

石墨烯涂层对直升机旋翼防冰除冰组件传热的影响

那 宇

天津航大雄鹰航空工程有限公司 天津 300308

【摘要】：石墨烯复合材料因其优良特性得到广泛应用，石墨烯涂层在电热除冰领域具有广阔应用前景。采用石墨烯涂层对复合材料防除冰组件进行测温实验，提出旋翼防除冰组件表面涂覆石墨烯涂层改型传热性能方法。采用搭建除冰实验平台进行传热除冰实验，表明石墨烯涂层对提高旋翼防除冰组件传热性能作用显著。瞬时最大传热速率为 $0.083^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，油性石墨烯涂层防除冰效果优于水性。研究发现随着石墨烯涂层增加导热系数减小，验证石墨烯导热率与片层厚度反比例关系。

【关键词】：石墨烯涂层；直升机旋翼；防除冰组件；传热

Effect of Graphene Coating on Heat Transfer of Helicopter Rotor Anti-icing De-icing Components

Yu Na

Tianjin Daxiongying Aviation Engineering Co., LTD., Tianjin 300308

Abstract: Graphene composites are widely used because of their excellent characteristics, and graphene coatings have broad application prospects in the field of electrothermal de-icing. Graphene coating was used to measure the temperature of composite anti-de-icing components, and a modified heat transfer performance method of graphene coating on the surface of rotor anti-de-icing components was proposed. Heat transfer and de-icing experiments were carried out by building a de-icing experimental platform, which showed that graphene coating played a significant role in improving the heat transfer performance of rotor anti-de-icing components. The instantaneous maximum heat transfer rate is $0.083^{\circ}\text{C}/\text{s}$, and the oily graphene coating has better anti-de-icing effect than water. It is found that as the thermal conductivity decreases as the graphene coating increases, the inverse proportional relationship between the thermal conductivity of graphene and the thickness of the sheet layer is verified

Keywords: Graphene coating; helicopter rotor; anti-de-icing components; heat transfer

直升机在高寒地带与空气中过冷水滴撞击，旋翼表面结冰导致飞行升力下降等问题，目前主流的防除冰方案是在直升机旋翼上安装防除冰组件，由于防除冰组件传热效率低，存在热惯性大等局限，亟需改进防除冰电加热方式传热效率。近年来石墨烯材料因具有优良导热等特点在航空航天领域广泛应用，石墨烯涂层具有良好导电性。研究表明 GN 含量为 2.0wt%，面间导热率提高 36.21%。应用石墨烯提高热传导效率的研究取得突破，通过制备石墨烯纳米片微胶囊相变材料，加入 0.5wt% 石墨烯纳米片，材料导热系数提高到 $0.379\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。Kong 等通过石墨烯氧化物沉积到碳纤维前驱体，测定制备碳复合纸具有 $977\text{W}/\text{mK}$ 超高面内导热系数。采用石墨烯涂层为传热增强层，加速旋翼表面积冰融化，通过制备复合材料旋翼防除冰组件，研究层对复合材料旋翼防除冰组件传热特定的影响。

1 直升机旋翼防除冰组件研究

直升机穿越云层飞行在旋翼表面结冰，主旋翼结冰会威胁飞机飞行安全。直升机旋翼桨叶防除冰问题非常迫切，国内外对电热防除冰技术开展积极研究，固定翼飞机采用连续加热模式，直升机旋翼表面可允许承受少量结冰，转动时带动周边气流降低加热效果，直升机工作时对旋翼连续加热消耗功率大于固定翼飞机^[1]。早期原型机电热防除冰组件安装在接近桨叶位置，电加热组件加热下复合直升机旋翼桨叶振动，振动引起破

坏在环境应力中占 27%。如何提高直升机旋翼桨叶电加热组件疲劳强度对直升机全至关重要。

美联航 FAR29 规定连续最大结冰条件，超过瞬时峰值对防护表面影响小，可作为直升机结冰气象条件^[2]。AC29-2A 对结冰气象条件详细阐述，直升机在过冷云层中轻微结冰是不防冰不会发生危险，中度结冰是防冰系统开启可长期飞行气象条件。直升机旋翼除冰系统取悬停状态为设计状态，直升机处于悬停状态旋翼产生升力等于自重，发生结冰主旋翼气动特性变坏，直升机悬停时主旋翼与气流相对速度是旋翼切向速度。主旋翼水滴撞击区在上表面约 9%弦长，主要结冰区上表面约为 7%弦长^[3]。直升机旋翼结冰与温度有关，主旋翼旋转表面冰受到质量与切向速度平方成正比离心力作用，超过旋翼表面粘着力导致旋翼动力不平衡。目前国内对旋翼结冰进行初步研究，主要对不同来流速度下旋翼水滴撞击特性分析，对冰层融化进行数值计算。

为防止直升机旋翼结冰可采用周期性电加热除冰系统，防冰液贮存在储液箱，泵将防冰液打到主旋翼分配环，通过旋翼驻点线附近小孔流到旋翼上。轻度结冰时液体防冰系统可起到防冰作用^[4]。液体防冰系统优点是安装不会影响翼型气动效果，系统有效工作旋翼表面不结冰，硬件设备重量比其他系统具有优势，对飞行员技术能力要求少。液体防冰系统只能在旋翼表

面未结冰的情况下防冰,旋翼表面结冰防冻液沿沟槽流动无法防冰。目前国外直升机最实用的旋翼防除冰技术是电热除冰系统,在直升机进入结冰区域对旋翼结冰区周期性加热,系统包含部件包括主旋翼滑环,故障监控器等^[5]。

2 直升机旋翼防除冰组件石墨烯涂层技术

直升机旋翼加热组件热电阻丝为金属材料,受较大应力产生微观裂纹。直升机旋翼桨叶电加热组件是防除冰主要部件,解决疲劳寿命问题要进行疲劳试验,要求对电加热组件传热特性进行研究,为电加热组件提供实验环境^[6]。飞机在结冰气象下容易产生结冰现象,积冰存在于发动机进气道等重要部位影响飞行安全,飞机除冰技术是重要的研究议题,电热防除冰系统电能耗大,寻找高效节能的电热材料是目前研究的热点。

直升机旋翼防除冰技术分为主动式与被动式,被动式防除冰技术包括机械除冰与溶液防冰,主动式除冰包括电热与微波防冰。电热除冰是目前常用的技术,传统电热除冰技术采用金属丝为加热元件,易造成除冰叶片局部温度过高,随着新型复合材料的发展,石墨烯与叶片材料可以形成界面结合力,石墨烯复合材料加热膜在直升机旋翼防除冰组件上具有很大应用价值。随着材料技术的进步,石墨烯材料被发现后就在各领域受到广泛关注,石墨烯发热材料电阻率较低,具有良好的导热和导电性能,作为加热元件可与复合材料贴合,具有重量轻、热响应快等优点。石墨烯是单层二维面状材料,6个碳原子形成正六环,在石墨烯导电中起到重要作用。石墨烯优异性能得益于其特殊二维结构,石墨烯具有很高的导电性,是目前发现电阻率最小的材料,使得石墨烯在电热领域具有很大发展空间。石墨烯是高机械强度的二维碳原子材料,高导热性引起国内外学者的关注。

飞机电加热防除冰装置是电加热器,将热量传递到待防护表面,伴随气动力作用将残余冰层去除,过冷水滴流经表面凝固成冰开启加热装置,除冰到一定要求关闭设备,不同机翼电加热防除冰方式不同,飞机加电加热除冰通过破坏冰与粘附层应力使冰层在外界作用力下脱落。研究将石墨烯制成加热元件设计电热防除冰装置,准备实验所需制冷等设备材料,将石墨烯电加热组件设定加热功率,试验件放置于工业冷柜设定冷冻温度,开启石墨烯电加热设备观察除冰效果,效果不佳考虑选材制作方式改进。实验采用石墨烯发热膜为电加热基础元件,连接控制端电源,利用小型洒水壶在蒙皮表面喷洒水雾,机翼表面结冰完成打开电加热设备,通电约10min完成除冰实验。

3 直升机旋翼防除冰组件石墨烯涂层传热建模

石墨烯是二维片面结构发热材料,具有良好的导热导电性能,作为加热元件可与复合材料贴合,在电热领域具有广阔应用前景。利用石墨烯复合材料导热性设计加热膜应用于电加热

除冰技术,分析直升机旋翼石墨烯涂层防除冰组件传热进行建模。复合材料旋翼防除冰组件传热形式包括层间内部与对流换热,可通过有限元仿真得到表面传热形式。复合材料旋翼防除冰组件包铁外部冰包括霜冰等,无冰下对流换热是包铁表面外部流场传热形式,结冰下包铁表面存在不同形状冰。考虑复合材料内部传热材料各向异性,建立复合材料玻璃层传热角度旋翼防除冰组件模型公式。石墨烯传热特性借鉴单层石墨烯导热系数,推导导热率 k 计算公式为 $k=XG(L/2hW)(\omega/\rho)-1$, W 为片层宽度, L 为石墨烯带长度, XG 为温度系数, h 为涂层厚度。通过提出复合材料传热数学模型研究石墨烯涂层厚度对传热效果的影响。

4 直升机旋翼防除冰组件石墨烯涂层传热实验

实验采用Quanta250FEG型场发射SEM观察水油性石墨烯材料微观形貌,采用玻璃纤维制备100×100mm方形旋翼防除冰组件,玻璃纤维预浸布采用光威复合材料公司提供G15000织物;碳纤维双向预浸布采用杰创碳纤维制品公司提供JC-3K-T200织物。旋翼防除冰组件采用3K碳纤维双向预浸布制成绝缘层,每层材料采用粘合剂粘合,绝缘层有电热丝加热层,将防除冰组件在125℃加热箱中加热1h进行固化。石墨烯涂层试样采用标准喷涂工艺制备,使用涂层采用改进Hummers法制备GO,氧化石墨烯片层为1-3层,涂覆复合材料涂层试件在120℃下完成固化1.5h。

研究通过对比分析水油性石墨烯涂层传热效果。旋翼防除冰组件水平放置于实验平台,采用拉力机施加离心力数值等于水平拉力,采用爱德堡HP-500型拉力机测量,最大范围为500N,热电偶分辨率为0.5℃,除冰加热时间采用ONstart310型数字式秒表测量。研究在低温下进行防除冰实验,采用低温制冷柜进行环境制备,制冷温度范围为-25~0℃。通过对实验试件进行除冰实验,对石墨烯涂层改进旋翼防除冰组件性能验证,在相同实验条件下测试无结冰防除冰组件表面温度分布,选取3.8V为除冰加热电压,加热120s后提取旋翼防除冰组件温度均值数据。通过设计除冰实验对比不同性状石墨烯涂层传热性能,涂覆在旋翼防除冰组件包铁表面,对旋翼防除冰组件包铁表面测温,结冰厚度5mm下隔50s记录旋翼防除冰组件表面温度数据。通过改变喷涂工艺制备厚度不同油性石墨烯涂覆试件,制冷温度为-12℃下测量旋翼防除冰组件包铁防冰表面最高温度。

5 旋翼防除冰组件石墨烯涂层传热实验分析

石墨烯涂覆在包铁表面均匀致密,石墨烯片层渗入材料内部,涂层内部石墨烯均匀分布在基体。油性石墨烯涂层可观察两种基体,聚乙烯醇缩丁醛材质呈均匀分布小圆圈状物质,分散在聚合物基体间,表明材料具有辅助聚合物作为涂层基体材料。对比分析旋翼防除冰组件有无石墨烯涂层传热效果,石墨

烯涂层提高防除冰组件表面温度,表明石墨烯涂层提高旋翼防除冰组件防除冰效率。随着防除冰加热电压增加提高传热效率比率增加,旋翼防除冰组件在零度下传热效率提高率小,石墨烯特性有助于旋翼防除冰工作降低机载能耗。

表1 不同石墨烯涂层除冰时间和效率

	Deicing time/s		Deicing efficiency%	
	Water-based graphene	Oil-based garphene	Water-based graphene	Oil-based garphene
Nocoating				
176	125	83	28.97 ↑	52.84 ↑
185	137	92	25.94 ↑	50.27 ↑
171	119	78	30.40 ↑	54.36 ↑

石墨烯涂层有效提高旋翼防除冰组件表面温度,石墨烯涂层具有优良导热性能,防除冰组件传热能力取决于内部复合材料铺设角度,通过涂覆提高整体传热能力。油性石墨烯涂层温升速率高于水性,平均传热速率为 0.021°C/s ,水性石墨烯涂层平均传热速率为 0.032°C/s ,油性石墨烯涂层片层分散效果优于水性。水性石墨烯涂层组件最大除冰效率高30.4%。油性涂层除冰效率提高,除冰时间缩短41s。油性石墨烯具有显著优势,与其喷涂表面形貌有关。油性石墨烯微观层叠状态降低涂层表面能,不同厚度石墨烯涂层传热不同,涂层最高温度下降趋势显著,涂层导热系数随涂层厚度增加减小。石墨烯涂层厚度增

加引起片层堆叠。实验验证石墨烯热导率与片层厚度反比例关系。随着石墨烯涂层厚度增加,加大内部对传热声子传播抵抗力。石墨烯涂层在旋翼防除冰组件应用提高效率,油性石墨烯涂层有利于组件热效率提高。

6 结论

本文研究介绍直升机旋翼防除冰组件,探讨直升机旋翼防除冰组件石墨烯涂层技术,进行直升机旋翼防除冰组件石墨烯涂层传热建模实验,通过石墨烯涂层涂覆在防除冰组件测温实验,表明石墨烯涂层可改变旋翼防除冰组件表面传热性能,旋翼表面除冰时间缩短。油性石墨烯涂层温升速率高于水性,平均传热速率为 0.021°C/s ,水性石墨烯涂层平均传热速率为 0.017°C/s ,表明油性石墨烯涂层平均传热速率高于水性涂层。

石墨烯二维面状发热材料电阻率比铜低,具有良好的导热导电性能,可承受较大的变形,可满足多层结构机械封装加固后耦合柔度的要求,在电热领域具有广阔应用前景。电热防除冰技术成为应用广泛的直升机旋翼防除冰技术,对电加热组件研究非常重要。石墨烯制备后因其独特电光热学性质受到科学界的关注,石墨烯产业应用加快发展,石墨烯在直升机上应用不断增多,随着石墨烯的应用实现更舒适环保安全的直升机环境的提供。

参考文献:

- [1] 詹大可,陈明生,邢芳芳,赵澎渤,刘贤良.一种复合式气热-防冰液防除冰系统[P].广东省:CN213862689U,2021-08-03.
- [2] 薛瑞丽,宋欢欢,樊超.飞机橡胶软油箱用石墨烯改性防护涂料的研制[J].橡胶工业,2021,68(06):431-436.
- [3] 李庆国,梁志,徐爱平,李皓.一种具有除冰功能的汽车挡风玻璃组件及汽车[P].浙江省:CN212604990U,2021-02-26.
- [4] 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(01):239-245.
- [5] 詹大可,陈明生,邢芳芳.一种复合式电热-防冰液防除冰系统[P].广东省:CN109720582A,2019-05-07.
- [6] 洪程.直升机旋翼防/除冰电加热组件高频热载疲劳试验方法研究[D].南京航空航天大学,2019.

作者简介: 那宇,男,满族,黑龙江省宁安市,1986.07,本科,工程师,研究方向:航空类。