文章编号:1674-2869(2024)01-0011-07

PDMS@P25复合涂层织布的制备及其光催化与自清洁性能研究

张 惠[1,2,3],陈 烨[1,2,3],王 静[4],蔡 思[1,2,3],向 珍[1,2,3],金士威*[1,2,3]
1. 中南民族大学化学与材料科学学院,湖北 武汉 430074;
2. 催化转化与能源材料化学教育部重点实验室,湖北 武汉 430074;
3. 湖北能源高分子材料工程技术研究中心,湖北 武汉 430074;
4. 临海市工投产业服务有限公司,浙江 临海 317000

摘 要:为开发具有高效光催化自清洁功能的环境友好材料,通过将聚二甲基硅氧烷(PDMS)和二氧化钛(TiO_2,P25)在乙酸乙酯中进行光接枝反应,制备得到复合涂层,然后喷涂于织布表面得到PDMS@P25织布。采用接触角仪、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、拉曼光谱对其进行表征,探讨了PDMS、TiO_2及溶剂乙酸乙酯的用量对PDMS@P25织布超疏水性能的影响,考察了PDMS@P25织布对有机染料尼罗红的紫外光降解情况。结果表明:经60 min的紫外照射后,PDMS@P25织布可将水体中尼罗红完全降解。同时PDMS@P25织布在水体中可防止其表面被泥沙和有机染料甲基蓝污染。即使PDMS@P25织布表面被有机染料尼罗红及亚甲基蓝等污染,在太阳光下仍可使其降解,实现表面的自清洁。该PDMS@P25织布具有良好的机械性能及重复使用性能,经100次摩擦后,其性能无明显变化,在10次循环使用后仍然具有稳定的光催化性能。该材料的制备工艺简单,原料均对环境友好,成本低廉,符合大规模生产的需要。

关键词:聚二甲基硅氧烷;二氧化钛;光催化;自清洁;织布
中图分类号:TB306;O644.1 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202312015

Preparation of PDMS@P25 composite coating fabric and its photocatalytic and self-cleaning performance

ZHANG Hui[1,2,3], *CHEN Ye*[1,2,3], *WANG Jing*[4], *CAI Si*[1,2,3], *XIANG Zhen*[1,2,3], *JIN Shiwei*[*1,2,3]
1. School of Chemistry and Materials Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China;
2. Key Laboratory of Catalysis and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Engineering Technology Research Centre of Energy Polymer Materials, Wuhan 430074, China;
4. Linhai Industrial Investment Service Co., Ltd, Linhai 317000, China

Abstract: To develop environmentally friendly materials with efficient photocatalytic self-cleaning function, a composite coating was prepared by performing a photo-grafting reaction of polydimethylsiloxane (PDMS) and titanium dioxide (TiO_2, P25) in ethyl acetate. This composite coating was then sprayed onto the fabric surface to obtain PDMS@P25 fabric. The influences of PDMS, TiO_2, and ethyl acetate on superhydrophobicity of the PDMS@P25 fabric were investigated, and were characterized using contact angle measurements, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and Raman spectroscopy.

收稿日期:2023-12-09
基金项目:国家自然科学基金(52272102);中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(CZZ23014)
作者简介:张 惠,硕士研究生。Email:2021110242@mail.scuec.edu.cn
***通信作者**:金士威,博士,教授。Email:jinsw@mail.scuec.edu.cn
引文格式:张惠,陈烨,王静,等. PDMS@P25复合涂层织布的制备及其光催化与自清洁性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(1):11-17.

The ultraviolet (UV) degradation of the organic dye Nile red by the PDMS@P25 fabric was examined as well. The results show that after 60 minutes of UV irradiation, the PDMS@P25 fabric can completely degrade Nile red in water. At the same time, the PDMS@P25 fabric prevents its surface from being contaminated by sediment and organic dyes such as methyl blue in water. Even if the surface of PDMS@P25 fabric is contaminated with organic dyes like Nile red and methylene blue, it can still degrade the organic dyes under sunlight, showing a self-cleaning capability. The PDMS@P25 fabric exhibits excellent mechanical properties and reusability. Its performance remains unchanged even after 100 cycles of friction and maintains stable photocatalytic performance after 10 cycles of use. Moreover, the fabrication process of this material is simple, the raw materials are environmentally friendly, and the cost is low, making it suitable for large-scale production.

Keywords: PDMS; titanium dioxide; photocatalysis; self-cleaning; fabric

在当今世界,环境污染已成为全球性的难题。其中,水、空气、土壤等环境中的各种污染物质对人类健康和环境都构成了严重威胁。因此,寻找一种有效的方法来治理环境污染已成为当今社会亟待解决的问题之一。

光催化技术作为一种高效、环保、无污染的新型技术,受到了广泛的关注。其中,二氧化钛[1-3](titanium dioxide,TiO_2)纳米材料广泛用于光催化分解有机废物和有害气体等方面[4-6]。超疏水材料因其所具有的自清洁特性,具有较强的抗污染能力[7-8],也成为当前的研究热点之一。制备具有光催化性能和自清洁功能的复合功能材料具有重要的意义。当前,超疏水材料制备常用氟硅烷和长碳链有机化合物等原料,对环境不友好[9-10],而以这些超疏水材料修饰的含TiO_2的光催化复合材料在紫外光下较易分解,耐久性较差[11],限制了其应用。因此,如何提升具有光催化性能和自清洁功能的复合功能材料的使用寿命是目前需要克服的难题。

聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane,PDMS)作为一种常用的无氟疏水聚合物,具有优异的化学稳定性、生物相容性[12-13]、良好的耐洗/耐磨性、出色的拒水性和高粘附性,对环境友好,因而是一种制备超疏水表面的理想原料[14-15]。例如,Chen等[16]通过简单的两步浸干法制备了一种高度耐用的超疏水棉纺织品,对污垢具有较强的防污和自洁能力。Zheng等[17]通过多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube,MWCNTs)的逐层组装和PDMS的改性成功制备了导电超疏水棉织物,在油水分离中表现出高效率和优异的可重复使用性,并展现了其在人体运动检测领域的应用前景。这些方法充分证明了PDMS用于制备超疏水表面的优点和可行性。然而,这些材料涉及到的制备方法,如蚀刻[18]、溶胶-凝胶合成[19]和化学气相沉积[20]等,制备工艺复杂、需要特定的设备或苛刻的条件,成本较高,限制了其规模化生产。

本文通过将PDMS和TiO_2纳米粒子(nanoparticles,NPs)分散在乙酸乙酯(ethyl acetate,EtOAc)中,利用光接枝反应形成混合涂层,在织布表面制得到具有光催化和自清洁效果的新型织布材料。探讨了PDMS和溶剂EtOAc以及NPs的用量对材料织布性能的影响。考察了所制得的超疏水光催化织布对有机染料尼罗红(nile red,NR)的光催化降解能力及其自清洁能力。

1 实验部分

1.1 试剂及仪器

主要试剂:商用TiO_2-P25(粒径21 nm,德固赛广州合仟贸易有限公司);PDMS,(道康宁SYLGARD 184硅橡胶);EtOAc(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);NR(分析纯,上海迈瑞尔化学技术有限公司);乙醇(ethyl alcohol,C_2H_5OH,分析纯,国药集团化学试剂有限公司)、甲基蓝(生物染色剂,上海麦克林生化科技有限公司)、亚甲基蓝(生物染色剂,国药集团化学试剂有限公司)。

主要仪器:电子天平(BSA224S-CW型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司),电热鼓风干燥箱(DHG-9076A型,天津市泰斯特仪器有限公司),智能磁力搅拌器(ZNCL-BS型,巩义市科贝仪器设备有限公司),接触角测量仪(JC2000D1型,上海中晨数字技术设备有限公司)、紫外/可见分光光度计(A380型,上海翱艺仪器)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)(SU8010型,日立(中国)有限公司)、透射电子显微镜(transmission electron microscope,TEM)(TalosF200X型,美国赛默飞世尔科技有限公司/捷克)、拉曼光

谱仪(DXR2 XI型,美国赛默飞世尔)。

1.2　实验方法

1.2.1　超疏水光催化织布的制备　将PDMS分散在EtOAc中,并进行磁力搅拌15 min,然后加入P25 NPs(粒径21 nm),并磁力搅拌120 min。随后,将该混合液蒸发24 h。接着,在365 nm,(5.0±0.6) mW·cm^{-2}的紫外光作用下进行接枝反应,形成稳定的超疏水光催化涂层溶液。探究PDMS、EtOAc以及P25 NPs三者之间质量体积比及质量比对织布水接触角(water contact angle,WCA)的影响。在得到的最佳比例条件下制备超疏水光催化涂层溶液。最后,将织布放入该涂层溶液中,振荡搅拌10 min后取出,在通风条件下干燥即可得到超疏水光催化织布(又记为PDMS@P25织布)。

1.2.2　稳定性实验　首先将PDMS@P25织布平铺于砂纸上,其次取1个200 g砝码置于PDMS@P25织布上,以5 cm/s的平均速度牵引织布向单一方向移动10 cm,循环100次,每隔10次测量PDMS@P25织布表面WCA。

1.2.3　光催化实验　将制备得到的PDMS@P25织布,置于有机染料溶液[10 μg·mL^{-1} NR的CH_5OH溶液(NR/CH_5OH)]中,研究其光催化活性。将制备得到的PDMS@P25织布,裁剪为2 cm×2 cm大小,置于光反应瓶中,加入50 mL NR/C_2H_5OH。然后在紫外光[波长365 nm,(5.0±0.6) mW·cm^{-2}]的照射下观察溶液颜色变化,每隔10 min取样,用紫外/可见分光光度计测量溶液中NR的含量。

1.2.4　自清洁抗污实验　将制备的PDMS@P25织布置于泥沙溶液和甲基蓝水溶液中,使其充分接触污染物,一段时间后取出;观察PDMS@P25织布表面的污染情况。之后,在PDMS@P25织布表面滴上NR和亚甲基蓝染料,使其充分接触织布表面,然后放置在太阳光下照射一段时间,观察织布表面污渍变化情况,通过比较前后织布表面的颜色变化和清洁效果来评估PDMS@P25织布的自清洁性能。

2　结果与讨论

2.1　PDMS、EtOAc、P25用量对PDMS@P25织布WCA的影响

考察了不同PDMS用量对PDMS@P25织布WCA的影响,结果表明,当m(PDMS)/V(EtOAc)(质量体积浓度)为0.1 g·mL^{-1}时,织布的WCA最大,见图1(a)。当PDMS的质量体积浓度过高时,PDMS会影响织布表面的粗糙结构,使得织布的WCA倾向于PDMS固化为薄膜时的WCA。而当PDMS的质量体积浓度较低时,PDMS含量较少,由于基底材料本身的超亲水性,WCA较低。

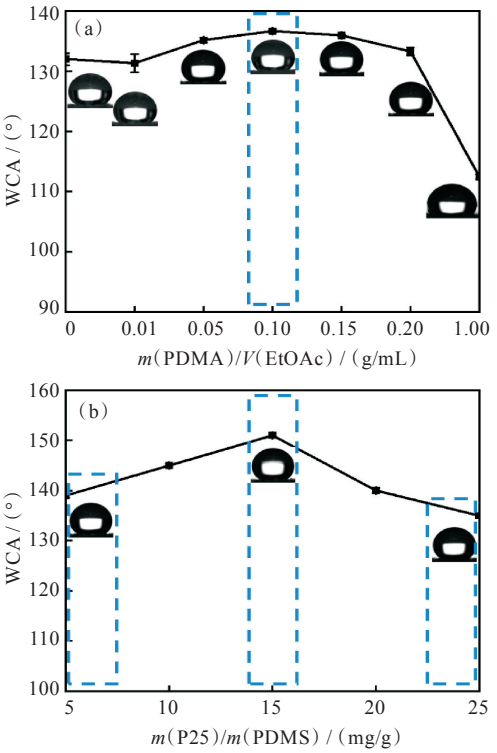

图1　PDMS的质量体积浓度(a)、P25与PDMS的质量比(b)对WCA的影响

Fig. 1　Impacts of mass volume concentration of PDMS (a) and mass ratio of P25 to PDMS (b) on WCA

固定PDMS与EtOAc在其最佳比例[即m(PDMS)/V(EtOAc)为0.1 g·mL^{-1}],探究P25和PDMS的质量比对材料WCA的影响。结果如图1(b)所示,当m(P25)/m(PDMS)为15 mg·g^{-1}时,织布得到最大的WCA,为151°。

2.2　PDMS@P25织布成分及形貌表征

SEM和TEM分析可以提供制备的PDMS@P25织布表面的信息。从图2(a)、(b)的SEM图中,可以观察到制备的PDMS@P25织布表面除了原始织布所具有的毛刺结构外,还具有微乳突结构。这类微乳突结构由P25 NPs和PDMS形成。这些结构提高了表面的粗糙度,从而使织布实现了超疏水性能。

在紫外光的作用下,PDMS和P25 NPs进行接枝反应,P25 NPs产生的电子-空穴对激发表面的—OH及H_2O形成活性基团,使PDMS的Si—O—Si键发生断裂,从而形成Ti—O—Si键[21]。将上述反应后的超疏水光催化溶液离心洗涤干燥,

得到的粉末通过TEM进行观测。从TEM图像中可以发现，P25 NPs表面被PDMS包裹，层厚为3~4 nm，如图2(c，d)所示。结果表明，PDMS成功地接枝到P25 NPs表面。

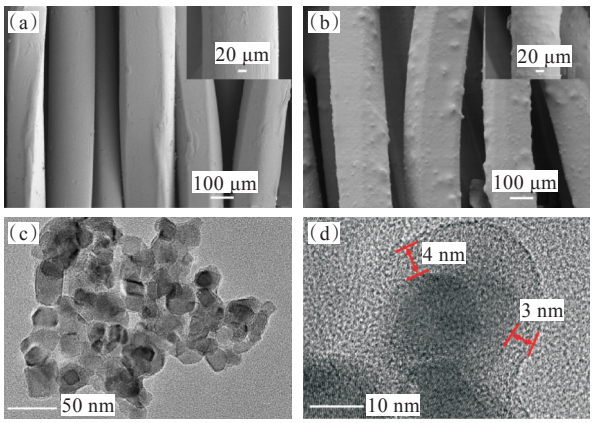

图2 原始织布(a)和PDMS@P25织布(b)的SEM图；超疏水光催化颗粒的TEM图像(c)及其放大图(d)

Fig. 2 SEM images of original fabric (a) and PDMS@P25 fabric (b); TEM image (c) and partial enlargement (d) of superhydrophobic photocatalytic particles

拉曼光谱测试可以用来观察不同样品中的分子振动和相互作用。分别对原始织布、原始P25 NPs、PDMS@P25织布以及超疏水光催化颗粒进行拉曼测试，从结果图(图3)中可以发现，原始P25 NPs在149 cm^{-1}处[22]出现1个明显的锐钛矿相的拉曼峰谱。PDMS@P25织布表面在相同的位置也存在明显的特征峰，表明超疏水光催化颗粒成功地被修饰到织布表面，形成了稳定的超疏水光催化织布。

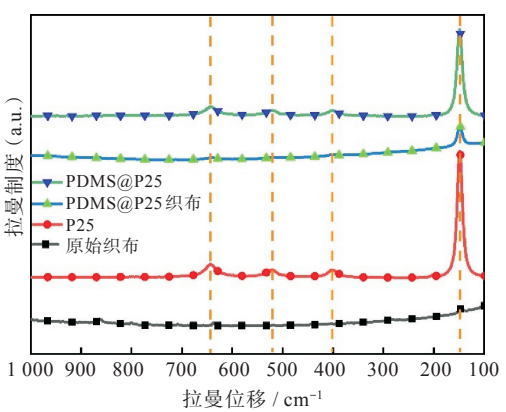

图3 经PDMS及P25修饰的织布的拉曼图像

Fig. 3 Raman spectra of fabric modified with PDMS and P25

2.3 PDMS@P25织布的机械稳定性

对于制备的PDMS@P25织布，探究其机械稳定性，是判断其商业应用价值的一个重要因素。本实验采用0.32 μm的砂纸对PDMS@P25织布进行摩擦测试以探究其机械稳定性。首先将PDMS@P25织布平铺于砂纸上，其次取200 g砝码置于PDMS@P25织布上，以5 cm/s的平均速度牵引织布以单一方向移动10 cm，循环100次，每隔10次测量PDMS@P25织布表面WCA。通过SEM图4(a，b)对比可发现，PDMS@P25织布经摩擦后，原先较为平整的织布纤维，因分叉变得粗糙。而由图5可知，经过100次的摩擦循环，PDMS@P25织布的WCA无明显变化。且由于PDMS的黏附能力使P25 NPs不易脱落，固定在纤维表面。摩擦实验结果表明，PDMS@P25织布经100次摩擦后，其性能无明显变化。

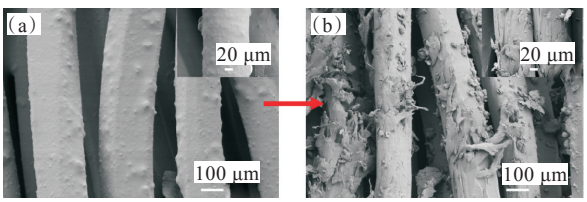

图4 PDMS@P25织布经100次摩擦后表面形貌变化图像

Fig. 4 Surface morphology changes of PDMS@P25 fabric after 100 friction cycles

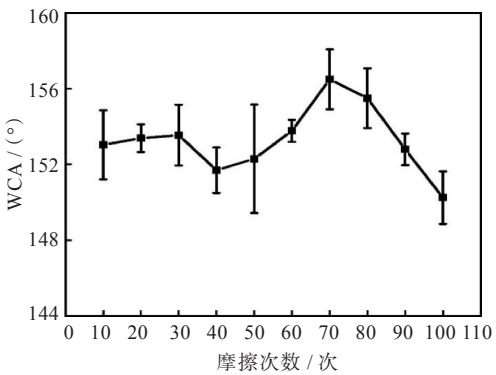

图5 PDMS@P25织布经不同摩擦次数后的WCA变化图

Fig. 5 WCA variation of PDMS@P25 fabric after different friction cycles

2.4 PDMS@P25织布的光催化性能

对于通过PDMS修饰P25 NPs制备的织布材料，关键在于保持其疏水性的基础上同时保持P25 NPs所具有的光催化活性。为了研究该织布的光催化活性，在紫外光[365 nm，(5.0±0.6) mW/cm^2]照射下，将制备的PDMS@P25织布浸入NR/C_2H_5OH(10 μg·mL^{-1})溶液中，观察溶液的颜色变化，并用紫外/可见分光光度计测量不同光照时间下溶液中NR染料分子的浓度大小[图6(a)]。不加PDMS@P25织布的情况下，单纯的紫外光对NR溶液的降解情况如图6(b)所示。在60 min的

紫外照射后，含有 PDMS@P25 织布的溶液几乎变为无色，而不含织布的溶液没有变色。表明制备的 PDMS@P25 织布具有明显的光催化性能，可以在较短的时间内降解 NR 等有机染料分子。

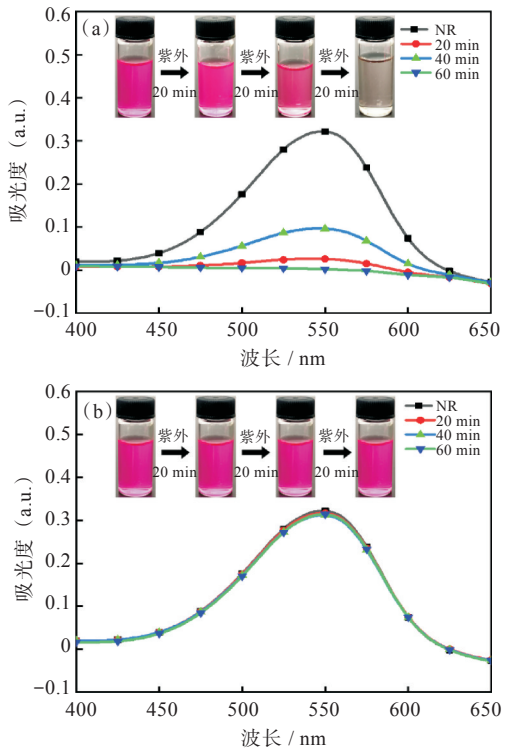

图 6　紫外光下 NR 溶液加 PDMS@P25 织布（a）和不加织布（b）的光催化降解图像

Fig. 6　Photocatalytic degradation of NR solution in presence of PDMS@P25 fabric (a) and without fabric (b) under UV light

在 1 次光催化反应后，将 PDMS@P25 织布用 C_2H_5OH 溶液和去离子水冲洗干净，用于探究该织布光催化的重复性。实验发现，同一织布在 10 次重复的光催化实验中，在 1 h 内仍然可以使 NR 的降解效率达到 90% 以上（图 7）。其中 c_t 为 t 时刻测得的 NR 溶液的摩尔浓度，c_0 为经 30 min 暗吸附后测得的 NR 的摩尔浓度。该结果表明，PDMS@P25 织布可多次重复使用，在多次循环使用后仍然具有稳定的光催化性能。

2.5　PDMS@P25 织布的自清洁性能

超疏水光催化材料的自清洁功能可以由两部分组成：第一部分是源于超疏水材料的拒水性，类似于荷叶表面，利用水滴自由滚动可以将污渍自然去除；第二部分是利用其表面光催化材料的光降解能力，对有机染料等污染物分子进行降解。在本研究中，选用泥沙和甲基蓝对制备的 PDMS@P25 织布自清洁性能的第一部分（抗污性）进行评价。

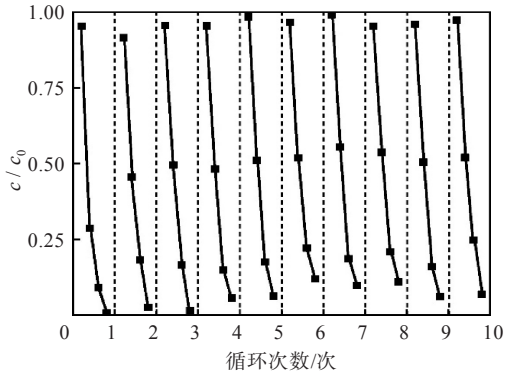

图 7　PDMS@P25 织布循环降解 NR 的光催化图像

Fig. 7　Photocatalytic degradation of NR by PDMS@P25 fabric in cyclic manner

实验将原始织布和 PDMS@P25 织布分别浸入在装有泥沙溶液的烧杯中，如图 8(a)所示，将织布取出后观察可发现，两个织布之间差别明显。原始织布由于其表面非常容易被润湿，在取出后表面上有许多泥沙颗粒，整体呈现出黄色。而 PDMS@P25 织布由于其表面的超疏水性，溶液中泥沙不在其表面黏附，取出后 PDMS@P25 织布仍然呈现出原始的白色，没有任何污物附着。当将原始织布和 PDMS@P25 织布分别置于甲基蓝水溶液中时，如图 8(b)所示，置于甲基蓝水溶液中的原始织布取出后呈现明显的蓝色，而 PDMS@P25 织布依然呈现出原始的白色。这进一步证明了 PDMS@P25 织布因其表面所具有的极强的拒水性，水滴完全无法附着在其表面上而具有抗污性。

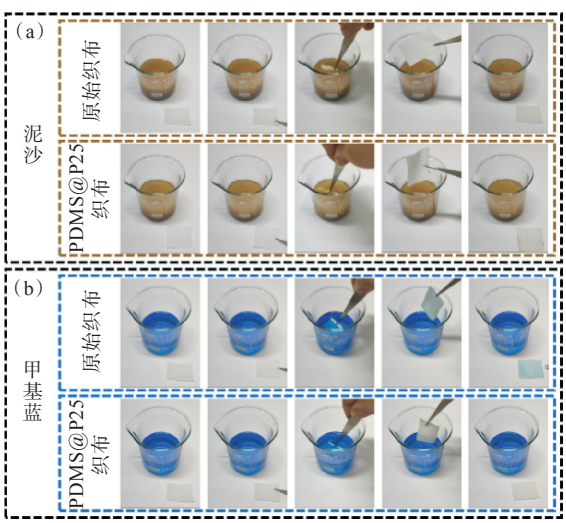

图 8　原始织布和 PDMS@P25 织布分别在泥沙悬浊液（a）和甲基蓝水溶液（b）中的自清洁性能

Fig. 8　Self-cleaning performance of original fabric and PDMS@P25 fabric in sediment suspension (a) and methyl blue solution (b)

为了进一步探究织布的自清洁性，在PDMS@P25织布和原始织布上分别滴加亚甲基蓝染料和NR染料。如图9所示，实验发现，在滴加染料后，两种织布表面均会留下蓝色和红色的污渍。但将织布置于太阳光照射下后，PDMS@P25织布上的红色痕迹会在1天左右的时间完全消失，蓝色痕迹会在3天左右的时间内完全消失。而原始织布上的红色和蓝色痕迹均无明显变化。这表明，在自然光照射下，制备的PDMS@P25织布表面仍具有较强的光催化效果。通过对抗污性和光降解性的考察可以发现，制备得到的PDMS@P25织布具有优异的自清洁效果。

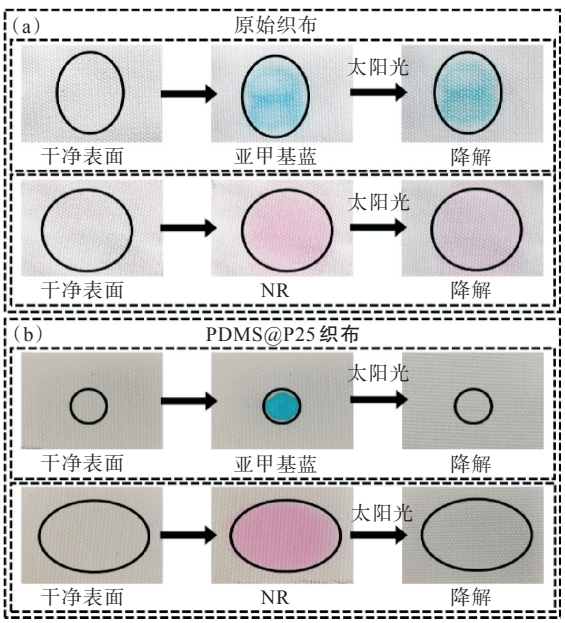

图9 原始织布(a)和PDMS@P25织布(b)在太阳光下对亚甲基蓝和NR的降解

Fig. 9 Degradation of methylene blue and NR on original fabric (a) and PDMS@P25 fabric (b) under sunlight

3 结 论

本研究成功制备了一种具有光催化活性和高效自清洁功能的PDMS@TiO_2织布，在紫外照射下可对水体中有机染料NR催化降解。PDMS@P25织布展现出了高效的自清洁能力，对泥沙、水溶性有机染料甲基蓝等有较强的抗污能力；即使被有色染料，如NR、亚甲基蓝污染，也可在太阳光照射下使其降解而恢复原本颜色。该PDMS@P25织布制备方法简单、成本低廉且重复使用性良好，具有广泛的应用前景。

参考文献

[1] JO S, KIM H, LEE T S. Decoration of conjugated polyquinoxaline dots on mesoporous TiO_2 nanofibers for visible-light-driven photocatalysis [J]. Polymer, 2021, 228: 123892.

[2] ZENG Q M, CHEN J W, WAN Y S, et al. Immobilizing TiO_2 on nickel foam for an enhanced photocatalysis in NO abatement under visible light [J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(33): 15722-15736.

[3] 邓延平，白浚贤，姜志民，等.阶梯型异质结光催化研究进展[J].武汉工程大学学报，2023，45(2)：126-138.

[4] HUMAYUN M, RAZIQ F, KHAN A, et al. Modification strategies of TiO_2 for potential applications in photocatalysis: a critical review [J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2018, 11(2): 86-102.

[5] XU D, MA H L. Degradation of rhodamine B in water by ultrasound-assisted TiO_2 photocatalysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127758.

[6] 季凯，刘清晨，许梓欣，等.气溶胶法制备纳米黑色TiO_2颗粒及其光催化降解四环素的研究[J].武汉工程大学学报，2021，43(4)：367-371.

[7] XU W, XU L H, PAN H, et al. Robust ZnO/HNTs-based superhydrophobic cotton fabrics with UV shielding, self-cleaning, photocatalysis, and oil/water separation [J]. Cellulose, 2022, 29(7): 4021-4037.

[8] BAO Y L, FU W N, XU H, et al. Bioinspired self-cleaning surface with microflower-like structures constructed by electrochemically corrosion mediated self-assembly [J]. CrystEngComm, 2022, 24(5): 1085-1093.

[9] QING Y, LONG C, AN K, et al. Sandpaper as template for a robust superhydrophobic surface with self-cleaning and anti-snow/icing performances [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 548: 224-232.

[10] CHEN J H, LIU Z H, WEN X F, et al. Two-step approach for fabrication of durable superamphiphobic fabrics for self-cleaning, antifouling, and on-demand oil/water separation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(14): 5490-5500.

[11] HUANG Z W, GURNEY R S, WANG Y L, et al. TDI/TiO_2 hybrid networks for superhydrophobic coatings with superior UV durability and cation adsorption functionality [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(7): 7488-7497.

[12] SELIM M S, EL-SAFTY S A, SHENASHEN M A, et al. Progress in biomimetic leverages for marine antifouling using nanocomposite coatings [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8(17): 3701-3732.

[13] HOUNGKAMHANG N, CHAISAWAT P, JOKSATHIT

W, et al. Enhancement of bacterial anti-adhesion properties on robust PDMS micro-structure using a simple flame treatment method [J]. Nanomaterials, 2022, 12(3): 557.

[14] MARTIN S, BHUSHAN B. Transparent, wear-resistant, superhydrophobic and superoleophobic poly (dimethylsiloxane) (PDMS) surfaces [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 488: 118−126.

[15] ZHOU X, LUO Y X, TONG X, et al. Superhydrophobic PDMS/SiNPs/T-ZnOw coating with reduced adhesion of Streptococcus mutans for dental caries prevention [J]. Ceramics International, 2023, 49(4): 6228−6237.

[16] CHEN J Y, YUAN L H, SHI C, et al. Nature-inspired hierarchical protrusion structure construction for washable and wear-resistant superhydrophobic textiles with self-cleaning ability [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(15): 18142−18151.

[17] ZHENG L Z, SU X J, LAI X J, et al. Conductive superhydrophobic cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for oil-water separation and human motion detection [J]. Materials Letters, 2019, 253: 230−233.

[18] CHENG Y, YANG Q, FANG Y, et al. Underwater anisotropic 3D superoleophobic tracks applied for the directional movement of oil droplets and the microdroplets reaction [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(10): 1900067.

[19] HU Y H, MA X F, BI H H, et al. Robust superhydrophobic surfaces fabricated by self-growth of TiO_2 particles on cured silicone rubber[J]. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 603: 125227.

[20] WEN N, MIAO X R, YANG X J, et al. An alternative fabrication of underoil superhydrophobic or underwater superoleophobic stainless steel meshes for oil-water separation: originating from one-step vapor deposition of polydimethylsiloxane [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 204: 116−126.

[21] WOOH S, ENCINAS N, VOLLMER D, et al. Stable hydrophobic metal-oxide photocatalysts via grafting polydimethylsiloxane brush [J]. Advanced Materials, 2017, 29(16): 1604637.

[22] BELEKBIR S, EL AZZOUZI M, RODRÍGUEZ-LORENZO L, et al. Cobalt impregnation on titania photocatalysts enhances vis phenol photodegradation [J]. Materials, 2023, 16(11): 4134.

本文编辑：张　瑞

☆

（上接第10页）

参考文献

[1] DEMAIN A L, SANCHEZ S. Microbial drug discovery: 80 years of progress [J]. The Journal of antibiotics, 2009, 62(1): 5−16.

[2] PEILLERON L, CARIOU K. Synthetic approaches towards avibactam and other diazabicyclooctane β-lactamase inhibitors [J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2020, 18(5): 830−844.

[3] TOOKE C L, HINCHLIFFE P, BRAGGINTON E C, et al. β-lactamases and β-lactamase inhibitors in the 21st Century [J]. Journal of Molecular Biology, 2019, 431(18): 3472−3500.

[4] DRAWZ S M, PAPP-WALLACE K M, BONOMO R A. New - lactamase inhibitors: a therapeutic renaissance in an MDR World [J]. Antimicrobial Agents & Chemotherapy, 2013, 58(4): 1835−1846.

[5] 郁群，董金华. 头孢他啶-阿维巴坦 [J]. 中国药物化学杂志, 2015, 25(5): 413.

[6] EBRAHIM T K H M, MARTIN N I. β-lactam/β-lactamase inhibitor combinations: an update [J]. MedChemComm, 2018, 9(9): 1439−1456.

[7] VITHALBHAI P M, VITTHAIRAO D V, SATISH B, et al. Sodium salt of (2*S*, 5*R*)-6-benzyloxy-7-oxo-l, 6-diaza-bicyclo [3.2.1] octane-2-carboxyhc acid and a process for its preparation: IN699/MUM/2013 (A1) [P]. 2013-03-08.

[8] 程荡，陈芬儿. 连续流微反应技术在药物合成中的应用研究进展 [J]. 化工进展, 2019, 38(1): 556−575.

[9] 周峰，刘宏臣，王克军，等. 连续流微反应器中简单咪唑的制备 [J]. 化工学报, 2018, 69(6): 2481−2487.

[10] 骆广生，王凯，吕阳成，等. 微反应器最新研究进展 [J]. 现代化工, 2009, 29(5): 27−30.

[11] DONG Z Y, WEN Z H, ZHAO F, et.al. Scale-up of micro-and milli-reactors: an overview of strategies, design principles and applications [J]. Chemical Engineering Science: X, 2021, 10: 100097−1000118.

[12] 周志旭，柳蓓蓓，孙悦，等. 连续流动化学在药物合成中的应用 [J]. 中南药学, 2014, 12(2): 135−140.

[13] 冯康博，陈炯，古双喜，等. 全连续流反应技术在药物合成中的新进展(2019−2022) [J]. 有机化学, 2023, 43: 1−26.

[14] 杨昭，祝宏，曾祥聪，等. 美乐托宁微反应合成系统的开发 [J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(3): 259−262.

[15] 巨修练，邓艳丽，王冬梅，等. 5,7-二羟基黄烷酮的流动氢化仪法合成 [J]. 武汉工程大学学报, 2013 (5): 6−8.

本文编辑：张　瑞