

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.006

## 建筑结构钢表面超疏水复合膜的耐久性及其自清洁效果

敬旭初<sup>1</sup>, 周宏业<sup>1</sup>, 许晓文<sup>2</sup>, 杨婧一<sup>1</sup>

(1. 沧州职业技术学院 城乡建设工程系, 河北 沧州 061001; 2. 河北水利电力学院 土木工程系, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 针对常规工艺制备的超疏水膜层耐久性差的问题, 采取了“表面粗糙化处理+喷涂颗粒溶胶”的策略。通过磷化处理形成具有微米级粗糙结构的锌系磷化膜, 喷涂含有疏水性 SiO<sub>2</sub> 颗粒的溶胶, 固化成膜后与磷化膜紧密结合, 在 Q235 钢表面制备出了具有超疏水性并且耐久性较好的复合膜。结果表明: 复合膜主要由 Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、Zn<sub>2</sub>Fe(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 和 SiO<sub>2</sub> 这 3 种物相组成, 接触角达到 155.2°; 与溶胶膜相比, 复合膜能较长时间耐受盐雾腐蚀和轻度摩擦, 并保持超疏水性; 复合膜具有低黏附性, 污染物很难紧密黏附, 可以实现自清洁效果。

**关键词:** 超疏水; 建筑结构钢; 耐久性; 自清洁效果

**中图分类号:** TQ050; TG174.4 **文献标志码:** A

## Durability and self-cleaning performance of superhydrophobic composite film on structural steel for buildings

JING Xuchu<sup>1</sup>, ZHOU Hongye<sup>1</sup>, XU Xiaowen<sup>2</sup>, YANG Jingyi<sup>1</sup>

(1. Department of Urban and Rural Construction Engineering, Cangzhou Technical College, Cangzhou 061001, China; 2. Department of Civil Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** To address the problem of poor durability of superhydrophobic films prepared by conventional processes, a strategy of “surface roughening treatment+spraying particles sol” was adopted. A zinc phosphating film with micro-scale rough structure was prepared through phosphating treatment, and then a sol containing hydrophobic SiO<sub>2</sub> particles was sprayed. After curing into a film, it was tightly combined with the phosphating film to prepare a composite film with superhydrophobicity and better durability on the surface of Q235 steel. The experimental results show that the composite film is mainly composed of three phases, such as Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, Zn<sub>2</sub>Fe(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, and SiO<sub>2</sub>, with a contact angle up to 155.2°. Compared with the sol film, the composite film has better resistance to salt spray corrosion and mild friction for a long time while maintaining superhydrophobicity. The composite film also shows lower adhesion, making it difficult for pollutants to adhere tightly, which can achieve a self-cleaning effect.

**Keywords:** superhydrophobic; structural steel for buildings; durability; self-cleaning performance

Q235钢兼具良好的力学性能、焊接性能和冷热加工性能, 并且冶炼工艺简单、成本较低, 在建筑

行业应用广泛, 适合制作桁架、横梁和支撑柱等建筑结构构件<sup>[1-2]</sup>。然而, Q235钢主要以铁素体和珠光体

收稿日期: 2025-07-17 修回日期: 2025-12-03

作者简介: 敬旭初(1991—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为建筑结构材料表面改性, e-mail: Jingxcedu@163.com

通信作者: 杨婧一(1988—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为建筑工程技术、表面改性, e-mail: Hyong6699@163.com

基金项目: 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJ2025188)

引用信息: 敬旭初, 周宏业, 许晓文, 等. 建筑结构钢表面超疏水复合膜的耐久性及其自清洁效果[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 38-44.

JING Xuchu, ZHOU Hongye, XU Xiaowen, et al. Durability and self-cleaning performance of superhydrophobic composite film on structural steel for buildings[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 38-44.

组织为主,容易形成“多阴极-多阳极”的分散微电池<sup>[3]</sup>,加之其表面不会形成具有防护作用的钝化膜,导致建筑构件不可避免地出现腐蚀生锈现象。如不采取防护措施,必将影响建筑构件的耐久性。近年来备受关注的超疏水膜层,为Q235钢的表面防护提供了新思路。

孙际洲和Jiang等<sup>[4-5]</sup>采用一步喷涂法在Q235钢表面制备出了由树脂与疏水性SiO<sub>2</sub>颗粒构筑的超疏水复合膜,能对Q235钢起到有效防护作用。李小兵等<sup>[6]</sup>采用一步电沉积法制备出超疏水复合膜,同样能有效减缓基体腐蚀。史雪婷等<sup>[7]</sup>则采用化学镀铜与表面修饰相结合的方法在Q235钢表面制备出超疏水膜层,凭借良好的耐蚀性实现了对Q235钢的有效防护。然而,超疏水膜层在实际应用中易受雨水冲淋、酸碱性质和盐雾侵蚀、机械摩擦等多因素影响,导致耐久性较差,随时间延长逐渐丧失超疏水特性。虽然可采用喷涂、滴涂、刻蚀和修饰等工艺在Q235钢表面直接制备超疏水膜层<sup>[8-10]</sup>,但这些工艺制备的膜层普遍呈柔性,与刚性基体仅依靠范德华力结合,较低的结合强度导致膜层在温度大幅度变化或受轻度摩擦时易脱落,进而加速超疏水特性的丧失。鉴于此,提高超疏水膜层与基体的结合强度是提升其耐久性的关键。

本研究采取“表面粗糙化处理+喷涂颗粒溶胶”的策略,首先对Q235钢进行磷化处理形成具有微米级粗糙结构的锌系磷化膜,然后喷涂含有疏水性SiO<sub>2</sub>颗粒的溶胶,固化成膜后与磷化膜紧密结合,在Q235钢表面形成具有超疏水性并且耐久性较好的复合膜。本研究结果可以为耐久性超疏水膜层的制备提供思路。

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

选用厚度为1 mm的Q235钢板,切割成50 mm×21 mm的片状作为基体。实验试剂均为分析纯,包括:丙酮(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O)、无水乙醇(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O)、盐酸(HCl)、正辛基三乙氧基硅烷(C<sub>14</sub>H<sub>32</sub>O<sub>3</sub>Si)、磷酸二氢锌(Zn(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>)、硝酸锌(Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)、氟化钠(NaF)、氯化钠(NaCl)。气相纳米SiO<sub>2</sub>颗粒的纯度高于99.8%、平均粒径为20 nm。

### 1.2 超疏水复合膜的制备过程

图1为超疏水复合膜的制备过程示意图,具体步骤如下:

(1) 基体预处理。依次进行打磨(2000目砂纸)、超声清洗(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O)、浸蚀(20 vol.% HCl+5 wt.% NaCl溶液)、超声清洗(H<sub>2</sub>O)、烘干(吹风机)。

(2) 配制溶胶。先称取3 g气相纳米SiO<sub>2</sub>颗粒,倒入100 mL无水乙醇中,搅拌1 h获得SiO<sub>2</sub>胶体颗粒。接着添加2 mL C<sub>14</sub>H<sub>32</sub>O<sub>3</sub>Si,使SiO<sub>2</sub>颗粒表面初步形成疏水基团。搅拌30 min后,再添加少量0.1 mol/L HCl、1 mL H<sub>2</sub>O、10 mL C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O和2 mL C<sub>14</sub>H<sub>32</sub>O<sub>3</sub>Si,继续搅拌2 h,最终获得含疏水性SiO<sub>2</sub>颗粒的溶胶(后补加的C<sub>14</sub>H<sub>32</sub>O<sub>3</sub>Si可确保所有SiO<sub>2</sub>颗粒被疏水基团充分包覆)。

(3) 磷化与烘干。将预处理后的基体浸入(35±1) °C的磷化液(65 g/L Zn(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>+70 g/L Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>+3 g/L NaF)中,静置20 min后取出,基体表面形成厚度约5 μm的锌系磷化膜。其中,Zn(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>是磷化液的核心成分,可提供Zn<sup>2+</sup>并维持磷化液酸性。Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>用作氧化剂,以补充Zn<sup>2+</sup>并加速磷化反应。NaF用于活化基体、维持磷化液稳

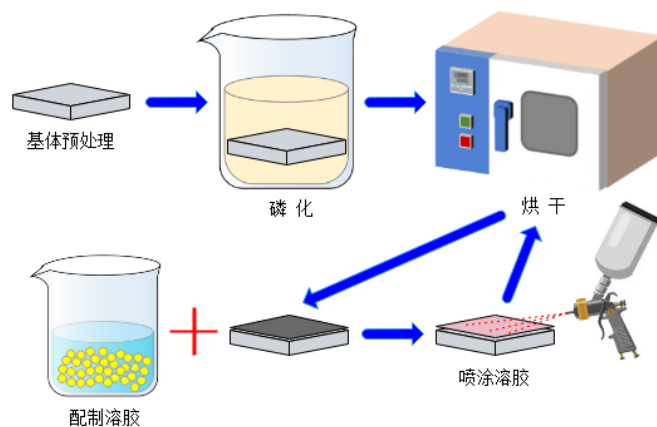


图1 超疏水复合膜的制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of superhydrophobic composite film

定性并减少磷化膜缺陷。磷化完成后,先清洗基体,再放入 $(60\pm 1)^\circ\text{C}$ 的鼓风干燥箱中烘干。

(4) 喷涂溶胶与固化成膜。将静置24 h的溶胶倒入喷枪喷壶,调节气压为0.3 MPa,在磷化后基体表面均匀喷涂溶胶,随后放入 $(100\pm 1)^\circ\text{C}$ 的鼓风干燥箱中静置30 min,使溶胶固化成膜(简称溶胶膜)。该溶胶膜与锌系磷化膜紧密结合,形成厚度约15  $\mu\text{m}$ 的复合膜。

作为对比,另在预处理后的基体表面直接喷涂第(2)步配好的溶胶,在 $(100\pm 1)^\circ\text{C}$ 、30 min下固化后形成厚度约10  $\mu\text{m}$ 的单一溶胶膜。

### 1.3 表征与测试

用Gemini SEM450型扫描电镜观察试样的微观形貌,观察前需将试样置于ETD-800型离子溅射仪中喷金1 min。

借助Smart LabSE系列XRD和Jade软件测试并分析基体和复合膜的物相,角度范围 $30^\circ\sim 90^\circ$ ,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$ 。借助Nicolet iS20型FTIR分析试样表面成分及官能团。

先用无水乙醇擦拭试样表面,随后用百格刀在试样表面刻划横纵向间距均为1 mm的网格状图案。观察划格区域并计算脱落面积所占的百分比,根据GB/T 9286-2021标准评估溶胶膜、复合膜与基体的结合强度。

将试样置于Y/Q-150型盐雾试验箱中,进行10 d盐雾实验。试样倾斜放置且互不接触,以3.5 wt.% NaCl溶液作为腐蚀介质,喷雾量为 $1\sim 2\text{ mL}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$ ,箱内温度 $(35\pm 2)^\circ\text{C}$ 。每隔2 d取样,经清洗、烘干后,借助DSA100B型接触角仪测量复合膜表面5个不同位置的接触角,取平均值。根据接触角变化评估复合膜表面润湿性,进而评估其耐久性<sup>[11-12]</sup>。同步进行砂

纸摩擦实验,进一步评估复合膜的耐久性。将400目砂纸的带砂面朝上放置,沿边角固定防止翘起。试样平放使复合膜与带砂面接触,其背面压200 g砝码。拖动试样沿砂纸直线移动,每移动5 cm为1次实验。每隔5次实验,按照上述方法测量复合膜的接触角。

借助M120M-16G型高速摄像机录制水流倾斜射向复合膜表面的过程,通过逐帧截图观察水滴形态,以此评估复合膜表面黏附性。

将泥土与细沙混合模拟固态污染物,均匀撒在倾斜放置的试样表面。使用10 mL注射器吸取清水滴于试样顶端,观察水滴接触污染物的状态及是否滚落清理污染物。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合膜的微观形貌、物相和表面成分分析

图2(a)~(c)为基体、锌系磷化膜和复合膜的微观形貌。从图2(a)看出,基体表面存在许多微米级凹坑,但凹坑形状不规则,并且有部分凹坑连通形成沟槽。从图2(b)看出,锌系磷化膜完全覆盖基体,其晶粒呈片状交错排列,形成微米级粗糙结构。锌系磷化膜用作过渡层,其微米级粗糙结构可以为溶胶提供固化结合的锚点,使基体对溶胶膜的抓附效果增强。从图2(c)看出,复合膜具有微纳米分级结构,由微纳米级凸起和形状不规则且深浅不等的凹坑构成。分析认为,较小凸起是单分散的纳米 $\text{SiO}_2$ 颗粒,较大凸起可能是 $\text{SiO}_2$ 颗粒团聚体。由于疏水性 $\text{SiO}_2$ 颗粒与有机溶剂的相容性存在差异,在烘干过程中有机溶剂蒸发会引起物相分离,从而形成由单分散的纳米 $\text{SiO}_2$ 颗粒与 $\text{SiO}_2$ 颗粒团聚体共同构成的微纳米级凸起,而颗粒分布稀疏的区域则会形成形状不规则、深浅不等的凹坑。

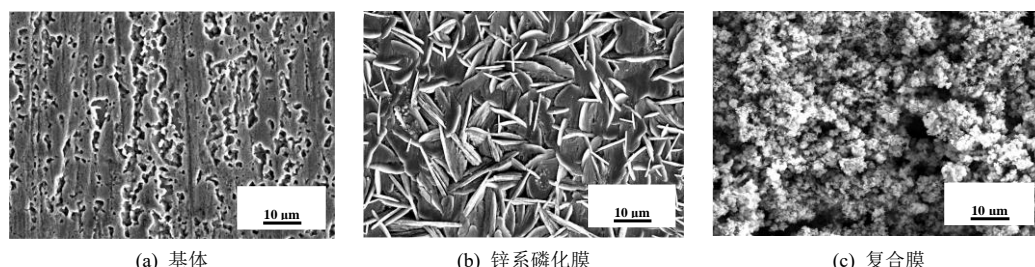


图2 基体、锌系磷化膜和复合膜的微观形貌

Fig.2 Micro-morphology of substrate, zinc phosphating film and composite film

图3为基体和复合膜的XRD图谱。从图中可看出,基体的XRD图谱出现4个衍射峰,都是Fe相特征峰。复合膜的XRD图谱上出现更多衍射峰,主要是

$\text{Fe}$ 、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{SiO}_2$ 等4种物相的特征峰。由于X射线的穿透性很强,复合膜较薄无法阻挡,导致X射线穿透复合膜与基体接触

并发生衍射,所以在复合膜中检测到Fe相。 $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 和 $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 相都来源于锌系磷化膜,是锌系磷化膜特有的物相<sup>[13-14]</sup>。由于配制磷化液未使用含硅试剂,也未向磷化液中添加 $SiO_2$ 颗粒,因而 $SiO_2$ 相来源于溶胶。

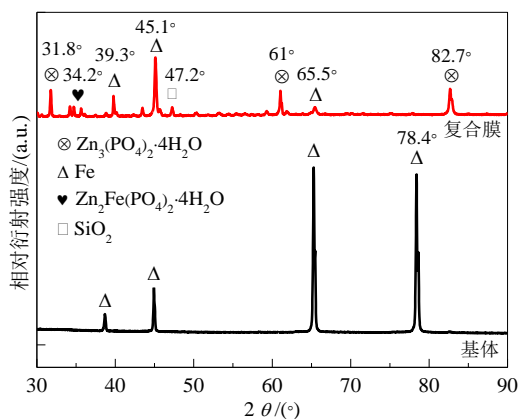


图3 基体和复合膜的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of the substrate and composite film

图4为基体和复合膜的红外光谱。从基体的红外光谱看出,在 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内无明显特征吸收峰,这是由于金属基体不含有有机官能团,符合红外惰性特征。从复合膜的红外光谱看出,在 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内出现多个特征吸收峰。其中位于 $2923 \text{ cm}^{-1}$ 的峰为C-H的伸缩振动峰,是 $C_{14}H_{32}O_3Si$ 烷基链的疏水基团;  $1454 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰为C-H的弯曲振动峰,属于烷基链构象;  $1037 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰为Si-O-Si的伸缩振动峰,是硅氧网络交联结构的特征峰;  $775 \text{ cm}^{-1}$ 处的峰为Si-C的伸缩振动峰,是由于 $C_{14}H_{32}O_3Si$ 与基体化学键合产生; 位于 $445 \text{ cm}^{-1}$ 的峰为Si-O-Si的弯曲振动峰,是硅氧网络骨架的特征峰。

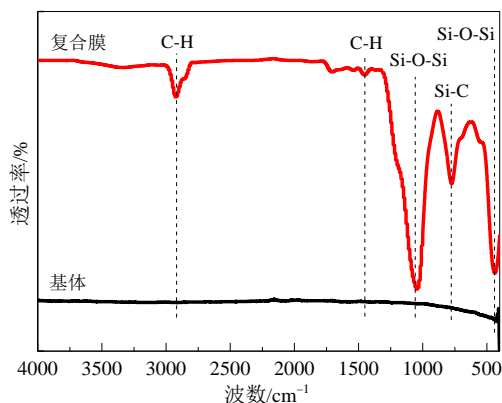


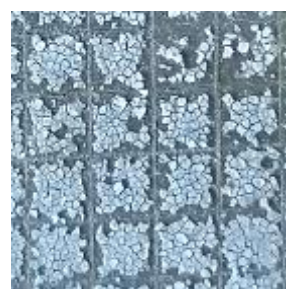
图4 基体和复合膜的红外光谱

Fig.4 Infrared spectra of the substrate and composite film

结合溶胶成分及红外光谱特征分析可知,C-H的特征峰对应 $C_{14}H_{32}O_3Si$ 分子的长链烷基(如 $-CH_3$ 、 $-CH_2$ ),出现Si-O-Si的特征峰表明 $C_{14}H_{32}O_3Si$ 发生了水解缩合反应,形成三维交联网络并附着在基体表面。Si-C特征峰的存在,表明 $C_{14}H_{32}O_3Si$ 分子成功引入复合膜中。该分子含有Si-O基团,具备与基体表面的Fe-O键发生化学反应的可能性,会形成Fe-O-Si共价键,进而实现基体与复合膜的化学键合。

## 2.2 复合膜的结合强度分析

图5为在溶胶膜和复合膜表面刻划的网格状图案。从图5(a)看出,溶胶膜表面的网格划痕周围脱落严重,脱落面积超过15%。从图5(b)看出,复合膜表面的网格划痕周围无明显脱落,脱落面积小于5%。由此表明,复合膜与基体结合牢固,并且溶胶膜与基体的结合强度明显低于复合膜。这是由于具有微米级粗糙结构的锌系磷化膜充当过渡层,为溶胶提供了固化结合的锚点,溶胶固化后与磷化膜紧密结合,进一步形成与基体结合牢固的复合膜。



(a) 溶胶膜



(b) 复合膜

图5 在溶胶膜和复合膜表面刻划的网格状图案

Fig.5 Grid-like patterns engraved on the surface of sol film and composite film

## 2.3 复合膜的耐久性分析

图6(a)~(c)分别为实验前基体、溶胶膜及复合膜表面的水滴形态,对应的接触角依次为 $67.6^\circ$ 、 $150.5^\circ$ 和 $155.2^\circ$ 。分析得知,基体表面亲水,容易被润湿,而溶胶膜和复合膜都具有超疏水性,很难润湿表面。但溶胶膜介于临界超疏水状态。

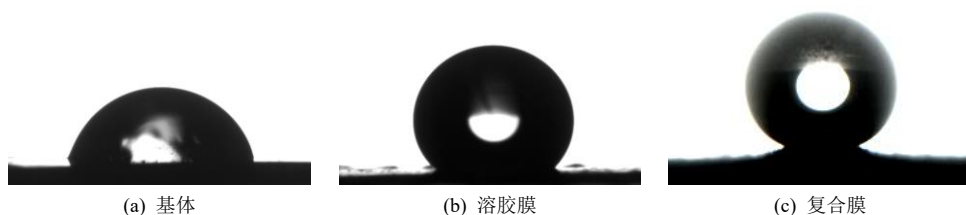


图6 实验前基体、溶胶膜和复合膜表面的水滴形态

Fig.6 Water droplet morphology on surface of substrate, sol film and composite film before experiment

图7为溶胶膜和复合膜在盐雾实验过程中表面接触角的变化。从图7看出，随着盐雾实验时间延长，溶胶膜和复合膜的接触角总体呈减小趋势。但经过4 d盐雾实验后，溶胶膜的接触角小于150°，失去超疏水性。而复合膜经过10 d盐雾实验后接触角仍大于150°，表明复合膜在盐雾环境中能保持超疏水性，也反映出其耐久性明显好于溶胶膜。

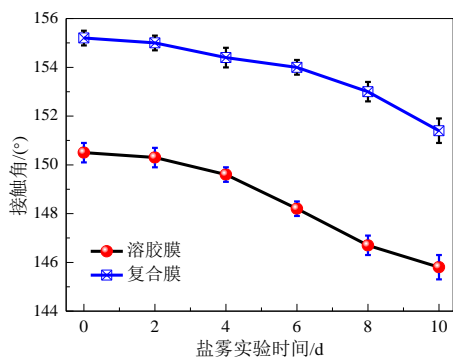


图7 溶胶膜和复合膜在盐雾实验过程中表面的接触角变化  
Fig.7 Changes of contact angle on the surface of sol film and composite film during salt spray test

图8为溶胶膜和复合膜在砂纸摩擦实验过程中表面接触角的变化。从图8看出，随着砂纸摩擦实验次数增加，溶胶膜和复合膜的接触角同样呈减小趋势，并且接触角的变化幅度逐渐增大。但经过10次砂纸摩擦实验后，溶胶膜的接触角小于150°，失去超疏水性。而复合膜经过25次砂纸摩擦实验后接触角仍大于150°，进一步表明复合膜能保持超疏水性，并且具有较好的耐久性。

结合盐雾实验和砂纸摩擦实验结果分析，复合膜具有较好耐久性的主要原因是：一方面，具有微纳米级粗糙结构的锌系磷化膜充当过渡层，增加了基体与溶胶膜的接触面积，当溶胶渗入磷化膜的晶粒间隙时会形成物理嵌合效应，能有效阻止溶胶膜在轻度摩擦及其它外力作用下发生破坏或脱落。同时，锌系磷化膜的微米级粗糙结构为单一分散的SiO<sub>2</sub>颗粒与SiO<sub>2</sub>颗粒团聚体提供了更多稳定附着位

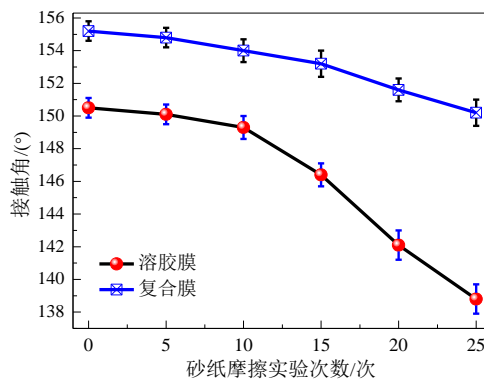


图8 溶胶膜和复合膜在砂纸摩擦实验过程中表面的接触角变化

Fig.8 Changes of contact angle on the surface of sol film and composite film during salt spray test

点，减少了外力导致的颗粒损失，保障了复合膜的表面结构完整性。另一方面，溶胶固化过程中，C<sub>14</sub>H<sub>32</sub>O<sub>3</sub>Si分子含有的Si-O基团，具备与基体表面的Fe-O键发生化学反应的可能性，会形成Fe-O-Si共价键。该共价键的强度远高于常规物理吸附，使复合膜与基体结合更牢固，因而能较长时间承受承受盐雾腐蚀和轻度摩擦。

### 2.4 复合膜的自清洁效果分析

图9(a)和图9(b)分别为多个水滴落在铺撒污染物的基体和复合膜表面的状态。从图9(a)看出，多个水滴在基体表面汇聚并黏附停留，污染物清理面积占基体总面积的比例为0，表明基体不具备自清洁效果。从图9(b)看出，水滴在复合膜表面未发生汇聚黏附，而是呈近似球形快速滚落。在滚落过程中，水滴会裹挟污染物将其带离。经估算，单个水滴滚落过程中可清理约13%面积的污染物。这表明复合膜可实现自清洁效果，对污染物的清理效率显著高于基体，能有效抑制污染物在其表面附着。

从微观层面分析，复合膜具有微纳米分级结构，这种特殊结构中存在多层级孔隙网络，空气被截留其中形成气膜<sup>[15-17]</sup>。另外，复合膜表面枝接了低表面能基团，黏附性变弱。图10为水流倾斜射向

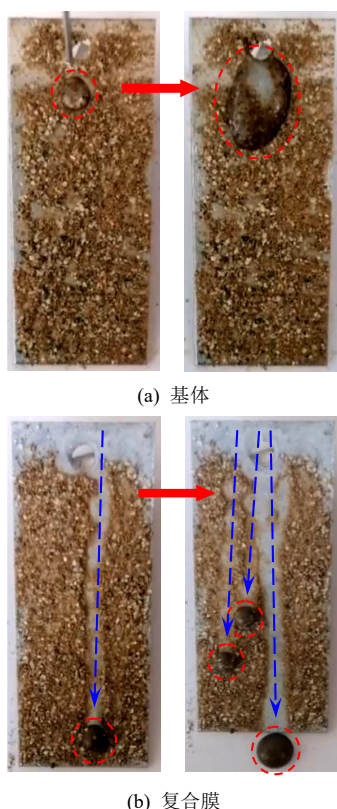


图9 多个水滴落在铺撒污染物的基体和复合膜表面状态  
Fig.9 Surface state of multiple water droplets falling of substrate and composite film contaminated with pollutants

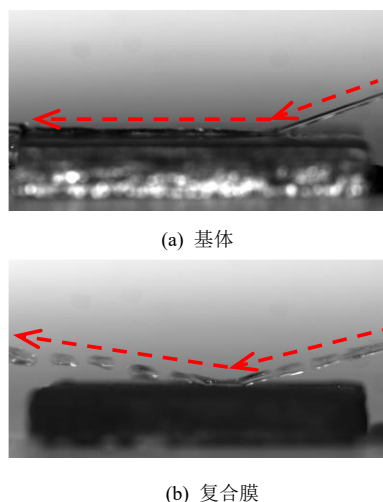


图10 水流倾斜射向基体和复合膜表面状态

Fig.10 Surface state of water flow impinging obliquely of substrate and composite film

基体和复合膜表面的状态。从图10(b)看出,水流倾斜射向复合膜表面时,发生弹射现象,且无水滴黏附于复合膜表面,这表明复合膜表面黏附性弱。然而,当水流以相同的倾斜角度射向基体表面时,发生黏附现象(图10(a)),证实基体表面黏附性强。

由于复合膜表面能低并且存在气膜效应,污染物很难紧密黏附。另外,特殊的微纳米分级结构使复合膜表面形成了气-固-液三相界面,根据表面能最小化原理,水滴倾向于收缩成表面积最小的球形<sup>[18-20]</sup>。球形水滴在重力作用下会滚落,滚落过程中将尚未紧密黏附的污染物清理,因而复合膜可以实现自清洁效果。

### 3 结论

(1) 通过对Q235钢进行磷化处理形成了具有微米级粗糙结构的锌系磷化膜,然后喷涂含有疏水性 $\text{SiO}_2$ 颗粒的溶胶,固化成膜后与磷化膜紧密结合,在Q235钢表面形成具有超疏水性并且耐久性较好的复合膜。

(2) 以微米级粗糙结构的锌系磷化膜作为过渡层,既能增加基体与溶胶膜的接触面积,又提供更多稳定附着位点以保障复合膜表面结构的完整性,因而复合膜能较长时间耐盐雾腐蚀和轻度摩擦,并保持超疏水性。复合膜具有微纳米分级结构,且表面枝接低表面能基团,能有效抑制污染物在其表面附着,从而实现自清洁效果。

### 参考文献

- [1] 刘继雄,陈晓,董汉雄,等.耐火耐候建筑用钢与Q235钢耐火性能的对标研究[J].物理测试,2005,23(2):6-11.
- [2] 苏铭浩.氨基酸酰胺类缓蚀剂的合成及其对Q235钢缓蚀性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [3] 贾晓帅,左训伟,陈乃录,等.经新型Q-P-T工艺处理后Q235钢的组织与性能[J].金属学报,2013,49(1):35-42.
- [4] 孙际洲.Q235碳钢表面超疏水涂层构建及防腐防污性能研究[D].青岛:青岛大学,2024.
- [5] JIANG LL, YANG JH, WU C, et al. Fabrication of a robust superhydrophobic coating exhibiting superior corrosion resistance via spray application technique[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 687: 133497.
- [6] 李小兵,余雄,胡顺保,等.一步电沉积法制备铜表面稀土铜/石墨烯超疏水复合涂层及其耐腐蚀性能[J].材料保护,2024,57(5):152-157.
- [7] 史雪婷,刘艳花,薛逢欣,等.铁基超疏水表面的化学镀铜法辅助构建及其性能研究[J].兰州交通大学学报,

2021, 40(5): 105-111.

[8] 王力. Q235 低碳钢超疏水表面的制备及耐用性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

[9] 钱晨. 碳钢表面超疏水涂镀层的制备及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[10] 张方铭, 曾志翔, 王刚, 等. Q235 钢超疏水表面制备及耐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(6): 617-624.

[11] 王波, 辛蕾, 张凯, 等. 耐久超疏水涂层的制备及其防冰防腐自清洁性能[J]. 中国表面工程, 2024, 37(2): 238-247.

[12] 姚思雨, 朵永超, 牛家嵘, 等. 提高超疏水表面耐久性的研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(1): 62-66.

[13] 张伟华, 张颖超, 孙伟, 等. 柠檬酸对建筑用 16Mn 钢磷化膜物相与耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(6): 21-25.

[14] 陈力, 耿海波, 张鉴达. 稀土-超声波耦合作用对轴套磷化膜性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(2): 96-101.

[15] JIANG Y J, WANG C C, LIU Z, et al. Anti-corrosion and anti-fouling superhydrophobic silicone coating with continuous micro/nano structure[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 188: 108230.

[16] FATHYUNES L, MOHTADI-BONAB M A. Co-electrodeposition of superhydrophobic NiCo/CeO<sub>2</sub> coating with hierarchical nano/micro structure for corrosion protection of plain carbon steel[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108851.

[17] ZHAO L X, LI H Y, ZHOU K, et al. Enhanced mechanical stability and corrosion resistance of superhydrophobic coating reinforced with inorganic binder[J]. Journal of Central South University, 2024, 31: 3502-3516.

[18] 陈宏霞, 马福民, 黄林滨. 金属丝网超亲/疏水性强化气液相界面运动[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2318-2324.

[19] 郭永刚, 张鑫, 耿铁, 等. 超疏水表面耐久性能的研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 63-72.

[20] ZHANG Z G, CHU Z M, LIU X M, et al. Superhydrophobic surface with switchable wettability and self-monitoring for droplet transportation[J]. Surfaces and interfaces, 2024, 51: 104547.

\*\*\*\*\*

\*上接 33 页\*

[19] 吴丰, 褚松竹. 化学复合镀镍-硼-三氧化二铝的研究[J]. 表面技术, 1994, 23(4): 154-158.

[20] 马军. 电沉积法制备纳米晶 Ni-Co 合金镀层[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(6): 1-4.

[21] 任雪峰, 安茂忠. Ni-Co-C 代硬铬镀层的制备及性能研究(II): 镀层性能研究[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(4): 1-7, 11.

[22] 李文畅, 盛施展, 吴金洪, 等. 表面活性剂对 Ni-W-P 化学镀层沉积行为及性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(1): 1-8.

[23] 闫巍, 张畅, 余智勇, 等. 高活性镍钴铁三元合金电极的制备及析氢性能研究[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(3): 30-35.

[24] 方志刚, 石键, 沈百荣, 等. Ni-Co-B 非晶态合金电子性质的理论研究[J]. 化学世界, 2003(3): 115-118.

[25] 饶群力, 王浩伟, 周尧和, 等. 化学镀镍硼基合金镀层的研究现状及其应用前景[J]. 机械工程材料, 2001(7): 7-11, 29.

[26] SANKARA N T S N, STEPHAN A, GURUSKANTHAN S. Electroless Ni-Co-B ternary alloy deposits: preparation and characteristics[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 179(1): 56-62.

[27] 彭成章, 杨添, 曹获, 等. 热处理对 Ni-Co 合金镀层组织与耐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(2): 197-199, 202.

[28] 姚伦芳, 罗雪芳, 刘定富. 热处理温度对电沉积 Ni-W-B 合金镀层性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(9): 93-96.

[29] 丁耀, 沈岳军, 付定国, 等. 热处理温度对电镀 Ni-Co-P 镀层的性能影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 25-29.