具有超疏水和自清洁特性的环氧树脂涂层制备

刘化民[1],李沛延[1],李 义[1],程 敏[2]

（1.吉林大学 材料科学与工程学院，长春 130022；2.吉林大学 机械与航空航天学院，长春 130022）

摘 要：以纳米SiO_2作为基础粒子，详细研究了用硅烷偶联剂PFOTES对其进行表面改性，并用氧化石墨烯（GO）进行负载的SiO_2粒子，与环氧树脂混合后喷涂制备的超疏水涂层的综合性能。在纳米SiO_2的表面进行硅烷化处理后，不仅赋予表面更多的硅氧烷基团，随后与氧化石墨烯的结合，让更多的改性粒子附着在氧化石墨烯的表面，有效地解决了纳米粒子团聚的问题，极大地增强了复合粒子在环氧树脂中的分散效果。结果表明：经过复合粒子增强过的PFOTES-SiO_2/GO/EP涂层，相较于纯环氧树脂涂层，其水接触角提升了109%，涂层表面粗糙度提高了577.3%，材料的自清洁能力也得到了明显的提升。

关键词：二氧化硅；环氧涂层；氧化石墨烯；疏水性能

中图分类号：TG386 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)06-1512-08

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250200

Preparation of epoxy resin coatings with superhydrophobic and self-cleaning properties

LIU Hua-min[1], LI Pei-yan[1], LI Yi[1], CHENG Min[2]

(1. *College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 2. *School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: The comprehensive performance of superhydrophobic coatings prepared by surface modification with silane coupling agent PFOTES and graphene oxide (GO)-loaded SiO_2 particles mixed with epoxy resin and sprayed was investigated in detail using SiO_2 nanoparticles as the base particles. The silanization treatment on the surface of SiO_2 nanoparticles not only gave more siloxane groups on the surface, but also allowed more modified particles to attach to the surface of graphene oxide, effectively solving the problem of nanoparticle agglomeration and greatly enhancing the dispersion of composite particles in the epoxy resin. The results showed that the water contact angle of the PFOTES-SiO_2/GO/EP coating enhanced by the composite particles increased by 109%, the surface roughness of the coating increased by 577.3%, and the self-cleaning ability of the material was also significantly improved compared with that of the pure epoxy coating.

Key words: silicon dioxide; epoxy coating; graphene oxide; hydrophobic properties

收稿日期：2025-01-08.

基金项目：吉林省科技发展计划项目（20240302103GX）.

作者简介：刘化民（1966-），男，教授，硕士. 研究方向：材料先进成型技术. E-mail：liuhm@jlu.edu.cn

通信作者：程敏（1989-），女，工程师，硕士. 研究方向：机械设计及材料加工. E-mail：792493209@qq.com

0　引　言

近年来，金属材料被广泛应用于汽车、化工、土木工程和建筑等领域[1,2]。然而，由于金属表面暴露在外，长时间与盐水、酸碱性液体等腐蚀性物质直接接触以及电化学反应等原因，金属产品本身的使用寿命大大缩短，从而造成经济损失[3,4]。因此，解决金属材料的防腐问题至关重要。受自然界荷叶效应的启发，具有仿生结构的超疏水材料的研究取得了重大进展[5-9]。Guo[10]用一种以改性多壁碳纳米管（MWCNTs）和环氧树脂为原料成功制备了高效油水分离超疏水涂层。Liang等[11]采用硅烷偶联剂KH560对二氧化钛纳米粒子（TiO_2）进行改性，并与环氧树脂E51共混，制备了性能优越的超疏水涂层。

此外，随着实际应用中对超疏水材料需求的不断增长和要求的不断提高，设计具有自清洁功能的超疏水材料引起了相当深入的关注。不同的材料表面表现出的亲疏水现象主要可以通过：Young's方程[12]、Cassie-Baxter理论模型[13,14]和Wenzel理论模型[15]来解释。

超疏水涂层的制备方法有很多。Cao等[16]采用模板法制备了金属表面的超疏水防冰涂层（F-SiO_2涂层）。Xue等[17]通过激光刻蚀法MWCNT/PEI超疏水纳米复合涂层。Huang等[18]采用化学气相沉积法制备了具有优异防冰性能的透明超疏水聚合物纳米酮阵列涂层。

但是，大部分研究提到的制备超疏水涂层的方法都存在反应时间长、成本较高以及对能源消耗大的缺陷。本研究通过由上至下方法，用硅烷偶联剂（PFOTES）对纳米二氧化硅进行改性，然后与氧化石墨烯复合后与环氧树脂进行共混，并采用更适合工业生产的喷涂法，制备了超疏水的PFOTES-SiO_2/GO/EP涂层，旨在降低实际工业应用中的经济成本。

1　实验部分

1.1　纳米SiO_2的改性

将0.4 g硅烷偶联剂（PFOTES）溶于80 mL乙醇中，在40 ℃下超声10 min后，在预反应溶液中加入1 g SiO_2粉末，然后以850 r/min的转速大力搅拌得到改性完全的SiO_2溶液。利用高速离心机以9 000 r/min的速度对混合液进行5 min离心，无水乙醇反复洗涤3次。最终，将改性后的SiO_2粒子在80 ℃下烘干，并命名为PFOTES-SiO_2，储存在干燥箱中备用。

1.2　PFOTES-SiO_2/GO复合粒子的制备

首先，称取0.2 g先前制备的PFOTES-SiO_2纳米粒子，并将其加入200 mL无水乙醇溶液中进行搅拌。接着，在上述溶液中加入氧化石墨烯（GO）使PFOTES-SiO_2与GO的质量比为20∶1。将该混合溶液置于50 ℃水浴加热恒温条件下，通过磁力搅拌器进行持续反应6 h促进PFOTES-SiO_2粒子与GO之间的复合。然后，对反应溶液进行离心处理，将得到的产物置于80 ℃的真空干燥箱中，干燥24 h得到PFOTES-SiO_2/GO复合粒子，并将产物命名为PSG-20，如图1所示。

为了探索PFOTES-SiO_2/GO复合材料在不同GO含量下的性能，本文采用相同的方法，分别制备了PFOTES-SiO_2与GO质量比为40∶1、70∶1和100∶1的复合粒子。根据GO含量的变化，这些产物在文中对应部分的图示中分别命名为PSG-40、PSG-70和PSG-100。

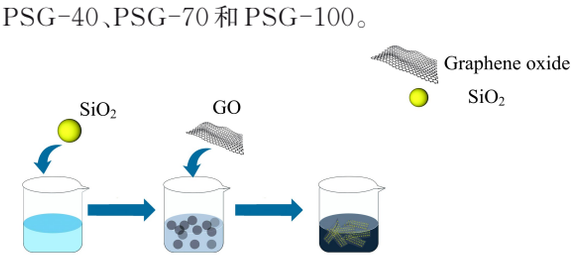


图1　复合粒子的制备过程

Fig. 1　Preparation process of composite particles

1.3　对比涂层以及PFOTES-SiO_2/GO/EP超疏水涂层的制备

本实验选择6061铝板作为基材，铝板的化学成分为：0.25% 的铜（Cu），0.6% 的硅（Si），和99.15%的铝（Al），尺寸为20 mm×30 mm×1 mm。首先，采用无水乙醇和丙酮对铝板表面进行清洗，去除可能存在的油脂、灰尘和其他杂质。然后，使用600目的砂纸对铝板进行初步打磨，粗化表面，去除氧化层。随后，使用2 000目的砂纸对铝板表面进行细致打磨，根据表1中的配方，制备涂层混合体系。

混合物制备完成后，通过喷涂方式将其均匀涂覆在经过处理的铝板表面。喷涂完成后，将铝板置于100 ℃的烘箱中进行固化处理，得到样品。

1.4　材料表征

（1）SEM：对式样喷金后，采用JSM-7900F

表1 不同涂层样品的实验配方

Table 1 Experimental formulations for different coated samples

涂层样品	环氧树脂/g	固化剂/g	复合粒子/g
EP	2	1	/
GO/EP	2	1	0.03-GO
SiO_2/EP	2	1	0.03-SiO_2
PFOTES-SiO_2/GO/EP	2	1	0.03-PFOTES-SiO_2/GO

对制备的复合粒子进行微观形貌表征。

(2)FT-IR:采用德国布鲁克公司TENSOR-27型号的傅里叶变换红外光谱仪,在4 000~500 cm^{-1}的波数范围内进行测试。

(3)XRD:采用DX-2700型X射线衍射仪,在扫描步宽为0.05、管电压为40 kV的条件下对试样进行测试。

(4)水接触角测试:采用水接触角测量仪。将水滴均匀地滴加在样品表面。在水滴静置至稳定后,利用接触角测量仪的拟合系统进行接触角的测量。

(5)涂层表面特征测试:选用激光共聚焦测量仪,对材料表面的粗糙度以及形貌进行了测试。采用高速摄像机,对材料表面的弹性行为进行了测试。

(6)自清洁测试:利用碳粉在水流冲刷下的不同表现形式,对涂层的自清洁性能进行了表征。

2 结果与讨论

2.1 反应机理

PFOTES分子中的Si-Cl基团具有较强的亲电性,在水解作用下生成活泼的硅羟基(Si-OH),该基团能够与环氧树脂中的羟基或环氧基团反应,形成稳定的硅氧烷键(Si-O-R),如图2所示。这一反应过程增强了环氧树脂与PFOTES之间的附着力,改性了涂层的表面性能,进而提升了涂层的机械强度、热稳定性以及抗化学腐蚀性能。通过这种共价键合,PFOTES-SiO_2复合粒子与环氧树脂基体之间形成了紧密的结合,改善了涂层的整体性能。

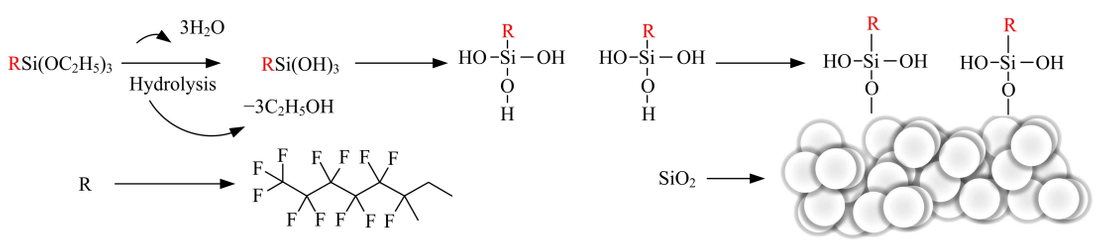


图2 硅烷反应机理图

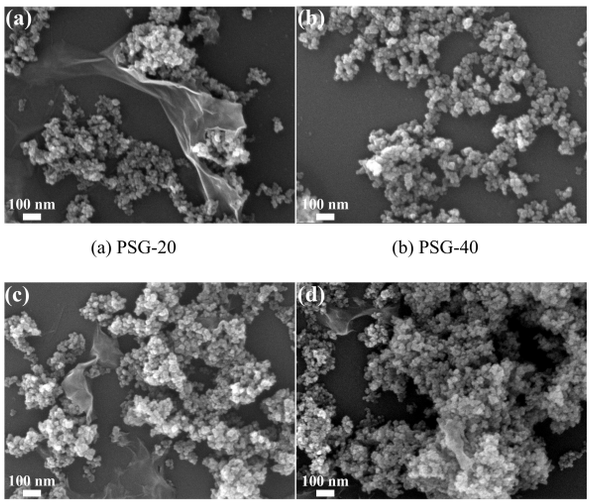
Fig. 2 Diagram of silane reaction mechanism

2.2 SEM分析

材料的表面形貌,是影响材料疏水性能的重要因素之一。通过制造具有特定微纳米结构的表面,提高材料的表面粗糙度,可以诱导水滴在材料表面形成较大的接触角,从而降低水滴的粘附力,提升其超疏水性能。

通过扫描电子显微镜(SEM)对不同质量比的PFOTES-SiO_2/GO复合粒子进行微观结构表征,结果如图3所示。从图3(a)中可以看出,当PFOTES-SiO_2改性粒子的掺入量较少时,虽然纳米粒子在基材中的分散情况很好,但由于其相对于氧化石墨烯的比例仍较低,因此不能完全覆盖氧化石墨烯表面。在图中可以直观观察到的具体表现为氧化石墨烯片层的褶皱仍然暴露在外部,未能形成理想的覆层结构。这种状态下,氧化石墨烯的片层状结构并未得到有效包覆,未能形成稳定且均匀的表面形貌,导致复合粒子整体形貌不够理想。图3(b)中的结果显示,当复合粒子与氧化石墨烯的质量比提高至40:1时,PFOTES-SiO_2复合粒子的分散性显著改善,并且能够几乎完全覆盖氧化石墨烯的表面,形成了均匀的粗糙纳米结构。这种不规则的微纳结构不仅改善了复合材料的表面形态,而且其表面微凸结构能够形成类似Cassie-Baxter理论模型的超疏水特性。这些微纳凸结构的凹陷部分能够有效捕捉空气,减少水或其他液体与基材的接触,从而极大地降低了液体在表面上的附着力,显著提升了材料的超疏水性。

然而,随着PFOTES-SiO_2改性粒子掺入量的进一步增加,图3(c)与图3(d)中显示了纳米粒子团聚现象逐渐加剧。当PFOTES-SiO_2改性粒子与氧化石墨烯的质量比为70:1时,尽管团聚现



(a) PSG-20　　(b) PSG-40

(c) PSG-70　　(d) PSG-100

图 3　不同质量比的 PSG 复合粒子的扫描电镜图像

Fig. 3　SEM image of PSG composite particles with different mass ratios

象有所抑制，但仍出现了较为明显的粒子聚集趋势，导致纳米粒子无法完全覆盖氧化石墨烯表面，覆盖层出现不均匀性。当质量比进一步增加至 100∶1 时，纳米粒子团聚现象愈发严重，粒子间的高度差异显著增大，形成了明显的聚集结构，这种不均匀的结构分布对复合材料的后续加工和性能发挥产生了不利影响。尤其是在环氧树脂中的分散性变差，这将直接影响到复合材料的整体性能，也就是会降低超疏水表面的稳定性和持久性。

2.3　FT-IR 分析

图 4 为 4 种粒子的红外光谱（FT-IR）吸收图谱。

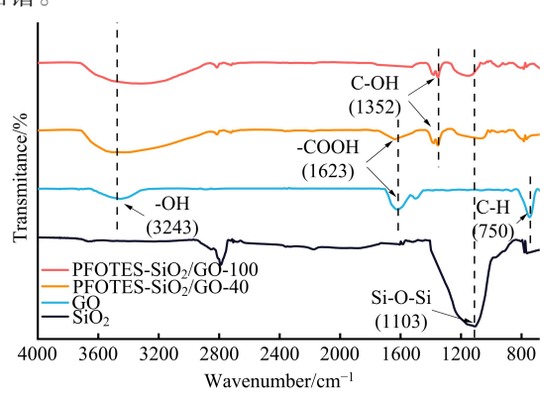


图 4　GO、SiO_2、PSG-40 和 PSG-100 的 FT-IR 谱图

Fig. 4　FT-IR spectra of GO, SiO_2, PSG-40, and PSG-100

从图 4 中可以观察到，未经反应的二氧化硅（SiO_2）样品中，存在明显的 Si-O-Si 键的特征吸收峰，表明其表面存在大量的硅氧化物骨架结构。经过 PFOTES 改性并与氧化石墨烯（GO）复合后，位于约 1 103 cm^{-1} 的 Si-O-Si 伸缩振动峰强度显著降低，并且随着氧化石墨烯含量的增加，该吸收峰的强度逐渐减弱。这表明，PFOTES 在与 SiO_2 表面反应的过程中，Si-O-Si 键的数量有所减少，可能是由于 PFOTES 的表面修饰作用取代了部分 Si-O-Si 键。此外，相比于单独的氧化石墨烯，改性后的复合粒子在约 1 623 cm^{-1} 处的吸收峰显著减弱，甚至消失，该峰对应于氧化石墨烯中的羧基（-COOH）的拉伸振动峰。这样的现象表明，氧化石墨烯在复合过程中被充分还原，表面存在的羧基大量发生反应，甚至全部进行了还原。

此外，从 PSG-40 和 PSG-100 的红外光谱图中可以看到，在约 1 352 cm^{-1} 处出现了一个新的吸收峰，该峰归属于 C-OH 的伸缩振动。这一新的特征吸收峰的出现，进一步证明了 PFOTES-SiO_2 与氧化石墨烯的复合反应成功，且 PFOTES 的修饰作用有效地引入了新的化学键合。

2.4　XRD 分析

图 5 为复合粒子的 X 射线衍射（XRD）谱图，为进一步确认复合材料的结构变化提供了证据。从谱图中可以观察到，PSG-40 复合粒子在约 11.21°的衍射峰强度相较于单独的氧化石墨烯（GO）有所减弱，且在约 42.14°处的衍射峰完全消失。这一现象在 PSG-100 复合粒子中表现得更加明显，表明随着 SiO_2 含量的增加，氧化石墨烯层被更多 SiO_2 粒子所包覆，复合粒子的晶体结构发生了显著变化。此外，相较于纯 SiO_2，复合粒子在约 11.21°处出现了一个新的特征衍射峰，进一步证明了 PFOTES-SiO_2 与 GO 的成功复合。

通过 SEM、FT-IR 以及 XRD 测试的共同表征与相互印证，证明了 PSG 复合粒子的成功制备

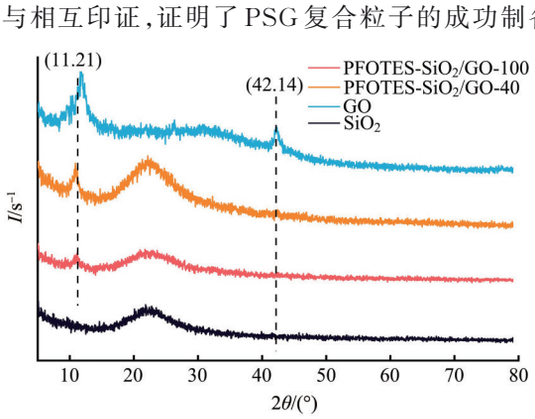


图 5　GO、SiO_2、PSG-40 和 PSG-100 的 XRD 谱图

Fig. 5　XRD spectra of GO, SiO_2, PSG-40, and PSG-100

并且可以得出结论,PSG-40复合粒子的合成效果最好,因此下文中PSG粒子皆指代PSG-40粒子。

2.5 水接触角测试

本研究分别对纯EP涂层、GO/EP涂层、SiO_2/EP涂层以及PSG/EP涂层进行了水接触角测试,不同涂层的水接触角测试结果如图6所示。

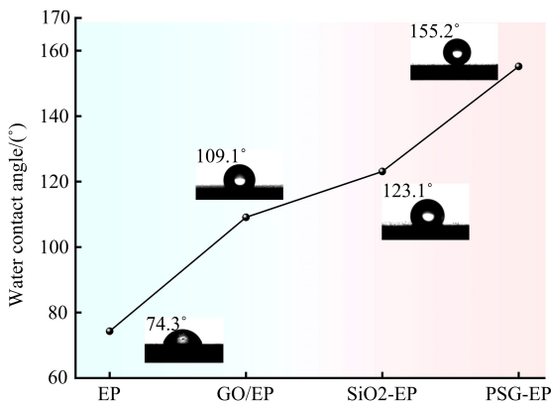


图6 不同涂层的水接触角测试图

Fig. 6 Water contact angle test plots for different coatings

纯环氧涂层的水接触角为74.3°,表现出明显的亲水性,这说明纯环氧树脂本身抵抗外界液体侵蚀的能力并不强,液体会长时间停留在涂层表面进而造成腐蚀。GO/EP涂层以及SiO_2/EP涂层的水接触角分别为109.1°以及123.1°,它们表现出一定的疏水特性,其中SiO_2/EP的表现更好一些,这样的疏水性能短时间内对基体会起到一定的保护作用,但长期接触腐蚀性液体,依然可会对基体产生破坏。而PSG/EP涂层的水接触角高达155.3°,展现出优异的超疏水性质,这样的高接触角可以使液体在触碰到涂层表面时被弹开,尽可能地减少涂层与腐蚀介质之间的接触时间,可以更为长期地对基体进行保护。PSG/EP涂层产生这样高的水接触角的原因主要是,经过PFOTES处理后,SiO_2表面产生了大量的疏水基团,这样的疏水基团赋予了其优异的疏水性,与此同时,改性后的SiO_2与GO混合,GO的二维大平面结构为PFOTES-SiO_2/复合粒子提供了更多可以附着的位置,另一方面氧化石墨烯的加入同样增强了复合粒子在环氧树脂中的分散性,避免了纳米粒子的团聚现象,并形成了超疏水的乳突状结构。

2.6 涂层表面特性测试

为了观察涂层表面粗糙度以及表面形貌,本研究对纯EP涂层、GO/EP、SiO_2/EP涂层以及PSG/EP涂层进行了激光共聚焦测试,测试结果如图7所示。其中图7(a)是纯EP涂层的测试结果,可以观察到,纯环氧树脂表面光滑,粗糙度仅为0.994 μm,表面没有形成具有超疏水特征的结构。图7(b)是GO/EP涂层的激光共聚焦扫描图。相比于纯EP涂层,其粗糙度有所提高,表面可以初步看到微小突起,这说明涂层表面已经具备一定的疏水能力,但由于突起有限,所以对于基体的保护也存在限制。观察图7(c)可以看到,SiO_2/EP涂层表面的突起明显增大,说明粒子的填入改善了涂层的表面形貌。同时从图中观察到,涂层表面虽然粗糙度增加,但却分布并不均匀,这是由于纳米粒子团聚问题造成的,反观图7(d),PSG/EP涂层的表面粗糙度为6.732 μm,相较于前3个涂层有明显的提升,并且表面形成了明显的乳突状结构,这样的结构形成了Cassie-Baxter超疏水理论模型,涂层表面形成了液体-固体-气体的三相接触状态,液滴和表面之间的接触极小,大部分是空气层的支撑,这大大降低了表面的黏附力,使液滴更容易滚动,达到超疏水效果。

图8展示了PFOTES-SiO_2/GO/EP复合涂层的疏水性能,采用了3种典型的实验方法进行综合表征,分别是涂层表面的滚动测试(见图8(a))、水流连续冲击测试(见图8(b))以及润湿性测试(见图8(c))。以下对这3项测试结果进行详细分析,以充分展示涂层的超疏水特性。

首先,图8(a)展示了通过移液管将水滴从1 cm的高度滴落至PSG/EP复合涂层表面的滚动测试。观察发现,水滴在接触涂层表面后,表现出轻微的反弹并迅速沿涂层表面向前滚动,且未在表面停留。此现象表明涂层表面具有非常优异的疏水性能,其表面能显著降低,使得水滴能够快速滚动而不被表面吸附。这一表现是涂层表面低表面能和高接触角的直接体现,验证了PSG/EP复合涂层的高疏水性。

接着,图8(b)展示了水流快速注射至涂层表面进行高压冲击测试。该测试旨在验证涂层在高压条件下是否能够维持其超疏水状态。通过775 ms的冲击测试,结果显示水流的注射角与反射角

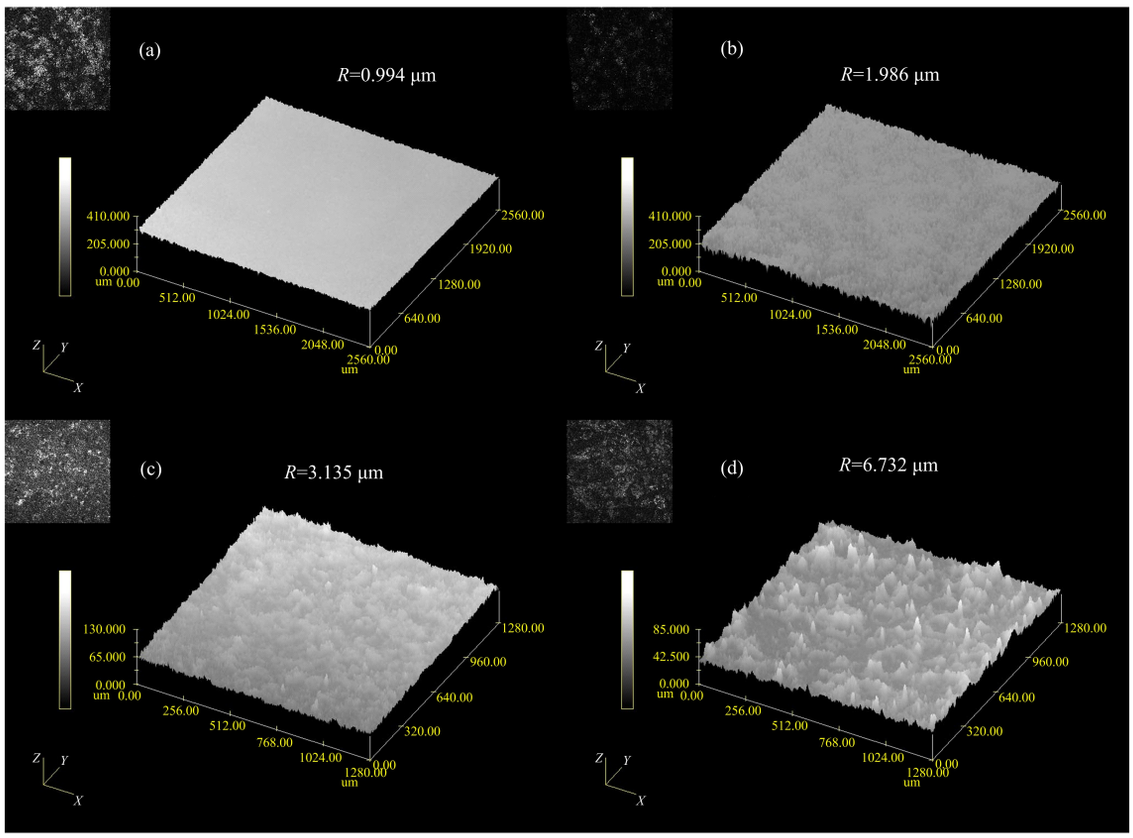


图 7　不同涂层的激光共聚焦扫描显微镜测试结果

Fig. 7　Confocal laser scanning microscope test results for different coatings

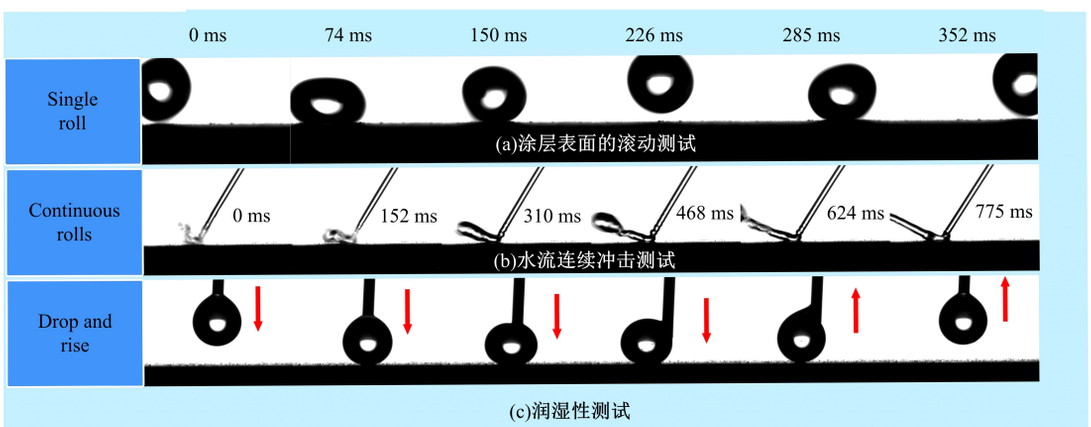


图 8　PSG 涂层的表面特性测试

Fig. 8　Surface characterization tests of PSG coatings

在整个过程中始终保持不变,未发生任何下降。这表明 PSG/EP 复合涂层在高压水流冲击下依然能够保持其卓越的疏水性能,具有极好的稳定性和耐用性。即使在较为苛刻的环境下,涂层的超疏水状态得以保持,进一步证明了涂层在长时间暴露于外界环境下依然能够有效抵御水分子附着的能力。

最后,图 8(c)展示了润湿性测试的结果。该测试通过微注射器将水滴接近涂层表面,观察水滴与涂层表面接触、挤压及最终离开的动态过程。测试过程中,水滴在涂层表面表现出良好的动态行为,水滴接触并迅速离开表面,且完全抬起后未留下任何水痕。同时,水滴始终保持了理想的圆润形态,没有任何形变或破裂,显示出涂层表面的极低润湿性。这一结果进一步验证了 PSG/EP 复合涂层的超疏水特性,其表面结构能够有效防止水滴与涂层之间的黏附和扩散,从而增强了涂层的自清洁能力。

2.7 自清洁测试

超疏水有机涂层因其卓越的疏水性能和低表面能而广泛受到关注。然而,超疏水性不仅仅体现在水的排斥能力上,其特殊的表面结构(例如微米或纳米级的乳突结构)也赋予了这些涂层卓越的自清洁能力。自清洁性使得涂层能够在雨水或水流的冲刷下清除附着的污垢和污染物,减少表面污染和维护成本,因此在众多领域,如建筑外墙、汽车涂料、电子设备防护等方面,超疏水涂层具有重要应用价值。本文通过在涂层表面添加石墨粉并利用水流冲刷实验,对不同涂层的自清洁能力进行了系统评估。

从图9中可以直观地观察到,PSG/EP复合涂层在水滴滑落的过程中展现了显著的自清洁效果。水滴能够轻松带走附着在涂层表面的石墨粉,而不会使其污染涂层表面,说明该涂层具备了优异的污物排斥性和清洁性能。

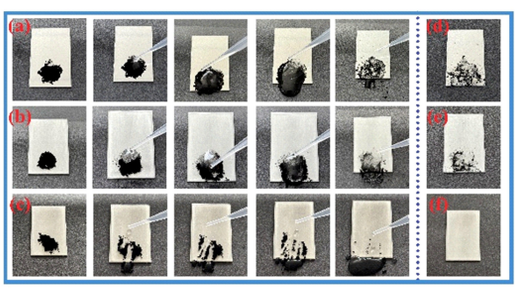


图9 纯铝基体、纯环氧树脂(EP)涂层和PSG/EP复合涂层在水流冲刷下的自清洁测试

Fig. 9 Self-cleaning test of pure aluminum substrate, pure epoxy resin(EP) coating and PFOTES-SiO_2/GO/EP composite coating under water washout

相比之下,纯铝和EP涂层的表现则较为逊色。当水滴滴落在纯铝基体表面时,水滴并不会直接带走表面的碳粉,而是与碳粉发生混合,形成一种共混状态。这是因为铝基体表面的亲水性较强,水滴更容易与石墨粉形成黏附,导致水滴既不能清洁表面,也无法将石墨粉带走。尤其在纯铝基体上,水滴与石墨的黏附性较强,液滴停留时间较长,显示出较差的自清洁能力,反而可能引发污物的积累和表面污染。

而对于EP涂层来说,虽然其表现有所改善,但仍未达到理想的自清洁效果。水滴与石墨粉的混合状态较纯铝基体有所减轻,EP涂层表面的亲水性较低,水滴滑落时能够带走部分石墨粉,但表面仍会残留一些混合物。尽管残留的碳粉比纯铝基体少,但长期来看,EP涂层依然无法充分保护基体材料,特别是在长期暴露于外界腐蚀介质或污染物的环境中,涂层的保护性能和自清洁能力仍显不足。

图9(d)(e)(f)进一步展示了PSG/EP复合涂层的显著优势。在液滴完全滴落并冲刷过涂层表面后,可以清楚地看到该复合涂层表面没有任何石墨残留,说明该涂层具备极好的自清洁能力,能够有效地清除外界的污染物,避免污物积聚在表面。结合水流冲刷实验的结果,可以确认PSG/EP复合涂层不仅具有优异的超疏水性,还因其表面的微观结构赋予了强大的自清洁功能,使其在长期使用中能够有效减少污物积累,保持表面清洁,并防止外界腐蚀介质的侵扰。

综上所述,PSG/EP复合涂层在自清洁性能上表现出色,其不仅具备优异的水排斥性,还能够在实际应用中显著减少污染物的附着与积累,为涂层的长期稳定性和耐用性提供了强有力的保障。这一特性使得该复合涂层在防腐蚀、抗污染和自清洁的应用场景,特别是在那些需要保持长期表面清洁和防止外界腐蚀介质侵蚀的环境中,具有显著的优势。

3 结束语

选用硅烷偶联剂PFOTES对纳米二氧化硅进行改性,并用二维大平面GO对其进行负载,制得PFOTES-SiO_2/GO复合粒子。以PFOTES-SiO_2/GO复合粒子为改性粒子,加入到环氧树脂中进行混合,并采用喷涂法,在铝板得表面制得了PFOTES-SiO_2/GO/EP复合涂层。GO的加入使得复合粒子在环氧树脂中分散的更为均匀,并且涂层表面的硅氧烷键(Si-O-R)大大提高了涂层的疏水性能。与纯环氧树脂相比,复合涂层的水接触角提高了109%,表面粗糙度提升了577.3%,自清洁性能也得到了极大的提升,具有优异的防水防污性能。

参考文献:

[1] Xia Y, Gu W, Zhang Q, et al. Enhancing resistance to corrosion and fouling using epoxy coatings with superhydrophobic cells[J]. Adv Funct Mater, 2024, 24: No. 12379.

[2] Sharma S, Kumar A. Recent advances in metallic corrosion inhibition: a review[J]. Journal of Molecular

Liquids, 2021, 322: No. 114862.

[3] Wu Y, Zhao W, Wang L. State of the art and current trends on the metal corrosion and protection strategies in deep sea[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 215: 192-213.

[4] Li S, Sun W, Yang Z, et al. Influences of semiconductor oxide fillers on the corrosion behavior of metals under coatings[J]. Electrochimica Acta, 2018, 292: 425-434.

[5] Tang Z, Xu B, Man X, et al. Bioinspired Superhydrophobic Fibrous Materials[J]. Small Methods, 2024,8: No. 2300270.

[6] Si Y, Dong Z, Jiang L. Bioinspired designs of superhydrophobic and superhydrophilic materials[J]. ACS Central Science, 2018, 4: 1102-1112.

[7] Xu P, Zhang Y, Li L, et al. Adhesion behaviors of water droplets on bioinspired superhydrophobic surfaces[J]. Bioinspir Biomim, 2022, 17: No. 041003.

[8] Jing X, Guo Z. Biomimetic super durable and stable surfaces with superhydrophobicity[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 16731-16768.

[9] Wu Y, Xu G, Wang T, et al. Preparation of biomimetic hair-like composite coatings with water-collecting and superamphiphobic properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 158: No. 106372.

[10] Guo Y. Super high flux oil/water separation and efficient separation of water-in-oil emulsions by a versatile superhydrophobic multi-walled carbon nanotubes coating[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 348: No. 127759.

[11] Liang C. TiO_2/EP superhydrophobic composite coating with excellent mechanical and chemical stability [J]. Coatings Technology, 2024, 481: No. 130641.

[12] Mo J, Sha J, Li D, et al. Fluid release pressure for nanochannels: the Young-Laplace equation using the effective contact angle[J]. Nanoscale, 2019, 11(17): 8408-8415.

[13] Nagayama G, Zhang D. Intermediate wetting state at nano/microstructured surfaces[J]. Soft Matter, 2020, 16(14): 3514-3521.

[14] Rohrs C, Azimi A, He P. Wetting on micropatterned surfaces: partial penetration in the cassie state and wenzel deviation theoretically explained[J]. Langmuir, 2019, 35(47): 15421-15430.

[15] Bell M S, Borhan A. A Volume-corrected Wenzel model[J]. ACS Omega, 2020,5,15: 8875-8884.

[16] Cao Y, Lu Y, Liu N, et al. Multi-applicable, durable superhydrophobic anti-icing coating through template-method and chemical vapor deposition[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 32: No. 102100.

[17] Xue Y, Wang Y, Wang Y, et al. Functionalized superhydrophobic MWCNT/PEI nanocomposite film with anti-icing and photo-/electrothermal deicing properties[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 297: No. 127385.

[18] Huang X, Sun M, Shi X, et al. Chemical vapor deposition of transparent superhydrophobic anti-Icing coatings with tailored polymer nanoarray architecture[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: No. 139981.