

可感应加热的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料 疏冰/除冰应用

秦文峰, 王新远, 李亚云, 艾璇, 符佳伟

(中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 提出一种基于 Ni、CNT 和 LIT-PDMS 的疏冰-涡流热效应一体化的新型复合材料, 既具有疏水性可预防结冰的特性, 又可利用涡流热效应进行非接触式除冰。Ni/PDMS-4 复合材料静态接触角约为 106.5°, 为疏水性材料, 能有效阻止水珠在飞机表面聚集进而结冰; 在感应加热装置输入电压为 30 V 时, 其发热最高平衡温度约为 120 °C, 能进行多次加热且具有良好的热稳定性, 完全融化 20 g 的冰层只需要 232 s; 在应变为 0.001 的 30 次循环拉伸中, 其内部导电网络具有良好的稳定性和回弹性。Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料可以完成飞机除冰工作, 保障飞行安全。

关键词: 镍; 碳纳米管; 聚二甲基硅氧烷; 飞机除冰

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)03-1062-07

飞机积冰一直是威胁飞机安全的重要因素之一。飞机积冰形成的主要原因是空气中的过冷水滴沾附在机身表面, 也可能是空气中的水汽直接凝华在机身表面^[1,2]。而飞机积冰不仅会在飞机飞行过程中过穿越云层时发生, 在寒冷的冬季, 停放在地面上的飞机表面也会产生大量积冰。2018年2月18日伊朗阿塞曼航空 EP3704 航班由于在起飞前没有进行除冰工作, 发生撞山事故, 造成重大人员伤亡及经济损失^[3]。研究显示只要有适当的空气湿度, 在 5 °C 时就会产生积冰现象, 在冰粒直径为 1~2 mm, 冰粒密度为 1 粒/cm² 的情况下, 飞机的升力至少减少 20%^[4]。飞机除冰不及时会造成冰层覆盖从而改变气动布局、桨叶叶片积冰造成转速降低、飞机传感器被冰层覆盖导致数据不符合实际情况从而影响飞行员判断等诸多问题^[5-7]。

传统飞机除冰分为物理法、化学法和传热法。物理法多为通过震动、敲击或气囊膨胀等方式使冰层从物体表面脱落, 此方法简单有效, 但能耗高, 设备体积大, 且容易损伤物体表面^[8-10]; 化学法多为通过喷洒除冰液或除冰盐降低水的冰点, 从而达到除冰目的, 但除冰液或除冰盐的大量使用容易造成周遭土壤以及地下水污染^[11-13]; 热力除冰法为通过产生热量传递给冰层使冰层融化, 有红外除冰法、电热除冰法、感应加热除冰法等, 红外除冰法由于热传导效率较低从而需

要较多热量, 且结构复杂, 所需器材过多^[14,15]; 电热除冰法、感应加热除冰法因为利用材料内部导电网络产生热量, 具有高效、环保、经济等优点, 现在飞机、汽车等多采用此种方式除冰^[16-18]。

Wang 等^[19]利用真空抽滤法来制造出柔性超疏水聚二甲基硅氧烷/多壁碳纳米管膜, 其不仅具有良好的疏水性, 其优异的电热效应也可用于除冰。Redondo 等^[20]研究了不同含量石墨烯/环氧树脂的除防冰涂层在不同温度下的焦耳热效应, 并分析了其除冰原理。Sabatier 等^[21]利用导电高分子涂层的焦耳热效应对风力涡轮叶片的相关表面进行加热除冰, 并设计一套控制系统控制除冰的进程。Tarfaoui 等^[22]研究了利用 CNT 制作的碳纳米管薄膜(巴基纸)的电热除冰效果, 并分析了其具体除冰过程。

Golovin 和 Dhyani 等^[23]研制出一系列新型低界面能除冰材料如通过向聚二甲基硅氧烷液 (polydimethylsiloxane, PDMS) 添加 40%(质量分数)的硅油制得低界面能聚二甲基硅氧烷 (low-interfacial toughness polydimethylsiloxane, LIT-PDMS), 用该材料做的涂层能够极大地降低基板与冰层之间的结合力, 使冰层能够轻易地从其表面脱落, 甚至仅靠冰层的自重就可以使其从基板上脱落。

而镍(Ni)具有优良的导磁性, 多用于制作合金以及涡流发热等方面; CNT 作为优秀的导电一维材料,

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 民航局教育人才类项目 (14002600100017J170); 四川省 2019 年大学生创新创业训练计划项目 (S201910624004); 中国民用航空飞行学院研究生创新基金项目 (X2020-7)

作者简介: 秦文峰, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307, E-mail: 511293358@qq.com

能够弥补镍导电性的不足,且两者单体体积尺寸相差悬殊,组合形成的导电网络导电性更好。本研究提出一种基于 Ni、CNT 和 LIT-PDMS 复合材料利用 LIT-PDMS 优异的疏冰性与高弹性和金属镍的良好的涡流热效应,搭建出具有微观岛桥结构的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料。通过控制镍的含量,研究其疏水性、涡流热效应和除冰性能,并实验验证其热稳定性和震动稳定性,足以在恶劣环境下保持其可靠性。

1 实验

镍粉,粒径 5~10 μm ,纯度 >99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS),双组分:A 液为乙烯基封端的聚(二甲基-甲基乙烯基硅氧烷),B 液为聚(二甲基-甲基氢硅氧烷)和铂(Pt)催化剂,美国 DOW CORNING 184;二甲基硅油(silicone oil),粘度约 500 mPa·s,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS),纯度 >99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;碳纳米管(carbon nanotube, CNT),纯度 >95%,苏州碳丰科技有限公司。

将高纯 Ni 粉置于 120 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中 4 h,以除去其中可能含有的水分。取聚二甲基硅氧烷的 A 液 7 g 和 B 液 0.7 g 机械搅拌 30 min 至均匀混合,在混合完成后,得到未固化的 PDMS 液。再加入 3 g 的二甲基硅油,以 1000 r/h 转速机械搅拌 30 min,使其充分混合均匀,获得未固化的 LIT-PDMS 液。在其搅拌完成后分别加入 11、22、33、44 g 的 Ni 粉(Ni 与基体的质量比分别为 1:1、2:1、3:1 和 4:1),再各自加入 0.25 g CNT 和 0.1 g SDS,以 200 r/min 转速机械搅拌 24 h,使其均匀分散在混合液中,随后再将其置于真空箱内脱气 2 h,直至混合液中无气泡。待完成后,通过调节刮刀高度,用自动刮涂仪将其刮涂为厚度约为 1 mm 的涂层,两端预埋 PAN 基碳纤维丝作为电极导线,留待测试使用,放入 130 $^{\circ}\text{C}$ 的真空烘箱中固化 1 h,得到 4 种不同含量的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料样品,分别称为 Ni/PDMS-1、Ni/PDMS-2、Ni/PDMS-3 和 Ni/PDMS-4。其实验步骤如图 1 所示。

通过电子扫描电镜(S-4800,Hitachi)观察样品微观形貌,X 射线衍射(XRD)仪(Xpert Pro Mpo, Bruker D8 Advance)测试试样成分组成及表征微观结构,确定样品相组成。差热-热重分析仪(DTG-60(H), Shimadzu)测试试样在 20~800 $^{\circ}\text{C}$ 情况下的热稳定性。利用测试源表(2450source, Keithley)、运动控制器(WNMC400,

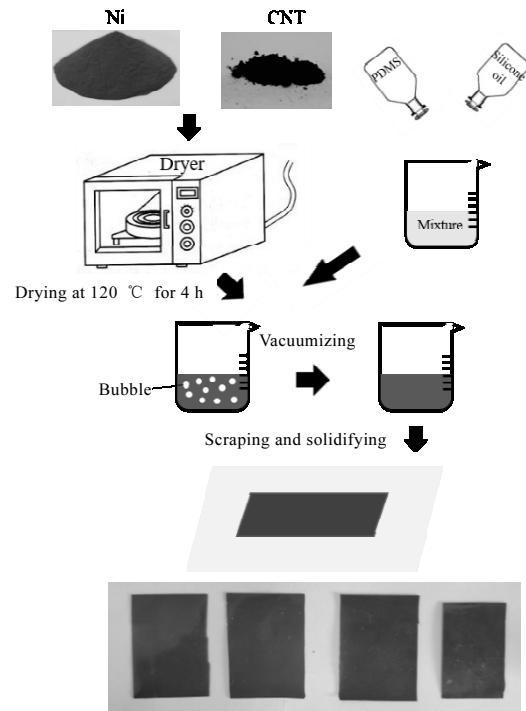


图 1 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料试样制备流程图

Fig.1 Schematic fabrication process of the Ni-CNT/LIT-PDMS composite

Beijing)测试样品的应变/电阻变化关系,样品通过夹具夹持在两块运动控制器之间,通过样品两端电极连接上测试源表,测试时通过电脑控制运动控制器之间的运动从而控制样品的形变程度,由测试源表采集试样实时电阻和电流变化数据。感应加热所用的仪器为自制电磁感应加热器,可以在 12~48 V 直流电压下工作使用,感应频率为 150 kHz,样品两端电极接入直流稳压电源(HY3020MT, HYELEC),通过调节输入电压电流的大小,控制输入功率,研究其感应加热效应及其实际除冰效果,用红外成像仪(E6, FLIR)记录其温度变化。实验中室温为 15 $^{\circ}\text{C}$,电磁感应所用铜管中接入循环冷水保证其处于低温,进而防止其温度过高对样品升温数据造成影响。应变/电阻测试装置模型和感应加热测试装置如图 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的化学结构

图 3 为 PDMS 和 Ni/PDMS-4 的 XRD 图谱。由图可知,与 PDMS 相比,试样 Ni/PDMS-4 由于掺杂了与基体质量比为 4:1 的 Ni 粉,其在 $2\theta=44.5^{\circ}$ 、 51.9° 和 76.5° 存在明显的衍射峰,通过对照 PDF 卡,确认其分别是 Ni 的(111)、(200)和(220)晶面的衍射峰^[24]。

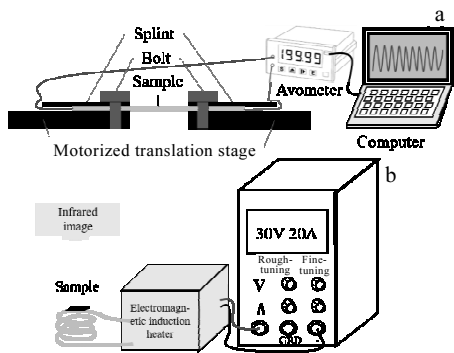


图 2 性能测试模型图

Fig.2 Model diagrams of performance test: (a) tension/resistance test device and (b) induction heating device

由于 CNT 掺杂质量分数只有 2.5%，远小于 Ni，通过放大曲线发现在 26°、42° 和 77° 也存在明显的衍射峰，通过对照 PDF 卡，分别代表了 CNT 的(002)、(100)和(110)晶面^[25]。通过分析其化学结构说明在试样制备过程中 Ni 与 CNT 未与加入的其他物质发生化学反应，相互之间稳定共存。

2.2 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的微观形貌

图 4 为 PDMS 和 Ni/PDMS-4 复合材料的表面微观形貌。由图 4a 可知，原始 PDMS 在扫描电镜观察下表面光滑平整。图 4b 中，Ni 粉和 CNT 在经过搅拌后均匀地分布在 PDMS 中，由光滑表面变成均匀分布的突起的粗糙表面，有凸起有凹坑，而凹坑是由于少量镍颗粒在日常使用中从表面脱落形成的。Ni 颗粒的平均粒径大约为 3.2 μm，相互之间距离约为 12.8 μm，相互之间没有直接接触。在原位通过更高倍数的观察，在 Ni 颗粒之间，CNT 均匀地分布在其中，条状的 CNT 连接起本不相连的 Ni 颗粒，就像大海中由大桥相互连接起来的孤岛。

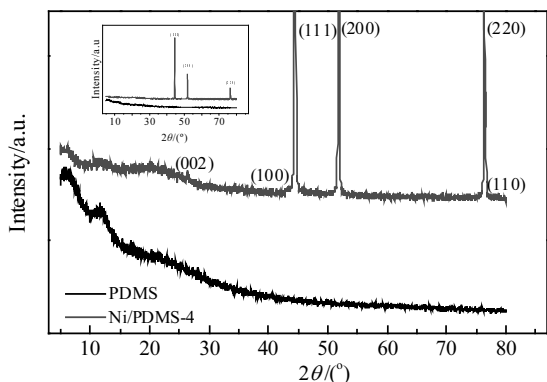


图 3 PDMS 与 Ni/PDMS-4 试样的 XRD 图谱

Fig 3 XRD patterns of PDMS and Ni/PDMS-4 samples

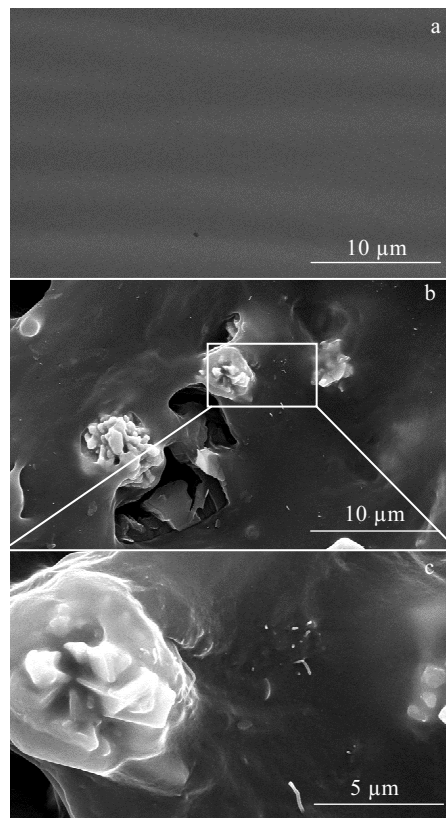


图 4 PDMS 和 Ni/PDMS-4 试样 SEM 照片

Fig 4 SEM images of samples: (a) PDMS and (b, c) Ni/PDMS-4

2.3 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的静态接触角

图 5 为不同含量的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的静态接触角。通过对比观察得知，LIT-PDMS 比 PDMS 的疏水性有了显著提高，由 95.7° 提高至 105.3°，原因是在固化过程中 LIT-PDMS 添加了二甲基硅油，而二甲基硅油是疏水性物质，且未参与 PDMS 固化反应。当 PDMS 固化后，小分子的二甲基硅油分散在其链式结构周边，从而提高了疏水性。当添加了与基体质量比为 1:1 的 Ni 粉和 2.5% 的 CNT 后，其接触角降低至 95.3°，通过分析其表面形貌，其主要原因是部分 CNT 末端裸露在外面，形成很多微小突起，影响表面平整，降低水滴的表面张力。随着 Ni 含量的增加，其接触角逐渐增大至 106.5°，其主要原因是随着 Ni 含量的增加，表面的 Ni 颗粒逐渐变多。Ni 颗粒的突起较大，形成粗糙表面，水滴落下时容易在表面之间形成气室，使疏水效果得以提高。通过分析其接触角的变化可得，不同含量 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料均表现为疏水性，能够较好防止水滴在其表面停留，抑制积冰的出现。

2.4 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料热稳定性分析

图 6 为试样 Ni/PDMS-4 在氮气环境下、30~800 °C 的热重曲线。从图中分析可得，在 30~226 °C 之间，

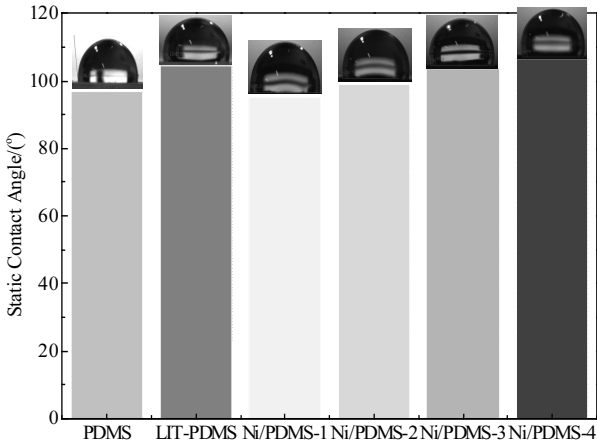


图 5 不同含量的 Ni/PDMS 复合材料的静态接触角

Fig 5 Static contact angle of Ni-CNT/LIT-PDMS composites

质量略有下降，并出现波动，质量损失大约 1.1%，这是由于水分蒸发及实验误差导致的；在 226~437 °C 之间，质量损失大约 3.4%，主要是因为二甲基硅油的闪点为 226 °C，其出现热分解导致质量减少；在 437~750 °C 之间，质量损失大约为 15.6%，这是由于 PDMS 开始分解，质量大量损失。在 30~800 °C 的加热过程中，质量一共损失约 20.1%。而在 30 V 电加热温度范围内，即 30~120 °C 间，几乎不会发生物质分解，具有良好的热稳定性。

2.5 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的应变/电阻变化

飞机在日常运行过程中往往是颠簸状态，剧烈的震动会导致飞机结构有不同程度微小拉伸变化，飞机上电子仪器的可靠性会受到严重挑战。在飞行中飞机结构形变程度一般都在 0.001 以下。通过应变/电阻测试装置测试试样 Ni/PDMS-4 在不同形变下的电阻变化。图 7 为试样 Ni/PDMS-4 在应变为 0.001 时循环

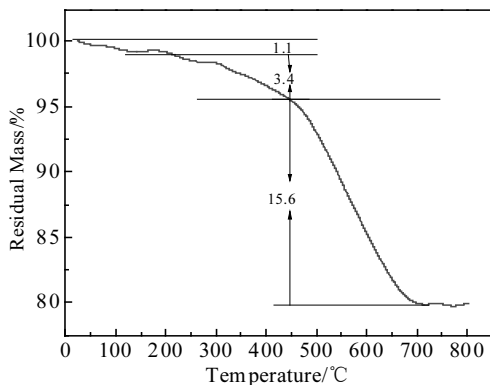


图 6 样品 Ni/PDMS-4 热重分析

Fig.6 TG analysis of Ni/PDMS-4 sample

拉伸 30 次电阻率变化曲线（电阻率=当前电阻/初始电阻）。通过对比图中信息，在 30 次循环变化后能迅速回到最开始的电阻大小，表明其具有良好重复性和回弹性，且经过形状改变后其内部导电电路并没有发生改变。在拉伸之后再进行感应加热，其最高平衡温度几乎没有发生改变，进一步验证了 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的可靠性和稳定性。

2.6 Ni 含量对 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的涡流热效应的影响

图 8 为不同含量的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料在输入电压为 24 V 时感应加热的温度升高曲线和红外成像图。在 24 V 的输入电压下，样品最高平衡温度由样品 Ni/PDMS-1 的 59.3 °C 随着含量一直升高到样品 Ni/PDMS-4 的 93.4 °C。且在红外图中可以观察到在感应加热过程中，热量分布均匀，这从另一方面说明在复合材料内部 Ni 和 CNT 分布均匀，未出现大量聚集。这是由于金属 Ni 具有优良的导磁性、导电性和导热性，对穿过其中的交变磁场能产生感应电动势，进而产生感应电流，感应电流在材料自身内阻的作用下，产生热量。根据电磁感应公式：

$$E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \tag{1}$$

式中， E 为感应电动势， n 为线圈匝数， $\Delta \Phi$ 为磁通量的变化量， Δt 为变化时间。在其他条件不变情况下，交变磁场通过的线圈圈数越多，感应电动势越大。当 Ni 含量变大时，在复合材料内部由 Ni 和 CNT 形成的微电路也就越多，当交变磁场通过时，匝数也就越多，其感应电动势也就越大。又根据电阻公式：

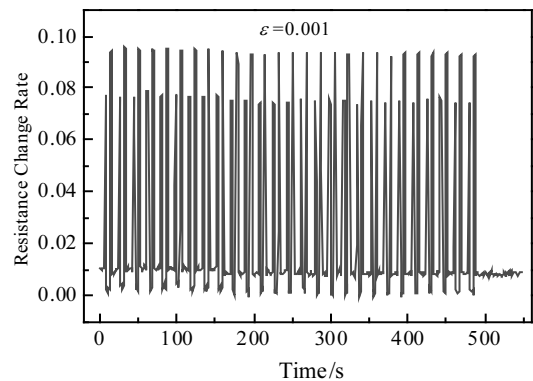


图 7 试样 Ni/PDMS-4 在应变为 0.001 时循环拉伸 30 次电阻率变化关系

Fig.7 Resistance change rate of the Ni/PDMS-4 sample stretched at $\epsilon=0.001$ for 30 times

$$R = \frac{\rho L}{S} \tag{2}$$

式中, R 为电阻, ρ 为电阻率, L 为电阻长度, S 为电阻截面积。随着 Ni 含量的增加, 在尺寸不变的情况下, 复合材料的等效电阻也就越小。最后根据焦耳热公式:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \tag{3}$$

式中, P 为发热功率, U 为两端电势差, I 为电流。在无外接电路情况下, U 值等于 E 值。当 Ni 含量越多, U 越大, R 越小, P 则越大, 故样品最高平衡温度随着 Ni 含量的增加而增加, 在 4 种不同 Ni 含量的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料中, 试样 Ni/PDMS-4 的涡流热效应性能最好, 所以选择试样 Ni/PDMS-4 为研究其他性能的对象。

2.7 输入电压对 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的涡流热效应的影响

图 9 为试样 Ni/PDMS-4 在不同输入电压下感应加热的温度升高曲线和红外成像图。在输入电压为 18 V 时, 样品 Ni/PDMS-4 最高平衡温度约为 64.9 °C; 在输入电压为 24 V 时, 最高平衡温度约为 91.8 °C; 在输入电压为 30 V 时, 最高平衡温度约为 120 °C。根据公式(1), 单位时间内磁通量的变化量越大, 其感应电动势也越大。当输入电压越大, 感应加热仪线圈产生的磁场强度越大, 则单位时间内磁通量变化量也越大。根据公式(3), 故在输入电压升高的情况下, 其发热功率也随之变大。而人体最大安全电压为 36 V, 在满足安全的要求下, 且一般能源系统的直流电压源电压多

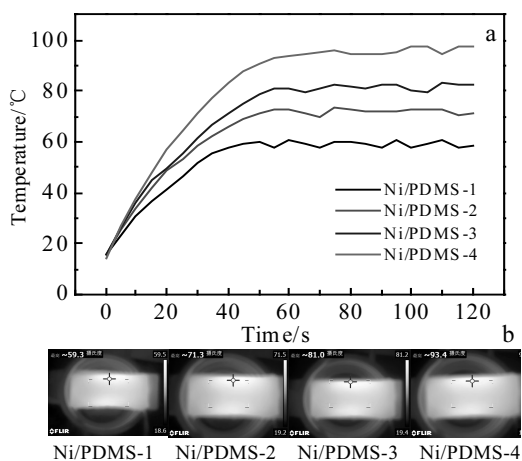


图 8 不同含量的 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料在电压 24 V 的感应加热温度升高曲线及红外成像图

Fig.8 Temperature-time curves (a) and infrared images (b) of Ni-CNT/LIT-PDMS composites induction heated at 24 V

为 24 V, 当输入电压为 24 V 时, 该复合材料能够升高约 76 °C, 满足一般加热及除冰要求。

2.8 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料加热稳定性分析

图 10 为当输入电压为 24 V, 试样 Ni/PDMS-4 循环加热 20 次的温度变化曲线。由图可知, 在循环加热 20 次中, 每次加热的最高平衡温度没有发生太大变化, 始终在 90~93 °C 范围内波动。这说明其化学组成及结构在多次加热循环测试中没有发生明显物理反应或化学反应, 具有良好的加热稳定性, 可以完成多次加热及除冰工作。

2.9 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料除冰实验分析

图 11 为试样 Ni/PDMS-4 在不同输入电压下的除冰速率图。将试样 Ni/PDMS-4 在 -20 °C 恒温冰柜中冷冻 12 h, 将 20 g 蒸馏水与样品放置在同一模

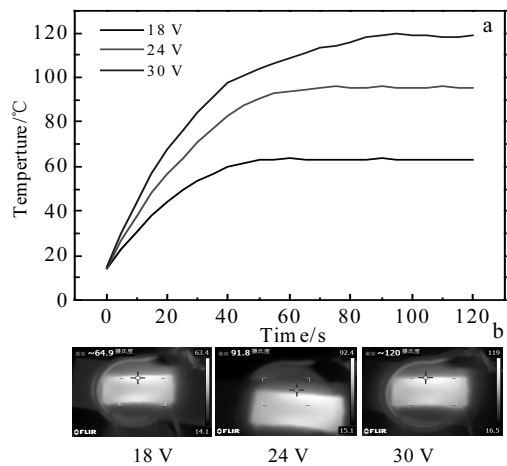


图 9 试样 Ni/PDMS-4 在不同输入电压的温升曲线及红外成像图

Fig.9 Temperature-time curves (a) and infrared images (b) of Ni/PDMS-4 sample electrically heated at different input voltages

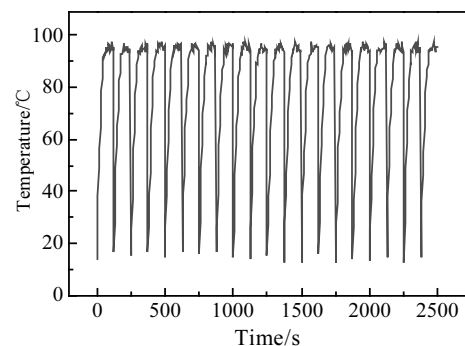


图 10 试样 Ni/PDMS-4 在电压 24V 下电加热循环 20 次温度-时间关系

Fig.10 Temperature-time curves of sample Ni/PDMS-4 electrically heated for 20 cycles at 24 V

具中冻结在一起,随后在室温为 20.6 °C 时,通过感应加热产生热量除冰,记录在输入电压为 18、24 和 30 V 情况下至冰层完全融化的时间。利用红外相机观察温度变化情况可知,融冰过程是由下及上,冰层融化为水的过程可以分为 2 段,一段为冰层温度从 -20 °C 逐渐升高至 0 °C,一段在 0 °C 保持不变,当冰层融化为水后,由于水的热传导性优于冰,且水能更好地包裹发热体,更快地将热量传递给未融化的冰层。根据公式(1)~(3)可知,随输入电压的增加,样品发热功率也随之升高。实际融化时间从 18 V 439 s 减少到 24 V 的 358 s 和 30 V 的 232 s,融冰速率从 18 V 的 0.045 g/s 升高到 24 V 的 0.055 g/s 和 30 V 的 0.086 g/s,验证了其实际除冰的可行性和融冰速率。

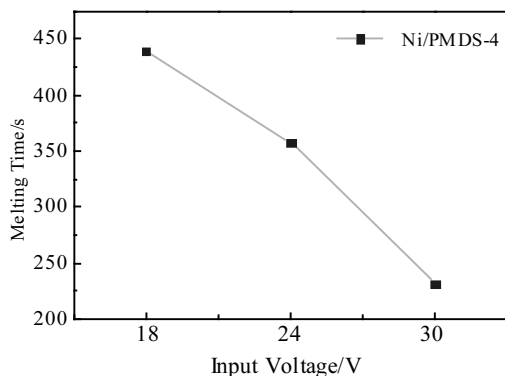


图 11 试样 Ni/PDMS-4 不同电压下的除冰速率

Fig.11 Ice melting rate of Ni/PDMS-4 sample electrically heated at different input voltages

3 结 论

1) 提出一种基于 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料,通过掺杂定量 CNT 用以在内部形成微导电网络,制备出一种可以灵敏测量微小形变以及具有良好涡流热效应的复合疏水材料。

2) 样品 Ni/PDMS-4 的接触角约为 106.5°,相较于 PDMS 的 95.7°提高约 10%,提高了材料的疏水性,防止水滴在表面滞留以至结冰。

3) Ni 的含量越高, Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的涡流热效应越强。感应加热输入电压越高,最高平衡温度越大,在输入电压为 30 V 时,最高平衡温度约为 120 °C,可以有效完成加热及除冰工作。

4) Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料可以在输入电压 24 V 以下稳定循环加热,不会发生热分解反应,具有良好的热稳定性。

5) Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料在飞机特殊的多

颠簸工作环境中,电阻变化很小,且在颠簸结束后,电阻能迅速恢复到初始电阻,进一步验证了 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的可靠性和稳定性。

6) 通过融冰实验验证了 Ni-CNT/LIT-PDMS 复合材料的融冰的可行性,融冰速率从 18 V 的 0.045 g/s 升高到 24 V 的 0.055 g/s 和 30 V 的 0.086 g/s。

参考文献 References

- [1] Tian Tian(田 甜), Wang Yuan(王 渊), Tao Mingjie(陶明杰) et al. *Science Technology and Engineering* (科学技术与工程)[J], 2019, 19(28): 390
- [2] Qin Wenfeng(秦文峰), You Wentao(游文涛), Zhong Mian(钟勉) et al. *Aerospace Materials & Technology* (宇航材料工艺)[J], 2019, 49(1): 86
- [3] International Civil Aviation Organization. *International Civil Aviation Organization Published in Montréal*[M]. Canada: ICAO, 2018
- [4] Zhang F, Gao Y, Yao H et al. *International Journal of Aerospace Engineering* [J], 2019, 2019: 7 851 260
- [5] Boudala F, Isaac G A, Wu D. *Weather and Forecasting*[J], 2019, 34(3): 485
- [6] Zhou Li(周 莉), Xu Haojun(徐浩军), Gong Shengke(龚胜科) et al. *China Safety Science Journal* (中国安全科学学报)[J], 2010, 20(6): 105
- [7] Wang Jin(王 晋), Ji Shuangying(纪双英), Yi Xiaosu(益小苏) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空器制造技术)[J], 2015(S2): 30
- [8] Marbœuf A, Bennani L, Budinger M et al. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 2020, 230: 106926
- [9] Cui W, Pakkanen T A. *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2020, 558: 251
- [10] Xu Z, Qi H, Cheng Y et al. *Applied Surface Science*[J], 2019, 498: 143 827
- [11] Rodziewicz J, Mielcarek A. *Separation and Purification Technology*[J], 2020, 242: 116 761
- [12] Guo Peng(郭 鹏), Feng Yunxia(冯云霞), Meng Xianchun(孟献春) et al. *Materials Review* (材料导报)[J], 2020, 34(6): 6062
- [13] Delorit J D, Racz L. *Water Environment Research*[J], 2014, 86(4): 366
- [14] Hu Linquan(胡林权). *Aeronautical Science and Technology* (航空科学技术)[J], 2016, 27(7): 8
- [15] Wang Y, Xu Y, Su F. *Renewable Energy*[J], 2020, 153: 1396
- [16] Maleki P, Iranpour B. *International Journal of Pavement Engineering*[J], 2019, 20(6): 682

- [17] Wan J, Wu S, Xiao Y *et al.* *Construction and Building Materials*[J], 2018,178: 542
- [18] Lin L, Wang L, Li B *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2020, 385: 123 391
- [19] Wang F, Tay T E, Sun Y *et al.* *Composites Science and Technology*[J], 2019, 184: 107 872
- [20] Redondo O, Prolongo S G, Campo M *et al.* *Composites Science And Technology*[J], 2018, 164: 65
- [21] Sabatier J, Lanusse P, Feytout B *et al.* *Lecture Notes in Electrical Engineering*[J], 2020, 495: 641
- [22] Tarfaoui M, El Moumen A, Boehle M *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2019, 54(2): 1351
- [23] Golovin K, Dhyani A, Thouless M D *et al.* *Science*[J], 2019, 364(6438): 371
- [24] Kim H, Ahn J H, Han S Z *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 832: 155 059
- [25] Zheng X, Zhou X, Xu J *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2020, 55(19): 8251

Inductively Heated Ni-CNT/LIT-PDMS Composite for Ice-phobic/Deicing Applications

Qin Wenfeng, Wang Xinyuan, Li Yayun, Ai Xuan, Fu Jiawei

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: A new composite material based on Ni, CNT and LIT-PDMS was proposed, which can make use of eddy current thermal effect for non-contact de-icing, and maintain its reliability in the complex working environment of aircraft. The Ni/PDMS-4 composite has a static contact angle of about 106.5° , which is hydrophobic and can effectively prevent water droplets from accumulating on the surface of the aircraft and thus freezing. When the input voltage of the induction heating device is 30 V, the maximum equilibrium temperature of its heating is about 120°C , and it can be heated several times with good thermal stability, and only needs 232 s to completely melt 20 g of ice. The internal conductive network of composites has good stability and resilience after the tension at $\varepsilon=0.001$ for 30 times. Ni-CNT/LIT-PDMS composites can complete the aircraft de-icing work to ensure flight safety.

Key words: Ni; carbon nano-tube; polydimethylsiloxane; aircraft de-icing

Corresponding author: Qin Wenfeng, Ph. D., Professor, Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, P. R. China, E-mail: 511293358@qq.com