



ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 制备及其抗菌抗紫外性能

夏月,孙辉,于斌

(1. 浙江理工大学纺织科学与工程学院(国际丝绸学院),杭州 310018;

2. 浙江省现代纺织技术创新中心,浙江绍兴 312000)

摘要:为获得具有优异抗菌和抗紫外性能的聚丙烯(PP)熔喷非织造材料,采用溶胶—凝胶法制备纳米氧化锌(ZnO),然后通过聚多巴胺(PDA)和聚乙烯亚胺(PEI)对 PP 进行表面亲水处理,获得改性 PP 熔喷材料(M-PP),通过浸渍法将壳聚糖(CS)和 ZnO 依次负载在改性后的 M-PP 上,制备得到 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料;对 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料进行形貌、结晶结构、抗菌和抗紫外性能分析。结果表明:通过溶胶—凝胶法制备的纳米 ZnO 为梭状形貌,长度为 200~600 nm,结晶结构完整,ZnO 与 CS 均匀分布在 M-PP 的表面;随着 ZnO 质量浓度的增加,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率随之提高,紫外线防护系数(UV protection factor, UPF)值也随之增加;当 ZnO 负载质量浓度为 2 mg/mL 时,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率可达 99.99%,UPF 值为 139.97。

关键词:聚丙烯熔喷非织造材料;结晶结构;壳聚糖;氧化锌;抗菌性能;抗紫外性能

中图分类号: TS176

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)11-0674-07

引文格式:夏月,孙辉,于斌. ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的制备及其抗菌抗紫外性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(6):674-680.

Reference Format: XIA Yue, SUN Hui, YU Bin. Preparation of ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials and their antibacterial and UV resistance properties[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(6): 674-680.

Preparation of ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials and their antibacterial and UV resistance properties

XIA Yue, SUN Hui, YU Bin

(1. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To obtain polypropylene (PP) melt-blown nonwoven materials with excellent antibacterial and UV resistance properties, nano zinc oxide (ZnO) was synthesized by the sol-gel method. Then PP was first treated with polydopamine (PDA) and polyethylene imine (PEI) to improve its surface hydrophilicity and modified melt-blown materials (M-PP) were obtained. Subsequently, chitosan (CS) and ZnO were loaded on the surface of M-PP by the impregnation method and ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials were prepared. The morphology, crystalline structure, and antibacterial and UV resistance properties of the ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials were analyzed. The results show that ZnO nanoparticles with a length in the range of 200 to 600 nm have a fusiform morphology, the crystalline

收稿日期: 2023-02-27 网络出版日期: 2023-05-05

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LTGS23E030005)

作者简介: 夏月(1996—),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事非织造材料方面的研究。

通信作者: 孙辉, E-mail: wlzxjyw@126.com

structure is perfect, and ZnO and CS are evenly distributed on the surface of M-PP. With the increase of the loading concentration of ZnO, the antibacterial efficiencies of ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* and the UV protection factor (UPF) value also increase. When the loading concentration of ZnO is 2 mg/mL, the antibacterial efficiencies of ZnO/CS@M-PP composite melt-blown materials against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* can reach 99.99%. At this time, the UPF value of the composite melt-blown materials is 139.97.

Key words: polypropylene melt-blown nonwoven material; crystalline structure; chitosan; zinc oxide; antibacterial property; UV resistance property

0 引 言

聚丙烯(Polypropylene, PP)熔喷非织造材料是由超细纤维固结而成的三维网状立体结构的材料,具有质量轻、透气性好、耐化学性好以及成本低等特点,广泛应用于医疗卫生材料、保暖材料、吸油材料、过滤材料和电池隔膜材料等领域^[1-3]。由于PP大分子结构中没有亲水基团,表面能低,疏水性强,其表面容易吸附蛋白质和多糖,细菌的附着会导致其表面易生物污染^[4-5]。此外,PP大分子主链结构中存在叔碳原子,在光照条件下容易出现脆化、发黄等老化现象,影响了PP的使用寿命^[6-7],制约了PP熔喷非织造材料的应用。因此,提高PP熔喷非织造材料的抗菌性能和抗紫外性能已经引起人们的广泛关注。

壳聚糖(Chitosan, CS)是一种环境友好型生物高分子材料,来源于脱乙酰甲壳质,具有良好的生物降解性、生物相容性、抗菌性和成膜性等优异性能,广泛应用于生物医学领域,如抗菌剂、药物传递载体、伤口敷料以及组织工程支架材料等^[8-10]。单一组分CS的抗菌性有限,且存在机械性能低、结晶度低和热稳定性差等缺点,限制了其应用^[11]。为了解决上述问题,可以利用CS分子中含有大量氨基和羟基的特点,与金属离子发生螯合作用进一步增强抗菌活性。

纳米氧化锌(Zinc oxide, ZnO)是一种常见的宽禁带半导体金属氧化物,尺寸小、比表面积大以及良好的生物相容性、热稳定性和化学稳定性,表现出良好的抗紫外性、光催化性能^[12-14]。迄今为止,纳米ZnO的制备方法主要有沉淀法、溶剂热法、溶胶—凝胶法、电化学法和微乳液法等^[15-16]。此外,纳米ZnO是一种无机抗菌剂,具有广谱的抗菌性能以及良好的生物吸收性和抗氧化性,且对人体无毒,已经成为纺织品抗菌领域的一个新的研究热点^[17]。艾纯金等^[18]采用溶剂热法制备了球状纳米ZnO,通过振荡浸渍方式将ZnO负载在PP熔喷布上,发现整

理后的PP熔喷布对大肠杆菌的抑菌圈明显,并且菌落数远少于PP基布的菌落数量,具有良好的抗菌性能。Zhang等^[19]采用水热法在PP NWFs表面生长ZnO纳米棒,经ZnO纳米棒包覆的PP对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率分别为99.5%和99.9%,具有良好的抗菌活性;处理后的PP NWFs的紫外线防护系数(UV protection factor, UPF)值大于100,对UVA和UVB的透过率分别为0.51%和0.09%,具有良好的紫外线防护性能。由于CS和ZnO都是具有优良的生物相容性的抗菌材料,同时使用可以取长补短,发挥两者的优异特性。因此,将天然抗菌剂CS与无机抗菌剂ZnO结合,对PP熔喷材料进行表面改性,可赋予其良好的抗菌和抗紫外性能。

本文用溶胶—凝胶法,以醋酸锌二水合物为前驱体制备ZnO,通过聚多巴胺(Polydopamine, PDA)和聚乙烯亚胺(Polyethylene imine, PEI)对PP表面进行亲水改性以制备出M-PP。将质量分数为1%的CS负载在M-PP上,制备出CS@M-PP,再将不同质量浓度的ZnO负载在CS@M-PP上,制备出ZnO/CS@M-PP复合熔喷材料。分析对ZnO/CS@M-PP复合熔喷材料的形貌、结晶结构、抗菌性能和抗紫外性能,探究不同质量浓度的ZnO对PP熔喷材料的影响,期望为PP熔喷非织造材料的多功能化改性和其应用领域的拓展提供理论依据。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

试剂:PP熔喷非织造材料(克重为40 g/m²)购于浙江省温州瑞安市舒佳特无纺布有限公司;醋酸锌(99.99%)、十六烷基三甲基溴化铵(99%)、三羟甲基氨基甲烷(AR)和盐酸多巴胺(AR)购自上海阿拉丁生化科技有限公司;聚乙烯亚胺和壳聚糖(CS, 脱乙酰度≥95%)购自上海麦克林生化科技有限公

司;氢氧化钠(AR)购自天津市永大化学试剂有限公司;盐酸(AR)购自杭州双林化工试剂有限公司;冰醋酸和无水乙醇购自杭州高晶精细化工有限公司;金黄色葡萄球菌和大肠杆菌购自北京保藏生物科技有限公司。

实验仪器:型集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101 S型,杭州惠创仪器设备有限公司);热场发射扫描电子显微镜(Ultra55型,德国 ZEISS 有限公司);视频接触角测定仪(Y-82型,承德鼎盛试验机检测设备有限公司);X射线粉末衍射仪(D8 discover型,布鲁克 AXS 有限公司);纺织品抗紫外因子测试仪(美国 Labsphere 公司);超声波清洗器(KQ3200型,昆山市超声仪器有限公司);医用离心机(盐城市凯特实验仪器有限公司)。

1.2 样品准备

1.2.1 ZnO 的制备

称取 0.4 g 十六烷基三甲基溴化铵溶于 200 mL 的去离子水,在磁力搅拌下充分溶解;称取 0.2 g 醋酸锌溶于 20 mL 的去离子水,将上述两种溶液充分混合搅拌,置于 60 °C 的水浴锅加热搅拌,待混合溶液的温度稳定后,配置 30 mL 的 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液,以 0.5 mL/min 的速度均匀滴加该混合溶液;滴加完成后继续加热搅拌 1 h,在室温下,依次用无水乙醇和去离子水洗涤一次,离心转速为 8000 r/min,离心时间为 5 min,混合溶液离心分离得到产物,产物置于 60 °C 的烘箱中烘干,获得白色的粉末样品。

1.2.2 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的制备

分别称取 0.2 g DA 和 0.2 g PEI 同时溶于 0.01 mol/L、pH 值为 8.5 的三羟甲基氨基甲烷缓冲溶液中,将 PP 熔喷非织造布剪成 4.0 cm × 4.0 cm,浸入上述混合溶液中,室温下磁力搅拌 4 h。反应结束后取出清洗,50 °C 低温干燥,制备得到 M-PP。称取 1 g CS 溶于 100 mL 体积分数为 2% 的醋酸溶液中,将 M-PP 放入 CS 混合溶液的烧杯中,在 37 °C 恒温水浴反应 6 h,取出清洗并烘干,制备得到 CS@M-PP。分别称取 5.0、10.0、15.0 mg 和 20.0 mg 的 ZnO 粉末放入 10 mL 乙醇中超声处理 30 min,将 CS@M-PP 熔喷材料分别放入上述 ZnO 分散液继续超声处理 30 min,使得 ZnO 粉末负载在 CS@M-PP 上,最后将复合熔喷材料置于 50 °C 的烘箱中烘干,得到负载不同质量浓度的 ZnO 的 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料,依次标记为 ZnO-0.5、ZnO-1、ZnO-1.5 和 ZnO-2。

1.3 测试与表征

1.3.1 表面形貌观察

采用热场发射扫描电子显微镜观察 ZnO 粉末、PP 及其复合熔喷非织造材料的表面形貌;样品剪成 4 mm × 4 mm 的大小,测试前使用离子溅射仪对样品进行镀金处理,扫描电压为 3.0 kV;采用 X 射线能谱仪对 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的表面进行元素分析,分析 ZnO 的负载情况。

1.3.2 结晶结构测试

采用 X 射线粉末衍射仪分别测试 ZnO 粉末、PP 及 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的晶体结构,测试条件:电流为 40 mA,电压为 40 kV,扫描速度为 5(°)/min,扫描范围 10°~80°。

1.3.3 接触角静态测试

采用 JY-82B 型视频接触角测定仪对 PP 及 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料表面的水接触角进行测试,记录样品接触角的变化,每组样品测试 3 次,取平均值。

1.3.4 抗菌性能测试

根据 GB/T 20944.3—2008《纺织品 抗菌性能的评价 第3部分:振荡法》,采用革兰氏阳性金黄色葡萄球菌和革兰氏阴性大肠杆菌作为实验菌种,对 PP 及 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的抗菌率进行测试。为减少误差,每组样品分别平行测试 3 次,取平均值,抗菌率的计算公式如式(1):

$$Y/\% = \frac{M-N}{M} \times 100 \quad (1)$$

其中:Y 为抗菌率,%;M 为对照样 24 h 后的平均菌落数,个;N 为测试样 24 h 后的平均菌落数,个。

1.3.5 抗紫外性能测试

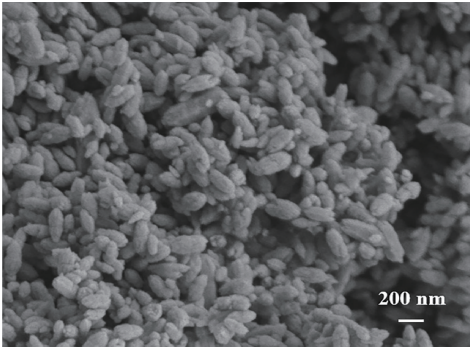
根据 GB/T 18830—2002《纺织品 防紫外线性能的评定》,使用纺织品抗紫外因子测试仪对 PP 及 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的抗紫外性能进行测试,以 UPF 值和紫外光透过率作为评价标准,当样品的 UPF 值大于 30,且长波紫外线(UVA)的透过率小于 5%时,表明非织造材料具有优异的紫外防护性能。为减少误差,每个样品测试 4 次,取平均值。

2 结果与讨论

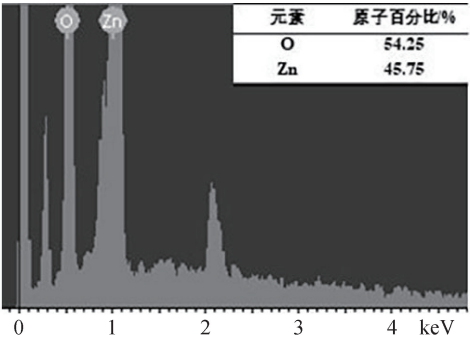
2.1 ZnO 的形貌结构分析

图 1 为 ZnO 的扫描电镜图、X 射线能谱图和 X 射线衍射图。从图 1(a)中可以看出,采用溶胶-凝胶法合成的纳米 ZnO 颗粒呈现两头尖、中间粗的梭状形貌,梭状 ZnO 颗粒的长度为 200~600 nm,截面直

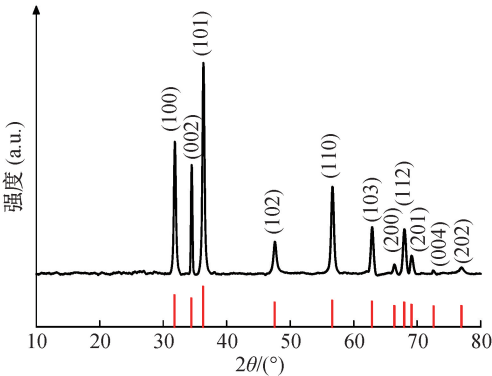
径为 100~300 nm,与文献[20]报道一致。从图 1(b)可以看出,纳米 ZnO 颗粒由 Zn 和 O 两种元素组成,且 Zn 元素和 O 元素的原子百分比接近 1:1。从图 1(c)可以看出,本文制备的 ZnO 颗粒在 31.9°、34.5°、36.4°、47.6°、56.9°、63.0°、68.3°处出现较强的特征衍射峰,与 ZnO 的标准谱图(PDF # 89-0510)较为吻合,分别对应于(100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)、(112)晶面^[21]。此外,衍射峰尖锐,没有发现其他杂质物相的衍射峰,表明合成的产物为六方纤锌矿结构的 ZnO,且结晶度高,产物较为纯净。



(a) ZnO 的扫描电镜图



(b) ZnO 的X射线能谱图



(c) ZnO 的X射线衍射图

图 1 ZnO 的扫描电镜图、X 射线能谱图和 X 射线衍射图

2.2 表面形貌分析

图 2 为 PP、M-PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的扫描电镜图。从图 2(a)可以看出,PP 的纤维表面光滑,纤维之间相互缠绕,具有较高的孔隙

率,有利于分子内部的扩散和传递。从图 2(b)可以看出,经过 PDA 和 PEI 改性后的 M-PP 表面也呈现均匀光滑的结构,其原因是 PDA 与 PEI 反应可以破坏多巴胺自聚合过程中的非共价键的相互作用,抑制了聚集体的形成,在 PP 纤维上可形成一层均匀的膜^[22]。从图 2(c)—(f)可以看出,负载 CS 和 ZnO 后,纤维表面仍较为光滑,并且存在纳米级的颗粒,表明 CS 在 M-PP 上均匀成膜,而纳米 ZnO 成功负载在 CS@M-PP 熔喷材料表面,且随着 ZnO 质量浓度的增加,熔喷材料纤维表面负载的 ZnO 颗粒也随之增加。

2.3 表面元素分析

为进一步分析 ZnO 在熔喷材料表面的负载情况,采用 EDS 对样品表面元素质量分数进行分析,得到的结果见表 1。从表 1 中可以看出,未经整理的 PP 熔喷材料除了含有 H 元素,还含有 C 元素;经过 CS 和 ZnO 负载后,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的纤维表面除了 C、O 元素,还出现了 Zn 元素,进一步证实了 ZnO 粒子成功负载在 PP 表面;随着 ZnO 质量浓度的增加,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料表面的 Zn 元素质量分数从 2.22%提高到 8.08%。

2.4 结晶结构分析

图 3 为 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 XRD 图。从图 3 可以看出,PP 熔喷非织造材料在 14.2°、17.1°、18.7°、21.8°处附近出现较强的衍射峰,分别对应于 PP 的 α 晶型 (110)、(040)、(130)、(131) 晶面^[23],负载了不同质量浓度的 ZnO 后,所有 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料在 31.9°、34.5°、36.4°处出现了 3 个衍射峰,分别对应于 ZnO 的(100)、(002)、(101)晶面。随着 ZnO 质量浓度的增加,在 47.6°、56.9°、63.0°、68.3°处出现 4 个新的衍射峰,分别对应着 ZnO 的(102)、(110)、(103)和(112)晶面^[24],以上结果证实了 ZnO 存在于 CS@M-PP 表面,且保持着良好的结晶度。

2.5 接触角静态分析

图 4 为 PP 和 M-PP 熔喷材料与水的接触角图。从图 4 中可以看出,PP 的水接触角为 132.7°,这是因为 PP 表面没有亲水基团,PP 熔喷材料表现为较强的疏水性,不利于 PP 的表面改性;经过 PDA 和 PEI 改性后,当水滴接触 M-PP 熔喷材料后,立刻被完全吸收,材料表面的水接触角降低接近 0°,表现出优异的亲水性,其原因是 PDA 分子上的邻苯二酚基团中的羟基和氨基等亲水基团与 PEI 分子上的氨基的协同作用,可以极大地改善 PP 熔喷材料的亲水性^[25]。

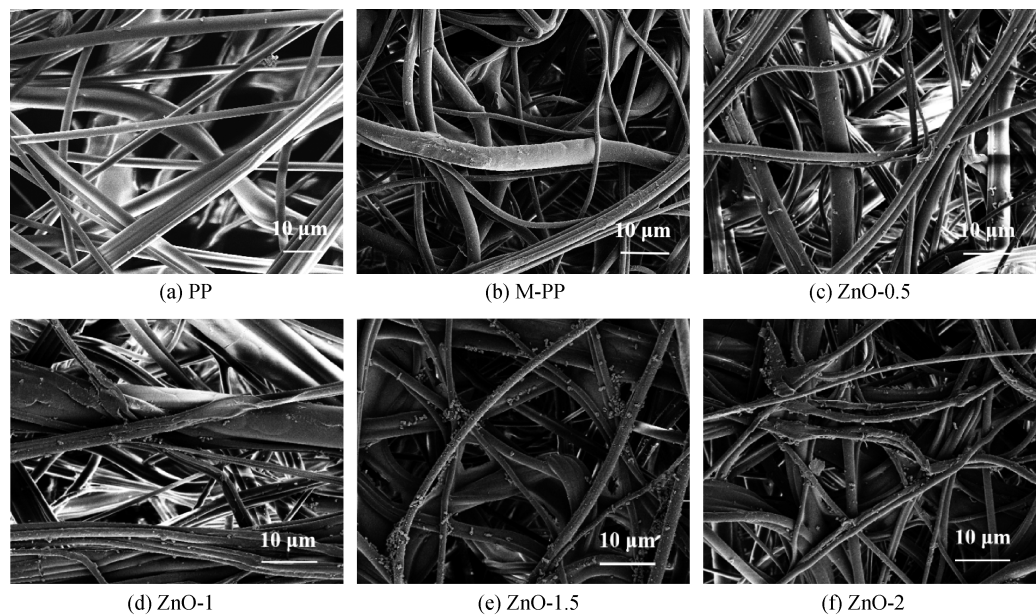


图 2 PP、M-PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的扫描电镜图

表 1 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的表面元素含量分析表

样品	元素质量分数/%		
	C	O	Zn
PP	100	0	0
ZnO-0.5	91.39	6.39	2.22
ZnO-1	90.62	5.52	3.86
ZnO-1.5	90.87	4.47	4.65
ZnO-2	86.13	5.79	8.08

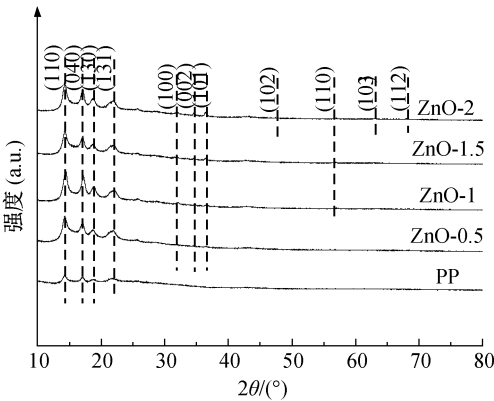


图 3 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 XRD 图谱

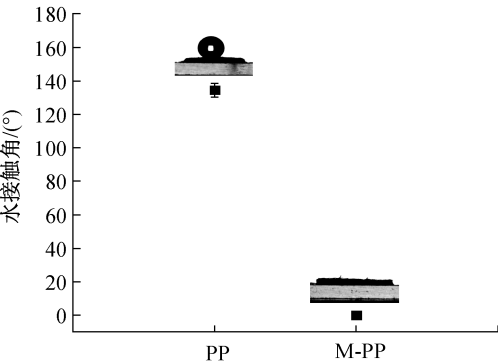


图 4 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的接触角图

2.6 抗菌性能分析

采用振荡法和菌落计数法分析 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌抗菌的抗菌率,结果如图 5、图 6 和表 2 所示。从图 5 和图 6 可以看出,PP 熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌没有抗菌性,细菌正常繁殖。当 ZnO 质量浓度增加时,培养皿中对 2 种细菌的菌落数逐渐减少。从表 2 可以看出,经过 CS 和 ZnO 整理后,随着 ZnO 质量浓度的增加,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌率也随之增加。当 ZnO 的质量浓度达到 2 mg/mL 时,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌率均达到 99.99%,具有优异的抗菌性能。因此,CS 和纳米 ZnO 的共同负载赋予了 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料优异的抗菌活性。

2.7 抗紫外性能分析

图 7 为 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 UPF 值、UVA 和 UVB 的紫外透过率。从图 7 中可以看出,PP 的 UPF 值为 6.90,UVA 和 UVB 的紫外透过率分别为 18.72%和 10.72%,具有较低的紫外防护能力;经表面改性和 CS 负载后,CS@M-PP 熔喷材料的 UPF 值增加到 45.45,是由于 PDA 的化学结构类似于黑色素,可以吸收部分紫外线辐射和捕获活性自由基,缓解 PP 材料的紫外光降解,起到一定的防紫外线作用^[26];经过 CS 和纳米 ZnO 共同负载后,ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 UPF 值随着 ZnO 质量浓度的增加而增大,最大

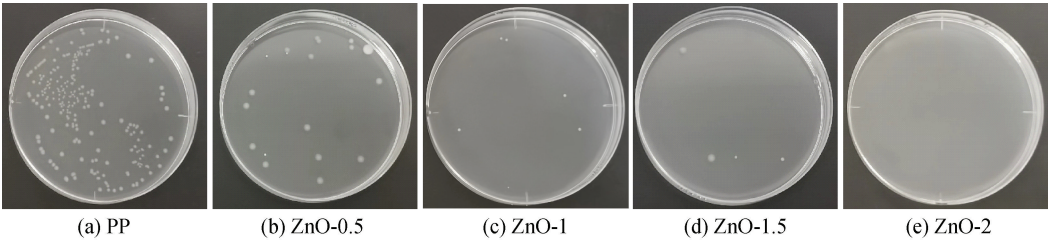


图 5 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌的测试照片

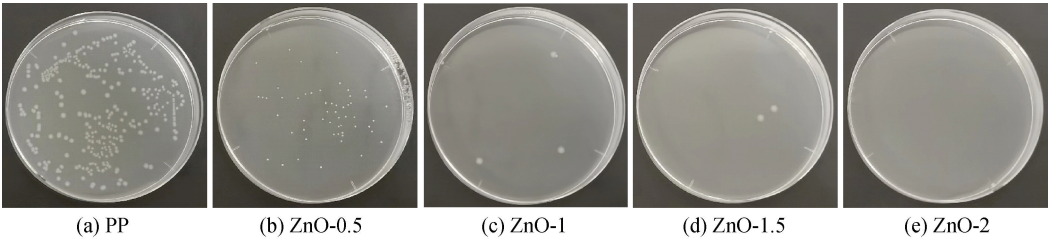


图 6 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对大肠杆菌的测试照片

表 2 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率

样品	金黄色葡萄球菌/%	大肠杆菌/%
PP	0	0
ZnO-0.5	87.76±5.10	81.99±1.16
ZnO-1	97.55±0.41	99.04±0.19
ZnO-1.5	98.37±0.24	99.37±0.18
ZnO-2	99.99±0.03	99.99±0.05

UPF 值为 139.97, 而其 UVA 和 UVB 的紫外透过率不断减小, 是由于纳米 ZnO 具有优异的紫外线屏蔽性能, 对紫外线具有很强的吸收和散射能力。因此, 4 个样品均符合纺织品防紫外线性能评定的标准, 纳米 ZnO 处理赋予了 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料优异的抗紫外性能。

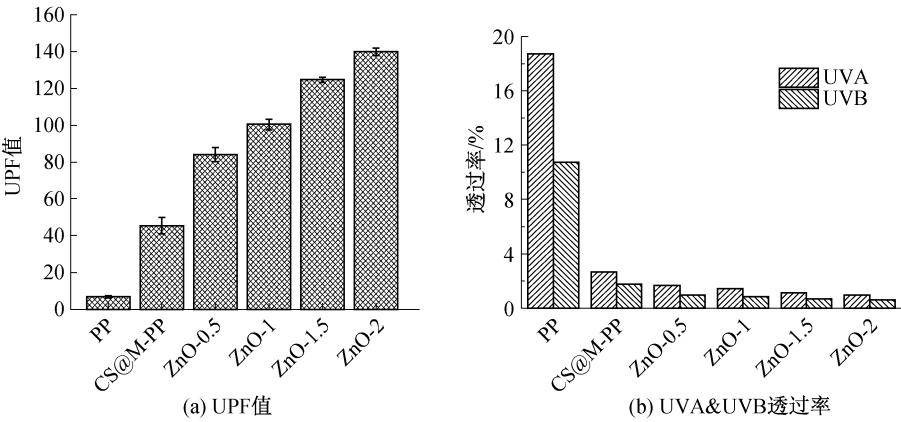


图 7 PP 和 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料的 UPF 值 UVA&UVB 的紫外透过率

3 结 论

本文以醋酸锌二水合物为前驱体制备纳米 ZnO, 将 CS 和不同质量浓度的 ZnO 先后负载在 M-PP 上, 制备 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料, 通过测试与分析探究不同质量浓度的 ZnO 对 PP 熔喷材料的影响, 得出的结论如下:

a) 采用溶胶—凝胶法成功合成了 ZnO 颗粒, 颗粒呈现中间粗、两头尖的梭状形貌, 长度为 200~600 nm, 截面直径为 100~300 nm, 结晶结构完整, 纯度较高。

b) 与 PP 相比, 经过 PDA 和 PEI 改性后亲水性显著增强, 经过 CS 和 ZnO 表面负载后, CS 包裹在 M-PP 的纤维表面形成一层膜, 纳米 ZnO 颗粒均匀地分布在被 CS 膜包裹的纤维表面, 形成 ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料; 复合熔喷材料中 PP 的结晶结构未有变化, 呈现明显的 ZnO 特征衍射峰。

c) ZnO 的质量浓度为 2 mg/mL 时, ZnO/CS@M-PP 复合熔喷材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌率均达到 99.99%, UPF 值为 139.97, UVA 和 UVB 分别为 1.00% 和 0.61%, 具有较低的紫外透过率。

参考文献:

- [1] Zhang H J, Zhang L X, Han X L, et al. Guanidine and amidoxime cofunctionalized polypropylene nonwoven fabric for potential uranium seawater extraction with antifouling property [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(5): 1662-1670.
- [2] 刘延波, 陈倩, 杨波, 等. 超疏水亲油 PDMS@mSiO₂-PP 非织造布的制备及其油水分离性能[J]. *天津工业大学学报*, 2022, 41(6): 29-35.
- [3] 丁大欢. 聚丙烯纤维在电池隔膜材料生产上的应用[J]. *化工管理*, 2021(32): 11-12.
- [4] Xin Z R, Du S S, Zhao C Y, et al. Antibacterial performance of polypropylene nonwoven fabric wound dressing surfaces containing passive and active components [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 365: 99-107.
- [5] Ma Y, Wisuthiphaet N, Bolt H, et al. N-halamine polypropylene nonwoven fabrics with rechargeable antibacterial and antiviral functions for medical applications [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2021, 7(6): 2329-2336.
- [6] Ma R Y, Tang P G, Feng Y J, et al. UV absorber co-intercalated layered double hydroxides as efficient hybrid UV-shielding materials for polypropylene [J]. *Dalton Transactions*, 2019, 48(8): 2750-2759.
- [7] Li Y, Chen X, Liu Q, et al. Constructing cross-functional intumescent flame retardants with UV resistance for polypropylene composites [J]. *Materials Today Chemistry*, 2022, 26: 101048.
- [8] 陈鹏, 王耐艳, 郑莹莹. 壳聚糖-聚氧化乙烯@明胶纤维制备及其生物性能探究[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 56-64.
- [9] Mathew S A, Arumainathan S. Crosslinked chitosan-gelatin biocompatible nanocomposite as a neuro drug Carrier [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(22): 18732-18744.
- [10] Khoerunnisa F, Nurhayati M, Dara F, et al. Physicochemical properties of TPP-crosslinked chitosan nanoparticles as potential antibacterial agents [J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(11): 2954-2964.
- [11] Ulu A, Birhanlı E, Köytepe S, et al. Chitosan/polypropylene glycol hydrogel composite film designed with TiO₂ nanoparticles; A promising scaffold of biomedical applications [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 529-540.
- [12] Ma L X, Zhang J W, Teng C Q. Covalent functionalization of aramid fibers with zinc oxide nanointerphase for improved UV resistance and interfacial strength in composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 188: 107996.
- [13] Liu D, Song J N, Chung J S, et al. ZnO/boron nitride quantum dots nanocomposites for the enhanced photocatalytic degradation of methylene blue and methyl orange [J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 6833.
- [14] Zahra M, Ullah H, Javed M, et al. Synthesis and characterization of polyurethane/zinc oxide nanocomposites with improved thermal and mechanical properties [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2022, 144: 109916.
- [15] Mahmood N B, Saeed F R, Gbashi K R, et al. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles via oxalate co-precipitation method [J]. *Materials Letters: X*, 2022, 13: 100126.
- [16] 景欣瑞, 史翔, 杜慧玲, 等. 电化学法合成氧化锌/聚苯胺复合多孔薄膜的湿敏传感特性 [J]. *传感技术学报*, 2020, 33(3): 335-339.
- [17] Ye K, Huang M R, He X J, et al. Synergistic antibacterial effect of zinc oxide nanoparticles and polymorphonuclear neutrophils [J]. *Journal of Functional Biomaterials*, 2022, 13(2): 35.
- [18] 艾纯金, 李栋, 张定军, 等. 负载纳米氧化锌聚丙烯熔喷布的制备及其抗菌性能研究 [J]. *塑料科技*, 2022, 50(12): 63-68.
- [19] Zhang G Y, Cheng R, Yan J W, et al. Photodegradation property and antimicrobial activity of zinc oxide nanorod-coated polypropylene nonwoven fabric [J]. *Polymer Testing*, 2021, 100: 107235.
- [20] 刘慧颖, 乔宇, 石波, 等. 不同形貌氧化锌微/纳米颗粒对食源性致病菌的抑菌研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(5): 140-147.
- [21] 贾雯, 程鑫, 袁小亚. 片状 ZnO/还原氧化石墨烯复合材料的制备及其可见光降解亚甲基蓝性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50(1): 171-176.
- [22] 苏婉, 张文娟, 张宇峰. PDA 与 PEI 共沉积和分步沉积方法对纳滤膜性能的影响 [J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(3): 14-21.
- [23] 樊婷玥, 任煜, 赵紫瑶, 等. Ag₆Si₂O₇-TiO₂/PP 复合光催化材料的制备及其抗菌性能 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 3915-3921.
- [24] 汪媛, 张耀磊, 彭勇刚, 等. 氧化锌溶胶的制备及防紫外线性能的研究 [J]. *针织工业*, 2018(6): 31-35.
- [25] Zhou Q Y, Liu S H, She J G, et al. In-situ aeration-assisted polydopamine/polyethyleneimine copolymerization and deposition for rapid and uniform membrane modification [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 657: 120662.
- [26] Xu W Q, Lv Y D, Kong M Q, et al. In-situ polymerization of eco-friendly waterborne polyurethane/polydopamine-coated graphene oxide composites towards enhanced mechanical properties and UV resistance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133942.