

<http://pmse.scu.edu.cn>

## 基于硅树脂和硅油制备的增透超滑自清洁涂层

常国华<sup>1,2</sup>, 杨彤<sup>1,2</sup>, 吴石莲<sup>1,2</sup>, 李承刚<sup>1,2</sup>, 关润泽<sup>1,2</sup>, 周炳见<sup>1,2</sup>, 王娟<sup>1,2</sup>, 杨宇<sup>1,2</sup>

(1. 云南大学 材料与能源学院 云南省光电信息材料国际联合研究中心, 云南 昆明 650504;

2. 云南大学 国家光电子能源材料国际联合研究中心, 云南 昆明 650504)

**摘要:** 鉴于光伏板在应用中迫切需要具有自清洁或易清洁的功能, 文中开发了一种涂覆在光伏板上具有增透作用的超滑自清洁涂层。该涂层由有机硅树脂、甲基硅油、环氧树脂和硅烷偶联剂制备而成。这种超滑疏水涂层配制溶液均匀, 可通过便捷的提拉和刷涂工艺制备而成。该涂层对纯水、甲基蓝等水基液体具有小于 $10^\circ$ 的滑动性能, 静态水接触角可达 $109^\circ$ , 呈疏水特性; 且涂层具有优异的稳定性和耐久性, 在400目砂纸打磨100次循环下, 涂层性能基本保持不变, 对基底的黏合强度高, 放置30 d后, 涂层仍黏合良好; 相对于裸玻璃表面具有2%~3%左右的光学增透率, 应用于太阳能电池表面具有0.18%初始效率的提升。此外, 这种超滑涂层还具有显著的疏水、防污特性和自洁能力, 在光伏领域具有潜在的应用价值。

**关键词:** 硅树脂; 超滑涂层; 疏水; 自清洁; 增透

**中图分类号:** TQ637.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7555(2025)01-0145-09

光伏发电已广泛应用于人类生活和工业领域。但光伏组件在使用过程中, 常常面临着水汽渗入导致电池沾污, 以及空气中的工业扬尘、生活废气、植物花粉和烟雾等污染物沉积覆盖的问题<sup>[1,2]</sup>, 这些污染物会降低光伏板的透光率, 进而降低发电效率<sup>[3-5]</sup>。自清洁涂层在光伏应用领域引起了众多的关注。但传统的自清洁涂层透光率不足, 难以应用于光伏板。目前已有一些自清洁涂层的研究报道, 但其主要应用于风机叶片、轮船外体、建筑表面等不透光/低透光表面<sup>[6]</sup>, 且这些涂层主要为超亲水涂层<sup>[7]</sup>、超疏水涂层<sup>[8-10]</sup>和超滑涂层<sup>[11]</sup>3类。超亲水涂层具有很强的亲水性, 能够在表面形成一层均匀的水膜, 有效防止污垢和颗粒的附着, 并具有光催化特性, 从而实现易清洁/自清洁的效果, 但亲水表面实现自清洁/易清洁时所需水量较多。Wang等<sup>[12]</sup>采用聚丙烯酸(PAA)、羧甲基纤维素(CMC)和六水氯化铁

( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )的混合物, 在玻璃表面制备了一种透明的防雾膜, 这种涂层具有超亲水性、抗冻性和自愈性能, 可以有效地防止污染物附着在光伏组件表面。与超亲水涂层相反, 超疏水涂层则使表面变得极度疏水, 水滴在接触这种涂层后会迅速滚动, 并携带走表面的污垢和颗粒。这种通过水滴滚动清洗表面的效应称为超疏水自清洁效应<sup>[13]</sup>。Wang等<sup>[14]</sup>通过纳米/微米2种结构的设计提供了表面疏水性和力学稳定性。通过构建多层粗糙结构, 保证其力学稳定性<sup>[15]</sup>, 但由于多层结构容易被外界环境损坏, 结构之间的空隙容易丢失被困空气, 导致其丧失超疏水性, 在户外环境下应用困难。

超滑涂层通过润滑液体灌注基材, 使表面具备很低的滚动角, 这种涂层通过水基液体的滑动可以减少污垢和微粒的黏附, 从而实现易清洁/自清洁的功能。超滑表面的制备方法主要有2种——浸润法

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0243

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 中央引导地方科技发展基金(202307AB110010); 云南省兴滇人才云岭学者研究项目(KC194317)

通信联系人: 王娟, 主要从事太阳能电池研究, E-mail: wjuan0130@ynu.edu.cn;

杨宇, 主要从事光电子能源材料、硅/有机彩色自清洁电池研究, E-mail: yuyang@ynu.edu.cn

和溶胀法,浸润法是在具有微纳粗糙结构的表面浸润一层低表面能的润滑油,而溶胀法则是通过构建聚合物交联网络后溶胀润滑油来制备超滑材料,使超滑表面具有良好的液体滑动性能。超滑表面可应用于防冰、防腐、自清洁、生物医学、减阻、防雾及海洋防污等多个领域<sup>[16,17]</sup>。该发现来源于热带雨林中幸存下来的猪笼草<sup>[18,19]</sup>。Wong等<sup>[20]</sup>受到了猪笼草的启发,首次提出了润滑油注入的多孔表面(Slippery liquid-infused porous surface, SLIPS),通过使用纳米/微结构基质来锁定注入的润滑液,成功制备出具有出色的液体滑动性和冰阻性、压力稳定性和增强光学透明度的表面,但与超疏水表面相同,仍依赖于微纳结构锁住润滑液体。Pan等<sup>[21]</sup>通过在光滑的环氧树脂表面嵌入储油二氧化硅纳米颗粒,成功开发了一种具有高度综合性能的一类固体光滑涂层(SSC),SSC对各种低至超高黏度的水基液体具有优异的水滑性能,但其制备的涂层在可见光波段下,仅具有80%左右的透射率,降低了电池的初始效率。Zhang等<sup>[22]</sup>利用交联聚二甲基硅氧烷(PDMS)与无毒正构烷烃溶胀,设计了一种可自我修复的透明有机凝胶层,以限制生物膜的附着,但并未对该涂层的自清洁效果做出论述。Urata等<sup>[23]</sup>通过聚二甲基硅氧烷(PDMS)在市售油的存在下进行简单交联,设计了具有可忽略冰黏附强度的透明有机凝胶膜。注入油的相对分子质量(MWs)及其在PDMS基质中的含量是主要决定PDMS基质交联密度和样品的协同/非协同行为的关键参数,对润滑液体的相对分子质量做了分类和分析,但并未制备出一种适于大规模应用的涂层。综上所述,为了促进太阳电池在实际应用中的需求,开发一种可通过工业化手段制备/补救、具备高透射率/增透功能、一定力学稳定性且防污能力的涂层是非常重要的。

在本文中,通过有机硅树脂和甲基硅油的协同作用,以及环氧树脂与硅烷偶联剂的强化效果,通过便捷的提拉和刷涂工艺,成功开发了一种具有增透能力的超滑涂层。这种涂层不仅展现了卓越的自清洁性能,并且可用于大量基底表面,在玻璃基底上具有2%~3%的增透效果;为了全面评估这种涂层的耐用性和坚固性,对其进行了紫外线照射、酸碱环境下的腐蚀测试和砂纸磨损试验,结果表明,该涂层具有

抗酸碱性能,在400目砂纸下经历100次循环的打磨后,涂层仍然保持稳定。此外,将该涂层应用于太阳电池表面,以评估这种涂层在太阳电池板上对能量转换效率的影响。这些测试结果表明,本文开发的涂层在光伏板封装中具有很好的应用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

载玻片(25 mm×76 mm×1 mm):江苏世泰实验器材有限公司;环氧树脂(E44)及固化剂(593):广州穗欣化工有限公司;乙酸乙酯、丙酮、过氧化氢、浓硫酸:均为分析级,中国天达化学试剂有限公司;去离子水:实验室自制;9H自干单组份SJ-1300无机硅树脂:旺鑫化工;醇溶有机硅树脂:鼎立化工;硅烷偶联剂KH550:山东优索化工技术有限公司;二甲基硅油:50 mPa·s(-55~220 °C),泰坦(中国);样品盒:鸿业达实验器件商城。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 基底清洗:**对载玻片基底表面进行清洗,将过氧化氢(质量分数为30%,分析纯)加入到浓硫酸(质量分数为98.3%)中,体积比3:7,将载玻片放入其中,摇晃15 s,取出后用去离子水冲洗5 s,氮气吹干,该步骤反复3次,最后放到干净样品盒中备用。

**1.2.2 环氧树脂稀释液配制:**取12.6 mL丙酮,加入1 g环氧树脂E44,搅拌均匀后加入0.25 g固化剂593,再次搅拌备用。

**1.2.3 超滑涂料配制:**在22 mL乙酸乙酯中加入3 g有机硅树脂和0~6 mL甲基硅油,质量比为1:0~1:2之间,搅拌均匀后,加入0.5 g硅烷偶联剂KH550和1 g环氧树脂E44分散液,再次搅拌。

**1.2.4 涂层制备:**将清洗干燥后的载玻片用刷子刷涂超滑溶液或提拉制备超滑涂层,100 °C干燥固化60 min。

### 1.3 测试与表征

**1.3.1 涂层形貌表征:**将制备好的涂层涂覆在硅片表面进行微观形貌的表征,通过扫描探针显微镜系统(SPA-400,日本精工SPI-3800)和场发射扫描电子显微镜(Nova NanoSEM 450,美国FEI)(加速电压为3.0 kV)观察涂覆超滑涂层后载玻片的表面形态和粗糙度。

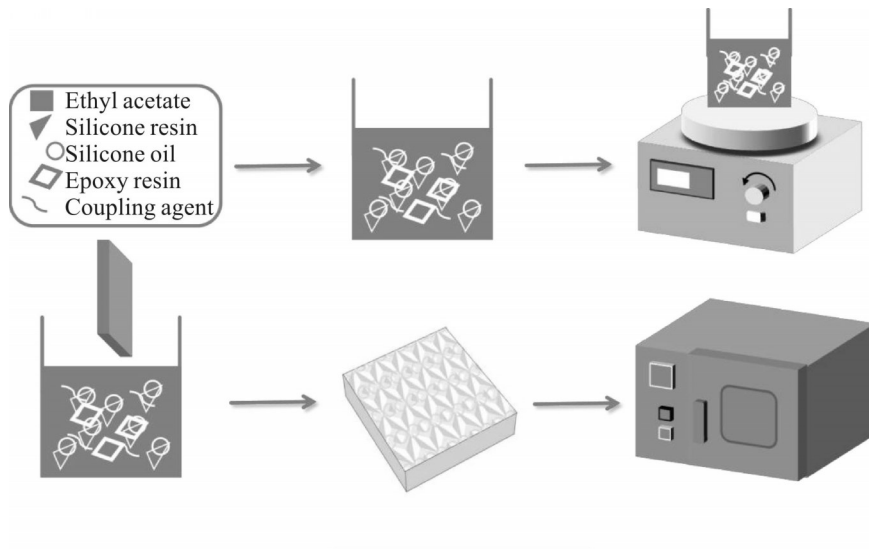


Fig. 1 Solution configuration and coating preparation technology roadmap

**1.3.2 涂层厚度及光学性能表征:**通过马来西亚布鲁克BRUKER公司生产的DEKTAK XT台阶仪测试涂层的厚度;通过中国台湾珀金埃尔默公司生产的UV-2600分光光度计分析涂层的的光学性能,分析涂层的透过率。

**1.3.3 涂层疏水性和滚动性表征:**在环境温度下,通过东莞市晟鼎半导体公司生产的SDC-200S光学接触角测量仪测量了各种液体在样品上的静态接触角和滑动角。样品相对于水平面以不同的角度倾斜,然后将具有不同体积的液体滴到倾斜表面,记录液体的运动过程,接触角、滑动角和滑动速度的平均值来自至少5个独立的测量值。

**1.3.4 涂层自清洁防污性能测试:**将超滑涂层涂覆的载玻片放置石英砂颗粒并用注射器滴水测试自清洁性能,将超滑涂层涂覆的载玻片放置于泥水中取出测试防污性能。

**1.3.5 涂层稳定性分析:**通过将超滑涂层涂覆的载玻片暴露于连续UV照射(365 nm, 6~10 W)来分析抗UV性。通过将超滑涂层涂覆的载玻片放置于不同目数(100~400目)的砂纸表面打磨来测试耐磨性。将超滑涂层涂覆的载玻片放置于酸碱性溶液后取出来分析耐酸碱性。

**1.3.6 涂层应用于电池表面效率测试:**将超滑涂层涂覆的载玻片放置于晶硅太阳能电池表面来测试涂层封装的电池效率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 工艺技术路线

根据实验过程,溶液的配制及涂层的制备过程简便、易于操作。该过程所需原材料包括甲基硅油、有机硅树脂、环氧树脂等,易于获取。同时,该过程仅需使用磁力搅拌器、加热烘箱等简单廉价的设备。在低温环境下,通过将基材进行刷涂、提拉等操作制备涂层后,这些涂料可在载玻片表面自发固化,形成疏水超滑涂层(如图1所示)。该工艺路线成本低廉,适于大规模制备涂层,在光伏组件封装等众多领域可广泛应用。

### 2.2 涂层形貌和粗糙度

对所制备涂层的表面形貌进行了表征。结果表明,在电子显微镜下观察,涂层表面并未发现大量硅油析出,通过不同制备方式的对比,可以发现,刷涂法制备的涂层在一定尺度下存在树脂团聚现象,粗糙度(RMS)为8.11 nm(如图2(a~c)所示),这是影响涂层透射率的主要因素。相较于刷涂工艺,提拉法制备的涂层在2个不同的尺度下十分均匀,未出现成分团聚现象(如图2(d, e)所示)。涂料中各组分之间混溶,固化后形成均匀涂层,有机硅树脂和二甲硅油的协同情况良好,溶胀分布均匀。然而,在实际应用中提拉法制备涂层的过程较为复杂且需要大量原料,成本高昂,而操作简单快捷且成本低廉的刷涂法更适用于光伏市场。

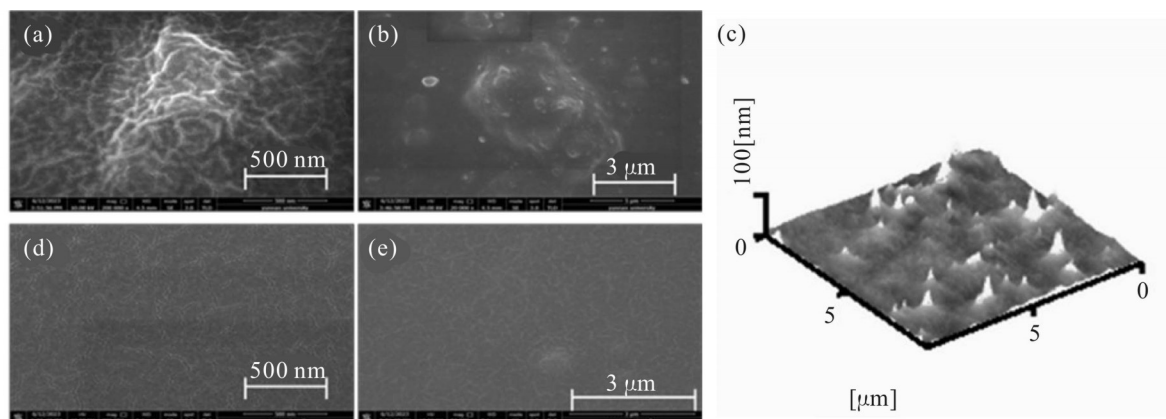


Fig. 2 Surface morphologies of coating: (a, b) SEM images of brush preparation super smooth coating; (c) AFM images of super smooth coating; (d, e) SEM images of dip preparation super smooth coating

Tab. 1 Coating thickness of different samples

Sample	Minimum value/nm	Maximum value/nm	Mean value/nm
Sample 1	-26	2031	50
Sample 2	-35	6979	194

sample 1: silicone resin: methyl silicone oil (1:1); sample 2: no methyl silicone oil

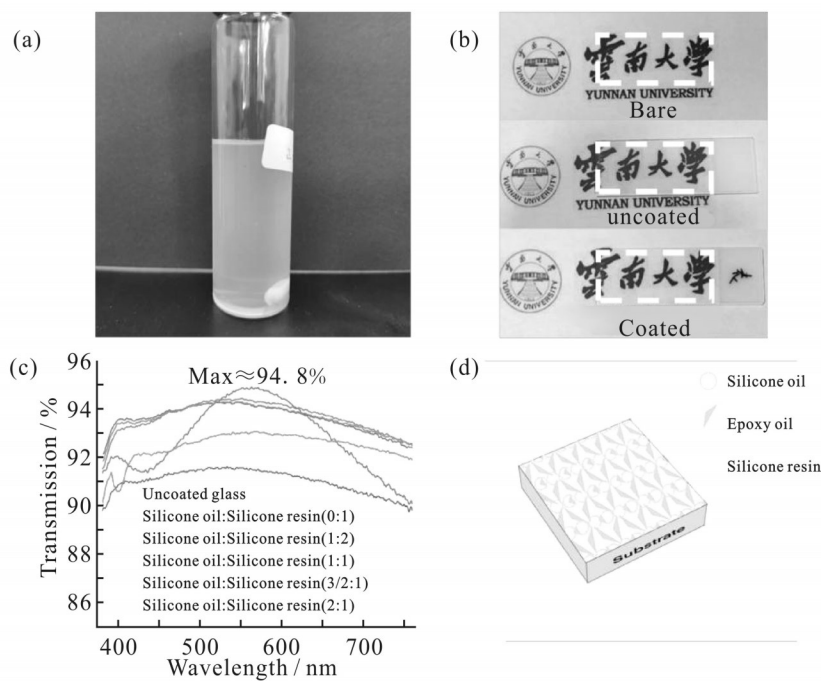


Fig. 3 Schematic diagram of miscibility of solution components and transmission spectrum of coating (a): morphology of solution and the miscibility of related components; (b): images of uncovered glass, images covered with bare glass, image of coated glass; (c): transmission spectrum of un-coated and differently-coated glass; (d): schematic diagram of coating structure

### 2.3 涂层厚度及透射率

制备的超滑涂料均匀且半透明(Fig.3(a)),涂层载玻片后的文字仍然清晰可见,相比裸载玻片下的文字更加清晰。透射光谱表明,在 380~760 nm 的可见光区域下,涂层玻璃的最大透射率为 93.8%,比裸玻璃的透过率 91% 高约 2%~3%(Fig.3(c))。甲基硅油溶胀有机硅树脂后,形成的涂层透射率更加平稳,在不同波段下,未出现透射率高低落差的情况。还探索了溶液中二甲基硅油与有机硅树脂的比例,当比例达到 2:1 时,涂层透射率 92.5%,出现了 1% 左右的下降,并且涂层在干燥过程中难以干燥,仍有部分有机溶液残留。进一步分析了涂层的形成机理(Fig.3(d)),采用“一锅法”,首先通过有机硅树脂和甲基硅油的协同作用,将高度交联网状结构的聚有机硅氧烷和线型聚硅氧烷共混,在此基础上加入配制的环氧树脂 E44 分散液与硅烷偶联剂 KH550 来增强涂层的力学、耐水、抗老化等性能。其中所用材料均易获取,且价格低廉,大大降低了涂层的制备成本;涂层表面储存一定量的低表面能甲

基硅油,形成稳定的涂层表面。有机硅树脂对硅油的协同作用对其固体状表面和涂层的光滑性能起着至关重要的作用。

### 2.4 液滴形状和滚动角

测试了涂层的滑动性能和疏水性能。观察到各种水基液滴在超滑涂层上的形状都是半球形(Fig.4(a)),这些水基液体的接触角达到疏水的范畴,约为  $110^\circ$  左右,并且在实验策略下它的滑动角小于  $10^\circ$ 。与所用材料的单一组分进行对比,甲基硅油不仅作为一种润滑液体,而且有机基团全部为甲基,所以水基液滴的滚动能力明显增强(Fig.4(b))。从而可以确认硅油被锁定在涂层表面,特别是  $20\ \mu\text{L}$  水滴的滑动角仅为  $7^\circ$ 。由于水滴很容易在涂层上滑动,观察了  $10\ \mu\text{L}$ ,  $20\ \mu\text{L}$ ,  $50\ \mu\text{L}$  和  $100\ \mu\text{L}$  体积的水基液体在不同倾斜角度的超滑涂层上的滑动过程(Fig.4(c))。结果表明,各种水基液滴均极易滑动,且随着液滴体积和倾斜角度的增大,其滑动速度加快,表现出优异的水滑动能力。

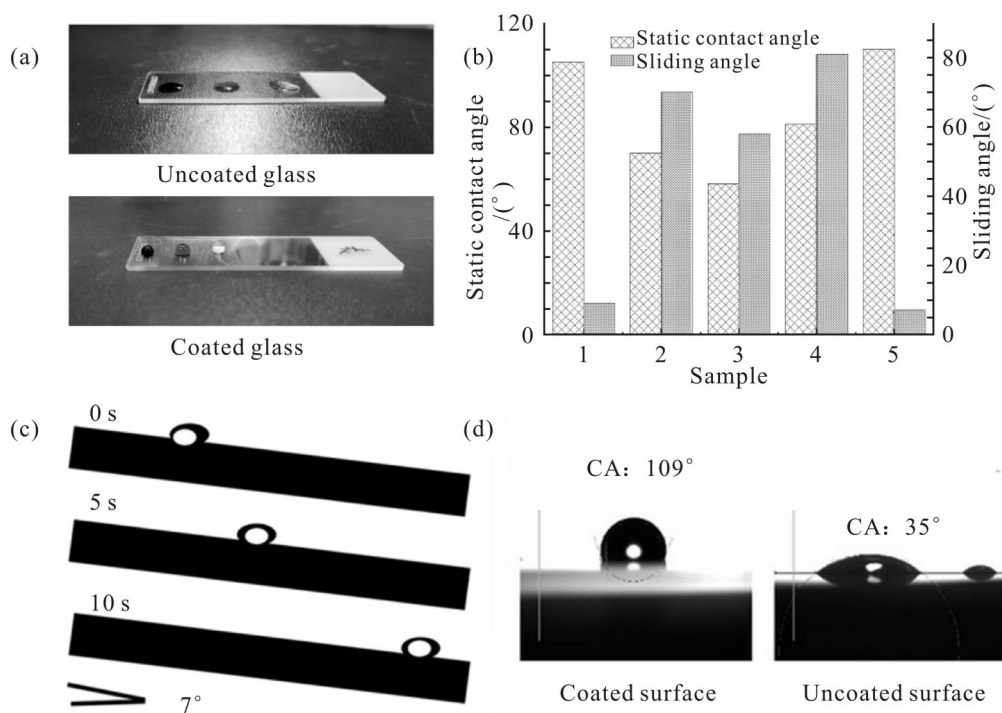
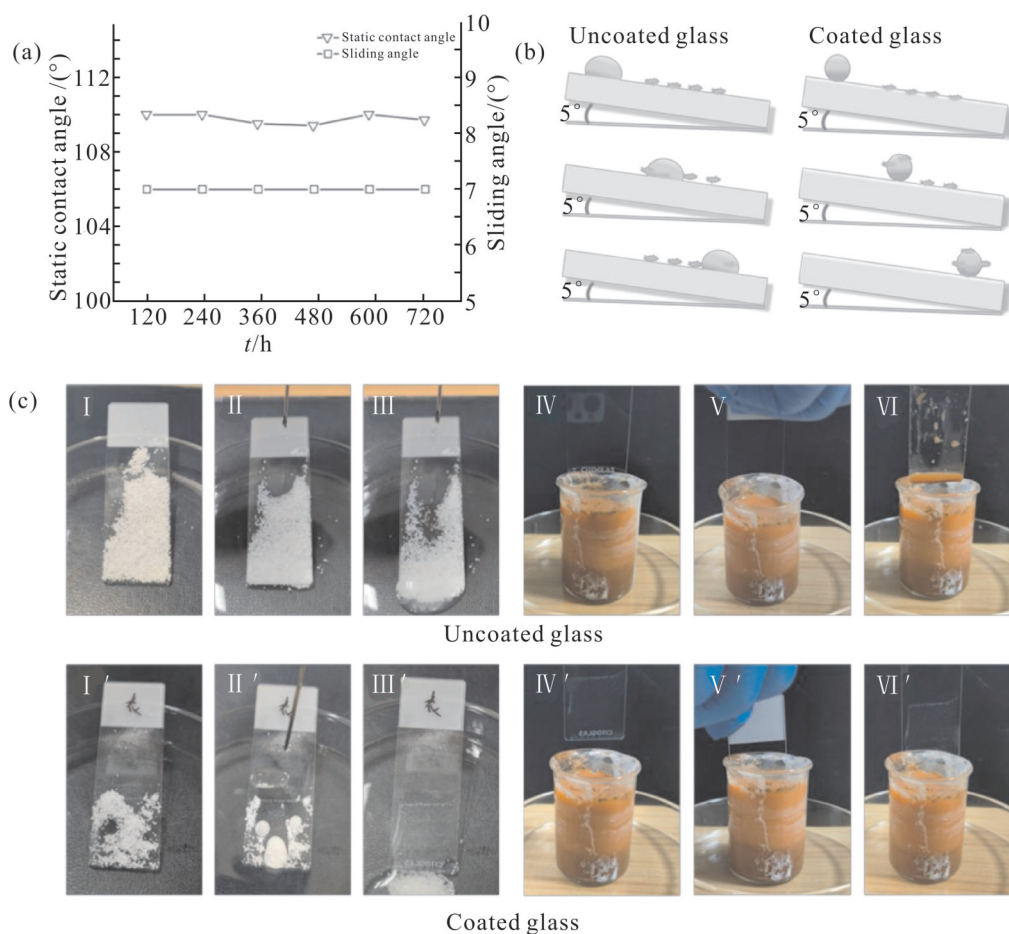


Fig. 4 Static contact angle and sliding angle of bare glass and coated glass

(a): images of different liquids on bare glass and coated glass; (b): static contact angle and sliding angle of  $10\ \mu\text{L}$  liquid on coating (Sample 1: silicone resin:silicone oil for 2:1; Sample 2: silicone resin:silicone oil is 1:0; Sample 3: epoxy resin coated; Sample 4: silicone resin coated; Sample 5: silicone resin: silicone oil is 1:1~1:2); (c): sliding diagram of a  $10\ \mu\text{L}$  liquid on ultra-slippery coating; (d): water drop shape and hydrostatic contact angle on bare glass and coated glass



**Fig. 5** Coating performance and self-cleaning anti-fouling ability under different placement time

(a): water contact angle and rolling angle of ultra-slippery coating under air exposure for 720 h; (b): schematic diagram of self-cleaning principle; (c): self-cleaning ability test of bare glass and coated glass

## 2.5 自清洁防污性能

超滑涂层在实际应用中,最关键的性能就是对环境的防污能力,所以对涂层的防污能力做了一系列测试。首先将样品放置于样品盒中,数天后取出测试接触角与滚动角(Fig.5(a)),发现放置数天后,样品表面浸润性能保持不变,滚动角仍小于 $10^\circ$ 。防污原理来源于水基液体的滑动带走样品表面的微小附着物,使样品表面仍保持整洁(Fig.5(b))。为了模拟自然环境中的污染物,将尺度(40~80目)5g的石英砂颗粒分别放置于裸玻璃表面和样品表面。如图5(c)I所示,将砂粒放置在裸玻璃表面时,基本完全附着;但从Fig.5(c)I'中可以明显看到,等量的砂粒放置在样品表面时只有1/3残留在样品表面,样品表面具有显著的防污能力。用3mL水分别向裸玻璃表面和样品表面滴下,从Fig.5(c)II中可以看出,5s

后裸玻璃表面的砂粒还有大量残留,而II'中样品表面砂粒被水滴带走。Fig.5(c)III经过10s水滴冲完后可以看出裸玻璃表面由于水的浸润,微小颗粒仍附着于基底表面,难以被带走;而III'中样品表面上的微小颗粒在水滴的滑动下被大量带离样品表面,自清洁效果好。为了进一步测试样品的防污能力,又模拟了自然环境中的湿污染,从外界环境中取大量泥土及灰尘放置于烧杯中,并加水搅拌。从Fig.5(c)IV和IV'中可以看出,裸玻璃和样品未放入泥水混合物时表面都是干净的。Fig.5(c)V和V'表示了将裸玻璃和样品分别浸入泥水混合物。Fig.5(c)VI中,将裸玻璃从泥水混合物中取出,可以看出裸玻璃表面被泥水附着污染严重;而VI'中的样品从泥水混合物中取出后表面比较清洁。从而可以看出,涂覆涂层后的基材具有较好的防污与自清洁能力。

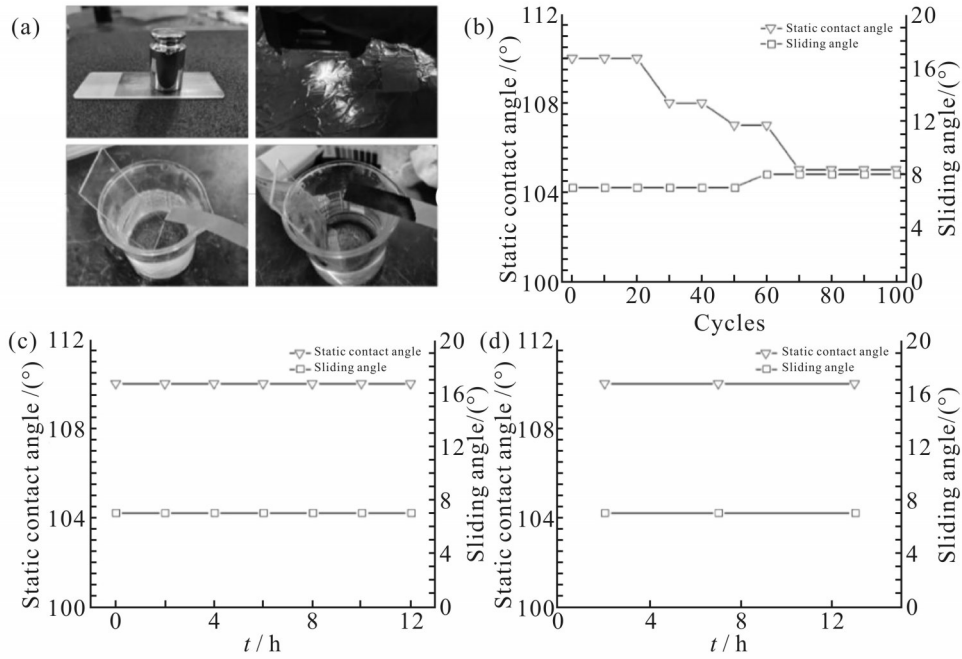


Fig. 6 Stability test of coating

(a): schematic diagram of different tests; (b): water contact angle and rolling angle for 100 cycles (400 mesh) with sandpaper with (100 g) mass; (c): water contact angle and rolling angle of ultra-slippy coating under ultraviolet irradiation; (d): water contact angle and rolling angle in acid-alkaline environment

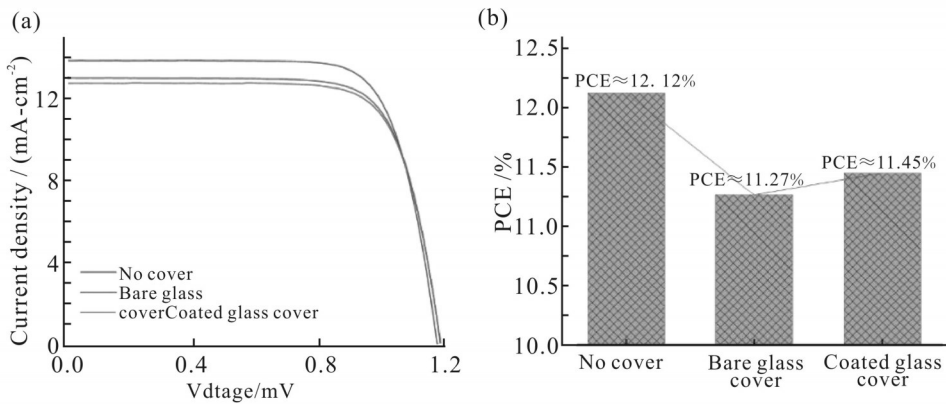


Fig. 7 Effect of coated encapsulated glass on battery performance

(a): schematic diagram of current density and voltage test curves; (b): schematic diagram of battery efficiency test

### 2.6 耐久性和酸碱性

在实际应用中,涂层的耐久性和稳定性非常重要,在某些特殊环境下,耐酸碱性也尤为重要。因此,在各种恶劣条件下测试了超滑涂层的耐久性(Fig.6(a))。将涂层涂敷后的样品在紫外线环境下暴露 12 h,测试涂层的抗紫外能力。然后将其浸入酸性和碱性溶液中,并快速取出,测试涂层的耐酸碱能力。此外,还在样品上负载 100 g 砝码,放置于 400

目砂纸上打磨数个循环(Fig.6(b)),测试涂层的耐磨损能力。在上述测试中,涂层的接触角基本不变,且滑动角仍小于 10°(Fig.6(c, d)),仍表现出疏水和优异的水滑动性能,由此可以看出,涂层具有一定的稳定性。

### 2.7 电池效率

在户外环境下,太阳能电池板容易被外界污染,从而降低太阳能电池板的转换效率,而现有部分自清洁

涂层透光率不高,导致电池的初始效率降低。因此比较了3块不同封装方式的太阳能电池板,其中一块封装涂层玻璃,一块采用裸玻璃封装,另一块不进行封装。由于该涂层主要应用于太阳能电池板的朝阳封装表面,故而将涂层玻璃和裸玻璃放置于电池上方进行封装,测试电池的初始性能。在未封装、裸玻璃封装和涂层玻璃封装下,可以看出涂层玻璃封装后的电池,电流密度-电压曲线小于未封装电池大于裸玻璃封装(Fig.7(a))。在电池效率的测试中,涂层玻璃封装后的电池效率也仍保持该规律,大于裸玻璃封装的电池,小于未封装电池(Fig.7(b)),相比之下效率提升了0.18%。由此,该涂层作为太阳能电池板的封装材料时,电池的初始性能也有一定程度的提高。

### 3 结论

(1)采用“一步法”研制出一种增透、低成本且稳定性较高的超滑涂层。有机硅树脂对二甲基硅油的协同作用成功的储存了硅油,由润滑液体从凝胶基质释放到外表面,并加入环氧树脂增强涂层对基底的黏附能力及表面强度,硅烷偶联剂等低表面能的助剂使其性能更佳。作为光伏板的自清洁材料,展现出潜在的应用价值。

(2)这种超滑涂层所需制备材料易获取,价格低廉,并成功赋予了超滑涂层优异的液滴滚动性能,滚动角在 $7^\circ$ 左右,在可见光波段下透射率为94%左右,相较裸玻璃增透2%~3%,提高了0.18%的电池效率。

(3)暴露于紫外线照射12 h后保持有效,在空气中储存90 d,并在400目砂纸打磨数个循环下仍具有疏水和超滑特性,耐用性好。

(4)置于泥水中,取出后没有被污染;放置沙砾后,表面细小颗粒很容易被水滴带走,表现出了优异的防污、自清洁能力。

#### 参考文献:

- [1] Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14: 3124-3131.
- [2] Adak D, Bhattacharyya R, Barshilia H C. A state-of-the-art review on the multifunctional self-cleaning nanostructured coatings for PV panels, CSP mirrors and related solar devices[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112145.
- [3] Tasdemir Y, Kural C. Atmospheric dry deposition fluxes of trace elements measured in Bursa, Turkey[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138: 462-472.
- [4] Sharma V, Chandel S S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 753-767.
- [5] Jamil W J, Abdul Rahman H, Shaari S, *et al.* Performance degradation of photovoltaic power system: review on mitigation methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 876-891.
- [6] Chen F, Wang Y, Tian Y, *et al.* Robust and durable liquid-repellent surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51: 8476-8583.
- [7] Nundy S, Ghosh A, Mallick T K. Hydrophilic and superhydrophilic self-cleaning coatings by morphologically varying ZnO microstructures for photovoltaic and glazing applications[J]. *ACS Omega*, 2020, 5: 1033-1039.
- [8] Nomeir B, Lakhoul S, Boukheir S, *et al.* Recent progress on transparent and self-cleaning surfaces by superhydrophobic coatings deposition to optimize the cleaning process of solar panels[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 257: 112347.
- [9] 张茗珺, 张琪瑶, 李鑫, 等. 自修复超疏水涂层研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(10):168-175.  
Zhang M J, Zhang F Y, Li X, *et al.* Research progress of self-healing superhydrophobic coatings[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(10):168-175.
- [10] 刘晓庆, 杨进. 疏水二氧化硅粒子的制备及超疏水改性聚氨酯树脂[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(1):8-16.  
Liu X Q, Yang J, Preparation of hydrophobic silica particles and superhydrophobic modified polyurethane resin[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 40(1):8-16.
- [11] Urata C, Nagashima, Hatton B D, *et al.* Transparent organogel films showing extremely efficient and durable anti-icing performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 28925-28937.
- [12] Wang X, Li S, Huang J, *et al.* A multifunctional and environmentally-friendly method to fabricate superhydrophilic and self-healing coatings for sustainable antifogging[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 409: 128228.
- [13] Deng W, Su Y, Zhang C, *et al.* Transparent superhydrophilic composite coating with anti-fogging and self-cleaning properties [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 642: 255-263.
- [14] Wang D, Sun Q, Hokkanen M J, *et al.* Design of robust



- superhydrophobic surfaces[J]. *Nature*, 2020, 582: 55-59.
- [15] Zhu P, Zhu L, Ge F, *et al.* Robust and transparent superamphiphobic coating prepared via layer-by-layer spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 426: 127793.
- [16] Howell C, Vu T L, Lin J J, *et al.* Self-replenishing vascularized fouling-release surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6: 13299-13307.
- [17] 曹京宜, 张海永, 杨文静, 等. KCC-1/PVDF 超疏水与超滑表面的制备及其性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 152-158.  
Cao J Y, Zhang H Y, Yang W J, *et al.* Preparation and properties of KCC-1/PVDF super hydrophobic and super slippery surfaces [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6): 152-158.
- [18] Bohn H F, Fedele W. Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface[J]. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101: 14138-14143.
- [19] Gaume L, Gorb S, Rowe N. Function of epidermal surfaces in the trapping efficiency of *Nepenthes alata* pitchers[J]. *New Phytologist*, 2002, 156: 479-489.
- [20] Wong T S, Kang S H, Tang S K, *et al.* Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477: 443-447.
- [21] Wei H P, Wang Q L, Jun M. Solid-like slippery coating with highly comprehensive performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2302311.
- [22] Zhang H, Wang P, Zhang D. Designing a transparent organogel layer with self-repairing property for the inhibition of marine biofouling[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 538: 140-147.
- [23] Urata C, Nagashima H, Hatton B D, *et al.* Transparent organogel films showing extremely efficient and durable anti-icing performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 28925-28937.

## An Anti-Reflection Super Slippery Self-Cleaning Coating Based on Silicone Resin and Silicone Oil

Guohua Chang<sup>1,2</sup>, Tong Yang<sup>1,2</sup>, Shilian Wu<sup>1,2</sup>, Chenggang Li<sup>1,2</sup>, Runze Guan<sup>1,2</sup>,  
Bingjian Zhou<sup>1,2</sup>, Juan Wang<sup>1,2</sup>, Yu Yang<sup>1,2</sup>

(1. *Yunnan International Joint Research Center of Optoelectronic Information Materials, School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650504, China*; 2. *National International Joint Research Center for Optoelectronics and Energy Materials, Yunnan University, Kunming 650504, China*)

**ABSTRACT:** Photovoltaic panels urgently need self-cleaning or easy-to-clean functions in applications, in this study, a super slippery self-cleaning coating with anti-reflection effect on photovoltaic panels was developed, the coating was prepared with silicone resin, methyl silicone oil, epoxy resin and silane coupling agent. This super slippery hydrophobic coating was configured with a uniform solution, it was prepared by convenient lifting and brushing process. The coating has a sliding property of less than 10° for water-based liquids such as pure water and methyl blue, and the static water contact angle can reach 109°, showing hydrophobic characteristics. The coating has a sliding property of less than 10° for water-based liquids such as pure water and methyl blue, and the static water contact angle can reach 109°, showing hydrophobic characteristics. The coating also has excellent stability. After polishing 100 cycles with 400 mesh sandpaper, the coating performance basically remains unchanged, and the adhesion strength to the substrate is high. After 30 d of placement, the coating is still well bonded. Compared with the bare glass surface, the optical anti-reflection rate is about 2%~3%, when applied to the solar cell surface, the initial efficiency has a 0.18% improvement. In addition, the super slippery coating also has remarkable hydrophobic, anti-fouling and self-cleaning properties, showing potential application value in photovoltaic field.

**Keywords:** silicone resin; super slippery coating; hydrophobic; self-cleaning; anti-reflection