doi:10.3969/j.issn.1674-7127.2024.03.002

风电叶片防除冰超疏水表面研究进展

刘贵群[1],张佳龙[1],原慷[2]

(1. 北方民族大学 材料科学与工程学院,银川 750021;
2. 北矿新材科技有限公司,北京 102206)

摘要:风机覆冰现象构成重大挑战,严重干扰风电机组的正常运作并潜在威胁人员安全。近年来,科学界对荷叶启发的超疏水表面(SHS)展开了广泛研究,这类表面凭借其非凡的表面特性与极低的表面能,展现出卓越的抗冰霜性能,使超疏水涂层成为防冰领域的新星。然而,尽管潜力巨大,其防冰效能及在实际应用中的推广仍面临诸多挑战与限制。阐述了超疏水涂层的制备工艺,并深入探讨了其耐久性的测试方法,同时剖析了当前存在的技术瓶颈与不足,进而展示了相关针对性的改进策略,旨在揭示这一领域的研究前沿,激发新的探索灵感,为风电领域的防冰研究开辟更为广阔的创新路径与方法论体系。

关键词:微纳结构;耐久性;防除冰;涂层

中图分类号:TG174.442　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1674-7127(2024)03-0011-11

Research Progress on Superhydrophobic Surface of Wind Power Blade for Deicing

LIU Guiqun[1], ZHANG Jialong[1], YUAN Kang[2]

(1. School of Materials and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China.
2. BGRIMM Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: The phenomenon of fan icing poses a major challenge, which seriously interferes with the normal operation of wind turbines and potentially threatens the safety of personnel. In recent years, the scientific community has conducted extensive research on the superhydrophobic surface (SHS) inspired by lotus leaves. These surfaces, with their extraordinary surface characteristics and extremely low surface energy, show excellent frost resistance performance, making the superhydrophobic coating to become a new star in the anti-ice field. However, despite its huge potential, its anti-ice effectiveness and its promotion in practical application still face many challenges and limitations. The preparation process of superhydrophobic coatings was elaborated upon, and the testing methods for their durability were explored in depth. Additionally, the current technical bottlenecks and shortcomings were analyzed, followed by the presentation of relevant targeted improvement strategies. The aim is to reveal the research frontiers in this field, stimulate new exploratory ideas, and pave the way for broader avenues and methodologies in anti-icing research within the wind energy sector.

Key words: micro and nano structure; durability; deicing; coating

收稿日期:2024-08-02

基金项目:2022 年度宁夏回族自治区青年拔尖人才项目(2022033)

第一作者:刘贵群(1982-),男,副教授。E-mail:gqliu10b@alum.imr.ac.cn

通信作者:原慷(1987-),男,正高级工程师。E-mail:yuankang@bgrimm.com

0 引言

风力发电集环保、持续可再生的特性，以其优异的经济效益、快捷的基建速度与低占地需求脱颖而出。其装机灵活，维护成本低廉，广泛应用于各类场景，加之技术的高度成熟，共同铸就了风力发电的卓越优势[1-3]。鉴于风能的地域分布极不均衡，中国众多风场又恰好坐落于几个极具挑战性的地理位置：北方严酷的寒冬地带，冰雪常至，寒风凛冽；中南部蜿蜒崎岖的山区，环境错综复杂；以及沿海区域，海风浩荡，气候多变[4-5]。这些地区的风能资源丰富，却伴随着严峻的自然条件考验。但严酷环境进一步催生风电叶片积冰现象，在增加叶片承重负荷的基础上，更深刻影响了其发电效能，导致电力损耗显著上升。GAO 等[6]通过实地测量、理论分析及 SCADA 系统监控，深入剖析了风力涡轮机叶片积冰问题。研究发现，强风下积冰使涡轮机转速锐减，频繁停机，严重破坏空气动力学，使电力损失高达 80%。因此，风电领域当前面临的重要挑战之一为有效应对并解决冰雪附着叶片的问题。

传统叶片除冰方式主要包括加热(电热、气热)除冰、机械除冰和化学除冰(图 1)[7-8]。这些主动除冰的方法耗时耗力、效率低下、非常依赖外部人力及物力资源的输入，同时会对环境造成一定的污染，不符合我国的绿色发展理念，且它们的实际应用通常受到相关场地的制约。因此，对环境无害、经济、高效的防覆冰技术引发了国内外研究人员的广泛关注。这些被动防覆冰的方法包括受荷叶微乳突表面启发的超疏水表面(SHS)[9]、受猪笼草润滑瓶口启发的光滑液体注入多孔表面结构(SLIPS)[10]以及受滑冰运动启发的水性润滑层表面[11]等。在这些被动防冰方式中，受 SHS 启发的超疏水涂层以其卓越的性能和显著的潜力，被视为一种极具可行性的方法，在风电领域展现出极高的应用价值。

低表面能的超疏水表面依靠微纳结构自身的憎水性和增加液滴成核所需要能量壁垒来延缓冻结。同时 SHS 可以保持 Cassie 态稳定，使液滴与表面的接触面积减少，降低冰的黏附强度，使其能在外力作用力下被轻易去除[12-14]。但在低温高湿的环境下，超疏水表面上的微量水会凝结成冰，渗入微纳米结构，进而破坏微纳结构增强了对冰的黏附力，使超疏水性能失效。另一方面，涂层使用环境无疑会对其微纳结构产生难以避免的影响与损伤。这些损伤，如化学腐蚀、温度波动以及湿度变化等，共同作用于涂层表面，逐渐侵蚀其微纳结构的完整性和稳定性。随时间推移，损伤累积，最终导致疏水性能显著下降，甚至完全失效，无法再有效排斥水分或抵御冰的黏附。因而在设计超疏水涂层时，耐久性无疑是一个核心且不可或缺的考量维度，它直接关乎涂层在实际应用中的长期表现与稳定性，需加以关注。

图 1　叶片化学除冰方式

Fig. 1　Chemical deicing method for leaves

1 超疏水涂层制备及耐久性测试

1.1 超疏水表面的来源

超疏水性是一种特殊的表面性能，即该表面具有强烈排斥水滴的趋势。只有当该表面展现出高表观接触角(超过 150°)、极低的接触角滞后(小于 10°)、微小的滑动角(小于 5°)，并能在 Cassie 模型状态下保持高度稳定时，我们才能将其界定为真正的超疏水表面[14]，其最初灵感来自荷叶效应。植物学家 BARTHLOTT 等[15]在研究其自清洁功能时揭示了荷叶表面的微观结构，即微米级乳突上覆盖着一层薄薄的纳米蜡状晶体。除此之外，自然界中也有许多动植物表面都存在这样类似荷叶 SHS 的结构[16]，如三叶草[17]、芋头叶[18]、玫瑰花瓣[19]、蝴蝶翅膀[20]、水黾[21]等，如图 2 所示。

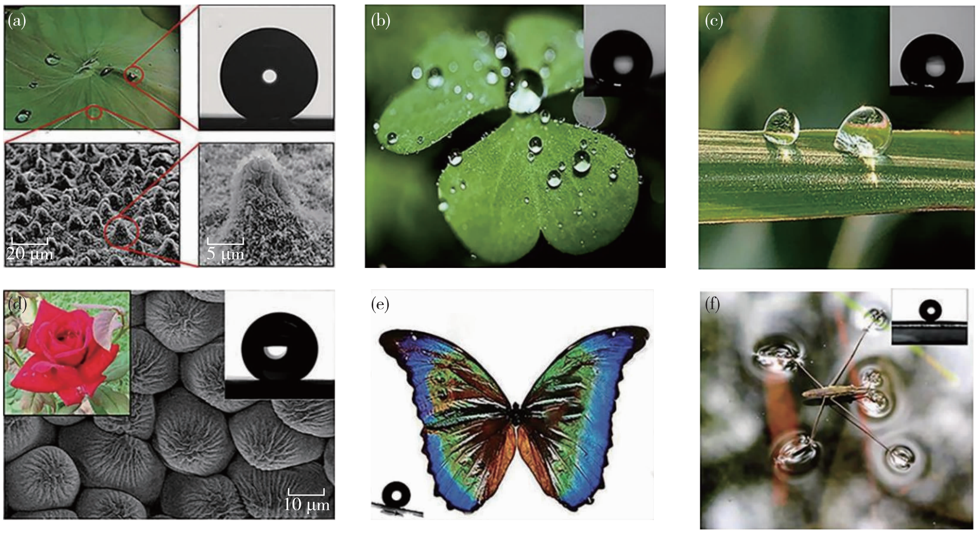

图 2　自然界的超疏水现象[16]：(a)荷叶表面微观特征；(b)三叶草上的水滴串珠；(c)芋头叶上的水滴串珠；(d)红玫瑰花花瓣的微观表面纹理；(e)蝴蝶疏水情况；(f)水黾疏水情况

Fig. 2　Superhydrophobic phenomena in nature[16]：(a) Microscopic characteristics of lotus leaf surface；(b) Beads of water droplets on clover；(c) Beads of water droplets on taro leaves；(d) The microscopic surface texture of red rose petals；(e) Butterfly hydrophobicity；(f) Water strider hydrophobicity

1.2　超疏水涂层的制备方式

这些丰富的自然现象为风电叶片表面的超疏水涂层的设计与研究提供了宝贵的灵感，揭示了实现固体表面超疏水性的两大核心要素：首先，表面需具备精细的微纳米结构形态；其次，需具备低表面能特性。在固体表面构建超疏水结构的过程中，多国研究者探索出多种制备途径。通常将其制备方法分为自下而上和自上而下。

自上而下的方法包括激光刻蚀法、等离子体处理法、静电纺丝法和电化学阳极氧化法(EAO)等。激光刻蚀法使用高能脉冲激光束对表面进行加工，尽管价格较为高昂，难以广泛应用且处理时间长，但精度高、效率高、可控性强，克服了传统脱模过程中损坏微纳结构的缺陷。WANG 等[22]通过飞秒激光加工在基材表面构建出兼具微米级凹槽与周期性纳米凸块的均匀的凹槽阵列，同时利用液-气界面自组装法将二氧化硅微球薄膜附着在基材上，得到了高疏水性的耐磨光热除冰材料。尹欢[23]通过飞秒激光直写技术与模板法相结合，以北极熊中空毛发和蚊子复眼为仿生模板，使用聚二甲基硅氧烷与多壁碳纳米管构建出全天候光热仿生防/除冰表面(图 3)。等离子体处理法集简便、经济及环保于一身，其反应速率灵活可调。然而，该方法在应用过程中也面临挑战，如可能导致的孔隙率偏高及裂纹增多等问题，需进一步研究与优化。JEONGEUN 等[24]仅使用 Ar 和 O_2 的简单一步等离子体处理，在聚四氟乙烯板材上制备出近乎完美的超疏水性表面，即使长时间暴露在空气中也几乎保持了最初的润湿性。静电纺丝法操作简单，经济高效，可加深扩展，用途广泛[25]，同时可以调节纤维薄膜的多孔结构。但其对设备和材料的较高要求限制了相关的工业化发展。

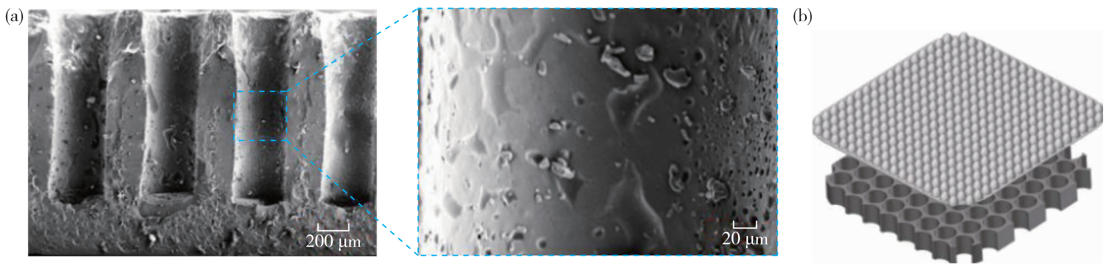

图 3　(a)HF 的中空微柱内壁；(b)MNHF 双仿生薄膜双层结构示意图[23]

Fig. 3　(a) Hollow micro column inner wall of HF；(b) Schematic diagram of dual layer structure of MNHF dual layer thin film[23]

CHEN等[26]受北极熊皮毛独特三层结构(透明皮毛、黑色表皮和脂肪层)高效隔热与防水特性的深刻启发,使用聚偏氟乙烯-共六氟丙烯(PVDF-HFP)研发出一种基于静电纺丝技术的超疏水PVDF-HFP光热薄膜(图4),在测试中表现出良好的自清洁性能和优异的耐久性。电化学阳极氧化法是构建高度有序的多孔纳米级结构的最佳熟练方法,特别是对于大面积非平面金属基板[27],同时该方法相对简单、经济、环保、可重复。值得注意的是,其作用表面范围存在一定局限性,但可将其作为一个需要深入探索和优化的方向。CHO等[28]采用两步阳极氧化铝(AAO)膜作为模板在玻璃上制造由纳米柱制成的仿壁虎毛质的硬质聚二甲基硅氧烷(h-PDMS)结构(图5),显示出高达150.5°±0.4°的静态水接触角和对水的高附着力。

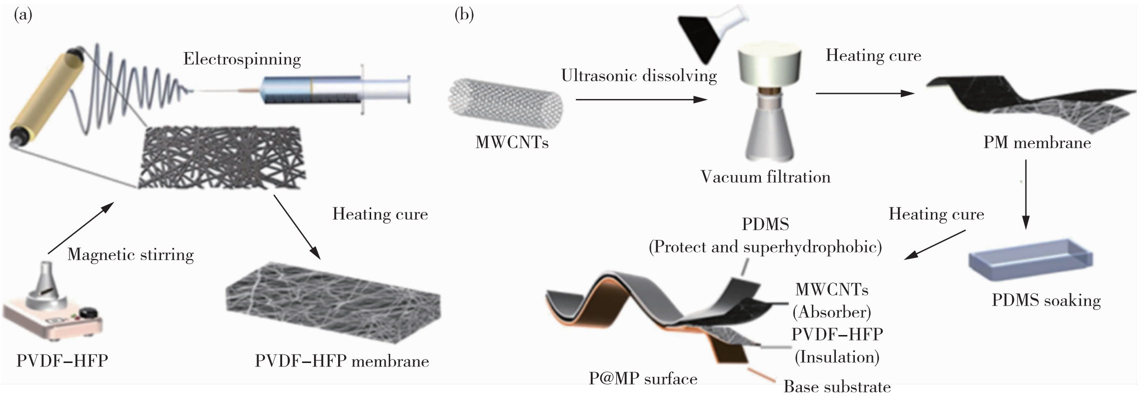

图4　(a)PVDF-HFP静电纺丝薄膜的制备;(b)光热防冰膜的制备[26]

Fig. 4　(a) Preparation of PVDF-HFP electrospun thin film;
(b) Preparation of photothermal anti icing film[26]

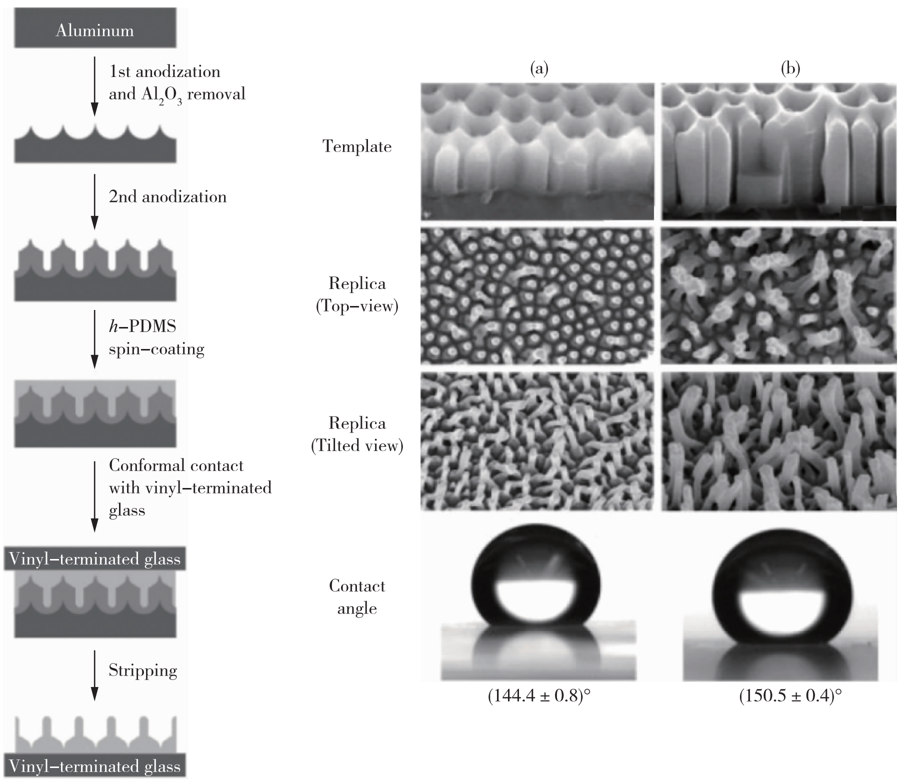

图5　*h*-PDMS薄膜的制备示意图及不同EAO时间(a)10 min和(b)20 min后两步阳极氧化AAO的及其PDMS复制品的SEM图像[28]

Fig. 5　Schematic diagram of *h*-PDMS film preparation and SEM images of anodized AAO and its PDMS replicates at different EAO times (a) 10 minutes and (b) 20 minutes[28]

自下而上的方法是通过纳米或微纳加工技术的精细操作，如溶胶-凝胶法、喷涂法、精密涂层工艺及CVD技术等，将微小的材料构建单元（如纳米颗粒、分子链段等）作为基本元件，通过氢键自发地进行有序的排列、组合或自组装[29]，从而在宏观尺度上形成有序和图案化的结构。溶胶-凝胶法因其工艺简便、反应条件温和以及设备成本低廉[30]的优势，在制备大面积或复杂形状表面薄膜方面表现出卓越的能力。然而，尽管初始阶段具有显著的成本效益，但后续处理步骤如细致的洗涤、严格的干燥及必要的热处理等，在一定程度上增加了整体的生产成本，因此，需在保持溶胶-凝胶法独特优势的同时，进一步降低生产成本，以提升其在工业应用中的竞争力。LUO等[31]以棉花为基材，使用巯胺基（MS）修饰的微硅颗粒和环氧基改性的纳米二氧化硅颗粒（NS）通过溶胶-凝胶法研制出坚固耐用的超疏水（154°±3°）纺织品，同时展现出较好的疏油性。喷涂法涂层均匀，可在表面不平整的物面上施工，且涂膜平滑美观，但其喷涂过程中产生的污染问题也不容忽视，研制出绿色无污染的超疏水涂料正是近几年的研究方向之一。ZHANG等[32]将双酚A型环氧树脂与未改性的多壁碳纳米管（MWCNTs）均匀混合后，用喷枪喷涂在经处理的钢板上成功制成了新型超疏水纳米复合涂层（图6）。经测试当MWCNTs含量达到30%时，涂层展现出约154°的水接触角，表现出卓越的超疏水性能。其微纳结构源于环氧树脂固化过程中MWCNTs团聚形成的多级微观结构，该结构有效减少了水滴与涂层的接触面积并增强了排斥力，从而实现了水滴的极端排斥。化学沉积（CVD）技术设备简单、操作维修方便，同时可通过调整温度、压力、前驱体浓度和气体流速等工艺参数来精确控制薄膜厚度、成分和性能。但要考虑所用化学物质对环境的污染性，同时沉积法同样存在着界面不稳定的问题，这些问题需要纳入考虑。

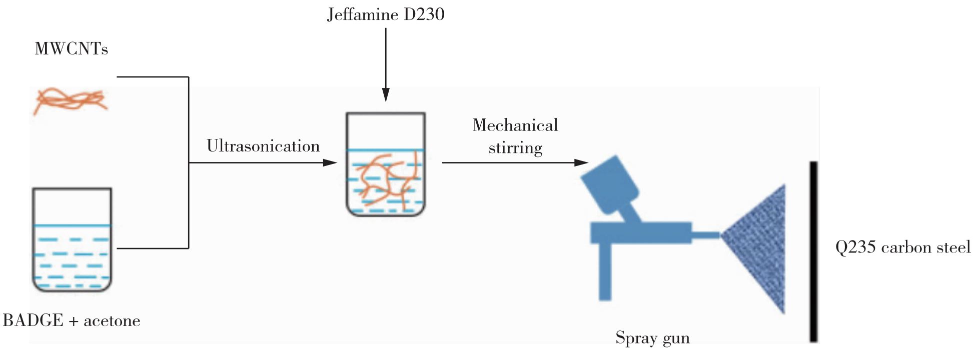

图 6　MWCNTs/环氧纳米复合涂层的制备方法示意图[32]

Fig. 6　Diagram of preparation method of MWCNTs/epoxynanocomposite coating[32]

ZHANG等[33]通过精确调控温度条件，在无催化剂辅助的铝箔上用CVD技术制备出排列有序的ZnO纳米棒阵列，利用脉冲激光沉积（PLD）技术在ZnO纳米棒表面沉积一层超薄且均匀的纳米SiO_2薄膜，再经过硬脂酸对进行表面改性处理（图7），赋予材料卓越的超疏水（约157.9°）性能。

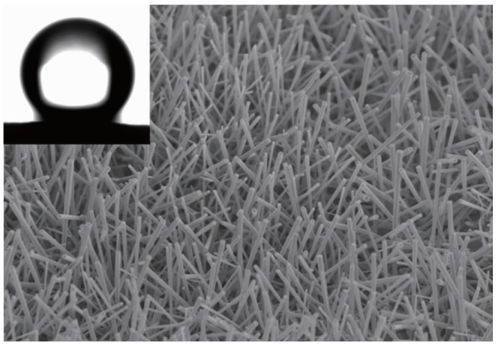

图 7　ZnO 纳米阵列及疏水性[33]

Fig. 7　ZnO nanoarray and hydrophobicity[33]

1.3　超疏水涂层的耐久性测试

考虑到实际应用场景，超疏水涂层的微纳结构不可避免地会面临多重外部挑战，包括机械磨损、紫外辐射、酸、碱、盐类腐蚀、极端高温、灰尘污染以及结构剥离等[34]。鉴于超疏水涂层的脆弱性，其粗糙结构或低表面能特性的任何细微损伤均将直接导致涂层丧失其独特的超疏水性。因此，为确保超疏水涂层在实际复杂环境中的长期有效性，对其进行统一且系统化的耐久性能评估显得尤为迫切与重要。当前，科研界积极响应这一需求，开发出一系列综合性的测评方案（表1），旨在全方位考察涂层的耐久性[35-37]。首先，从力学性能的角度出发，这些方案严格评估涂层在遭遇各类机械应力时的稳定表

现，确保其在动态使用环境中能够持久保持结构完整性。其次，针对涂层在户外应用时面临的紫外线挑战，测评应特别注重考察其抗紫外能力，以验证其在长期日照条件下的耐久性能。再者，耐腐蚀性测试通过模拟多种恶劣环境条件，精确测量涂层在这些条件下的性能保持能力，为涂层在复杂环境下的应用提供可靠依据。此外，考虑到实际应用中温度变化的多样性，温度适应性测试被纳入测评体系，确保涂层能在广泛的温度范围内保持稳定的性能输出。最后，自清洁能力的评估使得涂层在实际应用中能够更加便捷地维护，延长使用寿命。

表1　超疏水涂层耐久性几种典型测评方法

Table 1　Typical evaluation methods for durability of superhydrophobic coatings

性能类型	测试性能	测试方法		所需仪器	参考文献
力学	耐磨性	切向磨损法(线性磨损、圆形磨损)		Taber磨耗机	[38]
	黏附性	刀片划割法		刀片	[39]
		冲击法	(固)砂冲法	落砂装置	[40]
			(液)水流冲击/水滴冲击	滴水装置台/高压水枪	[41-42]
			(气)高压气流对冲法	高压气枪	[43]
		洗涤法		洗衣机	[31]
		胶带剥离法		3M胶带	[44]
	韧性	旋转弯曲法		万能试验机	[39]
	硬度	铅笔硬度测试法		铅笔硬度机	[44]
温度	耐热性	高温法		真空管式炉	[45]
	耐冻性	冻融循环测试法		冰箱，烘箱	[46]
紫外	抗紫外线性	紫外照射法		加速老化测试仪	[42]
腐蚀	耐酸碱性	耐碱腐蚀法		腐蚀液	[42]
	耐电化学腐蚀性	电化学腐蚀法		电化学工作站	[42]
自洁	防污性	污染-冲洗法	干污染	颗粒污染物	[38]
			湿污染	污染物悬浊液	

2　强化涂层防除冰措施

防冰涂层的设计往往局限于静态视角，忽视了表面纹理的特有结构、外界环境的动态变化以及表面能的改变对疏水防冰性能的影响。它仅仅聚焦于结冰前的预防阶段，没有考虑结冰后表面状态的变化及潜在损害，一方面会导致表面微结构受损，耐久性大打折扣[46-47]；另一方面，需要考虑结冰后的除冰措施。面对如今复杂动态的环境，超疏水表面的应用面临两大核心挑战：一是环境耐久性不足，二是机械稳定性欠缺，亟需我们集中力量突破。

2.1　环境耐久性

鉴于风电叶片在实际运行中需要适应复杂多变的环境，超疏水表面必须展现出在极端条件下的高度适应性。确保在极端环境条件下仍能维持其卓越的抗润湿性能，以应对各种复杂工况的挑战。PENG等[47]制备出一种基于Ecoflex石墨烯的超疏水涂层，在极端拉伸条件下(达至原始尺寸的300%)，如图8所示，涂层仍能保持优异的超疏水性，彰显了材料在复杂形变环境中的高度稳定性与适应性，同时石墨烯还赋予了涂层优异的电热性能，在施加25 V的低电压条件下可以将表面温度迅速提高到89.1 ℃，将主动除冰与被动防冰结合在一起，使材料具有更加优异的防冰性能。朱茂林[48]制备出一种具有耐酸碱、耐高温、耐紫外老化的碳纳米管电热超疏水涂层，同时在电加热除冰试验中，施加75 V交流电压，在−10 ℃的环境下，经10 min加热温度可升至25 ℃，5 ℃环境下经10 min加热温度可升至45 ℃，经检测，涂层展现出卓越的加热特性，即在最初的100 s内迅速升温，随后以稳定速率温和上升，直至达到理想的热平衡状态。整个加热周期内，涂层表面温度分布极为均匀，确保了高效的热传导与优异的电加热效果。

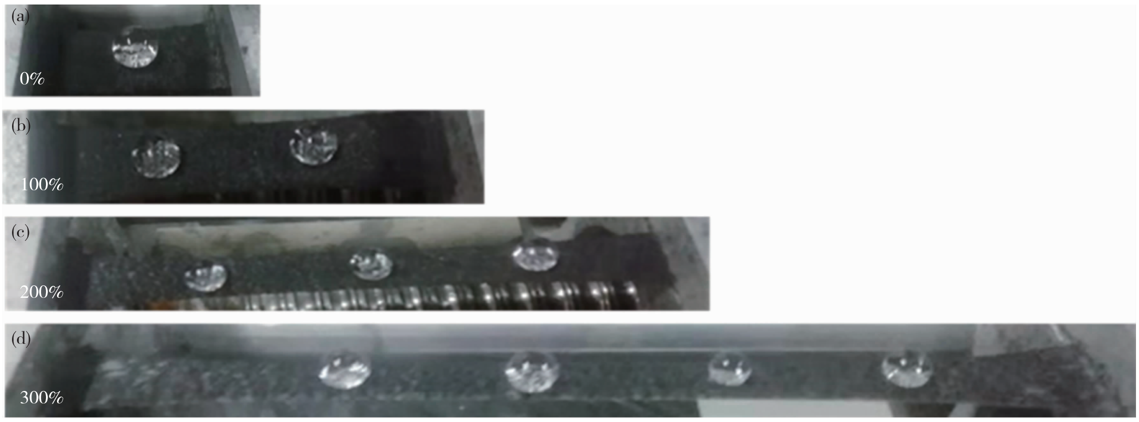

图 8　在涂层应变为 0%(a)、100%(b)、200%(c)和 300%(d)的疏水性[47]

Fig. 8　Hydrophobicity at coating strains of 0% (a), 100% (b), 200% (c), and 300% (d)[47]

为了有效减少叶片因覆冰而导致的运行故障，研究人员创新性地提出了将电磁线圈[49]、加热电阻[50]等主动除冰元件嵌入叶片内部，或是在叶根、轮毂等关键位置安装暖风机[51]等加热设备。这种复合除冰系统能够在必要时迅速启动，通过加热叶片表面，使积冰融化并脱落，从而保障设备的正常运行。然而，值得注意的是，这种将主动除冰与被动防冰相结合的策略虽然能够显著提升设备的抗冰能力，但同时也可能对叶片的气动性能和整体可靠性产生一定影响。叶片的气动性能直接关系到风能的捕获效率和转换效率，而任何对其结构的改变或附加设备的安装都可能引起流场的变化，进而影响其性能。此外，加热元件的长期运行也可能对叶片材料的耐热性、耐腐蚀性以及电气绝缘性能提出更高要求，从而增加设备的维护成本和复杂性。因此，目前这一领域的研究仍处于探索阶段。科学家们正通过不断优化加热元件的设计、改进叶片材料的性能，以及探索更加智能的除冰控制策略等方式，力求在保障设备抗冰能力的同时，最大限度地减少对叶片气动性能和可靠性的影响。

2.2　机械稳定性

当超疏水表面应用于户外环境时，微纳结构会不可避免地会遭受砂砾的磨蚀、液体(酸雨等)的冲击腐蚀，乃至尖锐物体的划伤。这些外力作用会严重破坏和损耗表面的微纳米结构，扩大了固-液接触面积，极大地削弱了表面的疏水性能。为此，在制备超疏水涂层时应注意提高机械稳定性。SU 等[52]从盔甲中得到灵感，设计并开发了一种双尺寸颗粒策略，采用石英砂微粒(QS MPs)和环氧树脂(EP)胶粘剂构建坚固的表面框架(EP@QS)作为“装甲”，将 EP@QS 复合材料改性的基板浸入 SiO_2 NPs ($msSiO_2$ NPs)-PDMS 中，形成超疏水 EP@QS@$msSiO_2$复合材料，由于在循环磨损过程中，QS“装甲”结构充当自我牺牲层，阻止 $msSiO_2$的纳米结构机械损坏，使涂层在 176 次磨损循环后能够保持超疏水性，显示出优异的机械耐久性。XU 等[53]采用相变材料(PCM)制备成多室微胶囊，使用自修复水性的聚氨酯(WPU)作为基体材料，将改性聚 N-异丙基丙烯酰胺(MNIPAM)引入壳层制备得到受温度刺激响应的一种双重自愈多功能涂层。由于加热会使微胶囊层暴露进而释放出疏水分子，使涂层表现出内在和表面的双重自愈能力以及超疏水性。SUN 等[54]以自然界弹尾虫角质层的分层结构为灵感，采用三维激光光刻技术，创新性地构建了锥形柱子阵列结构。如图 9 所示，该阵列中每个柱子均具备多层结构，含双重悬垂设计，其直径沿柱体自下而上渐次增大。这种设计不仅赋予材料优异的静态润湿性能，还通过多层屏障机制实现了液体的逐步渗透控制。尤为关键的是，双重结构间的协同作用，使得突破压力能够自下而上逐层累积增强，因此多层次分层设计还极大地提升了涂层的机械稳定性及超疏水性。

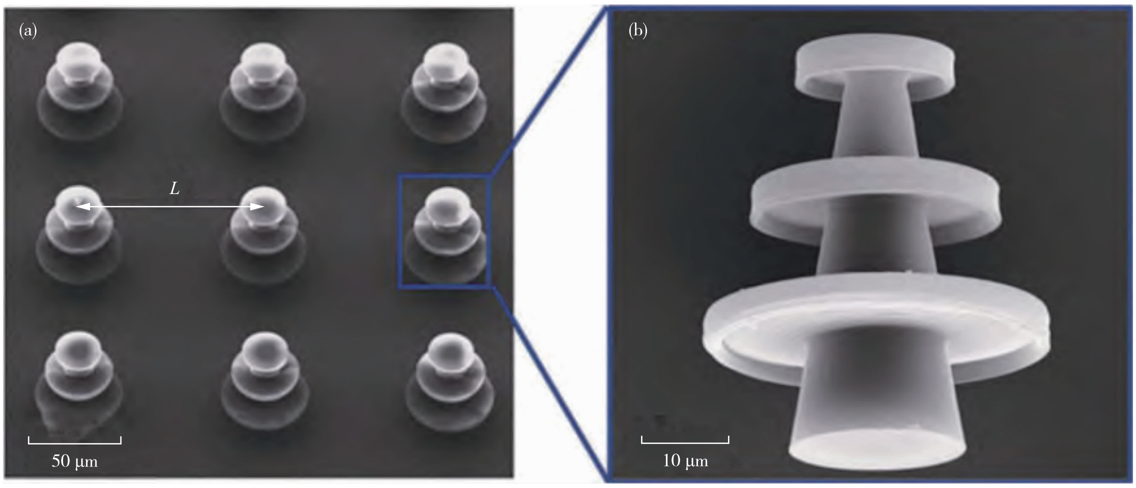

图 9 锥形柱子阵列结构[54]

Fig. 9 Cone shaped column array structure[54]

为了实现机械稳定超疏水表面的策略，我们可以从多个维度进行精心设计与优化，主要包括结构设计和基体材料修复两个方面。结构设计通过借鉴自然界中如荷叶、甲壳虫等生物表面的微纳米结构，设计出具有多层次复合结构的超疏水表面[14-15,54]，不仅增强表面的机械稳定性和抗磨损性，提高超疏水涂层的耐久性还使材料具有超高疏水性。其次，可以在超疏水涂层中嵌入内部含有修复剂的微胶囊，当涂层表面受到损伤时，微胶囊会破裂并释放修复剂，迅速填补损伤区域，恢复表面的超疏水性能[55]。这种设计不仅延长了涂层的使用寿命，还降低了维护成本。结构设计还可参考动态响应结构，通过设计具有动态响应特性的超疏水表面，如通过 pH 值[56]、温度[57-58]或光照[55]等外部刺激来控制表面形貌或化学性质的变化，从而实现对液体润湿性的智能调控。从叶片表面出发，可通过表面技术改性[52]，增强基体黏结性[57]等方面来提高涂层的附着力，减少因界面剥离而导致的涂层失效问题。

3 总结与展望

相较于传统叶片除冰技术，超疏水涂层凭借其独特的防冰机制，即在冰形成前有效清除表面水滴、延缓结冰进程并削弱冰层附着力，展现了显著的被动防冰优势。鉴于其性能与其表面形貌的紧密联系，结构对其疏水性有较大的影响。因此，具备自修复、自愈合等先进功能的多功能超疏水涂层，不仅能够恢复受损区域，甚至能在磨损后实现再生，这标志着涂层在耐久性方面的重大飞跃，预示着从实验室概念向工业化应用转化的广阔前景。然而，尽管已取得显著进展，当前超疏水涂层的制备技术仍面临成本高昂和工艺繁琐等挑战，限制了其在叶片表面大规模生产及广泛应用的潜力。因此，未来的研究亟需探索更简便、经济、环保且耐久的制备方法，以克服现有技术的局限性。同时，深入挖掘并创新除冰管理同样至关重要，为了应对极端或长时间暴露于严寒条件下的挑战，并进一步提升涂层的综合性能，可以考虑融合主动除冰与被动防冰策略。通过将电热元件、振动机制或化学除冰剂等主动除冰手段与超疏水涂层相结合，可以在必要时迅速启动除冰过程，确保涂层表面始终保持清洁无冰状态。

参考文献

[1] BERNARD T B，NJOMO D，DACKOU C S V，et al. Techno-economic analysis of wind power generation in Mongo and Abeche，Chad[J]. International Journal of Sustainable Development and Planning，2024，19(1)：55-67.

[2] NINA K S. Just sustainabilities：lessons from the lake Turkana wind power project in Kenya[J]. Local Environment，2024，29(1)：40-56.

[3] 刘永迪. 风力发电对电网的影响研究[J]. 智慧中国，2024(5)：78-79.
LIU Y D. Research on the impact of wind power generation on the power grid[J]. Smart China，2024(5)：78-79.

[4] 李红伟，明兴莹，罗华林，等. 基于改进灰狼优化的开关磁阻风力发电最大功率点跟踪控制策略[J]. 科学技术与工程，2023，23(26)：11224-11231.
LI H W，MING X Y，LUO H L，et al. Maximum power point tracking control strategy for switched reluctance

wind power generation based on improved grey wolf optimization[J]. Science,Technology and Engineering,2023,23(26):11224-11231.

[5] 刘韬文,蒙文川,戴承伟,等.风力发电机防冻融冰综述[J].湖北电力,2019,43(1):10-17.
LIU T W,MENG W C,DAI C W,et al. Overview of anti-freezing and thawing of wind turbines[J]. Hubei Electric Power,2019,43(1):10-17.

[6] GAO L Y,TAO T,LIU Y Q,et al. A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbines[J]. Renewable Energy,2020,167:917-928.

[7] NAZARI M H, MOUSAVI S Z, POTAPOVA A, et al. Toxicological impacts of roadway deicers on aquatic resources and human health:a review[J]. Water Environment Research,2021,93(10):1855-1881.

[8] 吴天容,曹伯兴,徐莉.国外化学融雪除冰剂的开发与进展[J].无机盐工业,1989,21(5):28-32.
WU T R,CAO B X,XU L. Development and progress of chemical snow melting and deicing agents abroad[J]. Inorganic Chemicals Industry,1989,21(5):28-32.

[9] SRINIVAS S B,VITALIY K,JÜRGEN R,et al. Low ice adhesion on nano-textured superhydrophobic surfaces under supersaturated conditions[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces,2016,8(20):12583-12587.

[10] 张强,夏雅阁,杨中天,等.液体注入表面(LIS)在防污领域的研究进展[J/OL].表面技术:1-21[2024-08-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20240704.1728.015.html.
ZHANG Q,XIA Y G,YANG Z T,et al. Research progress of liquid injection surface (LIS) in the field ofanti-fouling[J/OL]. Surface Technology:1-21[2024-08-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20240704.1728.015.html.

[11] CHEN J,LUO Z Q,FAN Q R,et al. Anti-ice coating inspired by ice skating[J]. Small,2014,10(22):4693-4699.

[12] ZHAO Z H,CHEN H W,ZHU Y T,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. DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109578.

[13] CHU F Q, HU Z F, FENG Y H, et al. Advanced anti-icing strategies and technologies by macrostructured photothermal storage superhydrophobic surfaces[J]. Advanced Materials,2024,36(31):2402897. DOI:10.1002/adma.202402897.

[14] JEEVAHAN J,CHANDRASEKARAN M,BRITTO J G,et al. Superhydrophobic surfaces:a review on fundamentals,applications, and challenges[J]. Journal of Coatings Technology and Research,2018,15(2):231-250.

[15] BARTHLOTT W,NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. Planta,1997,202:1-8.

[16] HE H,GUO Z G. Superhydrophobic materials used for anti-icing theory, application, and development[J]. iScience,2021,24(11):103357. DOI:10.1016/j.isci.2021.103357.

[17] TAKIKAWA Y, KAKUTANI K, NONOMURA T, et al. Conidia of erysiphe trifoliorum attempt penetration twice during a two-step germination process on non-host barley leaves and an artificial hydrophobic surface[J]. Mycoscience,2011,52(3):204-209.

[18] CHEN Y P,WANG H W,YAO Q F,et al. Biomimetic taro leaf-like films decorated on wood surfaces using soft lithography for superparamagnetic and superhydrophobic performance[J]. Journal of Materials Science,2017,52(12):7428-7438.

[19] CHEN Y D,JIE Y,WANG J,et al. Triboelectrification on natural rose petal for harvesting environmental mechanical energy[J]. Nano Energy,2018,50:441-447.

[20] ZHENG Y M, GAO X F, JIANG L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings[J]. Soft Matter,2007,3(2):178-182.

[21] LU H Y, ZHENG Y L, YIN W, et al. Propulsion principles of water striders in sculling forward through shadow method[J]. Journal of Bionic Engineering,2018,15(3):516-525.

[22] WANG W L,CHEN J L,CHEN L,et al. A laser-processed micro/nanostructures surface and its photothermal de-icing and self-cleaning performance[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2024,655(1):307-318.

[23] 尹欢.飞秒激光制备微/纳仿生结构协同光热效应防覆冰的研究[D].绵阳:西南科技大学,2023.
YIN H. Research on the synergistic photothermal effect of micro/nano biomimetic structures prepared by femtosecond laser for anti-icing[D]. Mianyang:Southwest University of Science and Technology,2023.

[24] JEONGEUN R,KIWOONG K,JOOYOUNG P,et al. Nearly perfect durable superhydrophobic surfaces fabricated by a simple one-step plasma treatment[J]. Scientific Reports,2017,7(1):1981. DOI:10.1038/s41598-017-02108-1.

[25] XUE J J,WU T,DAI Y Q,et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and

applications[J]. Chemical Reviews, 2019, 119(8): 5298-5415.

[26] CHEN Y F, ZHENG J, ZHU Z J, et al. Multi-layer photothermal film inspired by polar bear fur for anti-icing and photothermal de-icing in cold environments[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 694: 134125. DOI: 10. 1016/j. colsurfa. 2024. 134125.

[27] SAJI S V. Superhydrophobic surfaces and coatings by electrochemical anodic oxidation and plasma electrolytic oxidation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 283: 102245. DOI: 10. 1016/j. cis. 2020. 102245.

[28] CHO K W, CHOI S I. Fabrication of hairy polymeric films inspired by geckos: wetting and high adhesion properties[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(7): 1089-1096.

[29] 洪卫,王立权,林嘉平. 高分子多级微相结构与性能的研究进展[J]. 应用化学,2021,38(10):1310-1325.
HONG W, WANG L Q, LIN J P. Research progress on multi-level microstructure and properties of polymers[J]. Applied Chemistry, 2021, 38(10): 1310-1325.

[30] 李岱文. 溶胶-凝胶法制备玻璃基透明超疏水涂层[D]. 西安:西安理工大学,2022.
LI D W. Glass based transparent superhydrophobic coating prepared by sol-gel method[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2022.

[31] LUO X F, WENG Y Q, WANG S F, et al. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2019, 89(3): 820-829.

[32] ZHANG F, QIAN H C, WANG L T, et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 341: 15-23.

[33] ZHANG M, ZHOU T, LI H, et al. UV-durable superhydrophobic ZnO/SiO_2 nanorod arrays on an aluminum substrate using catalyst-free chemical vapor deposition and their corrosion performance[J]. Applied Surface Science, 2023, 623: 157085. DOI: 10. 1016/j. apsusc. 2023. 157085.

[34] 吴银涛,王波,王潇. 超疏水表面服役稳定性的研究进展[J]. 表面技术,2023,52(11):95-110.
WU Y T, WANG B, WANG X. Research progress on service stability of superhydrophobic surfaces[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 95-110.

[35] YAO L, 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.

[36] MA W, YANG Z, ASIF M, et al. Scalable-manufactured anticorrosion and wear-resistant superhydrophobic surfaces[J]. American Chemical Society Applied Engineering Materials, 2023, 1(1): 519-529.

[37] LUO W X, LI M J. Recent advances in fabrication of durable, transparent, and superhydrophobic surfaces[J]. Nanomaterials, 2023, 13(16): 2359. DOI: 10. 3390/nano13162359.

[38] ALLAHDINI A, JAFARI R, MOMEN G. Transparent non-fluorinated superhydrophobic coating with enhanced anti-icing performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 165: 106758. DOI: 10. 1016/j. porgcoat. 2022. 106758.

[39] LIU J J, LI M, LUO C Y, et al. Eco-friendly synthesis of self-reporting robust superhydrophobic coatings with damage sensitive photoluminescence[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 134162. DOI: 10. 1016/j. cej. 2021. 134162.

[40] CHEN B Y, ZHANG R R, FU H X, et al. Efficient oil-water separation coating with robust superhydrophobicity and high transparency[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 2187. DOI: 10. 1038/s41598-022-06220-9.

[41] LUO H, YANG M, LI D D, et al. Transparent super-repellent surfaces with low haze and high jet impact resistance[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(11): 13813-13821.

[42] LIU Y, TAN X Y, LI X Y, et al. Eco-friendly fabrication of transparent superhydrophobic coating with excellent mechanical robustness, chemical stability, and long-term outdoor durability[J]. Langmuir, 2022, 38(42): 12881-12893.

[43] ZHANG Y F, GE D T, YANG S. Spray-coating of superhydrophobic aluminum alloys with enhanced mechanical robustness[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 423: 101-107.

[44] PENG S, YANG X J, TIAN D, et al. Chemically stable and mechanically durable superamphiphobic aluminum surface with a micro/nanoscale binary structure[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(17): 15188-15197.

[45] CHA S, HER K E, KO T, et al. Thermal stability of superhydrophobic, nanostructured surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 391: 152-157.

[46] XIAO Z, ZHANG L Q, ZHANG W W, et al. Thermal stability of typical superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(6): 1025-1034.

[47] PENG Y J, HU J P, FAN Z, et al. A stretchable superhydrophobic coating with electrothermal ability for anti-icing application[J]. Materials Research Express, 2021,8(4):045009. DOI:10.1088/2053-1591/abf475.

[48] 朱茂林. 风力发电机叶片电热超疏水涂层的制备及防除冰性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
ZHU M L. Preparation and anti-icing performance of electric superhydrophobic coating on wind turbine blades[D]. Chongqing:Chongqing University,2021.

[49] 印厚飞,李奎,包振江,等. 风力发电机组叶片防冻除冰技术进展分析[J]. 科技创新与应用,2021(3):164-166.
YIN H F, LI K, BAO Z J, et al. Progress analysis of anti-freezing and deicing technology for wind turbine blades[J]. Technological Innovation and Application, 2021(3):164-166.

[50] 郑永强. 叶片通过频率振动的分析及治理[J]. 湖北电力,2017,41(3):35-38.
ZHENG Y Q. Analysis and treatment of blade vibration through frequency[J]. Hubei Electric Power,2017,41(3):35-38.

[51] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(2):428-438.

[52] SU C Z, ZHOU L, YUAN C Y, et al. Robust superhydrophobic composite fabricated by a dual-sized particle design[J]. Composites Science and Technology, 2023,231:109785. DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109785.

[53] XU C Y, CHEN Z, WANG Z X, et al. Fabrication of dual self-healing multifunctional coating based on multicompartment microcapsules[J]. American Chemical Society Applied Materials & Interfaces,2021,13(49):59298-59309.

[54] SUN J, ZHU P A, YAN X T, et al. Robust liquid repellency by stepwise wetting resistance[J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(3): 34103. DOI: 10.1063/5.0056377.

[55] 刘黎明,陈盛龙,潘炜. 光热自愈合超疏水膜的制备和防冰性能[J/OL]. 复合材料学报:1-13[2024-08-05]. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240530.002.
LIU L M, CHEN S L, PAN W. Preparation and anti-icing performance of a photothermal self-healing superhydrophobic membrane [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica:1-13[2024-08-05]. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240530.002.

[56] LI D, SUN L W, SHI L J, et al. Reversible switchable wettability of intrinsic micro/nanostructured pollen microcarriers via pH-induce from superhydrophobicity to superhydrophilicity[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,473:145184. DOI:10.1016/j.cej.2023.145184.

[57] JIANG S J, ZHOU S S, DU B, et al. Preparation of the temperature-responsive superhydrophobic paper with high stability[J]. American Chemical Society Omega, 2021,6(24):16016-16028.

[58] CHEN K L, WU Y, ZHOU S X, et al. Recent development of durable and self-healing surfaces with special wettability[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2016,37(6):463-485.