

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200513.001

石墨烯涂层对直升机旋翼防/除冰组件
传热的影响



分享本文

陈龙*, 刘慧, 张一木

(山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

摘 要: 采用水性和油性石墨烯涂层对复合材料防/除冰组件进行测温及防/除冰实验。针对直升机旋翼对结冰的敏感等特点, 提出了旋翼防/除冰组件包铁表面涂覆石墨烯涂层改性传热性能的方法, 从而提高旋翼防/除冰组件除冰效率。为验证石墨烯涂层对防/除冰组件传热效率具有显著的提高作用, 采用搭建的除冰实验平台并对涂覆的旋翼防/除冰组件进行传热实验及除冰实验。结果表明, 石墨烯涂层对提高防/除冰组件的传热性能具有显著作用。同时, 采用油性石墨烯涂层和水性石墨烯涂层分别进行传热测试, 研究表明油性石墨烯涂层升温速率高于水性石墨烯涂层, 且油性石墨烯涂层平均传热速率为 0.021℃/s, 瞬时最大传热速率为 0.083℃/s, 均高于水性石墨烯涂层, 说明油性石墨烯涂层的防/除冰效果优于水性石墨烯。最后, 通过改变喷涂工艺控制石墨烯涂层厚度进行研究, 研究发现随着石墨烯涂层厚度的增加, 涂层的导热系数逐渐减小, 该实验结果验证了 Balandin 等推导的热导率公式中石墨烯热导率与片层厚度之间的反比例关系。

关键词: 石墨烯涂层; 传热; 防/除冰; 喷涂; 复合材料

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)01-0239-07

Effect of graphene coating on heat transfer of anti-/deicing
component for helicopter rotor

CHEN Long*, LIU Hui, ZHANG Yishu

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, School of
Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The temperature measurements and anti-/deicing experiments of the composite anti-/deicing component were performed with water-based and oil-based graphene coating. In view of the sensitivity of helicopter rotor to icing, a method of modifying the heat transfer performance of rotor anti-/deicing component with graphene coating on the iron surface was proposed to improve the efficiency of anti-/deicing component. In order to verify the effect of graphene coating on the heat transfer efficiency, the temperature measurements and deicing experiments of the coated rotor anti-/deicing components were carried out on the deicing experimental platform. The experimental results show that the graphene coating has a significant effect on improving the heat transfer performance of anti-/deicing component. Meanwhile, the heat transfer of oil-based graphene coating and water-based graphene coating were tested respectively. The results show that the temperature rise rate of oil-based graphene coating is higher than that of water-based graphene coating, and the average heat transfer rate of oil-based graphene coating is 0.021℃/s, the instantaneous maximum heat transfer rate is 0.083℃/s, which are higher than that of water-based graphene coating. The results indicate that the anti-/deicing effect of oil-based graphene coating is better than that of water-based graphene coating. Finally, by changing the spraying process to control the

收稿日期: 2020-03-16; 录用日期: 2020-05-01; 网络首发时间: 2020-05-14 10:08:50
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200513.001>
基金项目: “十三五”装备预研领域基金(61402060404); 山东省自然科学基金(ZR2019BEE068); 机械系统与振动国家重点实验室开放课题资助项目(MSV-2019-13); 山东大学基本科研业务费资助项目(2018GN034)
通信作者: 陈龙, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为石墨烯掺杂及复合材料设计 E-mail: 812612937@qq.com
引用格式: 陈龙, 刘慧, 张一木. 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
Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 239-245(in Chinese).

thickness of graphene coating, it is found that with the increasing of the thickness of graphene coating, the thermal conductivity of the coating gradually decreases. The experimental results verify the inverse proportion relationship between the thermal conductivity of graphene coating and the thickness of the sheet in the thermal conductivity formula deduced by Balandin et al.

Keywords: graphene coating; heat transfer; anti-/deicing; spray coat; composites

直升机在高寒地带及穿过云层过程中会与空气中的过冷水滴发生撞击, 旋翼表面易形成结冰^[1-3]。旋翼表面结冰会导致直升机飞行升力下降、旋翼重量不平衡等问题, 严重影响直升机飞行安全^[4-6]。现阶段主要的防/除冰防护手段是通过在旋翼上安装防/除冰组件, 通过防/除冰组件电加热的方式进行防冰和除冰, 但由于旋翼防/除冰组件传热效率低等问题, 该种方式存在机载能源的消耗大、热惯性大及不易控制等局限^[7-8]。因此, 亟需对防/除冰组件电加热方式的传热效率进行改进, 以满足低能耗防冰及除冰的要求。

近年来, 石墨烯作为单层石墨材料具有优良的导热导电等特性, 被广泛应用于航空航天领域^[9-13]。大量研究表明, 石墨烯涂层具有良好的导电性、导热性及力学稳定性。Wroblewski等^[9]、Prolongo等^[10]和Raji等^[11]分别研究了石墨涂层的导热性能, 以上学者的研究重点是利用石墨烯涂层导电性产生的焦耳热性能。Wang等^[12]制备了一种具有低极化率和导电性的石墨烯纳米带薄膜, 研究表明, 制备的石墨烯纳米带薄膜具有优异的导电及传热性能。秦红梅等^[13]采用物理机械剥离法制备了石墨烯纳米薄片(GN), 并与橡胶复合制备GN/天然橡胶浓缩母粒, 研究表明, 当GN含量为2.0wt%时, GN/天然橡胶复合材料的面内导热率提高了38.1%, 面间导热率提高了36.21%, 导电率提高了36.07%。周宏等^[14]通过氧化和超声波分散制备了氧化石墨烯(GO)纳米片/环氧树脂复合材料, 结果表明, GO纳米片/环氧树脂复合材料的失热稳定性提高, 并发现GO纳米片/环氧树脂复合材料的冲击强度和抗弯性能先提高后降低。

此外, 应用石墨烯材料高导热特性来提高传热效率的研究取得显著进展。Zhou等^[15]利用石墨烯制备自组装的表面, 并在沸腾传热强化方面进行应用, 研究表明, GO具有提高强化传热的效果。Praveen等^[16]通过制备石墨烯纳米片微胶囊相变材料, 并应用到提高散热器传热中, 为了提高微胶囊的传热性能, 分别加入了0.5wt%、1wt%和3wt%的石墨烯纳米片, 并进行对比实验研究, 结果显示, 材料的导热系数由0.192 W/(m·K)提高

到0.379 W/(m·K)。Zhou等^[17]通过改变纳米流体中石墨烯纳米片含量及填充率改善振荡热管传热性能, 结果表明, 以石墨烯纳米片流体为工质的振荡热管具有更好的传热性能。在合适的填充率(分别为55%、62%和70%)下, 石墨烯纳米片流体振荡热管的最大热阻降低率为83.6%, 有效改善了振荡热管的传热性能; Naddaf等^[18]采用多壁碳纳米管和石墨烯对石油基纳米流体进行改性, 通过改性提高了纳米流体的对流换热系数, 并取得较好的传热效果。秦国锋等^[19]采用熔融共混法制备了BN纤维-石墨烯微片/聚丙烯高导热电绝缘复合材料, 研究表明, 石墨烯微片含量为7wt%、100 μm BN纤维含量为20wt%时, BN纤维-石墨烯微片/聚丙烯复合材料的热导率较聚丙烯提高了4.2倍, 同时电绝缘性略有提高。Zhang等^[20]通过石墨烯纸与玻璃纤维复合制备了石墨烯-玻璃纤维/环氧树脂多层加热结构样件, 实验表明, 石墨烯纸与玻璃纤维复合可以达到显著传热效果, 合成的复合材料具有防/除冰功能。Zanjani等^[21-22]将GO片层分别在碳纤维及聚烯烃等基体中进行掺杂并制备样件, 研究表明, 石墨烯片层受控均匀分散在织物内部, 增强了环氧树脂基体和碳纤维之间的界面强度, 并增加了基体与增强纤维之间的热载荷传递效率。Liu等^[23]采用GO悬浮液在酚醛树脂乙醇溶液中与碳纤维共混, 真空干燥和热压制备GO-碳纤维/酚醛树脂, 并通过实验测定热还原石墨烯-碳纤维/酚醛树脂复合材料的压缩强度和模量分别提高了178.9%和129.5%。Kong等^[24]通过将石墨烯氧化物沉积到碳纤维先驱体中, 制备柔性石墨烯-碳纤维复合纸, 测定所制备的碳/碳复合纸具有977 W/(m·K)的超高面内导热系数。

基于以上分析, 结合石墨烯自身的导热性能特点, 采用石墨烯涂层作为传热增强层, 通过石墨烯涂层将复合材料防/除冰组件的温度传递到表面, 加速旋翼表面的积冰融化, 提高旋翼防冰及除冰的效率。同时, 通过制备复合材料旋翼防/除冰组件, 将石墨烯涂层喷涂于复合材料防/除冰组件表面, 研究石墨烯涂层对复合材料旋翼防/除冰组件的传热特性的影响。

1 传热数学模型

根据作者前期研究^[25]表明, 复合材料旋翼防/除冰组件的传热形式主要包括复合材料层间内部传热和旋翼防/除冰组件表面对流换热。表面传热形式为对流换热, 可以通过有限元仿真及实验测量得到。

以复合材料旋翼防/除冰组件的包铁作为研究对象, 其外部冰的类型主要分为霜冰、明冰和混合冰。外部流场的传热类型不同, 对应不同类型的结冰。在无冰状态下, 对流换热是包铁表面外部流场的传热形式。对流换热发生在包铁表面和高速气流之间; 在结冰状态下, 包铁表面存在不同形状的冰。因此, 在结冰条件下包铁表面的传热形式为热传导。

通过分析, 考虑到复合材料内部传热的材料各向异性和材料不同层间主要导热方向的多样性, 建立基于复合材料玻璃纤维层及碳纤维层传热角度的旋翼防/除冰组件内部传热模型公式^[26]如下:

$$T_{wi} = T_{w1} - \phi \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\delta_j}{A \lambda_j}$$
$$= T_{w1} - \phi \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\delta_j}{A (\lambda_{j1} \sin^2 \beta + \lambda_{j2} \cos^2 \beta)} \quad (1)$$

式中: T_{w1} 为电热丝温度; T_{wi} 为旋翼复合材料防/除冰组件第 i 层与第 $i-1$ 层之间的温度; δ_j 为旋翼复合材料防/除冰组件第 $i-1$ 层厚度; A 为第 i 层与第 $i-1$ 层的传热面积; λ_j 为旋翼复合材料防/除冰组件第 $i-1$ 层的导热系数; β 为考虑材料各向异性传热坐标系变换的偏转角。

同时, 石墨烯传热特性可以借鉴 Balandin 等^[27]在室温条件下机械剥离制备的单层石墨烯的导热系数。通过测量, 石墨烯的导热系数范围为 $4\,840 \sim 5\,300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 并推导出热导率 k 计算公式为

$$k = \chi_G (L/2hW) (\delta w / \delta p)^{-1} \quad (2)$$

式中: L 为石墨烯带的长度; W 为片层宽度; h 为涂层厚度; χ_G 为温度系数, 可以表示为 $\chi_G = \delta w / \Delta T$ 。

以上提出的传热数学模型可以对石墨烯涂层传热实验结果进行理论分析; 同时通过所提出的复合材料传热数学模型, 可以对实验方案进行指导, 研究石墨烯涂层厚度对传热效果的影响。

2 实验材料及方法

2.1 材料表征

采用 Quanta 250 FEG 型场发射 SEM 对水性石墨

烯及油性石墨烯材料的微观形貌进行表征及观察。

2.2 材料的制备

采用碳纤维和玻璃纤维制备 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的方形旋翼防/除冰组件 (如图 1 所示), 碳纤维双向预浸布采用江苏杰创碳纤维制品有限公司提供的 JC-3K-T200 织物, 面密度为 $200 \text{ g}/\text{m}^2$, 玻璃纤维预浸布采用山东光威复合材料股份有限公司提供的 G15000 织物, 面密度为 $150 \text{ g}/\text{m}^2$ 。旋翼防/除冰组件采用 6 层 3K 碳纤维双向预浸布制成绝缘层, 传热层由 3 层玻璃纤维预浸布制成。每层材料组件之间采用粘合剂粘合, 粘合剂采用 3M 公司提供的 DP6310NS 型聚氨酯双组份复合材料粘合剂。在绝缘层之间有电热丝加热层并和传热层粘结固定。最后, 通过二次固化方式将整个防/除冰组件在 125°C 的加热箱中加热 1 h 进行完全固化。

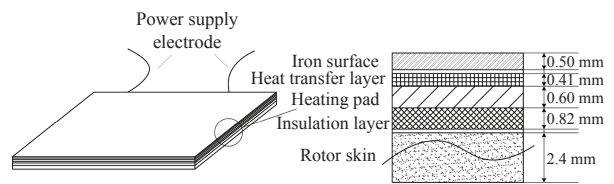


图 1 复合材料防/除冰组件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of composite anti-/deicing component

图 2 为石墨烯涂覆试样, 石墨烯涂层试样采用标准喷涂工艺制备, 采用的石墨烯涂料为苏州恒球石墨烯有限公司提供的水性石墨烯涂料和油性石墨烯涂料, 所使用涂料采用改进 Hummers 方法制备 GO 并在聚乙烯醇缩丁醛等溶剂中分散制备而成, 氧化石墨 (GO) 烯片层为 1-3 层, 单层率大于 95%。涂覆的复合材料涂层试件在 120°C 高温下完成固化 1.5 h。本文采用水性石墨烯涂层和油性石墨烯涂层分别进行实验, 通过对比两者的传热效果, 对不同性状的石墨烯涂层进行分析, 两种石墨烯百分含量相同。

2.3 实验装置

图 3 为搭建的旋翼防/除冰组件除冰实验装置, 旋翼防/除冰组件水平放置于实验平台上, 并通过紧定螺栓夹持固定。为有效地等效旋翼表面积冰所承受的旋翼高转速下所产生的离心力, 采用拉力计施加相当于转子高速旋转所产生的离心力数值相等的水平拉力, 并通过细绳缠绕在积冰四周完成拉力的施加。采用艾德堡 HP-500 型拉力计进行测量, 分辨率为 0.1 N , 最大测量范围为 500 N 。表面温度测量采用 PT100 型热电偶实现, 热电偶



图2 石墨烯涂覆试样

Fig. 2 Sample of graphene coating

的分辨率为 0.5°C ，测量范围为 $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$ ；除冰加热时间采用 ONstart 310 型数字式秒表进行测量，秒表的分辨率为 0.01 s 。

本研究在低温环境下进行防/除冰实验，为近似等效旋翼防/除冰组件结冰环境，采用低温制冷柜进行低温环境制备，低温制冷柜控温精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，制冷温度范围为 $-25\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 性能测试

通过对实验试件进行除冰实验，并记录各实验中的除冰时间，对石墨烯涂层改进旋翼防/除冰组件的防/除冰性能进行除冰实验验证。首先，对比有无石墨烯涂层的导热效果影响，分别在相同实验条件下(制冷温度为 -12°C)测试无结冰的旋翼防/除冰组件表面温度分布及涂覆油性石墨烯涂层的防/除冰组件表面温度分布，分别选取 3 V 、 8 V 及 12 V 作为除冰加热电压。实验中对同一旋翼防/除冰组件按不同除冰加热电压进行加热，在加热 120 s 后提取旋翼防/除冰组件温度平均值数据。

为研究水性石墨烯涂层及油性石墨烯涂层传热效果的不同，通过设计除冰实验对比了不同性状的石墨烯涂层传热及除冰性能。分别将水性石墨烯和油性石墨烯采用相同喷涂工艺(喷涂压力

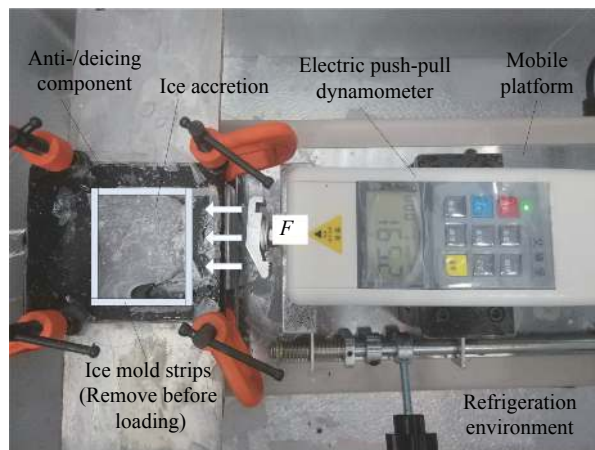


图3 防/除冰实验装置

Fig. 3 Diagrammatic of anti-/deicing experimental apparatus

为 344.75 kPa ，涂层厚度为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$) 涂覆在旋翼防/除冰组件包铁表面。在相同加热方案条件下，对旋翼防/除冰组件包铁表面进行测温及除冰效率测试实验。在制冷温度为 -12°C 、结冰厚度为 5 mm 条件下，采用 3 V 电压加热除冰 700 s ，并每隔 50 s 记录旋翼防/除冰组件表面温度数据。

在除冰实验中针对不同喷雾工艺进行实验研究。通过改变喷涂工艺分别制备喷涂厚度不同的油性石墨烯涂覆试件，分别进行 4 次除冰试验，4 次实验的涂层厚度分别为 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $6.7\text{ }\mu\text{m}$ 。在制冷温度为 -12°C 、结冰厚度为 5 mm 条件下，采用 3 V 电压加热除冰 700 s ，并测量旋翼防/除冰组件包铁防冰表面的最高温度。

3 结果与讨论

图 4 为油性石墨烯涂层及水性石墨烯涂层的 SEM 图像。可见，石墨烯涂层涂覆在包铁表面均匀致密，石墨烯片层分布为团聚的片层堆叠状且均匀分布在石墨烯涂层基体中，并渗入到材料内部。放大局部 SEM 图像可以观察到涂层内部的石墨烯片层分布，表明其主要成分为石墨烯片层，且均匀分布在基体内部。同时观察石墨烯片层可知，对于油性石墨烯涂层，除基体材料为涂料的分散剂外，可观察到两种基体，基体材料分别为聚合物基体及聚乙烯醇缩丁醛基体物质，聚乙烯醇缩丁醛材质呈均匀分布的小圆圈状物质，粒径在几微米到十几微米不等，且分散在聚合物基体及石墨烯片层之间，说明该种材料组成主要以石墨烯材料为主，并具有辅助材料聚合物和聚乙烯醇缩丁醛材料作为涂料基体材料，且传热效果起

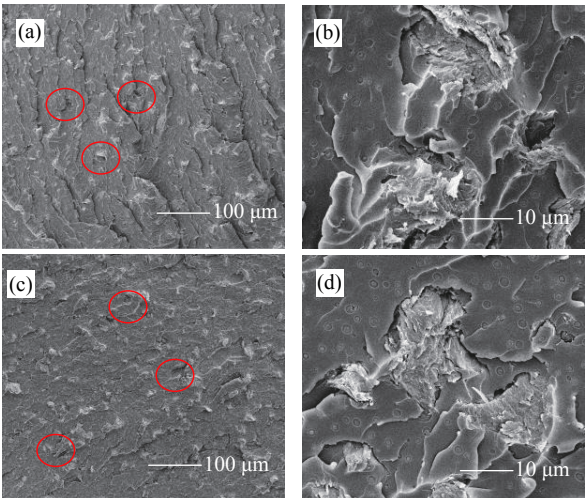


图 4 油性石墨烯涂层基体 (a) 和其石墨烯片层 (b) 及水性石墨烯涂层基体 (c) 和其石墨烯片层 (d) 的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of oil-based graphene coating substrate (a) with graphene sheets (b) and water-based graphene coating substrate (c) with graphene sheets (d)

主要作用的为石墨烯片层结构。

图 5 为旋翼防/除冰组件无石墨烯涂层与有石墨烯涂层的传热效果对比。可知，石墨烯涂层可明显提高防/除冰组件的表面温度，三组实验中旋翼防/除冰组件表面平均温度差分别提高了 0.2℃、1.8℃ 和 2.7℃，说明石墨烯涂层可以改变旋翼防/除冰组件表面的传热性能，提高旋翼防/除冰组件的防冰及除冰效率。

由图 5 还可知，三组实验中旋翼防/除冰组件传热效率分别提高了 50.1%、53.3% 和 58.2%，随着除冰加热电压的增加，石墨烯涂层提高传热效率的比率不断增加，改善旋翼防/除冰组件传热能力越来越显著。同时发现，旋翼防/除冰组件在零度以下环境温度中的传热效率提高比率较小，随着温度升高至零度以上，石墨烯涂层传热效率提高比率逐渐增加，该石墨烯特性有助于直升机旋翼在防/除冰工作后期有效降低机载能耗，保障旋翼防/除冰效果。

石墨烯涂层对提高旋翼防/除冰组件表面温度具有显著作用，从传热学角度分析可知，石墨烯涂层具有优良的导热性能，其导热系数高于旋翼防/除冰组件的导热系数。由式 (1) 也可以看出，防/除冰组件的传热能力取决于内部复合材料的铺设角度及各层传热系数，实验中通过石墨烯涂层的涂敷提高旋翼防/除冰组件的整体传热能力。

图 6 为水性石墨烯涂层和油性石墨烯涂层传

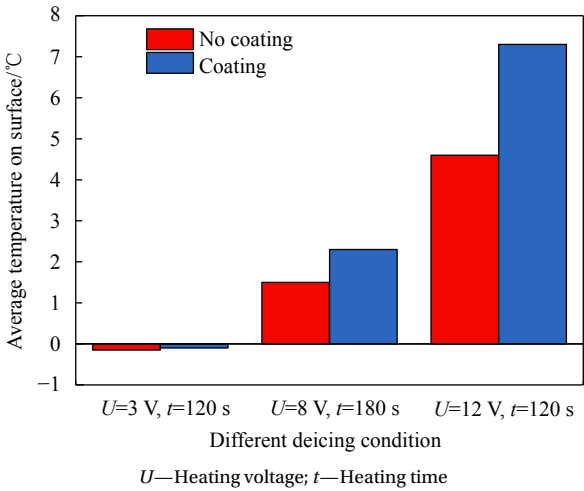


图 5 旋翼防/除冰组件无石墨烯涂层与有石墨烯涂层的传热效果对比

Fig. 5 Comparison of heat transfer effect of rotor anti-/deicing component with and without graphene coating

热温度随时间的变化。可以看出，油性石墨烯涂层温升速率高于水性石墨烯涂层，具有较好的传热性能。油性石墨烯涂层平均传热速率为 0.021℃/s，瞬时最大传热速率为 0.083℃/s；而水性石墨烯涂层平均传热速率为 0.017℃/s，瞬时最大传热速率为 0.032℃/s，说明油性石墨烯涂层平均传热速率及瞬时最大传热速率均高于水性石墨烯涂层。由图 4 可知，油性石墨烯涂层中石墨烯片层分散效果优于水性石墨烯中石墨烯片层分散效果，均匀分布的石墨烯片层有利于提高涂层的传热效率。

表 1 为不同石墨烯涂层的除冰时间和除冰效率。可知，与无涂层的旋翼防除冰组件相比，水性石墨烯涂层的旋翼防除冰组件最大除冰效率提高了 30.4%，油性石墨烯涂层的旋翼防/除冰组件除冰时间明显缩短，除冰效率明显提高，最大除

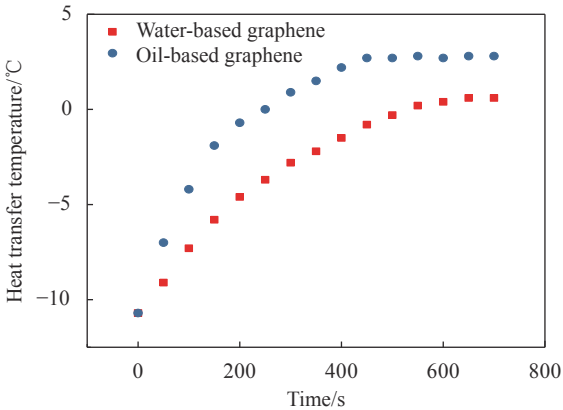


图 6 水性石墨烯涂层和油性石墨烯涂层传热温度随时间的变化

Fig. 6 Heat transfer temperature of water-based graphene coating and oil-based graphene coating with time

表 1 不同石墨烯涂层的除冰时间和除冰效率

Table 1 Deicing time and deicing efficiency of different graphene coatings

Test	Deicing time/s (No coating)	Deicing time/s (Water-based graphene)	Deicing efficiency/% (Water-based graphene)	Deicing time/s (Oil-based graphene)	Deicing efficiency/% (Oil-based graphene)
1	176	125	28.97 ↑	83	52.84 ↑
2	185	137	25.94 ↑	92	50.27 ↑
3	171	119	30.40 ↑	78	54.36 ↑

冰效率提高了 54.36%，除冰时间缩短 41 s。

油性石墨烯涂层在除冰实验中相对于水性石墨烯涂层具有显著优势，除了油性石墨烯涂层在传热性能方面优于水性石墨烯涂层外，还与其喷涂表面形貌有关。由图 4 可知，油性石墨烯基体在微观形貌上出现层叠状态，该种层叠状态在涂层表面降低了涂层表面的表面能。因此，积冰在油性涂层表面的结冰黏附强度小于水性涂层表面。

图 7 为不同涂层厚度的油性石墨烯涂层的传热最高温度。可知，不同厚度的石墨烯涂层在传热方面展现出明显区别，随着油性石墨烯涂层厚度的增加，涂层的最高温度下降趋势较显著，说明随着石墨烯涂层厚度的增加，涂层的导热系数逐渐减小。该实验结果可采用式 (2) 进行阐释，即石墨烯涂层厚度的增加引起涂层内部石墨烯片层的堆叠，而石墨烯材料的导热性能与石墨烯片层厚度呈反比例关系，实验结果验证了石墨烯热导率与片层厚度之间的反比例关系。从导热机制分析图 7 的实验现象，随着石墨烯涂层厚度的增加，石墨烯原子的排列更加混乱，从而增加了石墨烯内部对传热声子传播的抵抗力。因此，声子传播速度的降低极大地影响了石墨烯涂层的导热率。

综上所述，石墨烯涂层在旋翼防/除冰组件上

的应用明显提高了直升机旋翼的防/除冰效率，实验及理论研究表明，油性石墨烯涂层更有利于旋翼防/除冰组件传热效率的提高，研究结果对降低直升机旋翼防/除冰机载能耗具有重要理论指导意义。

4 结论

(1) 通过对石墨烯涂层涂覆在防/除冰组件上进行测温及防/除冰实验，研究了石墨烯涂层对防/除冰组件传热性能的影响。研究表明，石墨烯涂层可以改变旋翼防/除冰组件表面的传热性能，当采用石墨烯涂层时，旋翼表面除冰时间明显缩短，提高了旋翼防/除冰组件的防冰及除冰效率。

(2) 对比油性石墨烯涂层与水性石墨烯涂层可知，油性石墨烯涂层温升速率高于水性石墨烯涂层，具有较好的传热性能，且油性石墨烯涂层平均传热速率为 0.021℃/s，瞬时最大传热速率为 0.083℃/s；而水性石墨烯涂层平均传热速率为 0.017℃/s，瞬时最大传热速率为 0.032℃/s，表明油性石墨烯涂层平均传热速率及瞬时最大传热速率均高于水性石墨烯涂层。

(3) 通过改变喷涂工艺控制石墨烯涂层厚度并进行除冰实验研究，结果表明，随着石墨烯涂层厚度的增加，涂层的导热系数逐渐减小，实验结果验证了式 (1) 中石墨烯热导率与片层厚度之间的反比例关系。

参考文献：

[1] PISCITELLI F, CHIARIELLO A, DABKOWSKI D, et al. Superhydrophobic coatings as anti-icing systems for small aircraft[J]. *Aerospace*, 2020, 7(1): 2.

[2] DEKONINCK L H, AHMADI S F, BOREYKO J B. Passive anti-frosting cables[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118808.

[3] QI Y, YANG Z, CHEN T, et al. Fabrication of superhydrophobic surface with desirable anti-icing performance based on micro/nano-structures and organosilane groups[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 501: 144165.

[4] 杨常卫, 胡和平, 马艳玲, 等. 直升机旋翼桨叶防/除冰技术新思路[J]. *直升机技术*, 2009(3): 47-51.

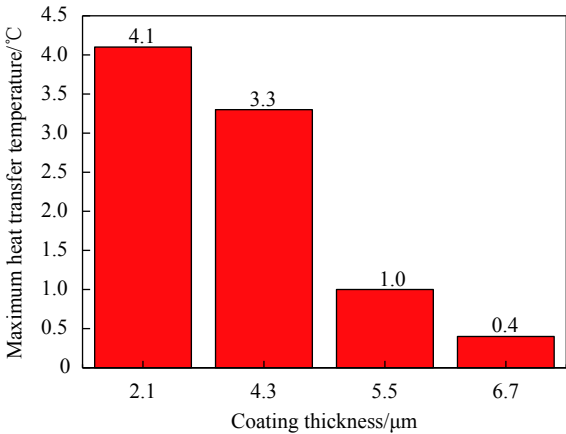


图 7 不同涂层厚度的油性石墨烯涂层的传热最高温度

Fig. 7 Maximum heat transfer temperature of oil-based graphene coating with different coating thicknesses

- YANG C W, HU H P, MA Y L, et al. A new idea on anti-icing and de-icing of helicopter rotor blade[J]. *Helicopter Technique*, 2009(3): 47-51(in Chinese).
- [5] 曹普孙, 张威, 胡偶. 基于CCAR-29附录C的旋翼结冰特性研究[J]. *直升机技术*, 2019(3): 1-4, 9.
- CAO P S, ZHANG W, HU O. Research for rotor icing property based on CCAR-29 appendix C[J]. *Helicopter Technology*, 2019(3): 1-4, 9(in Chinese).
- [6] OVERMEYER A, PALACIOS J, SMITH E. Ultrasonic de-icing bondline design and rotor ice testing[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(12): 2965-2976.
- [7] THOMAS S K, CASSONI R P, MACARTHUR C D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. *Journal of Aircraft*, 1996, 33(5): 841-854.
- [8] 蔺瑞, 颜正国, 刘涛, 等. 60 t钢包浇注过程中汇流旋涡形成机理[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(4): 655-659.
- LIN R, YAN Z G, LIU T, et al. Modeling formation mechanism of vortex during steel casting in a 60 t ladle[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(4): 655-659(in Chinese).
- [9] WROBLEWSKI G, KIELBASINSKI K, SWATOWSKA B, et al. Carbon nanomaterials dedicated to heating systems[J]. *Circuit World*, 2015, 41(3): 102-106.
- [10] PROLONGO S G, MORICHE R, ROSARIO G D, et al. Joule effect self-heating of epoxy composites reinforced with graphitic nanofillers[J]. *Journal of Polymer Research*, 2016, 23(9): 189.
- [11] RAJI A R O, VARADHACHARY T, NAN K, et al. Composites of graphene nanoribbon stacks and epoxy for joule heating and deicing of surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(5): 3551-3559.
- [12] WANG T, ZHENG Y, RAJI A R O, et al. Passive anti-icing and active deicing films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(22): 14169-14173.
- [13] 秦红梅, 邓超然, 李明专, 等. 石墨烯纳米薄片-SiO₂/天然橡胶复合材料的导电导热性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(11): 2683-2691.
- QIN H M, DENG C R, LI M Z, et al. Electrical and thermal properties of nano graphene sheets-SiO₂/natural rubber composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(11): 2683-2691(in Chinese).
- [14] 周宏, 朴明昕, 李芹, 等. 氧化石墨烯纳米片/环氧树脂复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1309-1315.
- ZHOU H, PIAO M X, LI Q, et al. Preparation and properties of graphene oxide nanosheets/epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1309-1315(in Chinese).
- [15] ZHOU W, MAO L, HU X, et al. An optimized graphene oxide self-assembly surface for significantly enhanced boiling heat transfer[J]. *Carbon*, 2019, 150: 168-178.
- [16] PRAVEEN B, SURESH S, PETHURAJAN V. Heat transfer performance of graphene nano-platelets laden micro-encapsulated PCM with polymer shell for thermal energy storage based heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 237-249.
- [17] ZHOU Y, CUI X, WENG J, et al. Experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with graphene nanofluids[J]. *Powder Technology*, 2018, 332: 371-380.
- [18] NADDAF A, HERIS S Z, POULADI B. An experimental study on heat transfer performance and pressure drop of nanofluids using graphene and multi-walled carbon nanotubes based on diesel oil[J]. *Powder Technology*, 2019, 352: 369-380.
- [19] 秦国锋, 张婧婧, 徐子威, 等. BN纤维对石墨烯微片/聚丙烯复合材料导热绝缘性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(3): 546-552.
- QIN G F, ZHANG J J, XU Z W, et al. Effect of BN fiber on thermal conductivity and insulation properties of graphene nanoplatelets/polypropylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(3): 546-552(in Chinese).
- [20] ZHANG Q, YU Y, YANG K, et al. Mechanically robust and electrically conductive graphene-paper/glass-fibers/epoxy composites for stimuli-responsive sensors and Joule heating heaters[J]. *Carbon*, 2017, 124: 296-307.
- [21] ZANJANI J S M, OKAN B S, MENCELOGLU Y Z, et al. Nano-engineered design and manufacturing of high-performance epoxy matrix composites with carbon fiber/selectively integrated graphene as multi-scale reinforcements[J]. *RCS Advances*, 2016, 6(12): 9495-9506.
- [22] ZANJANI J S M, OKAN B S, PAPPAS P N, et al. Tailoring viscoelastic response, self-heating and deicing properties of carbon-fiber reinforced epoxy composites by graphene modification[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 106: 1-10.
- [23] LIU Y, LI Y, YANG Y, et al. Preparation and properties of graphene oxide-carbon fiber/phenolic resin composites[J]. *Carbon*, 2013, 52: 624.
- [24] KONG Q Q, LIU Z, GAO J G, et al. Hierarchical graphene-carbon fiber composite paper as a flexible lateral heat spreader[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(27): 4222-4228.
- [25] CHEN L, ZHANG Y, WU Q. Heat transfer optimization and experimental validation of anti-icing component for helicopter rotor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 662-670.
- [26] CHEN L, ZHANG Y, WU Q, et al. Numerical simulation and optimization analysis of anti-/de-icing component of helicopter rotor based on big data analytics[M]//ZHANG L, SONG X, WU Y. Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems. Singapore: Springer, 2016.
- [27] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3): 902-907.