第 49 卷第 10 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 10
2021 年 10 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　October，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200910

基于气相法二氧化硅和聚二甲基硅氧烷构建超疏水自修复涂层

李秀秀，王红宁，陈若愚

(常州大学石油化工学院，江苏 常州 213164)

摘　要：将气相法二氧化硅和聚二甲基硅氧烷混合形成一定黏度的悬浮液，利用气相法二氧化硅纳米粒子在喷涂过程中的三维聚集，形成了微纳米级的粗糙表面，并将低表面能物质聚二甲基硅氧烷储存在气相法二氧化硅纳米粒子三维孔隙中，在不同基材表面喷涂制备了自修复超疏水涂层。涂层表面在经等离子破坏后，仅需室温放置或 100 ℃、30 min 处理即可恢复其超疏水性能，自修复次数超过 20 次。同时该涂层还具有良好的耐高温、耐酸碱、耐摩擦和耐冲刷性能。

关键词：自修复；超疏水涂层；喷涂法；耐摩擦
中图分类号：O613.72　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)10–2233–09
网络出版时间：2021–09–03



Superhydrophobic Self-Healing Coating with Fumed Silica and Polydimethylsiloxane

LI Xiuxiu, *WANG Hongning*, *CHEN Ruoyu*
(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

Abstract: Fumed silica and polydimethylsiloxane were mixed with water to prepare a suspension with a certain viscosity. The three-dimensional aggregates of fumed silica nanoparticles in the spraying process were used to form a micro-/nano-grade rough structure for super-hydrophobic coating, and a low surface energy material of polydimethylsiloxane was stored in the three-dimensional pores of gas-phase chain silica nanoparticles, and self-healing superhydrophobic coatings were prepared *via* simple spraying on the surface of different substrates. After the surface of the coating is destroyed by oxygen plasma, the coating can be restored to its super-hydrophobic performance by only placing at room temperature or treating at 100 ℃ for 30 min. The number of self-healing exceeds 20 times. Also, the coating has good high-temperature resistance, acid and alkali resistance, friction resistance and erosion resistance performance.

Keywords: self-healing; superhydrophobic coating; spraying; rub resistance

受自然界中如荷叶表面的超疏水自清洁现象的启发[1]，研究者们已经通过溶胶凝胶法[2]、静电纺丝法[3]、电化学沉积法[4]等制备了不同物质组成的接触角大于 150°，滚动角小于 10°的超疏水表面[5]。超疏水表面具有的微米级的乳突结构和单个乳突上的纳米突出所组成的微纳结构是导致超疏水现象的重要原因，微纳结构可以捕捉空气，在固–液表面形成气垫，结合表面上的低表面能物质(如荷叶上的蜡质)，液滴在该表面极易滚落，并将表面的污垢带走，使得表面保持清洁[6]，但在实际应用中，由于超疏水表面微纳结构的脆弱性，紫外线、酸碱、风沙等外部条件会对涂层的微纳结构或低表面能物质带来不可逆转的损伤，从而使涂层失去超疏水性能[7]。因此，超疏水自洁涂层的耐久性能制约了其在实际中的应用。

当超疏水表面的低表面能物质或微纳米结构遭受破坏后，就会失去其超疏水性能[8]，而利用湿度[9]、加热[10]和有机溶剂[11]等可以诱导损伤的表面自我重

收稿日期：2020–12–11。　修订日期：2021–03–06。
基金项目：国家自然科学基金(21571024)；江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX19_1748)。
第一作者：李秀秀(1994—)，女，硕士研究生。
通信作者：陈若愚(1966—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–12–11.　**Revised date:** 2021–03–06.
First author: LI Xiuxiu (1994–), female, Master candidate.
E-mail: 1948822828@qq.com
Correspondent author: CHEN Ruoyu (1966–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: cxdcry@163.com

新构建微纳结构，或者通过诱导超疏水表面内部的低表面能物质在自由能的驱动下向材料表面迁移，在受损的表面重新形成一层新的低表面能物质，从而修复表面的超疏水性能，这类涂层称为自修复超疏水涂层[12]。Li 等[13]制备了基于聚苯乙烯泡沫废料和近红外线响应的微胶囊的具有自修复和超疏水性能的涂料，在经过氧等离子体破坏超疏水表面后，经近红外光照射后，氟硅烷 1H, 1H, 2H, 2H-全氟辛基三乙氧基硅烷从微胶囊中释放出来使涂层表面重新具有低表面能，从而恢复其超疏水性能。Yin 等[14]采用电沉积、溶剂热反应和化学改性相结合的方法在 304 不锈钢表面制备了无氟的 Ni_3S_2 超疏水涂层，在经过氧等离子刻蚀损伤后，经过加热可以恢复其超疏水性能，且该涂层可以自修复循环 5 次。Peng 等[15]采用紫外光照和热处理的方法，将 SiO_2 和 TiO_2 与聚二甲基硅氧烷(PDMS)通过共价键枝接在一起后制备了具备多种功能的超疏水表面，且经过等离子体处理后可以恢复疏水性能，该涂层的自修复过程可以重复至少 8 次。尽管已经有很多有关自修复超疏水涂层的研究，但是寻求一种价廉、易得和环境友好的自修复超疏水涂层仍是该领域的研究热点。

在涂层表面形成微纳结构是构建超疏水表面的重要步骤。本工作将气相法二氧化硅(FS)[16–17]和具有低表面张力的有机弹性体 PDMS 简单混合成悬浮液，通过 PDMS 与 FS 的连接胶黏得到了合适的柔韧度，从而形成了微纳米聚集体，通过喷涂在不同基体表面制备了自修复超疏水涂层。同时对涂层的结构、超疏水自洁性能、自修复能力、自修复机理和涂层的耐久性进行了研究。

1 实验

1.1 样品制备

气相法二氧化硅(FS)(0.2~0.3 μm)(相对分子质量：60.08 g/mol)购买于美国 SIGMA 公司，聚二甲基硅氧烷(PDMS)和固化剂(Sylgard 184)购买于美国 Dow Corning 公司，正己烷(分析纯，质量分数≥97.0%)、无水乙醇(分析纯，质量分数≥99.7%)购买于国药集团化学试剂有限公司，齿轮牌载玻片购买于国药集团化学试剂有限公司，铝合金金属板、棉布和海绵购于当地市场，去离子水为实验室自制。

称取 0.8 g 的 PDMS(前驱体与固化剂质量比为 10:1)，溶于 10 mL 正己烷和乙醇(体积比为 1:2)的混合溶液中，超声 15 min 后加入不同质量(0.10、0.20、0.25、0.30 g)的 FS，分别占总质量的 11%、22%、28%和 33%。超声 30 min 后搅拌 30 min 得到喷涂液，将喷涂液装入喷枪(佛山市百马五金工具有限公司 BM-116BK 型喷枪，喷嘴内径为 0.3 mm，喷涂距离约为 15 cm)中在通风橱中喷涂到清洗好的基材(载玻片、铝合金、棉布、海绵、水泥块和滤纸)上，将喷涂好的基材在室温干燥 30 min 后放入 120 ℃的烘箱中干燥 2 h，得到超疏水自修复涂层。

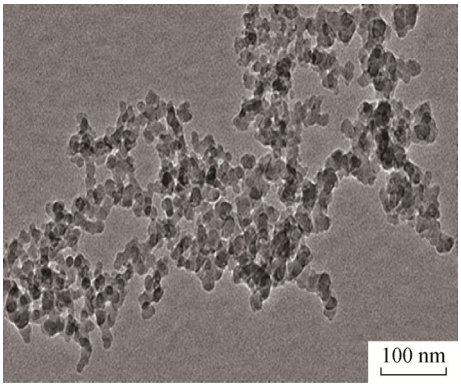
1.2 样品分析与性能测试

采用北京哈科试验仪器厂 HARKE-SPCA 型标准接触角测量仪测试样品的接触角。采用美国 Nicolet-460 型 Fourier 变换红外光谱仪(FTIR)分析样品键合情况，使用 KBr 压片法处理样品，将压片成型后的样品在红外灯下干燥，然后放入仪器中测试，测试波长范围为 400~4 000 nm^{-1}。采用德国蔡司 SUPRA55 型场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察样品表面及截面形貌，喷金次数为 4 次，观察过程中加速电压为 5 kV，信号源选择二次电子。采用日本 JEOL-2100 型高分辨透射电子显微镜(TEM)观察溶液中纳米粒子的形貌和结构，加速电压为 200 kV。采用日本奥林巴斯 BX50M 型正置显微镜观察涂层的表面形貌。采用深圳三和波达机电设备有限公司 PT-5S 型真空等离子体清洗机测试样品自修复性能(使用功率为 80 W，处理时间为 60 s)。采用上海精宏仪器设备有限公司程控箱式电炉涂层在不同温度对涂层的热稳定性进行测试。收集建筑工地的砂土过筛后均匀地撒在涂层的表面后用 6 μL 的亚甲基蓝染色的水滴对涂层进行自清洁测试。采用盐酸和氢氧化钠配制不同 pH 值的溶液，将涂有涂层的载玻片浸渍其中 4 h 以测试涂层的耐酸碱性能。使用 100 g 的重物将涂有涂层的载玻片按压在平均粒径约为 15 μm 的砂纸上，随后在外力作用下将其缓慢向前推动 20 cm (速率为 3 cm/s)，对涂层进行机械耐久性测试。采用兰州中科凯华科技开发有限公司 WS-2005 型涂层附着力自动划痕仪分析涂层与基底的结合力，将涂有涂层的载玻片固定在涂层附着力自动划痕仪上，将金刚石钻头抵进至膜层表面，然后在 0~200 N 范围内进行声波载荷实验，加载速率为 200 N/min，划痕速率为 10 mm/min，金刚石钻头开始在膜层表面制造长度约 3 mm 的划痕，电脑记载过程中的声波波动曲线，曲线平稳时表示膜层未从基底上脱落，当曲线出现波动表示膜层已经从基底上脱落，开始脱落的载荷点称为临界载荷点，以此判断镀层与基底的结合程度。

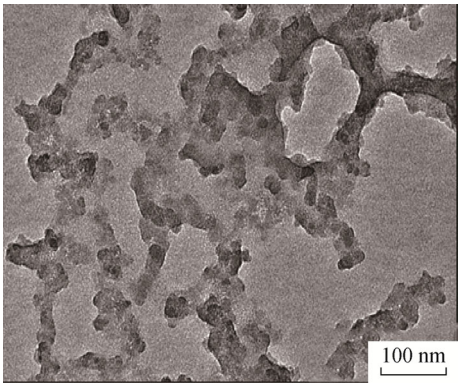
2　结果与分析

2.1　FS-PDMS 自修复涂层的组成和表面结构

FS 纳米颗粒与 PDMS 混合前后形貌如图 1 所示。原料 FS 为分散性良好，长度为 200~300 nm 的链状纳米颗粒(图 1a)，当 FS 与 PDMS 混合后，PDMS“包裹”在 FS 的骨架上，并由 PDMS 将 FS 连接成三维网状结构(图 1b)。



(a) FS

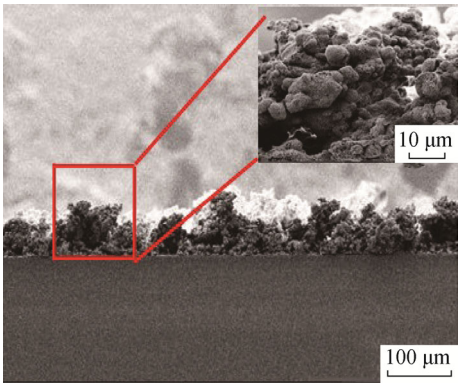


(b) FS–PDMS

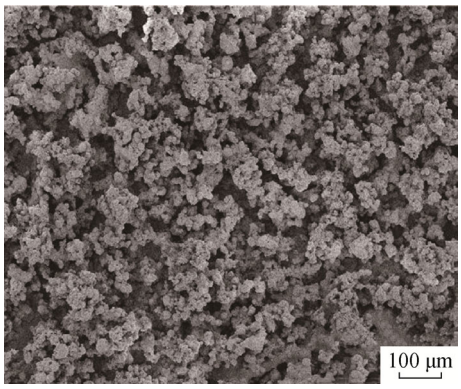
图 1　气相法二氧化硅(FS)纳米颗粒和气相法二氧化硅–聚二甲基硅氧烷(FS–PDMS)纳米颗粒的 TEM 照片

Fig. 1　TEM images of fumed silica (FS) nanoparticles and FS–polydimethysioxan (PDMS) nanoparticles

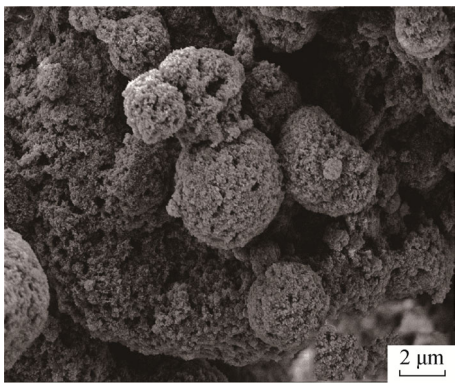
场发射扫描电子显微镜(FESEM)测试结果如图 2a 所示，FS–PDMS 涂层的厚度为 80~100 μm，FS 由 PDMS 黏结而发生团聚，纳米级的 FS 小颗粒团聚成微米级的大颗粒。在较低分辨率的照片中(图 2b)可以看到，FS 纳米粒子聚集形成了直径约为 3~30 μm 的微米级球形团聚体，并均匀分布在涂层表面。进一步观察较大聚集体的 FESEM 高分辨率照片，可以看到较大聚集体表面有未聚集的 FS 纳米颗粒所形成的纳米级突出结构(图 2c)。具有微-纳米级粗糙表面是 FS–PDMS 涂层能够超疏水的主要原因之一。



(a) Cross-section of coating



(b) Surface of coating



(c) Surface of coating

图 2　FS–PDMS 涂层的 FESEM 照片

Fig. 2　FESEM images of FS–PDMS coating

不同 FS 含量的涂层表面具有类似的微纳米复合结构，随着 FS 与 PDMS 混合喷涂液中 FS 相对含量的不断增加，混合喷涂液中的 PDMS 无法将 FS 全部包裹，喷涂液中较多未被包裹的 FS 堆叠在基板上，使涂层表面与基板黏附力下降。涂层与基底结合力测试结果如图 3 所示，结果表明随着 FS 含量的增加，涂层与基板之间的结合力逐渐下降，载荷力由最开始的 55 N(FS 质量分数为 11%)逐渐降低到 22 N(FS 质量分数为 33%)。

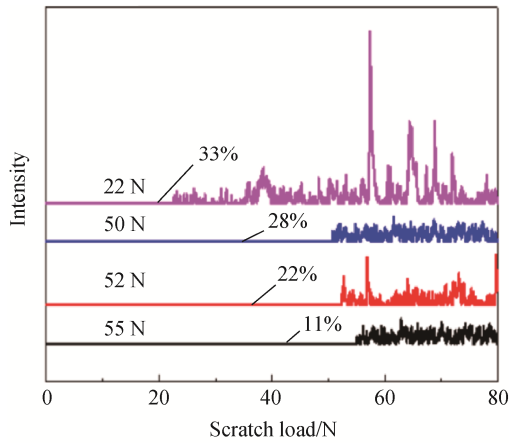
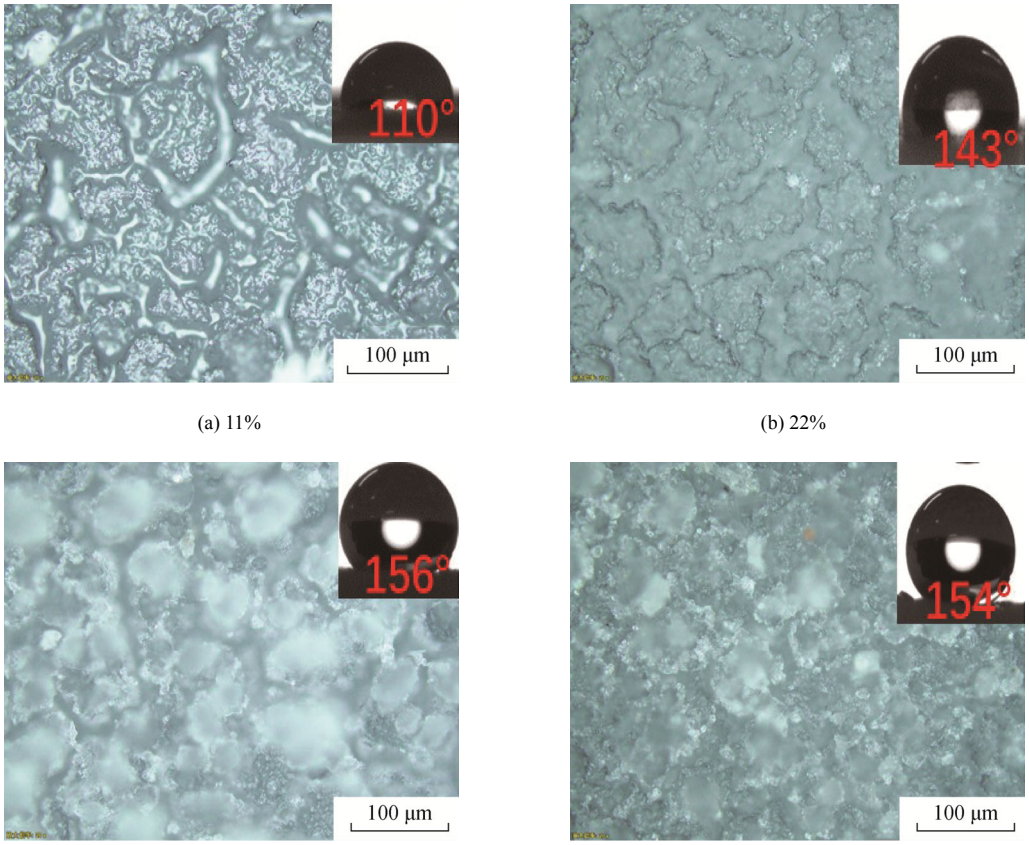


图 3 不同 FS 含量的涂层的声发射信号–载荷测量曲线

Fig. 3 Acoustic emission signal–load measurement curves of coatings with different FS contents

图 4 为不同 FS 含量涂层表面的光学显微镜照片。从图 4a 可见，FS 质量分数为 11%时，PDMS 表面并未被 FS 全部覆盖，涂层表面的粗糙度过低，水接触角约为 110°。FS 为 22%(图 4b)和 28%(图 4c)时的涂层表面形成的膜层相对致密，随着 FS 含量的增加，表面粗糙度增加，水接触角也分别增加至 143°和 156°。当 FS 含量为 33%时(图 4d)，PDMS 无法将全部 FS 包裹起来，虽然水接触角达到 154°，但是未被 PDMS 包裹的 FS 在涂层表面形成堆叠，造成涂层与基板的黏附力下降，影响其机械稳定性。当 FS 与 PDMS 混合喷涂液中 FS 的含量为 28%时，涂层在超疏水性能和涂层–基底结合力之间达到了最佳平衡。



(a) 11% (b) 22%

(c) 28% (d) 33%

图 4 不同 FS 含量的涂层表面

Fig. 4 Coating surfaces with different FS contents

图 5 为 FS、PDMS 和 PDMS–FS(两者质量比为 8.0:2.5)粉末的 FTIR 谱。FS 的 FTIR 谱中的 3 448 cm^{-1} 处的吸收带为—OH 的振动峰，1 636 cm^{-1} 处的为 O—H 弯曲振动峰，1 091 cm^{-1} 处的为 Si—O—Si 的伸缩振动峰。PDMS 的 FTIR 谱中的 1 400 cm^{-1} 为 C—H 键的伸缩和弯曲振动峰，2 971、2 924 cm^{-1} 处的是—CH_3 基团中的 C—H 伸缩振动吸收峰[18–21]。FS–PDMS 的谱在 2 971、2 924 cm^{-1} 和 1 400 cm^{-1} 处均出现峰。FTIR 分析结果表明，当 PDMS 与 FS 混合后，没有新的特征吸收峰出现，说明 FS 与 PDMS 之间未发生键合，PDMS 为超疏水涂层表面提供了疏水的基团，而 FS 为超疏水涂层提供

了骨架。

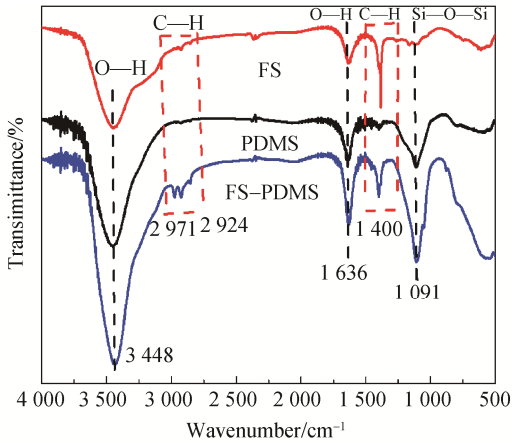


图 5　FS，PDMS 和 FS–PDMS 的红外光谱

Fig. 5　Fourier transformed infrared (FTIR) spectra of FS, PDMS and FS–PDMS

在喷涂过程中由 PDMS“包裹”的长链 FS 在玻璃等基底表面随机排列，如图 6 所示，FS 与 PDMS 黏结形成微米突出结构，微米级的突起表面又分布着未黏结的纳米级的 FS，两者在适当比例下形成了超疏水的表面结构。

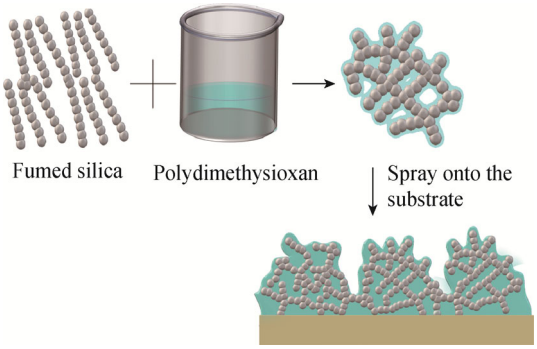


图 6　制备过程示意图

Fig. 6　Schematic diagram of the preparation process

2.2　FS-PDMS 涂层的超疏水自洁性能和自修复性能

为了研究 FS–PDMS 超疏水材料的广泛适用性，参照文献[22]的制备方法在不同基材上制备了超疏水涂层，将 FS 质量分数为 28%的涂膜液通过喷涂的方法在滤纸、海绵、水泥块、棉布、玻璃和铝合金表面制备了超疏水涂层，亚甲基蓝染色的水滴在不同基材上的 FS–PDMS 涂层表面呈现为圆润的球形，测其水接触角(水接触角测试时水滴为 5 μL)均在 150°以上，说明该方法可应用于不同的基材表面自修复超疏水涂层的制备。

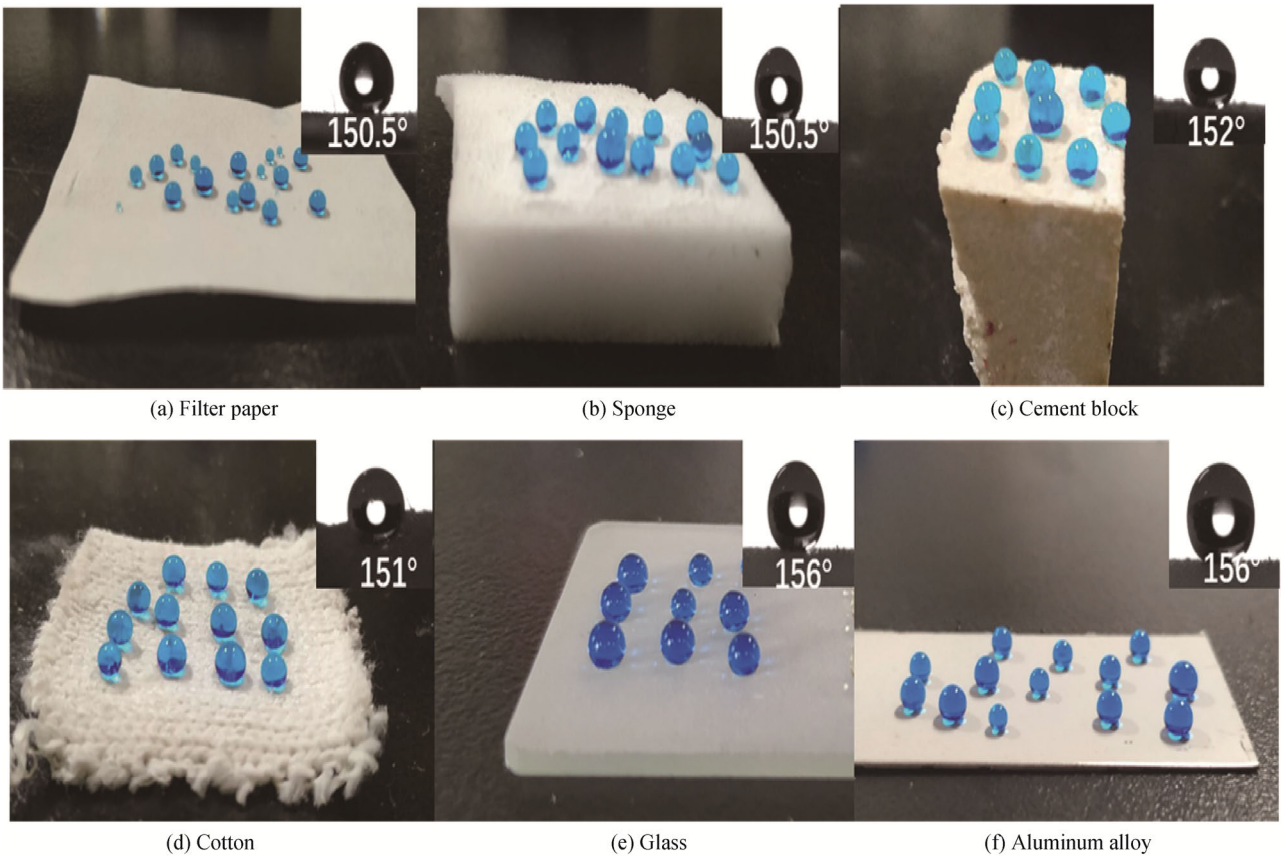
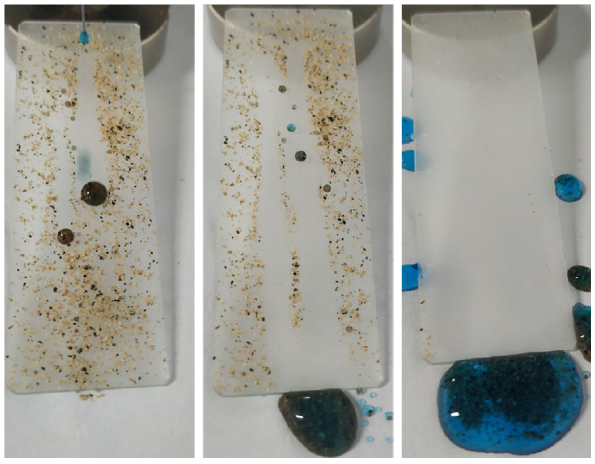


图 7　不同基材上的 FS–PDMS 涂层

Fig. 7　FS–PDMS coatings on different substrates

参照文献[23]中超疏水涂层自清洁测试的方法，选取载玻片上的涂层进行自清洁评价，自清洁过程如图 8 所示。由图 8 可见，沙粒涂抹未进行自清洁的 FS–PDMS 涂层(FS 质量分数为 28%)表面，将水滴滴在涂层后，玻璃表面上会出现一条明显的水珠划过的痕迹，图 8b 为继续在玻璃涂层上方滴加水，水滴继续带动涂层表面的沙粒从涂层上方滚落，直至该涂层表面完全没有污染物(图 8c)。该自清洁过程说明了超疏水涂层具有较好的自清洁性能。



(a) (b) (c)

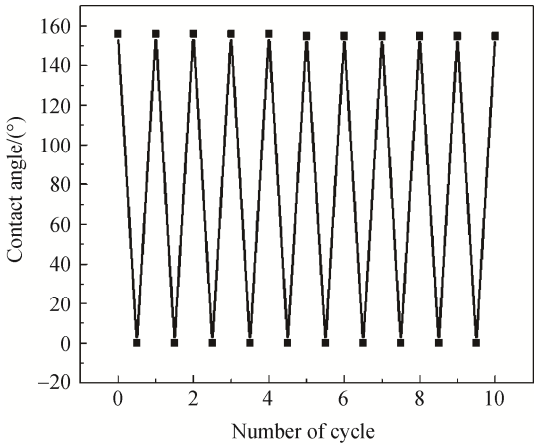
图 8 自清洁过程

Fig. 8 Self-cleaning process

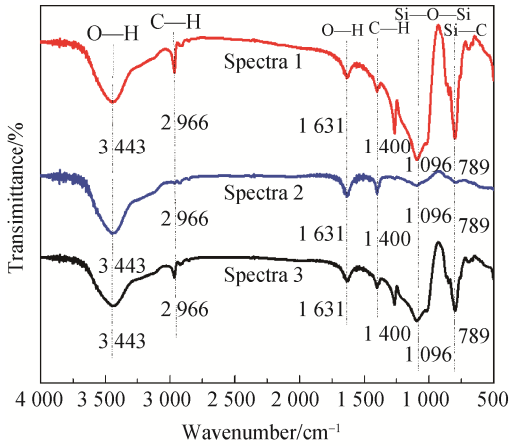
参照文献[24]中的方法对 FS–PDMS 超疏水涂层进行自修复测试，FS–PDMS 涂层(FS 质量分数为 28%)在经过空气等离子体处理(功率为 80 W，处理时间为 60 s)，失去超疏水性后，通过在 100 ℃加热 30 min 即可使涂层快速恢复其疏水性，在室温下放置约 72 h 也可恢复其超疏水性能。图 9a 为自修复循环过程中接触角变化，经破坏后的涂层均能够通过加热或室温放置由超亲水状态恢复至超疏水状态。

图 9b 为原始涂层(谱线 1)和经过空气等离子体处理后的涂层(谱线 2)以及恢复超疏水性能的涂层(谱线 3)的 FTIR 谱。原始涂层谱图(谱线 1)中的 2 966 cm^{-1} 的甲基峰以及 789 cm^{-1} Si—C 键的峰[25]在经过空气等离子体处理后(谱线 2)，甲基峰及 Si—C 键的峰明显变弱，表明经过空气等离子处理后，涂层表面的疏水基团被等离子体氧化后变为亲水基团，而经过 100 ℃处理后，涂层 FTIR 谱中上述 2 个峰再次变强(谱线 3)。这表明，被破坏的涂层加热或长时间放置于室温后，疏水的低表面能物质从涂层内部迁移到涂层表面从而恢复了疏水性。

图 9c 为涂层自修复示意图，经空气等离子处理后涂层表面由超疏水表面变为超亲水表面，但是在 100 ℃放置 30 min 后，涂层表面又恢复超疏水状态，说明在涂层受到空气等离子体破坏后，只是涂层表面的低表面能基团被氧化，在加热或放置修复后，涂层内部存储的 PDMS 逐渐迁移到涂层表面，低表面能基团的恢复使得涂层重新具有了超疏水性能[26]。在经过约 20 次的自修复循环后，涂层仍能

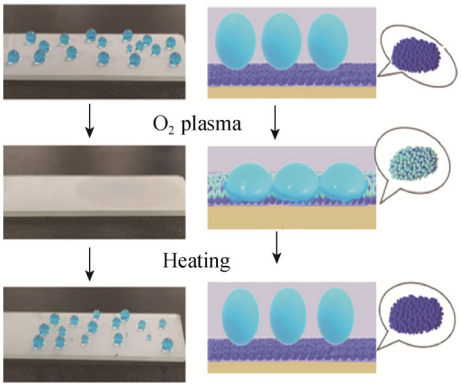


(a) Self-healing cycle



1—FS-PDMS coating; 2—Coating after air plasma treatment; 3—Heat-treated coating.

(b) FTIR spectra of self-healing coating



(c) Self-healing process diagram

图 9 自修复测试及红外分析结果

Fig. 9 Self-healing test and FTIR analysis results

保持超疏水状态，具有较好的自修复性能。FS 在涂层表面形成的三维结构既给涂层的疏水性能提供了合适的微纳结构，还给低表面能物质(即 PDMS)提供了储存空间并可以在三维结构中进行迁移。

按照文献[27]中的测试方法，对 FS–PDMS 涂层(FS 的质量分数为 28%)表面进行耐酸碱性能评价。使用盐酸和氢氧化钠分别配置不同 pH 值(pH=1、3、5、7、9、12、14)的溶液，然后将制备好的超疏水涂层浸渍到上述溶液中，浸渍 4 h 后取出，除浸渍在 pH=5、7、9 溶液的涂层表面的水接触角保持在 150°以上，浸渍在其他 pH 值溶液的涂层表面水接触角变为 0°。将涂层用自来水冲洗，去除涂层表面残余的酸碱溶液，将其在 100 ℃放置 30 min 后，涂层重新恢复了超疏水性能。涂层表面的 PDMS 在强酸强碱环境下会被腐蚀，当将表面酸碱冲掉再经过加热后，涂层内部储存的 PDMS 迁移到表面，涂层表面恢复超疏水状态。图 10 为经过酸碱溶液浸泡后以及自修复后接触角的变化，表明涂层能在经过强酸、强碱溶液侵蚀后恢复其超疏水性能。

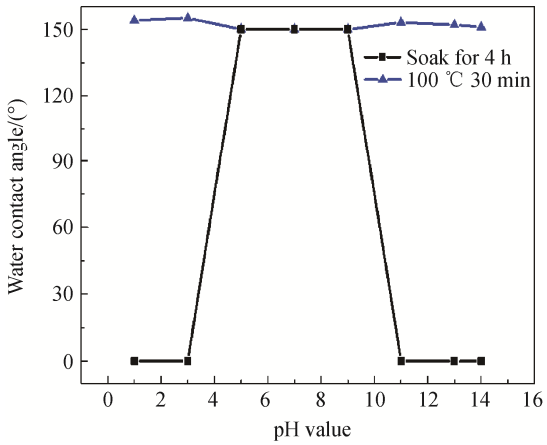


图 10　浸泡不同 pH 值溶液的涂层的接触角

Fig. 10　Contact angles of coating immersed in different pH value solutions

2.3　FS-PDMS 超疏水涂层的热稳定性和机械性能稳定性

按照文献[28]中的方法对 FS–PDMS 涂层(FS 质量分数为 28%)进行热稳定性能测试。将涂覆有 FS–PDMS 的超疏水涂层的载玻片放入–15，5，25，100，200，300，400，450，500 ℃的环境中 2 h，取出后自然冷却，测试其接触角变化，其接触角变化如图 11 所示。在–15~400 ℃范围内疏水角都能保持在 150°以上，说明涂层有较好的热稳定性。但是当温度超过 400 ℃，涂层就由超疏水状态转变为亲水状态，且此种状态是不可逆的。

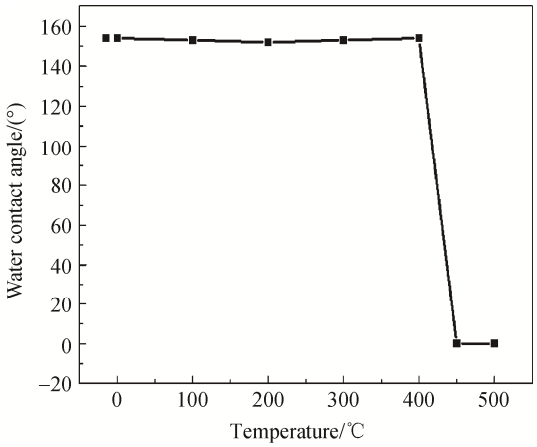


图 11　涂层经不同温度处理后接触角变化

Fig. 11　Change of contact angles after coating treated at different temperature

涂层的表面微纳米结构对其超疏水性能非常重要，但是超疏水涂层往往机械稳定性差，非常容易磨损，从而影响了涂层的性能以及其在磨损环境中的应用。按照文献[29–30]中的方法，用砂纸摩擦和水冲击评估 FS–PDMS 涂层(FS 质量分数为 28%)表面的机械稳定性，如图 12 所示。每 10 次摩擦循环后都利用接触角测试仪测试涂层的水接触角。经过 100 次摩擦后，涂层的水接触角并没有明显下降。

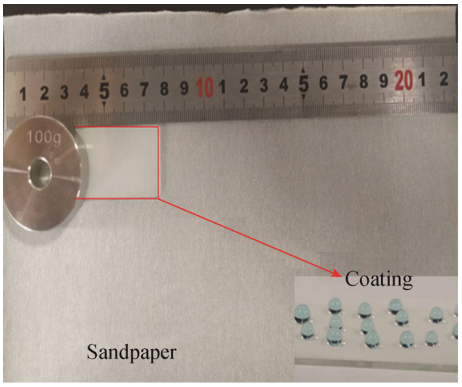
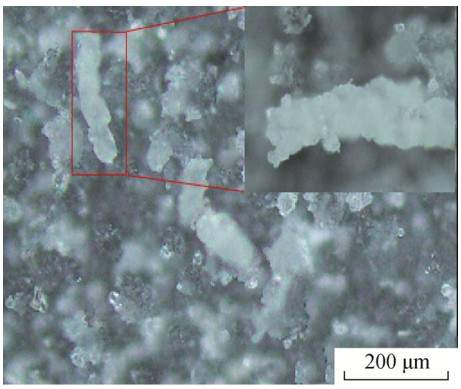


图 12　涂层的耐摩擦测试

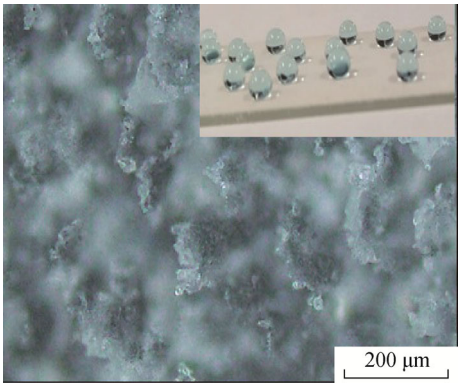
Fig. 12　Coating friction test

不同摩擦次数涂层的光学显微镜照片如由图 13 所示，随摩擦次数的增加，涂层表面的微米级的突起逐渐增多，但是并没有从基板上剥落，涂层表面仍保留了合适的粗糙度，故此时的水接触角并没有下降(图 2b 和图 2c)。涂层在摩擦过程中，较高的微米级突起由于摩擦作用而竖立起来(图 13a)，随着摩擦次数的增多，涂层表面的突起越来越多，使得涂层的水接触角略微增加。由图 14 可见，在摩擦前后水接触角的变化不大，而水滚动角却随着摩擦次数的增多有所增加。连续的摩擦会使得涂层表面的

微纳结构变平，致使涂层的疏水性能下降，同时随着摩擦次数的增多，涂层表面出现了诸多如同海浪形状的突起，对于液滴滚动有一定的阻碍作用，故导致滚动角有所增加。



(a) 50 times



(b) 100 times

图 13 涂层经不同次数摩擦后的光学显微镜照片

Fig. 13 Optical microscopy photos of coating rub by different friction times

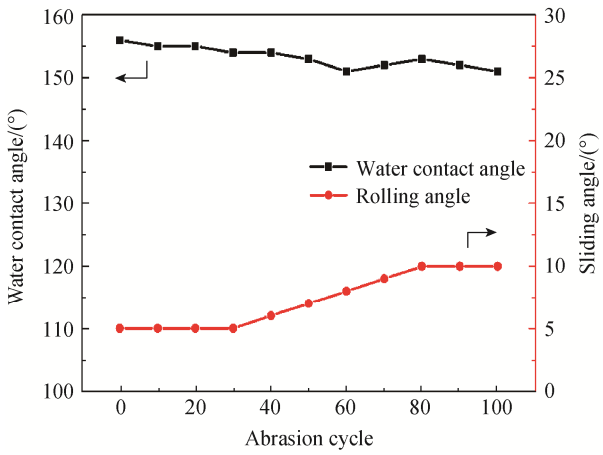


图 14 涂层经摩擦测试后的接触角和滚动角变化

Fig. 14 Change of contact angles and sliding angles of coating after friction test

按照文献[31–32]中的方法对 FS–PDMS 涂层(FS 的质量分数为 28%)进行水流冲击测试。将涂有涂层的载玻片倾斜 30°角放置，水流是从 30 cm 的高处落下，水的流量为 8.4 mL/s，经过一段时间冲击后测试涂层的接触角。当超疏水涂层经过 30 min 的水流冲刷后，表面水接触角由 156°下降到 154°，仍能保持超疏水状态。在室温或者 100 ℃放置一段时间后，水接触角有一定的恢复。如在水流冲击第 1 个周期(30 min)后将涂层在室温下放置 12 h 或 100 ℃放置 20 min 后，接触角恢复至 155°，如图 15 所示，当涂层经过 10 个周期(300 min)水冲击后水接触角从 156°降至 150°。因此，在涂层经过水流冲击后，涂层表面的微纳粗糙分级结构被部分破坏或表面的低表面能物质 PDMS 损失导致了涂层表面水接触角的降低，室温放置或 100 ℃放置可以使涂层内部的 PDMS 迁移到表面恢复涂层表面低表面能物质的数量，也可能部分修复涂层的微纳米分层结构。

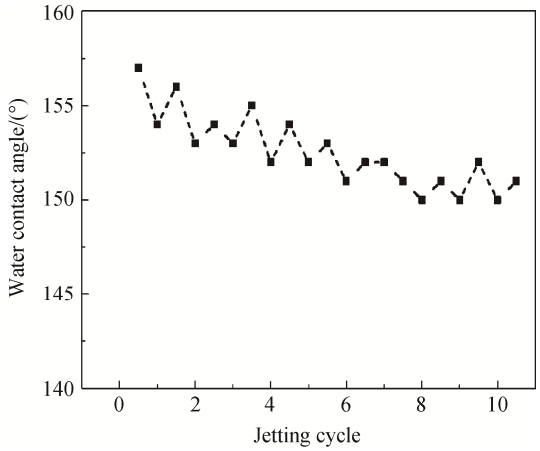


图 15 水冲击不同时间后涂层的接触角

Fig. 15 Contact angles of coating after water impact with different times

3 结论

以气相法二氧化硅(FS)以及聚二甲基硅氧烷(PDMS)为原料，采用简单快速的喷涂方法制备了具有自修复功能的超疏水涂层。FS 纳米颗粒在 PDMS 交联作用下形成微米、纳米级的聚集体，形成了超疏水表面所需的微纳分级粗糙结构，同时 PDMS 包裹在 FS 表面并储存在三维网络涂层表面和内部，为形成超疏水表面提供了低表面能物质。利用喷涂法在玻璃、水泥等不同基材表面均可制备超疏水自清洁涂层，当涂层在经过空气等离子体处理，涂层表面由超疏水变为亲水状态后，经过 100 ℃或室温不同时间放置后，低表面能的 PDMS 能够从涂层内部迁移到涂层的表面，涂层可恢复疏水性能，上述

自修复过程可以循环 20 次以上。此外，该涂层还具有较宽的温度使用范围，可在–15~400 ℃保持超疏水性能，有较好的耐酸碱性能，能在 pH=1~14 的环境下保持超疏水性能，同时还具有良好的机械强度。

参考文献:

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

[2] XIU Y, HESS D W, WONG C P. UV and thermally stable superhydrophobic coatings from sol–gel processing[J]. J Colloid Interf Sci, 2008, 326(2): 465–470.

[3] ISLAM M S, AKTER N, KARIM M R. Preparation of superhydrophobic membranes by electrospinning of fluorinated silane functionalized pullulan[J]. Colloid Surface A, 2010, 362(1–3): 117–120.

[4] HUANG Y, SARKAR D K, CHEN X G. A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces[J]. Mater Lett, 2010, 64(24): 2722–2724.

[5] DALAWAI S P, ALY M A S, ALY S, et al. Recent advances in durability of superhydrophobic self-cleaning technology: A critical review[J]. Progr Org Coati, 2019, 138: 105381.

[6] ENSIKAT H J, DITSCHE-KURU P, NEINHUIS C, et al. Superhydrophobicity in perfection: The outstanding properties of the lotus leaf[J]. Beilstein J Nanotech, 2011, 2(1): 152–161.

[7] DARBAND G B, ALIOFKHAZRAEI M, KHORSAND S, et al. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: Review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability[J]. Arab J Chem, 2018, 13: 1763–1802.

[8] ERBIL H Y. Practical applications of superhydrophobic materials and coatings: Problems and perspectives[J]. Langmuir, 2020, 36(10): 2493–2509.

[9] LI Y, LI L, SUN J. Bioinspired self-healing superhydrophobic coatings[J]. Angew Chem Int Edit, 2010, 49(35): 6129–6133.

[10] WANG J, KATO K, BLOIS A P, et al. Bioinspired omniphobic coatings with a thermal self-repair function on industrial materials[J]. ACS Appl Mater Inter, 2016, 8: 8265–8271.

[11] XUE C H, ZHANG Z D, ZHANG J, et al. Lasting and self-healing superhydrophobic surfaces by coating of polystyrene/SiO_2 nanoparticles and polydimethylsiloxane[J]. J Mater Chem A, 2014, 2: 15001–15007.

[12] XUE C H, MA J Z. Long-lived superhydrophobic surfaces[J]. J Mater Chem A, 2013, 1: 4146-4161.

[13] LI W, ZHANG X H, YU X F, et al. Near infrared light responsive self-healing superhydrophobic coating based on solid wastes[J]. J Colloid Interf Sci, 2020, 560: 198–207.

[14] YIN X, YU S, WANG K, et al. Fluorine-free preparation of self-healing and anti-fouling superhydrophobic Ni_3S_2 coating on 304 stainless steel[J]. Chem Eng J, 2020, 394: 124925.

[15] PENG S, MENG W, GUO J, et al. Photocatalytically stable superhydrophobic and translucent coatings generated from PDMS-grafted-SiO_2/TiO_2@PDMS with multiple applications[J]. Langmuir, 2019, 35: 2761–2771.

[16] 郑重, 宋义虎, 郑强. 气相二氧化硅填充极性低聚物的界面与流变[J]. 高分子学报, 2017(3): 429–453.
ZHENG Zhong, SONG Yihu, ZHENG Qiang. Acta Polym Sin(in Chinese), 2017(3): 429–453.

[17] 杨晓鸿, 朱薇玲. 气相二氧化硅对环氧填料体系流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(5): 547–552.
YANG Xiaohong, ZHU Weiling. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(5): 547–552.

[18] LIU X, WANG Y, CHEN Z, et al. A self-modification approach toward transparent superhydrophobic glass for rainproofing and superhydrophobic fiberglass mesh for oil–water separation[J]. Appl Surf Sci, 2016, 360: 789–797.

[19] LONG M, PENG S, YANG X, et al. One-step fabrication of non-fluorinated transparent super-repellent surfaces with tunable wettability functioning in both air and oil[J]. ACS Appl Mater Inter, 2017, 9: 15857–15867.

[20] ZHANG L, XUE C H, CAO M, et al. Highly transparent fluorine-free superhydrophobic silica nanotube coatings[J]. Chem Eng J, 2017, 320: 244–252.

[21] YANG J, LI J, XU P, et al. Robust and transparent superoleophobic coatings from one-step spraying of SiO_2@fluoroPOS[J]. J Sol-Gel Sci Technol, 2019, 93: 79–90.

[22] JINMEI H, JIAO H, MINGJUAN Y, et al. Facile fabrication of ecofriendly durable superhydrophobic material from eggshell with oil/water separation property[J]. Adv Eng Mater, 2018, 20: 1701180(1–9).

[23] LEE Y, YOU E A, HA Y G. Transparent, self-cleaning and waterproof surfaces with tunable micro/nano dual-scale structures[J]. Nanotechnology, 2016, 27: 355701.

[24] ZHU H, WU L, MENG X, et al. An anti-UV superhydrophobic material with photocatalysis, self-cleaning, self-healing and oil/ water separation functions[J]. Nanoscale, 2020, 12: 11455–11459.

[25] ZHANG L, XUE C H, CAO M, et al. Highly transparent fluorine-free superhydrophobic silica nanotube coatings[J]. Chem Eng J, 2017, 320: 244–252.

[26] XUE C H, ZHANG Z D, ZHANG J, et al. Lasting and self-healing superhydrophobic surfaces by coating of polystyrene/SiO_2 nanoparticles and polydimethylsiloxane[J]. J Materi Chem A, 2014, 2: 15001–15007.

[27] DONG X, GAO S, HUANG J, et al. A self-roughened and biodegradable superhydrophobic coating with UV shielding, solar-induced self-healing and versatile oil–water separation ability[J]. J Mater Chem A, 2019, 7: 2122–2128.

[28] VARSHNEY P, NANDA D, SATAPATHY M, et al. A facile modification of steel mesh for oil–water separation[J]. New J Chem, 2017, 41: 7463–7471.

[29] ZHANG L, ZHOU A G, SUN B R, et al. Functional and versatile superhydrophobic coatings *via* stoichiometric silanization[J]. Nat Commun, 2021, 12(1): 982.

[30] WANG S, WANG Y, ZHOU Y, et al. Scalable-manufactured superhydrophobic multilayer nanocomposite coating with mechanochemical robustness and high-temperature endurance[J]. ACS Appl Mater Inter, 2020, 12: 35502–35512.

[31] WANG Z, YANG A, TAN X, et al. A veil-over-sprout micro-nano PMMA/SiO_2 superhydrophobic coating with impressive abrasion, icing, and corrosion resistance[J]. Colloids Surf A, 2020,601: 124998.

[32] LIU X, WANG Y, CHEN Z, et al. A self-modification approach toward transparent superhydrophobic glass for rainproofing and superhydrophobic fiberglass mesh for oil–water separation[J]. Appl Surf Sci, 2016, 360: 789–797.