Vi-PDMS/S-SiO_2 超疏水聚酯纤维织物的制备及性能研究

张哲，吴晓飞，包翻霞，郭丽智，张正健*
（天津科技大学 轻工科学与工程学院，天津 300457）

摘要：目的 基于普通织物材料防水性较差的问题，制备一种具有超疏水涂层的聚酯纤维织物，并对其性能进行研究。**方法** 以聚酯纤维织物为基材，基于紫外光固化技术通过浸涂法，使用商用气相纳米 SiO_2 颗粒（S-SiO_2）、端乙烯基聚二甲基硅氧烷（Vi-PDMS）在织物表面构筑微纳粗糙结构，获得超疏水的织物。采用扫描电子显微镜、水接触角测量仪对其微观结构和疏水性能进行表征，并通过机械摩擦实验对其超疏水稳定性进行考察。**结果** 当 Vi-PDMS 和 S-SiO_2 质量比为 1∶4 时，选择交联剂为三羟甲基丙烷三丙烯酸酯（TMPTA）制备的聚酯纤维织物表面的水接触角可达到 151°，滚动角可达 9°；且经过 40 次循环摩擦后，其表面水接触角仍大于 140°，具有一定的耐磨性。**结论** 基于紫外光固化技术，采用操作简便的浸涂法制备的聚酯纤维织物具有优异的超疏水性能和一定的耐磨性，为织物超疏水性能研究提供参考，有望应用于超疏水聚酯纤维织物领域。

关键词：聚酯纤维织物；超疏水；浸涂法；气相纳米二氧化硅
中图分类号：TB484.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)21-0111-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.014

Preparation and Properties of Superhydrophobic Polyester Fiber Fabrics with Vi-PDMS/S-SiO_2

ZHANG Zhe, *WU Xiao-fei*, *BAO Fan-xia*, *GUO Li-zhi*, *ZHANG Zheng-jian**
(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare polyester fiber fabrics with superhydrophobic coatings to improve the poor water repellency of ordinary fabrics and investigate their properties. Polyester fiber fabrics were used as the substrate to obtain superhydrophobic fabrics by UV curing technique and dip-coating method with SiO_2 nanoparticles (S-SiO_2), terminated vinyl polydimethylsiloxane (Vi-PDMS) to construct micro-nano rough structures on the fabric surface. The microstructure and hydrophobic properties were characterized by scanning electron microscopy and water contact angle measurement, and the superhydrophobic stability was investigated by mechanical friction experiments. When the mass ratio of Vi-PDMS and S-SiO_2 was 1:4, the surface water contact angle of the polyester fiber fabric prepared by selecting the cross-linking agent trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) could reach 151°, and the rolling angle could be up to 9°. After 40 times of cyclic friction, the surface water contact angle of the polyester fiber fabric was still greater than 140°, which had certain abrasion resistance. The polyester fiber fabrics prepared by UV curing technique and easy-to-operate dip-coating method have excellent superhydrophobicity and certain abrasion resistance, which provide reference for the study of superhydrophobicity of fabrics and are expected to be applied in the field of superhydrophobic polyester fiber fabrics.

KEY WORDS: polyester fiber fabric; superhydrophobic; dip-coating method; fumed nanosilica

收稿日期：2023-06-20
基金项目：大学生创新创业训练项目（202310057026）
*通信作者

随着我国纺织业的不断发展，人们对纺织品的需求不仅仅局限于保暖、保护等作用，人们对功能性的纺织物需求也日益增加。现如今，纺织材料在服装、家用装饰、包装材料等领域应用也十分广泛。由于织物自身具有很好的吸湿性，在日常的使用过程中易于被浸润，从而限制了其应用价值[1]。自德国植物学家 Barthlott 发现了莲花效应，并与 Neibuis 利用扫描电子显微镜（SEM）观测到了荷叶表面的微细粗糙结构，在其中发现了微米量级的“乳状突起”[2]，仿生技术得到了快速的发展，为超疏水奠定了基础。所谓超疏水即表面水接触角（WCA）大于 150°且滚动角（SA）小于 10°[3]。经过多年的研究，国内外研究者总结了 2 种获得超疏水的方法：一是构造粗糙的微纳结构[4]，二是将低表面能物质修饰在粗糙的微纳结构上[5-6]。目前常用于制备超疏水材料的方法主要有溶胶-凝胶法、有机-无机复合法[7]、激光刻蚀法、层层自组装法、相分离法、化学气相沉积法等[8]。超疏水织物存在的问题主要是超疏水稳定性差，在机械摩擦和一定外界环境影响下，超疏水性能容易丧失，因而限制了超疏水材料的应用。如何提高纺织材料的耐磨性，保持其良好的超疏水性成为了国内外的研究重点。王美淑等[9]以硝酸铈铵为引发剂，含有乙烯基的聚二甲基硅氧烷（VPDMS）和八乙烯基八硅倍半氧烷为原料，对棉布进行接枝聚合疏水改性。改性后的棉布的水接触角可达 153°，使用全氟癸硫醇进行二次改性后，改性棉布的水接触角可达 164°且二次改性棉布疏水性能最优，且具有自修复特性。Xie 等[10]通过在棉布上原位沉积氧化锌纳米颗粒，并进行聚二甲基硅氧烷改性来实现自清洁纺织品。制备的棉织物表现出优越的拒水性能，水接触角为 157°。Deng 等[11]通过溶胶-凝胶工艺将二氧化钛、二氧化硅、聚二甲基硅氧烷引入到纺织物表面制备超疏水聚酯棉织物，这种超疏水性织物具有耐洗和耐强酸侵蚀的特性，在经历洗涤和强酸/强碱浸泡后其表面接触角仍可达 150°，可以用作油水分离和彩色图案印刷。目前制备超疏水织物的方法很多，但是如化学处理法，物理处理法大都操作复杂，生产率低。浸涂法是制备超疏水织物最常用的技术之一，它通过直接在材料表面涂覆一层疏水性微米/纳米颗粒，如 TiO_2、SiO_2 等来实现超疏水效果[12-13]。浸涂法具有生产效率高、设备与操作简便、可进行连续生产等优势，特别适用于单一品种的大量生产。此外，由于紫外光固化反应速度快、无有机化合物（VOC）、设备携带方便等优势[14]，基于紫外固化技术的浸涂法常被用来构造粗糙结构来制备超疏水材料。综上，本文以基于紫外光固化技术的浸涂法，利用 Vi-PDMS 和 S-SiO_2 制备了超疏水聚酯纤维织物。探究了 Vi-PDMS/S-SiO_2 不同用量和不同的交联剂单体对聚酯纤维织物超疏水性能的影响，并对其超疏水稳定性进行了研究。此种方法基于紫外光固化速度快的优点，使其制备工艺简单，价格低廉，可用于超疏水聚酯纤维织物的制备。

1 实验

1.1 材料和试剂

主要材料：商用气相纳米 SiO_2 颗粒（S-SiO_2，粒径为 30 nm），河北巴度金属材料有限公司；端乙烯基聚二甲基硅氧烷（Vi-PDMS）分析纯，广东瀚江化学试剂有限公司；2-羟基-2-甲基苯基丙酮（1173），分析纯，湖北启步新材料科技有限公司；丙酮，分析纯，天津渤化化学试剂有限公司；单体 A 丙烯酸异冰片酯（IBOA），分析纯，湖南恒湖化工有限公司；单体 B（双三羟甲基丙烷四丙烯酸酯，TMPTMA），分析纯，长兴特殊材料（珠海）有限公司；单体 C 乙氧基三羟基甲基丙烷三丙烯酸酯（TMPEOTA），分析纯，湛新树脂（中国）有限公司；单体 D 三羟甲基丙烷三丙烯酸酯（TMPTA），分析纯，湛新树脂（中国）有限公司。

主要仪器：KQ–600DE 型数控超声清洗器，昆山禾创超声仪器有限公司；JSM–IT300LV 型扫描电子显微镜（SEM），日本电子公司；DSA30 型水接触角测量仪，德国克吕士公司；ME203 型电子分析天平，梅特勒托利多公司；XYG-6-50 型 UV 固化灯，上海迈芯光电科技有限公司。

1.2 超疏水聚酯纤维织物的制备

1.2.1 聚酯纤维织物的预处理

将购买的聚酯纤维织物裁剪为 1.5 cm×1.5 cm，通过乙醇清洗 2 次后放入 70 ℃的烘箱中干燥 5 min，干燥后放置干净处备用。

1.2.2 超疏水涂料的制备

超疏水涂料的制备中采用了 2 组方案。第 1 种方案为采用同一种交联剂，不同质量比的 Vi-PDMS/S-SiO_2 配置涂料，将 Vi-PDMS/S-SiO_2 按质量比 1∶10、1∶4、1∶2、1∶1，分别加入到含 0.05 g 三羟甲基丙烷三丙烯酸酯（TMPTA）、10 g 丙酮、0.04 g 2-羟基-2-甲基苯丙酮（1173）的烧杯中。其中，Vi-PDMS 添加量为 0.3 g，纳米 S-SiO_2 添加量分别为 0.03、0.075、0.15、0.3 g。随后将上述混合液在功率为 100 W 的超声波清洗器中超声 20 min，使气相纳米 S-SiO_2 颗粒均匀分散后放置备用。第 2 种方案采用不同交联剂单体（丙烯酸异冰片酯、双三羟甲基丙烷四丙烯酸酯、乙氧基三羟基甲基丙烷三丙烯酸酯、三羟甲基丙烷三丙烯酸酯），相同质量比的 Vi-PDMS/S-SiO_2（1∶4）配置涂料。

1.2.3 聚酯纤维织物超疏水涂层的制备

将清洗、干燥后 1.5 cm×1.5 cm 的聚酯纤维织物分别浸泡到超声后的复合液中，继续超声 30 min。将 40 kHz 的超声清洗机运行功率设置为 100 W，起始水温设为 20 ℃，超声结束时水温不超过 60 ℃。超声结束后立即从烧杯中取出聚酯纤维织物，在功率 40 W 的紫外固化灯（风冷型）下照射 6 min，即可得到超疏水聚酯纤维织物。制备过程如图 1 所示。

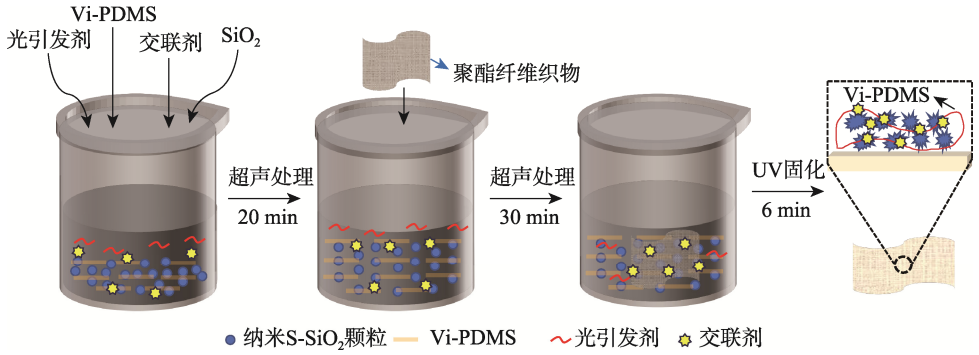


图 1　超疏水聚酯纤维织物制备流程
Fig.1 Preparation process of superhydrophobic polyester fiber fabric

1.3　超疏水涂层表征及性能测试

1.3.1　SEM 表征

使用 JSM–IT300LV 型扫描电子显微镜（SEM）对样品进行表面形貌观察。通过导电胶将裁剪好的待测样品粘贴到载物台上，进行喷金处理后，在 10 kV 的电压下观察疏水织物材料的表面微观形貌。

1.3.2　水接触角测试

采用水接触角测量仪（DSA30，德国克吕士公司），在室温下（22 ℃±2 ℃）。将 5 μL 的蒸馏水滴在织物材料表面，保持 1 min，然后通过该测试仪的计算机软件分析得到静态水接触角。在 3 处位置测量，计算得到平均接触角，同时利用测试仪自带的照相机进行数据的收集。

1.3.3　聚酯纤维织物耐机械摩擦测试

在实际应用中，由于机械强度不足，许多超疏水表面在手指擦拭和机械磨损等恶劣环境中会失去超疏水性能[15-16]。在该实验中，Vi-PDMS 与 S-SiO_2 黏合提高涂层对基材的附着力。为了研究超疏水涂层的耐磨性，进行了循环摩擦实验。如图 2 所示，在聚酯纤维织物上施加 50 g 砝码，利用夹子将织物在 300 目砂纸上拉行 10 cm 记为 1 次；样品旋转，继续拉行 10 cm，一共拉动 5 次为一个周期。然后测量摩擦后的水接触角来表征聚酯纤维织物的耐磨性能。

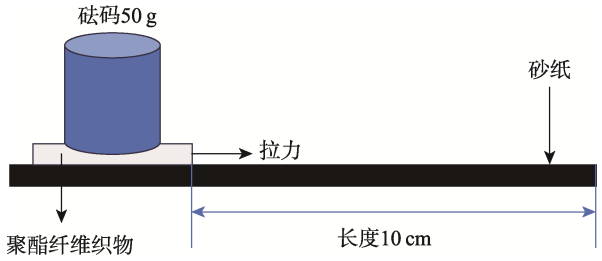


图 2　摩擦实验
Fig.2 Friction experiment

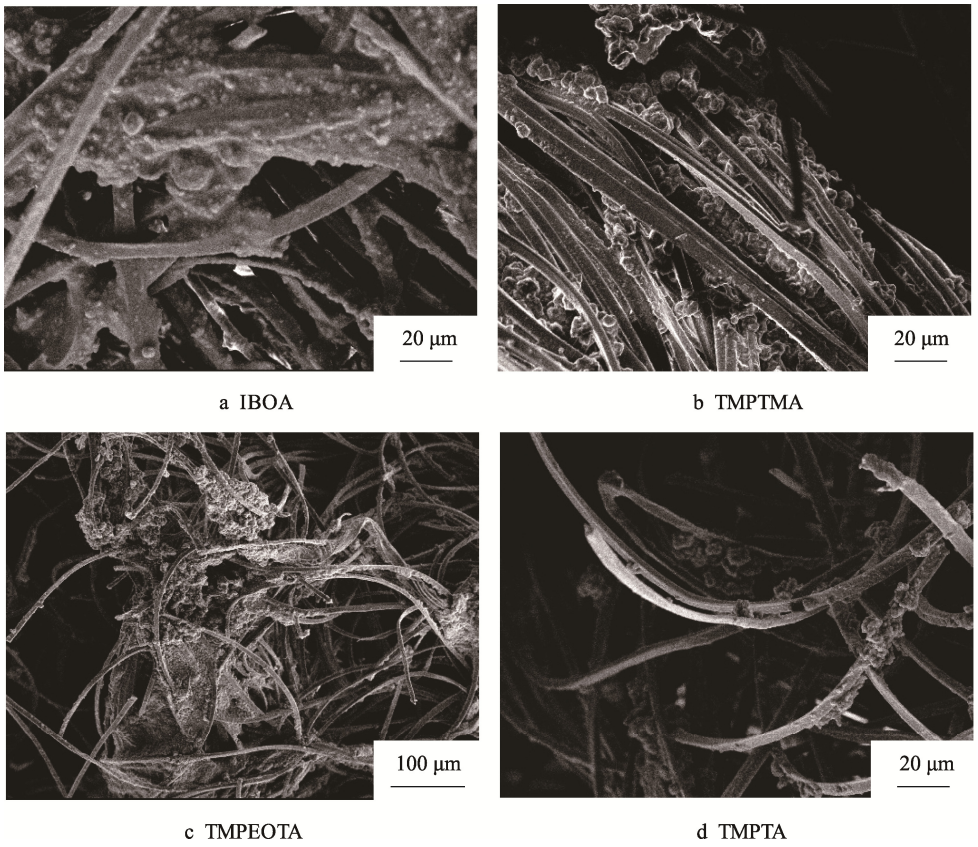
2　结果分析

2.1　不同交联剂单体对聚酯纤维织物疏水性能的影响

图 3 为不同交联剂单体制备的聚酯纤维织物的 SEM 图。图 3a，c 显示，IBOA 和 TMPEOTA 制备的织物表面有大量纳米 S-SiO_2 发生团聚。由于 IBOA 只含一个光活性基团，在光固化反应中不会产生交联点，反应体系的交联密度下降，使整个疏水体系强度降低。同时，纳米 S-SiO_2 的大量团聚也影响了其疏水性能，使得水接触角仅为 114°[17]（见图 4）。TMPEOTA 为乙氧基化的 TMPTA，其具有较好的水溶性，导致织物疏水性能下降。图 3d 显示，TMPTA 制备的织物表面形成了轻微的团聚，这种轻微的团聚增加了材料表面的粗糙结构，利于材料的疏水性能。TMPTA 具有良好的交联作用，在紫外光照射下，光引发剂产生自由基引发 TMPTA 同 Vi-PDMS 分子发生化学反应形成了三维网络结构，提高了体系耐水性，其疏水性能最好，水接触角可达 151°[18]（见图 4）。综上，TMPTA 为最适合制备超疏水织物的交联剂。图 5 显示 TMPTA 制备的超疏水涂层表面的液滴呈球形，可以自由滚动（蓝墨水染色），后续实验均采用 TMPTA 制备的样品进行分析。

2.2　涂层的疏水性和表面形貌分析

超疏水涂层的形成需要通过构造微纳米级的粗糙结构来实现，引入纳米材料是一种实现超疏水表面快捷的方法。通过扫描电镜（SEM）分析了 Vi-PDMS 和纳米 S-SiO_2 制备的织物纤维表面结构，如图 6 所示。图 6a 是 Vi-PDMS 制备的织物图片，其表面相对光滑，仅有少量凹凸粗糙结构。图 6b 是纳米 S-SiO_2 制备的织物图片，可看出纳米 S-SiO_2 作为一种无机纳米颗粒，提高了织物表面粗糙度，从而可以作为提升织物疏水性能的材料[19]。水接触角测试时，



a IBOA　　b TMPTMA

c TMPEOTA　　d TMPTA

图 3　不同交联剂单体聚酯纤维织物表面 SEM 图

Fig.3 SEM image of the surface of polyester fiber fabrics with different crosslinker monomers

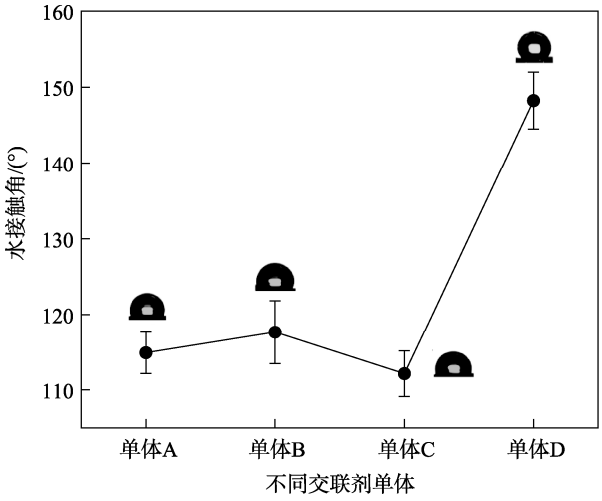


图 4　不同单体作为交联剂制备的聚酯纤维织物水接触角

Fig.4 Water contact angle of polyester fiber fabrics prepared with different monomers as crosslinking agents

Vi-PDMS 制备的织物出现了如图 7 所示的效果，10 s 内织物被水完全浸润，纳米 S-SiO_2 制备的织物则瞬间被水浸润。因此单独使用 Vi-PDMS 和 S-SiO_2 都很难实现织物的超疏水性能。大量的研究表明，两者的共同作用更易实现材料的超疏水性能，此外 Vi-PDMS 层可与 S-SiO_2 颗粒表面发生物理吸附，来提高涂层的附着力，在织物表面形成稳定的粗糙结构，进而增强织物的疏水性能[20]。

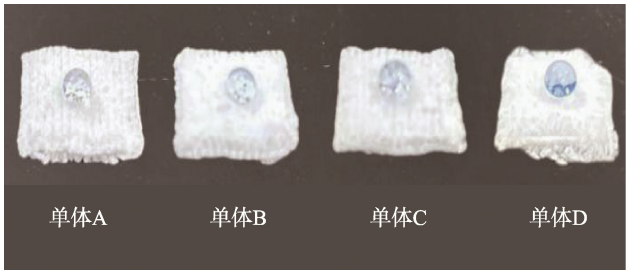
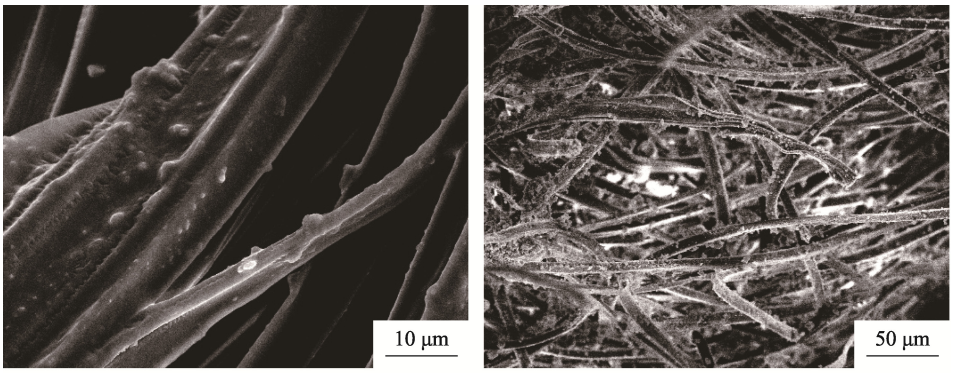


图 5　水滴在单体（A/B/C/D）制备的聚酯纤维织物疏水效果

Fig.5 Hydrophobic effect of water droplets on polyester fiber fabrics prepared from monomers (A/B/C/D)

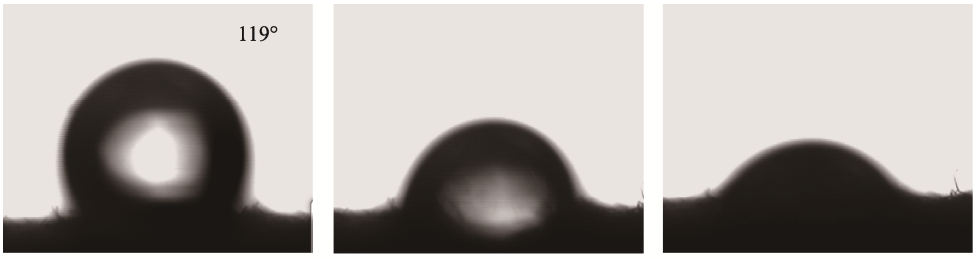
图 8、图 9 为不同质量比聚酯织物水接触角大小和表面形貌。纳米 S-SiO_2 作为提升织物疏水性的材料在整个体系中的添加量也至关重要。如图 8 显示，当 Vi-PDMS/S-SiO_2 的质量比为 1∶4 时，水接触角达到 151°，滚动角为 9°，具备了超疏水性能。从图 9b

中看出，其织物纤维表面凹凸的粗糙结构分布相较其他质量比织物更均匀，且织物表面发生了轻微的团聚现象，增加了材料的粗糙结构[21]，导致水滴与材料接触时捕获了空气，在与 Vi-PDMS 的相互作用下，这种表面粗糙度捕获空气形成的“气垫”使得固液界面接触面积减小，从而获得了更好的疏水性[22-23]。当纳米 S-SiO_2 添加量少、Vi-PDMS/S-SiO_2 比值为 1∶10 时，水接触角为 131°、滚动角为 21°（见图 8）。当纳米 S-SiO_2 添加量过多，Vi-PDMS/S-SiO_2 比值达到 1∶1，待丙酮蒸发后，大部分的 Vi-PDMS 更倾向移至底层，少量的 Vi-PDMS 留在表面黏附纳米 S-SiO_2，造成了纳米 S-SiO_2 的团聚（如图 9d）使得疏水性能下降[24]，水接触角下降到 106°，滚动角增加到 23°（见图 8）。



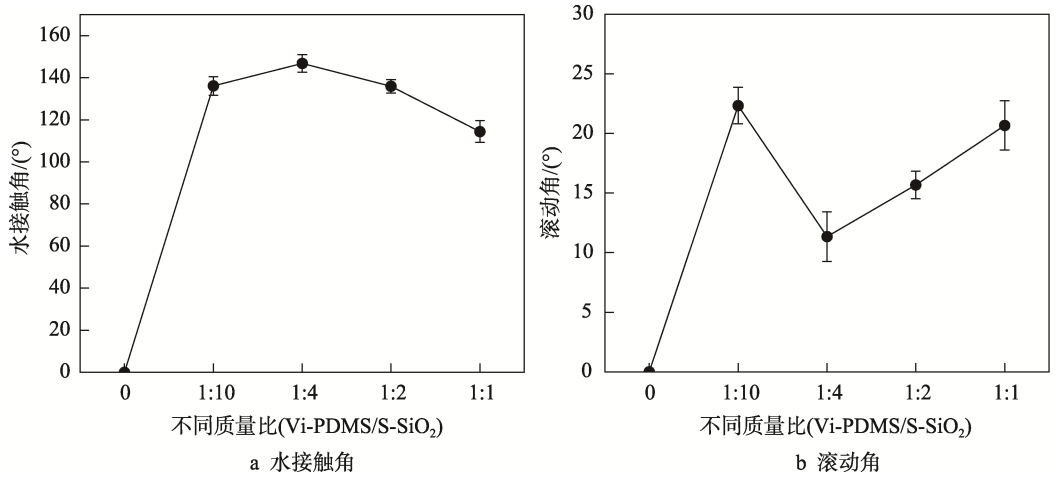
a Vi-PDMS　　b 纳米S-SiO_2

图 6　Vi-PDMS 和 S-SiO_2 聚酯纤维织物 SEM 图
Fig.6 SEM images of Vi-PDMS and S-SiO2 polyester fiber fabrics



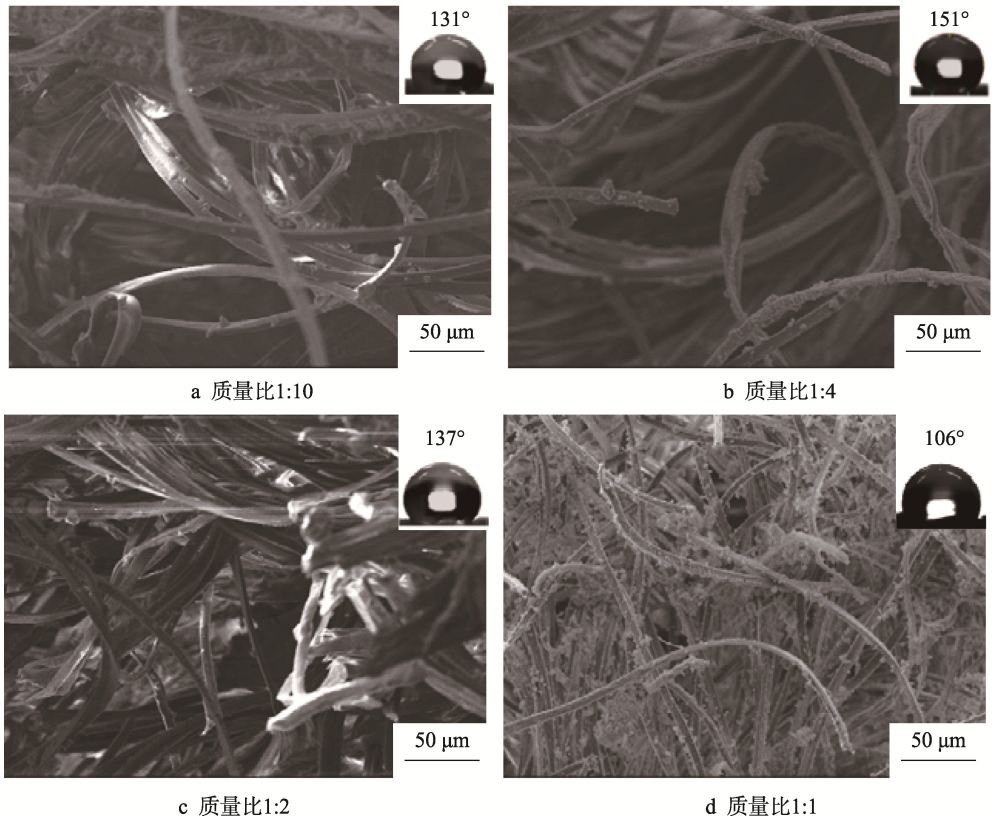
a 3 s　　b 4 s　　c 5 s

图 7　添加 Vi-PDMS 聚酯纤维织物浸润效果
Fig.7 Infiltration effect of polyester fiber fabric after addition of Vi-PDMS



a 水接触角　　b 滚动角

图 8　Vi-PDMS / S-SiO_2 用量对聚酯纤维织物疏水性的影响
Fig.8 Effect of Vi-PDMS / S-SiO_2 dosage on hydrophobicity of polyester fiber fabrics



a 质量比1:10　　b 质量比1:4

c 质量比1:2　　d 质量比1:1

图 9　Vi-PDMS/S-SiO_2 不同用量聚酯纤维织物表面 SEM 图

Fig.9 SEM image of the surface of polyester fiber fabric with different dosages of Vi-PDMS/S-SiO_2

2.3　超疏水涂层耐摩擦性分析

本实验制备的聚酯纤维超疏水织物中，Vi-PDMS 层与 S-SiO_2 颗粒在织物表面形成超疏水涂层，在交联剂和 Vi-PDMS 的作用下碳碳双键通过化学键合将其固定在织物表面形成了黏接层。“超疏水层+黏接层”的疏水结构，有利于改善超疏水纳米颗粒与基底之间因相互作用力较弱，涂层会粉化脱落，从而失去超疏水性的问题[20]。

通过图 2 所示步骤，采用质量比为 1∶4 的 Vi-PDMS/S-SiO_2 和 TMPTA 制备的聚酯纤维织物进行循环摩擦实验评价织物的超疏水耐磨性。图 10 表明，织物摩擦 5 次后，水接触角低于 150°。这种轻微的降低可能是在剧烈摩擦下，表面粗糙度的部分损失和 Vi-PDMS/S-SiO_2 涂层的去除造成的。在摩擦 40 次前，涂层的水接触角均大于 140°，具有一定的疏水性能。摩擦 50 ~ 60 次，织物疏水性提高，这可能是由于纤维和砂纸在摩擦过程中产生了突出的绒毛，对水滴有一定的黏附作用[25]。随着摩擦次数的增加，织物表面大量的疏水物质被破坏，导致水接触角低于 90°，完全丧失了疏水性能[26]。通过扫描电镜（SEM）对比了实验所用织物和棉布的表面形貌。图 11a、b 比较显示，2 种材料表面的形貌差异大。图 11b 中的材料根根交织，相较于图 11a 中的形貌更加规律。现有的研究表明，此种形貌产生的网络结构更利于涂层的附着，其耐磨性能更好[27]。这表明，聚酯纤维织物的耐磨性不足可能也与其材料和纺织工艺有关，这可能是导致本实验所制备的织物耐磨性不足的一个原因。

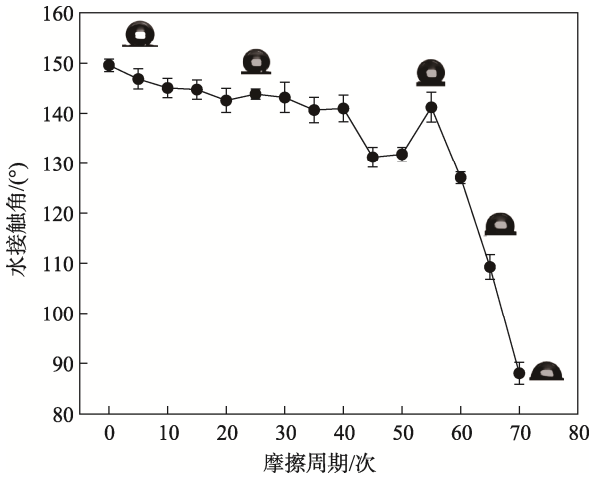
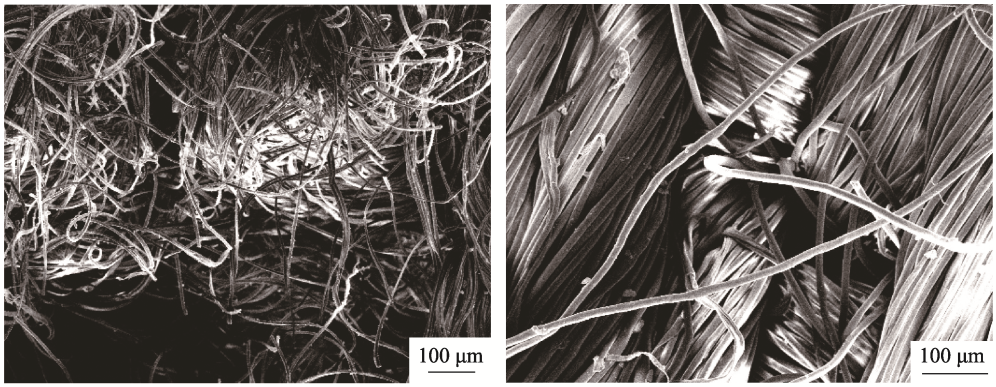


图 10　聚酯纤维织物疏水性随摩擦次数的变化

Fig.10 Variation of hydrophobicity of polyester fiber fabrics with the number of rubs



a 聚酯纤维织物　　b 棉布

图 11　聚酯纤维织物和棉布织物 SEM 图

Fig. 11 SEM images of polyester fiber fabric and cotton fabric

3　结语

本文以 S-SiO_2 和 Vi-PDMS 为原料，丙酮作为溶剂，2-羟基-2-甲基苯基丙酮（1173）作为光引发剂，多种丙烯酸酯为交联剂，通过浸涂法制备了聚酯纤维超疏水织物。实验结果表明，当 Vi-PDMS/ S-SiO_2 的质量比为 1∶4 时，交联剂单体选择 TMPTA 制备的聚酯纤维织物，水接触角达到 151°，滚动角达 9°；该织物还具有一定的耐磨性，在 50g 的负载下，在 300 目砂纸上循环摩擦 60 次后仍能保持较高的疏水性，水接触角大于 140°。本研究所制备的超疏水涂层耐磨性还需进一步地改善，但其基于紫外光固化技术，制备工艺简单，成本低廉，为该类超疏水涂层的研究提供了参考。目前的 SiO_2/PDMS 超疏水涂层已经显示出卓越的疏水性能，但仍有改进的空间。未来的发展将着重于进一步提高涂层的水接触角和滚动角，在其基础上开发更耐久和稳定的 SiO_2/PDMS 涂层，以增加其使用寿命，并在复杂环境下保持优异的性能。

参考文献：

[1] 黄梦晨, 薛朝华, 郭小静, 等. PVDF/SiO_2/PDMS 涂层超疏水纺织品性能[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 76-84.
HUANG Meng-chen, XUE Chao-hua, GUO Xiao-jing, et al. Superhydrophobic Fabrics by Coating with PVDF/SiO_2/PDMS[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 76-84.

[2] 尤航, 彭毅. 超疏水表面的制备与应用研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(2): 2043-2054.
YOU Hang, PENG Yi. Research Progress on the Preparation and Application of Superhydrophobic Surfaces[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(2): 2043-2054.

[3] ERIKSSON M, SWERIN A. Forces at Superhydrophobic and Superamphiphobic Surfaces[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2020, 47: 46-57.

[4] XU Pan, LI Xin-xue. Fabrication of TiO_2/SiO_2 Superhydrophobic Coating for Efficient Oil/Water Separation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105538.

[5] WANG Shu-tao, LIU Ke-song, YAO Xi, et al. Bioinspired Surfaces with Superwettability: New Insight on Theory, Design, and Applications[J]. Chemical Reviews, 2015, 115(16): 8230-8293.

[6] GHARIEH A, POURGHASEM M. Eco-Friendly UV-Curable Polyurethane-Silica Superhydrophobic Coating with Superb Mechanical Durability[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2022, 33(10): 3312-3322.

[7] 韩佳, 勾昱君, 秦仪. 超疏水表面制备及防冰抑霜性能研究[J]. 低温工程, 2022(6): 48-55.
HAN Jia, GOU Yu-jun, QIN Yi. Preparation of Super Hydrophobic Surface and Study on Anti-Icing and Anti-Frost Properties[J]. Cryogenics, 2022(6): 48-55.

[8] 李聪聪, 冯辉霞, 陈柏屹, 等. 超疏水材料的制备方法及油水分离应用研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(10): 3001-3004.
LI Cong-cong, FENG Hui-xia, CHEN Bai-yi, et al. Research Progress on Preparation Methods of Superhydrophobic Materials and Their Application in Oil Water Separation[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(10): 3001-3004.

[9] 王美淑, 刘海峰, 孙一峰, 等. 有机硅接枝聚合法制备超疏水棉织物[J]. 精细化工, 2020, 37(5): 912-918.
WANG Mei-shu, LIU Hai-feng, SUN Yi-feng, et al. Preparation of Superhydrophobic Fabric by Silicone Graft Polymerization[J]. Fine Chemicals, 2020, 37(5): 912-918.

[10] XIE Yao, TU Peng-peng, XIAO Yong-he, et al. Design-

ing Non-Fluorinated Superhydrophobic Fabrics with Durable Stability and Photocatalytic Functionality[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(33): 40011-40021.

[11] DENG Zheng-yan, WANG Wei, MAO Li-hua, et al. Versatile Superhydrophobic and Photocatalytic Films Generated from TiO_2–SiO_2@PDMS and Their Applications on Fabrics[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(12): 4178-4184.

[12] HUANG J Y, LI S H, GE M Z, et al. Robust Superhydrophobic TiO_2@fabrics for UV Shielding, Self-Cleaning and Oil–Water Separation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(6): 2825-2832.

[13] SHAH S M, ZULFIQAR U, HUSSAIN S Z, et al. A Durable Superhydrophobic Coating for the Protection of Wood Materials[J]. Materials Letters, 2017, 203: 17-20.

[14] 欧定军. 印刷中的 LED-UV 固化技术[J]. 广东印刷, 2017(2): 33-37.
OU Ding-jun. LED-UV Curing Technology in Printing[J]. Guangdong Print, 2017(2): 33-37.

[15] WU Lei, ZHANG Jun-ping, LI Bu-cheng, et al. Magnetically Driven Super Durable Superhydrophobic Polyester Materials for Oil/Water Separation[J]. Polymer Chemistry, 2014, 5(7): 2382-2390.

[16] WANG Huai-yuan, WANG En-qun, LIU Zhan-jian, et al. A Novel Carbon Nanotubes Reinforced Superhydrophobic and Superoleophilic Polyurethane Sponge for Selective Oil-Water Separation through a Chemical Fabrication[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(1): 266-273.

[17] 余彪, 邱雪群, 张军, 等. 基于硫醇/甲基丙烯酸酯的 3D 打印用光敏树脂的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(2): 39-44.
YU Biao, QIU Xue-qun, ZHANG Jun, et al. Preparation and Properties of Thiol/Methacrylate Based Photosensitive Resins for 3D Printing[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(2): 39-44.

[18] 尹朝辉, 罗顺, 闫晓琦, 等. 水性 PSiUA IPN 阻尼胶的研究-三羟甲基丙烷三丙烯酸酯用量的影响[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(5): 15-18.
YIN Zhao-hui, LUO Shun, YAN Xiao-qi, et al. Study on Waterborne PSiUA IPN Damping Adhesive-Effect of Trimethylolpropane Triacrylate Dosage[J]. China Adhesives, 2018, 27(5): 15-18.

[19] WANG Ya-qun, SHI Ye, PAN Li-jia, et al. Multifunctional Superhydrophobic Surfaces Templated from Innately Microstructured Hydrogel Matrix[J]. Nano Letters, 2014, 14(8): 4803-4809.

[20] WU Lei, ZHANG Jun-ping, LI Bu-cheng, et al. Mechanical- and Oil-Durable Superhydrophobic Polyester Materials for Selective Oil Absorption and Oil/Water Separation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 413: 112-117.

[21] 许永傲. 一步法合成耐久性水基超疏水 TiO_2/DTMS 涂层[J]. 有色金属材料与工程, 2022(3): 30-36.
XU Yong-ao. Synthesis of Robust Water-Based Superhydrophobic TiO_2/DTMS Coating by One-Step Method[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2022(3): 30-36.

[22] 李战胜. 基于纳米二氧化硅的防冰疏水涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(4): 201-205.
LI Zhan-sheng. Preparation of Anti-Icing Hydrophobic Coating Based on Nano-Silica and Study on Its Properties[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(4): 201-205.

[23] 李永莲, 鄢嘉炜, 庄映芬, 等. 基于纳米二氧化硅的超疏水表面的制备及性能研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2022, 41(8): 7-11.
LI Yong-lian, YAN Jia-wei, ZHUANG Ying-fen, et al. Preparation and Properties of Hydrophobic Surfaces Based on Nanosilica Particles[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2022, 41(8): 7-11.

[24] ANSARI A, SAADATBAKHSH M, SOHRABI M, et al. Antifouling Activity of Superhydrophobic PDMS/Hydrophobic Silica Coating[J]. Surface Engineering, 2023, 39(1): 35-48.

[25] XUE Chao-hua, LI Xing, JIA Shun-tian, et al. Fabrication of Robust Superhydrophobic Fabrics Based on Coating with PVDF/PDMS[J]. RSC Advances, 2016, 6(88): 84887-84892.

[26] XUE Chao-hua, ZHAO Ling-ling, GUO Xiao-jing, et al. Mechanically Durable Superhydrophobic Surfaces by Binding Polystyene Nanoparticles on Fibers with Aluminum Phosphate Followed by Hydrophobization[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 396: 125231.

[27] XIAO Qian, WANG Bin, HUANG Yue-wen. Preparation and Study of Stable Fluorine-Free Superhydrophobicity of Cotton Fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(23): 50556.

责任编辑：曾钰婵