第 49 卷第 10 期
2021 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 10
October，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210174

二氧化钛协同凹凸棒土构筑超疏水表面及其性能

宋月英[1]，雷西萍[1,2]，刘 静[1]，关晓琳[3]，袁蝴蝶[1]

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055；2. 陕西省纳米材料与技术重点实验室，西安 710055；
3. 西北师范大学化学化工学院，兰州 730070)

摘 要：通过 TiO_2 协同凹凸棒土(AT)构筑微纳米粗糙结构，以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为低表面能物质成功制备了具有光催化功能的超疏水涂层(AT/TiO_2@PDMS)，研究了不同掺量的 AT 对涂层表面润湿性和光催化性能的影响。结果表明：AT/TiO_2@PDMS 涂层表面的润湿角均大于 150°，当 AT 掺量为 75% (质量分数)时，接触角可达 165°；汞灯照射 11 h 后，25% AT 掺量的涂层对罗丹明的降解率最高为 94%，且涂层的超疏水性几乎保持不变。这表明该涂层具有良好的光催化性和化学稳定性。此外，该涂层具有基材适用性，可涂覆于各种基材。对生活中一些常见液滴以及强酸/碱性液体在涂层表面的润湿性也进行了测试，发现涂层对这些液滴均具有优异的防护作用。Tafel 测试结果表明，涂层具有良好的耐腐蚀性。自清洁和防污测试结果说明涂层具有一定的自清洁作用和防污性能。经过燃烧实验测试，该涂层还表现出优异的阻燃性能，且燃烧后仍显示出超疏水性。

关键词：凹凸棒黏土；二氧化钛；聚二甲基硅氧烷；超疏水；光催化
中图分类号：TB332　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)10–2242–09
网络出版时间：2021–09–03



Preparation and Properties of Superhydrophobic Surface with Titanium Dioxide and Attapulgite

SONG Yueying[1], *LEI Xiping*[1,2], *LIU Jing*[1], *GUAN Xiaolin*[3], *YUAN Hudie*[1]

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi′an 710055, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Nano Materials and Technology, Xi′an 710055, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: TiO_2 and attapulgite (AT) were used to construct micro-/nano-structures, and polydimethylsiloxane (PDMS) was used as a low surface energy material to prepare the superhydrophobic photocatalytic coating (AT/TiO_2@PDMS). The effect of AT amount on the wettability and photocatalytic performance of the coatings was investigated. The results show that the wetting angle of AT/TiO_2@PDMS coating is more than 150° and the contact angle can reach 165° when AT content is 75% (in mass fraction). After exposure to mercury lamp for 11 h, the degradation rate of rhodamine by 25% AT is 94%, and the superhydrophobicity of the coating almost unchanges, indicating that the coating has good photocatalytic activity and anti UV linearity. In addition, the coating has a substrate applicability, which can be applied to various substrates. The wettability on the surface of the coating with some common droplets and acid/alkaline solutions was examined, showing that the coating has a protective effect on these droplets and solutions. The results by Tafel test show that the coating has a good corrosion resistance. Based on the results by self-cleaning and antifouling tests, the coating has a certain cleaning effect and an antifouling performance. In addition, the coating also shows superior flame retardancy and superhydrophobicity after combustion.

Keywords: attapulgite; titanium dioxide; polydimethylsiloxane; superhydrophobic; photocatalysis

收稿日期：2021–03–11。　修订日期：2021–04–08。
基金项目：生态环境相关高分子材料教育部重点实验室开放基金(KF-18-01)。
第一作者：宋月英(1996—)，女，硕士研究生。
通信作者：雷西萍(1979—)，女，博士，教授。

Received date: 2021–03–11.　**Revised date:** 2021–04–08.
First author: SONG Yueying (1996–), female, Master candidate.
E-mail: 2461827725@qq.com
Correspondent author: LEI Xiping (1979–), female, Professor.
E-mail: leixiping123456@163.com

近些年来，具有特殊浸润性的表面引起了研究者们的广泛关注，尤其是具有光催化活性的超疏水表面。这些表面在自清洁[1–3]、防污[4–6]、耐腐蚀[7–9]、油水分离[10–13]、防冰[14–16]等领域中具有很高的应用价值。超疏水性通常是由表面的微观结构和化学成分的相互作用所决定的。目前，制备超疏水表面常用 2 种途径[17]：1) 利用微纳颗粒构造粗糙的表面结构，再在其表面涂覆低表面能物质。2) 选择低表面能物质作为基底，在这些基底上构造粗糙的表面结构。相较于第 2 种途径，第 1 种途径更方便引入功能性颗粒构筑具有功能性的超疏水表面，使超疏水表面的应用更加广泛。

纳米 TiO_2 颗粒因其优异的光催化性能而备受关注。近年来，学者使用 TiO_2 颗粒制备了各类超疏水表面。Liu 等[18]采用水热合成结合喷涂技术，成功地制备出坚固的 PVDF/GO@TiO_2 复合涂层，其水接触角为 158°，滑移角为 6°，在 1 000 次磨损循环后涂层仍保持超疏水性。Emarati 等[19]使用高效地一步法将纳米 TiO_2 颗粒/三甲氧基(丙基)硅烷复合涂层沉积在 316L 钢表面，给予钢材良好的疏水性以及光催化性能。但是，由于涂层与污染物之间的接触面积有限，TiO_2 颗粒对光源的利用率很低，降低了 TiO_2 催化降解污染物的效率，限制了其在光催化领域中的应用。此外，TiO_2 会降解构成超疏水膜的低表面能材料，导致超疏水涂层的耐久性极差，这是此类涂层在实际应用中需要克服的另一障碍。

凹凸棒黏土(AT)是一种具有独特棒状结构的镁铝硅酸盐粘土矿物，是我国非常重要的特色非金属矿资源，具有较大的比表面积、良好的化学稳定性和比其它黏土更好的吸附性能，而且成本低、来源广[20–21]。将 AT 引入超疏水涂层，利用其较强的吸附能力在涂层表面富集污染物，再利用强光催化能力的 TiO_2 降解表面的污染物，使二者产生一定的协同作用，以提高涂层的光催化效率。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)等聚合材料由于其出色的耐久性和稳定性而被广泛用于日常材料中[22]。PDMS 具有良好的疏水性和化学稳定性，难以被水或氧化剂分解，通常在–45~145 ℃的温度范围内具有耐热性。此外，PDMS 薄膜具有很高的透气性，具有抗老化、抗日光、抗潮湿和化学药品的作用[23]。

本研究通过 TiO_2 协同 AT 构筑微纳米粗糙结构，以 PDMS 为低表面能物质成功制备了具有光催化功能的超疏水涂层(AT/TiO_2@PDMS)，并采用浸涂法将其涂覆到各种基材上，研究了不同掺量的 AT 对涂层润湿性和光催化性能的影响，并对该涂层的耐腐蚀、自清洁和阻燃性能进行了测试。

1　实验

1.1　原料

铝片(99%)、盖玻片购自阿里巴巴。PDMS 预聚物(Sylgard 184A)和固化剂(Sylgard 184B)购自道康宁公司。纳米二氧化钛(TiO_2，锐钛矿，粒径 25 nm，纯度 99%)，凹凸棒黏土(AT，粒径 500 nm，纯度>99%)购自常州鼎邦矿产品科技有限公司。罗丹明 B(RhB，AR)购自麦克林。四氢呋喃(THF，AR，99%)，氯化钠(NaCl，AR)购自恒兴化学试剂制造有限公司。所用水皆为去离子水。

1.2　超疏水涂层的制备

将玻璃片依次置于盛有蒸馏水和乙醇的烧杯中超声清洗 10 min，随后置于烘箱中于 60 ℃烘干，待用。

将 PDMS 预聚物与固化剂以 10:1 的质量比溶于四氢呋喃(THF)中，在室温下搅拌至完全溶解。随后，添加不同掺量[30% (质量分数)、60%、70%、80%]的 TiO_2 颗粒，在室温下搅拌 4 h。将清洗过的玻璃片浸入上述混合浆料中 1~2 min，垂直取出，静置 5 min 后放入烘箱，100 ℃固化 1 h，取出，获得 TiO_2@PDMS 涂层。另外，用 AT 部分替代 TiO_2(替代量分别为 25%、50%、75%、100%)，重复上述实验操作，获得 AT/TiO_2@PDMS 涂层。

1.3　样品表征

通过扫描电子显微镜(SEM，日本 JEOL 的 JSM-7610 F)观察样品的表面形态。为了表征样品的润湿性，使用光学接触角测量仪(Theta Lite，瑞典百欧林科技有限公司)测量水接触角(θ_w)和滚动角(α_s)。通过电化学工作站(CHI660E，上海辰华仪器有限公司)使用三电极系统进行防腐性能测试：样品铺于铝片用作工作电极，铂电极用作对电极，AgCl 电极用作参比电极。在进行电化学测试之前，将工作电极浸入 3.5%的 NaCl 溶液中 10 min，以获得稳定的开路电位，以 1 mV/s 的扫描速率记录电位极化曲线。电化学阻抗谱(EIS)在 0.01 Hz~100.00 kHz 的频率范围内进行，振幅扰动为 10 mV。通过降解 100 mL RhB 溶液(20 mg/L)评估涂层的光催化降解能力。为了消除涂层吸附作用而非降解作用带来的误差，首先将试样浸没于 RhB 溶液中，黑暗下使其自动吸附 2 h 至吸附–解吸平衡，再使用不同光源(氙灯波长范围：280~980 nm，汞灯波长范围：300~380 nm)照射试样，

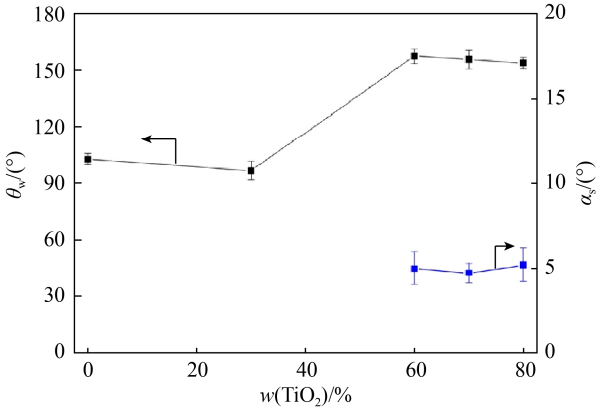
每隔一段时间取出溶液 4 mL，采用紫外–可见分光光度计(UV-8000S，上海佑科仪器有限公司)进行吸光度(C)测试。所有光催化实验均在室温下于自制光催化装置中进行，固定试样距离光源 15 cm。

2 结果与讨论

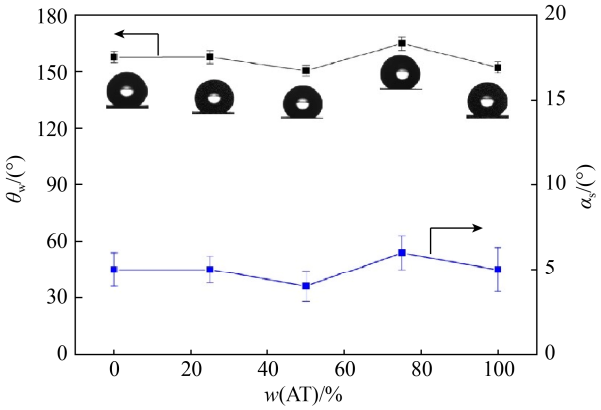
2.1 表面润湿性

表面粗糙度对超疏水性有非常重要的影响[17]。因此，首先在纯 PDMS 涂层中仅加入 TiO_2，探讨了 TiO_2 掺量对涂层表面润湿性的影响。从图 1a 可以看出，相较于纯 PDMS 涂层，当 TiO_2 掺量为 60%时，接触角为 158°，滚动角为 5°。这主要是由于 TiO_2 在涂层表面构成分层的微/纳米结构，在这些结构空隙之间截留了大量的空气，显著减小了液–固接触面积，从而防止水渗入表面。由此，可以确定 TiO_2 的最佳掺量为 60%。随后，再逐渐引入 AT 替代 TiO_2，探讨其掺量对涂层表面润湿性的影响，结果如图 1b 所示。AT 掺量由 0 逐步增加到 100%，即涂层中 TiO_2 的掺量由 100%逐渐减少到 0，涂层的接触角从 150°到 165°之间变化，变化不显著，且均具有超疏水性。并当 AT 掺量为 75%时，接触角最高达 165°。这是因为 AT 与 TiO_2 均为微纳粒子，两者皆可用于构筑微纳米粗糙结构。此外，为了直观说明涂覆超疏水涂层前后液滴对基底的润湿状态，使用更能直观显色的红色水滴作为测试液体，获得图 2a 的结果。对比发现，未涂覆涂层的玻璃表面具有明显的亲水性(θ_w=43°)，而涂覆 75% AT/TiO_2@PDMS 涂层后，θ_w 可达 165°，具有显著的超疏水特性。后续适用性实验中均采用 75% AT/TiO_2@PDMS 用于测试。

此外，为了证明该涂层的适用性，测试了生活中常见的 6 种液体，酸梅汤、咖啡、牛奶、酸奶、豆浆、墨水在上述 AT/TiO_2@PDMS 涂层上的润湿状态，对比了接触角的大小，结果如图 2b 所示。除墨水外，其他液滴在该涂层上的接触角均大于 150°，说明可以有效防止多数液体的污染。



(a) Influence of TiO_2 content on wettability

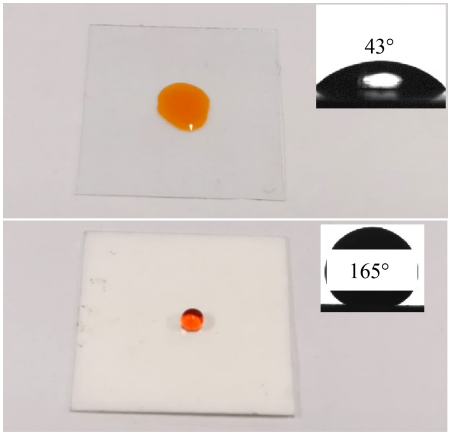


(b) Influence of AT content on wettability

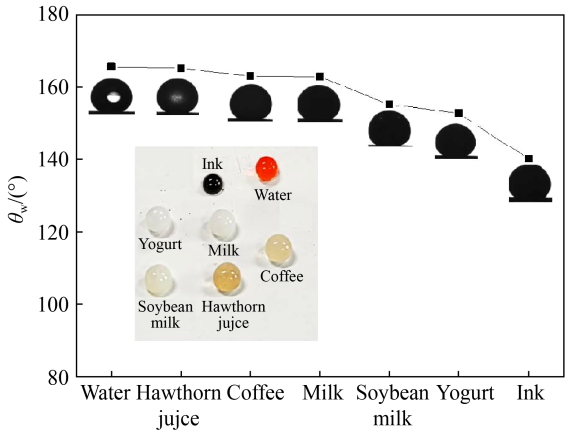
θ_w is contact angle with water; α_s is slide angle; w is mass fraction.

图 1 TiO_2、AT 掺量对涂层表面润湿性的影响

Fig. 1 Effect of TiO_2 and AT content on wettability of coating surface



(a) Water droplet state on glass surface



(b) Wettability of common droplets on coating surface

图 2 液滴在涂层表面的润湿状态实物照片及 θ_w

Fig. 2 Physical photos and θ_w of droplets on the surface of the coating

为了进一步说明该涂层的适用性，选取了 6 种基材(铝片、A4 纸、称量纸、卫生纸、棉花、棉抹布)作为研究对象，在其表面涂覆该涂层，对比涂覆前后水滴在其表面的润湿状态。如图 3a~图 3c、图 3g~图 3i 所示，水滴在未涂覆涂层的基材表面如铝片、A4 纸与称量纸上具有一定的接触角，但显然未达到超疏水状态，水滴在餐巾纸、棉花与棉布上是完全浸润的状态，并且由于虹吸作用使水滴渗入内部无法停留在表面。但浸渍该涂层后，结果如图 3d~图 3f、图 3j~图 3l 所示，所有基材均保持了良好的疏水性，水滴呈现滚珠状态，给予一定倾斜角度，便可以从涂层表面瞬间滑落。这表明 AT/TiO_2@PDMS 涂层可以通过浸涂法，轻易地将超疏水浆料涂覆于这些基材上，并赋予这些基材优异的疏水性，有望增加这些基材的使用寿命，并扩大这些基材的应用范围。

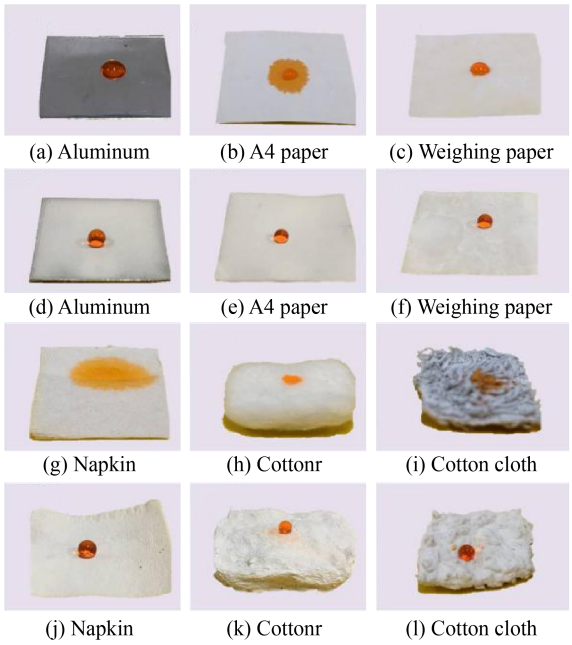


图 3　涂覆前后水滴在各种基材上的实物照片

Fig. 3　Pictures of water drops on various substrates before and after superhydrophobic coating

(a–c, g–i) state of water drops on uncoated substrate, (d–f, j–l) state of water drops on coated substrate

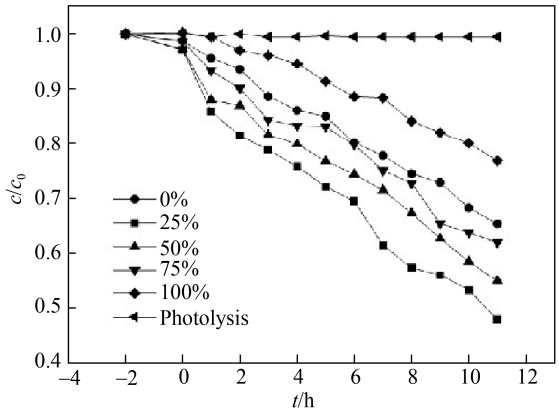
2.2　光催化性能

为了研究 AT/TiO_2@PDMS 涂层是否具有光催化性能，首先探讨了不同 AT 掺量(0、25%、50%、75%、100%)的涂层在氙灯下对 RhB 的降解效率。结果如图 4a 示，在黑暗中放置 2 h 后，RhB 溶液的 c/c_0 值(降解残余率)略有下降。这表明涂层本身对染料具有一定的吸附作用。打开氙灯后，光化学反应开始。对比发现，25% AT/TiO_2@PDMS 涂层对 RhB 的去除效率在 11 h 后约为 53%，明显优于纯 TiO_2 涂层的去除效率。经过数据处理获得图 4b，对比可知，该比例下获得的涂层光催化降解一级动力学反应速率常数(k)约为仅添加 TiO_2 涂层的 1.6 倍。随后，探讨了光源对 25% AT/TiO_2@PDMS 涂层降解效率的影响。结果如图 4c 和图 4d 所示，涂层在汞灯下反应 11 h 后，去除效率达到 94%，对应的一级动力学反应速率常数(k)约为氙灯的 4.4 倍。这是由于汞灯波长为 300~380 nm，相对输入能量高，更容易激发 TiO_2 粒子产生空穴电子对，发生催化反应。

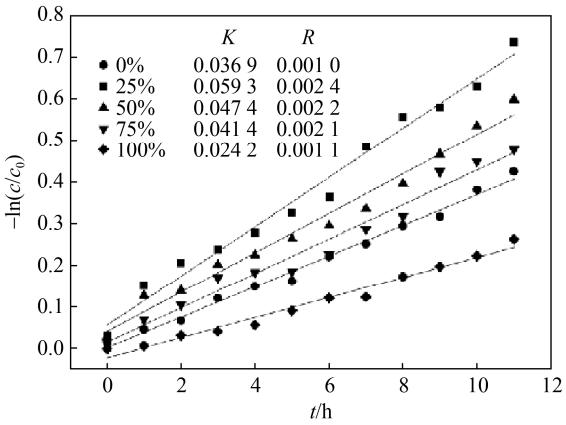
为了说明降解前后超疏水涂层是否发生降解，对比了 2 种情况下的红外光谱(FTIR)，结果如图 5 所示。发现紫外光照射 11 h 后的涂层的光谱形状、强度与照射前基本相同，2 962 cm^{-1} 和 1 258 cm^{-1} 处的吸收峰分别归属于—CH_3 的不对称伸缩振动和形变振动，1 014 cm^{-1} 处的峰可归因于 Si—O—Si 的形变振动，它们都是 PDMS 的特征峰，说明 AT/TiO_2@PDMS 涂层具有良好的光稳定性。另外，如图 6 所示，经紫外线照射后，涂层仍具有超疏水的特性，接触角几乎全部在 150°以上，这是由于表面的 PDMS 并未因 TiO_2 的光催化作用而降解，疏水基团仍稳定存在。

2.3　机理分析

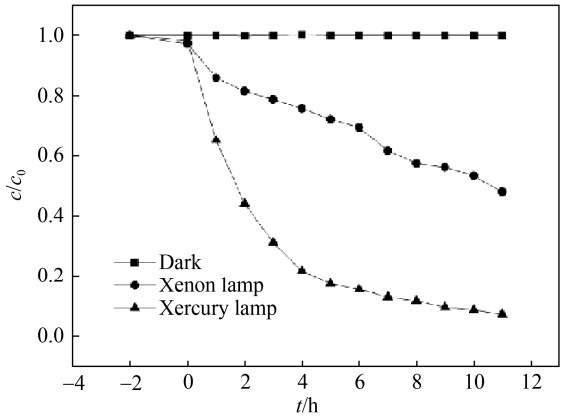
为了探讨 AT/TiO_2@PDMS 涂层的光催化机理，对涂层的微观形貌进行了分析。图 7a 和图 7b 分别显示了纯 TiO_2 涂层和纯 AT 涂层的表面形貌，由此可见，TiO_2 粒径范围约为 0.1~1.0 μm，AT 粒径范围约为 0.1~1.5 μm。两者表面均有大面积的团聚现象。图 7c 为引入 25% AT 涂层的形貌，从图 4c 中可以看出，部分 TiO_2 粒子附着在 AT 表面。这种附着状态有助于提高涂层对 RhB 染料的降解效率。此外，对比了不同掺量 AT 涂层在汞灯下照射 11 h 后的试样照片。由图 8a 可以看出，当 AT 掺量为 0 时，降解后的涂层表面没有剩余的 RhB 染料，这表明涂层中的 TiO_2 已将涂层周围的 RhB 染料降解完全。随着 AT 掺量的增加，涂层对 RhB 染料的吸附能力逐渐加强，这基于 AT 强大的吸附能力，将大量的 RhB 染料吸附到涂层周围，增加了 TiO_2 粒子周围的 RhB 含量，这将促进 TiO_2 的光催化降解效率。然而，AT 对 RhB 染料仅为吸附作用，引入过量的 AT 会使涂层中的 TiO_2 掺量减少，即涂层的吸附能力加强，光催化能力减弱，这时 AT 吸附到涂



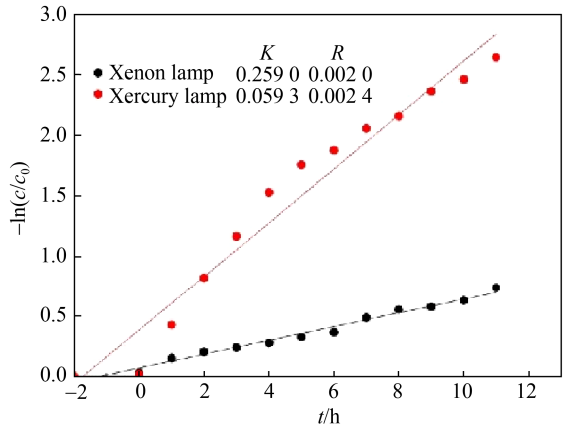
(a) Photocatalytic degradation of RhB by coating with different AT content under xenon lamp



(b) $-\ln(c/c_0)$ of the sample



(c) Photocatalytic degradation of RhB by 25% AT/TiO_2@PDMS coating under different light sources



(d) $-\ln(c/c_0)$ of the sample

图 4 样品的光催化测试结果

Fig. 4 Photocatalysis test results of samples

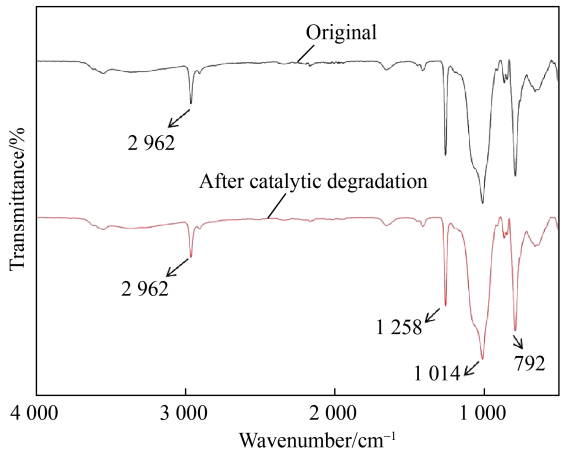


图 5 光催化降解前后涂层的红外光谱图

Fig. 5 Infrared spectra of coating before and after photocatalytic degradation

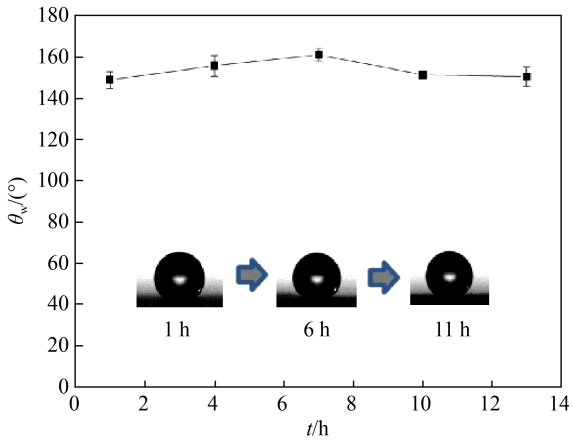
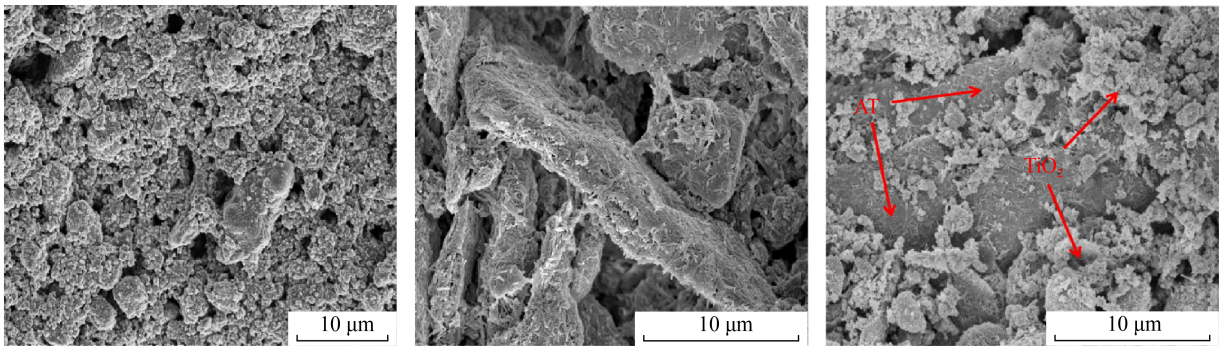


图 6 涂层的润湿性随光催化降解时间的变化

Fig. 6 Changes of wettability of coating with photodegradation time

层周围的 RhB 染料过多，TiO_2 无法降解过多的 RhB 染料，因此降解后涂层表面的 RhB 染料随 AT 掺量的增加而增多，涂层的降解效率也有所降低。图 8b 为降解后 RhB 溶液的实物图，当 AT 掺量为 25%时，

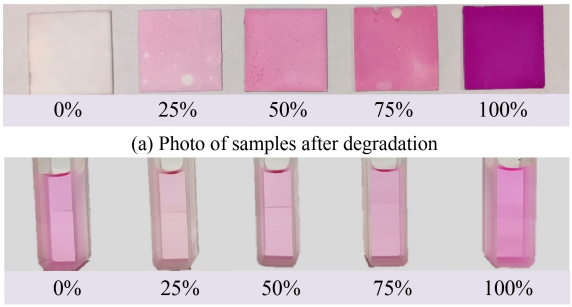
经涂层降解后的 RhB 溶液颜色最浅，表明 25% AT/TiO_2@PDMS 涂层对 RhB 染料的降解率最高。因此，仅当 AT 掺量为 25%时能够与 TiO_2 协同发挥最大作用，降解机理如图 9 所示。



(a) TiO_2@PDMS　　(b) AT@PDMS　　(c) 25% AT/TiO_2@PDMS

图 7　不同涂层的 SEM 照片

Fig. 7　SEM images of different coatings



(a) Photo of samples after degradation

(b) Photo of rhodamine solution after degradation

图 8　降解后的涂层与 RhB 溶液实物照片

Fig. 8　Photos of degraded coating and RhB solution

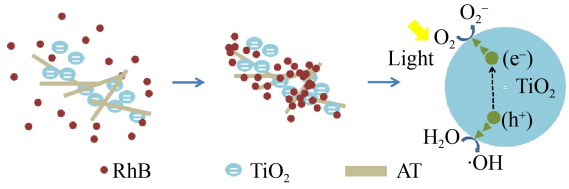


图 9　涂层的光催化降解机理示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the photocatalytic degradation mechanism of coating

除此之外，由于涂层的超疏水特性，即使浸泡在 RhB 溶液中，涂层表面仍会截留少量的 O_2。从原理上分析，O_2 的存在可以抑制光生电子(e^-)与空穴(h^+)的复合，同时它还可以与 e^-作用形成 O_2^-，接着与 H^+生成 HO_2·，最后再生成具有强氧化性的·OH[24]，成为·OH 的另外一个重要来源，从而提高涂层氧化降解 RhB 的速率。

2.4　耐腐蚀性能

为了进一步说明该涂层的阻水能力，通过电化学工作站测试了该涂层的动电位极化曲线与 Nyquist 图，评价了其耐腐蚀性能。动电位极化曲线中，腐蚀电位越大耐腐蚀性越好，腐蚀电流密度越小腐蚀速率越小，耐腐蚀性能越好[8]。如图 10 所示，未涂覆涂层的铝片腐蚀电位为–0.77 V，腐蚀电流密度为 6.675×10^{-4} A/cm^2，而涂覆涂层后铝片的腐蚀电位为 1.15 V，腐蚀电流密度为 2.504×10^{-4} A/cm^2。相较于未涂覆涂层的铝片，其腐蚀电位正移了 1.92 V，腐蚀电流密度降低了，说明该涂层有较好的耐腐蚀性。Nyquist 图中阻抗弧的直径代表了腐蚀过程中电荷转移的能力，阻抗弧越大，耐腐蚀性能越好[8]。如图 11 所示，涂覆涂层后铝的阻抗弧直径明显比未涂覆涂层的铝片大，说明涂覆超疏水涂层后铝片的耐腐蚀性能显著提升，这与动电位极化曲线结果一致。

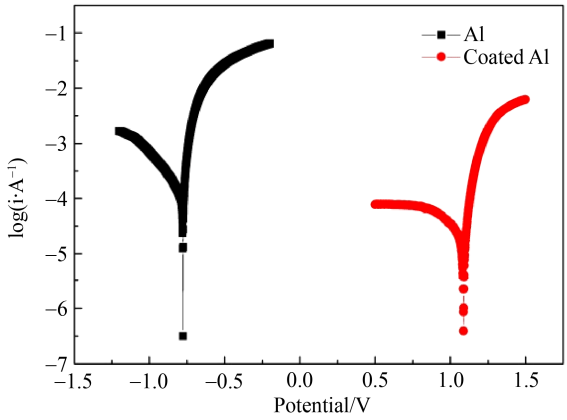


图 10　涂层的 Tafel 曲线

Fig. 10　Tafel curves of coatings

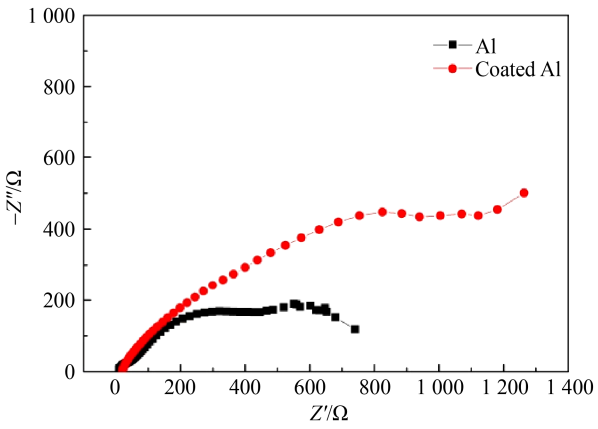


图 11 涂层的 Nyquist 阻抗谱
Fig. 11 Nyquist impedance spectra of coating

另外，除了评价该涂层耐腐蚀性外，还在超疏水涂层表面进行了不同 pH 值液滴的接触角测试，以确定超疏水涂层对酸碱液体的抵抗能力。如图 12 所示，可知接触角随 pH 值变化略有变化，但均高于 150°，并且在中性环境下接触角可以达到 161°。这表明超疏水表面具有优异的化学稳定性。

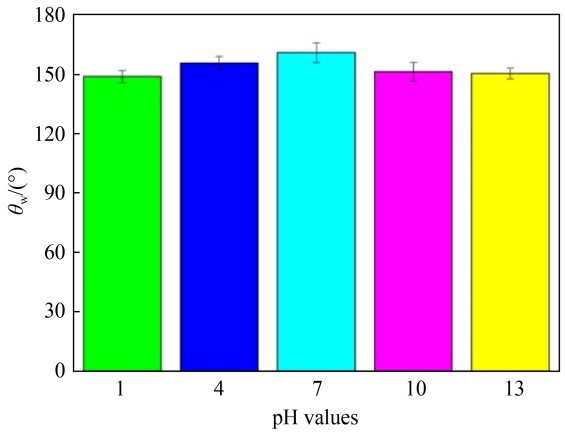
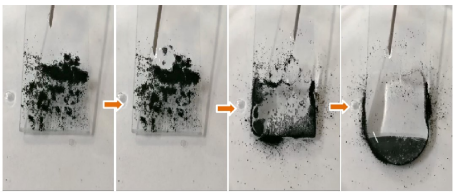


图 12 不同 pH 值的液滴在超疏水涂层上的接触角
Fig. 12 Contact angles of droplets with different pH values on superhydrophobic coatings

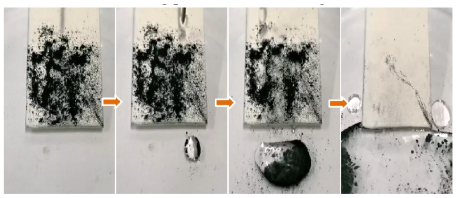
2.5 自清洁和防污性能

由于该涂层优异的疏水性，尝试对其进行自清洁和防污测试。使用纳米碳粉(d<50 nm)模拟人造粉尘，将玻璃基材倾斜 15°测试清洁效果。图 13a 为未涂覆涂层的玻璃片对碳粉的清洁过程，结果显示：水滴积聚在玻璃表面无法滑落，清洁效果不明显。对比图 13b，当水滴落到涂覆涂层的玻璃表面时，滚动和弹跳的水滴粘附了碳粉颗粒，将其带走，清洁了玻璃表面，证明了涂层的优异自清洁性能。

为了测试防污性能，分别将未涂覆和涂覆超疏水涂层的 A4 纸浸入稀释的红色墨水中。如图 14a 所示，由于亲水性导致未涂覆涂层的 A4 纸立即被染红。但是，涂覆涂层的 A4 纸浸没在墨水中再提出后仍保持洁净的表面，没有吸附任何染料(如图 14b)，这是因为截留在水和涂层粗糙结构表面之间的空气层有效地阻止了液体润湿和污染物体表面，从而显示出优异的防污性能。

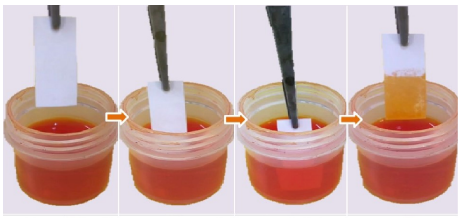


(a) Self-cleaning process of uncoated galss surface

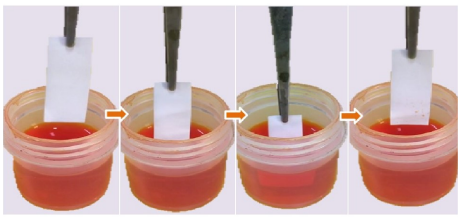


(b) Self-cleaning process of coated galss surface

图 13 涂层表面的自清洁过程
Fig. 13 Self cleaning process of coating surface



(a) Antifouling process of uncoated A4 paper surface



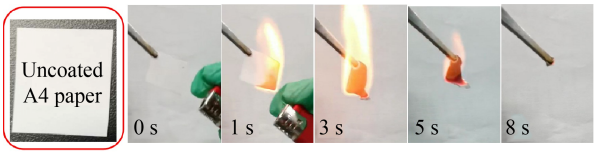
(b) Antifouling process of coated A4 paper surface

图 14 涂层表面的防污过程
Fig. 14 Antifouling process of coating surface

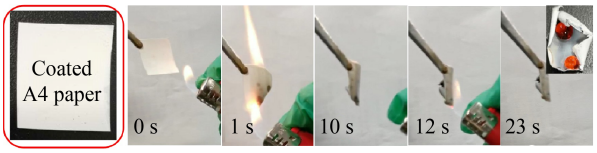
2.6 阻燃性

一般来说，纸张、织物和木材等可燃材料会在火中快速燃烧，如果这些材料表面涂覆阻燃性涂层，可以提高它们的使用寿命和安全性，也可扩大应用范围。通过简单的燃烧实验测试了该涂层的阻燃性。如图 15 所示，对未涂覆和涂覆超疏水涂层的 A4 纸进行了点燃实验。图 15a 为未涂覆 A4 纸的燃烧过程，纸张在 1 s 内点燃，表面迅速被火焰覆盖，8 s

燃烧成灰烬，没有残留物。相比图 15b 所示，纸张极不易点燃，用明火持续燃烧 23 s 后，仍残留余烬，且保持疏水状态。这是由于 AT、TiO_2、PDMS 均为难燃物质，燃烧时 PDMS 在纸张表面形成一层保护膜起到阻燃的效果。因此，该超疏水涂层还具有阻燃功能，扩大了其应用范围。



(a) Combustion process of uncoated A4 paper



(b) Combustion process of coated A4 paper

图 15　燃烧实验对比实物图

Fig. 15　Comparison of combustion experiments

3　结论

1) AT 的引入对涂层的润湿性几乎没有影响，但提高了涂层的光催化性能。该涂层的接触角最高可达 165°，对 RhB 的去除率最高可达 94%，且在紫外线连续照射下仍保持超疏水状态。

2) 涂层对生活中的一些常见液滴以及强酸/碱性液体都表现出优异的防护作用，并适用于各种基材，具有基材适用性。涂层表现了出色的自清洁、防污、耐腐蚀以及阻燃性能。该涂层有望在光催化、自清洁、阻燃等领域中应用。

参考文献:

[1] KHAIRUDIN A, SHAHIZA SHAHARUDDIN A, FARHAN HANAFI M, et al. Study of self-cleaning superhydrophobic surface based on titanium dioxide nanomaterial[J]. Mater Today: Proceedings, 2021, 31: A63–A66.

[2] WANG G, LI A, LI K, et al. A fluorine-free superhydrophobic silicone rubber surface has excellent self-cleaning and bouncing properties[J]. J Collo Interf Sci, 2020, 588: 175–183.

[3] WANG Y, PENG H K, LI T T, et al. Lightweight, flexible and superhydrophobic conductive composite films based on layer-by-layer self-assembly for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Compos Part A: Appl Sci Manuf, 2021, 141: 106199.

[4] HE X, CAO P, TIAN F, et al. Autoclaving-induced in-situ grown hierarchical structures for construction of superhydrophobic surfaces: A new route to fabricate antifouling coatings[J]. Surf Coat Technol, 2019, 357: 180–188.

[5] WANG Y, HE G, SHAO Y, et al. Enhanced performance of superhydrophobic polypropylene membrane with modified antifouling surface for high salinity water treatment[J]. Separ Purif Technol, 2019, 214: 11–20.

[6] KIM J H, MIRZAEI A, KIM H W, et al. Facile fabrication of superhydrophobic surfaces from austenitic stainless steel (AISI 304) by chemical etching[J]. Appl Surf Sci, 2018, 439: 598–604.

[7] WANG S, HOU C, WU M, et al. Effect of choline chloride on electrodeposited superhydrophobic nickel film and the corrosion protection application[J]. Colloids Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2021, 614: 0169–4332.

[8] GONG A, ZHENG Y, YANG Z, et al. Spray fabrication of superhydrophobic coating on aluminum alloy for corrosion mitigation[J]. Mater Today Commun, 2021, 26: 101828.

[9] REZAYI T, ENTEZARI M H. Achieving to a superhydrophobic glass with high transparency by a simple sol–gel-dip-coating method[J]. Surf Coat Technol, 2015, 276: 557–564.

[10] HUANG G, LAI B, XU H, et al. Fabrication of a superhydrophobic fabric with a uniform hierarchical structure via a bottom-blown stirring method for highly efficient oil-water separation[J]. Separ Purifi Technol, 2021, 258: 118063.

[11] LI J, YANG Y, MA W, et al. One-pot room-temperature synthesis of covalent organic framework-coated superhydrophobic sponges for highly efficient oil-water separation[J]. J Hazard Mater, 2021, 411: 125190.

[12] WANG J, WU Y, ZHANG D, et al. Preparation of superhydrophobic flexible tubes with water and blood repellency based on template method[J]. Colloids Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2020, 587: 124331.

[13] 徐卜琴, 赵宗倩, 徐桂龙. 超疏水超亲油玻璃纤维过滤膜的制备及其乳化水分离效率[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1173–1177.
XU Buqin, ZHAO Zongqian, XU Guilong. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1173–1177.

[14] LI W, ZHAN Y, YU S. Applications of superhydrophobic coatings in anti-icing: Theory, mechanisms, impact factors, challenges and perspectives[J]. Progr in Organ Coat, 2021, 152: 106117.

[15] LIU C, LIU Q, JIN R, et al. Mechanism analysis and durability evaluation of anti-icing property of superhydrophobic surface[J]. Intern J Heat Mass Transfer, 2020, 156: 119768.

[16] LIU J, FANG X, ZHU C, et al. Fabrication of superhydrophobic coatings for corrosion protection by electrodeposition: A comprehensive review[J]. Collo Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2020, 607: 125498.

[17] NGUYEN-TRI P, TRAN H N, PLAMONDON C O, et al. Recent progress in the preparation, properties and applications of superhydrophobic nano-based coatings and surfaces: A review[J]. Prog Organ Coat, 2019, 132: 235–256.

[18] LIU Z, ZHANG C, ZHANG X, et al. Durable superhydrophobic PVDF/FEVE/GO@TiO_2 composite coating with excellent anti-scaling and UV resistance properties[J]. Cheml Eng J, 2021, 411: 128632.

[19] EMARATI S M, MOZAMMEL M. Efficient one-step fabrication of superhydrophobic nano-TiO_2/TMPSi ceramic composite coating with enhanced corrosion resistance on 316L[J]. Ceram Inter, 2020, 46(2): 1652–1661.

[20] XIE H, ZHANG J, WANG D, et al. Construction of three-dimensional g-C_3N_4/attapulgite hybrids for Cd(II) adsorption and the reutilization of waste adsorbent[J]. Appl Surf Sci, 2020, 504: 144456.

[21] 汤庆国, 沈上越. 凹凸棒石及其磁性药物载体的吸附及解吸性能[J].

硅酸盐学报, 2006, 34(6): 739–743.
TANG Qingguo, SHEN Shangyue. J Chin Ceram Soc, 2006, 34(6): 739–743.

[22] WANG Y, HUANG Z, GURNEY R S, et al. Superhydrophobic and photocatalytic PDMS/TiO_2 coatings with environmental stability and multifunctionality[J]. Collo Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2019, 561: 101–108.

[23] PARK E, HUR J. Three-dimensionally interconnected porous PDMS decorated with poly(dopamine) and Prussian blue for floatable, flexible, and recyclable photo-Fenton catalyst activated by solar light[J]. Appl Surf Sci, 2021, 545: 148990.

[24] LAI M, ZHAO J, CHEN Q, et al. Photocatalytic toluene degradation over Bi-decorated TiO_2: Promoted O_2 supply to catalyst's surface by metallic Bi[J]. Catal Today, 2019, 335: 372–380.