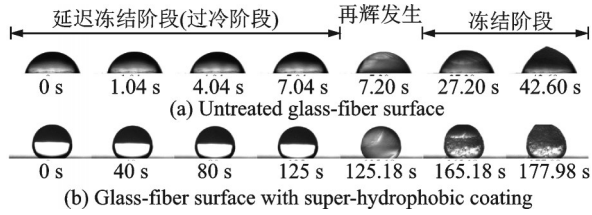


图5 低温表面静置水滴延迟结冰过程(水滴体积 $V=7\ \mu\text{l}$, 表面温度 $T_s=-15\ ^\circ\text{C}$)
Fig.5 Delayed freezing process of sessile droplets on cold surfaces (Droplets volume $V=7\ \mu\text{l}$ and surface temperature $T_s=-15\ ^\circ\text{C}$)

水滴内部形成均匀的冰水混合物,透光性急剧恶化。随即进入固化阶段,水滴内部的冰水相界面由底部逐渐向水滴顶部推移,直至完全冻结^[20]。

实验结果表明,未处理玻纤基板表面延迟结冰时间为 $(7\pm 0.5)\ \text{s}$,而玻纤基板超疏水涂层表面延迟结冰时间为 $(125\pm 7)\ \text{s}$,是未处理玻纤基板表面延迟结冰时间的18倍。这主要原因是超疏水表面提高了冰晶成核的能量势垒,以此增加延迟结冰时间,从而达到一定的防结冰效果。

根据经典成核理论,水滴成核需要克服吉布斯自由能成核势垒,成核过程是固液相界面非均相成核过程,而液滴在冷表面的相变成核能垒取决于液滴体积以及接触角,相应关系如下^[21]

$$\Delta G = \Delta G^H f(\theta) \quad (1)$$

$$\Delta G^H = \frac{16\pi\Omega\gamma^3}{3\Delta g^2} \quad (2)$$

$$f(\theta) = \frac{2 - 3\cos f(\theta) + \cos^3\theta}{4} \quad (3)$$

式中: ΔG 为非均相成核吉布斯自由能成核势垒, ΔG^H 为均相成核吉布斯自由能成核势垒, Ω 为单个水分子体积, γ 为固-液界面张力, Δg 为单个水分子成核能垒, $f(\theta)$ 为关于接触角的函数。通过对 $f(\theta)$ 分析可知, $f(\theta)$ 是一个关于 θ 的递增函数,即 ΔG 随 θ 增大而增大。因此,水滴延迟结冰时间增大。此外,超疏水表面冻结时间明显长于未处理表面,这与文献[22]的实验结果相一致。这是因为超疏水表面接触角较大,与低温基板接触面积较小,即换热面积减小,水滴从表面带走的冷量减少,同时水滴高度较大,导致水滴冻结时间显著增大。

2.2 热力学性能测试

为研究实验件热力学特性,在冷环境中分别研究不同构型和功率密度下的耦合组件表面温度变化情况。

首先对实验件的构型对传热影响的情况进行研究,如图6所示。当环境温度、功率密度(p)一定时,构型2所对应的实验件表面温升速率最大,构

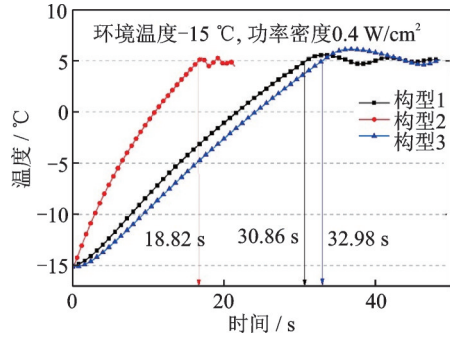


图6 实验件表面温度变化
Fig.6 Surface temperature evolution of test pieces

型1、构型3次之。对于多层多材料平面传热,可以简化看作是串联热阻(R_A)叠加,如图7所示(以构型1为例)。热阻定义如下

$$R_A = \frac{\delta}{\lambda} \quad (4)$$

式中: δ 为材料厚度, λ 为材料导热系数。对比构型2和构型3可知,随着材料厚度的增大,热阻明显增大,因此升温速率降低。构型1相对于构型2,其上表面增加了一层由环氧树脂和聚四氟乙烯构成的超疏水涂层,热阻增大,因此升温速率降低。以上结果表明从热力学性能考虑,电加热膜-复合材料一体化构型具有良好的导热性能和传热方向性。

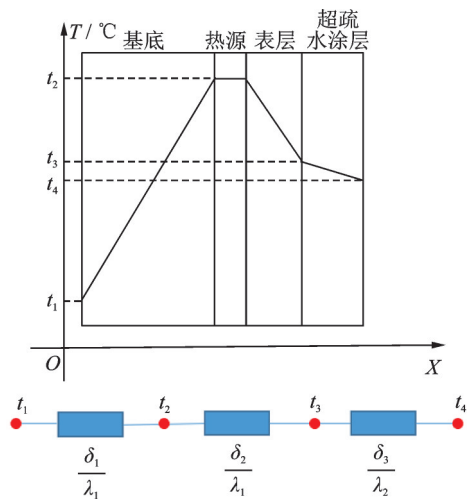


图7 构型1传热过程的热阻分析
Fig.7 Thermal resistance analysis of configuration 1 heat transfer process

针对构型1,开展不同功率密度下温度变化情况研究。从图8可以看出,当功率密度从 $0.2\ \text{W}/\text{cm}^2$ 逐渐升高到 $0.8\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,温升所用的时间下降明显,从 $0.8\ \text{W}/\text{cm}^2$ 逐渐升高到 $1.8\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,温升所用的时间下降幅度很小。考虑到本文增加了温度控制系统,导致能耗与时间和功率密度的乘积相关,表达式如下

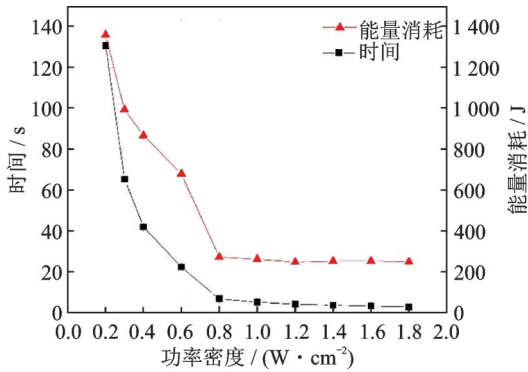


图 8 实验件表面温升至 5℃所需的时间和能量消耗

Fig.8 Time and energy consumption for the surface temperature up to 5℃

$$W = \rho \times t \times S \quad (5)$$

式中: W 为加热膜将构型 1 表面温度升至 5℃所消耗的电能, ρ 为加热的功率密度, S 为加热面积。当功率密度为 1.2 W/cm² 时, 能量消耗达到最低值。通过对比可知, 温升速率随着热流密度增大而增大, 但达到一定范围后趋势变缓, 存在一个极限; 在本文实验条件下, 选用功率密度为 1.2 W/cm² 能够满足较快的升温速率和较低的能耗, 为除冰实验中热流密度的选取提供依据。

2.3 除冰性能测试

虽然制备的超疏水具有很好的防结冰性能, 但在低温、高湿等恶劣条件下结冰无可避免, 这会使表层丧失超疏水性能, 具有优异的除冰性能就显得尤为重要。前面已经研究了不同构型的实验件在低温环境下的热力学性能, 在此基础上进一步研究他们的除冰性能。控制除冰时实验件表面温度为 5℃, 通过对电源编程, 当实验件表面温度大于等于 5℃ 时进行断电, 小于 5℃ 时通电, 通电时为直流恒压供电。因此电源在整个除冰过程中会有多次的通断电, 如图 9 所示, 统计所有温度小于 5℃ 的时间段 t_i , 以此计算加热总时长 t_{total} 。

$$t_{total} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (6)$$

通过 CCD 相机拍摄的照片来计算冰脱落时间, 如图 10 所示。

在功率密度相同的条件下, 不同构型的实验件传热效率不同, 由 2.2 节可知, 传热效率顺序为构型 2 > 构型 1 > 构型 3, 然而对于除冰的效果还需要用进一步的实验来验证。因此在功率密度不变的条件下, 对 3 种构型分别进行除冰实验, 结果如图 11 所示。可以看出, 在功率密度为 1.2 W/cm²、环境温度 -15℃ 的情况下, 构型 1、构型 2、构型 3 冰脱落的时间分别为 130.88、205.33、235.38 s, 加热的总时间分别为 30.32、47.09、45 s。构型 1 冰脱落的时间最短, 构型 2、构型 3 次之。相较于构型 3,

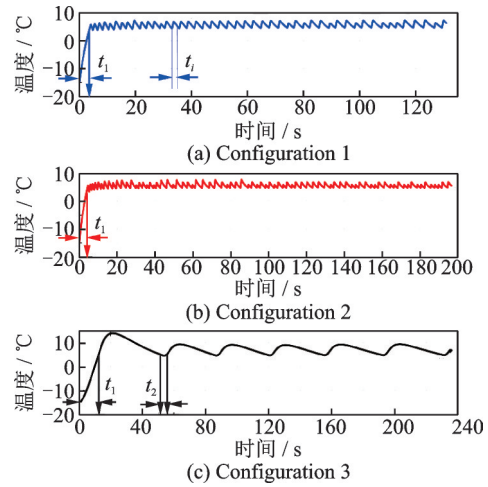


图 9 3 种构型表面温度变化

Fig.9 Surface temperature evolution of three types of configurations

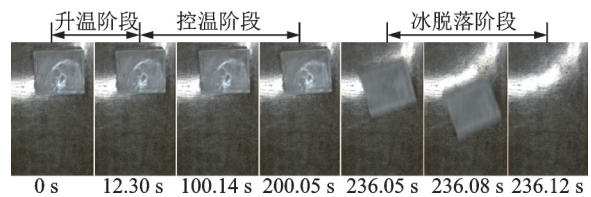


图 10 除冰过程

Fig.10 Process of de-icing

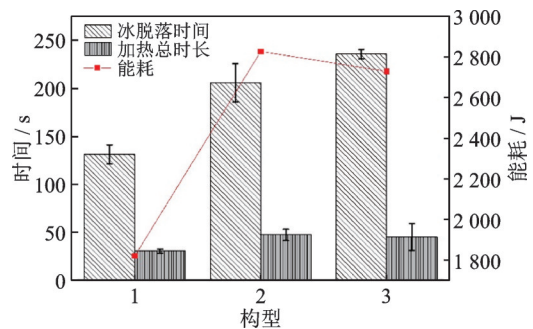


图 11 不同构型下冰脱落时间、加热总时长及能耗

Fig.11 Ice shedding time, total heating time and energy consumption under different configurations

构型 2 具有更快的温升速率, 但是在除冰时间上却是构型 3 更快。这是因为玻璃纤维基底导热性差, 构型 3 表面温度升高至 5℃ 时, 底层靠近加热膜位置的温度已经远高于 5℃, 这导致了即使系统断电, 由于复合材料上下表面较大的温差, 表面温度仍在升高。由于温冲效应, 导致构型 3 的除冰时间缩短, 表现出传热效率随构型的变化趋势与除冰效果随构型的变化趋势不完全相符。相较构型 2, 构型 1 节能约 35.6%, 相较构型 3, 构型 1 节能约 33.3%, 充分证明了本文设计的超疏水-电热一体化构型除冰时具备降低能耗的可行性。

通过 2.2 节实验结果可以发现, 功率密度是影响除冰效率的一个重要因素。针对超疏水-电加热膜-复合材料一体化构件不同功率密度下除冰情况

进行研究。如图12所示,3种功率密度下冰脱落的时间分别为147.78、130.88、94.50 s,加热的总时间分别为48.98、30.32、24.44 s。随着功率密度的升高除冰效果也在提高,但从能耗方面考虑,能耗随着功率密度的升高,存在着先下降再升高的过程。在本文的实验条件下,功率密度为 1.2 W/cm^2 的情况下是最节能的。

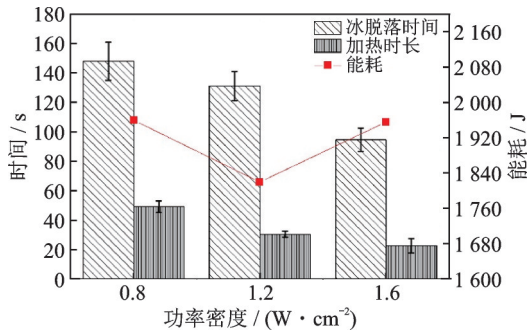


图12 不同功率密度下冰脱落时间、加热总时长及能耗
Fig.12 Ice shedding time, total heating time and energy consumption under different power densities

本节进行了覆冰-除冰-覆冰的循环除冰实验,以此来验证整个防/除冰系统的耐久性,实验结果如图13所示。在前6次循环中除冰时间相对稳定,除冰时间基本在 $(135 \pm 10) \text{ s}$,除冰性能维持在一个相对稳定的状态。从第6次循环开始,除冰时间开始变长到 $(200 \pm 15) \text{ s}$ 。从实验结果上来看,超疏水-电热一体化构型拥有较好的耐久性,能够维持一个相对稳定的除冰效果。后面除冰时间增加,主要原因是为了保证实验条件的稳定性,10次覆冰除冰实验是连续进行的,每次实验中间并未将构件取出完全烘干,因此会有残留的微小水滴导致实验区域的超疏水性能略微下降。从静态接触角的变化可以看出,10次循环除冰实验后,超疏水涂层的静态接触角仍能保持在 150° 以上,构件本身仍具有超疏水性能。

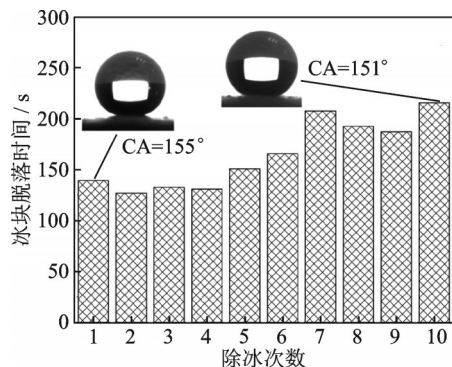


图13 循环除冰的除冰时间
Fig.13 De-icing time of cycling de-icing

3 结 论

对电加热膜和复合材料基底进行一体化设计,利用喷涂法制备出具有超疏水性能的表层结构,并对超疏水-电热-复合材料一体化构型的防/除冰性能进行实验研究。得到主要结论如下:

(1) 一体化构件接触角大于 155° ,滚动角均小于 5° ,具有优异的疏水性能,并且在低温条件下水滴延迟结冰时间是未处理复合材料表面的18倍,提高了防冰效果。

(2) 电加热膜-复合材料一体化构型可以有效地增强导热方向性,显著提高温升速率。温升速率会随着热流密度的增大而升高,在本文实验条件下, 1.2 W/cm^2 时温升过程能耗最低。

(3) 超疏水-电热-复合材料一体化构型显著缩短除冰时间,除冰总时长随热流密度的增加而减少,但在 1.2 W/cm^2 的功率密度下是最节能的。并且经过实验验证该一体化构型中的超疏水涂层具有良好的耐久性。相较于传统构型,超疏水-电热一体化构型节能 $30\% \sim 40\%$,超疏水-电热一体化防/除冰方法具有高效、低能耗可行性。

参考文献:

- [1] 周莉,徐浩军,龚胜科,等.飞机结冰特性及防除冰技术研究[J].中国安全科学学报,2010,20(6):105-110.
ZHOU Li, XU Haojun, GONG Shengke, et al. Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and deicing technology[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6): 105-110.
- [2] 陈宇,罗艳春,刘国庆,等.飞机结冰对飞行安全的影响[J].装备制造技术,2014(5):254-255,291.
CHEN Yu, LUO Yanchun, LIU Guoqing, et al. Aircraft icing effect on flight safety[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(5): 254-255, 291.
- [3] SHAKHATREH H, SAWALMEH A H, AL-FUQAHA A, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48572-48634.
- [4] 倪楠楠,卞凯,夏璐,等.先进复合材料在无人机上的应用[J].航空材料学报,2019,39:45-60.
NI Nannan, BIAN Kai, XIA Lu, et al. Application of advanced composite materials for UAV[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39: 45-60.
- [5] RICHARD H, ADRIANA E, MIKKEL C, et al. Experimental heat loads for electrothermal anti-icing and de-icing on UAVs[J]. Aerospace, 2021. DOI: 10.3390/aerospace8030083.
- [6] 路晶,史宇,张书畅,等.无人机航迹规划算法综述

- [J].航空计算技术,2022,52(4):131-134.
- LU Jing, SHI Yu, ZHANG Shuchang, et al. A review of UAV trajectory planning algorithms[J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(4): 131-134.
- [7] CHEN B, WANG L W. Simulation and research of aircraft deicing fluids deicing process[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121/122/123/124/125/126: 4695-4699.
- [8] 郭之强,郑梅,董威,等.表面凸起对机翼热气防冰腔内换热强化的影响[J].航空学报,2017,38(2):81-90.
- GUO Zhiqiang, ZHENG Mei, DONG Wei, et al. Influence of surface convex on heat transfer enhancement of wing hot air anti-icing system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 81-90.
- [9] CHENG J C, CHEN Y M. Investigation of fluid flow and heat transfer characteristics for a thermal anti-icing system of a high-altitude and long-endurance UAV [J]. Journal of Mechanics, 2021, 37: 467-483.
- [10] CHEN J, LIANG H, WU Y, et al. Experimental study on anti-icing performance of NS-DBD plasma actuator[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1889.
- [11] 田苗,宋慧敏,梁华,等.介质阻挡放电等离子体防除冰实验研究[J].化工学报,2019,70(11):4247-4256.
- TIAN Miao, SONG Huimin, LIANG Hua, et al. Experimental study on DBD discharge plasma for anti-icing and de-icing[J]. CIESC Journal, 2019, 70(11): 4247-4256.
- [12] DE PAUL D, DOLATABADI A. Effect of superhydrophobic coating on the anti-icing and deicing of an airfoil[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(2): 490-499.
- [13] ZENG D, LI Y, HUAN D, et al. Robust epoxy-modified superhydrophobic coating for aircraft anti-icing systems[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 628: 127377.
- [14] FALZON B G, ROBINSON P, FRENZ S, et al. Development and evaluation of a novel integrated anti-icing/de-icing technology for carbon fibre composite aerostructures using an electro-conductive textile[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 68: 323-335.
- [15] 郑海坤,常士楠,赵媛媛.超疏水/超润滑表面的防冰机理及其应用[J].化学进展,2017,29(1):102-118.
- ZHENG Haikun, CHANG Shinan, ZHAO Yuanyuan. Anti-icing & icephobic mechanism and applications of superhydrophobic/ultra slippery surface[J]. Progress in Chemistry, 2017, 29(1): 102-118.
- [16] KULINICH S A, FARHADI S, NOSE K, et al. Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent? [J]. Langmuir, 2011, 27(1): 25-29.
- [17] 马莉娅,熊联友,刘立强,等.用于碳纤维复合材料的电热除冰技术实验研究[J].航空学报,2012,33(1):54-61.
- MA Liya, XIONG Lianyou, LIU Liqiang, et al. Experimental study on electro-thermal deicing technique for carbon fiber composite[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 54-61.
- [18] ANTONINI C, INNOCENTI M, HORN T, et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1/2): 58-67.
- [19] 刘重洋,王正之,田甜,等.三维空速管电热防冰系统性能计算[J].航空计算技术,2019,49(5):54-58.
- LIU Chongyang, WANG Zhengzhi, TIAN Tian, et al. Performance calculation for three-dimensional pitot tube electrothermal anti-icing system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(5): 54-58.
- [20] 张旋,吴晓敏,闵敬春.冷壁上单个静止过冷液滴冻结过程的数值模拟[J].工程热物理学报,2018,39(1):159-164.
- ZHANG Xuan, WU Xiaomin, MIN Jingchun. Numerical simulation of freezing process of a sessile supercooled water droplet on a cold wall[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 159-164.
- [21] HUANG L, LIU Z, LIU Y, et al. Preparation and anti-frosting performance of super-hydrophobic surface based on copper foil[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(4): 432-439.
- [22] YUE X, LIU W, WANG Y. Freezing and melting of sessile droplet on micro- and hierarchically-structured silicon surfaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114185.

(编辑:胥橙庭)