

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.017

复材加热组件一体成型制备及其热/力学性能研究

刘建民¹, 黄寅良¹, 朱程香¹, 朱春玲^{1,2}

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 针对玻纤/环氧复合材料, 采用平板硫化机热压成型制备工艺, 将预封装的石墨烯加热元件内嵌于复材夹层中, 从而制备得到复材加热组件。实验证明, 该制备方法对石墨烯复合材料的阻值及发热影响较小, 保证了石墨烯加热元件的防/除冰效率。基于复材加热组件, 进行了热/力学性能实验和低温除冰实验。实验结果表明, 复材加热组件的温升速率随热流密度的增加而增大, 并且铺层位置对复材加热组件的温升具有较大影响。在冷环境除冰实验中, 环境温度为一 20 °C, 热流密度为 0.3 W/cm² 时, 相较于传统电加热组件, 复材加热组件的除冰时间大幅减小, 能耗减少约 30%, 为进一步制备复材加热机翼奠定了基础。

关键词: 飞机防/除冰; 复材加热组件; 一体成型; 热/力学特性; 除冰实验

中图分类号: V261.97

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)03-0515-10

Integrated Molding and Thermal / Mechanical Properties of Composite Heating Components

LIU Jianmin¹, HUANG Yinliang¹, ZHU Chengxiang¹, ZHU Chunling^{1,2}

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For glass fiber/epoxy composite materials, the pre-encapsulated graphene heating element is embedded in the interlayer of composite material by using the hot-pressing preparation process of flat plate vulcanizer, so as to prepare the composite heating component. Experiments show that the preparation method has little effect on the resistance and heating performance of graphene materials, thus ensuring the anti-icing/de-icing efficiency of graphene heating elements. Then, based on the composite heating components, thermal/mechanical experiments and de-icing performance experiments are carried out. The test results show that the temperature growth rate of composite heating components increases with the increase of heat flux, and the position of layer has a great influence on the temperature rise of composite heating components. In the cold environment de-icing experiment, when the ambient temperature is -20 °C and the heat flow density is 0.3 W/cm², compared with the traditional electric heating component, the de-icing time of the composite heating component is greatly reduced, and the energy consumption is reduced by about 30%, which lays a foundation for the further preparation of the composite heating wing.

Key words: aircraft anti-icing/de-icing; composite heating component; integrated molding; thermal/mechanical property; deicing experiment

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11832012)。

收稿日期: 2022-08-05; **修订日期:** 2023-03-17

通信作者: 朱程香, 女, 副教授, E-mail: cxzhu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘建民, 黄寅良, 朱程香, 等. 复材加热组件一体成型制备及其热/力学性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 515-524. LIU Jianmin, HUANG Yinliang, ZHU Chengxiang, et al. Integrated molding and thermal / mechanical properties of composite heating components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 515-524.

在过冷云层条件下,空气中通常会含有大量低于冰点温度的液态水滴,这种能够在负温情况下仍然保持液态的水滴称为过冷水滴^[1]。在冰点温度,当飞机飞入该云层时,空气中的过冷水滴撞击到飞机迎风面后,会在迎风面上迅速结冰,从而导致飞机表面的某些部位冰层聚集,该现象被称为飞机结冰^[2]。结冰会影响飞机的气动特性,导致飞机的升阻比下降,严重时会导致飞机失控而坠毁^[3-7],因此,需要飞机防/除冰系统来保证飞行安全。

同其他的单一均质金属材料相比,复合材料具有许多优越的性能,比如重量轻、耐热、抗冲击、抗震、抗裂、防腐以及绝缘等,因此,复合材料在航空航天领域的应用越来越广泛^[8-10]。国外从20世纪80年代便开始推动复合材料在飞机结构上的应用,如波音787中的复合材料用量达50%,空客A320XWB中达52%^[11]。同时,中国商飞也逐渐增加复合材料在民用飞机中的用量,C919复合材料用量占比达10%,CRJ929达51%。经过多年的发展,目前航空复材部件的制备技术与加工方法已经相当成熟,航空复合材料主要采用的基体为环氧、双马、聚酰亚胺;增强纤维主要包括碳纤维、玻璃纤维等^[12]。在成型技术方面,主要采用的是热熔预浸料、热压罐、热压机和低温固化低压成型等,并且形成了相配套的无损检查及修理技术^[13]。航空复合材料的用量已经成为飞机先进性的一个重要标志^[14]。

传统的电热防/除冰系统加热组件通常是利用绝缘材料将金属加热元件进行封装,然后将其贴于防/除冰区域的内表面^[15]。石墨烯材料因其优良的导电及导热性能,同时相较于金属具有良好的机械性能,因而可代替金属作为加热芯材^[16]。对于复材机翼,由于一般的复合材料及基体均为绝热材料,利用传统加热组件会使得防护表面的温升速率减小,导致除冰时间增加。将加热元件嵌入到复材机翼中,可能会造成复合材料层板之间发生断裂,削弱蒙皮的强度^[17]。韩辰橙^[18]通过手糊成型和真空负压成型技术制备防/除冰复合材料层合板。刘亚沣等^[19]通过实验和有限元方法研究了复合材料层合板间隙缺陷的拉伸性能。

本文采用平板硫化机热压成型制备工艺,制备得到了复材加热组件。实验证明该制备方法对石墨烯材料的阻值及发热影响较小,保证了石墨烯加热元件的防/除冰效率。对复材加热组件进行了热/力学实验和低温除冰实验,验证了将石墨烯加热元件内嵌于复材夹层中的可行性以及复材加热组件在除冰方面的优越性。

1 树脂基体对石墨烯加热元件的影响

为制备石墨烯复材加热组件,首先需要研究玻纤/环氧树脂材料中的树脂基体对石墨烯材料是否具有影响,以便了解石墨烯复合材料是否可以直接嵌入到玻纤/环氧夹层中。石墨烯加热元件的阻值和发热特性是研究电热防除冰系统的重要属性,因此,本节首先研究了树脂基体对石墨烯材料阻值和发热的影响。

1.1 石墨烯加热元件制备

在尺寸为100 mm×80 mm的矩形石墨烯两端布上刷好银浆的铜带作为电极,为保证电极与石墨烯材料之间的接触良好,在两侧用聚酰亚胺薄膜对铜电极带进行封装,保留中间位置的石墨烯材料未封装,未封装部分的尺寸为70 mm×80 mm,实验件如图1所示。

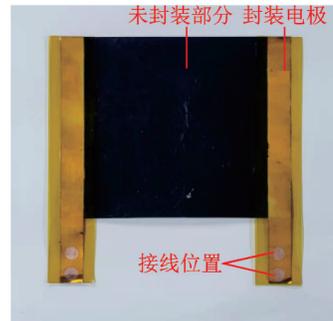


图1 石墨烯加热元件

Fig1 Graphene heating element

1.2 树脂基体对石墨烯加热元件阻值的影响

将实验件分别置于E51环氧树脂和DW-3环氧树脂结构胶中,待其完全浸透后,分别放置在烘箱中固化,两种环氧树脂固化条件如表1所示。实验件浸胶前后阻值变化如表2所示。

通过3组实验对比可得,两种树脂基体对石墨烯复合材料的阻值均有较大的影响,封装后的石墨烯加热元件平均阻值增加约20%~30%。

表1 环氧树脂固化条件

Table 1 Curing conditions of epoxy resins

| 编号 | 环氧树脂 | 固化温度/℃ | 固化时间/h |
|----|--------------|--------|--------|
| 1 | E51 环氧树脂 | 80 | 1 |
| | | 100 | 2 |
| 2 | DW-3 环氧树脂结构胶 | 100 | 2 |

1.3 树脂基体对石墨烯加热元件温升的影响

搭建如图2所示的热学性能测试实验台,在保证实验件封装前后施加功率一致的情况下,利用红外热成像仪测量实验件封装前后表面的平均温升特性曲线。引入热流密度 q 概念,即单位时间通过

表 2 环氧树脂对加热元件阻值影响

Table 2 Effect of epoxy resin on resistance value of heating element

| 实验件编号 | 封装材料 | 封装前电阻/ Ω | 封装后电阻/ Ω | 电阻变化百分比/% |
|-------|------|-----------------|-----------------|-----------|
| 1 | E51 | 2.81 | 3.39 | 20.6 |
| 2 | E51 | 2.78 | 3.4 | 22.3 |
| 3 | E51 | 2.68 | 3.16 | 17.9 |
| 4 | DW-3 | 2.79 | 3.66 | 31.2 |
| 5 | DW-3 | 2.74 | 3.71 | 35.4 |
| 6 | DW-3 | 2.74 | 3.43 | 25.2 |

单位面积的导热量。利用热流密度乘以加热元件面积可以大致估算得到电源所施加的功率,即

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$

式中: q 表示热流密度,单位为 W/m^2 ; Φ 表示导热量,即单位时间内传递的热量,单位为 W ;A表示加热元件面积。

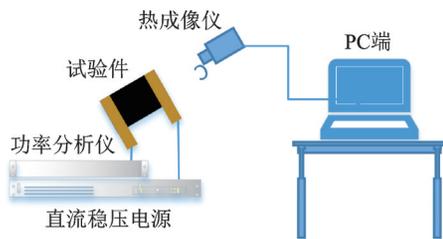


图 2 热学性能测试实验台

Fig.2 Test bench of thermal performance

实验均在室温下进行,初始环境温度约为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,每组实验保证加热元件封装前后热流密度为 $0.2\text{ }W/cm^2$ 。实验件表面温度通过 FLIR A310 红外热像仪测得,该热成像仪灵敏度小于 $0.05\text{ }^\circ\text{C}$,测温精度在 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,具有较高的灵敏度和测温精度。供电电源采用 ITECH IT6502D 直流稳压电源,以保证每组实验过程中电源提供的电压恒定。

实验采用直流稳压电源通电 90 s,电压始终保持恒定。如图 3 所示,采用功率分析仪测量电路实际的供电电压和实验台实际功耗。经测量,供电电压始终保持在 5.41 V ,功率随时间的变化曲线如图 4 所示。



图 3 功率分析仪

Fig.3 Power analyzer

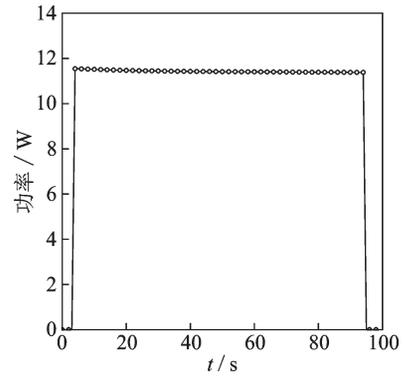


图 4 实际功耗变化

Fig.4 Actual power consumption variation

由图 4 可得,通电 90 s 内的系统功耗逐渐减小,功率从最开始的 11.5 W 减小到 11.4 W ,减少了约 0.1 W 。结果表明,热学性能测试实验台实际的功耗变化较小,加热元件在发热时,电阻值几乎没有变化,电阻值对温升速率没有影响。

石墨烯加热元件封装前后实验件的平均温升曲线对比如图 5、6 所示。

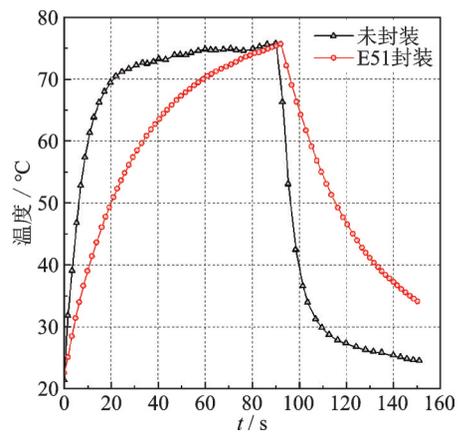


图 5 E51 环氧树脂对石墨烯加热元件温升特性的影响

Fig.5 Effect of E51 epoxy resin on temperature growth characteristics of graphene heating element

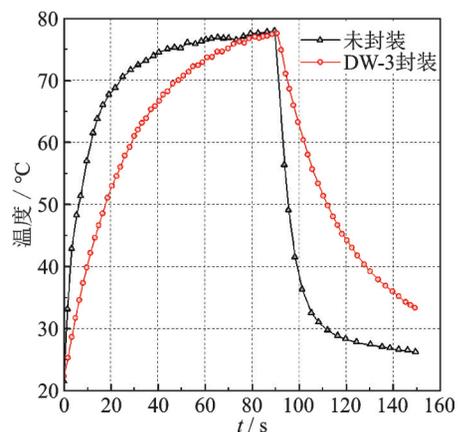


图 6 DW-3 环氧树脂结构胶对石墨烯加热元件温升特性的影响

Fig.6 Effect of DW-3 epoxy resin on temperature growth characteristics of graphene heating element

如图5所示,未封装的石墨烯加热元件通电后,表面温度迅速上升,随后趋于平缓,稳定时的平均温度为75.7℃,前8s的温升速率为4.094℃/s,断开电源后,温度迅速下降。采用E51环氧树脂封装的石墨烯加热元件通电90s后,表面平均温度为75.65℃,与未封装的加热元件稳定时的平均温度基本相同,但温升速率明显降低,前8s的温升速率约为1.728℃/s,较封装前减小了约58%。

如图6所示,未封装的石墨烯加热元件通电后,温度稳定时的平均温度为77.94℃,前8s的温升速率为3.962℃/s。用DW-3环氧树脂结构胶封装后,通电90s的加热元件表面平均温度达77.585℃,前8s的温升速率约为1.848℃/s,较封装前减小了约53%。

上述实验结果表明,环氧树脂对石墨烯材料的阻值和温升速率均具有较大的影响。环氧树脂具有良好的电绝缘性和绝热性能,是应用领域最为广泛的热固性树脂。由于石墨烯材料本身存在许多微观孔隙,石墨烯层间也存在缝隙,在封装过程中,环氧树脂必然会渗入到石墨烯材料的间隙之中,固化后的树脂基体会导致微观上的石墨烯之间相互隔绝,从而使得整体的石墨烯材料的导电性能变差,最终导致封装后加热元件的电阻增加。同时,由于环氧树脂覆盖在石墨烯材料的表面,绝热良好的环氧树脂会导致加热元件表面温升速率减小,故封装后的石墨烯加热元件前8s内表面温升速率降低。因此,石墨烯材料不适合直接嵌入到带有环氧树脂基体的玻纤之中。

2 复材加热组件一体成型制备方法

由前述分析可知,树脂基体会影响石墨烯材料的阻值和温升速率,而在加热组件的设计和制备过程中,往往需按要求设计其电阻,为保证制备的复材加热组件与设计时的电阻保持一致,需要一套完备的成型方法来保证加热组件制备前后阻值变化不大,且对其热力学性能影响较小,以便于电热防/除冰系统加热组件的设计。

2.1 石墨烯加热元件预封装

为减小环氧树脂对石墨烯材料阻值的影响,在用玻纤/环氧封装石墨烯加热元件之前,需预先采用一种导热良好的材料,对其进行预封装。本文采用了3种预封装材料:聚酰亚胺、TPU热熔胶膜和石墨绝缘导热膜。采用高温辊压预封装工艺对石墨烯加热元件进行预封装,防止树脂基体渗入石墨烯材料中。采用这3种预封装材料封装石墨烯加热元件前后的温升特性曲线如图7~9所示。

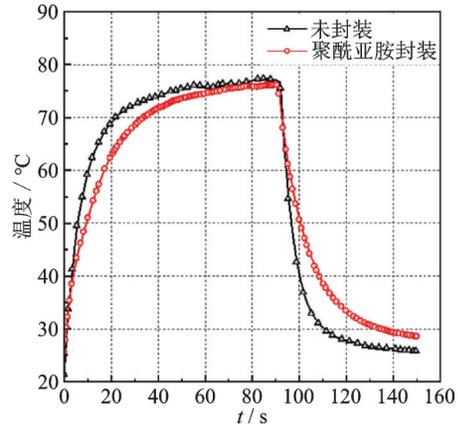


图7 聚酰亚胺封装前后加热元件温升曲线

Fig.7 Temperature growth curve of heating element before and after package using polyimide

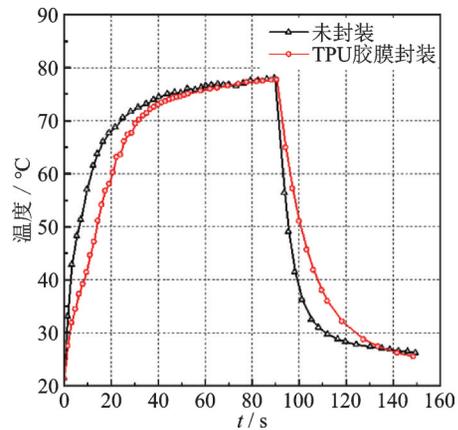


图8 TPU封装前后石墨烯加热元件温升曲线

Fig.8 Temperature growth curve of heating element before and after package using TPU

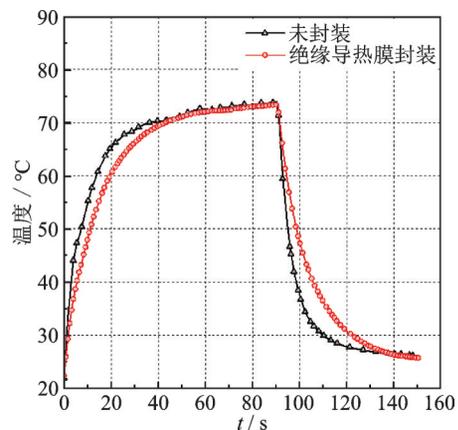


图9 绝缘导热膜封装前后加热元件温升曲线

Fig.9 Temperature growth curve of heating element before and after package using film of insulation and heat conduction

如图7所示,封装前的石墨烯加热元件表面温度稳定在77℃左右,前8s的温升速率约为4.274℃/s。用聚酰亚胺预封装后,加热元件通电90s的表面平均温度达76.1℃,前8s的温升速率

为 2.732 °C/s,相较于封装前减小了约 36%。

如图 8 所示,石墨烯加热元件封装前的表面平均温度稳定在 78 °C 左右,前 8 s 的温升速率约为 3.96 °C/s;TPU 封装后的加热元件通电 90 s 的表面平均温度达 77.708 °C,前 8 s 的温升速率为 2.23 °C/s,较封装前减小约 43%。

如图 9 所示,石墨烯加热元件封装前的最高平均温度稳定在 73.9 °C 左右,前 8 s 的温升速率为 3.798 °C/s;石墨绝缘导热膜封装后的加热元件通电 90 s 的表面平均温度达 73.38 °C,前 8 s 的温升速率为 2.81 °C/s,较封装前减小了约 26%。

采用 3 种预封装材料封装石墨烯加热元件前后的阻值变化如表 3 所示。

表 3 封装前后石墨烯加热元件阻值变化

Table 3 Resistance change of graphene heating element before and after package

| 实验件 | 封装材料 | 封装前 电阻/Ω | 封装后 电阻/Ω | 电阻变化 百分比/% |
|-----|---------|-------------|-------------|---------------|
| 1 | 聚酰亚胺 | 2.57 | 2.65 | 3.11 |
| 2 | 聚酰亚胺 | 2.36 | 2.62 | 11.01 |
| 3 | 聚酰亚胺 | 2.16 | 2.34 | 8.33 |
| 4 | TPU | 2.57 | 3.17 | 23.35 |
| 5 | TPU | 2.61 | 3.06 | 17.24 |
| 6 | TPU | 2.63 | 3.16 | 20.15 |
| 7 | 石墨绝缘导热膜 | 2.51 | 2.73 | 8.76 |
| 8 | 石墨绝缘导热膜 | 2.46 | 2.53 | 2.84 |
| 9 | 石墨绝缘导热膜 | 2.41 | 2.56 | 6.22 |

结果证明,采用 TPU 热熔胶膜封装后的加热元件阻值增加约 20.25%,而采用聚酰亚胺和石墨绝缘导热膜封装后的石墨烯加热元件阻值增加在 6.71% 左右。可以认为,采用聚酰亚胺和石墨绝缘导热膜封装后的加热元件阻值不变。其原因为 TPU 热熔胶膜高温辊压封装,胶膜受热部分融化会渗入石墨烯材料中,从而对石墨烯加热元件的阻值产生影响,而其他两种预封装材料不会影响石墨烯材料的结构和组成,所以封装前后加热元件的阻值变化不大。

本文通过实验研究了采用石墨绝缘导热膜封装石墨烯加热元件的表面热均匀性。石墨绝缘导热膜封装后石墨烯加热元件热成像如图 10 所示,热成像图中方框内的温度统计信息如图 11 所示。图 10 中的红色方框内,加热组件表面温度最大值为 75.6 °C,最小温度为 66.2 °C,温差在 9 °C 以内,这是由于在靠近边缘位置处,热量向周围未加热部分传递,导致边缘温度降低。在实际应用中,需利用加热元件中心温差较小的部位作为有效除冰区域,而剔除周围温度受影响较大部分,或者减小加热元件未加热部分的面积。

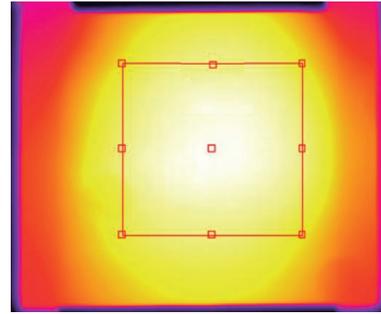


图 10 绝缘导热膜封装后石墨烯加热元件表面热成像
Fig.10 Thermal image of surface of graphene heating element after package using film of insulation and heat conduction

| 统计信息 [单位] | 方框 1 |
|--------------|-----------------------|
| 平均值 [°C] | 72.4 |
| 标准偏差 [°C] | 1.9 |
| 中心 [°C] | (316, 0, 221, 5) 75.3 |
| 最大值 [°C] | (299, 236) 75.6 |
| 最小值 [°C] | (435, 334) 66.2 |
| 像素数 | 54014 |
| 单个像素区域 [cm²] | 不适用 |

图 11 温度统计信息

Fig.11 Temperature statistics

综上所述,相比于其他两种预封装方法,采用绝缘导热膜封装不会影响石墨烯材料的阻值,并且对加热元件温升的影响较小。同时,采用石墨绝缘导热膜封装后的加热元件表面温度均匀性较好,但其外部绝缘层容易损坏,从而导致石墨层裸露后电路发生短路,所以本文仍然采用聚酰亚胺对石墨烯材料进行预封装,从而得到电热防/除冰系统加热元件。

2.2 不同环氧树脂基体的力学性能

为保证玻纤/环氧复合材料层之间具有足够的粘接力,使得加热元件与玻纤之间不会在气动力和颤震等情况下发生开裂和脱落,本文按照 GB/T-2791 测试样件的平均剥离强度对复材加热组件进行了剥离力学性能测试。按照国标标准件尺寸设计剥离样件,并保证复材加热组件能承受弯曲角度而不产生裂纹,涂胶粘接部分长度为 150 mm,另一端为未粘接部分。国标标准件尺寸如图 12 所示,实验样件如图 13 所示。将实验样件未粘接部分分别固定在拉伸机上下夹具中,夹持部位不能滑移,从而保证所施加的拉力均匀地分布在试样的宽度上。开动拉伸机,按照国标规定的夹具行走速度 100±10 mm/min 进行实验样件剥离实验,实验台如图 14 所示。

记录在至少 100 mm 剥离长度内的剥离力的最大值和最小值,取得平均剥离力,计算得到平均剥离强度值为

$$\sigma = F/B \quad (2)$$

式中: σ 表示剥离强度,单位为 KN/m; F 表示剥离

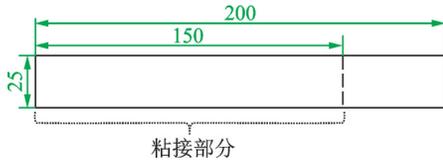


图12 标准件示意图

Fig.12 Diagram of standard sample



图13 实验样件

Fig.13 Test sample



图14 剥离实验台

Fig.14 Peel strength test bench

力,单位为N; B 表示试样宽度,单位为mm。

为增加玻纤层间的粘接力,在环氧树脂基体中加入不同质量的硅烷偶联剂,得到不同组分的环氧

树脂结构胶,用其粘接样件后的平均剥离强度如表4所示,其中硅烷偶联剂质量表示其占总胶量的质量百分比。

表4 不同环氧树脂基体粘接样件的平均剥离强度

Table 4 Average peel strength of samples made of different epoxy resin

| 样件 | 环氧基体 | 硅烷偶联剂计量/% | 固化温度/℃, 固化时间/h | 剥离强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) |
|----|------|-----------|----------------|--|
| 1 | E51 | 0 | 80,1;100,2 | 1.25 |
| 2 | E51 | 2 | 80,1;100,2 | 1.57 |
| 3 | E51 | 3 | 80,1;100,2 | 2.03 |
| 4 | E51 | 4 | 80,1;100,2 | 1.77 |
| 5 | DW-3 | 0 | 100,2 | 1.44 |
| 6 | DW-3 | 2 | 100,2 | 3 |
| 7 | DW-3 | 3 | 100,2 | 3.08 |
| 8 | DW-3 | 4 | 100,2 | 2.52 |
| 9 | DW-3 | 5 | 100,2 | 2.7 |

样件1和5的实验结果表明,DW-3粘接玻纤后的层间剥离力更大,样件2~9的实验结果表明,树脂基体中加入少量硅烷偶联剂,能够使粘接样件的平均剥离强度得到提高。对比样件2和7,在DW-3中加入质量百分数为2%~3%硅烷偶联剂时的玻纤剥离强度较大。因此选用DW-3环氧树脂基体加入质量百分数为2%~3%的硅烷偶联剂,以增加玻纤间以及玻纤与加热元件间的粘接力。

2.3 制备方法

将S高强玻纤裁成若干矩形,铺层数为10层,每层玻纤厚0.1 mm。首先利用聚酰亚胺预封装石墨烯材料制备得到加热元件,然后铺于玻纤之间,最后采用平板硫化机热压成型制备工艺制备得到复材加热组件。

制备过程首先采用预吸胶工艺来控制胶量,在0.1 MPa、60℃条件下,吸胶15 min;然后降温至40℃左右,取出吸胶纸;之后继续升温加压固化,固化条件为100℃下加压3 MPa,固化时间2 h。玻

纤/环氧复合材料热压制备工艺固化条件如图15所示。

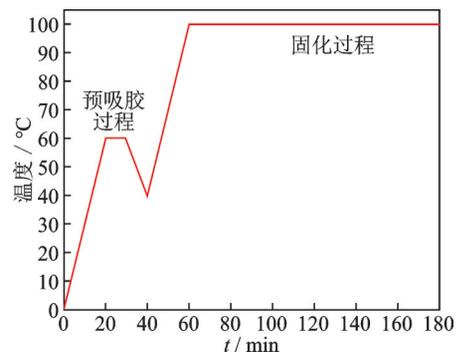


图15 玻纤/环氧复合材料热压制备工艺固化条件

Fig.15 Curing condition of glass fiber/epoxy composite by hot-pressing process

3 复材加热组件性能

基于上述工艺制备得到复材加热组件,并在室温和冷环境中测量其表面温升特性,研究加热元件铺层位置及加热功率对复材加热组件表面温升特

性的影响。最后通过冷环境除冰实验,验证复材加热组件相比传统加热组件具有更高的除冰效率。

3.1 铺层位置对加热组件温升的影响

将加热元件分别铺放在玻纤夹层中的不同位置制备得到复材加热组件,在常温环境中测量不同加热组件在相同热流密度情况下的温升特性,从而研究加热元件铺层位置对复材加热组件温升的影响规律。实验件尺寸及加热元件铺层位置如表 5 所示。在常温环境中,初始环境温度约为 25 °C,设置相同热流密度,得到实验件的温升曲线如图 16 所示。

表 5 实验样件
Table 5 Test samples

| 实验件编号 | 厚度/mm | 长×宽/ (mm×mm) | 加热元件铺层 位置 <i>i</i> -(<i>i</i> +1) |
|-------|-------|-----------------|---------------------------------------|
| 1 | 1 | 120×100 | 1-2 |
| 2 | 1 | 120×100 | 2-3 |
| 3 | 1 | 120×100 | 3-4 |
| 4 | 1 | 120×100 | 4-5 |
| 5 | 1 | 120×100 | 5-6 |

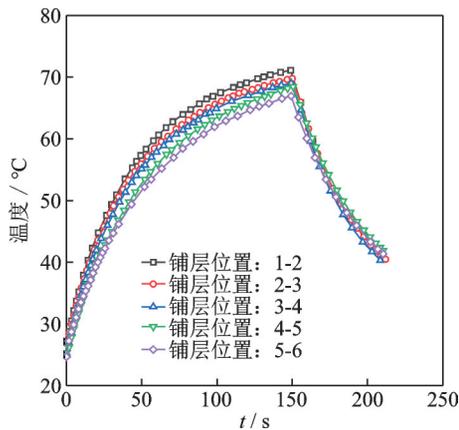


图 16 不同铺层位置加热组件的温升曲线

Fig.16 Temperature growth curve of heating components at different interlayer positions

由图 16 所示,不同铺层位置的加热组件通电 150 s 时的表面平均温度相差不大,但温升速率有明显的差别,加热元件在 1-2 层时,通电 50 s 时的加热组件表面温升速率约为 0.6 °C/s;当加热元件位于 5-6 层时,通电 50 s 时的加热组件表面温升速率为 0.5 °C/s,减小了约 16.7%。结果表明加热组件的温升速率与铺层层数成反比。对于加热元件最优铺层位置的选择,还应考虑环境对复材机翼侵蚀的作用,在保证加热元件不被破坏的情况下,铺层位置越靠上,温升速率越大,除冰耗时也越少。

3.2 不同热流密度对加热组件温升的影响

对上节铺层 1-2 的复材加热组件施加不同的

热流密度,利用热电偶测得其表面中心位置处的温升曲线,如图 17 所示。热流密度分别设置为 0.2, 0.3 及 0.4 W/cm²,初始环境温度约为 -13 °C。图 18 表示热流密度为 0.2 W/cm² 时,利用热电偶测得复材加热组件正面和背面中心位置处的温升曲线。图中,加热组件正面是指距加热元件较近的面,背面是指距加热元件较远的面。

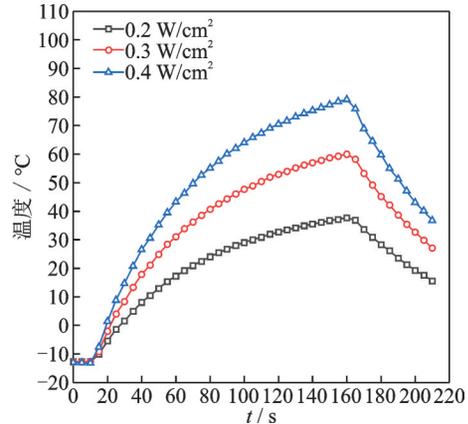


图 17 冷环境中不同热流密度加热组件中心处温升曲线

Fig.17 Temperature growth curve at center of heating component with different heat flux in cold environment

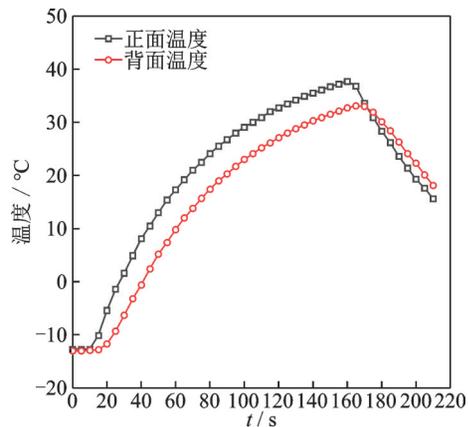


图 18 0.2 W/cm²热流密度下加热组件正反面中心处温升曲线

Fig.18 Temperature growth curve at center of front and back of heating component at 0.2 W/cm² heat flux

由图 17 可得,加热组件的温升速率随着所施加热流密度的增加而增大,热流密度越大,温度上升也越快。由图 18 可得,当铺层位置靠上时,加热组件正面的温度和温升速率均高于背面,可以有效防止热量向内部传递。

3.3 加热组件除冰性能实验

低温除冰实验均在 -20 °C 的低温环境箱中进行。如图 19 所示,将模具放置在加热组件中心位

置处,将水吸到模具中,保证每次吸水量相同,以保证结冰厚度相同,冰厚度均为3 mm左右。冰块正下方布置有热电偶温度传感器,用于检测组件表面与冰块交界面之间的温度。由于热电偶相比于铂电阻的体积小,对结冰界面影响较小,故采用热电偶测量界面之间的温度,本实验忽略了热电偶线对冰块与组件表面间粘附力的影响。然后将实验件以60°倾角倾斜放置,并记录冰块滑落的时间,如图20,21所示。

文中测试了2组实验样件,如图19所示,左边实验组通过一体成型制备方法将加热元件铺设于1-2层玻纤之间,右边对照组将加热元件通过导热胶贴于玻纤板内表面,两组样件采用的玻纤/环氧复合材料及其厚度一致。通过热电偶分别测量样件中心位置处冰与玻纤表面之间的温升曲线,如图22所示。

相较于传统的加热组件,复材加热组件中心位置处的温升速率较高,在60 s时测温点就已经达到除冰温度,冰块滑落耗时115 s;而将加热元件贴于玻纤板内表面时,除冰耗时较长,冰块滑落耗时174 s。通过对比可得,一体成型的加热组件的除冰耗时较短、除冰效率较高。

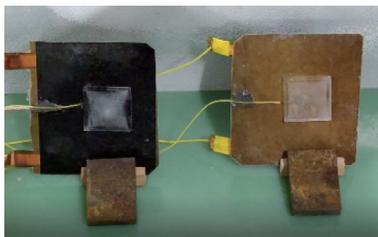


图19 倾角60°下未通电
Fig.19 No power at angle 60°

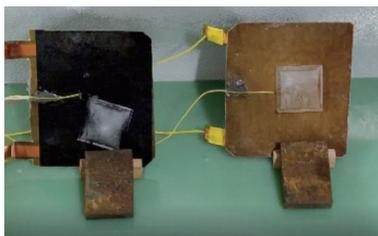


图20 倾角60°下加热115 s
Fig.20 Heating 115 s at angle 60°

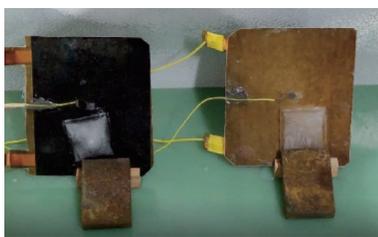


图21 倾角60°下加热174 s
Fig.21 Heating 174 s at angle 60°

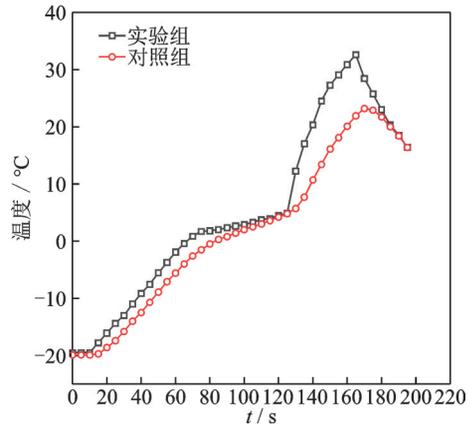


图22 冰与加热组件表面中心处之间的温升曲线
Fig.22 Temperature growth curve between ice and center of heating component

3.4 不同斜度下的除冰性能实验

为排除加热组件放置斜度对除冰性能的影响,实验增加放置斜度为45°和90°工况,进行同3.3节相同的除冰性能实验,验证在不同斜度下一体成型加热组件均具有较高的除冰效率。

由图23~25所示,在倾角45°下,复材加热组件表面冰块滑落耗时192 s;传统加热组件表面冰

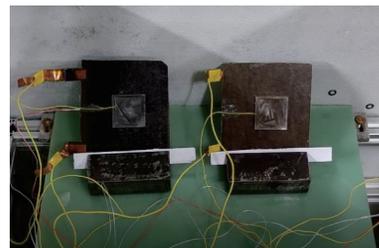


图23 倾角45°下未通电
Fig.23 No power at angle 45°

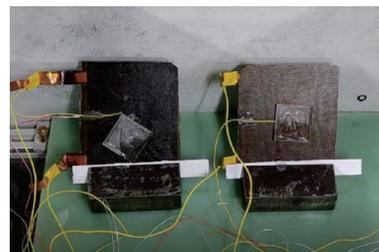


图24 倾角45°下加热192 s
Fig.24 Heating 192 s at angle 45°

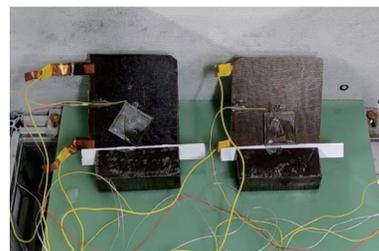


图25 倾角45°下加热224 s
Fig.25 Heating 224 s at angle 45°

块滑落耗时 224 s。对比可得,复材加热组件的除冰时间较后者缩短了约 30 s。

由图 26~28 所示,在倾角为 90° 下,复材加热组件表面冰块滑落耗时 133 s;传统加热组件表面冰块滑落耗时 193 s。对比可得,复材加热组件的除冰时间较后者缩短了约 60 s。

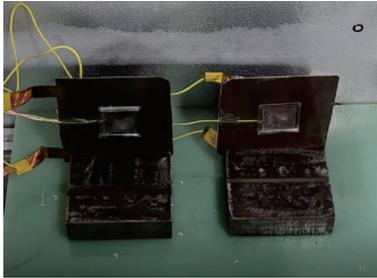


图 26 倾角 90° 下未通电

Fig.26 No power at angle 90°

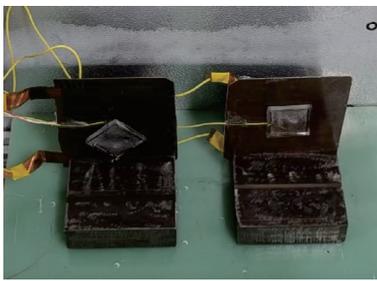


图 27 倾角 90° 下加热 133 s

Fig.27 Heating 133 s at angle 90°

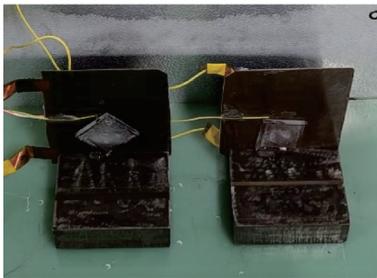


图 28 倾角 90° 下加热 193 s

Fig.28 Heating 193 s at angle 90°

上述实验结果表明,由于冰块在不同斜度下所受重力的分力不同,导致不同斜度下,冰块滑落耗时也各不相同。总体而言,在不同斜度下,一体成型的加热组件除冰均耗时较短,排除角度对冰块滑落的影响。

4 结 论

本文通过实验验证了环氧树脂会影响石墨烯材料的阻值和温升速率,因而不能直接将其封装在玻纤/环氧复合材料中制备加热组件。通过对比不同预封装材料和不同配比的树脂基体对石墨烯材料的影响,最终确定了一套完备的复材加热组件制

备方法,然后通过热压成型制备工艺得到复材加热组件。最后对其进行热力学性能实验和冷环境下的除冰实验,验证了一体成型的复材加热组件具备低能耗除冰的可行性,主要结论如下:

(1)相同环境温度和热流密度下,树脂基体对加热元件稳定时的平均温度几乎没有影响,而对阻值和温升速率的影响较大。石墨绝缘导热膜可以隔绝树脂基体渗入到石墨烯材料中,起到保护加热元件的作用,同时可以使加热元件表面的温度分布更加均匀,但其外部绝缘层容易损坏,从而导致石墨层裸露后电路发生短路。

(2)通过热学实验选择了对石墨烯材料影响较小的预封装材料,通过力学实验得到平均剥离强度最大时的树脂基体组成和配比,最后通过热压工艺制备得到复材加热组件。

(3)热力学性能实验结果表明,加热组件的温升速率随着所施加热流密度的增加而增大,同时温升速率随着上表面铺层数的增加而减小。当铺层位置靠上时,复材加热组件正面的温度和温升速率均高于背面。在实际应用中,正面的玻纤层可以起到保护加热膜,延长电加热膜使用寿命的作用,背面的玻纤层起到绝缘和绝热的作用。

(4)在冷环境除冰实验中,环境温度为 -20°C ,热流密度为 0.3 W/cm^2 时,复材加热组件除冰时间相比传统电热组件大大减小,能耗减小约 30%,证明本文设计的复材加热组件具备低温、低能耗除冰的可行性,为机翼复材加热组件的制备奠定了基础。

参考文献:

- [1] BRAGG M B. Rime ice accretion and its effect on air-foil performance[D]. Ohio: The Ohio State University, 1981.
- [2] LI S, PAOLI R. Aircraft icing severity evaluation[J]. Encyclopedia, 2022, 2 (1): 56-69.
- [3] 朱春玲, 朱程香. 飞机结冰及其防护[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHU Chunling, ZHU Chengxiang. Aircraft icing and its protection[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] 裘燮纲, 韩凤华. 飞机防冰系统[M]. 北京: [s.n.], 1985: 16-21.
QIU Xiegang, HAN Fenghua. Aircraft anti icing system[M]. Beijing: [s.n.], 1985: 16-21.
- [5] 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 16th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference.[S.l.]: AIAA, 2008.
- [6] 孙志国. 飞机结冰数值计算与冰风洞部件设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- SUN Zhiguo. Research on numerical simulation of ice accretion and design for icing tunnel parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] 王岩, 王渊, 朱程香, 等. 谐振式飞机结冰探测传感器仿真及实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 267-273.
- WANG Yan, WANG Yuan, ZHU Chengxiang, et al. Simulation and experimental study of aircraft icing detection sensor by resonant[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 267-273.
- [8] FORD T. Aerospace composites[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1997, 69(4): 334-342.
- [9] 渠晓溪. 复合材料机翼的结构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- QU Xiaoxi. Structural design and analysis of composite wing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [10] HASANZADEH M, ZADEH S M. Advanced fibrous composites for aircraft application[M]//Materials, Structures and Manufacturing for Aircraft. Cham: Springer, 2022: 89-112.
- [11] 周晓芹, 段友社, 薛向晨, 等. 飞机复材构件制造装备应用现状[J]. 航空制造技术, 2013(17): 53-56.
- ZHOU Xiaoqin, DUAN Youshe, XUE Xiangchen, et al. Application of manufacturing equipment for aircraft composites component[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2013(17): 53-56.
- [12] PANTELAKIS S. Historical development of aeronautical materials[M]//Revolutionizing Aircraft Materials and Processes. Cham: Springer, 2020: 1-19.
- [13] 盛永清. 航空树脂基复合材料技术发展[J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2008(1): 12-15.
- SHENG Yongqing. Aeronautical polymer matrix composites' technological development[J]. Journal of Xi'an Aerotechnical College, 2008(1): 12-15.
- [14] 陈龙, 刘慧, 张一术. 石墨烯涂层对直升机旋翼防/除冰组件传热的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 239-245.
- CHEN Long, LIU Hui, ZHANG Yishu. Effect of graphene coating on heat transfer of anti-/deicing component for helicopter rotor[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 239-245.
- [15] THOMAS S K, CASSONI R P, MACARTHUR C D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 2012, 33(5): 841-854.
- [16] GEIM A K. Graphene: Status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [17] FALZON B G, ROBINSON P, FRENZ S, et al. Development and evaluation of a novel integrated anti-icing/de-icing technology for carbon fiber composite aerostructures using an electro-conductive textile[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 68: 323-335.
- [18] 韩辰橙. 防/除冰复合材料层合板热-力联合作用下的力学行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- HAN Chencheng. Study on mechanical behaviours of anti/de-icing composite laminates under thermo-mechanical loading[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [19] 刘亚泮, 张新增. 含间隙缺陷的复合材料层合板拉伸性能研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(26): 39-42.
- LIU Yafeng, ZHANG Xinzheng. Study on the tensile properties of composite laminates with gap defects[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2021, 38(26): 39-42.

(编辑: 孙静)