引用:解旭,周杰,罗静. 紫外光固化易清洁涂层的制备及性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026,39(6):885-895.
Citation: Xie Xu, Zhou Jie, Luo Jing. Preparation and performance study of UV-curable easy-to-clean coatings[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2026,39(6):885-895.
文章编号 1672-6634(2026)06-0885-11 **DOI** 10.19728/j.issn1672-6634.2026050011

紫外光固化易清洁涂层的制备及性能研究

解旭,周杰,罗静

(江南大学 化学与材料工程学院,江苏 无锡 214122)

摘要 研究提出一种简便高效的物理共混策略,将羟基封端聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH)引入光固化树脂体系,成功构筑了多功能紫外光固化易清洁涂层。该技术利用 PDMS-OH 与树脂基体间的表面能差异作为驱动力,通过控制湿膜诱导期为 PDMS-OH 提供向涂层表面迁移的时间窗口,使其在光引发交联前自发富集于涂层表面形成低表面能覆盖层,随后利用 UV 固化技术形成树脂交联网络,实现涂层非均相功能结构的瞬时物理锁定。结果表明:0.5 h 的诱导期能为 PDMS-OH 提供充足的时间构建稳定的覆盖层;仅需添加质量分数为 4%的 PDMS-OH,即可赋予涂层优异的易清洁与防冰性能:相较于未添加 PDMS-OH 的涂层,所构筑涂层的水滴滑动速率提升超 8 倍,油污完全滑落时间仅需 124 s,涂鸦痕迹可用湿棉布基本擦除,能够循环 10 次擦除常见生活污染物(如牛奶、咖啡)且不留痕迹。在−20 ℃低温环境下,涂层表面水滴的结冰时间长达 482 s,较空白涂层延长约 5 倍。即使经过 15 次除冰循环,冰附着力强度仍保持 75 kPa 以下,展现出优异的防冰耐久性。

关键词 紫外光固化;易清洁涂层;防冰
中图分类号 TB306 **文献标志码** A

Preparation and performance study of UV-curable easy-to-clean coatings

XIE Xu, ZHOU Jie, LUO Jing

(School of Chemistry and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract A facile and efficient physical blending strategy was presented to introduce hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane (PDMS-OH) into a photocurable resin system, successfully constructing multifunctional UV-curable self-cleaning protective coatings. This technology utilized the surface energy difference between PDMS-OH and the resin matrix as the driving force. By controlling the wet film induction period, a time window was provided for PDMS-OH to migrate toward the coating surface, enabling it to spontaneously enrich on the coating surface to form a low surface energy overlayer before photocrosslinking. Subsequently, this heterogeneous structure was instantaneously locked using UV curing technology. The results showed that an induction period of 0.5 hours could provide sufficient time for PDMS-OH to construct a

收稿日期:2026-05-22
基金项目:国家自然科学基金项目(52273057)资助
通信作者:罗静,女,汉族,教授,博士生导师,江苏省“六大人才高峰”高层次人才,江苏省青蓝工程中青年学术带头人,研究方向:先进功能涂层的制备及应用、功能胶体粒子的制备及应用,E-mail:jingluo19801007@jiangnan.edu.cn。

stable overlayer. Only 4% PDMS-OH addition was required to endow the coating with excellent easy-to-clean and anti-icing properties. Compared to the coating without PDMS-OH, the water droplet sliding speed of the as-prepared coating was increased by more than 8 times, and the complete sliding-off time for oil was only 124 s. Graffiti marks could be essentially erased with a wet cotton cloth, and common household contaminants (such as milk and coffee) could be repeatedly cleaned for 10 cycles without leaving any traces. At a low temperature of −20 ℃, the icing time of water droplet on the coating surface reached 482 s, which was approximately 5 times longer than that of the blank coating. Even after 15 deicing cycles, the ice adhesion strength remains below 75 kPa, demonstrating remarkable anti-icing durability.

Keywords ultraviolet curing; easy-to-clean coatings; anti-icing

0 引言

易清洁涂层作为一种低成本、环保以及便捷的表面防护技术,能够在外力作用下轻松去除表面污染物,在日常消费与工业领域均具有重要的应用价值[1-2]。在日常生活中,此类涂层能够减少电子设备表面的指纹、汗渍与污垢残留,或抑制摩天大楼窗户上的污渍积聚。在工业领域,它能够降低原油管道内壁的摩擦阻力、减少污泥沉积,降低管道维护成本。因此,易清洁涂层的开发具有重要的现实价值与经济效益[3-4]。

根据表面结构与作用机理,易清洁涂层主要分为两类:一类是基于微纳结构的超疏水涂层,另一类是基于光滑注液多孔表面的 SLIPS(Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces)涂层[5-6]。尽管超疏水涂层具有高接触角(大于 150°)和低滚动角(小于 10°)的优点,但是其制备工艺复杂,且表面微纳结构易因磨损而失效,导致涂层的机械耐久性以及透光性较差,限制了其在玻璃、显示屏等高透光基材上的应用[7-8]。相比之下,SLIPS 涂层具有透明度高、耐磨性强、制备简单等优点,能够较好地克服超疏水涂层的局限性。

传统意义上的 SLIPS 高度依赖预制的微纳多孔结构,并通过毛细管力实现外源润滑液的注入与固定。然而,随着研究向实际工业应用推进,传统多孔注液型 SLIPS 暴露出制备工艺繁琐、多孔骨架易受机械磨损,且润滑液在外部剪切作用下极易枯竭流失等瓶颈问题。近年来,众多研究者发展了多种 SLIPS 涂层制备技术,例如合成特殊结构的有机硅树脂,利用多孔材料(如改性硅藻土)负载润滑油,或采用微胶囊封装润滑物质等[9-11]。这些方法在一定程度上实现了润滑表面的构建,但仍面临诸多瓶颈,部分有机硅树脂需通过复杂化学改性实现与基材的稳定结合,合成流程繁琐且反应条件严苛。同时,负载型多孔材料和微胶囊的制备往往涉及多步处理过程,极大增加了制备的时间和经济成本,难以满足绿色、高效、规模化生产的需求。因此,开发一种更简便、通用、可规模化制备的 SLIPS 涂层技术具有重要研究意义。

同时,紫外光(UV)固化技术作为一种面向 21 世纪的绿色制造技术,可将液体光敏树脂快速固化形成三维交联网络,具有固化速度快、反应条件温和、能耗低、挥发性有机物排放少等优势,在电子、涂料、印刷油墨和黏合剂领域得到广泛应用[12-14]。将 UV 固化技术与 SLIPS 涂层相结合,有望解决传统制备方法中工艺复杂、成膜周期长和能耗高等诸多问题。然而,UV 固化反应速率极快,反应体系黏度会瞬间剧增,往往导致润滑组分(PDMS-OH)被瞬间“物理锁定”在树脂基体交联网络内部,无法在固化前克服扩散阻力迁移至涂层界面,使得涂层表面难以形成有效的 PDMS-OH 覆盖层,无法充分发挥 PDMS-OH 的表面润滑作用。

基于此,本研究提出一种简便的物理共混耦合表面迁移诱导策略,将具有润滑性能的 PDMS-OH 直接掺入光固化树脂体系,通过调控湿膜诱导期,为 PDMS-OH 的表面迁移提供动力学窗口,使其在光引发阶段前充分富集于涂层-空气界面,形成稳定的低表面能覆盖层,再通过 UV 固化实现该结构的瞬时物理锁定。系统研究了 PDMS-OH 在湿膜中的迁移行为,明确了其添加量对涂层疏水性、防油污、防涂鸦及防冰性能的影响规律,最终成功制备出具有优异综合性能的 SLIPS 易清洁涂层,为绿色、高效和可规模化制备高性能易清洁涂层提供了一种简便、通用的技术路径。

1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

改性环氧丙烯酸酯(6215-100)和聚酯丙烯酸酯(DR-E524)购自长兴化学工业股份有限公司;丙烯酸异

冰片基酯(IBOA)、羟基封端的聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH，M_n=500～800，黏度 0.02 ～ 0.03 Pa·s)、2-羟基乙基甲基丙烯酸酯磷酸酯(EM-39)购自广东首科新材料股份有限公司；2-羟基-2-甲基-1-苯基-1-丙酮(1173)购自阿达玛斯试剂中国有限公司；聚醚改性有机硅(BYK-333)购自德国毕克化工公司；BGD2313 型低碳钢板购自广州标格达精密仪器有限公司；HFV-M 高真空油购自上海惠丰石油化工有限公司；去离子水为江南大学自制。

高速搅拌分散机(DAC150.1FVZ-K，德国 SpeedMixer 公司)；框式刮膜器(BYK，德国 BYK 公司)；履带式光固化机(F300S，美国 Fusion 公司)；膜厚仪(Qnix 1500，德国 BYK 公司)；涂膜划格器(QFH，天津精科材料试验机有限公司)；铅笔硬度计(QHQ-A，天津艾瑞普科技有限公司)；漆膜冲击器(CJQ-II，普申检测仪器(上海)有限公司)；弯折机(WZJ-Ⅱ，上海现代环境工程技术有限公司)；视频光学接触角测量仪(OCA 40，北京东方德菲仪器有限公司)；半导体制冷板(SR-RLTA96W，广州正一电子科技有限公司)；数显推拉力计(SF-10，福州艾普仪器有限公司)。

1.2　易清洁涂层的制备

采用丙酮清洁无表面处理的低碳钢板，去除表面的油污及各类杂质。参照表 1 配方，将改性环氧丙烯酸酯 6215-100、聚酯丙烯酸酯 DR-E524 和活性稀释剂 IBOA 混合均匀，加入光引发剂 1173，待其完全溶解后，再加入附着力促进剂 EM-39 和流平剂 BYK-333，最后分别添加不同含量的羟基封端的聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH)，分散均匀后制得 UV 固化涂料。随后利用框式刮膜器(90 μm)将涂料涂覆在清洁过的低碳钢板上制备湿膜，并将湿膜分为三批样品，在无尘无光的环境中分别静置 0、0.5 和 1 h，静置时间结束后将样品放入 UV 光固化机跟随履带曝光 3 次，履带速度为 5.4 m/min，辐照总能量为 480 mJ/cm^2，制得 UV 固化易清洁涂层。

表 1　UV 固化体系的组成

Tab.1　The composition of UV-curable system

原料	质量/g
改性环氧丙烯酸酯 6215-100	1.5
聚酯丙烯酸酯 DR-E524	2
活性稀释剂 IBOA	1.5
光引发剂 1173	0.1
附着力促进剂 EM-39	0.1
流平剂 BYK-333	0.1
羟基封端的聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH)	0；0.05；0.125；0.2

1.3　表征和测试

涂层厚度根据 GB/T 13452.2－2008 进行测试；铅笔硬度根据 GB/T 6739－2006 进行测试；划格附着力根据 GB/T 9286－2021 进行测试；耐冲击性根据 GB/T 1732－2020 进行测试；T 弯根据 GB/T 30791－2014 进行测试。每组测试 3 个平行样品涂层，下同。

涂层透光率测试。将涂料涂覆于透明基材表面，固化后通过双光束紫外可见光分光光度计进行测试。

疏水性能测试。将待测试样放置于测试平台，在测试仪器的滴液管中装入去离子水，以 0.2 mL/min 的速率滴落在样品涂层表面，待水滴形态稳定后记录接触角数值。将样品涂层倾斜 45°，在涂层顶端滴加 50 μL 经透明色精染色的去离子水，控制水珠滑动路径为 100 mm。采用数码相机拍摄记录水珠滑落全过程，并记录水珠滑落时间。

涂鸦清洗性能测试。使用黑色油性记号笔在样品涂层中心绘制 20 mm×20 mm 的涂鸦印记，自然放置 24 h 后，使用湿润无绒棉布对涂鸦印记往复擦拭 25 次，擦拭压力为(1.5 ± 0.1)kg。测试后观察涂层是否出现失光、变色现象，记录涂鸦残留状态并拍摄数码照片留存。

防油黏附性能测试。使用刮膜器(250 μm)将 HFV-M 高真空油均匀涂覆在样品涂层表面，随后将涂层样品垂直于地面放置，使高真空油自然滴落。全程拍摄数码照片记录油滴落过程中涂层的表面状态及对应的滴落时间。

防结冰性能测试。制冷器预冷至－20 ℃后，将待测样品涂层放置在制冷器载物台上，在涂层中央滴加 30 μL 去离子水，拍摄数码照片记录水珠结冰过程，并记录水珠结冰所需时间。

循环防冰耐久性能测试。通过使用数显推拉力计对涂层冰附着强度进行多次循环测试，评价涂层防冰耐久性能。

2 结果与讨论

2.1 PDMS-OH 的迁移行为规律

羟基封端聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH)作为涂层的核心润滑功能成分,其在涂层表面的富集程度直接决定了涂层易清洁性能的关键因素。在 UV 固化体系中,低表面能 PDMS-OH 在热力学驱动下,倾向于向涂层气-液界面迁移,以降低体系总能量。但 UV 固化反应的瞬间性与体系黏度的急速上升往往会限制该迁移过程。因此,在光固化前设置适宜的湿膜诱导期,为 PDMS-OH 的定向迁移供充足的时间窗口,对优化涂层表面结构至关重要。该工艺可使部分 PDMS-OH 迁移至涂层表面形成致密润滑层,另一部分则被物理“锁定”在涂层内部,作为后续损耗的补充来源,涂层成膜机制如图 1 所示。

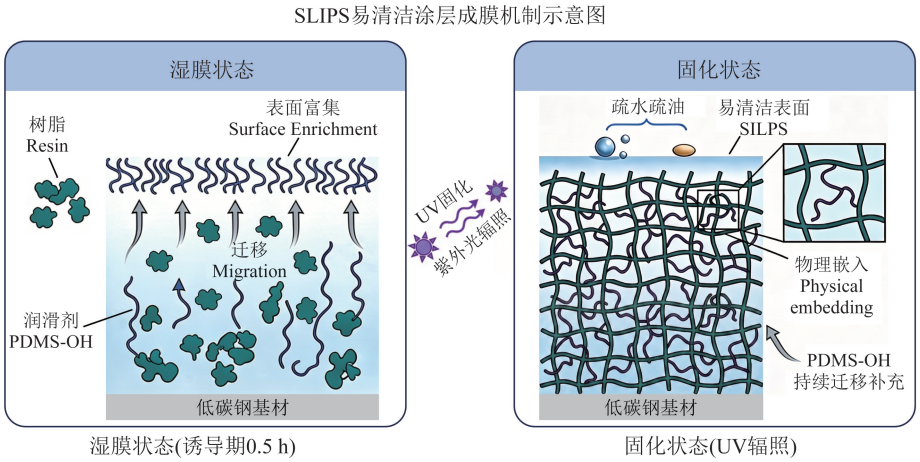


图 1 SLIPS 易清洁涂层成膜机制示意图

Fig. 1 Film-forming mechanism schematic of UV-curable SLIPS easy-to-clean coatings

为了研究表面能诱导 PDMS-OH 迁移与富集的调控机制,系统研究了不同湿膜诱导期对涂层润湿性、液滴润滑行为及表面元素组成的影响,结果如图 2 所示。未添加 PDMS-OH 的空白对照组涂层水滴滑落时间长达 28 s,水接触角仅有 56.65°,且表面 Si 含量极低,质量分数仅为 0.39%。加入质量分数 4%的 PDMS-OH 后,无湿膜诱导期(0 h)的样品水滴滑落时间缩短至 3.9 s,水接触角小幅提升至 59.85°,表面 Si 含量增至质量分数 1.82%。这表明在无诱导期条件下,PDMS-OH 链段尚未克服体系黏度阻力完成界面迁移,便被快速形成的交联网络固定于树脂基体内部,导致其表面润滑功能未能充分发挥。当诱导期延长至 0.5 h,涂层性能显著改善:水滴滑落时间进一步缩短为 3 s,水接触角提升至 82.35°,同时表面 Si 元素含量增加至质量分数 2.06%。这一变化归功于适宜的诱导期为 PDMS-OH 在表面能差驱动下向界面迁移提供了关键的时间窗口,使其得以在涂层表面形成较为致密的覆盖层。继续延长诱导期至 1 h,涂层性能趋于稳定,水滴滑落时间为 3.1 s,水接触角为 79.74°,表面 Si 元素含量质量分数为 1.90%,与诱导期 0.5 h 的样品相比略微不同。这是因为当诱导期进一步延长至 1 h 时,体系趋近热力学平衡,甚至在表面出现局部“过饱和”。为了进一步降低体系的总自由能,过剩的 PDMS-

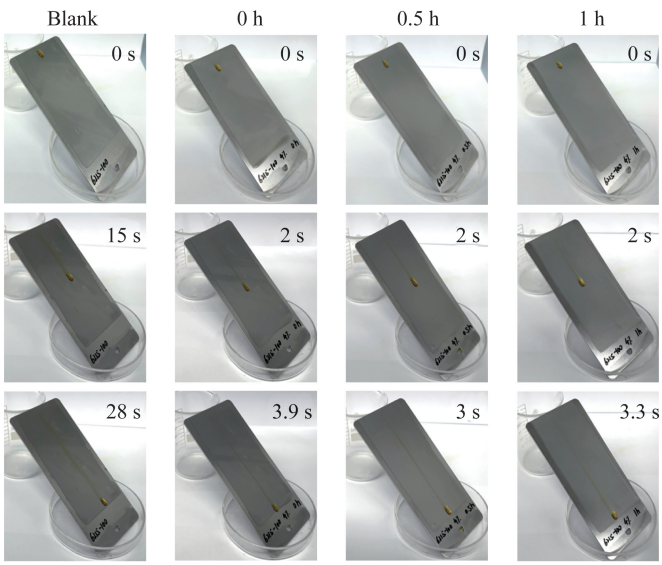
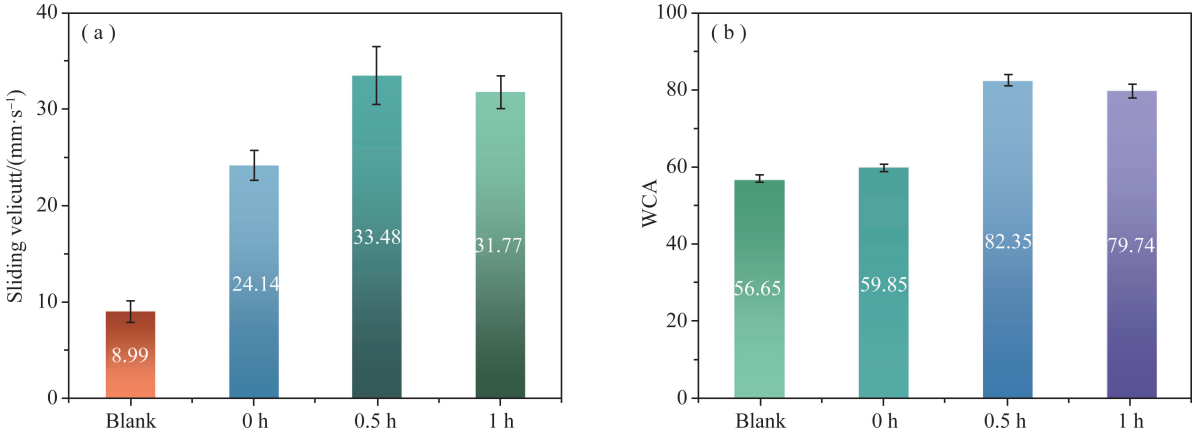


图 2 不同诱导时间添加量质量分数为 4%PDMS-OH 涂层倾斜 45°的水滴滑动状态

Fig. 2 Sliding of water droplets on 45°-tilted coatings with 4% PDMS-OH at different standing times

OH 分子链段在界面处倾向于发生微观上的自发聚集或轻微的相分离，导致涂层最外层的微观均匀性出现轻微下降。这种表面的微观团聚与不均匀分布，最终在宏观测试数据上体现为数值的微小波动与回落。

综上所述，0.5 h 的湿膜诱导期为 PDMS-OH 实现高效的表面富集提供了必要的动力学条件，保证了足量 PDMS-OH 迁移至界面并形成稳定的覆盖层，随后通过 UV 固化快速锁定该表面结构，为后续涂层表现出优异的易清洁与防冰性能奠定了结构基础。



注：(a) 水滴滑动速度；(b) 水接触角。

图 3　不同静置诱导时间下含质量分数为 4%的 PDMS-OH 涂层 45°倾斜表面水滴滑动速度与水接触角测试结果

Fig. 3　Sliding speed of water droplets and the water contact angle on a 45°-tilted surface coated with 4% PDMS-OH at different static induction times

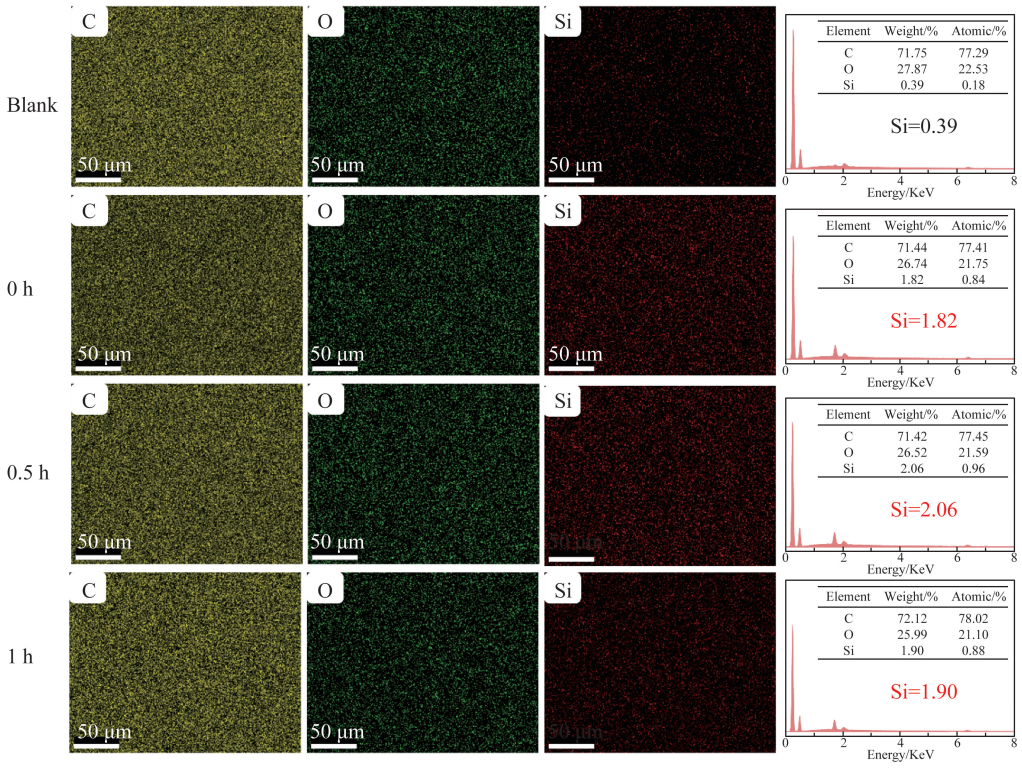


图 4　不同静置诱导时间下含质量分数为 4%的 PDMS-OH 涂层的 EDX 光谱

Fig. 4　EDX spectra of coatings with 4% PDMS-OH at different static induction times

2.2　PDMS-OH 添加量对涂层性能的影响

为研究 PDMS-OH 添加量对涂层综合性能的影响，制备了不同 PDMS-OH 添加量（质量分数分别为 0%、1%、2.5%和 4%）的光固化涂层，并系统表征其力学性能、润湿行为及抗油污黏附性能。

2.2.1　力学性能。表 2 为不同 PDMS-OH 添加量涂层的力学性能测试结果。实验结果表明，PDMS-OH

的引入在较宽添加范围内(质量分数为0～4%)对涂层的宏观力学性能无明显不利影响。各组涂层铅笔硬度均为HB,耐冲击强度均保持在5 J,T弯测试结果始终为0 T,划格法附着力均达到最高等级(0级)。上述数据证实,PDMS-OH的引入不会破坏涂层与基材的界面结合强度及涂层自身的韧性,各样品均维持优异的力学性能。

表2 不同PDMS-OH添加量涂层的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of coatings with different PDMS-OH additions

项目	质量分数0%	质量分数1%	质量分数2.5%	质量分数4%
铅笔硬度	HB	HB	HB	HB
耐冲击性/J	5	5	5	5
T弯	0T	0T	0T	0T
划格附着力/级	0	0	0	0

2.2.2 *润滑性与疏水性能*。PDMS-OH是赋予涂层疏水性与表面润滑特性的关键组分,其低表面能可有效削弱水滴在涂层表面的黏附作用。因此PDMS-OH的添加量直接决定其在界面富集浓度,从而决定涂层的润湿行为。

图5和图6分别呈现不同PDMS-OH添加量制备的光固化涂层的动态水滴滑动速度与静态水接触角。未添加PDMS-OH的涂层水接触角仅为59.04°,水滴在45°倾斜表面上滑动速度缓慢,完全滑落需28 s,表现出较差的疏水性。引入质量分数1%的PDMS-OH后,涂层水接触角提升至63.95°,水滴滑动时间急剧缩短,完全滑落仅需要6 s,表明少量PDMS的表面迁移已显著改善疏水性。当PDMS-OH添加量增至质量分数为2.5%时,水接触角进一步提升至77.23°,水滴滑动时间缩短至4.6 s。当PDMS-OH添加量达到质量分数4%时,涂层润湿性能最优:水接触角可达82.52°,水滴完全滑落仅需3 s,滑移速率相较空白样品提升8倍以上。同步计算各组涂层表面自由能,不含PDMS-OH的纯树脂涂层表面自由能高达53.11 mN/m;伴随PDMS-OH的掺入,涂层总表面自由能呈阶梯式显著降低;当添加量为质量分数4%时,表面自由能大幅降低至32.01 mN/m。这是因为PDMS-OH与树脂基体间固有的表面自由能差异作为热力学驱动力,克服了体系内部的物理阻力,促使低表面能的润滑组分在湿膜诱导期内自发向界面发生定向迁移与富集,进而构筑出优异的低表面能液相润滑层。

上述数据证实,PDMS-OH添加量与涂层的静态疏水性和动态疏水润滑性呈正相关。随着添加量增加,更多PDMS-OH迁移至表面并形成更完整、均匀的低表面能覆盖层,从而持续降低表面能,抑制水分子在表面铺展与钉扎效应,最终实现水滴的快速滚落。

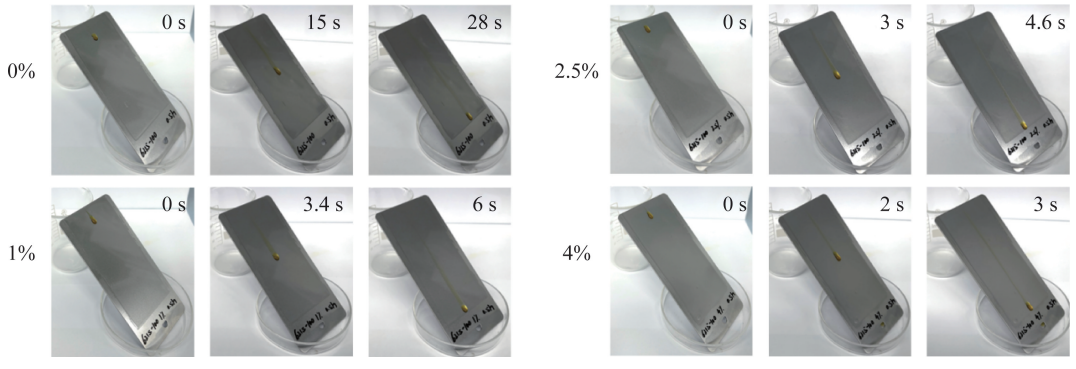
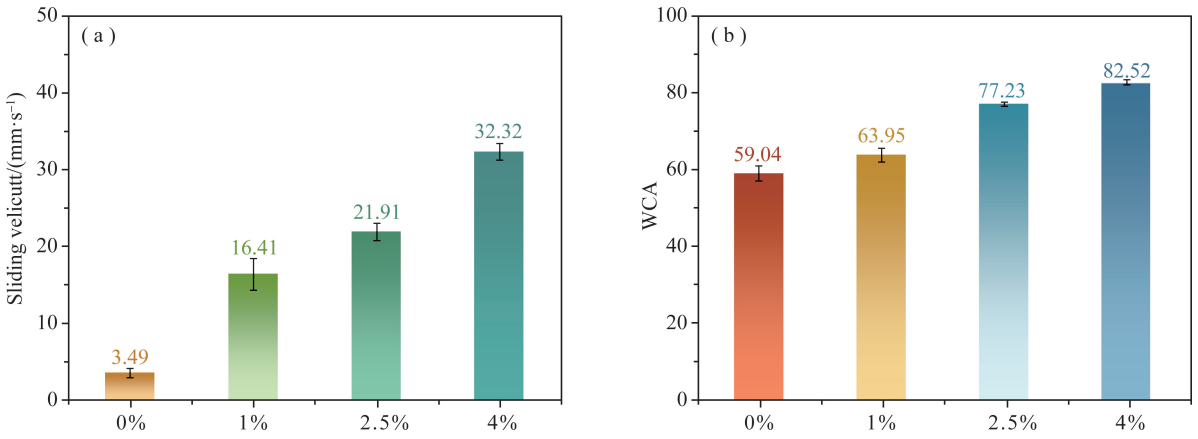


图5 不同PDMS添加量涂层45°倾斜角的水滴滑动状态

Fig. 5 Sliding of water droplets on 45°-tilted coatings with different PDMS additions

2.2.3 *抗油污黏附性能*。PDMS-OH具有低表面能特性,除赋予涂层疏水性,还可有效抑制油污附着于涂层表面。图7对比了不同涂层对高真空油的抗黏附性能。未添加PDMS-OH的涂层表面被油污完全覆盖,900 s内无明显滑落迹象。添加质量分数为1%的PDMS-OH后,油污开始发生滑落,完全滑落需354 s。当PDMS-OH添加量增至质量分数2.5%时,油污滑落速度加快,完全滑落的时间缩短至186 s。而当PDMS-

OH 添加量达到质量分数 4%时，性能最优，油污完全滑落时间仅需 124 s，滑落速率较空白涂层提升超过 6 倍，且表面几乎无油污残留。上述结果证实，PDMS-OH 添加量与涂层疏油自清洁性能呈正相关，添加量越多，油污滑落速度越快，涂层防油黏附性能越优异。该现象可归因于 PDMS-OH 在涂层表面形成连续均匀的饱和低表面能薄膜带来的“隔离效应”。随着 PDMS-OH 添加量增加，表面覆盖度与完整性提高，大幅削弱了油滴与固体表面间的相互作用，阻碍油滴在表层铺展、钉扎，使其在重力驱动下快速脱离涂层表面。



注：(a) 水滴滑动速度；(b) 水接触角。

图 6　不同 PDMS-OH 添加量涂层 45°倾斜角的水滴滑动速度和水接触角

Fig. 6　Sliding velocity of water droplets at a tilt angle of 45° and water contact angle of coating with different PDMS additions

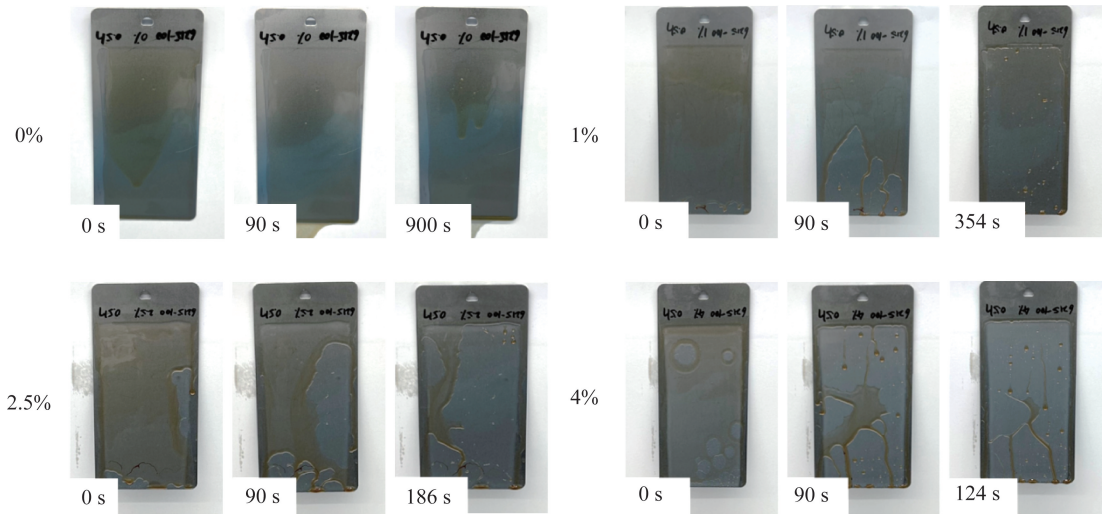


图 7　不同 PDMS-OH 添加量涂层的防油黏附状态

Fig. 7　Anti-oil-adhesion of coatings with different PDMS-OH additions

2.2.4　防涂鸦性能。防涂鸦可擦拭性能是评价易清洁涂层实际应用价值的重要指标。为探究 PDMS-OH 添加量对涂层防涂鸦性能的影响，对不同 PDMS-OH 添加量的光固化涂层进行了防涂鸦实验，结果如图 8 所示。未添加 PDMS-OH 的涂层表面，黑色油性记号笔涂鸦在 24 h 后难以用湿棉布擦除，若用无水乙醇等有机溶剂强行擦除，可能会导致涂层失光、表层破损。随着 PDMS-OH 添加量的增加，涂层的抗涂鸦性能显著提升。添加质量分数为 4%的 PDMS-OH 的涂层，涂鸦基本实现完全擦除，仅留下轻微灰色痕迹。上述现象证实，纯树脂涂层基本不具备耐涂鸦能力，随着 PDMS-OH 添加的越多，涂层的防涂鸦性能越强。其机制可能在于迁移至涂层表面的 PDMS-OH 可构筑连续致密的低表面能屏障，有效阻止了油性涂鸦组分向涂层内部渗入，大幅降低污渍附着强度，使其易于在清洁过程中被去除。

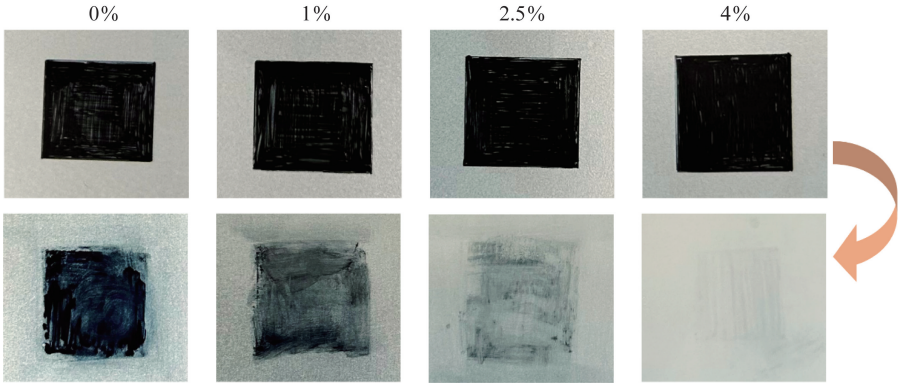


图 8 不同 PDMS-OH 添加量涂层的防涂鸦状态

Fig. 8 Anti-graffiti of coatings with different PDMS-OH additions

为进一步验证涂层的耐磨稳定性与耐擦拭耐久性能,对涂层进行了循环擦拭测试,在经历无尘布 10 次循环擦拭后,涂层水接触角以及水滑落时间的变化如图 9 和图 10 所示。经过上述处理后,不同 PDMS-OH 添加量涂层表面的水接触角仅出现小幅减小,水滴滑落时间仍保持较低水平。这主要归因于本涂层体系独特的物理嵌合结构与组分储液机制:不仅表面的润滑层具有良好的隔离效果,同时三维交联网络基体中储备的 PDMS-OH 组分,能够在表面受损时持续向界面迁移补充,实现界面性能动态修复与长效润滑防护。

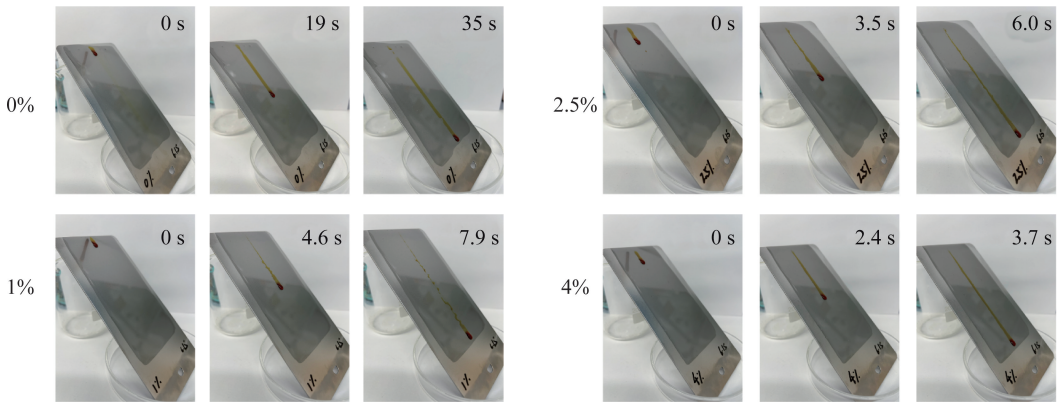
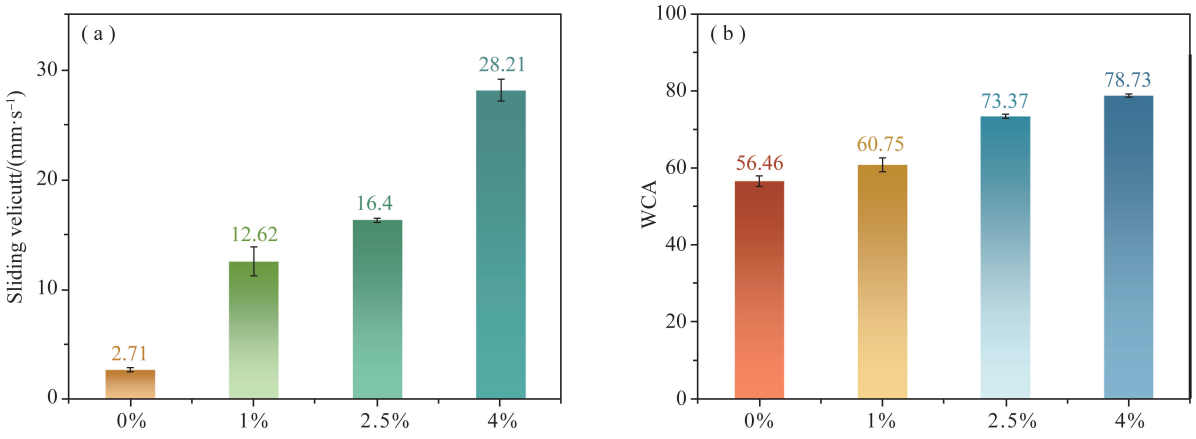


图 9 循环擦拭后不同 PDMS 添加量涂层 45°倾斜角的水滴滑动状态

Fig. 9 Sliding of water droplets on 45°-tilted coatings with different PDMS additions after cyclic wiping



注:(a) 水滴滑动速度;(b) 水接触角。

图 10 循环擦拭后不同 PDMS-OH 添加量涂层 45°倾斜角的水滴滑动速度和水接触角

Fig. 10 Sliding velocity of water droplets at a tilt angle of 45° and water contact angle of coating with different PDMS-OH additions after cyclic wiping

2.2.5 *生活污染物清洁性能*。为进一步探究该涂层在实际工况中的长效抗污应用潜力,特选取了牛奶和咖

啡这两种日常生活中最常见的污染物，对涂层进行了生活污染物循环清洁测试。牛奶中含有丰富的蛋白质和脂肪，而咖啡则富含小分子色素，这两类物质极易在固体表面发生物理吸附并留下顽固的印记。涂层表面在经 10 次“污染-擦拭”循环前后的形貌变化如图 11 所示。未掺杂 PDMS-OH 的空白涂层在经过 10 次循环擦拭后，其表面残留了大量的污染物痕迹。这主要是由于空白树脂基体的表面能较高，牛奶和咖啡中的有机大分子极易通过毛细作用或范德华力渗透并附着在涂层表面，导致常规的物理擦拭无法将其彻底清除。相比之下，添加了 PDMS-OH 的改性涂层在历经 10 次相同的牛奶与咖啡污染及擦拭循环后，表面依然保持光洁如初，未观察到任何生活污染物的残留与沉积。这一显著的抗污耐久性提升，归因于 PDMS-OH 在涂层界面自发富集构筑的低表面能润滑滑移层。该滑移层赋予了涂层极低的表面能，有效阻隔复杂污染物分子与树脂基体的直接接触与界面结合，使得污染物只能在滑移层上方呈游离状态，从而能被轻松且彻底地擦除。

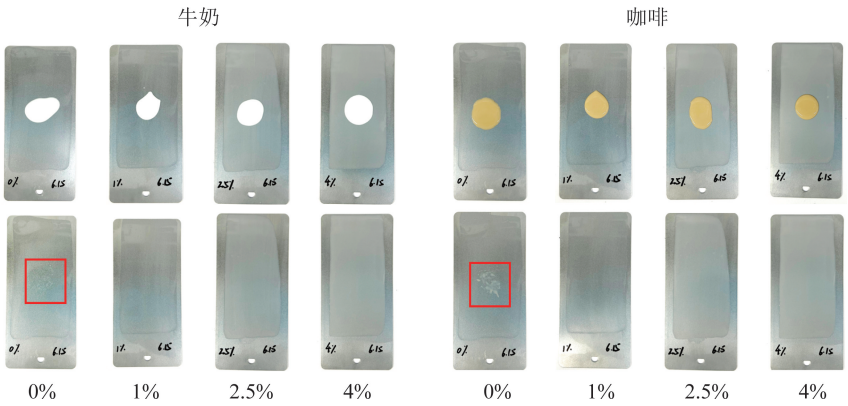


图 11　不同 PDMS-OH 添加量涂层牛奶/咖啡循环清洁耐久性

Fig. 11　Cyclic milk/coffee cleaning durability of coatings with different PDMS-OH additions

2.2.6　防结冰性能及循环除冰耐久性。在实际低温工况下，涂层极易面临表面结冰、覆冰附着等难题。考虑到 PDMS-OH 赋予涂层的优异疏水润滑性能，该特性可进一步抑制冰晶在涂层表面的生成与附着。因此，评估了该涂层在低温下的防结冰行为及其在多次除冰循环中的耐久性。

图 12 展示了－20 ℃低温环境不同 PDMS-OH 添加量涂层的结冰延迟时间。未添加 PDMS-OH 的涂层表面水滴在 76 s 内即完全结冰。随着 PDMS-OH 掺量提升，结冰时间显著延长：添加质量分数为 1%、2.5%和 4%的涂层，PDMS-OH 改性涂层的结冰时间分别延长至 103、201 和 482 s。其中添加质量分数为 4%的 PDMS-OH 的涂层将结冰延迟时间延长了约 534%。这表明 PDMS-OH 的引入有效延缓了冰晶成核，其表面形成的低表面能层能够弱化水分子界面吸附效应、抑制冰核活性位点生成，最终实现优异的防结冰效果[15-16]。

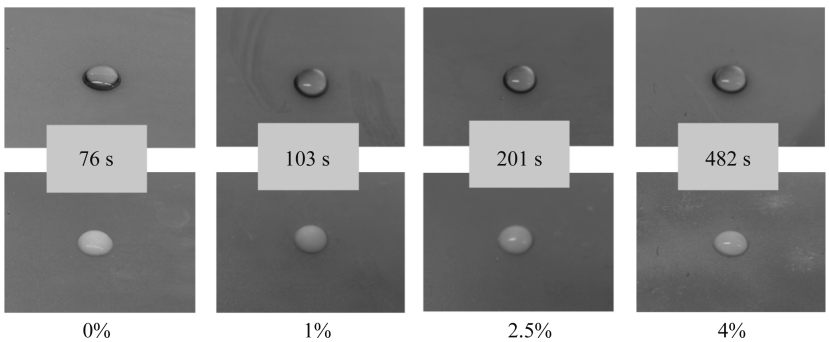
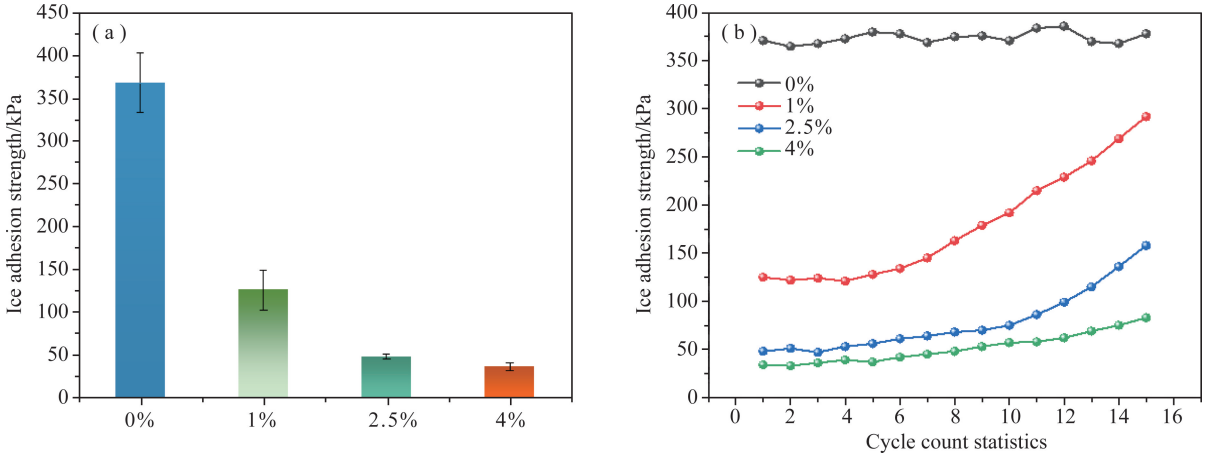


图 12　－20 ℃下不同 PDMS-OH 添加量涂层的防结冰性能

Fig. 12　Anti-icing of coatings with different PDMS-OH additions at －20 ℃

进一步测量了冰在涂层表面的附着力强度，结果如图 13(a)所示。未添加 PDMS-OH 的涂层冰附着力高达约 370 kPa。而添加质量分数为 4%的 PDMS-OH 的涂层冰附着力强度显著降低至 40 kPa 左右，降幅达 89%。极低的冰附着力强度意味着冰层在轻微外力下即可脱落，无法稳定附着与持续生长。这源于 PDMS-OH 覆盖层大幅削弱了冰与涂层表面的界面相互作用。



注:(a) 冰附着力强度;(b) 循环除冰耐久性。

图 13 −20 ℃条件下不同 PDMS-OH 添加量涂层的冰附着力强度与循环除冰耐久性

Fig. 13 Ice adhesion and cyclic de-icing durability of coatings with different PDMS-OH additions at −20 ℃

与此同时,实际工程应用不仅要求涂层具备优异的防冰性能,还需拥有良好的循环耐久与使用寿命。图13(b)展示了涂层在15次冻融-除冰循环测试后冰附着力变化。添加质量分数为4%的PDMS-OH的涂层在全部循环中均保持较低的冰附着力(小于75 kPa),表现出优异的耐久性。而PDMS-OH添加质量分数为1%和2.5%的涂层在约10次循环后,冰附着力强度即显著上升,表明其表面润滑层的补充或保持能力不足。这可能是由于高掺量PDMS-OH为涂层三维网络提供了充足的功能组分储备,使其能在多次机械或热应力作用后,通过本体向表面的持续迁移,长期维持表层低表面能润滑结构与防冰功能稳定性。

3 结论

针对UV固化体系固化速率过快、导致低表面能润滑组分难以向界面迁移的技术难题,本研究提出一种简便的物理共混策略,将PDMS-OH直接引入光固化树脂,成功制备了兼具优异疏水、抗污与防冰耐久性能的UV固化SLIPS易清洁涂层。通过利用PDMS-OH与树脂基体间的表面能差异作为驱动力,并引入0.5 h湿膜诱导工艺,为PDMS-OH提供了定向迁移至涂层表面的时间窗口,使其在固化前形成稳定的低表面能覆盖层,最终通过UV快速固化形成致密树脂交联网络,实现表层功能结构的物理锁定与固定。研究表明,仅需添加质量分数为4%的PDMS-OH,即可显著提升涂层的各项性能:在润湿性方面,水接触角达82.52°,水滴在45°倾斜表面的滑落时间缩短至3 s,滑动速率较未添加涂层提升超过8倍;在抗污性方面,油污完全滑落时间缩短至124 s,黑色记号笔涂鸦几乎可被湿布完全擦除,能够循环10次擦除常见生活污染物(如牛奶、咖啡)且不留痕迹;在防冰性能方面,涂层在−20℃下的水滴结冰时间延长至482 s(提升约5倍),冰附着力由370 kPa大幅降低至40 kPa,且在经历15次冻融-除冰循环后,冰附着力仍可维持在75 kPa以下,表现出良好的耐久性。本研究通过简易物理共混改性与湿膜诱导工艺调控,结合绿色高效的UV固化技术,实现了高性能SLIPS易清洁涂层的简易、可控制备,为开发新型多功能防护涂层提供了简便通用、具备良好实用价值的技术思路。

参 考 文 献

[1] Sethi S K, Manik G. A combined theoretical and experimental investigation on the wettability of MWCNT filled PVAc-g-PDMS easy-clean coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 151: 106092.

[2] 常国华, 杨彤, 吴石莲, 等. 基于硅树脂和硅油制备的增透超滑自清洁涂层[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(1): 145-153.

[3] 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.

[4] Latthe S S, Sutar R S, Kodag V S, et al. Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 128: 52-58.

[5] 雷啸天, 魏梦洁, 吴静, 等. 基于聚二甲基硅氧烷改性超支化聚硫氨酯制备紫外光固化易清洁涂层[J]. 功能高分子学报, 2026, 39(1): 61-73.

[6] Zang X R, Zhao H B, Li J W, et al. Heterogeneous network SLIPS coating with soft-hard chain integration design for marine antifouling engineering[J]. Advanced Materials, 2026, 38(16): e22578.
[7] 许慧凌，林明华，王华，等. 功能性超疏水防冰涂层的研究进展[J]. 涂料工业，2025，55(12)：82-86.
[8] 卢林宇，袁文鹏，张越，等. 超疏水涂层耐久性研究进展[J]. 复合材料学报，2026，43(2)：637-654.
[9] Sedai B R, Khatiwada B K, Mortazavian H, et al. Development of superhydrophobicity in fluorosilane-treated diatomaceous earth polymer coatings[J]. Applied Surface Science, 2016, 386: 178-186.
[10] Zhang Q Q, Zhang S Y, Liu R, et al. Near-infrared light-responsive lubricating coating with polyaniline microspheres for long-term anti-icing and high-efficiency de-icing[J]. Small, 2025, 21(39): e07428.
[11] Ou S N, Zhang J Q, Gu L J, et al. Click chemistry of PMHS for fabrication of robust, transparent and hydrophobic silicone resin coating on wood substrate at room temperature[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 186: 107976.
[12] Chen Y, Liu R, Luo J. Enhancing weathering resistance of UV-curable coatings by using TiO_2 particles as filler[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 169: 106936.
[13] Zhang Z J, Liu R, Luo J. Silicone modified cardol based UV-curable coating with antifouling and anticorrosion performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 204: 109266.
[14] Cai Z, Guo H Z, Sun W S, et al. Recent advances in UV-curable resins for flexible electronic devices-formulations, properties, and applications[J]. Polymer Engineering & Science, 2026, 66(5): 3069-3099.
[15] Kuai S W, Tang J, Zhou L P, et al. Durable anti-icing coating with stability based on self-regulating oil storage layer[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 685: 133028.
[16] Veronesi F, Boveri G, Mora J, et al. Icephobic properties of anti-wetting coatings for aeronautical applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127363.

（责任编辑：陈梦圆）

（上接第 884 页）

[11] Naowarat, Tawarat W, Tang M I. Control of the transmission of chikungunya fever epidemic through the use of adulticide[J]. American Journal of Applied Sciences, 2011, 8(6): 558-565.
[12] Dumont Y, Chiroleu F. Vector control for the chikungunya disease[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2010, 7(2): 313-345.
[13] Moulay D, Aziz-Alaoui M A, Cadivel M. The chikungunya disease: modeling, vector and transmission global dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 2011, 229(1): 50-63.
[14] Srichan S, Naowarat S. Effect of Environmental Factors on the Transmission of Chikungunya Fever[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2015, 9(13): 19-25.
[15] Pialoux G, GaüzèRe B A, Jauréguiberry S, et al. Chikungunya, an epidemic arbovirosis[J]. The Lancet Infectious Diseases, 2007, 7(5): 319-327.
[16] Manore C A, Hickmann K S, Xu S, et al. Comparing dengue and chikungunya emergence and endemic transmission in A. aegypti and A. albopictus[J]. Journal of Theoretical Biology, 2014, 356: 174-191.
[17] Lahariya C, Pradhan S K. Emergence of chikungunya virus in Indian subcontinent after 32 years: a review[J]. Journal of Vector Borne Diseases, 2006, 43(4): 151-160.
[18] Sebastian M R, Lodha R, Kabra S K. Chikungunya infection in children[J]. The Indian Journal of Pediatrics, 2009, 76(2): 185-189.
[19] Schwartz O, Albert M L. Biology and pathogenesis of chikungunya virus[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(7): 491-500.
[20] Chitnis N, Hyman J M, Cushing J M. Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model[J]. Bulletin of Mathematical Biology, 2008, 70(5): 1272-1296.
[21] Pontryagin L S. Mathematical Theory of Optimal Processes[M]. London: Routledge, 2018: 1-74.
[22] Pang L Y, Ruan S G, Liu S H, et al. Transmission dynamics and optimal control of measles epidemics[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 256: 131-147.
[23] 陈丽丽，丁春晓. 尼日利亚猴痘疫情不确定 Logistic 增长模型分析[J]. 山东大学学报(理学版)，2025，60(12)：49-54.
[24] 赵锦，刘如春，陈水连，等. 中国基孔肯雅热暴发疫情关键控制措施效果模拟[J]. 中华流行病学杂志，2015，36(11)：1253-1257.
[25] 金秀蕾. 两类蚊媒传染病动力学特性和控制策略的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.
[26] 张宛玉. 几类具有年龄结构的蚊媒传染病建模与分析[D]. 信阳：信阳师范大学，2024.
[27] Mallapaty S. Dengue vaccine poised for roll-out but safety concerns linger[J]. Nature, 2022, 611(7936): 434-435.

（责任编辑：刘庆松）