

引文格式:王浩林,应宇轩,王丽,等.含CNT复合材料前缘结构制备及电热防/除冰性能研究[J].航空制造技术,2026,69(17):26010013.

WANG Haolin, YING Yuxuan, WANG Li, et al. Fabrication and electrothermal anti-icing/de-icing performance of composite leading edges with CNTs[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(17): 26010013.

含 CNT 复合材料前缘结构制备及电热防 / 除冰性能研究

王浩林¹,应宇轩¹,王 丽²,李江海²,王 桥³,吴一尘¹,王亚琦¹,吕卫帮⁴,汪万栋^{1,5},姚旭丹^{1,5}

(1. 西北工业大学航空学院,西安 710072;

2. 中航(成都)无人机系统股份有限公司,成都 611743;

3. 中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所,绵阳 621000;

4. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所,苏州 215123;

5. 强度与结构完整性全国重点实验室,西安 710072)

[摘要] 飞行器结冰严重影响飞行性能,威胁飞行安全。电热防/除冰系统因其结构简单、可设计性强、控制灵活等特点表现出巨大的应用潜力,且随着电热元件的发展,可以进行结构-功能一体化设计制造,进一步提高系统集成度。本文开发了基于喷涂碳纳米管(SCCNT)的电热元件,并将其与作为电绝缘层的玻璃纤维增强树脂整体嵌入碳纤维增强树脂基复合材料一体成型,获得了结构-防/除冰功能一体化的复合材料机翼前缘。设计并制备了两种不同铺层的结构,对其室温电热特性以及冰风洞环境下的防/除冰性能进行了研究,发现 SCCNT 与碳纤维共同组成的导电通路具有优异的稳定性;复合材料传热表现出明显的各向异性;通过优化设计可以实现过热保护、降低过热风险;相较于对称铺层,将电热层移至外表面可降低约 50% 的除冰时间及能耗。

关键词: 碳纳米管(CNT);喷涂;电热防/除冰;复合材料;冰风洞试验

中图分类号: V244.1+5; V25; TB33 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26010013

Fabrication and Electrothermal Anti-Icing/De-Icing Performance of Composite Leading Edges With CNTs

WANG Haolin¹, YING Yuxuan¹, WANG Li², LI Jianghai², WANG Qiao³, WU Yichen¹, WANG Yaqi¹,
LÜ Weibang⁴, WANG Wandong^{1,5}, YAO Xudan^{1,5}

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC (Chengdu) UAS CO., LTD., Chengdu 611743, China;

3. Low Speed Aerodynamic Institute, China Aerodynamics Research and Development Center (CARD),
Mianyang 621000, China;

4. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

5. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Aircraft icing severely threatens flight performance and poses safety hazards. Electrothermal anti-icing/de-icing system demonstrates considerable potential owing to their structural simplicity, design flexibility, and precise controllability, etc. With the development of heating elements, the system enables integrated structural-functional design and manufacturing, thereby enhancing the system integrity. This work developed heating elements based on spray coated carbon nanotubes (SCCNTs), which are co-embedded with glass fiber reinforced plastics serving as electrical insulating

收稿日期: 2026-01-12; 退修日期: 2026-02-04; 录用日期: 2026-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(52302457, 12272303)

通信作者: 姚旭丹, 教授, 博导, 研究方向为结构-功能一体化复合材料航空结构及电热防/除冰。

layers into carbon fiber reinforced polymer composite structures via a single-step curing. This process yields integrated composite leading edges with inherent anti-icing/de-icing functionality. Two structures with distinct ply sequences were designed and fabricated, with their electrothermal properties at ambient temperature and anti-icing/de-icing performance in an icing wind tunnel evaluated. Key findings reveal: (1) The conductive paths formed jointly by spray coated CNTs (SCCNT) and carbon fibers exhibit exceptional stability; (2) Heat transfer of the composite displays significant anisotropy; (3) Overheating risks can be mitigated through optimized thermal protection design; (4) Compared to the symmetric layout, strategic outward positioning of the heating layer can reduce the de-icing time and energy consumption by about 50%.

Keywords: Carbon nanotube; Spray coating; Electrothermal anti-icing/de-icing; Composites; Icing wind tunnel test

飞机在结冰气象条件下飞行时,由于水滴冻结或水汽凝结易在飞机的机翼、螺旋桨、发动机进气道、风挡等表面聚积成冰层^[1],破坏飞机的气动外形,使阻力增加、升力和临界攻角降低,飞机操纵性和稳定性下降,严重时可导致飞机失控造成灾难^[1-3]。发动机结冰会改变其气动外形、减小进气面积,使进入发动机的流量减小、推力降低。此外,冰层脱落、吞入易造成发动机叶片机械损伤,导致发动机停车甚至报废等^[4]。因此,为提高飞行安全,防/除冰系统至关重要。

目前,热气防/除冰系统应用最为广泛,原理为从压气机引气,由供气管路分配至防护部位,经热量交换破坏冰层与蒙皮间的黏附使冰层融化、脱落,实现结冰防护。但是,该方法热惯性大、热效率低,会增加质量和维护成本,且会导致发动机推力损失^[5]。此外,复合材料因其优异的比强度、比刚度以及耐腐蚀性等特点,在新一代飞行器中的用量逐渐增加^[6-9],在军用及民用飞机上的用量均已突破 50% (质量分数),如图 1 所示^[8-9]。然而,与传统金属材料相比,复合材料导热系数较小、耐

高温性能较差,如环氧树脂大部分长期使用温度不超过 150 ℃,使传统的热气防/除冰系统面临挑战^[8,10]。电热防/除冰系统响应速度快、精准可控,且随着电热元件性能的不断提升,可以将其与复合材料结构进行一体化设计制备,进一步提高系统集成度;此外,随着多电飞机、全电飞机的发展,使之在航空领域展现出巨大的应用潜力。

电热元件作为电热防/除冰系统中的关键部件,近年来国内外对其进行了深入研究^[11]。金属材料作为传统的电热元件被广泛应用于电热防/除冰^[12-13],然而金属与复合材料存在界面相容性差、热膨胀性能不匹配等问题,且面临质量及加热均匀性等挑战^[8,14]。碳纳米材料,如石墨烯^[15-19]、碳纳米管(Carbon nanotube, CNT)^[20-26]等因自身优异的电热性能、可设计性、轻质,且与纤维增强树脂基(Fibre reinforced polymer, FRP)复合材料具有良好的相容性等,受到了广泛关注。从湿法分散-过滤制得电加热膜^[17,19,26]、喷涂^[25,27]、将碳纳米材料分散至树脂基体^[16,18],到有序碳纳米材料^[20-24]

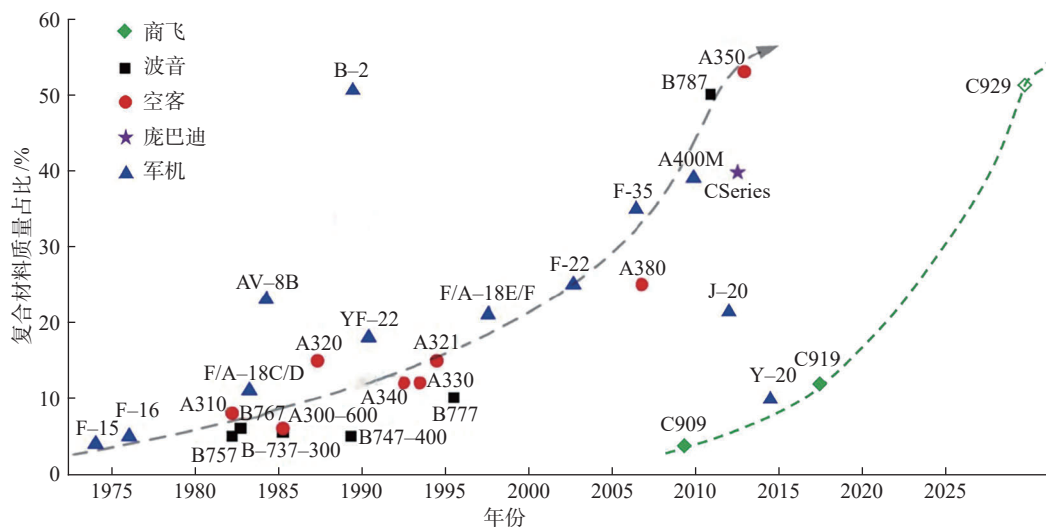


图 1 军/民机复合材料用量发展趋势^[8-9]

Fig.1 Trends for the use of composites in military and civil aircraft^[8-9]

以及原位生长^[15]的发展,进一步推动了碳纳米材料在电热防/除冰领域的应用。2022年,巴西航空和柯林斯宇航联合发布了基于CNT的结冰防护系统,应用于“飞鸿”300E原型机的垂直尾翼,经试飞验证了系统的可行性;并与金属电热系统进行了对比,结果表明,基于CNT的结冰防护系统在轻质、环保、寿命、能耗上具有优势,在系统级别上节省了约25%的能耗^[28]。

然而,目前发表的相关研究工作大多集中在材料级的电热元件及其室温电热性能研究,对于结构级的设计-制造一体化、过热保护、面向工程应用的大规模制备以及考虑服役环境的冰风洞试验研究相对缺乏。基于此,本文面向可大规模制备、具有曲面及双曲面适应性以及结构-功能一体化复合材料航空结构的需求,开发了基于喷涂碳纳米管(Spray coated carbon nanotube, SCCNT)的电热元件,将其嵌入FRP复合材料前缘结构,设计并制备了两种不同铺层,研究了此结构在室温下的电热性能、电阻热稳定性并进行了过热保护设计。通过冰风洞试验验证了其防/除冰能力以及铺层设计对防/除冰性能的影响,为后续工程应用提供了理论及技术支撑。

1 电热防/除冰复合材料前缘结构制备

采用中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所制备的碳纳米管水性分散液,通过Iwata喷涂系统将分散液喷涂到平纹编织石英纤维布上,喷涂距离为20 cm,如图2(a)所示。

在电热防/除冰过程中,电加热产生的热量通过热

传导的方式由电热层传递到结冰防护外表面,电热层与外表面距离越近,热量则会被更多地用于防/除冰,使防/除冰效率越高^[14,29-30]。此外,碳纤维在垂直于纤维方向电阻较大且可调^[20],可将其置于最外层与碳纳米管共同作为电热层。基于此,本文设计了两种铺层,将含有喷涂碳纳米管的纤维布作为电热层,与单向碳纤维增强树脂(Carbon fibre reinforced polymer, CFRP)预浸料(290 g/m^2)以及作为电绝缘层的平纹编织玻璃纤维增强树脂(Glass fibre reinforced polymer, GFRP)预浸料(39 g/m^2)进行铺层设计及一体化固化,制备成具有结构-功能一体化的复合材料多层结构,如图2(b)和(c)所示。

(1)SCCNT: 将喷涂有CNT的纤维布嵌入6层GFRP与12层CFRP预浸料之间,对称铺层;

(2)SCCNT-CF: 结合使用SCCNT纤维布与两层 90° 单向碳纤维作为电热元件,置于外表面,并采用4层GFRP作为绝缘层,与内侧10层CFRP一体化成型。

根据NACA0012翼型设计模具,所用模具为凹模,参考上述两种铺层方式进行铺层后,在热压罐内进行固化成型。固化后,在边缘处打孔,与翼型后端通过螺钉进行连接(图2(d)和(e)),进行冰风洞试验验证。

2 试验方法

2.1 室温电热性能及电阻热稳定性表征

将喷涂有碳纳米管的纤维布与环氧树脂在模具上进行铺贴,嵌入铜电极,并通过真空袋压法制备了具有不同SCCNT含量的电热元件,固化后测量其电阻值,

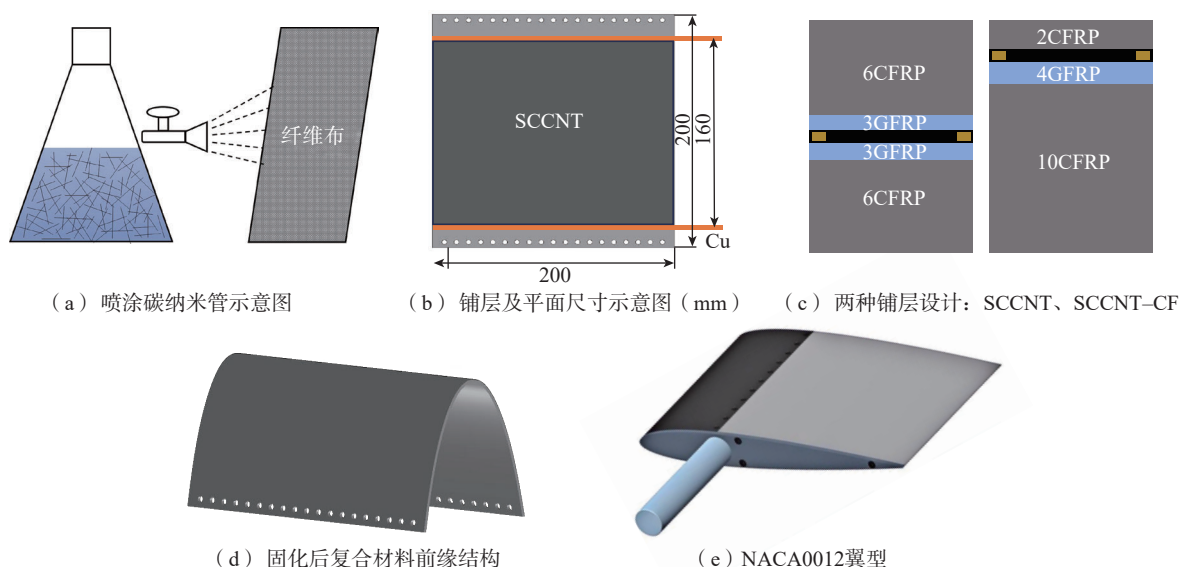


图2 喷涂碳纳米管电热元件及复合材料机翼前缘结构设计及制备

Fig.2 Design and fabrication of electro-thermal heating element based on spray coated carbon nanotubes, as well as the leading-edge composite aerostructures

以获得阻值随 SCCNT 面密度的变化曲线,可以为后续电热防/除冰复合材料前缘结构的阻值选取及制备提供支撑。

针对复合材料前缘结构的室温电热特性,使用直流稳压电源对两种不同铺层的试样分别加热,在试样内外表面对应位置粘贴多个热电偶,连接至温度仪(UT3232, UNI-T)进行温度测量,温度分布则通过红外热像仪(A655sc, FLIR)进行监测。同时,为评估该结构的电阻热稳定性,将其置于烘箱中(OMH180, Thermo)进行热循环,实时测量循环过程中的电阻,同时使用温度仪监测烘箱内温度,设置两者采样频率相同,即可获得电阻随温度的变化曲线。

此外,为降低过热风险,将热敏常闭开关串联进电加热电路,并进行了循环测试,实时监测复合材料结构表面温度,通过温度控制实现过热保护。

2.2 冰风洞试验

冰风洞试验在西北工业大学结冰风洞中完成,该风洞是一座小型低速回流式风洞,由风洞洞体、制冷系统、喷雾系统和控制系统等组成。其中,风洞洞体包括试验段、扩散段、收缩段、动力段和稳定段,试验段尺寸为 $700\text{ mm} \times 304\text{ mm} \times 500\text{ mm}^{[31]}$ 。本次试验选取了两组参数(表1),温度 T 为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速 V 为 $10\sim 15\text{ m/s}$,平均水滴容积直径(Medium volume diameter, MVD)为 $20\text{ }\mu\text{m}$,液态水含量(Liquid water content, LWC)为 1 g/m^3 ,攻角(Angle of attack, AOA)为 0° 。

冰风洞试验模型由金属支架与复合材料前缘结构组成,二者装配为一个剖面为 NACA0012 翼型的试验模型,如图2(e)所示。试验模型的测试区域为复合材料前缘部分,该区域展向长度为 200 mm ,沿前缘驻点向后的弧长为上下各 100 mm ,其中电加热区域为各 80 mm (图2(b)和(d)),铜电极沿展向延伸出来,如图3所示,通过导线连接直流稳压电源(32005A, VICTOR)。在模型前缘内壁粘贴热电偶(Thermocouple, TC)实时测量加热区域的温度,并在试验段观察窗处安装红外摄像机,实时监测前缘结构表面温度分布。

将装配好的模型安装在冰风洞试验段中(图3),启动风洞及制冷系统,待风速与温度达到设定值,且模型温度稳定后,分别进行防冰与除冰试验。

表1 冰风洞试验参数

Table 1 Parameters of icing wind tunnel tests

序号	$T/^{\circ}\text{C}$	$V/(\text{m/s})$	$\text{MVD}/\mu\text{m}$	$\text{LWC}/(\text{g/m}^3)$	$\text{AOA}/(^{\circ})$
1	-10	10	20	1	0
2	-10	15	20	1	0

(1)防冰试验。启动喷雾系统的同时接通电源,实时观测防冰效果、记录前缘温度,持续 10 min ,并记录防冰能耗。

(2)除冰试验。启动喷雾系统,结冰 15 min 后,接通电源,并通过摄像机与红外热像仪实时观察除冰情况,记录除冰时间与能耗。

3 结果与讨论

3.1 喷涂碳纳米管电阻特性

采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对喷涂碳纳米管形貌进行观察,如图4所示,喷涂均匀、质量较好。为建立喷涂碳纳米管 SCCNT 面密度与方阻阻值之间的关系,制备了具有不同面密度的电热元件,固化后测量其电阻值,如图4所示,获得了其方块电阻随 SCCNT 面密度的变化曲线。当 SCCNT 面密度低于 2 g/m^2 时,接近其渗透阈值,阻值变化显著。基于此,对于 SCCNT 铺层设计的电热防/除冰复合材料前缘

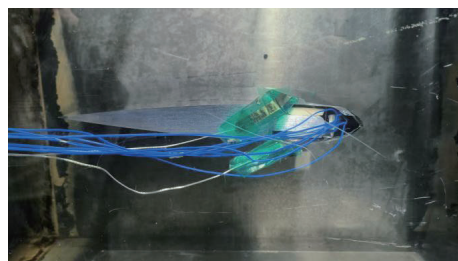


图3 冰风洞试验

Fig.3 Icing wind tunnel tests

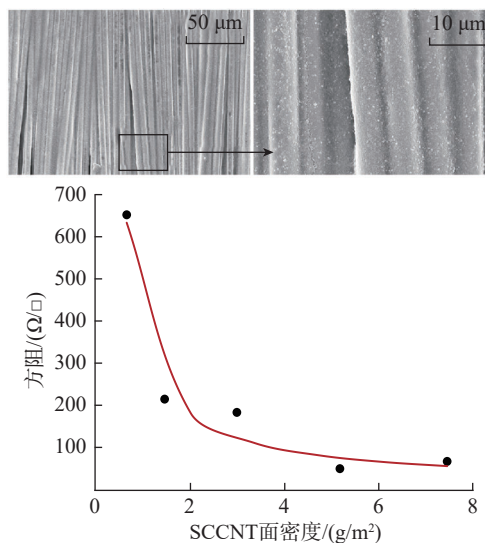


图4 电热元件方阻随 SCCNT 面密度变化曲线及喷涂有 CNT 的石英纤维布表面微观形貌 SEM 表征

Fig.4 Sheet resistance of the heating element as a function of the SCCNT areal density, and SEM images of the surface morphology of quartz fabric spray coated with CNTs

结构,选取 SCCNT 面密度为 3 g/m^2 ; SCCNT-CF 则定为 1.5 g/m^2 ,与两层 90° 的单向碳纤维 ($\sim 130\Omega/\square$ [20]) 并联作为电加热组件。

3.2 复合材料前缘结构电阻热稳定性

电阻稳定性对于电热防/除冰系统的长期服役至关重要。本节针对以上两种不同铺层设计的复合材料前缘结构的电阻随温度的变化特性进行了研究。将其从室温升至其固化温度 130°C ,再降温,重复循环 3 次,并记录该过程的电阻-温度变化。

SCCNT 与 SCCNT-CF 复合材料前缘结构固化后的阻值分别为 $\sim 150\Omega$ 和 $\sim 462\Omega$,质量均为 150 g 。前者阻值与设计阻值相当,而后者阻值远小于设计值。这是由于 SCCNT-CF 复合材料前缘结构在制备过程中,曲率较大的曲面前缘处的单向碳纤维在铺层及固化过程中因铺放偏差及树脂流动产生了纤维的移动、缝隙等面内缺陷,如图 5 (a) 所示,影响了导电路径的连续性。

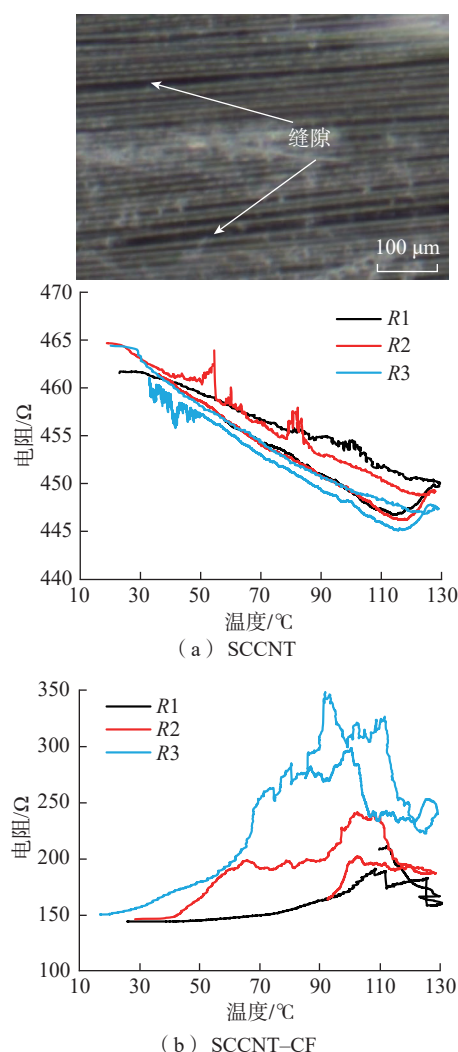


图 5 复合材料前缘结构电阻热稳定性

Fig.5 Resistance thermal stability of composite leading edges

3 次热循环过程中的电阻-温度变化曲线如图 5 所示, SCCNT 的电阻随温度升高而增大,即具有正温度系数 (Positive temperature coefficient, PTC) 效应。且在后续的第 2、3 次重复试验中电阻值随温度升高变化程度逐渐增大,即 PTC 强度逐渐增大。其中,第 3 次重复试验时,阻值增幅超过 100%,这会导致恒定电压下施加的功率随温度升高逐渐降低,严重影响加热稳定性。而 SCCNT-CF 则表现出负温度系数 (Negative temperature coefficient, NTC) 效应,即电阻值随着温度升高而降低。3 次重复循环的曲线重合度较高,阻值变化均小于 5%,表现出较好的电阻热稳定性。

这与电热元件本身的导电路径相关, SCCNT 的导电通路仅由喷涂碳纳米管组成,其中 CNT 随机分布,呈各向同性,升温时导致的热膨胀使部分导电通路被切断,阻值升高,即产生 PTC 效应;降温时导电路径随收缩而恢复,初始电阻随重复次数表现出良好的稳定性 (图 5 (b))。SCCNT-CF 中,各向同性的喷涂碳纳米管与 90° 单向碳纤维共同作为电热元件,为碳纤维沿纤维方向提供了稳定的导电网络,表现出 NTC 效应,降温后电阻可恢复至初始电阻的同时,室温至 130°C 的温度区间内,阻值变化较小 (图 5 (a)),具有更好的热稳定性。

3.3 复合材料前缘结构室温电热性能

基于上述复合材料前缘结构电阻特性及相似的热质量,对 SCCNT 与 SCCNT-CF 分别施加 75 V 和 120 V 的电压以实现相似功率的施加,持续 30 min ,以探究其室温电热性能。在前缘结构上 8 个不同位置通过热电偶实时监测其温度变化,温度-时间曲线以及升温、稳态及降温时温度分布如图 6 所示。由于碳纤维均为 90° 单向铺层,传热表现出明显的各向异性,沿纤维方向传热较快,垂直于纤维方向传热较慢;中间驻点区域温度最高、升温速率最快,不同区域表现出明显的温度梯度。SCCNT 电极处因接触电阻导致局部过热; SCCNT-CF 电热元件由喷涂碳纳米管与 90° 碳纤维并联组成,电极接触情况有所改善,未出现局部过热。但是,由于制备过程中压力与温度作用下的树脂流动、碳纤维产生了移动,出现了树脂富集区,电热元件整体加热均匀性受到了影响,如图 6 (b) 和 (d) 所示。

两种不同铺层的复合材料前缘结构的温度-时间曲线、内外侧表面温度变化以及初始 5 min 加热情况对比如图 7 所示,根据热平衡方程 [20] 可得

$$q_{\text{in}} = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

$$q_{\text{out}} = c \cdot m \cdot \frac{dT(t)}{dt} + q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} \quad (2)$$

$$q_{\text{in}} = q_{\text{out}} \quad (3)$$

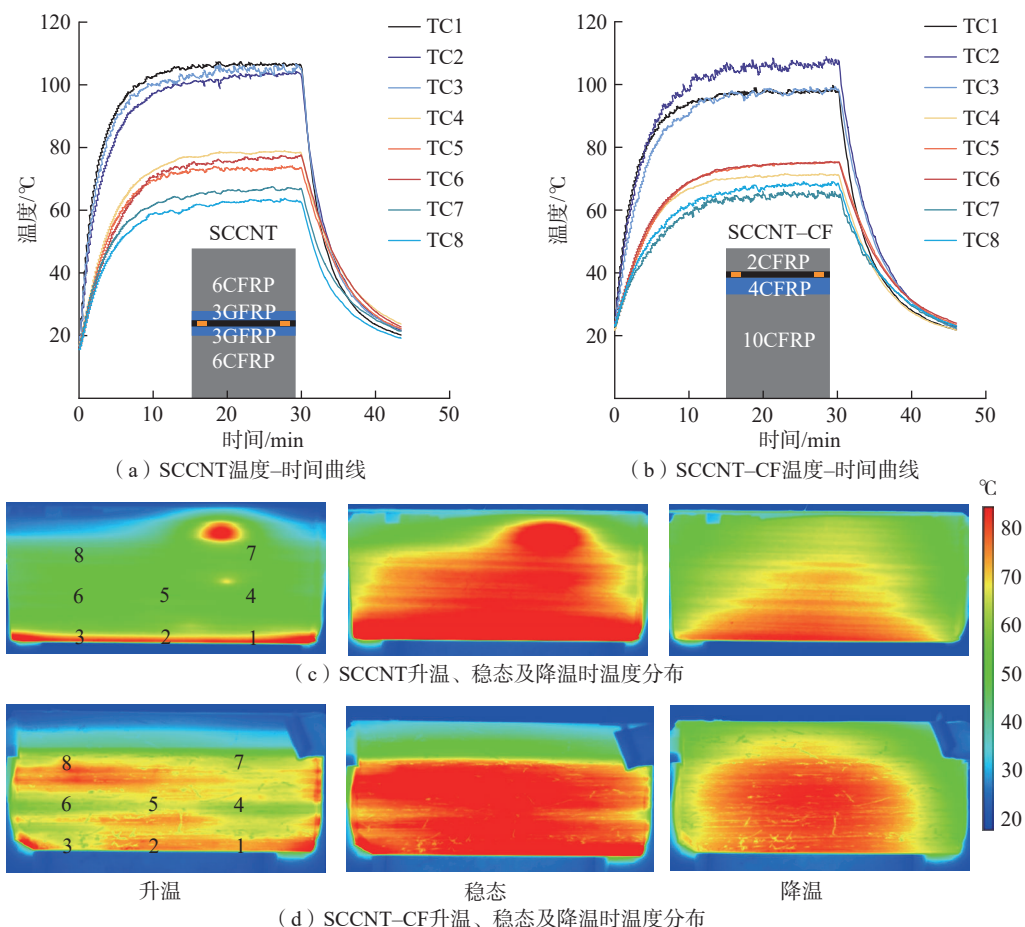


图6 SCCNT和SCCNT-CF复合材料前缘结构的室温电热性能

Fig.6 Electrothermal performance of SCCNT and SCCNT-CF leading-edge composite structures at room temperature

$$\frac{U^2}{R} = c \cdot m \cdot \frac{dT(t)}{dt} + kA \frac{T_s - T_\infty}{\Delta x} + hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

式中, q_{in} 和 q_{out} 分别为输入、输出功率; U 为施加的电压; R 、 c 、 m 、 T 、 t 、 A 、 T_s 、 T_∞ 、 Δx 、 k 、 h 、 ε 和 σ 分别为电阻、比热容、质量、温度、时间、加热面积、表面温度、环境温度、距离、热导率、对流换热系数、辐射系数和 Stefan-Boltzmann 常数。电阻加热产生的热量主要用于平衡热传导 q_{cond} 、热对流 q_{conv} 、热辐射 q_{rad} 消耗的热量以及复合材料结构被加热吸收的热量。其中温度较低时, 辐射热量可以忽略。室温静态环境下, h 可取空气自然对流换热系数。输入功率与温度近似线性相关。

SCCNT 的电热层在中间, 通电后热量需经过热传导至表面, 表面初始升温速率较低, 热传递至复合材料表面后, 升温速率升高, 如图 7 (a) 和 (d) 所示。因其对称的铺层设计, 内外侧表面在升降温以及稳态阶段均表现出相似的特性, 如图 7 (b) 和 (c) 所示。SCCNT-CF 的电热元件在最外层, 升温速率在电源开启初期最高, 而随着加热的持续进行, 热传导至底部复合材料消

耗一部分热量, 热质量增加, 升温速率减缓, 因非对称铺层, 升温过程中外表面比内表面表现出更高的升温速率和表面温度; 而达到稳态后, 因热平衡, 表现出相近的表面温度; 降温时外表面则具有更高的降温速率和更低的表面温度, 如图 7 (c) 所示。

此外, 在建立了结构-功能一体化的防/除冰复合材料前缘结构后, 为了防止电热防/除冰过程中对复合材料结构产生过热风险, 采取了过热保护措施, 即将热敏常闭开关串联进电加热电路, 并进行了循环测试, 所得温度-时间曲线如图 8 所示。结果显示, 该方法能有效地提供过热保护, 其效果与热敏开关的触发温度与自身的灵敏性紧密相关。

3.4 电热防/除冰性能冰风洞试验

将上述复合材料前缘结构装配到模型上, 整体为 NACA0012 翼型(图 2), 装配至西北工业大学结冰风洞内进行试验。结冰工况见表 1, 温度为 -10°C , 液态水含量为 1 g/m^3 , 平均水滴容积直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 攻角为 0° , 风速 SCCNT 为 10 m/s ; SCCNT-CF 选取 10 m/s 和 15 m/s 两组参数。分别进行防冰和除冰测试, 结合使用温度仪、

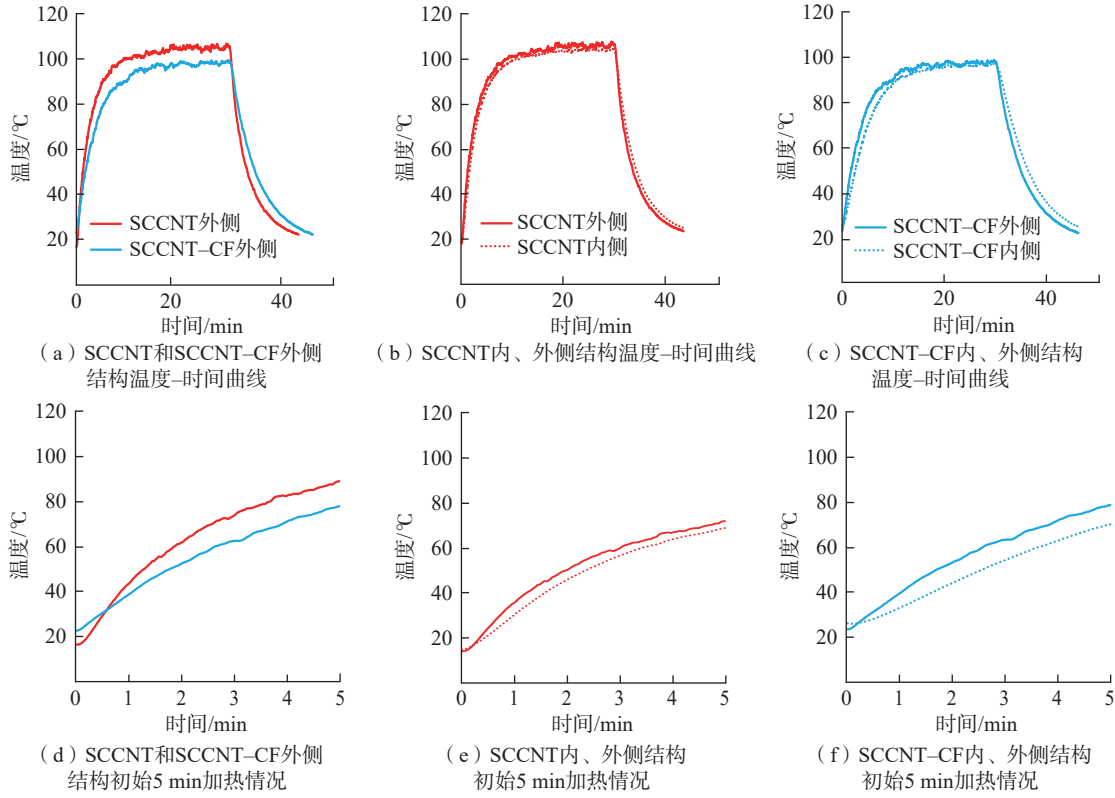


图7 两种复合材料前缘结构温度-时间曲线、内外侧表面温度变化以及对应的初始5 min加热情况

Fig.7 Temperature-time curves, comparison of the inner and outer surfaces and corresponding heating performance in the initial five minutes of the two leading-edge composite structures

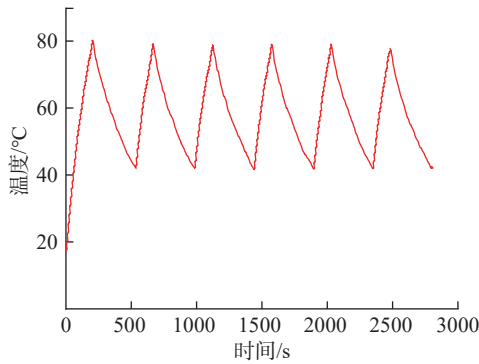


图8 热敏开关保护下的温度-时间曲线

Fig.8 Temperature-time curve with thermal switch protection

红外热像仪与相机进行记录,其中,连接温度仪的6组热电偶粘贴在前缘结构的内表面,如图3所示,其中TC1-3在上表面,TC4-6在下表面。

3种工况下的防冰结果如图9所示,SCCNT和SCCNT-CF的施加电压分别为100 V和200 V,对应的初始功率分别为66.7 W和86.6 W,功率密度为2.1 kW/m²和2.7 kW/m²。10 min的防冰测试过程中,前缘结构的温度-时间曲线表明温度均保持在0℃以上,未出现结冰(图9(c))。

根据能量守恒方程^[32],可计算防冰(Anti-icing, AI)

所需热流密度。

$$\dot{q}_{AI} = \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{evap} - \dot{q}_{kin} - \dot{q}_{aero} \quad (5)$$

式中, $\dot{q}_{sens}$ 为显热加热,包括冰的融化潜热(L_m),以及加热至表面温度所需要的热量

$$\dot{q}_{sens} = \dot{m}_{local} [\Delta T((1-f)c_{liq} + fc_{ice}) + fL_m] \quad (6)$$

$$\dot{q}_{conv} = h_0(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

式中, $\dot{q}_{conv}$ 为对流换热损失; h_0 为局部传热系数; f 为结冰系数; $\dot{m}_{local}$ 为单位面积的过冷液滴撞击量; c_{liq} 和 c_{ice} 分别为液态水和冰的比热容。

$$\dot{q}_{evap} = 0.7h_0L_e \frac{R_h(e_\infty - e_s)}{p_\infty c_{p,air}} \quad (8)$$

式中, $\dot{q}_{evap}$ 为蒸发热损失; L_e 为蒸发潜热; p_∞ 为空气压力; $c_{p,air}$ 为空气的等压比热容; e_∞ 和 e_s 分别为来流与壁面温度下的饱和水蒸气分压。对于干态防冰,即完全蒸发式防冰,需对表面进行充分加热,使撞击到表面的过冷水完全蒸发;而对于湿态防冰,仅发生部分蒸发,其蒸发量不仅取决于表面温度,还受到饱和压力 e 及相对湿度 R_h 的影响。

$$\dot{q}_{kin} = \dot{m}_{local} \frac{u_\infty^2}{2} \quad (9)$$

式中, $\dot{q}_{\text{kin}}$ 为动能加热; u_{∞}^2 为撞击速度。

$$\dot{q}_{\text{aero}} = R_c h_0 \frac{u_{\infty}^2}{2c_{p,\text{air}}} \quad (10)$$

式中, $\dot{q}_{\text{aero}}$ 为气动加热; R_c 为边界恢复因子。

在本研究中,相似的结冰工况下,防冰所需热流密度相当,3种工况下均实现了湿态防冰,同样持续10 min 防冰的能耗均在 0.03 kWh 左右,见表 2。

除冰测试前,先启动喷雾系统进行结冰 15 min 分钟,后分别施加 150 V 和 200 V 的直流电压进行除冰。除冰试验结果如图 10 所示,因热电偶布置在内表面,与 SCCNT-CF 的加热层距离更远,如图 10 (a)~(c) 所

示,电源开启后相较于对称铺层的 SCCNT 需要更长的时间通过热传导到达该位置,再次证明了铺层设计的重要性。此外,如图 10 (d) 红外热像仪图像所示,0° 攻角、低风速环境下,积冰去除以融化-蒸发为主导,去除后,因热质量降低,前缘结构内表面热电偶记录的温度-时间曲线中的升温速率有所提高。电阻加热作用下,表面温度升高,界面冰层融化,3 种工况下均在 3 min 内实现了除冰。

除冰时,因冰层覆盖在外表面,对流换热、蒸发、动能及气动加热可忽略,基于此,上述能量守恒方程可进行简化,除冰(De-icing, DI)所需热流密度取决于破坏冰层与前缘表面黏附力所需融化与加热的积冰质量^[32]。

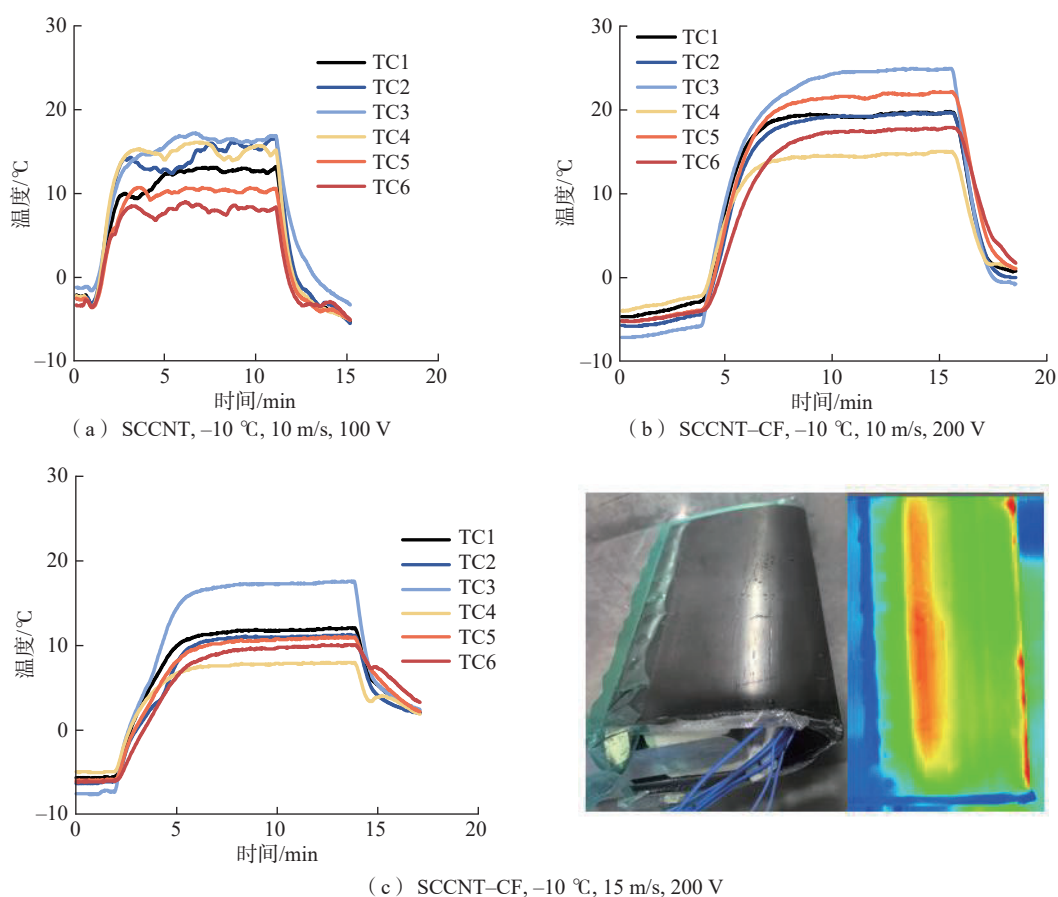


图 9 SCCNT 与 SCCNT-CF 的防冰温度-时间曲线及摄像机与红外热像仪图像

Fig.9 Anti-icing temperature-time curves of SCCNT and SCCNT-CF, with images from digital and infrared cameras

表 2 冰风洞环境下的防/除冰试验结果

Table 2 Results of anti-icing/de-icing tests in the icing wind tunnel

前缘结构	风速/(m/s)	温度/°C	防冰电压/V	防冰能耗(10 min)/kWh	除冰电压/V	除冰时间/s	除冰能耗/kWh
SCCNT	10	-10	100	0.032	150	133	0.016
SCCNT-CF	10	-10	200	0.034	200	62	0.007
	15	-10	200	0.028	200	160	0.013

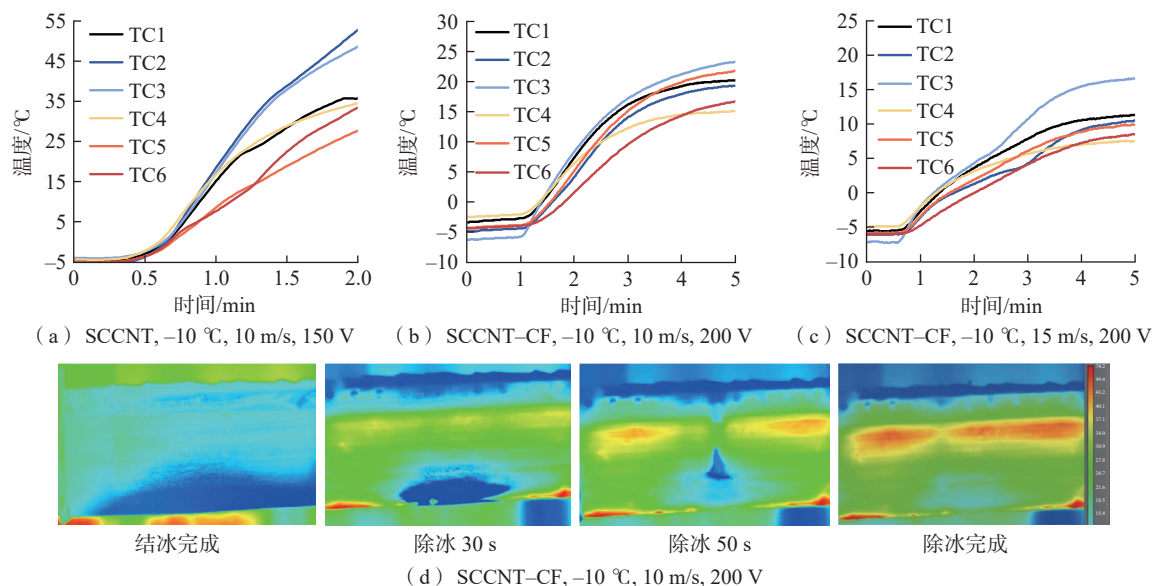


图 10 SCCNT 与 SCCNT-CF 的除冰温度-时间曲线及红外热像仪记录过程

Fig.10 Temperature-time curves during the de-icing of SCCNT and SCCNT-CF, as well as the images recorded by the infrared camera

$$\dot{q}_{DI} = \dot{q}_{sens} = \frac{\dot{m}_{ice}}{t} (\Delta T_{c_{ice}} + L_m) \quad (11)$$

SCCNT 因电热层在中间,热量需经热传导到达结冰防护外表面,同样结冰环境下,除冰效率低于电热层在外表面的 SCCNT-CF。如表 2 所示,后者除冰时间降低了约 50%,热流密度相当的情况下,能耗亦降低了约 50%。这说明在复合材料电热防/除冰系统中,将电热层适当外移,有助于减少热传导带来的热损耗,提升电热防/除冰系统的快速响应能力,降低能耗。

4 结论

开发了基于喷涂碳纳米管的电加热组件,并将其与 GFRP 电绝缘层以及 CFRP 复合材料结构一体成型,获得了结构-防/除冰功能一体化的复合材料前缘。开展了针对两种不同铺层设计结构的电阻稳定性、电热性能以及冰风洞环境下的防/除冰特性试验研究,得到以下主要结论。

(1) 基于喷涂碳纳米管的电加热组件可以作为电热防/除冰复合材料结构的电热层,但其稳定性仍需进一步加强,其中,与碳纤维共同组成导电通路可以显著改善其稳定性。

(2) 复合材料结构传热表现出明显的各向异性,通过串联热敏常闭开关,可以实现过热保护、降低过热风险。

(3) 防冰所需能耗远高于除冰能耗,电热层的铺层位置对传热特性有显著影响,适当将其外移,即靠近防/除冰外表面,有助于降低厚度方向热传导的影响、提高

防/除冰效率、降低能耗。

致谢

感谢陈志鹏博士生与李崇阳硕士生在冰风洞试验中提供的帮助。

参考文献

- [1] 林贵平. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [2] LIN Guiping. Aircraft icing and anti-icing technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016.
- [3] REEHORST A, CHUNG J, POTAPCZUK M, et al. Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(2): 253-259.
- [4] 肖春华, 桂业伟, 林贵平. 飞机电热除冰的研究进展与展望[J]. 科技导报, 2011, 29(18): 69-73.
- [5] XIAO Chunhua, GUI Yewei, LIN Guiping. A Review of Studies of Aircraft Electrothermal De-icing[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(18): 69-73.
- [6] 马辉. 发动机复合材料导向叶片防冰性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [7] MA Hui. Performance investigation on anti-icer of composite engine inlet vane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [8] 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.
- [9] 张超, 曹勇, 赵振强, 等. 树脂基复合材料在民用航空发动机

中的应用与关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(2): 1–18.

ZHANG Chao, CAO Yong, ZHAO Zhenqiang, et al. Applications and key challenges of polymer composites in civil aero-engines: State-of-art review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(2): 1–18.

[7] LEWIS S J. The use of carbon fibre composites on military aircraft[J]. Composites Manufacturing, 1994, 5(2): 95–103.

[8] 应宇轩, 逯晗斗, 杨秋明, 等. 飞机电热防 / 除冰技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2025: 1–23.

YING Yuxuan, LU Handou, YANG Qiuming, et al. Advances in electrothermal anti-icing and de-icing techniques for aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 44(0): 1–24 (in Chinese).

[9] WEI T. Modelling the behaviour of composite structures under impact and crush loading[D]. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University Belfast, 2016

[10] 马辉, 张大林, 孟繁鑫, 等. 复合材料部件电加热防冰性能试验[J]. 航空学报, 2013, 34(8): 1846–1853.

MA Hui, ZHANG Dalin, MENG Fanxin, et al. Experiment of electro-thermal anti-icing on a composite assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1846–1853.

[11] GAO H, ZHOU Y Q, MA J Y, et al. Recent advancements in electro-thermal anti-/ de-icing materials[J]. RSC Advances, 2025, 15(22): 17102–17115.

[12] JI Z M, HUANG X B, SHENG H Q, et al. Cell membrane-inspired self-assembly corrosion resistant liquid metal composite coating with photothermal/electrothermal anti-icing/de-icing performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 191: 108464.

[13] DING Y Y, LI Z M, REN Z F, et al. Design and performance research on metal-sprayed electrical heating films for aircraft wing anti-icing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2842(1): 012073.

[14] CHEN J C, BAI Y, ZHAO Z H, et al. A wave-transparent electrothermal sandwich composite for high-efficient anti-icing/de-icing[J]. Materials & Design, 2024, 246: 113320.

[15] YUAN H, ZHANG H, HUANG K W, et al. Dual-emitter graphene glass fiber fabric for radiant heating[J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 2577–2584.

[16] REDONDO O, PROLONGO S G, CAMPO M, et al. Anti-icing and de-icing coatings based Joule's heating of graphene nanoplatelets[J]. Composites Science and Technology, 2018, 164: 65–73.

[17] ZHANG Q Q, YU Y K, YANG K C, et al. Mechanically robust and electrically conductive graphene-paper/glass-fibers/epoxy composites for stimuli-responsive sensors and Joule heating deicers[J]. Carbon, 2017, 124: 296–307.

[18] COLLADO I, VÁZQUEZ-LÓPEZ A, JIMÉNEZ-SUÁREZ A, et al. Multifunctional sequential dual curing electroactive graphene Nanocomposites: Self-heating, de-icing and *in-situ* curing[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 307: 112911.

[19] VOLMAN V, ZHU Y, RAJI A O, et al. Radio-frequency-transparent, electrically conductive graphene nanoribbon thin films as deicing heating layers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(1): 298–304.

[20] YAO X D, HAWKINS S C, FALZON B G. An advanced anti-

icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs[J]. Carbon, 2018, 136: 130–138.

[21] YAO X, HAWKINS S C, FALZON B G. A repairable carbon nanotube web-based electro-thermal heater and damage sensor for aerospace applications[J]. The Aeronautical Journal, 2021, 125(1292): 1833–1843.

[22] YAO X D, FALZON B G, HAWKINS S C. Orthotropic electro-thermal behaviour of highly-aligned carbon nanotube web based composites[J]. Composites Science and Technology, 2019, 170: 157–164.

[23] YAO X, FALZON B G, HAWKINS S C, et al. Aligned carbon nanotube webs embedded in a composite laminate: A route towards a highly tunable electro-thermal system[J]. Carbon, 2018, 129: 486–494.

[24] XU X K, ZHANG Y, JIANG J, et al. *In-situ* curing of glass fiber reinforced polymer composites *via* resistive heating of carbon nanotube films[J]. Composites Science and Technology, 2017, 149: 20–27.

[25] DENG L C, WANG Z W, NIU Y X, et al. CNTs-induced superhydrophobic and photothermal coating with long-term durability and self-replenishing property for anti-icing/de-icing[J]. Composites Science and Technology, 2024, 245: 110347.

[26] CHU H T, ZHANG Z C, LIU Y J, et al. Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing[J]. Carbon, 2014, 66: 154–163.

[27] YAO X D, RAINE T P, LIU M F, et al. Effect of graphene nanoplatelets on the mechanical and gas barrier properties of woven carbon fibre/epoxy composites[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(35): 19538–19551.

[28] Stubbins G. Embraer, Collins Aerospace demonstrate CNT-based ice protection system[EB]. (2022–07–25). <https://www.compositesworld.com/news/embraer-collins-aerospace-demonstrate-cnt-based-ice-protection-system>.

[29] JI Z M, HUANG X B, SHENG H Q, et al. Neuron-like thermal silica bridge between boron nitride nanosheets with hard-soft composite structure to enhance thermal conductivity and anti-icing properties on CFRP[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 175: 107806.

[30] GUO X F, YANG Q, ZHENG H R, et al. Integrated composite electrothermal de-icing system based on ultra-thin flexible heating film[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121723.

[31] 刘欣乐, 李文丰, 许德辰, 等. 超疏水电热复合表面防冰机理与特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2025, 39(2): 75–85.

LIU Xinle, LI Wenfeng, XU Decheng, et al. Experimental investigation on anti-icing mechanism and characteristics of superhydrophobic electrothermal coupled surface[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2025, 39(2): 75–85.

[32] MEIER O, SCHOLZ D. A Handbook Method for the Estimation of Power Requirements for Electrical De-Icing Systems. DLRK, Hamburg, 31 August-02 September 2010.

(责编 晓月)