

超疏水防冰表面研究进展



曹俊¹, 吕忠¹, 任黄威¹, 项腾飞^{1,2,*}

¹ 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽马鞍山 243002

² 安徽工业大学先进金属绿色制备及表面技术教育部重点实验室, 安徽马鞍山 243002

摘要: 金属表面结冰问题严重影响建筑和航空航天等众多领域的发展, 甚至会造成重大安全隐患和经济损失, 解决金属表面结冰和积冰难题迫在眉睫。传统的防冰除冰法不仅价格高昂, 而且效率低下, 因此亟需开发出新一代防冰除冰技术。随着仿生学的不断发展, 受“荷叶效应”启发, 具有高接触角和低接触角滞后的超疏水表面逐渐受到广泛关注。新兴的超疏水表面不仅具有优异的防冰和除冰性能, 而且具有能耗低和效率高等众多优势, 展现出良好的应用前景。本文介绍了近些年来超疏水表面的制备方法, 探讨了超疏水防冰表面的影响因素及其内在机理, 总结了智能响应型超疏水表面防冰除冰技术。此外, 针对超疏水防冰表面在低温下的长期耐久性与稳定性、大规模制备以及未来智能响应型超疏水表面的发展等问题进行了展望。

关键词: 超疏水表面; 润湿性; 微纳结构; 防冰; 除冰

DOI: [10.57237/j.mater.2022.01.002](https://doi.org/10.57237/j.mater.2022.01.002)

Research Progress of Superhydrophobic Surfaces for Anti-icing

Jun Cao¹, Zhong Lv¹, Huangwei Ren¹, Tengfei Xiang^{1,2,*}

¹ School of Architectural and Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

² Key Laboratory of Green Fabrication and Surface Technology of Advanced Metal Materials (Ministry of Education), Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

Abstract: The problem of icing on metal surface seriously affects the development of many fields, such as architecture, aerospace, it can even causes significant security risks and economic losses. Thus, it is urgent to solve the problem of icing and ice accumulation on metal surfaces. The traditional anti-icing and deicing methods are not only expensive, but also inefficient. Therefore, it is urgent to develop a new generation of anti-icing and deicing technology. With the continuous development of bionics, inspired by the "lotus leaf effect", superhydrophobic surfaces, which exhibit large contact angle and low contact angle hysteresis have gradually attracted large numbers of attentions. The burgeoning superhydrophobic surfaces not only display excellent anti-icing and deicing performance, but also exhibit many advantages such as low energy consumption and high efficiency, showing good application prospect. In this paper, the fabrication methods of superhydrophobic surfaces in recent years was introduced, the influencing factors and internal mechanism of superhydrophobic surfaces for anti-icing was discussed, the anti-icing and deicing techniques of intelligent responsive superhydrophobic surfaces was summarized. In addition, the long-term durability and stability of superhydrophobic surfaces for anti-icing under low temperatures, large-scale fabrication and the future development of

基金项目: 国家自然科学基金(No.52201056); 安徽省高校科学研究重点项目(No.KJ2021A0377)

*通信作者: 项腾飞, xiangtf@ahut.edu.cn

收稿日期: 2022-09-07; 接受日期: 2022-09-29; 在线出版日期: 2022-11-01

<http://www.materialsrd.com>

intelligent responsive superhydrophobic surfaces were prospected.

Keywords: Superhydrophobic Surfaces; Wettability; Micro-nano Structure; Anti-icing; De-icing

1 引言

结冰现象在日常生活及自然界中是非常普遍的现象。冰雪虽然能向我们呈现出迷人的瑰丽风景，但是也常常给人们的生活带来不便甚至是灾难。在低温环境下，金属表面不可避免会发生结冰与积冰现象，冰的积聚不仅会降低房屋和飞机以及船舶等承载能力，而且会极大的增加自重，甚至造成房屋倒塌、飞机失控和船舶倾覆的危险。输电线路和输电塔结冰和积冰影响电力的传输，造成了巨大的资源浪费与经济损失。在 2008 年，我国遭遇了百年一遇的特大冰雪灾害，霜冻的积累增加了输电线的重量，许多输电塔与输电线路被压垮，造成了超过 1516 亿人民币的经济损失[1, 2]。此外，冰的积聚会严重影响交通运输、航空航天和建筑等众多领域。然而，传统的防冰除冰法如：热力融冰法[3]、化学除冰法[4]、机械除冰法[5]等不仅价格昂贵，而且效率低下且难以保证完全去除积冰，具有较大的限制性。随着仿生学的发展，受“荷叶效应”而发展的超疏水表面因其优异的防水性能而受到防冰领域极大的关注。

本文详细介绍了超疏水表面的制备方法，分析了影响超疏水表面防冰性能的主要因素，探讨了超疏水表面的防冰机理。此外，对兼具被动防冰和主动除冰性能的智能响应型超疏水表面进行总结，最后对超疏水防冰表面的未来发展方向进行展望。本文旨在总结超疏水表面的制备方法，探讨超疏水防冰表面的影响因素及其内在机理，为未来的超疏水防冰表面的发展提供参考思路。

2 超疏水表面

自 1997 年 Barthlott 等[6]揭示著名的荷叶效应以来，具有高接触角和低接触角滞后的超疏水表面因其优异的疏水和自洁性能引起了工业和基础研究领域的极大兴趣。超疏水表面一般具备两个基本条件：一是表面具有粗糙微/纳米结构；二是具有较低的表面能。由此制得的固体表面接触角大于 150° 且滚动角小于 10° 被称为超疏水表面，如图 1 所示。超疏水表面粗糙结构

截留下的空气层阻绝了液滴与固体的直接接触，减少了固-液接触面积，增大了液-气接触面积，从而达到了增大接触角的目的。

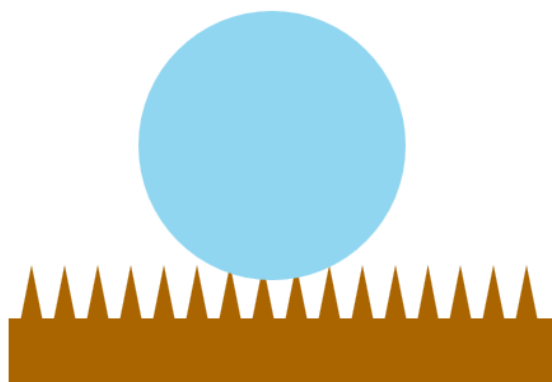


图 1 超疏水表面示意图

Figure 1 Schematic diagram of superhydrophobic surface

3 超疏水表面的制备

近年来，随着超疏水表面制备技术的不断进步与发展，超疏水理论也越来越完善，在各种材料表面制备超疏水涂层方法也趋向成熟。由于超疏水表面具有高接触角和低滚动角，液滴难以停留在材料表面的性质，因此，超疏水表面成为解决结冰问题的重要途径之一，其防冰性能也越来越得到重视。

目前，已经开发出多种方法制备超疏水涂层应用于金属表面防结冰领域，如水热法、激光织构法、喷涂法、溶胶凝胶法、阳极氧化法和化学刻蚀法等等。Li 等人[7]通过激光织构法对铜材料表面进行激光纹理加工，构造出具有闭孔状阵列结构的超疏水表面，其接触角高达 155° ，滑动角仅为 7° 。在 -15°C 低温下测试其防结冰性能，与普通铜表面相比，超疏水表面的延迟结冰时间可以从 79s 延长至 1615s。Lan 等人[8]通过水热法与蚀刻法相结合在铝合金表面制备出接触角高达 161° ，滚动角为 2° 的超疏水表面，如图 2 所示。在 -15°C 时，相比于普通的铝合金表面，超疏水表面可延迟结冰时间为 300s，将样品放置在倾斜角度为 10° 的平

台测试动态防冰性能, 普通表面会有大量的水滴残留在金属表面, 进而被冻结。超疏水表面具有优异的疏水性能, 水滴在冻结之前滚落。超疏水表面还具有出

色的防腐性能和自清洁性能。Zheng 等人[9]通过阳极氧化法在铝表面

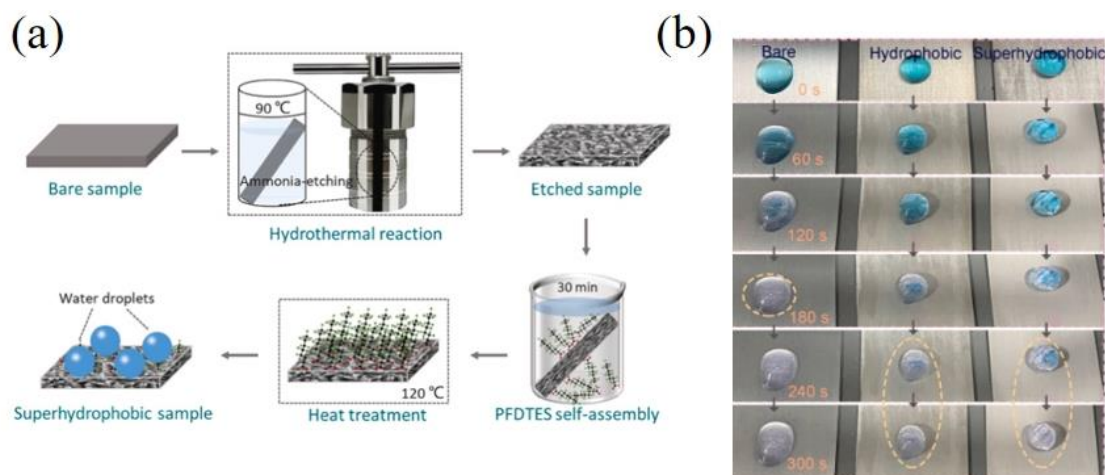


图2 (a) 水热法样品制备过程示意图, (b) 不同表面防冰测试图像

Figure 2 (a) Schematic diagram of sample preparation process by hydrothermal method, (b) anti-icing test images of different surfaces

构建出微纳米线和微纳米孔结构的超疏水铝表面。普通铝表面在-12 °C下2s后即冻结, 而超疏水表面的水滴在-24 °C开始冻结, 延迟时间达到23s, 且冰粘附力低至0.04MPa。Eshaghi 等人[10]采用溶胶-凝胶法将不同二氧化硅纳米颗粒的薄膜沉积在玻璃基板上构造出超疏水表面, 在-12 °C时与未涂覆表面相比, 超疏水表面覆冰时间从105s增加到938s, 在动态防结冰测试中, 超疏水表面在300s后涂层样品表面无冰覆盖。Lu 等人

[11]混合PDMS-三乙氧基硅烷(PDMS-TES)和1H, 1H, 2H-十七氟癸基(FD)-三乙氧基硅烷(FD-TMS)涂覆化学蚀刻铝表面形成的双尺度粗糙度结构的超疏水表面。如图3所示, 在-20.5 °C时与普通铝表面相比, 超疏水表面冻结延迟时间超过150min, 且在经过100次结冰/除冰循环后冰粘附强度为47kPa。综上可知, 超疏水表面的制备方法已趋于多样化, 并发展成熟, 展现出优良的防冰性能。

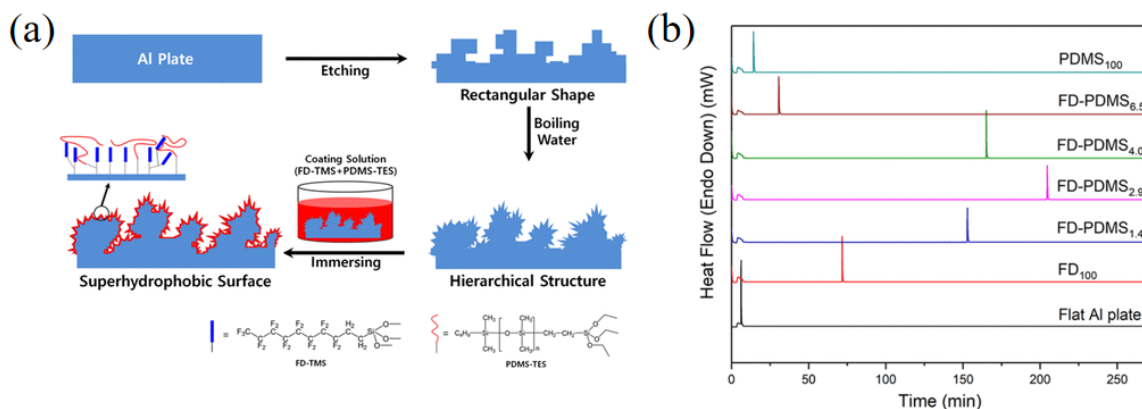


图3 (a) 化学蚀刻法制备超疏水铝表面示意图和 (b) 不同样品延迟结冰时间图

Figure 3 (a) Schematic diagram of superhydrophobic aluminum surface prepared by chemical etching method and (b) delayed freezing time of different samples

4 超疏水表面防冰性能

超疏水表面具有高接触角和低滚动角, 可以在结冰之前阻止水滴滞留在表面上。Zhen 等[12]将丙酮处理后的碳纳米管喷涂到基材上形成碳纳米管超疏水薄膜, 为

了验证其疏冰特性,将基底倾斜 30° , $10\mu\text{L}$ 的单个液滴在 25mm 高度处分别在室温和 -8°C 的环境下冲击超疏水薄膜,如图 4 所示,水滴从超疏水表面滚下,没有观察到结冰现象。Mishchenko 等人[13]使用单个液滴在 $-25\sim-30^\circ\text{C}$ 情况下,将基质倾斜至 30° ,从 10cm 高度落下撞击基质,水滴在普通的亲水表面没有回弹,且在几秒钟之内铺展冻结;而在疏水表面,水滴落下接触后先铺展再缩回,但仍然在基质上冻结;而在超疏水表面上则发生完全缩回,且液滴在成核之前从超疏水表面反弹。由此可见,即使在过冷的底物温度下,由于液固界面附着低,从高处落下的水滴撞击超疏水表面时发生完全反弹,因此,超疏水表面能够防止滴落的水滴冻结。

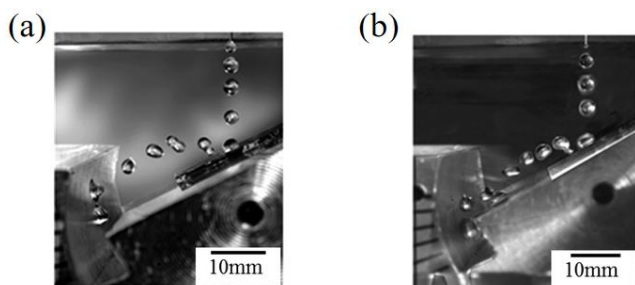


图 4 在室温 (a) 和 -8°C 条件下 (b) 液滴在丙酮处理后的碳纳米管基板上反弹

Figure 4 Droplets bounce on acetone-treated carbon nanotube substrates at room temperature (a) and -8°C (b)

然而,除了水滴滴落在超疏水表面上,还有水蒸气在潮湿的环境中通过与较冷的固体表面接触而迅速

凝结成水滴。Barthwal 等人[14]在铝表面构建了双形微/纳米结构超疏水表面,在 -5°C 探索了凝结水滴的动态过程,发现了液滴自弹跳行为,如图 5 所示。最初时,超疏水表面的液滴处于孤立状态,然后,微小的液滴会与相邻的液滴合并,跳跃到另外一个位置。由于连续的液滴聚结和快速运动,冷凝的液体合并成大的球形液滴并在表面上滚动,最后较大的液滴克服了粘附力后滚落表面。通过与普通铝表面对比发现,超疏水表面上的水滴的大小和覆盖范围比其他表面上的水滴小得多,并且水滴仍然保持球形。这是由于双形微/纳米结构之间产生了大量空气,且极大的增加了气液界面,防止冷凝水滴渗透到腔体中,并保持了 Cassie 态,从而延迟了表面冻结时间。此外, Lee 等人[15]提出了一种基于磁响应型层状毛阵列的超疏水材料,该材料能够通过外部磁场调节毛阵列结构的弯曲状态,以诱导不同模式下的各种液滴反弹行为,从而能够有效去除表面上的水滴并有效防止表面结冰行为。Xiao 等人[16]利用微滴分配的可视化技术构造了两种层状纳米多孔结构和开放纳米锥结构超疏水表面,它们使凝聚的液滴具有高动态自推进能力。虽然凝结在表面上的水滴不具有从高出落下水滴相同的初始动能,但超疏水微纳米表面结构之间捕获了大量的空气,当水滴在表面凝结时,突出的微纳结构的尖端使得液滴具有较大的接触角和较小的接触角滞后,从而使液滴与表面之间的接触面积最小,起到延缓结冰的作用。

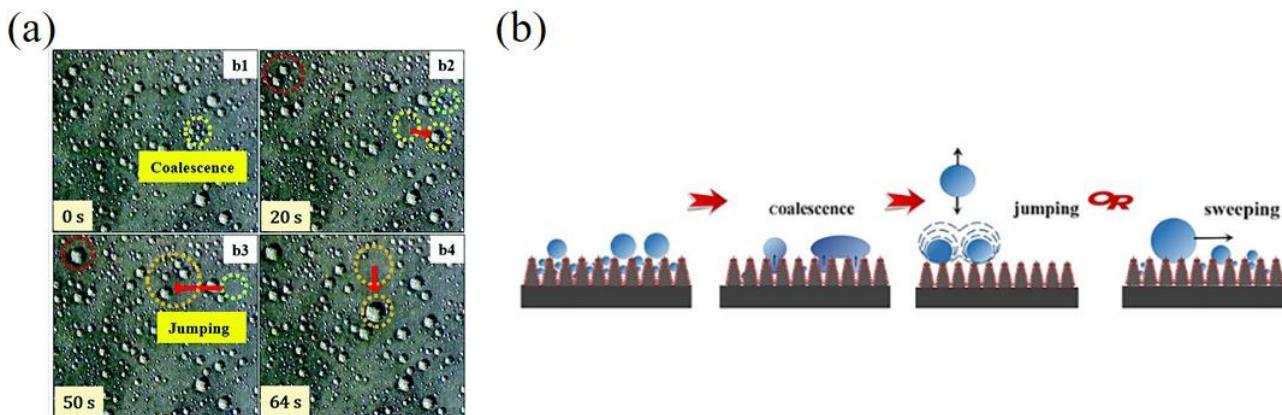


图 5 (a) 在 -5°C 超疏水表面凝结跳跃行为, (b) 超疏水表面凝结滚动示意图

Figure 5 (a) Condensation hopping behavior on superhydrophobic surface at -5°C , (b) Schematic diagram of condensation rolling on superhydrophobic surface

此外,研究发现超疏水表面的微观结构是影响其防冰的重要因素。Hou 等人[17]使用等离子蚀刻技术在硅表面设计并构造了一系列微立方阵列,微立方阵列

中心间距从 $30\mu\text{m}$ 到 $130\mu\text{m}$ 不等。他们测试了不同微观结构中心间距对延迟结冰的影响,如图 6 所示。当微观结构中心间距为 $30\mu\text{m}$ 时,在 -15°C 延迟结冰时间

为 675s, 当中心间距为 $70\mu\text{m}$ 时, 延迟结冰时间高达 1295s, 当进一步增大微观中心间距到 $130\mu\text{m}$ 时, 其延迟结冰时间仅为 36s。这是由于 $70\mu\text{m}$ 的微观结构可以在水滴下方捕获更多气穴, 形成稳定的 Cassie-Baxter 润湿状态, 从而降低实际固液接触面积, 同时作为传热屏障, 降低传热效率。Guo 等人[18]通过使用机械加工发在锌表面构造出带有棘轮阵列的微米级结构, 通过使用给晶体生长构造出纳米结构。在 -10°C 下, 对比了微米结构、纳米结构以及微纳二级结构三种粗糙度不同的表面, 发现微纳二级结构表面延迟结冰时间最长达到 7220s。同时使用 $15\mu\text{L}$ 在 -23.5°C 时, 测量三种不同表面的冰粘附力, 结构表明微纳二级结构表面的

冰粘附力最低。Shin 等人[19]通过表面处理方法在 PET 的无纺布上诱导纳米级粗糙度, 通过改变等离子体处理时间来控制纳米结构的长径比, 结果显示具有较大长径比的超疏水表面防冰性能更出色。由于超疏水材料在表面上的特殊结构, 当液滴停留在超疏水材料的表面时, 超疏水材料和液滴之间会形成固液气共存界面, 使超疏水表面上的水滴保持在 Cassie-Baxter 状态。由于空气传热效率低, 水滴将空气困在下面形成气垫, 成为有效的屏障, 大大减少了与水滴的接触面积, 防止了热量从水滴传递到基体, 进一步延长了冷冻时间, 提高了防冰性能。由此可见, 超疏水表面的多级微纳结构对延迟结冰性能至关重要。

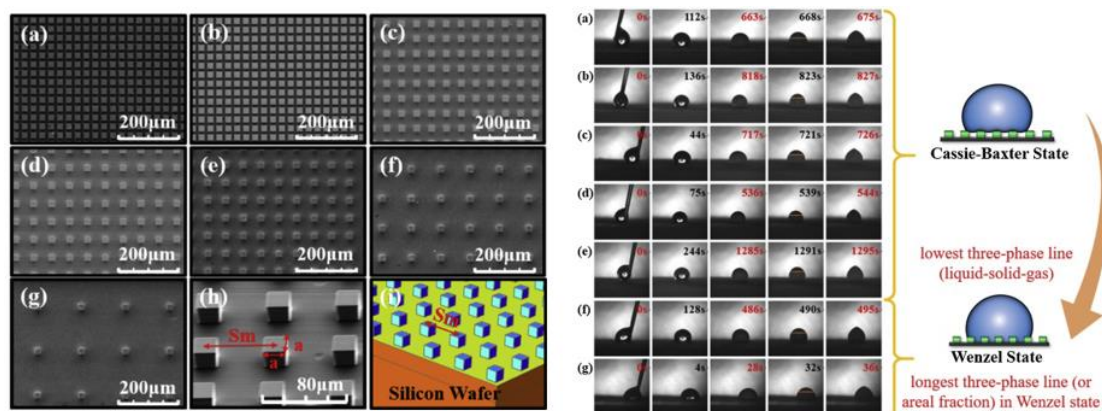


图 6 微立方体阵列表面的不同中心间距 SEM 图像及延迟结冰图像 (a) $30\mu\text{m}$, (b) $40\mu\text{m}$, (c) $50\mu\text{m}$, (d) $60\mu\text{m}$, (e) $70\mu\text{m}$, (f) $100\mu\text{m}$, (g) $130\mu\text{m}$

Figure 6 SEM images of microcube array surface with different center-to-center spacing and delayed icing images (a) $30\mu\text{m}$, (b) $40\mu\text{m}$, (c) $50\mu\text{m}$, (d) $60\mu\text{m}$, (e) $70\mu\text{m}$, (f) $100\mu\text{m}$, (g) $130\mu\text{m}$

5 智能响应型超疏水防冰表面

随着超疏水表面在防冰领域得到越来越多的关注, 光响应、热响应和磁响应等智能响应型超疏水防冰表面逐渐受到青睐, 不仅具备优异的防冰性能, 同时能够有效地利用光能和电能并将其转化为热能, 从而迅速融化积冰。Ma 等人[20]制备了一种光热超疏水膜, 通过沉积具有高孔隙率的低表面能聚四氟乙烯 (PTFE) 和不同长度的氮化钛纳米棒 (TiN) 来提高疏水性以及光热性能。充分结合光热效应和超疏水性, 超疏水表面的延迟冻结时间是未处理钢表面的四倍。此外, TiN-PTFE 薄膜在激光照射下温度在 50s 内迅速超过 55°C , 冰层在激光照射下在几秒钟内完全融化, 展现出极其优异的光热除冰性能。Sun 等人[21]制备了具有超疏水表面的可控 CNW/PDMS 仿生纳米复合薄膜, 相

对于亲水表面, 单个水滴的初始成核时间在超疏水表面上延迟了 353.3s, 仿生纳米复合薄膜在施加电压时转化为电热活性除冰防线, 冰层在非接触式 40V 电压下, 在 150 秒内完全融化。Zhao 等人[22]通过在坚韧的氟化环氧树脂中加入碳/PTFE 颗粒, 制备出具有双重被动防冰和主动除冰特性的功能性超疏水表面。由于阳光强度是有限的, 将电热/光热效应与超疏水性相结合的策略, 通过光热辅助电热, 能在较短时间内提升温度至 65°C , 且显著降低了冰的粘附力, 缩短了除冰时间, 降低了能量损耗, 在静态除冰和动态防冰循环中表现出高效的防冰/除冰性能。Zhao 等人[23]通过纳米金刚石 (ND), 聚四氟乙烯 (PTFE) 和 MXene 的高温烧结, 合成了具有微/纳米结构的多面复合颗粒, 在玻璃表面制备出了 MPND 超疏水表面。该涂层具备出色光热转化性能, 在室温下仅需要 360s 日光照射下可以迅速升温到 109°C , 表现出极其优异的光热性能。Zhen

等人[24]通过蜡烛烟尘(CS)和羰基铁(Fe)掺入聚二甲硅氧烷(PDMS)中,制备了磁响应和柔性复合超疏水膜。当温度为-5℃时,在阳光照射下,厚度为4mm的积冰在237s后完全融化,水迅速从表面滑落。此外,超疏水膜具备柔韧性和磁响应性能,可以在磁场下紧紧地粘附在弯曲的基板上,而无需涂覆任何粘合剂,这可以应用于解决电力线等曲线基板中的积冰问题。由此可见,智能响应型超疏水表面兼具出色的防冰性能和主动除冰性能,对超疏水表面防冰领域的发展具有重大意义。

综上所述,相比于具有能源损耗快,除冰效率低下等缺陷的主动除冰法,被动除冰是一种更具有潜力成为解决积冰问题的途径。而超疏水表面具有优异的疏水性能,当水滴落到超疏水表面时,超疏水表面通过使水滴以滚动或者弹跳方式在结冰前脱除,减少了表面结冰的可能性。当水滴第一阶段没有脱除表面时,超疏水表面通过微纳米结构截留下的空气充当换热热阻,减少了热量的传递,从而达到延缓结冰的目的。此外,智能响应型超疏水表面能够有效利用光能和电能转化为热能,表现出优异的除冰性能。

6 结论与展望

本文通过对超疏水表面防冰研究现状进行综述,介绍了超疏水表面的制备方法,探讨了超疏水表面的防冰机理。通过对比超疏水表面的微观形貌对防冰性能的影响,发现微纳二级结构对防冰效果最好。超疏水表面通过优异的疏水性使液滴从表面滚落,且表面的微纳米结构截留下的空气能够阻碍热量传递,起到延迟结冰的效果。此外,智能响应型超疏水表面通过光热和电热等方法去除积冰,展现出优异的除冰性能。由此可见,超疏水表面的发展对金属表面防冰领域具有重要意义。

超疏水防冰表面在制备技术与应用等方面仍存在一定的挑战。尽管超疏水防冰表面制备方法已经成熟,但超疏水表面具有多级微纳结构,其大规模制备仍然是一个难题。另外,随着超疏水防冰表面使用寿命延长,其防冰性能可能会随之降低,如何提升超疏水防冰表面的耐久性与稳定性也是其应用道路上的关键技术问题。因此,未来的超疏水防冰表面可向大规模生产制备、优异的稳定性与耐久性,同时兼具防冰和除冰等性能的方向发展。此外,随着可穿戴设备、5/6G技术及海洋风电技术的发展,面向未来装备的

智能响应型超疏水表面的制备与开发仍是目前的研究热点。

参考文献

- [1] Pan L, Liu Z, Kzlta O, et al. Carbon fiber/poly ether ether ketone composites modified with graphene for electro-thermal deicing applications [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 192 (26): 108-117.
- [2] Guo H, Liu M, Xie C, et al. A sunlight-responsive and robust anti-icing/deicing coating based on the amphiphilic materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402 (15): 126161.
- [3] Mirzanamadi R, CE Hagentoft, Johansson P, et al. Anti-icing of road surfaces using hydronic heating pavement with low temperature [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145: 106-118.
- [4] Norrstr M, Bergstedt E. The impact of road de-icing salts (NaCl) on colloid dispersion and base cation pools in roadside soils [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2001, 127 (1-4): 281-299.
- [5] Boinovich L B, Emelyanenko A M. Anti-icing potential of superhydrophobic coatings [J]. *Mendelev Communications*, 2013, 23 (1): 3-10.
- [6] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces [J]. *Planta*, 1997, 202 (1): 1-8.
- [7] Li J, Zhou Y, Wang W, et al. Superhydrophobic copper surface textured by laser for delayed icing phenomenon [J]. *Langmuir*, 2020, 36 (5): 1065-1072.
- [8] Lan X, Zhang B, Wang J, et al. Hydrothermally structured superhydrophobic surface with superior anti-corrosion, anti-bacterial and anti-icing behaviors [J]. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 624: 126820.
- [9] Zheng S, Li C, Fu Q, et al. Fabrication of a micro-nanostructured superhydrophobic aluminum surface with excellent corrosion resistance and anti-icing performance [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(83): 79389-79400.
- [10] Eshaghi A, Mesbahi M, Aghaei A A. Transparent hierarchical micro-nano structure PTFE-SiO₂ nanocomposite thin film with superhydrophobic, self-cleaning and Anti-icing properties [J]. *Optik*, 2021, 241: 166967.
- [11] Lo T, Lee J, Hwang H S, et al. Nanoscale coatings derived from fluoroalkyl and PDMS alkoxysilanes on rough aluminum surfaces for improved durability and anti-icing properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 4 (7): 7493-7501.

- [12] Zheng L, Li Z, Bourdo S, et al. Exceptional superhydrophobicity and low velocity impact ocephobicity of acetone-functionalized carbon nanotube films [J]. *Langmuir*, 2011, 27 (16): 9936-43.
- [13] Mishchenko L, Hatton B, Bahadur V, et al. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets [J]. *ACS Nano*, 2010, 4 (12): 7699-7707.
- [14] Barthwal S, Lim S H. Rapid fabrication of a dual-scale micro-nanostructured superhydrophobic aluminum surface with delayed condensation and ice formation properties [J]. *Soft Matter*, 2019, 15: 7945-7955.
- [15] Sang-Hyeon, Lee, Minho, et al. Tunable multimodal drop bouncing dynamics and anti-icing performance of a magnetically responsive hair array [J]. *ACS Nano*, 2018, 12 (11): 10693-10702.
- [16] Xiao Y, Zhang L, Fen L, et al. Droplet jumping: effects of droplet size, surface structure, pinning, and liquid properties. [J]. *ACS Nano*, 2019, 13 (2): 1309-1323.
- [17] Hou W, Shen Y, Tao J, 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*, 2019, 586: 124180.
- [18] Peng G, Zheng Y, Wen M, et al. Icephobic/Anti-Icing properties of micro/nanostructured surfaces [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24 (19): 2642-2648.
- [19] Shin B, Lee K R, Moon M W, et al. Extreme water repellency of nanostructured low-surface-energy non-woven fabrics [J]. *Soft Matter*, 2012, 8 (6): 1817-1823.
- [20] Ma L, Wang J, Zhao F, et al. Plasmon-mediated photothermal and superhydrophobic TiN-PTFE film for anti-icing/deicing applications [J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 181: 107696.
- [21] Sun Y, Sui X, Wang Y, et al. Passive anti-icing and active electrothermal deicing system based on an ultraflexible carbon nanowire (CNW)/PDMS biomimetic nanocomposite with a superhydrophobic microcolumn surface [J]. *Langmuir*, 2020, 36 (48): 14483-14494.
- [22] Zhao Z, Chen H, Zhu Y, et al. A robust superhydrophobic anti-icing/de-icing composite coating with electrothermal and auxiliary photothermal performances [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 227: 109578.
- [23] Zhao Y, Chen Y, Hou T, et al. Multifunctional Ti3C2Tx MXene-based composite coatings with superhydrophobic anti-icing and photothermal deicing properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14 (22): 26077-26087.
- [24] Zheng W, Teng L, Lai Y, et al. Magnetic responsive and flexible composite superhydrophobic photothermal film for passive anti-icing/active deicing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 130922.