## SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰 涂层的制备及性能研究



刘宜松,张靖,苏芳芳,刘晨,郑亚萍

西北工业大学,陕西西安 710072

**摘 要:**结冰是生活中一种常见的自然现象,但当冰层在基础设施或者交通工具等表面积聚时,会不可避免地影响它们的安全运行,进而带来设备失效的风险,甚至产生安全事故。因此,研究材料表面的防除冰机制,制备具有防除冰性能的功能性涂层材料,防止设备表面结冰,有助于提高各种设备的使用可靠性,具有重要的现实意义。受大自然中荷叶超疏水性能的启发,本文从提高材料表面疏水性的角度出发,结合羰基铁粉(CIP)深色金属粒子的太阳光响应性,以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基底,通过向其中引入定向CIP,然后再在其表面修饰SiO<sub>2</sub>纳米粒子,最终得到具有微纳结构的SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层。结果表明,涂层的静态接触角高达159.7°±2°,滚动角低至2.7°±1°,其延迟结冰时间长达1120s,冰的黏附强度低至78.33kPa。本文所制备的涂层具有优异的超疏水、自清洁和防除冰性能,且具有一定的太阳光响应性,具有良好的户外防除冰应用前景。

关键词:防除冰;超疏水;微纳结构;冰的黏附强度;结冰延迟时间

#### 中图分类号:TB34/V25

### 文献标识码:A

结冰是自然界中广泛存在的一种普遍的自然现象。一 方面,冰的存在会让我们的生活更加丰富和便捷。然而,在 气温严寒之时,冰霜容易在基础设施<sup>[1]</sup>、交通工具<sup>[2]</sup>和飞行 器<sup>[3]</sup>等上积聚,轻则造成一定的经济损失,重则会导致严重 的安全事故<sup>[4-9]</sup>。因此,研究防除冰技术对我们的生产、生 活具有极其重要的经济、社会和现实意义<sup>[10]</sup>。

传统的防除冰方式主要包括机械除冰<sup>[11-13]</sup>、热力防除 冰和化学防除冰<sup>[14-16]</sup>,也被称为主动除冰方式,存在效率 低、耗能高、成本高、环境污染等问题。高效的防除冰涂层 具有三个特点:(1)促进未结冰的水滴滚落<sup>[17-18]</sup>;(2)延缓结 冰过程的发生,即延长结冰时间;(3)降低冰的黏附强度。

自古以来,自然界就是人类获取灵感从而进行发明创造的源泉。荷叶是一种能够排斥水的植物,1997年,W. Barthlott等<sup>[19]</sup>通过对荷叶的微观结构进行研究,发现荷叶这种特殊的性能主要是来源于其表面大量的微尺度乳状凸起以及表皮蜡质。随后,我国科学家Li Shuhong等<sup>[20]</sup>使用超高分辨率扫描电子显微镜对荷叶进行了进一步研究发现,

#### DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.003

荷叶表面微尺度的乳状凸起上还存在大量的纳米级结构, 提出微米尺度与纳米尺度复合的多层级结构是荷叶具有超 疏水性能的根本原因。

常见的构筑粗糙微纳米结构的制备方法包括模板法、 刻蚀法、喷涂法、原位法和相分离法等。模板法是一种将已 有模板图案复写给表面的方法,Maghsoudi等<sup>[21]</sup>采用压印的 方式在聚二甲基硅氧烷(PDMS)表面复刻出粗糙结构,并 使用常压等离子体处理所得表面后,得到静态接触角大于 150°的超疏水表面。刻蚀法则是一种可控性更高、灵活性 更强的方法<sup>[22-23]</sup>,其主要是通过外界条件(腐蚀性溶剂、等 离子体和激光等)在材料表面刻蚀出粗糙结构,Liu Chao 等<sup>[24]</sup>通过激光刻蚀的方式在氧化锆陶瓷表面蚀刻出周期性 的微纳米结构,再通过硅油后处理,制备得到了超疏水的氧 化锆陶瓷表面。喷涂法是一种十分简便、低廉且适用性广 的方法,它利用喷枪将分散均匀的溶液雾化并喷涂于基材 表面,Peng Huaqiao等<sup>[25]</sup>将 PDMS 与环氧树脂单体的混合 液喷涂在粗糙的炭黑表面,制备得到了接触角高达171.5°

收稿日期: 2023-07-01;退修日期: 2023-11-23;录用日期: 2024-01-05 基金项目:航空科学基金(2018ZF053065)

引用格式: Liu Yisong, Zhang Jing, Su Fangfang, et al. Preparation and performance study on SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS superhydrophobic anti-icing/ deicing coating[J].Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03):20-27. 刘宜松,张靖,苏芳芳,等.SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除 冰涂层的制备及性能研究[J].航空科学技术, 2024, 35(03):20-27.

的超疏水材料PDMS@CB。原位法则是指在涂层表面固化前/过程中,在适当的条件下涂层自身形成定向的微阵列, Chen Kai等<sup>[26]</sup>以苯并恶嗪为基底,加入不同的金属氯化物, 再加入不互溶的两种溶剂,制备了不同相分离程度的苯并 恶嗪粗糙表面,且材料具有超疏水和很强的耐久性。

本文受大自然的启发,从提高涂层的疏水性能的角度 出发,结合羰基铁粉(CIP)深色金属颗粒的光热转化性能, 模仿荷叶表面的多层级结构,以PDMS为基底,引入CIP, 在外加磁场的作用下使得羰基铁粉定向排列,形成具有微 米柱结构的CIP/PDMS涂层,随后在其表面修饰二氧化硅 纳米粒子,形成具有太阳光响应性的SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏 水防除冰涂层;并对涂层的疏水性能、自清洁性能、耐久性 能、延迟结冰能力、冰的黏附强度、结冰除冰循环次数、太阳 光响应性进行了研究。

## 1 材料与试验

#### 1.1 试验材料

试验材料有聚二甲基硅氧烷(PDMS)、羰基铁粉、正硅酸乙酯、氨水、石油醚和无水乙醇。

#### 1.2 SiO<sub>2</sub>纳米粒子的制备

采用 Stöber 法来制备不同粒径的 SiO<sub>2</sub>纳米粒子。在 500mL 烧杯中依次加入 48mL 无水乙醇、18mL 的氨水、 74mL的H<sub>2</sub>O,搅拌 15min。同时,在另一烧杯中加入一定量 无水乙醇、正硅酸乙酯,搅拌 15min之后将正硅酸乙酯的无 水乙醇溶液倒入盛有氨水和去离子水的烧杯中,搅拌 2h 后,停止反应。将反应所得产物离心,并用无水乙醇对产物 进行洗涤,干燥研磨得到 SiO<sub>2</sub>纳米粒子。

#### 1.3 CIP/PDMS 涂层的制备

选用25mm×25mm的正方形玻璃片作为涂层的基底。 将PDMS的A、B两组分以10:1的质量比混合均匀后,使用 涂膜器采用刮涂的方式,选用400µm厚度在玻璃片上预先 涂覆一层纯PDMS,150℃条件下等待20min使其固化。将 PDMS的A、B两组分与CIP以10:1:*X*(*X*=0,4,8,9,10,12, 16,20)的质量比混合均匀后,采用旋涂的方式,将PDMS与 CIP的混合物旋涂在预涂覆了纯PDMS的玻璃片上。随 后,将所得玻璃片置于均匀磁场中使CIP定向排布,并于 150℃高温烘箱中固化20min,最终得到CIP/PDMS涂层。

#### 1.4 SiO2-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层的制备

如图1所示,将一定量的SiO<sub>2</sub>纳米粒子均匀分散在环 己烷/无水乙醇的混合溶剂里,将具有微米柱结构的CIP/ PDMS涂层浸没在含有SiO<sub>2</sub>纳米粒子的环己烷/无水乙醇 混合溶液中,在20℃水浴温度下以100r/min的速率将其置 于恒温振荡器中6h后取出,使用无水乙醇溶液将其表面冲 洗后晾干,即可得到SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层。



图1 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层制备的技术 路线图

Fig.1 Schematic of the preparation process to obtain SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS superhydrophobic anti/deicing coating

#### 1.5 表征方法

使用高分辨透射电镜对 SiO<sub>2</sub>纳米粒子和 CIP 颗粒的微 观形貌进行表征。采用接触角测量仪测试涂层的接触角与 滚动角。使用聚焦离子/电子双束电镜(FIB)对 CIP/PDMS 滚员与 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层的微观形貌进行表征。采 用图 2 所示的装置进行冰的黏附强度(见图 2(a))、结冰延 迟时间及涂层耐摩擦性测试(见图 2(b))。采用 IRS-S6 红 外热成像仪对样品的太阳光响应性进行表征。



## 2 结果分析

#### 2.1 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层疏水性能

只具有微米柱结构的CIP/PDMS涂层最低滚动角大于 20°,不利于水滴的滚落。为了进一步降低其滚动角,使水 滴能够比较容易滚落,模仿荷叶的微纳结构,对其表面进行 SiO<sub>2</sub>纳米粒子修饰。图3(a)为300nm的SiO<sub>2</sub>纳米粒子,图 3(b)为30nm的SiO,纳米粒子,图3(c)为SiO,-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层的静态接触角图示,图3(d)为SiO<sub>2</sub>-CIP/ PDMS超疏水防除冰涂层表面动态黏附图示。如图3(a)、 图 3(b) 所示, 所使用 SiO, 纳米粒子的尺寸约为 300nm 和 30nm。通过对具有微米柱结构的CIP/PDMS涂层进行不同 尺寸SiO,纳米粒子的修饰后,发现当选用CIP含量X=9、 SiO,纳米粒子尺寸为300nm时,所制备的SiO,-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层表现出最优异的超疏水性能,如图3(c) 所示,其静态接触角高达159.7°±2°,滚动角低至2.7°±1°。 研究了水滴在超疏水防除冰涂层表面的动态黏附性能,如 图3(d)所示,将针头水滴与超疏水表面接触后,水滴无法黏 附在涂层表面并能够轻松提起,显示出超疏水表面与水滴 之间极小的黏附力,进一步说明了涂层表面优异的超疏水 性能。因此,本文选用CIP含量X=9、修饰SiO,纳米粒子尺 寸为300nm的涂层进行后续试验。



Fig.3 TEM diagram of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and superhydrophobic properties of SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS coatings at CIP content X=9

为进一步说明所制备涂层优异的超疏水性能,将所制备涂层浸没入水中,可以观察到明显的"银镜现象",如图4(a)所示;当涂层从水中拿出时仍然保持干燥状态。在所制备涂层表面滴加不同液体,液滴均呈现球状(见图4(b)),包括钙镁试剂溶液(见图4(b1))、甲基橙溶液(见图4(b2))、亚甲基蓝溶液(见图4(b3))、牛奶(见图4(b4))、酸

奶(见图4(b5))、咖啡(见图4(b6))、HCl溶液(见图4(b7))、NaOH溶液(见图4(b8))、KCl溶液(见图4(b9))。 将涂层以较小角度(15°)倾斜,液滴均无法停留在涂层表面 并迅速滚落,如图4(c)所示。以上现象说明涂层具有优异 的超疏水性能。



图4 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层的超疏水的光学照片 Fig.4 Optical photograph of superhydrophobic properties of SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS superhydrophobic anti-icing coating

对CIP/PDMS涂层和SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂 层的形貌进行观察,以探讨涂层的防除冰机理,如图5所 示。可以发现,CIP/PDMS涂层的表面布满了微米柱结构 (见图5(a)、图5(b)),而SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂 层表面布满了凸起的微米柱结构,在凸起的微米柱表面附 着大量的SiO<sub>2</sub>纳米粒子((见图5(c)俯视图、图5(d)侧视图 以及图5(e)~图5(f)局部放大图),在微米柱与SiO<sub>2</sub>纳米粒 子的共同作用下,涂层具有微纳米结构,赋予涂层优异的超 疏水性能。

## 2.2 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层的超疏水耐久性 能和稳定性能

为了测试所制备超疏水涂层的耐磨性能,分别选用 50g、100g砝码置于涂层上,将涂层正面与砂纸接触,通过拉 动涂层使得砂纸与涂层产生相对位移。本文所使用的砂纸 为600目,每摩擦10cm记为一次摩擦。经过5次摩擦之后, 负重50g和100g的涂层的CA依然保持在150°以上,SA保 持在10°以下,如图6所示。经过10次摩擦之后,负重50g 和100g的涂层的CA略有降低,但依然保持在150°以上,其 中负重100g的涂层SA上升至19°±4°。

为了测试涂层表面SiO<sub>2</sub>纳米粒子附着的稳定性,将SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层浸泡在无水乙醇中,每超声处理



图 5 涂层微观形貌的 SEM 图示(X=9) Fig.5 The SEM images of coating(X=9)



图6 涂层经过600目砂纸打磨之后静态接触角和滚动角 的变化

Fig.6 The changes of coating's contact angle and sliding angle under the friction of 600 mesh sandpaper

5min,测试一次涂层的静态接触角和滚动角。静态接触角 和滚动角随超声时间延长的变化趋势如图7所示。由图7 可以看出,随着超声时间的延长,涂层的滚动角逐渐增大, 但其在超声的前25min里,能够保持静态接触角大于150°, 滚动角小于10°,这说明了SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层表面SiO<sub>2</sub> 纳米粒子的附着较为稳定。

#### 2.3 结冰除冰性能及自清洁性能

在测试冰的黏附强度时,将带有冰柱的涂层固定在冷 台上,通过移动测力计使得冰柱从材料表面脱除,将水平剪



图7 涂层浸没在无水乙醇溶液中超声处理时,涂层表面 静态接触角和滚动角的变化

Fig.7 Changes in static contact angle and rolling angle of the coating surface when the coating was immersed in absolute ethanol solution under the ultrasonic treatment

切力作为冰对基底的黏附力F,并测量得到冰与基底的接触面积S,通过公式 r=F/S即可得到冰的黏附强度。如图8(a)所示,Al片、玻璃片和纯PDMS表面的冰黏附强度分别为329.43kPa、238.47kPa和182.83kPa,而SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层具有最低的冰黏附强度,仅为78.33kPa。一方面是由于水滴与涂层之间存在空气层,结冰之后,这种状态依然能够存在,因此冰柱与涂层的实际接触面积远远小于100mm<sup>2</sup>,如图8(d)所示,而冰的黏附强度计算公式中接触面积S依然为100mm<sup>2</sup>,比实际接触面积大,计算得到其具有最低的冰黏附强度;另一方面是由于涂层具有较低的表面能,因此与冰柱之间的相互作用力较小,使得公式中的F较小,从而使得冰的黏附强度降低<sup>[27]</sup>。

将样品放置于-15℃的冷台上,在其表面滴一滴100µL 的水滴,观察其结冰过程并记录其延迟结冰时间。如图 8 (b)所示,相较于AI片、玻璃片、PDMS涂层三种表面,SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层具有最长的延迟结冰时间, 长达1120s,是AI片的21.5倍。SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防 除冰涂层表面的微纳结构能够吸附空气,水滴与涂层表面 之间存在空气垫,空气的导热系数为0.024W/(m·K),是热 的不良导体,因而阻止了热量传递,从而极大地延长了结冰 时间;微纳结构使水滴与涂层的接触面积降低,因而冰的成 核面积较小,这限制了结冰膜的进一步扩张,从而使得结冰 时间延长<sup>[21]</sup>。对 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层进行 结冰/除冰循环性能测试,如图 8(c)所示,发现随着结冰除 冰循环次数的增加,涂层表面冰的黏附强度呈上升趋势。 在第5次结冰/除冰循环过程中,冰的黏附强度已达到 184.73kPa,与纯PDMS的冰黏附强度相差无几,这是由于 在结冰除冰循环过程中,涂层表面的微纳结构容易被损坏, 如图8(d)所示。此外,冰会与残留微纳结构产生锚合作用, 使涂层的冰黏附强度迅速增大。

对SiO2-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层自清洁性能进





行测试,从图9中可以看到,涂层表面的木屑很容易就被水 流冲走且没有残留,冲洗之后,表面依然保持干净状态,这 说明其具有良好的自清洁性能。

## 2.4 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层的太阳光响应 性能

由于SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水防除冰涂层中添加了CIP 颗粒,所以涂层呈现深灰色。在光热转换领域,金属粒子具 有良好的吸热性能<sup>[28]</sup>,因而SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层具有一定 程度的太阳光响应性,这对其在防止结冰、帮助除冰过程中 会产生良好的辅助作用。将SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层、CIP/ PDMS涂层、PDMS涂层、玻璃板放置在室外温度为35℃的 8月下旬下午3时的太阳光下照射10min后,使用红外热成 像仪对其表面温度进行分析,其结果如图10所示。由图10 可以发现,含有CIP的涂层表面温度较高,而SiO<sub>2</sub>-CIP/ PDMS涂层的温度比CIP/PDMS涂层的温度略低,这是由 SiO<sub>2</sub>纳米粒子对太阳光的反射造成的。

为了进一步证明SiO2-CIP/PDMS涂层的太阳光响应





(b) 滴加清水

(a) 木屑附着





性,将SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层、CIP/PDMS涂层、PDMS涂层、 玻璃板放置在红外烘烤灯下5min,如图11所示。



图10 不同基材对于太阳光响应性的热成像照片





图11 光热试验装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of the photothermal experimental setup

发现所得结果与放置在太阳光下的结果一致。图12 (a)、图12(b)所示为涂层表面温度随时间变化趋势,可以看 出,在距离红外烘烤灯10cm和20cm时,含有CIP的涂层均 具有较高的表面温度,由于SiO<sub>2</sub>纳米粒子的存在,SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS涂层的表面温度稍低于CIP/PDMS涂层。涂层 具有太阳光响应性,有助于冰层的去除<sup>[29]</sup>。

## 3 结论

经过研究,可以得出以下结论:

(1)将 CIP 引入 PDMS 中,利用均匀磁场制备出具有微 米柱结构的 CIP/PDMS 涂层,随后在涂层表面附着 SiO<sub>2</sub>纳 米粒子,制备出 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水防除冰涂层,具有 类似荷叶表面的微纳结构。

(2)所制备的SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS超疏水涂层表面附着的



Fig.12 Schematic diagram of the sunlight response performance of the coating

SiO<sub>2</sub>纳米粒子具有良好的稳定性,在超声处理25min之后,依然能够保持158.7°±2°的静态接触角和6°±1°的滚动角,在超声处理30min之后,滚动角上升至16.3°±3.7°。

(3)所制备的 SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS 超疏水涂层具有极好的 超疏水性能。涂层的静态接触角高达 159.7°±2°,滚动角低 至 2.7°±1°,并且具有良好的自清洁性能和优异的防除冰性 能。延迟结冰时间可长达 1120s,且冰的黏附强度低至 78.33kPa;涂层表现出一定的太阳光响应性,能够将光转化 为热,这使得涂层具有广阔的室外除冰应用前景。

#### 参考文献

- [1] Dalili N, Edrisy A, Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 428-438.
- [2] Lasse M. Ice adhesion-theory, measurements and countermeasures[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26

(4-5): 413-445.

- [3] 陈增贵,肖冰,王宇,等.超疏水电热薄膜对溢流冰的抑制效果 探究[J].航空科学技术,2021,32(9):75-80.
  Chen Zenggui, Xiao Bing, Wang Yu, et al. Inhibitory of runback ice via superhydrophobic electrothermal film[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 75-80.(in Chinese)
- [4] Zhuo Yizhi, Xiao Senbo, Amirfazli A, et al. Polysiloxane as icephobic materials-the past, present and the future[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 405: 127088.
- [5] Hannat R, Weiss J, Garnier F, et al. Application of the dual kriging method for the design of hot-air-based aircraft wing anti-icing system[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2014, 8(4): 530-548.
- [6] Farzaneh M, Kiernicki J. Flashover problems caused by ice build up on insulators[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(2): 5-17.
- [7] 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)

- [8] 魏卓,姚井淳,石小鑫,等.低频振动对超疏水电热除冰方法的 增益效果探究[J].航空科学技术,2022,33(11): 70-75.
  Wei Zhuo, Yao Jingchun, Shi Xiaoxin, et al. Study on gain effect of low frequency vibration on superhydrophobic electrothermal de-icing method[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 70-75.(in Chinese)
- [9] 战培国.美国NASA结冰试验设备体系综述[J]. 航空科学技 术,2021,32(5): 1-6.

Zhan Peiguo. Review on the system of icing faclilties in NASA [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(5): 1-6. (in Chinese)

- [10] Kreder M J, Alvarenga J, Kim P, et al. Design of anti-icing surfaces: Smooth, textured or slippery[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(1): 15003.
- [11] Habibi H, Cheng Liang, Zheng Haitao, et al. A dual de-icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 859-870.
- [12] Drury M D, Szefi J T, Palacios J L. Full-scale testing of a centrif-

ugally powered pneumatic de-icing system for helicopter rotor blades[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(1): 220-228.

- [13] Labeas G N, Diamantakos I D, Sunaric M M. Simulation of the electroimpulse de-icing process of aircraft wings[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(6): 1876-1885.
- [14] Marin J, Kennedy K J, Eskicioglu C. Characterization of an anaerobic baffled reactor treating dilute aircraft de-icing fluid and long term effects of operation on granular biomass[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(7): 2217-2223.
- [15] Zhang Yan, Liu Zhuangzhuang, Shi Xianming. Development and use of salt-storage additives in asphalt pavement for anti-icing: literature review[J]. Journal of Transportation Engineering Part B-Pavements, 2021, 147(4): 03121002.
- [16] Chen Jun, Ma Xie, Wang Hao, et al. Experimental study on antiicing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer[J]. Construction & Building Materials, 2018, 161 (10): 598-605.
- [17] Shen Yizhou, Tao Jie, Chen Zhong, et al. Rational design of the nanostructure features on superhydrophobic surfaces for enhanced dynamic water repellency[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(8): 9958-9965.
- [18] Ensikat H J, Ditsche-Kuru P, Neinhuis C, et al. Superhydrophobicity in perfection: Outstanding properties of the lotus leaf[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2011, 2(1): 152-161.
- [19] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta, 1997, 202 (1): 1-8.
- [20] Li Shuhong, Li Huanjun, Wang Xianbao, et al. Super-hydrophobicity of large-area honeycomblike aligned carbon nanotubes[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2002, 106(36): 9274-9276.
- [21] Maghsoudi K, Vazirinasab E, Momen G, et al. Icephobicity and durability assessment of superhydrophobic surfaces: The role of surface roughness and the ice adhesion measurement technique
   [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 288: 116883.
- [22] Hou Wenqing, Shen Yizhou, Tao Jie, et al. Anti-icing performance of the superhydrophobic surface with micro-cubic array structures fabricated by plasma etching[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 586: 124180.

- [23] Jin Mingming, Shen Yizhou, Luo Xinyi, et al. A combination structure of microblock and nanohair fabricated by chemical etching for excellent water repellency and icephobicity[J]. Applied Surface Science, 2018, 455: 883-890.
- [24] Liu Chao, Zheng Junjie, Liu Xiangpeng, et al. Facile laser-based process of superwetting zirconia ceramic with adjustable adhesion for self-cleaning and lossless droplet transfer[J]. Applied Surface Science, 2023, 638: 158069.
- [25] Peng Huaqiao, Liu Xifei, Liu Xiwen, et al. A facile and cost-effective fabrication of robust carbon black-based superhydrophobic coatings on aluminum alloy[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 41: 103317.
- [26] Chen Kai, Hu Junyi, Wang Caoyu, et al. Robust superhydrophobic surface with controlled adhesion: In situ growth depending

on its bulk phase composition and environment[J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(15): 1800444.

- [27] Li Yabin, Li Bucheng, Xia Zhao, et al. Totally waterborne, nonfluorinated, mechanically robust and self-healing superhydrophobic coatings for actual anti-icing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(45): 39391-39399.
- [28] Han Peng, Jiang Chao, Zhang Xiaohong. Research progress of functional materials with photothermal conversion ability[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(5): 522-528.
- [29] Xie Zhenting, Wang Hong, Geng Yang, et al. Carbon-based photothermal superhydrophobic materials with hierarchical structure enhances the anti-icing and photothermal deicing properties[J].
   ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(40): 48308-48321.

# Preparation and Performance Study on SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS Superhydrophobic Anti-icing/Deicing Coating

Liu Yisong, Zhang Jing, Su Fangfang, Liu Chen, Zheng Yaping Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China

**Abstract:** Icing is a common natural phenomenon in life, but when ice accumulates on surfaces such as infrastructure or vehicles, it will inevitably affect their safe operation, resulting in the risk of equipment failure, and even safety accidents. Therefore, it is of great practical significance to study the anti-icing/deicing mechanism on the surface of materials and prepare functional coating materials with anti-icing/deicing properties to prevent icing on the surface of equipment, which helps to improve the reliability of various equipment. Inspired by the super hydrophobic properties of lotus leaves in nature, this paper combined with the sunlight responsiveness of Carbonyl Iron Powder(CIP) dark metal particles from the perspective of improving the surface of SiO<sub>2</sub> nanoparticle, finally obtained SiO<sub>2</sub>-CIP/PDMS super hydrophobic anti-icing/deicing coating. The results show that the static contact angle of the coating is as high as  $159.7^{\circ} \pm 2^{\circ}$ , the rolling angle is as low as  $2.7^{\circ} \pm 1^{\circ}$ , the icing delay time is as long as 1120s, and the ice adhesion strength is as low as 78.33kPa. In summary, the coatings prepared in this paper have excellent superhydrophobic, self-cleaning and excellent anti-icing/deicing properties, and have certain sunlight response, which has good prospects for outdoor anti-icing/deicing applications.

Key Words: anti icing/deicing; superhydrophobic; micro nano structure; adhesion strength of ice; freezing delay time