静电纺丝一步法制备 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的研究

伍悦玥　耿子茹　饶　晓　王　萍
苏州大学 纺织与服装工程学院,江苏 苏州 215021

摘　要:将聚苯乙烯(PS)和聚氨酯(PU)溶于二甲基甲酰胺/四氢呋喃(DMF/THF)溶剂[m(DMF):m(THF)=1:1]中,采用静电纺丝一步法制备具有微纳米微球-纤维掺杂结构的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面,并探究影响该超疏水表面疏水性的因素。研究结果表明,溶液质量分数、PS 和 PU 质量比及静电纺丝电压、推进速率等均对 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的疏水性有较大影响。由单因素试验和三因素三水平正交试验结果可知,当溶液质量分数为 3%、m(PS):m(PU)=1:1、纺丝电压为 16 kV、推进速率为 1.2 mL/h、接收距离为 15 cm 时,所得 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面具有最佳的疏水性,且耐水冲击性良好。研究结果可为后续超疏水表面的构建提供参考。

关键词:超疏水表面;疏水性;静电纺丝;微纳米微球;聚苯乙烯;聚氨酯
中图分类号:TS 176.9　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-7093(2024)02-0019-09

Research of PS-PU composite nanofibers superhydrophobic surface prepared by one-step electrospinning method

Wu Yueyue, *Geng Ziru*, *Rao Xiao*, *Wang Ping*
College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China

Abstract: Polystyrene (PS) and polyurethane (PU) were dissolved in dimethylformamide/tetrahydrofuran (DMF/THF) solvent with m(DMF):m(THF)=1:1, and PS-PU composite nanofibers superhydrophobic surface with a micro/nano microsphere-fiber doped structure was prepared by one-step electrospinning method. Also, the factors affecting the hydrophobicity of the superhydrophobic surface were investigated. The research results showed that the hydrophobicity of PS-PU composite nanofibers superhydrophobic surface were greatly affected by the mass fraction of solution, mass ratio of PS to PU, electrospinning voltage and advancing rate. According to the results of the single factor and three-factor three-level orthogonal test, it was calculated and verified that when the solution mass fraction at 3%, m(PS):m(PU) at 1:1, spinning voltage at 16 kV, advancing rate at 1.2 mL/h, and receiving distance at 15 cm, the PS-PU composite nanofibers superhydrophobic surface had the best hydrophobicity and good water impact resistance. The

基金项目:江苏省大学生创新创业训练计划项目省级一般项目(202210285160Y)
收稿日期:2023-11-27
作者简介:伍悦玥,女,2002 年生,在读本科生,主要研究方向为纺织纤维膜表面疏水性
通信作者:王萍,教授,pingwang@suda.edu.cn

research results can provide reference for the subsequent construction of superhydrophobic surface.
Keywords: superhydrophobic surface; hydrophobicity; electrospinning; micro/nano microsphere; polystyrene; polyurethane

超疏水现象在大自然中十分常见,如荷叶表面、蜘蛛丝表面、壁虎脚趾部位、水龟腿部等均具有超疏水结构。已有研究者通过探究不同生物体超疏水表面的形成原理,仿生构建出形式多样的超疏水材料,广泛应用于油水分离[1-4]、自清洁[5-6]、抗紫外[7-8]、防冰[9]、防腐[10]、防雾[11-12]等诸多领域。对超疏水表面疏水机理的研究发现,材料的疏水性由其表面自由能和粗糙程度决定[13]。含氟聚合物因具有极低的表面能、耐高温性及耐化学腐蚀性而被视为优异的疏水材料[14]。李卢祎等[15]合成了 SiO_2/含硅氟苯丙乳液超疏水涂层,该涂层的水接触为 153°,疏水性能优异,且具有良好的热稳定性,在经-10~90 ℃的冷/热处理后仍保持良好的超疏水特性。然而,含氟材料难以生物降解,对人体健康和自然环境都有潜在危害,因此其应用受限[16]。

目前,材料超疏水表面的构建方法众多。静电纺丝法因具有操作简单、成本低廉的特点而广泛应用于超疏水表面的制备。Xue 等[17]采用静电纺丝法制备了具有稳定孔隙的全聚合物和自粗化超疏水聚偏氟乙烯纤维膜;刘谦等[18]采用静电纺丝法制备了水接触角为 152.5°的超疏水聚苯乙烯/聚丙烯腈复合纳米纤维。静电纺丝工艺可以制备出具有特殊结构的微纳米结构,如珠串结构[19-20]、核壳结构[21-23]等。通常,珠串结构能为纤维表面提供微纳米粗糙结构,使其具有良好的疏水性和稳定性[24]。然而,静电纺丝技术在构造力学性能稳定且耐久的超疏水表面方面存在一定的局限性[25]。如何提高静电纺丝制得的超疏水表面的耐久性是一个备受关注的话题。

聚苯乙烯(PS)和聚氨酯(PU)是常见的环保型疏水材料,PU 是一种软段和硬段交替连接的嵌段聚合物,具有良好的力学性能[26],而 PS 是一种具有较低表面能(34 mN/m)的聚合物[27],因此二者被广泛用于制备超疏水表面[28-29]。本文以 PS 和 PU 为原料,通过静电纺丝一步法制备具有“珠串”微纳米粗糙结构的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面,并进一步探究影响该复合超疏水表面疏水性的因素,以及其耐久性。研究结果为后续材料超疏水表面的构建提供参考。

1 试验

1.1 试验原料

通用型 PS,优特普科技苏州有限公司;PU,苏州科同生物医药科技有限公司;*N*,*N*-二甲基甲酰胺(DMF,分析纯),江苏强盛功能化学股份有限公司;四氢呋喃(THF,纯度为 99%),优特普科技苏州有限公司。

1.2 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的制备

PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的具体制备方法如图 1 所示。称取一定量的 PS 和 PU 颗粒,加入提前配制好的 DMF/THF 溶剂[m(DMF):m(THF)=1:1]中,在室温下采用磁力搅拌器搅拌 8~12 h,制得纺丝液。将 PS 和 PU 的质量占全部溶液质量的百分比定义为纺丝液溶液质量分数,制得溶液质量分数分别为 2%、3%、5%、7%、9%和 11%的纺丝液。取适量纺丝液放入 TYD01-01 型注射泵(保定雷弗流体科技有限公司)中,通过 DW-P303-1ACDF0 型高压电源产生电场,使纺丝液在电场的作用下形成泰勒锥,并利用接收板收集纺制的纳米纤维。

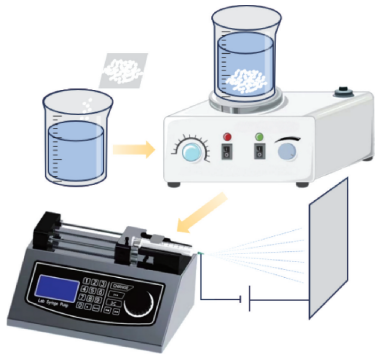


图 1 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的制备示意图
Fig. 1 Preparation diagram of PS-PU composite nanofibers superhydrophobic surface

1.3 测试与表征

1.3.1 接触角测试

PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的接触角采用

DSA100 型液滴形状分析仪(德国 Kruss 公司)测试,每块试样选取 3 个不同的区域,分别垂直滴加 6 μL 的去离子水并进行测量,结果取平均值。

1.3.2 表面形貌测试

裁剪少量的试样,用导电胶将其固定在电镜台上,在 60 ℃下将试样烘干后,在 90 mA 的电流下对试样喷金 90 s,赋予其导电性,随后在 15 kV 的加速电压下,采用 S-4700 型扫描电子显微镜(SEM,日本 Hitachi 公司)观察试样的表面形貌。

2 结果与分析

2.1 溶液质量分数对表面疏水性的影响

目前,已有研究者在超疏水表面构造出微球粗糙表面结构。根据现有研究,微球数量对静电纺丝制得的超疏水表面的疏水性有较大影响,且微球数量与接触角大小正相关[30-31]。此外,当纺丝液浓度较低时,容易因静电雾化而形成微球[32]。为探究溶液质量分数对所得超疏水表面疏水性的影响,本文在不同 PS-PU 溶液质量分数下,通过静电纺丝工艺制备 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面。纺丝工艺参数如表 1 所示,纺丝时间为 4.5 h。

图 2 为不同溶液质量分数下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的接触角测试结果。由图 2 可以看出:溶液质量分数为 3%时,试样的表面接触角最大,达 153.2°,溶液质量分数为 11%时,试样的表面接触角最小;在溶液质量分数为 3%和 11%范围内,随着溶液质量分数的增大,试样的表面接触角呈减小趋势。

图 3 为不同溶液质量分数下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的 SEM 图。由图 3 可以看出,当溶液质量分数为 2%时,试样表面同时呈现出微球与纤维的结构,且表面结构中存在明显的孔隙。这是因为,溶液质量分数较小时,静电纺丝过程不稳定,纺丝液难以在高压静电场作用下拉伸形成纤维。将溶液质量分数增大到 3%,试样表面的微观纳米微球结构更加致密,微球与纤维相连形成“珠串”,这种致密的“珠串”结构能够有效减少水滴与基底的接触面积,增大表面粗糙度,从而形成超疏水表面。随着溶液质量分数的继续增大,表面结构中的微粒数量越来越少,形成的多为纤维结构,与此同时,所得试样的接触角也逐渐减小。这是因为静电纺丝过程中,溶液质量分数增大,溶液黏度随之增大,更易纺制出连续且均匀的纤维。然而,相较于纤维结构,微纳米级微球结构能够增大材料的表面微观粗糙度,使试样的表面接触角更大,达到超疏水状态。因此,具有稳定的“珠串”微纳米粗糙结构的表面疏水性更好。这一结论与 Wenzel 模型相符,该模型认为,膜的表面粗糙度与接触角之间存在良好的正相关关系[33]。

表 1 不同溶液质量分数下的静电纺丝工艺参数

Tab. 1 Process parameters of electrospinning with different solution mass fraction

试验编号	溶液质量分数/%	m(PS):m(PU)	纺丝电压/kV	接收距离/cm	推进速率/(mL·h^{-1})
A	2	1:1	16	15	0.4
B	3	1:1	16	15	0.4
C	5	1:1	16	15	0.4
D	7	1:1	16	15	0.4
E	9	1:1	16	15	0.4
F	11	1:1	16	15	0.4

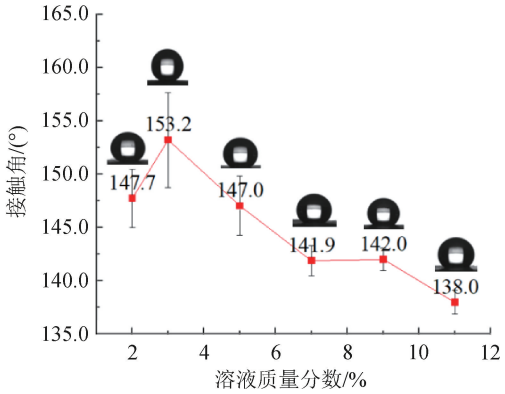
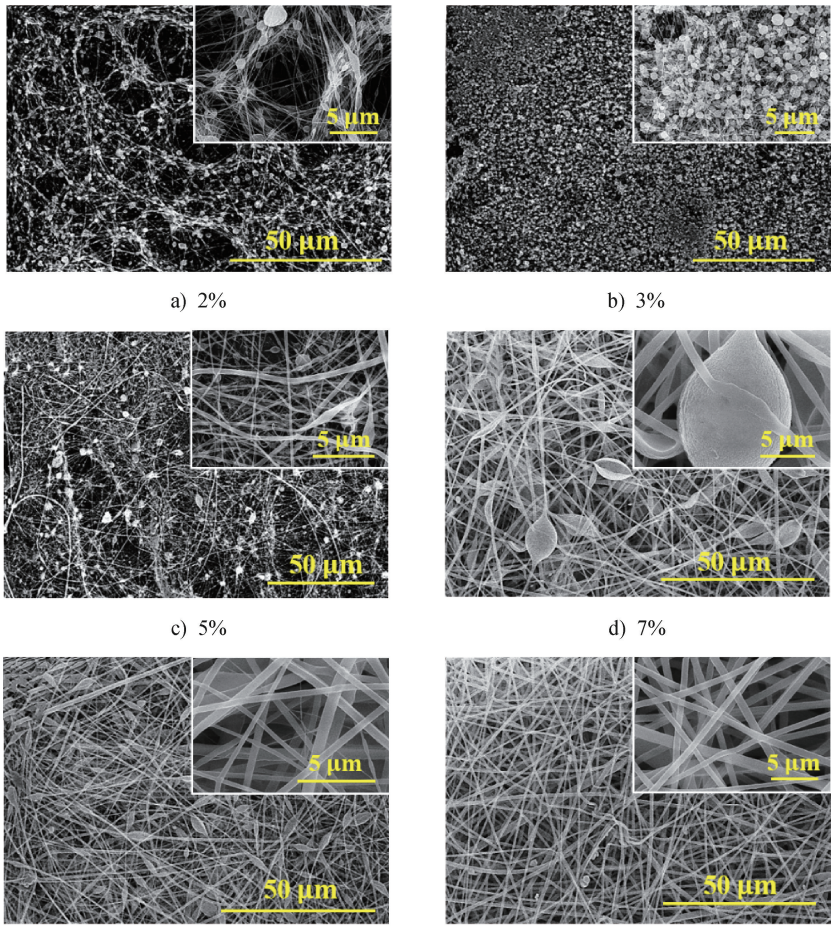


图 2 不同溶液质量分数下各试样的接触角测试结果

Fig. 2 Contact angle test results of samples with different solution mass fraction



a) 2%　b) 3%

c) 5%　d) 7%

e) 9%　f) 11%

图 3　不同溶液质量分数下各试样的 SEM 图

Fig. 3　SEM images of samples with different solution mass fraction

2.2　溶质质量比对表面疏水性的影响

在 2.1 节确定的最佳溶液质量分数(3%)下,探讨 PS 和 PU 质量比(即溶质质量比)对试样表面疏水性的影响。纺丝工艺参数如表 2 所示。

表 2　不同溶质质量比下的静电纺丝工艺参数

Tab. 2　Process parameters of electrospinning with different solute mass ratios

试验编号	m(PS):m(PU)	溶液质量分数/%	纺丝电压/kV	接收距离/cm	推进速率/(mL·h^{-1})
a	1:0	3	16	15	0.4
b	3:1	3	16	15	0.4
c	2:1	3	16	15	0.4
d	1:1	3	16	15	0.4
e	1:3	3	16	15	0.4
f	0:1	3	16	15	0.4

6 种不同溶质质量比下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的接触角测试结果如图 4 所示,其表面 SEM 图如图 5 所示。由图 4 可以看出,当 PS-PU 复合纺丝液中 m(PS):m(PU)= 1:1时,所得试样的表面接触角最大,为 153.2°,疏水性最好,即最佳的 PS 和 PU 质量比为 1:1。在 PS 和 PU 的混合体系中,主要由 PS 发挥疏水作用,这是因为 PS 分子中不含亲水基团,而 PU 的分子链上含有亲水的—OH。由图 4 还可以看出,溶质分别为纯 PS 和纯 PU 的试样,其表面接触角分别为 140.4° 和

135.9°,疏水性明显不及两者质量比为 1∶1的试样,这表明,PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的疏水性由二者共同作用决定。从图 5 可以看出,不同溶质质量比下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面结构存在明显的差异,呈现出不同的纤维、纳米微球-纤维结构。当溶液质量分数为 3%时,纯 PU 静电纺丝纳米纤维表面形成了大量大小不匀的微球结构,以及少量不连续的纤维;m(PS)∶m(PU)= 1∶1 时,纳米微球-纤维相互连接形成均匀分布的“珠串”结构;随着 m(PS)∶m(PU)值的增大,纳米微球-纤维中的孔隙越来越明显。这是因为纺丝液中的聚合物互不相容,纺丝液自喷嘴喷出后,在电场力的作用下,纺丝液中的溶剂迅速挥发,射流内聚合物分子间不同作用力的相互作用导致大小不均匀的孔隙形成。当溶质中仅含有 PS 时,试样表面呈现出单纯的纤维结构。采用 ImageJ 软件对图像进行处理,结果显示,纤维的直径在 300 nm 和 900 nm 之间。溶剂挥发引起的相分离是影响纤维形态的主要因素[34]。

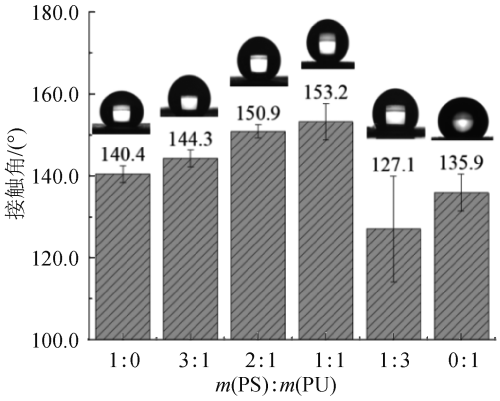
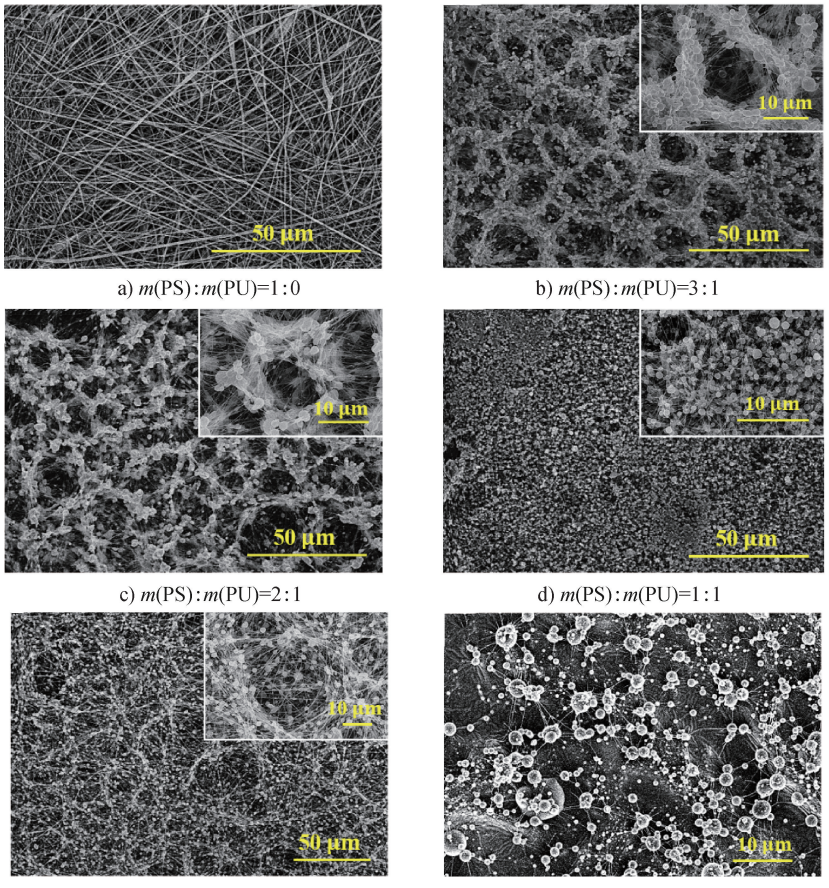


图 4　不同溶质质量比下各试样的接触角测试结果

Fig. 4　Contact angle test results of samples with different solute mass ratios



a) m(PS)∶m(PU)=1∶0　b) m(PS)∶m(PU)=3∶1

c) m(PS)∶m(PU)=2∶1　d) m(PS)∶m(PU)=1∶1

e) m(PS)∶m(PU)=1∶3　f) m(PS)∶m(PU)=0∶1

图 5　不同溶质质量比下各试样的表面 SEM 图

Fig. 5　SEM images of samples with different solute mass ratios

2.3　推进速率和纺丝电压对表面疏水性的影响

由 2.2 节可知,当 m(PS)∶m(PU)= 1∶1时,试样的疏水性最优,因此控制溶液质量分数为 3%、m(PS)∶m(PU)= 1∶1、m(DMF)∶m(THF)= 1∶1,保

持接收距离为 15 cm 不变,分别以纺丝推进速率和纺丝电压为变量,探究这两个因素对 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面疏水性的影响。纺丝工艺参数设置见表 3。

表 3 不同推进速率和纺丝电压下的静电纺丝工艺参数

Tab. 3 Process parameters of electrospinning with different advancing rates and spinning voltages

试验编号	溶液质量分数/%	m(PS):m(PU)	纺丝电压/kV	接收距离/cm	推进速率/(mL·h^{-1})
1	3	1:1	12	15	0.4
2	3	1:1	16	15	0.4
3	3	1:1	20	15	0.4
4	3	1:1	12	15	0.8
5	3	1:1	16	15	0.8
6	3	1:1	20	15	0.8
7	3	1:1	12	15	1.2
8	3	1:1	16	15	1.2
9	3	1:1	20	15	1.2

静电纺丝工艺参数对所得纤维的表面形貌和尺寸分布至关重要。不同推进速率和纺丝电压下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的接触角测试结果如图 6 所示。图 7~图 9 分别为不同推进速率和纺丝电压下纺制的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的 SEM 图与纤维直径分布图。由图 6 可以看出,试样表面接触角受推进速率和纺丝电压共同作用的影响,当纺丝电压为 16 kV、推进速率为 1.2 mL/h 时,试样表面的接触角最大,且达到超疏水状态。由图 7~图 9 可以看出,随着纺丝电压增大,纤维直径呈减小趋势。这是因为纺丝电压增大使得纺丝液射流携带的电荷量增大,进而增大了库仑斥力,使纳米纤维直径减小[35]。

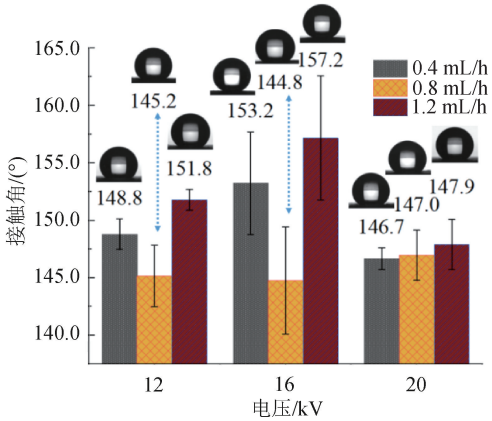


图 6 不同推进速率和电压下各试样的接触角测试结果

Fig. 6 Contact angle test results of samples with different advancing rates and spinning voltages

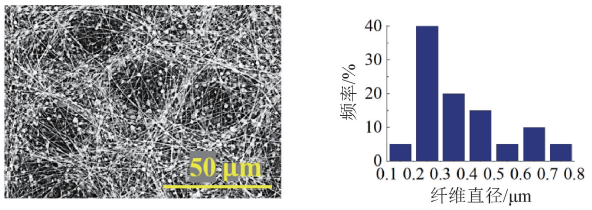
2.4 正交试验最佳纺丝工艺参数确定

静电纺丝法制备 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的主要工艺参数有:溶液质量分数、溶质质量比、推进速率、纺丝电压及接收距离等。为简化试验量并确定最佳工艺参数,采用正交试验法探讨溶液质量分数、溶质质量比及接收距离 3 个主要工艺参数对 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面疏水性及表面形貌的影响。正交试验因素水平设置如表 4 所示。根据三因素三水平正交试验表,设计正交试验方案,以接触角为测试指标进行疏水性试验,结果见表 5。试验结果表明,第(5)组样品的疏水性最好,接触角达 147.0°。

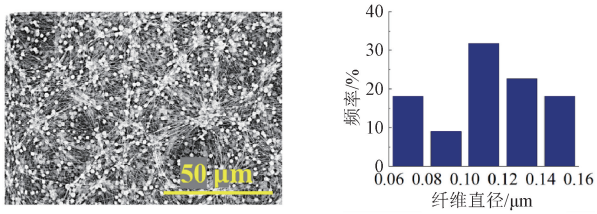
将各试验因子在不同水平下的接触角测试结果取平均值,计算得极差 R。R 越大,表明该因子对接触角的影响越大。正交试验的极差分析结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,PS-PU 复合纺丝液的溶液质量分数对超疏水表面疏水性能的影响大于溶质质量比和接收距离的影响。表 5 中最佳纺丝工艺为 $A_2B_2C_2$,即溶液质量分数为 5%、溶质质量比为 1:1、接收距离为 15 cm。采用该工艺制得的试样的接触角最大。然而,该接触角值小于溶液质量分数为 3%、溶质质量比为 1:1、静电纺丝电压为 16 kV,推进速率为 1.2 mL/h、接收距离为 15 cm 条件下制得的试样的接触角。由此可知,溶液质量分数也是静电纺丝中重要的工艺参数,溶液质量分数太高或太低均大幅影响纳米纤维表面的疏水性。

2.5 超疏水表面耐水冲击性

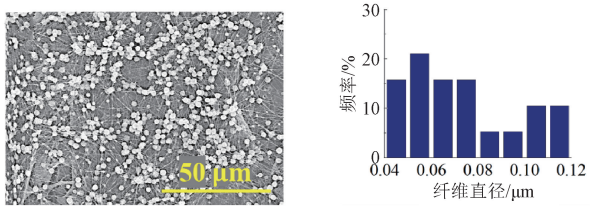
为进一步探究所制备的超疏水表面的耐久性,将试验所得接触角最大的超疏水表面(组号 8)水平



a) 0.4 mL/h



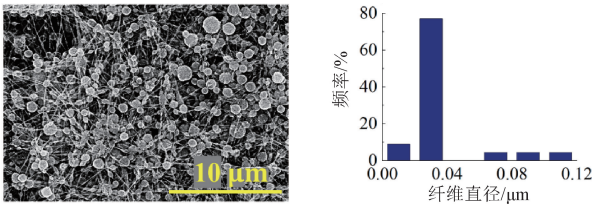
b) 0.8 mL/h



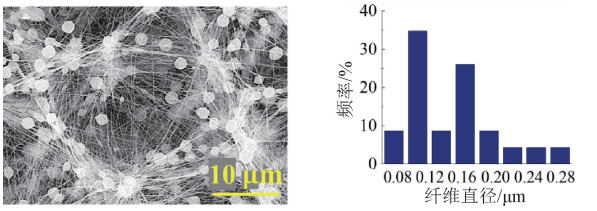
c) 1.2 mL/h

图 7 电压为 12 kV 时不同推进速率下试样表面 SEM 图与粒径分布图

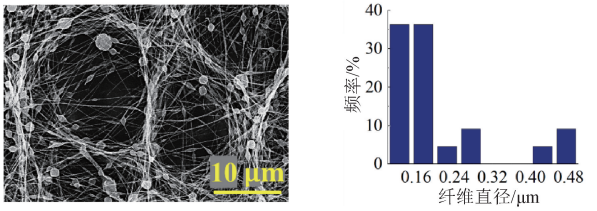
Fig. 7 SEM images and particle size distribution of samples with different flow rates at 12 kV voltage



a) 0.4 mL/h



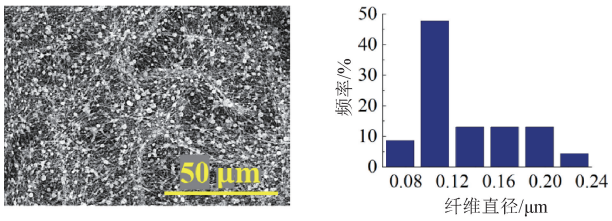
b) 0.8 mL/h



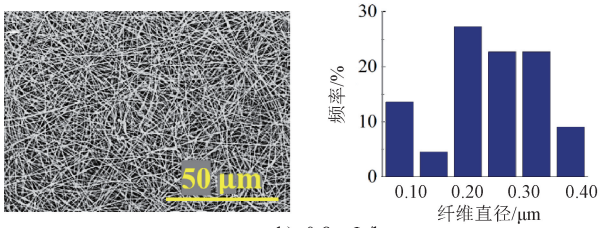
c) 1.2 mL/h

图 8 电压为 16 kV 时不同推进速率的样品表面 SEM 和粒径分布图

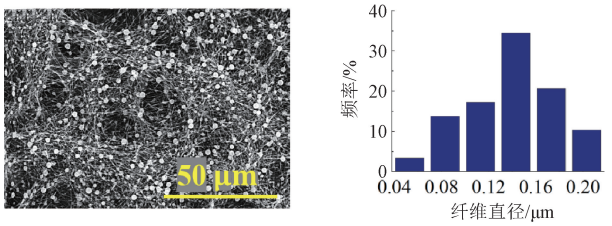
Fig. 8 SEM images and particle size distribution of samples with different flow rates at 16 kV voltage



a) 0.4 mL/h



b) 0.8 mL/h



c) 1.2 mL/h

图 9 电压为 20 kV 时不同推进速率的样品表面 SEM 和粒径分布图

Fig. 9 SEM images and particle size distribution of samples with different flow rates at 20 kV voltage

表 4 正交试验因素水平表

Tab. 4 Experimental gradient of each factor in orthogonal experiment

水平	试验因素		
	溶液质量分数(A)/%	m(PS)∶m(PU)(B)	接收距离(C)/cm
1	2	3∶1	12
2	5	1∶1	15
3	7	1∶3	18

倾斜 10° 后置于水流(水流速度为 1 mL/s)下方 5 cm 处接受水流冲击(图 10),每隔 1 min 测试 1 次接触角,结果如图 11 所示。由图 11 可以看出,水流冲击对超疏水表面的疏水性影响较小,随着水流冲击次数的增加,接触角有所下降,5 次水流冲击后,接触角由 157.2° 下降至 150.2°,原因是水流冲击过程中,试样表面结构遭破坏,疏水性下降。然而,受 5 次水流冲击后试样的接触角仍大于 150°,仍呈超疏水状态,表明该超疏水表面具有一定的耐水冲击性。

表 5 三因素三水平正交试验方案及接触角测试结果

Tab. 5 Three-factor three-level orthogonal test scheme and contact angle test results

组号	*A*	*B*	*C*	接触角/(°)
(1)	1	1	1	114.8
(2)	1	2	3	130.5
(3)	1	3	2	126.1
(4)	2	1	3	139.4
(5)	2	2	2	147.0
(6)	2	3	1	134.8
(7)	3	1	2	136.3
(8)	3	2	1	137.0
(9)	3	3	3	137.1

表 6 接触角的正交试验极差分析

Tab. 6 Range analysis of orthogonal test for contact angles

指标	试验因素		
	A	*B*	*C*
K_1	123.8	130.2	128.9
K_2	140.4	138.2	136.5
K_3	136.8	132.7	135.7
R	16.6	8.0	7.6

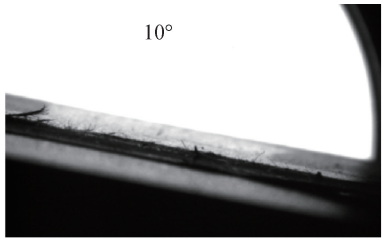


图 10 超疏水表面接受水流冲击示意图

Fig. 10 Schematic diagram of superhydrophobic surface receiving water shock

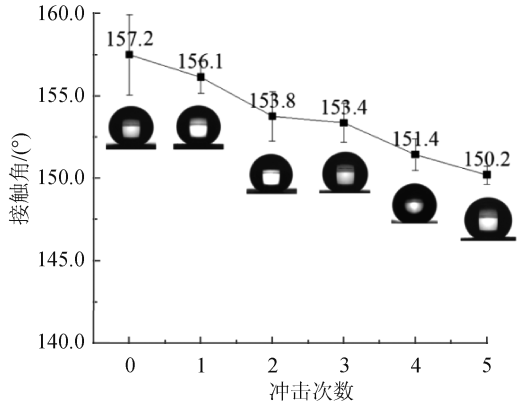


图 11 接触角随水流冲击次数的变化

Fig. 11 The change of contact angles with the number of water shocks

3 结论

本文通过静电纺丝技术一步法制备 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面,对制备方法及影响其疏水性的因素进行探究,并进一步测试了超疏水表面的耐久性。得出的结论主要如下所述。

(1)采用本文的方法能够一步法成功制备 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面。当溶液质量分数为 3%、*m*(PS):*m*(PU)= 1:1、静电纺丝电压为 16 kV、推进速率为 1.2 mL/h、接收距离为 15 cm 时,制得的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的超疏水性最佳,接触角最高可达 157.2°。

(2)溶液质量分数、溶质质量比、纺丝电压、推进速率及接收距离等因素均对 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面的疏水性有较大的影响,其中,溶液质量分数对超疏水表面疏水性能的影响大于溶质质量比和接收距离的影响。

(3)由超疏水表面的耐水冲击性测试结果可知,本文制得的 PS-PU 复合纳米纤维超疏水表面具有较好的耐水冲击性,可应用于户外防雾、自清洁等领域。

期刊采编平台 中国知网下载

参考文献

[1] XING R Z, HUANG R L, QI W, et al. Three-dimensionally printed bioinspired superhydrophobic PLA membrane for oil-water separation[J]. Aiche Journal, 2018, 64(10): 3700-3708.

[2] ZHANG X H, LYU J, YIN X Q, et al. Nanofibrous polystyrene membranes prepared through solution blow spinning with an airbrush and the facile application in oil recovery[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2018, 124(5): 362.

[3] 侯珂珂, 陈新华, 张万强, 等. 超疏水性棉织物的制备及其油水分离应用研究[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(9): 22-28.

[4] 谢爱玲, 乐昱含, 艾馨, 等. 茶多酚改性超疏水涤纶

织物制备及其在油水分离中的应用[J]. 纺织学报, 2022, 43(2): 162-170.

[5] 韦玲俐, 邹沁杉, 王璐, 等. 无氟自清洁功能型羊毛/羊绒混纺织物的研发[J]. 纺织学报, 2019, 40(9): 102-107.

[6] WANG F, GUO F Q, XUE Y, et al. Rapid fabrication of large-scale structurally colored PS@ SiO_2 films with enhanced self-cleaning capability[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2021, 18(2): 489-499.

[7] 刘亚东, 徐丽慧, 王黎明, 等. 基于纳米 CuS 制备超疏水抗紫外线棉织物[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(9): 40-45.

[8] 侯艺, 张佳文, 蔡英, 等. 超疏水抗紫外日间被动辐射制冷多孔涂层织物的制备及性能[J]. 丝绸, 2023, 60(10): 30-37.

[9] RUAN M, XU J J, FAN S L, et al. Effects of modifiers on the anti-wetting and anti-icing property of Aluminum surface[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2021, 36(1): 143-147.

[10] YU Y H, LIN Y Y, LIN C H, et al. High-performance polystyrene/graphene-based nanocomposites with excellent anti-corrosion properties[J]. Polymer Chemistry, 2014, 5(2): 535-550.

[11] GRUBE S, SIEGMANN K, HIRAYAMA M. A moisture-absorbing and abrasion-resistant transparent coating on polystyrene [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2015, 12(4): 669-680.

[12] SHANG Q Q, ZHOU Y H. Fabrication of transparent superhydrophobic porous silica coating for self-cleaning and anti-fogging[J]. Ceramics International, 2016, 42(7): 8706-8712.

[13] 王战胜. 超疏水自清洁涂层的研究进展[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(13): 183-185.

[14] FANG C, JING Y, ZONG Y J, et al. Preparation and characterization of fluorine-containing acrylic latex PSAs using a reactive surfactant [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2016, 192: 113-119.

[15] 李卢祎, 翁睿, 王文波, 等. SiO_2/含硅氟苯丙乳液超疏水涂层制备与热稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(6): 28-33.

[16] 李小燕, 安秋凤, 焦岚姣. 无氟超疏水自清洁织物的制备及性能[J]. 印染, 2023, 49(7): 17-21.

[17] XUE X Y, TAN G M, ZHU Z G. All-polymer and self-roughened superhydrophobic PVDF fibrous membranes for stably concentrating seawater by membrane distillation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(38): 45977-45986.

[18] 刘谦, 李新梅, 杨现臣, 等. 超疏水 PS/PAN 复合纳米纤维的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(10): 124-127.

[19] HU X H, CHEN X, GIAGNORIO M, et al. Beaded electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF) membranes for membrane distillation (MD) [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 661:120850.

[20] LIU K, ZHENG Y S, GE C, et al. Preparation and formation mechanism of electrospun porous beaded fibers [J]. Aatcc Journal of Research, 2022, 9(3): 134-142.

[21] YU Y B, WANG Q, DAI J F, et al. One-step morphology control synthesis of coaxial $MgCo_2O_4$@Mn_2O_3 hollow core-shell structures by electrospinning[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2023, 351: 112489.

[22] BAYKARA T, TAYLAN G. Coaxial electrospinning of PVA/Nigella seed oil nanofibers: processing and morphological characterization [J]. Materials Science and Engineering B: Advanced Functional Solid-State Materials, 2021, 265:115012.

[23] WOO Y C, YAO M W, SHIM W G, et al. Co-axially electrospun superhydrophobic nanofiber membranes with 3D-hierarchically structured surface for desalination by long-term membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 623:119028.

[24] WANG L F, YANG S Y, WANG J, et al. Fabrication of superhydrophobic TPU film for oil-water separation based on electrospinning route[J]. Materials Letters, 2011, 65(5): 869-872.

[25] HOODA A, GOYAT M S, PANDEY J K, et al. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of superhydrophobic coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 142: 105557.

[26] ZHAO H, GAO W C, LI Q, et al. Recent advances in superhydrophobic polyurethane: preparations and applications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 303:102644.

[27] LYU J, YIN X Q, LI R G, et al. Superhydrophobic PCL/PS composite nanofibrous membranes prepared through solution blow spinning with an airbrush for oil adsorption [J]. Polymer Engineering and Science, 2019, 59: E171-E181.

(下转第 53 页)