

文章编号: 1674-8190(2024)04-171-08

# 具有可拉伸性的石墨烯半导体超疏水涂层

淮继茹, 王鹏, 杨梦宇

(华北电力大学保定校区 能源动力与机械工程学院, 保定 071003)

**摘要:** 超疏水性涂层是理想的防冰材料, 超疏水性材料能够推迟冰晶的形成或降低冰黏附强度, 但现有涂层存在机械性能差、性能参数自然衰老快等问题。通过将改性石墨烯部分嵌入弹性体的方法制备新型涂层, 对涂层进行结冰—除冰性能测试对比, 并对涂层的表面结构及化学成分进行分析。结果表明: 新型涂层具有一定的电热除冰能力, 机械性能测试中应变、耐磨、抗老化等方面均表现出优异的性能; 引入涂层的石墨烯是使涂层具备一定主动除冰能力的关键, 该涂层特有的主、被动双重除冰属性是区别于传统的被动涂层特有属性, 不仅为双属性防冰涂层的研发奠定了基础也开辟了防冰涂层新的发展方向。

**关键词:** 超疏水; 电热性能; 防覆冰; 延迟结冰

中图分类号: V25; V224

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.19

## Graphene semiconductor superhydrophobic coating with stretchability

HUAI Jiru, WANG Peng, YANG Mengyu

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

**Abstract:** Superhydrophobic coating is the ideal anti-icing materials, and the superhydrophobic materials can delay the formation of ice crystals or reduce the strength of ice adhesion, but the existing coating has the problems such as poor mechanical property and fast natural aging of performance parameters. The modified graphene is partially embedded into the elastomer to produce a new coating. The icing-deicing performance of the coating is tested and compared, and the surface structure and chemical composition of the coating are analyzed. The results show that the new coating has a certain ability of electric deicing. In the re-mechanical properties test, the coating showed excellent properties in strain, wear resistance and aging resistance. The graphene introduced into the coating is the key to make the coating have a certain active deicing ability. The unique active and passive dual deicing properties of the coating are different from the traditional passive coating unique properties, which not only lays the foundation for the research and development of dual-attribute anti-icing coating but also opens up a new development direction of anti-icing coating.

**Key words:** superhydrophobic; electrothermal property; anti-icing; delayed icing

收稿日期: 2023-07-06; 修回日期: 2023-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51977079); 结冰与除冰重点实验室开放课题(IADL20210401)

通信作者: 淮继茹(1995—), 女, 硕士研究生。E-mail: 220212224026@ncepu.edu.cn

引用格式: 淮继茹, 王鹏, 杨梦宇. 具有可拉伸性的石墨烯半导体超疏水涂层[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 171-178.

HUAI Jiru, WANG Peng, YANG Mengyu. Graphene semiconductor superhydrophobic coating with stretchability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 171-178. (in Chinese)

## 0 引言

机翼是飞机的重要组成部分,但在低温环境下机翼表面很容易积冰<sup>[1-2]</sup>。目前除冰方法主要分为主动除冰法和被动除冰法两类<sup>[3-4]</sup>。主动除冰法包括超声波法<sup>[5]</sup>、光热法<sup>[6]</sup>、电热法<sup>[7-8]</sup>等。电热法因其操作简单、高效的特点<sup>[9]</sup>被广泛应用于工业生产中。

与主动除冰法相比,被动除冰法试图在没有额外能量消耗的情况下防止冰层的积累,一种典型的无能源消耗方法是构造超疏水性表面。超疏水效应的灵感来自于荷叶<sup>[10-11]</sup>。众所周知,荷叶上的水滴几乎呈球状,很容易脱落。因此,超疏水性涂层被认为是理想的防冰材料。进一步的研究结果证明,超疏水性材料可以推迟冰晶的形成,降低冰的黏附强度<sup>[12]</sup>或两者都有<sup>[13]</sup>。然而,大多数超疏水性材料只能在一定程度上延迟结冰的形成。对于航空飞行器,只有在恶劣天气持续几天时才会发生结冰事故。但目前,超疏水材料最多会在一小时后形成冰。然而,应该注意的是,一些新的防覆冰涂层可能会完全阻止冰的形成<sup>[14]</sup>。

近年来,一些研究结果表明,新一代除冰材料应该具有主动和被动除冰功能。例如,Takeshi等<sup>[15]</sup>通过将导电纳米颗粒嵌入氰基丙烯酸乙酯中制备了导电超疏水性涂层,由于焦耳热,它可以迅速融化新形成的霜冻;秦文峰等<sup>[16]</sup>提出了一种基于电热板超疏水表面的协同除冰策略,介绍了一种基于石墨烯超疏水性和焦耳加热协同效应的新型抗冰方法。然而,该涂层在大变形的情况下不能保持超疏水性。飞机在不同风速下飞行时,涂覆在飞机表面的涂层不可避免地会产生变形。

在仿生研究方面,Gou X等<sup>[17]</sup>通过对五种超疏水植物叶片的深入研究介绍了两种超疏水表面结构:二元结构(微纳米结构)、一元结构(微线结构);Knight<sup>[18]</sup>通过对生活在冷水中的鱼类进行研究表明其体内的某些蛋白也具有类似于“荷叶”的微纳米结构。通过对荷叶疏水原理的研究表明,荷叶表面有许多的微小凸起和凹陷,这种特殊的表面结构使得水分子无法在其表面形成稳定而连续的液膜从而达到超疏水的特性<sup>[19-21]</sup>。Xu X等<sup>[22]</sup>利用喷涂的方法将混有棒状二氧化锰的聚苯乙烯悬浊液均匀地喷涂在基底材料上制备出了仿生超疏水纳米复合涂层;Wang P等<sup>[23]</sup>通过将二氧化硅

纳米颗粒部分嵌入到聚酰胺网的微型织物中制备了一种超疏水网格。

本文通过将纳米级改性石墨烯嵌入弹性体的方案来模仿荷叶的超疏水特性,将改性石墨烯部分嵌入弹性体的方法制备新型涂层,对涂层进行结冰、除冰测试,验证涂层主、被动防冰的双重性能。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

石墨烯纳米片(G485308)购自美国 XG Science,采用可交联聚二甲基硅氧烷树脂(Ecoflex 0030,美国 Smooth-On Co.);1H,1H,2H,2H-全氟辛基三乙氧基硅烷(FAS),乙醇和甲基蓝购自中国上海阿拉丁试剂有限公司。所有的化学试剂都是分析级试剂,并按照标准使用。

### 1.2 疏水粉末的制备

在文献[20-23]的基础上制备疏水性石墨烯粉末。首先,将0.2 g FAS加入到8 g乙醇中形成溶液,并搅拌2 h使两者均匀融合后,逐渐向混合溶液中加入0.2 g石墨烯粉末,搅拌溶液8 h以确保混合均匀。然后,将混合溶液均匀涂覆在玻璃片上,常温干燥24 h后,将其取下研磨成粉末便可获得FAS改性石墨烯粉末。

### 1.3 可拉伸超疏水样品的制备

制备可拉伸超疏水样品的示意图如图1所示。首先,将Ecoflex 0030的A部分和Ecoflex 0030的B部分按1:1的质量进行混合,混合液使用旋转搅拌机在基底材料上制备厚度为2 mm的聚二甲基硅氧烷膜(如图1(a)所示)。然后,60℃烘干4 h后制备完样品,利用喷枪将石墨烯粉末喷涂在Ecoflex薄膜上,如图1(b)所示。由于重力的作用,在Ecoflex薄膜上的石墨烯粉末会部分嵌入到Ecoflex薄膜中(如图1(c)所示)。在喷涂过程中,石墨烯粉末被过量注入到Ecoflex薄膜上,此时利用洁净的压缩空气清除掉薄膜表面没有渗透到弹性体中的石墨烯。最后,将涂层在室温下静置24 h后待Ecoflex膜完全固化,即可得到可拉伸超疏水样品(如图1(d)所示)。

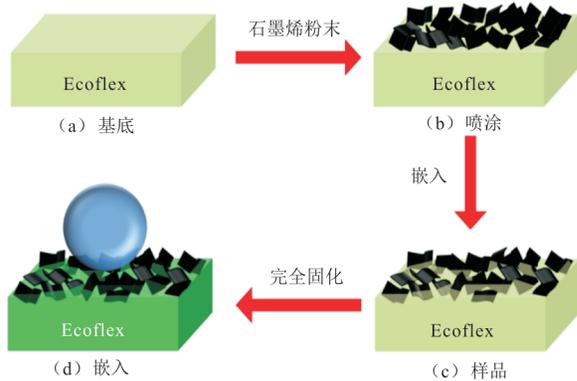


图1 可拉伸超疏水样品制备示流程  
Fig. 1 Stretchable superhydrophobic sample preparation flowchart

#### 1.4 试验设备

利用扫描电子显微镜(SEM, TESCAN Vega3)观察样品的表面微纳米结构,并通过X射线光电子光谱法获取样品的表面化学成分(XPS, Thermo ESCALAB 250XI, USA);使用凯斯利静电计(Keithley 2450)测量样品的表面电导率;使用自制的接触角计(测量范围 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,测量精度 $0.1^{\circ}$ )测量水的接触角和滚动角。

利用数字显微镜(ANDONSTAR/安东星V160)、红外热成像仪(Flir-c2, USA)、人工气候室(QL-HWHS-100, 中国厦门群龙科技有限公司)搭建多功能试验装置来观察样品表面的结冰/除冰过程,如图2所示,并通过数字显微镜来记录液滴冻结/融化的整个过程,半导体冷台用以提供低温环境,红外热成像仪用来监控样品表面温度变化。

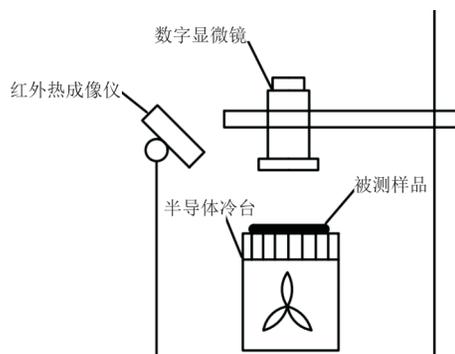


图2 多功能试验台  
Fig. 2 Multifunctional test bench

#### 1.5 结冰/除冰测试

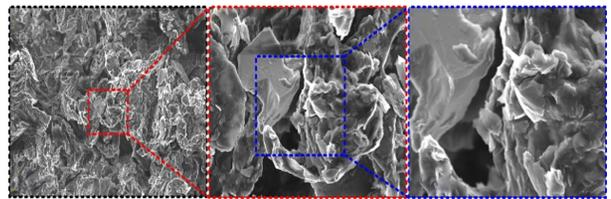
除冰试验根据文献[24]的试验方案加以改进

后进行测试。使用数字显微镜记录冻结过程,并使用红外成像仪测量表面温度。为了记录液滴是如何被冻结的,将样品放在玻璃片上。玻璃片上的表面温度设置为 $-15^{\circ}\text{C}$ ,小心地将水滴(约 $5\mu\text{L}$ )滴在样品表面。

为了模拟涂层在实际自然界中应用时的结冰—除冰过程,将样品放入模拟雨水环境的气候室内(温度 $-5^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度30%),并利用商业生产的保湿剂来模拟雨滴,慢慢地在表面上形成冰层(约 $2\text{mm}$ 厚)来模拟涂层结冰过程。在冰层形成后给涂层施加直流低压电的电热除冰试验中,模拟涂层表面冰层形成后的除冰过程。

#### 1.6 表面物理结构

特殊的表面结构是制备超疏水材料的关键。用扫描电镜来观察涂层表面形态,如图3(a)所示,可以看出:图中出现许多形状不规则的微小凸起,凸起的大小从几微米到几百微米不等。从高倍放大扫描电镜图像(如图3(b)和图3(c)所示)可以推断,凸起由石墨烯厚度和纳米级褶皱组成。石墨烯作为一种典型的二维材料,容易团聚。在这项研究中,石墨烯聚集成微米凸起,凸起的微结构与石墨烯的纳米结构(如图3(c)所示)形成分级结构,这对超疏水性是至关重要的<sup>[23-24]</sup>。



(a)  $20\mu\text{m}$ 电镜图 (b)  $2\mu\text{m}$ 电镜图 (c)  $2\mu\text{m}$ 局部放大图

图3 石墨烯复合物扫描电镜图像  
Fig. 3 SEM images of graphene complexes

#### 1.7 表面化学成分

表面化学组成是超疏水性的另一个关键因素。使用通过X射线光电子光谱法(XPS)测试,从测量光谱检测到了氟 $1s(\text{F}1s)$ 、氧 $1s(\text{O}1s)$ 、硅 $2p(\text{Si}2p)$ 和碳 $1s(\text{C}1s)$ 峰值,如图4(a)所示。对于 $\text{F}1s$  XPS光谱(如图4(b)所示),总峰为一种主要成分( $689.32\text{eV}$ )和一种次要成分( $689.75\text{eV}$ )组成。应该注意的是, $\text{CF}_x$ 来自FAS链,在降低表面能方面起着关键作用。对于 $\text{Si}2p$ 光谱(如图4(c)所示),位于 $104.15\text{eV}$ 的主峰归因于硅羟基或硅

Fx 物种, 而位于 102.64 eV 的其他峰归因于二氧化硅。C1s 光谱(如图 4(d)所示)可以解卷积为 284.50、284.78、285.60、292.00 和 294.27 eV 五个峰值, 分别分配给 C-Si、C-C、C-O、CF<sub>2</sub> 和 CF<sub>3</sub>。

## 2 测试部分

### 2.1 应变测试

在日常生活中, 变形是不可避免的, 因为物体不可避免地会受到力的作用, 特别是机翼在气流作用下产生变形。在本文中, 样品即使在大变形下也保持超疏水性。不同应变比下疏水性能如图 5 所示, 从图 5(a)~图 5(d)可以看出: 随着应变的增加, 水滴几乎保持圆形; 从图 5(e)可以看出: 随着应变的增加, 水的浸润角逐渐变低, 滚动角逐渐变大。然而, 在 300% 的应变下, 接触角仍然高于 150°, 而滚动前仍然低于 10°, 这表明样品具有优异的超疏水性。需要注意的是, 当应变为 300% 时, 可以发现许多白色部分, 表明 Ecoflex 基板在大变形下容易暴露, 超疏水性的保留可归因于分级结构(如图 3 所示)。进一步研究样品在循环拉伸下的稳定性, 如图 5(f)所示, 即使在 100% 拉伸 1000 次后, 样品仍保持超疏水性。

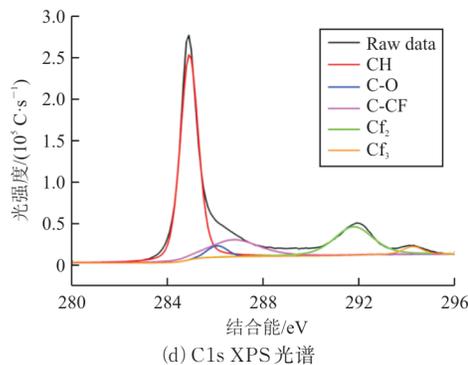
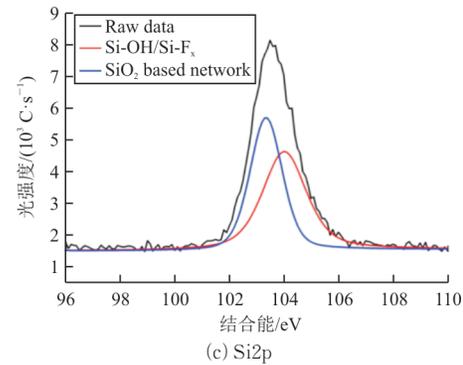
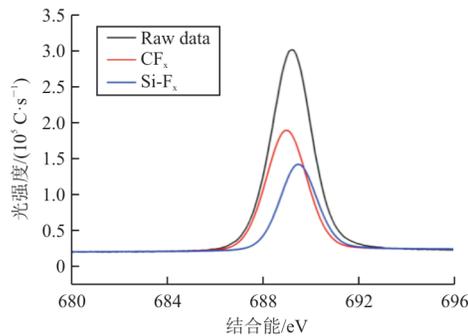
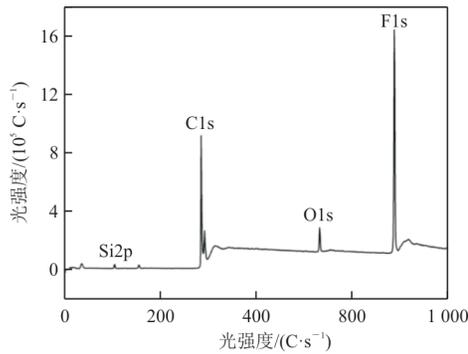
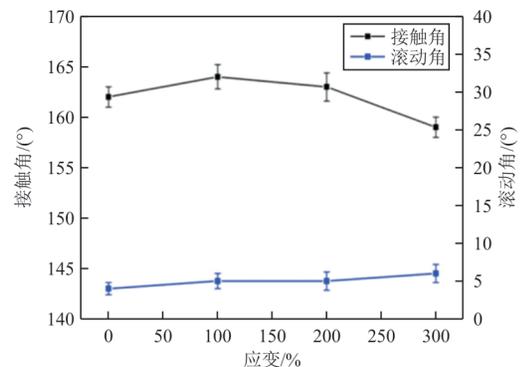
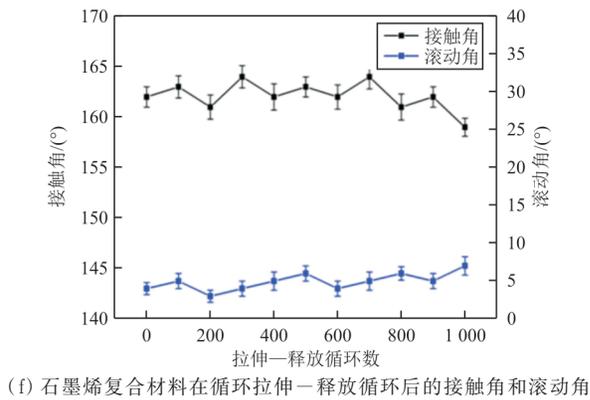


图 4 石墨烯复合材料光谱图

Fig. 4 Spectra of graphene composites





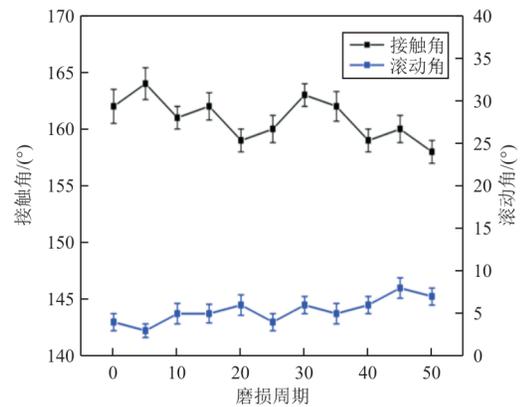
(f) 石墨烯复合材料在循环拉伸-释放循环后的接触角和滚动角

图 5 不同应变比下疏水性能水滴在石墨烯复合材料上的应变

Fig. 5 Hydrophobic properties under different strain ratios

### 2.2 耐磨测试

尽管超疏水材料已经显示出许多特性,但是从实际应用的角度来看,耐磨性是一个必不可少的因素。在本文中,利用物理和化学方法来评估耐磨性。物理实验最广泛使用的砂磨实验, Tian X 等<sup>[25]</sup>进一步指出,磨损距离和施加的法向压力是有利于评估的两个重要指标。本文使用质量 200 g (5 kPa 压力)、150 目 SiC 砂纸研磨样品(如图 6(a)所示),进一步定义每 20 cm 的磨损距离为一个周期。接触角和滚动角数据如图 6(b)所示,可以看出:水接触角逐渐变低,滚动角逐渐变高,然而,水接触角和滚动角仍在超疏水性范围内。与其他研究<sup>[26]</sup>相比本试验所施加的压力更大、移动距离也 longer,其工况比较如表 1 所示,可以看出:本文研究的可拉伸超疏水材料具有优异的机械耐磨性。



(b) 每个磨损循环后的接触角和滚动角

图 6 耐磨测试

Fig. 6 Abrasion test

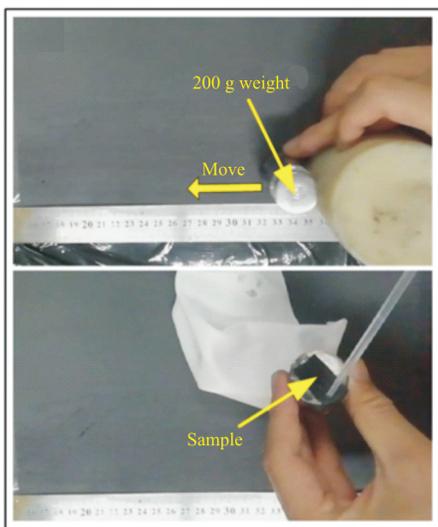
表 1 与其他研究的工况对比

Table 1 Compares the conditions with other studies

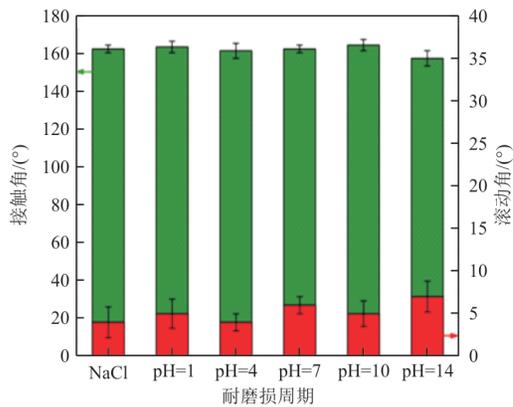
材料	负载/g	距离/m
TiO <sub>2</sub> NPs+黏合剂	100(1.05 kPa)	8.00
PDMS@ZHS	100(1.20 kPa)	3.00
水泥/沙子/氟硅烷	100(1.10 kPa)	8.00
NPs+无机胶	200(2.50 kPa)	10.00
硅树脂和硅溶胶	220(2.67 kPa)	0.80
UHMWPE/SiO <sub>2</sub> /NiO	200(2.25 kPa)	9.65
聚氨酯喷涂+硅烷化坡缕石	200(2.30 kPa)	80.00
NPs and 聚苯乙烯	500(7.84 kPa)	6.75
分层硅结构	300(3.45 kPa)	0.25
PDMS/TiO <sub>2</sub> NPs	100(1.15 kPa)	5.00
Ecoflex 石墨烯涂层	200(5.00 kPa)	10.00

### 2.3 老化测试

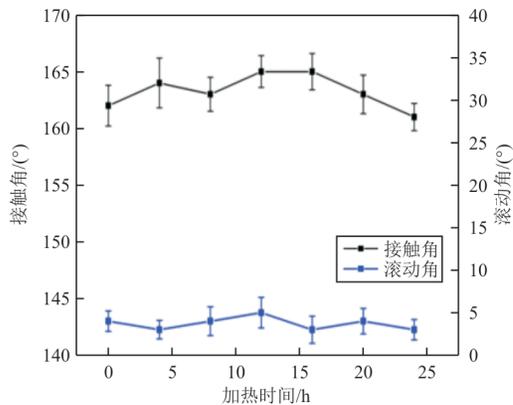
除了潜在的机械损伤,超疏水材料在工程实践中不可避免地会遇到腐蚀性液体的侵蚀。本文对超疏水样品的化学耐磨性进行测试。使用六种液体,分别是 3.5% 的氯化钠水溶液,其酸碱度调节至 1、4、7、10 和 14。该试验首先将样品浸入液体中 24 h,然后用水冲洗。模拟老化后疏水性能,即表面润湿性测量结果如图 7(a)所示,可以看出:水接触角均高于 150°,滚动角均小于 10°,显示出极好的耐磨性。为了进一步证明适用性,测试可拉伸超疏水样品的热稳定性。样品在 200 °C 下加热,表面润湿性和加热时间之间的关系如图 7(b)所示。接触角和滚动角的值表明热处理并没有改变超疏水性。因此,这种超疏水样品具有在高温环境中使用的潜力。



(a) 砂纸打磨过程图像



(a) 在不同腐蚀性液体中浸泡 24 h 后的接触角和滚动角图



(b) 在 200 °C 热处理 0~24 h 后, 制备样品的接触角和滚动角

图 7 模拟老化后疏水性能

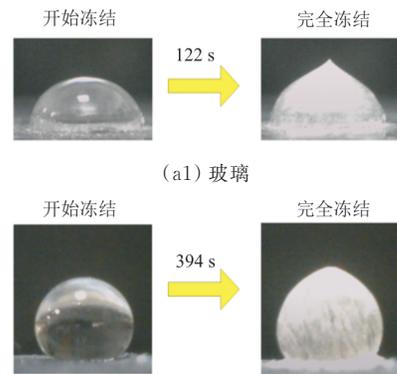
Fig. 7 Simulated hydrophobic performance after aging

### 3 电热除冰能力

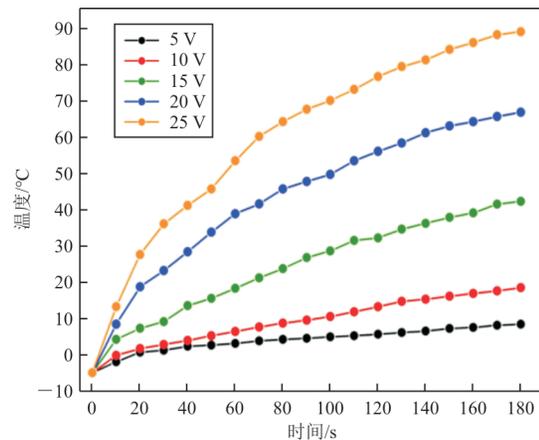
基于上述可拉伸和耐磨性的超疏水性, 进一步研究样品在防冰方面的潜在应用。测量水滴的冻结时间, 并使用干净的玻璃片进行比较, 如图 8(a) 所示, 一个半球形水滴在干净的玻璃表面, 122 s 后完全冻结, 在 394 s 后完全冻结的超疏水表面上发现了近似圆形的水滴。因此, 超疏水表面可以有效地延缓冰的形成, 这一现象归因于卡西态<sup>[23]</sup>。正如卡西态所描述的, 水滴倾向于捕获空气以形成气垫, 这不仅大幅减少了与涂层的接触面积, 而且阻止了热传递。

本文利用石墨烯制备超疏水材料, 石墨烯作为典型的二维纳米材料, 不仅具有优异的界面面积, 而且具有优异的导电性, 进而研究石墨烯超疏水表面的电热性质。使用凯思利静电计(凯思利 2450)测量样品的表面电导率为 4.26 S/m。在提供不同电压后, 温度和时间之间的关系如图 8(b) 所示, 10 V 电压可以将表面温度从  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  迅速上升

到  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而施加 25 V 电压后, 表面温度在 60 s 内从  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  迅速上升到  $53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 180 s 后达到  $89.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温。



(a) 水滴在干净的玻璃和石墨烯复合物上的冻结过程的图像



(b) 不同电压下石墨烯超疏水复合材料随时间变化的温度曲线

图 8 水滴冻结及材料通电升温图

Fig. 8 Water drop freezing and material heating diagram

超疏水涂层虽然可以大幅延缓冰层的形成, 但并不能完全阻止冰层的堆积。进一步将超疏水样品放入模拟旧雨环境的气候室中, 约 50 min 后, 样品表面形成一层冰(约 2.0 mm)。利用电热效应快速融化冰, 施加 20 V 的直流电压, 如图 9 所示, 可以看出: 约 30 s 后出现液态水, 说明冰开始融化, 经过约 115 s, 表面的冰全部融化, 融化的冰很容易脱落, 最后留下干燥和干净的表面, 表明超疏水性得以保留。此外, 进一步研究循环结冰/除冰试验的防冰稳定性。从  $162^{\circ}$  到  $154^{\circ}$ , 接触角逐渐变小; 从  $4^{\circ}$ ~ $7^{\circ}$ , 接触角逐渐变大, 表明超疏水性得以维持(如图 10 所示)。综上所述, 循环结冰/除冰过程没有严重破坏表面结构, 可拉伸超疏水表面在航天系统除冰应用中具有广阔的前景。

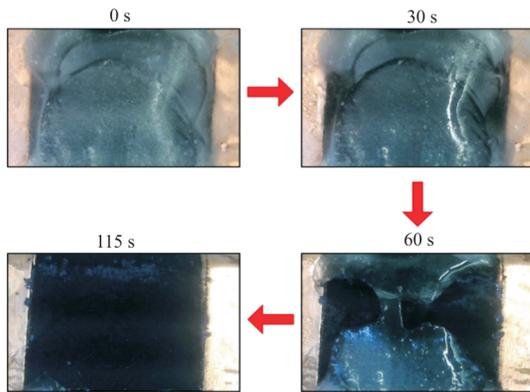


图 9 石墨烯超疏水复合材料的快速电热除冰过程  
Fig. 9 Rapid electrothermal de-icing process of graphene superhydrophobic composites

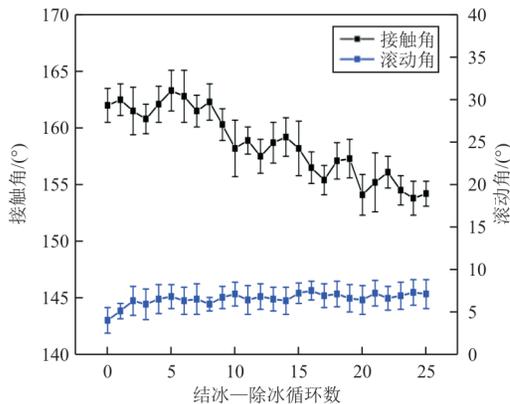
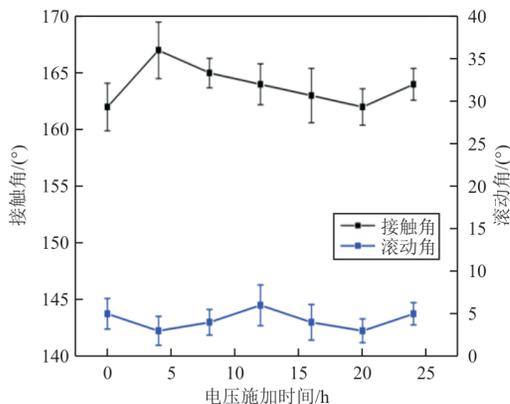
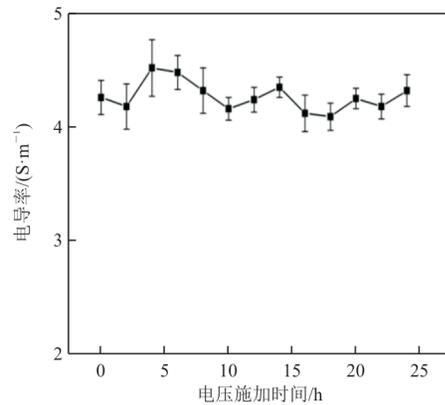


图 10 作为结冰—除冰循环函数的接触角和滚动角图  
Fig. 10 Plots of contact angle and roll-off angle as a function of icing-de-icing cycles

当样品用作电热活性防冰涂层时,应考虑在外部加热下的劣化。在样品上施加 20 V 电压,然后测量表面润湿性和电导率,如图 11(a)所示,可以看出:接触角和滚动角的值仍然在超疏水性的范围内,电导率在 4.00 和 5.00 S/m 之间(如图 11(b)所示)。因此,这种超疏水涂层足够坚固,可以承受外部加热的恶化。



(a) 表面润湿性



(b) 电导率

图 11 施加 20 V 电压 0~24 h 后制备样品的表面润湿性和电导率

Fig. 11 Surface wettability and conductivity of samples prepared after applying 20 V 0~24 h

## 4 结 论

1) 本文制备了一种基于 Ecoflex 和石墨烯的新型超疏水涂层,由于 Ecoflex 弹性体用作基材,该涂层显示出高弹性和延展性,具有优异的拉伸性能。

2) 石墨烯的高界面面积,使得该涂层具有良好的机械耐磨性能,且在拉伸到 300% 后仍保持超疏水性。

3) 石墨烯赋予复合材料优异的电热性能,使得涂层在被施加 25 V 电压后,可以将表面温度迅速升至 89.1 °C。

## 参 考 文 献

- [1] SHEN X, ZENG Y, LIN G, et al. Effects of skin heat conduction on aircraft icing process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 235(10): 1306-1317.
- [2] MA L, ZHANG Z, GAO L, et al. An exploratory study on using slippery-liquid-infused-porous-surface (SLIPS) for wind turbine icing mitigation[J]. Renewable Energy, 2020, 162: 2344-2360.
- [3] LU J, GUO J, JIAN Z, et al. Resilience assessment and its enhancement in tackling adverse impact of ice disasters for power transmission systems [J]. Energies, 2018, 11 (9) : 1-7.
- [4] 王海涛, 毛玉坤. 机翼结冰分析与防除冰系统设计验证 [J]. 航空工程进展, 2016, 7(4): 439-446, 470.  
WANG Haitao, MAO Yukun. Analysis of wing icing and design verification of anti-deicing system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7 (4) : 439-

- 446,470. (in Chinese)
- [5] 王聪. 滇东北高原山地航天装置超声波除冰技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.  
WANG Cong. Research on ultrasonic de-icing technology for transmission lines in the northeast Yunnan plateau mountains [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [6] CHU Z, JIAO W, HUANG Y, et al. FDTD-modified SiO<sub>2</sub>/rGO wrinkled films with a micro-nanoscale hierarchical structure and anti-icing/deicing properties under condensation condition[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 7(1): 1901446.
- [7] 魏杰, 李昊, 张亚男, 等. 石墨烯复合材料在电热防/除冰领域研究进展[J]. *中国材料进展*, 2022, 41(6): 487-496.  
WEI Jie, LI Hao, ZHANG Yanan, et al. Research progress of graphene composites in the field of electrothermal anti/de-icing[J]. *China Advances in Materials*, 2022, 41(6): 487-496. (in Chinese)
- [8] 谌广昌, 纪双英, 赵文明, 等. 直升机旋翼除冰系统加热垫试验研究[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(2): 201-205,211.  
CHEN Guangchang, JI Shuangying, ZHAO Wenming, et al. Experimental study on heating pad of helicopter rotor deicing system [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(2): 201-205,211. (in Chinese)
- [9] YANG Zhiyong, BAO Tian, CHEN Zhi, et al. Model experimental study on de-icing method of bridge pylon beam based on electric heating [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(6): 3793-3798.
- [10] LIU M, WANG S, JIANG L. Nature-inspired superwettability systems[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(7): 17036.
- [11] SI Y, DONG Z, LEI J. Bioinspired designs of superhydrophobic and superhydrophilic materials[J]. *Acs Central Science*, 2018, 4(9): 1102-1112.
- [12] CHENAB K K, SOHRABI B, ESRAFILI M D. pH-sensitive organic diimide materials-based superhydrophobic surface for oil-water separation applications [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 125112.
- [13] FERCHICHI A K, PANABIÈREM, DESPLATS O, et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces on flexible Fluorinated foils by using dual scale patterning[J]. *Materials Research Express*, 2014, 1(2): 025704.
- [14] BOINOVICH L B, EMELYANENKO A M, EMELYANENKO K A, et al. Modus operandi of protective and anti-icing mechanisms underlying the design of longstanding outdoor icephobic coatings[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 4335-4346.
- [15] TAKESHI M, MIZUKI T, KENGO M, et al. Integrated anti-icing property of super-repellency and electrothermogenesis exhibited by PEDOT: PSS/cyanoacrylate composite nanoparticles [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24212-24220.
- [16] 秦文峰, 游文涛, 钟勉, 等. 碳纳米管薄膜电热特性及其除冰性能[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(1): 86-90.  
QIN Wenfeng, YOU Wentao, ZHONG Mian, et al. Electrothermal properties of carbon nanotube films and their de-icing performance [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2019, 49(1): 86-90. (in Chinese)
- [17] GOU X, GUO Z. Superhydrophobic plant leaves with micro-line structures: an optimal biomimetic objective in bionic engineering [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(5): 851-858.
- [18] KNIGHT C A. Adding to the antifreeze agenda [J]. *Nature*, 2000, 406: 249-251.
- [19] SURESH K N, PADMA S R, CHANDRA B N K, et al. A review on biological and biomimetic materials and their applications[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(6): 1-18.
- [20] YONG J, CHEN F, YANG Q, et al. Superoleophobic surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(14): 4168-4217.
- [21] SETHI S K, MANIK G. Recent progress in super hydrophobic/hydrophilic self-cleaning surfaces for various industrial applications: a review[J]. *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 2018, 57(18): 1932-1952.
- [22] XU X, ZHANG Z, GUO F, et al. Fabrication of bionic superhydrophobic manganese oxide/polystyrene nanocomposite coating-science direct [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(1): 11-17.
- [23] WANG P, LI Z, XIE Q, et al. A passive anti-icing strategy based on a superhydrophobic mesh with extremely low ice adhesion strength[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(1): 55-64.
- [24] WANG Pengwei, ZHAO Tianyi, BIAN Ruixin, et al. Robust superhydrophobic carbon nanotube film with lotus leaf mimetic multiscale hierarchical structures [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12): 12385-12391.
- [25] TIAN X, VERHO T, RAS R H A. Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications[J]. *Science*, 2016, 352: 142-143.
- [26] 李自强. 输电线路防冰涂层的研制及性能评测[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.  
LI Ziqiang. Development and performance evaluation of anti-icing coating for power transmission lines [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)