

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

基于疏水 SiO_2 粒子的速干超疏水涂层制备及防结冰性能研究

刘洋¹, 林长亮¹, 宫少波¹, 刘明亮¹, 陆洋²

(1. 航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 飞机设计研究所, 哈尔滨 150066)

(2. 南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016)

摘要: 超疏水涂层因其独特的性能在飞机防结冰领域具有极好的应用前景。本文研发一种具有良好耐腐蚀性能、良好防除冰性能的超疏水涂层, 首先使用正硅酸乙酯制备亲水纳米二氧化硅粒子, 通过聚三氟丙基甲基硅氧烷对其进行疏水改性; 然后将疏水纳米粒子与氟硅树脂结合, 制备水接触角为 158.6° 的超疏水涂层; 最后检验该超疏水涂层的防除冰特性。结果表明: 经过砂纸磨损测试, 经过 50 个周期的磨损后, 该涂层的水接触角仍保持在 148.5° , 展现出良好的延迟结冰性能和除冰性能; 在 -10°C 和 -15°C 的低温条件下, 水滴在涂层表面的冻结时间分别被延长了 205% 和 800%, 与未涂覆涂层的马口铁片相比, 涂覆了该涂层的冰层附着力降低了 91.8%; 且该涂层对不同液体均表现出良好的疏液性。

关键词: 防除冰; 超疏水; 冰层附着力; 纳米二氧化硅

中图分类号: V255⁺.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Preparation of quick-drying superhydrophobic coating based on hydrophobic SiO_2 particles and study of anti-icing performance

LIU Yang¹, LIN Changliang¹, GONG Shaobo¹, LIU Mingliang¹, LU Yang²

(1. Aircraft Design and Research Institute, AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China)

(2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Superhydrophobic coatings have excellent application prospects in the field of aircraft anti-icing due to their unique properties. The aim of this paper is to develop a superhydrophobic coating with good corrosion resistance and anti-deicing properties. Hydrophilic silica nanoparticles were prepared using ethyl orthosilicate and hydrophobically modified by poly. Subsequently, the hydrophobic nanoparticles were combined with fluorosilicone resin to prepare a superhydrophobic coating with a water contact angle of 158.6° . Finally, verify the anti-icing properties of the superhydrophobic coating. The results showed that after 50 cycles of sandpaper wear testing, the water contact angle of the coating remained at 148.5° , demonstrating good delayed icing and de icing performance; At low temperatures of -10°C and -15°C , the freezing time of water droplets on the coating surface was extended by 205% and 800%, respectively. Compared with uncoated tinplate, the adhesion of the coated ice layer decreased by 91.8%; And the coating exhibits good hydrophobicity to different liquids.

Key words: anti-icing; superhydrophobic; ice adhesion strength; nano- SiO_2

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2025-01-03

基金项目: 直升机动力学全国重点实验室基金(2023HALB06710, 2024-CXPT-GF-JJ-093-10)

通信作者: 刘洋(1996-), 男, 博士, 工程师。E-mail: 2933699447@qq.com

引用格式: 刘洋, 林长亮, 宫少波, 等. 基于疏水 SiO_2 粒子的速干超疏水涂层制备及防结冰性能研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-8.

LIU Yang, LIN Changliang, GONG Shaobo, et al. Preparation of quick-drying superhydrophobic coating based on hydrophobic SiO_2 particles and study of anti-icing performance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

0 引言

飞机外表面结冰可能会对机身传感器造成影响,甚至导致传感器失灵,从而影响飞行员对飞机飞行情况的判断,降低飞行员对飞机的操纵性,增加飞机失事的风险;机翼表面冰层的积聚可能导致机翼失速等问题,严重影响飞行安全^[1-3]。2018年2月,一架从莫斯科起飞的飞机因空速管结冰让飞行员产生误判,最终造成飞机坠毁^[4]。飞机结冰还会改变机体的气动外形,导致飞行阻力增加、飞行能耗增加。在直升机旋翼系统中,冰层会改变旋翼桨叶的气动外形和质量分布,降低飞行性能,甚至导致失控、失速和坠毁^[5-6]。因此研究高效的防/除冰策略,对于提升飞机和直升机的安全性、降低飞行能耗具有重要意义。

目前常用的除冰技术主要包括电热除冰和机械除冰两类。电热除冰通过加热管散发出的热量使冰层融化,在重力的作用下剩余冰层从机身表面脱落;机械除冰则主要通过电脉冲法和膨胀法进行除冰。上述方法虽然具有较好的除冰效果,但多次除冰带来的温度变化或材料的振动、膨胀收缩可能造成飞机材料力学性能的下降,还有可能导致材料产生疲劳,进而降低飞机安全性^[7-9]。而且上述防除冰技术通常成本较高且需要较为复杂的外接设备,不满足飞机低成本、轻量化的要求。因此,研究飞机表面结冰及防除冰过程,开发高效、低成本的防除冰技术对飞机至关重要。对直升机而言,不仅能显著提升飞行安全性,有效防止结冰条件下旋翼桨叶结冰,避免因飞行性能下降导致的安全事故;还能大幅降低运营成本,减少除冰过程中的资源消耗和人力成本。此外,先进的防除冰技术还能增强直升机的全天候作战能力,使其在恶劣天气条件下也能正常作业^[10-11]。防除冰涂层具有独特的性能优势,其制造成本较低且无需外加设备,近年来受到广泛关注。其中主要包括超疏水涂层和超滑涂层^[12-14]。但由于超滑涂层的润滑层会随着除冰次数的增加而逐渐被消耗,因此目前研究的重点主要集中在超疏水涂层的设计^[15]。

超疏水涂层的制备工艺受材料体系影响较大,目前主要通过化学刻蚀、阳极氧化、激光刻蚀等工艺在材料表面制备微纳结构,并对其进行疏水化改性以实现超疏水效果^[16-18]。Liu R等^[19]通过激光刻蚀技术在钛合金表面雕刻阵列结构,并在

其表面接枝草状纳米结构,成功制备出具有良好除冰效果的超疏水涂层;Zheng Z H等^[20]在不同基体材料表面制备了聚合物/是模型超疏水涂层,发现涂层在不同基体表面均表现出良好的延迟结冰效果。

与超疏水表面相比,超疏水涂料施工工艺较为简单^[21-24],且对基体材料种类及形状没有特殊要求,具有极好的普适性。在因外力或环境因素造成超疏水涂层失效时,使用表面工程技术制备的表面难以恢复其超疏水性,而超疏水涂料仅需将已经失效的涂料清除后重新喷涂即可。因此,近年来超疏水涂料在防除冰领域的应用受到广泛关注。但目前超疏水涂层在长期服役过程中会出现涂层因外力磨损而失效的问题,使得涂层性能无法长期保留。开发具有良好耐磨性的超疏水涂层对推动超疏水涂层在飞机防结冰领域的实际应用具有重要意义。

本文对聚三氟丙基甲基硅氧烷疏水化改性纳米二氧化硅粒子的方法及工艺流程进行研究,使用疏水纳米二氧化硅和低表面能的氟硅树脂共同制备具有良好疏水效果的超疏水涂层;测试涂层的耐磨性及其面对不同溶液的浸润性,分析该超疏水涂层在低温下的防结冰性能及除冰性能;研究涂层在循环除冰过程中的稳定性,最终获得一种具有良好除冰能力及耐久性的超疏水涂层,并检验该涂层的优良性能。

1 实验材料及实验方法

1.1 实验材料

本文所使用的实验材料和设备分别如表1和表2所示。

表1 实验所需材料
Table 1 Materials for the experiment

材料	规格	厂家
丙酮	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
正己烷	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
氟硅树脂(HLR-Si)	分析纯	上海市东氟化工科技有限公司
无水乙醇	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
氢氧化钠	分析纯	天津市东丽区天大化学试剂厂
正硅酸乙酯	分析纯	天津市福晨化学试剂有限公司
氨水(25 wt. %)	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
聚三氟丙基甲基硅氧烷	工业级	广州吉必盛科技有限公司

表2 实验所需设备
Table 2 Equipments for the experiment

仪器名称	型号	厂家
扫描电子显微镜	ZEISS Gemini 300	卡尔蔡司光学(中国)有限公司
接触角测量仪	SDC-200S	广东达因特智能科技有限公司
数显拉力计	DS2-200N	东莞市智取精密仪器有限公司
激光显微镜	OLS5000	奥林巴斯(北京)销售服务有限公司

实验用水均为电阻率 $\geq 17.5 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$ 的去离子水。由于超疏水涂层在飞机防除冰领域的研究大多处于实验室阶段,且目前飞机表面多使用除冰套及电热手段进行防除冰,其与超疏水涂层在防除冰原理方面有很大不同,两者很难进行横向比较。马口铁片具有良好的导热效率,其表面温度可迅速降低,在低温下可较快冻结。因此对比喷涂超疏水涂层前后的马口铁片试样的防除冰性能可以较为直观地观察到超疏水涂层的防除冰效果。因此本实验基材选用尺寸为 $80 \text{ mm}\times 40 \text{ mm}\times 0.26 \text{ mm}$ 的马口铁片。在实验前需要对马口铁片进行喷砂处理,并使用丙酮进行超声以去除喷砂时残留的沙粒,然后吹干备用。

1.2 实验方法

将一定量无水乙醇与氨水添加到锥形瓶中,使用磁力搅拌器使其均匀混合。然后缓慢滴加正硅酸乙酯并持续搅拌2 h,再向混合溶液中滴加一定量聚三氟丙基甲基硅氧烷,继续搅拌一定时间。使用离心机对混合溶液进行离心,并使用无水乙醇对所得固体颗粒进行多次洗涤。将产物置于烘箱中干燥24 h即可获得疏水纳米二氧化硅粒子。

基于疏水纳米二氧化硅粒子的超疏水涂层制备流程:用天平称取一定量正己烷和氟硅树脂置于研磨罐中,使用二氧化锆作为研磨珠进行研磨以确保氟硅树脂在溶剂中分散均匀。向分散液中加入一定量的疏水纳米二氧化硅粒子并继续研磨10 min,将所得浆料滤出。使用漆膜涂布器将其涂覆于马口铁片表面,在室温下固化5~10 min即可获得超疏水涂层。

使用扫描电子显微镜对疏水纳米二氧化硅粒子进行观察,以确定粒子尺寸分布。使用接触角测量仪对涂层疏水性进行测量,除测量去离子水与涂层的接触角外,还需观察不同溶液在涂层表面的状态。

涂层耐磨性通过砂纸磨损试验进行,将涂有涂层的试样倒扣在1 500#砂纸表面,在试样上放置100 g重物砝码,将试样横向推动10 cm后再纵向移动10 cm,以此为一个磨损周期。每五个周期对涂层疏水性进行测试,观察涂层疏水性变化。

涂层结冰延迟时间测试通过冷冻台进行。将涂层置于冷冻台上降至目标温度,在涂层表面滴加10 μL 去离子水,通过摄像头观察水滴冻结过程。在涂层表面放置内径为8 mm的铝管,向其中注入1 mL的水,待完全冻结后使用推力计将冰柱推倒,记录最大推力,并计算冰层附着力。

2 实验结果及讨论

2.1 纳米粒子制备及疏水改性机理

正硅酸乙酯可在纯碱环境下完全发生水解,水解产生的硅醇又会重新缩聚生成Si-O-Si键。在碱性条件下硅醇之间不会缩聚成网状结构,而是形成团簇状胶体粒子,也就是亲水纳米二氧化硅粒子。

亲水二氧化硅粒子表面含有大量的羟基,在碱性环境下可与聚三氟丙基甲基硅氧烷端基的羟基发生缩聚,使得疏水分子接枝到二氧化硅粒子表面。在经过干燥脱水后,最终生成疏水纳米二氧化硅粒子。

疏水纳米二氧化硅粒子形貌如图1所示,可以看出:粒子粒径分布较为均匀。从图中选取了500个粒子对其粒子尺寸进行了测量,发现粒子粒径主要集中在350 nm左右。为了直观地观察到纳米粒子疏水化改性的效果,分别取一定量未改性和改性粒子置于载玻片表面,向粒子表面滴加染色后的去离子水。结果如图2所示。水滴直接渗入到了改性前的粒子粉末之中,但对于改性后的粒子粉末,水滴收缩成类球状停留于粒子粉末表面。这是由于粒子疏水化所带来的影响。

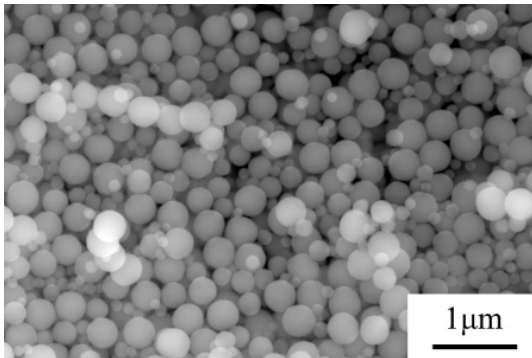


图1 疏水纳米二氧化硅粒子微观形貌
Fig. 1 Microscopic morphology of hydrophobic nano-silica particles

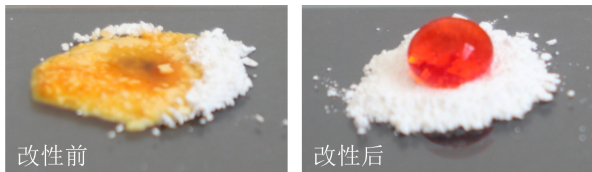


图2 改性前与改性后纳米粒子疏水性对比
Fig. 2 Comparison of hydrophobicity of nanoparticles before and after modification

2.2 疏水粒子制备工艺优化

不同改性时间下所得粒子粉末压片的水接触角如图3所示。

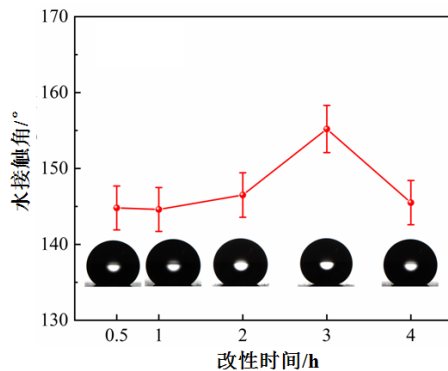


图3 不同改性时间疏水粒子压片接触角
Fig. 3 Contact angle of hydrophobic particles with different modification time

从图3可以看出:改性时间小于3 h时,随着改性时间逐渐增加,粒子粉末压片的水接触角逐渐增加。这是因为此时反应体系中Si-O-Si键生成速率大于分解速率,疏水分子被逐渐接枝到纳米二氧化硅粒子表面。当改性时间超过3 h时, Si-O-Si键分解速率大于生成速率,此时粒子表面接枝的疏水分子含量逐渐减少,因此粒子疏水逐渐

下降。通过对不同改性时间下粒子疏水性的变化,确定疏水纳米二氧化硅粒子最佳改性时间为3 h。

2.3 涂层疏水性分析

分别制备疏水纳米二氧化硅粒子含量不同的涂层,并对其水接触角进行测量,其结果如图4所示。

随着涂层中疏水纳米二氧化硅粒子含量的逐渐增加,涂层疏水性逐渐增加。从图中可以看出,不同粒子含量的涂层表面都存在较为明显的由纳米粒子堆积而成的微观结构。且各组涂层的结构中都没有观察到明显的氟硅树脂,说明此时氟硅树脂仅作为粘结剂均匀分布于粒子表面,将疏水粒子粘结在一起,而氟硅树脂在粒子表面的包覆也可以进一步降低涂层的表面自由能。这样既保证了涂层表面微纳结构的成功搭建,同时避免过量氟硅树脂将疏水粒子所搭建的微纳结构覆盖从而使涂层疏水性下降。不同粒子含量下涂层水接触角分别为:147.1°、151.3°、152.2°、158.5°、153.4°。涂层中疏水纳米二氧化硅粒子含量为20wt.%时疏水性最佳,接触角达到了158.6°。粒子含量继续增加会导致涂层疏水性下降。因此确定涂层中纳米粒子最佳添加量为20wt.%。这可能是因为各组涂层间不同的粒子含量使得各涂层中溶剂占比有所不同,这会导致涂层固化时间略有差异,从而导致各组涂层的微观结构存在差异。

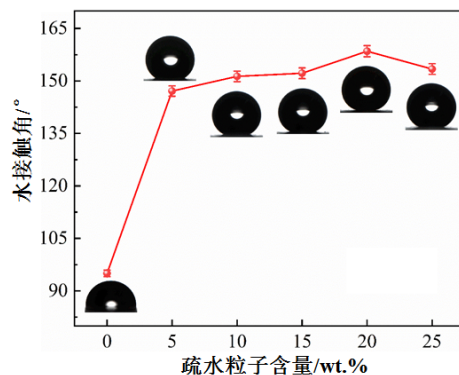
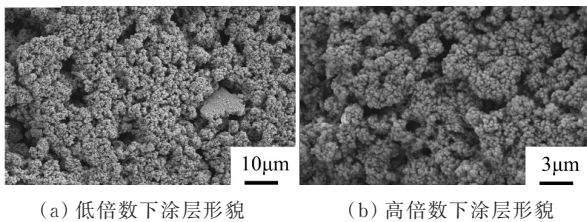


图4 不同粒子含量下涂层疏水性变化
Fig. 4 The change of hydrophobicity of coating under different particle content

涂层制备时所用溶剂为挥发速度较快的正己烷,当涂料被涂覆到基材表面时,纳米粒子并未来

得及因涂料的流平性而平整的分布于基材表面。而是由于正己烷快速挥发以及氟硅树脂的固定作用使得粒子堆积形成了丰富的微米级微观结构。再加上纳米粒子自身的纳米级尺度,形成了微纳共存的表面形貌。且由于粒子的疏水性以及氟硅树脂较低的表面自由能,共同作用使得涂层表面出超疏水性能。同时,由于溶剂较快的挥发速度,使得涂层可在喷涂 10 min 后实现快速固化并投入使用。在涂层出现破损等意外损伤时,可实现快速修补,保证涂层性能的稳定性。

超疏水涂层表面微观形貌如图 5 所示,从图 5(a)可以看出:涂层表面存在微米级的微观结构;从图 5(b)可以看出:这些微米级的形貌是由纳米粒子堆积而成的。因此涂层表面存在明显的微米级和微米级微观结构,这是涂层展现出超疏水性能的关键因素。



(a) 低倍数下涂层形貌 (b) 高倍数下涂层形貌

图 5 超疏水涂层微观形貌

Fig. 5 Microstructure of superhydrophobic coating

为了对涂层表面粗糙度进行更加详细的表征,使用激光显微镜对涂层表面进行观察,其结果如图 6 所示,可以看出:涂层表面存在一些微裂纹,这是由涂层在快速固化过程中的收缩造成的。通过对激光共聚焦形貌结果进行测量分析,涂层表面粗糙度为 1.012 μm,这也证明了涂层的粗糙度确实达到了微米级。

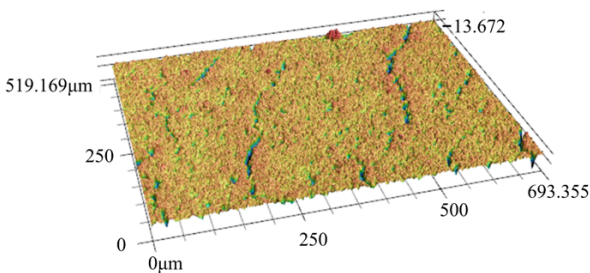


图 6 超疏水涂层表面 3D 形貌

Fig. 6 3D morphology of superhydrophobic coating surface

为了研究其它溶液在涂层表面的状态,分别将 20 μL 氯化钠溶液、盐酸溶液、氢氧化钠溶液、咖

啡以及牛奶滴在涂层表面,其结果如图 7 所示,可以看出:不同液体在超疏水涂层表面均收缩成类球状,并未铺展开。

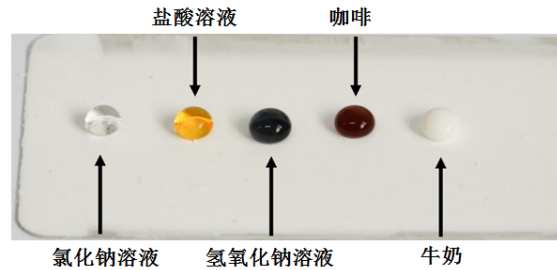


图 7 不同液体在超疏水涂层表面状态

Fig. 7 The surface state of different liquids on the superhydrophobic coating

使用 4 μL 的液滴对不同溶液在涂层表面的接触角进行了测试,得到的实验结果如表 3 所示,可以看出:不同液滴在涂层表面均达到超疏的状态。这代表超疏水涂层具备良好的疏液性,可以应对不同溶液环境的侵蚀。

表 3 不同液体在涂层表面接触角

Table 3 Contact angle of different liquids on the coating surface

溶液	氯化钠溶液	盐酸溶液	氢氧化钠溶液	咖啡	牛奶
接触角/(°)	157.2	150.3	151.7	152.4	153.8

2.4 超疏水涂层耐磨性分析

超疏水涂层在长期服役过程中,其表面微观结构可能会受到外力磨损而被破坏,从而造成涂层丧失超疏水效果。因此耐磨性是超疏水涂层非常重要的一项评价指标。

超疏水涂层砂纸磨损试验结果如图 8 所示,可以看出:随着磨损过程的进行,涂层疏水性出现先下降后升高在下降的趋势。这是因为在磨损初期,砂纸将涂层表面尖端突起打磨掉,使得涂层疏水性有所下降。随着磨损的继续进行,磨损过程在涂层表面出形成了新的微米级微观结构,使得涂层疏水性出现回升。但随着磨损过程的继续进行,涂层表面微观结构逐渐被破坏,涂层疏水性开始下降。最终经过 50 个周期的磨损后(磨损距离为 10 m),涂层水接触角下降到 148.6°,滚动角升高至 4°,此时涂层丧失超疏水性能。

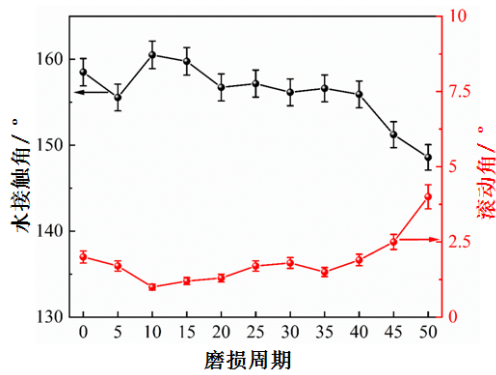


图8 超疏水涂层砂纸磨损实验结果
Fig. 8 Abrasion test results of superhydrophobic coated sandpaper

本涂层与部分相似工作中涂层砂纸磨损结果对比如表4所示,可以看出:本涂层耐磨性能处于行业内优秀水平。

表4 超疏水涂层与相似工作对比结果
Table 4 Comparison results of superhydrophobic coatings with similar work

研究工作	磨损条件		磨损距离/cm	水接触角/(°)	
	重物重量/g	砂纸目数(#)		磨损前	磨损后
本文	100	1500	1000	158	148.5
Hong ^[25]	50	200	400	164	156
Liu ^[26]	100	2000	1500	155	143
Lu ^[27]	100	240	800	164	161
Wang ^[28]	50	150	180	163	153

2.5 超疏水涂层防结冰性能分析

为研究超疏水涂层防除冰性能,分别测试了涂层的结冰延迟能力以及冰层附着力。通过结冰延迟时间可对涂层放结冰性能进行表征,而冰层附着力则主要表征涂层的除冰能力。

马口铁片以及超疏水涂层表面 $10\ \mu\text{L}$ 水滴的完全冻结时间如表5所示,可以看出: $-10\ ^\circ\text{C}$ 时,水滴在马口铁片表面的完全冻结时间为 $1\ 220\ \text{s}$,在 $-15\ ^\circ\text{C}$ 时则仅需 $10\ \text{s}$ 水滴就会被完全冻结。而在超疏水涂层表面,水滴的完全冻结时间分别被延长到 $3\ 660$ 和 $90\ \text{s}$ 。这表明,涂覆超疏水涂层可以使水滴的冻结过程延长 205% ($-10\ ^\circ\text{C}$)和 800% ($-15\ ^\circ\text{C}$)。与未涂覆涂层的马口铁片相比,超疏水涂层展现出了良好的防结冰效果。

表5 水滴完全冻结时间

Table 5 Complete freezing time of water droplets

	$-10\ ^\circ\text{C}$	$-15\ ^\circ\text{C}$
马口铁片	$1\ 220\ \text{s}$	$10\ \text{s}$
超疏水涂层	$3\ 660\ \text{s}$	$90\ \text{s}$

马口铁片表面以及超疏水涂层表面冰层附着力如表6所示,可以看出:马口铁片表面冰层附着力为 $416\ \text{kPa}$,这是由于水滴与马口铁片表面完全接触,两者间存在机械互锁作用,使得冰层与马口铁片之间附着力较高,难以分离。而超疏水涂层表面水滴与涂层呈Cassie-Baxter状态,水和涂层之间存在一层极薄的空气层,降低了涂层与冰层之间的接触面积,从而降低了涂层表面的冰层附着力。这是涂层表现出良好除冰能力的原因。

表6 不同表面除冰能力

Table 6 De-icing ability of different surfaces

	冰层附着力
马口铁片	$416\ \text{kPa}$
超疏水涂层	$34\ \text{kPa}$

为了表征涂层在多次循环除冰过程中的性能,对超疏水涂层进行了循环除冰,并测试涂层表面冰层附着力的变化情况。其结果如图9所示,可以看出:超疏水涂层在10次循环除冰过程中冰层附着力基本保持稳定,这代表涂层具有较好的稳定性。这种稳定性是由于氟硅树脂的粘结作用所提供的。

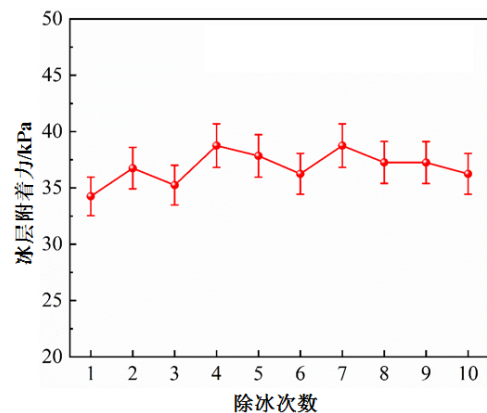


图9 超疏水涂层循环除冰过程中冰层附着力变化
Fig. 9 The change of ice adhesion during the cyclic de-icing process of superhydrophobic coating

3 结 论

1) 聚三氟丙基甲基硅氧烷分子表面—OH 可与亲水 SiO₂ 粒子表面—OH 发生缩合,从而使纳米粒子疏水化。纳米 SiO₂ 粒子疏水改性时,最佳改性时间为 3 h。

2) 通过对不同疏水粒子含量的涂层性能研究,发现涂层疏水性随粒子含量增加先增大后减小,这是由涂层中粒子含量及溶剂占比不同导致粒子堆积形成的微观结构不同所造成的。粒子含量为 20 wt. % 时涂层疏水性能最佳,此时涂层水接触角为 158.6°,涂层表面粗糙度为 1.012 μm,且涂层面对不同溶液均表现出良好的疏液性。

3) 超疏水涂层表现出良好的耐磨性,经过 50 个周期(磨损距离为 10 m)的磨损后才失去超疏水状态。

4) 由于超疏水涂层表面空气层的存在减缓了水—涂层间传热过程,延缓了涂层表面水滴冻结时间,使得超疏水涂层表现出良好的结冰延迟能力。在-10 和-15 °C 时,水滴在涂层表面完全冻结时间分别为 3 660 和 90 s,与马口铁片相比分别延长了 205% 和 800%。与未涂覆涂层的马口铁片相比,冰层附着力降低了 91.8%。

参 考 文 献

- [1] 罗聪. 输电线路覆冰预测及融冰决策研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LUO Cong. Research on ice-coating prediction and ice-melting decision of transmission lines[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] 汪仕靖. 极地航区船舶积冰预报模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Shijing. Research on ship ice accumulation prediction model in polar waters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 李振宇. 输电线路覆冰增长机理和防治策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Zhenyu. Study of icing mechanism and prevention and control strategy of power transmission line [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [4] 王洋洋. 微功耗飞机电脉冲除冰系统理论与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
WANG Yangyang. Theoretical and experimental research of the electro-impulse de-icing system for aircraft[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [5] 常士楠, 刘达经, 袁修干. 直升机旋翼桨叶防/除冰系统防护范围研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 360-364.
CHANG Shinan, LIU Dajing, YUAN Xiugan. Research on protected range of the anti-icing/deicing system for helicopter rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 360-364. (in Chinese)
- [6] 王立国, 周靓, 张颂, 等. 直升机旋翼防除冰技术研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(增刊2): 729458.
WANG Ligu, ZHOU Liang, ZHANG Song, et al. Research progress on anti-icing and de-icing technologies for helicopter rotors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(s2): 729458. (in Chinese)
- [7] JING H, ZHAO C H, GAO F R. Non-stationary data reorganization for weighted wind turbine icing monitoring with Gaussian mixture model[J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 147: 107241.
- [8] 邓燕. 新型防除冰系统的设计和表征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
DENG Yan. Design and characterization of new anti-deicing system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [9] TÔNG T V K, LOUCHEZ P R, ZOUZOU A. Introductory analysis of draining and freezing of de-icing fluids[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(3): 207-214.
- [10] 计皓, 贾宇刚, 岳菁菁. 防除冰技术在试飞工程中的安全性研究[J]. 中国科技期刊数据库(工业 A), 2022(8): 127-130.
JI Hao, JIA Yugang, YUE Jingjing. Research on safety of anti-deicing technology in flight test engineering[J]. China Science and Technology Journal Database (Industry A), 2022(8): 127-130. (in Chinese)
- [11] 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 Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 239-245. (in Chinese)
- [12] 肖春华. 飞机电热除冰过程的传热特性及其影响研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2010.
XIAO Chunhua. Study on heat transfer characteristics and effects of electrothermal aircraft deicing[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2010. (in Chinese)
- [13] SUN Q Q, ZHAO Y, CHOI K S, et al. Molecular dynamics simulation of thermal de-icing on a flat surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116701.
- [14] BENNANI L, TRONTIN P, CHAUVIN R, et al. A non-overlapping optimized Schwarz method for the heat equation with non linear boundary conditions and with applications to de-icing[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2020, 80(6): 1500-1522.
- [15] BUERKIN C K, De VRIES I, RAUPP S M, et al. Investi-

- gation of interfacial instabilities with a two-layer slide coating process[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2017, 14(5): 991-1001.
- [16] XIANG G X, LI S Y, MA B H. Optimal condition for preparing TiO_2 superhydrophobic surfaces on titanium substrate in $\text{NH}_4\text{F}/\text{H}_3\text{PO}_4$ electrolyte by anodization and its self-cleaning effect and anti-icing ability[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 423: 127574.
- [17] LI K Q, ZENG X R, LI H Q, et al. A study on the fabrication of superhydrophobic iron surfaces by chemical etching and galvanic replacement methods and their anti-icing properties[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 458-463.
- [18] TANG L L, WANG N, SUN H H, et al. Superhydrophobic surfaces with flake-like structures and lubricant-infused composite surfaces to enhance anti-icing ability[J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 758: 137903.
- [19] LIU R, CHI Z D, CAO L, et al. Fabrication of biomimetic superhydrophobic and anti-icing $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy surfaces by direct laser interference lithography and hydrothermal treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 534: 147576.
- [20] ZHENG Z H, LIAO C C, XIA Y R, et al. Facile fabrication of robust, biomimetic and superhydrophobic polymer/graphene-based coatings with self-cleaning, oil-water separation, anti-icing and corrosion resistance properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 627: 127164.
- [21] JIN Y, WANG P, HOU K, et al. Superhydrophobic porous surface fabricated via phase separation between polyhedral oligomeric silsesquioxane-based block copolymer and polyethylene glycol[J]. *Thin Solid Films*, 2018, 649: 210-218.
- [22] LIU Z J, REN L N, JING J, et al. Fabrication of robust superhydrophobic organic-inorganic hybrid coating through a novel two-step phase separation method[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 157: 106320.
- [23] PENG P P, KE Q P, ZHOU G, et al. Fabrication of micro-cavity-array superhydrophobic surfaces using an improved template method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 395: 326-328.
- [24] GUO F Q, DUAN S W, WU D T, et al. Facile etching fabrication of superhydrophobic 7055 aluminum alloy surface towards chloride environment anticorrosion[J]. *Corrosion Science*, 2021, 182: 109262.
- [25] HONG S Q, WANG R T, HUANG X B, et al. Facile one-step fabrication of PHC/PDMS anti-icing coatings with mechanical properties and good durability[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 135: 263-269.
- [26] LIU X L, CHEN H W, KOU W P, et al. Robust anti-icing coatings via enhanced superhydrophobicity on fiberglass cloth[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 138: 18-23.
- [27] LU Y, SATHASIVAM S, SONG J L, et al. Robust self-cleaning surfaces that function when exposed to either air or oil[J]. *Science*, 2015, 347(6226): 1132-1135.
- [28] WANG P, CHEN M J, HAN H L, et al. Transparent and abrasion-resistant superhydrophobic coating with robust self-cleaning function in either air or oil[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(20): 7869-7874.

(编辑:马文静)