

文章编号: 1671-0444(2018)06-0859-09

多肽改性二醋酸纤维素纳米纤维的制备及抗菌性能

邴绍苗^{a, b}, 熊健^{a, b}, 覃小红^{a, b}, 张弘楠^{a, b}

(东华大学 a. 上海市微纳米纺织重点实验室; b. 纺织学院, 上海 201620)

摘要: 通过固相合成技术合成抗菌多肽(peptide), 将其接枝到二醋酸纤维素(CDA)上, 成功制备了改性二醋酸纤维素(CDA-g-peptide)。通过静电纺丝技术, 制备出二醋酸纤维素纳米纤维和改性二醋酸纤维素纳米纤维。扫描电子显微镜图显示, CDA 和 CDA-g-peptide 在外观形貌上存在一定差异。强力拉伸曲线表明, CDA 纳米纤维膜的断裂强力大于 CDA-g-peptide 纳米纤维膜的断裂强力, 但二者的断裂伸长率相近。以大肠杆菌和金黄色葡萄球菌为代表, 研究 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌性能及其抗菌稳定性, 试验结果表明, CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别为 98.4% 和 98.7%, 且经振荡处理不同时间后, 抑菌率没有显著下降。由此表明, CDA-g-peptide 纳米纤维具有稳定优异的抗菌性能, 在服用纺织品和医用纺织品领域具有潜在的应用前景及优势。

关键词: 抗菌多肽; 二醋酸纤维素; 静电纺丝; 抗菌性能

中图分类号: TQ 342.3 **文献标志码:** A

Preparation and Antibacterial Performance of Peptide Modified Cellulose Diacetate Nanofibers

BING Shaomiao^{a, b}, XIONG Jian^{a, b}, QIN Xiaohong^{a, b}, ZHANG Hongnan^{a, b}

(a. Key Laboratory of Micro-nano Textile of Shanghai;

b. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Based on the solid-phase synthesis technology, the antibacterial peptide was prepared. Then the antibacterial peptide was grafted onto the cellulose diacetate (CDA), so that the CDA-g-peptide was synthesized successfully. The nanofibers of both CDA-g-peptide and CDA were prepared separately by the electrostatic spinning technology. The scanning electron microscope (SEM) results demonstrated that the appearance of CDA-g-peptide nanofibers and CDA nanofibers were different. And the load-elongation curves also showed that the breaking strength of CDA nanofibers membranes was greater than that of CDA-g-peptide nanofibers membranes, but their breaking elongation showed little difference. The antibacterial properties of CDA-g-peptide nanofibers were tested with *S. aureus* and *E. coli*. And the bacteriostatic rates of CDA-g-peptide nanofibers to *S. aureus* and *E. coli* were 98.4% and 98.7% respectively. After oscillating treatment, the bacteriostatic rates had no significant decrease. It shows that CDA-

收稿日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172064); 长江学者(青年学者)计划资助项目(51373033); 教育部重点支持资助项目(113027A); 上海市科委“扬帆计划”资助项目(14Y1405100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 东华大学励志计划资助项目

作者简介: 邴绍苗(1992—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为微纳米抗菌材料开发, E-mail: bingshaomiao@163.com

覃小红(联系人), 女, 教授, E-mail: xhqin@dhu.edu.cn

g-peptide nanofibers have excellent antibacterial properties and stability, thus having potential application prospect and great advantage in the fields of clothing materials and biomedical textiles.

Key words: antibacterial peptide; cellulose diacetate; electrostatic spinning; antibacterial properties

纺织品在人体穿着过程中会粘染很多皮肤分泌物,同时也会受到环境污染物的影响,常常是微生物细菌繁殖和传递的重要媒介^[1]。若能为纺织品赋予一定的抗菌功能,则可有效避免纺织品因微生物侵蚀而出现的受损,还可以阻断病菌的传播途径^[2]。静电纺丝技术是近年兴起的一种简单有效的纳米纤维制备方法,采用静电纺丝生产抗菌纺织品的技术引起了医疗领域的极大关注^[3-8],但抗菌纺织品的抗菌稳定性往往达不到消费者的使用需求。

抗菌剂主要分为 3 类:天然抗菌剂、有机抗菌剂和无机抗菌剂。其中,天然抗菌剂主要包括甲壳质、壳聚糖^[9-11]以及抗菌性蛋白质等,无机抗菌剂主要有银沸石、银硅胶以及银活性炭等^[12-13],有机抗菌剂有季铵盐、胍类等。但无机和有机抗菌剂易造成环境污染,并对人体健康有一定危害作用,而且如使用时间较长、使用方法不规范将导致其抗菌效果逐渐丧失,进而导致耐药细菌甚至超级细菌的产生^[14]。大量研究证明,抗菌多肽(peptide)作为替代类抗菌药物,具有传统抗菌药物不可比拟的优势^[15],其主要通过物理作用破坏微生物细菌的磷脂双分子层而使细菌的细胞质组分渗漏,或者与细菌细胞内的蛋白质、核酸等物质反应进而导致细菌死亡,具有非特异性、适用范围广、效力持久稳定、不会产生耐药性的特点^[16]。

目前生产抗菌纺织品主要有两种方法:一是纺丝法,即在纺丝过程中加入抗菌物质,由抗菌纤维制成相应的抗菌纺织品^[17];二是后整理,即通过印花、浸渍、浸轧等方法将抗菌剂整理到织物上^[18]。但是经后整理处理得到的纺织品通常耐洗性较差,且织物原有的物化性能容易发生变化,而且由于抗菌剂只存在于纤维表面,其初期溶出量较大,存在穿着安全性问题^[19],并且在洗涤过程中抗菌剂易脱落,容易造成环境污染。因此,在静电纺丝过程中,学者们^[20-21]通过在纺丝液中掺入抗菌功能性纳米颗粒以实现纺织品的抗菌功能化处理,但这又存在由纺丝液中的纳米颗粒所带来的静电纺丝可纺性差、抗菌剂易流失、抗菌效率低、纤维力学性能差等问题^[22]。此外,动物试验证明,某些纳米抗菌颗粒对人体是有害的^[23-24]。

针对上述问题,选用化学接枝法将抗菌多肽接枝

到二醋酸纤维素(CDA)上,避免了由简单掺杂、共混纺丝等技术所导致的纳米粒子的不稳定性和聚集效应,提高了抗菌功能的均匀性和可靠持久性。通过静电纺丝制备改性二醋酸纤维素(CDA-g-peptide)纳米纤维,并对其外观形貌、力学性能、抗菌效果及抗菌效果的稳定性进行表征。静电纺丝二醋酸纤维素纤维生物相容性好、可降解、化学性质稳定、热稳定性好^[25],制成的纺织品透气、吸汗,同时具有低致敏性,可用于与皮肤直接接触的绷带、敷料以及家用纺织品等^[26]。改性二醋酸纤维素纳米纤维进一步拓展了其在抗菌功能纺织品领域的应用。

1 试验部分

1.1 试剂与原料

三氯三苯甲基氯树脂, HOOC-(R)CH-NH-Fmoc, N,N-二异丙基乙胺(DIEA), O-苯并三氮唑-四甲基脲六氟磷酸盐(HBTU), 1-羟基苯并三唑(HOBT), 吉尔生化上海有限公司; 哌啶, 茚三酮, N,N-二甲基甲酰胺(DMF), N,N-二甲基乙酰胺(DMAC), 二氯甲烷(DCM), 三氟乙酸(TFA), 无水乙醚, 丙酮, 无水乙醇, 丁二酸酐(SA), 三乙胺, 1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐(EDC), N-羟基琥珀酰亚胺(NHS), 国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均为分析纯。

二醋酸纤维素由南通醋酸纤维公司提供,呈白色粉粒状或片条状,取代度为 2.43,特性黏度为 1.45,数均相对分子质量为 8.4×10^4 。

1.2 试验过程

1.2.1 多肽的合成

抗菌多肽的合成路线如图 1 所示。多肽链从树脂上切落后,经抽滤、旋蒸浓缩,再用无水乙醚沉淀,将沉淀物真空干燥,得到抗菌多肽。

1.2.2 CDA-g-peptide 制备

CDA 纯化。称取一定量 CDA,将其溶解在丙酮中,再用无水乙醇沉淀,低温静置 12 h,抽滤后干燥。

CDA-g-SA 制备。称取 2.0 g 纯化 CDA,将其溶解于提纯丙酮中,加入 0.5 g SA,5 mL 三乙胺,将反应温度升至 65 °C 左右,反应 24 h。反应完后,用无水乙醇沉淀后干燥。其合成原理如图 2 所示。

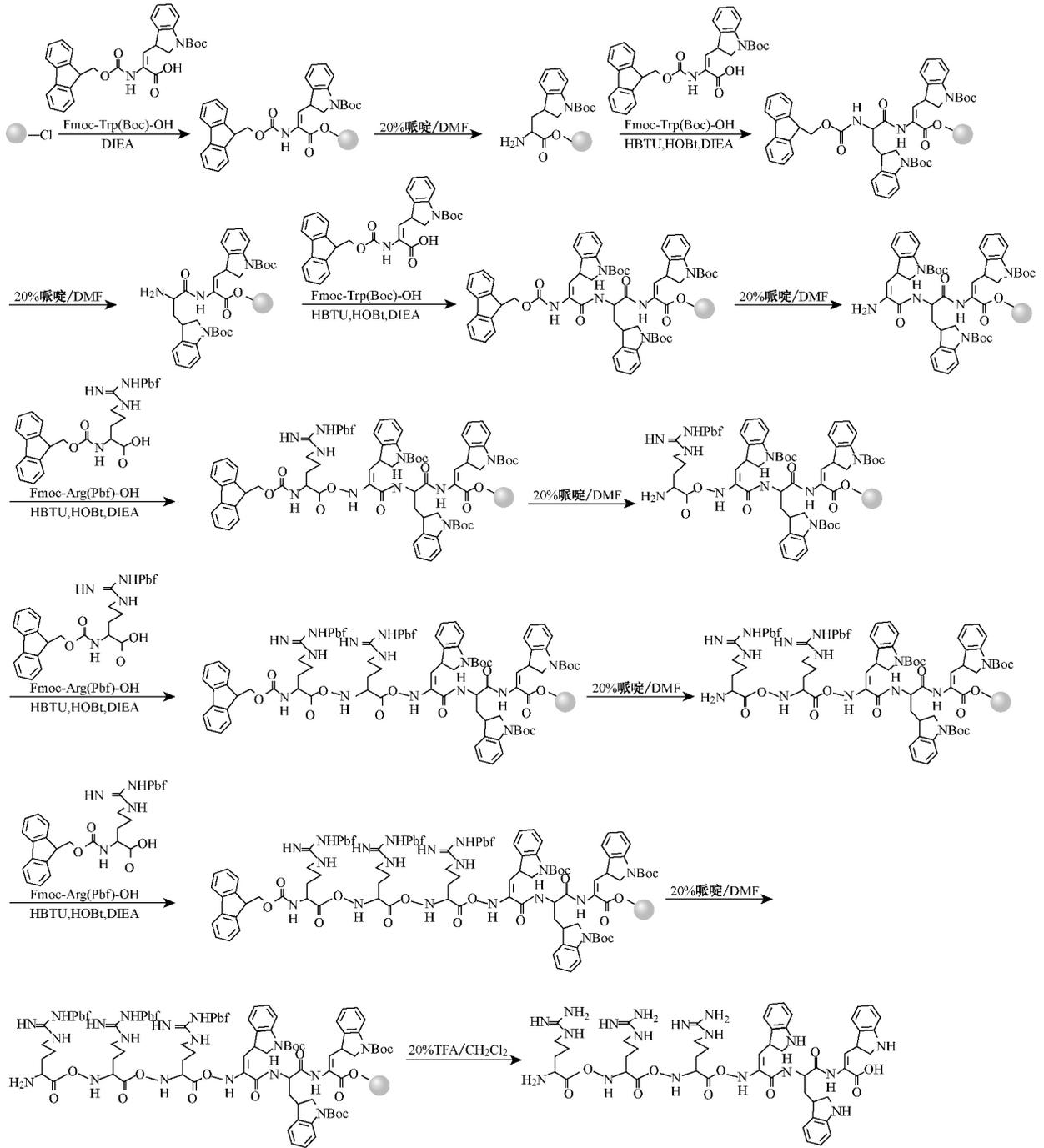


图 1 抗菌多肽的合成路线示意图

Fig 1 Synthetic processes of antibacterial peptide

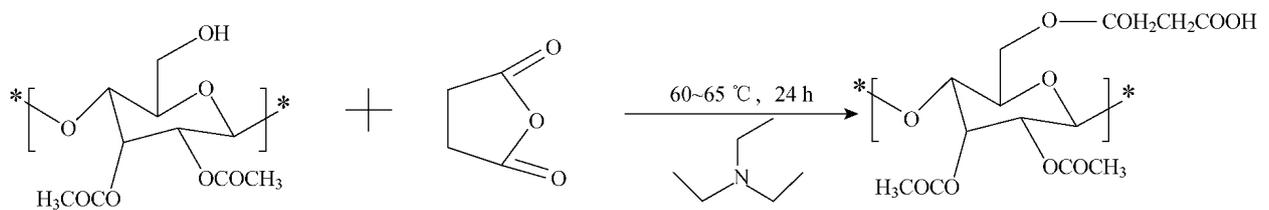


图 2 CDA-g-SA 的合成原理

Fig 2 The synthetic principle of CDA-g-SA

CDA 与抗菌多肽(peptide)接枝。称取 1.0 g CDA-g-SA,冰浴下溶解于干燥 DMF 中,加入 0.5 g EDC、0.4 g NHS,反应 12 h;然后将 0.2 g peptide

溶解在少量 DMF 中,转移至反应烧瓶中,反应 12 h。反应完后,用无水乙醇沉淀后干燥。CDA-g-peptide 合成原理如图 3 所示。

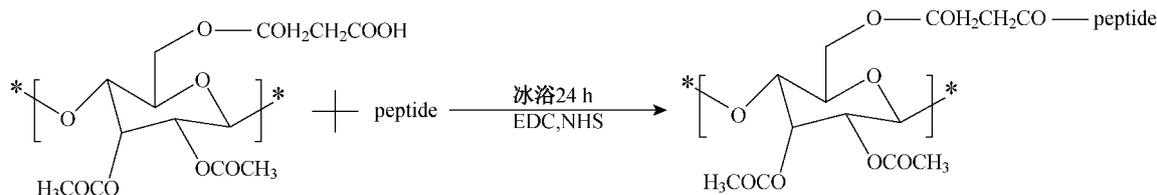


图 3 CDA-g-peptide 合成原理

Fig 3 The synthetic principle of CDA-g-peptide

1.2.3 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维制备

由前期预试验获得 CDA 和 CDA-g-peptide 两种溶液纺丝性能相对稳定的参数,溶剂体系选用(丙酮:DMAC=2:1)混合溶剂,溶质(CDA 或 CDA-g-peptide)的质量分数为 10%。称取一定量的 CDA、CDA-g-peptide、丙酮和 DMAC,分别在混合溶剂中加入两种溶质,磁力搅拌 12 h,静置 4 h。

在室温下,控制环境相对湿度在 40%左右,采用单针头静电纺丝,保持两种纺丝液流速均为 0.3 mL/h、纺丝电压为 15 kV,接收距离为 20 cm。

1.3 测试方法

采用 TM-3000 型扫描电子显微镜(SEM)观察 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维的表观形态,并使用 Nano Measurer 软件测量纳米纤维的直径(随机选取 100 个不同位置)。采用 Mettler Toledo Seven2Go 型电导率仪测试 CDA 和 CDA-g-peptide 纺丝液的电导率。采用 PerkinElmer Spectrum Two 型傅里叶变红外光谱仪(FTIR)分析多肽、CDA 和 CDA-g-peptide 的分子基团变化。采用 XQ-2 型纤维拉伸强度仪(随机选取纳米纤维膜不同位置,膜长度为 50 mm,宽度为 3 mm,拉伸速度为 10 mm/min),测试 CDA 纳米纤维膜和 CDA-g-peptide 纳米纤维膜的拉伸断裂强力及断裂伸长率。

1.4 抗菌试验

选取金黄色葡萄球菌(革兰氏阳性致病菌)和大肠杆菌(革兰氏阴性致病菌)作为测试菌种,参照 GB/T 20944.1—2007 采用琼脂平皿扩散法表征 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌效果,其抗菌效果的评价标准如表 1 所示。抗菌性能的评价参考 GB/T 20944.1—2007 中的振荡法,有 2 个评价指标:一是试验有效性 F 的判断,对于金黄色葡萄球菌及大

肠杆菌等细菌,当 $F \geq 1.5$,且对照烧瓶中的活菌浓度比接种时的活菌浓度增加时,试验判定有效,否则试验无效,需重新进行试验;二是抑菌率的计算,当对金黄色葡萄球菌及大肠杆菌的抑菌率 $\geq 70\%$ 时,样品具有抗菌效果。

表 1 CDA-g-peptide 纳米纤维抗菌效果评价
Table 1 Evaluation of antibacterial effect of CDA-g-peptide nanofibers

抑菌带宽度/mm	试样上细菌繁殖情况	描述	评价
>1	无	抑菌带大于 1 mm,未繁殖	效果好
0~1	无	抑菌带在 1 mm 之内,未繁殖	效果好
0	无	无抑菌带,未繁殖	效果好
0	轻微	无抑菌带,仅有少量菌落,繁殖几乎被抑制	效果较好
0	中等	无抑菌带,与对照样相比,繁殖减少一半	效果有限
0	大量	无抑菌带,与对照样相比,繁殖未减少或轻微减少	无效果

1.5 抗菌效果的稳定性评价

由 FZ/T 73023—2006 可知,抗菌效果的稳定性一直是评价抗菌产品优劣的重要指标。但目前的评价标准并未对其做出统一有效规定,而且由于制备方法、使用原料差异,各类抗菌产品所适用的评价方法也无法一概而论。为此,考虑到 CDA-g-peptide 纳米纤维的制备方法及其在纺织服装中反复洗涤使用的特点,将 CDA-g-peptide 纳米纤维置于去离子水中,放在 37 °C 恒温振荡器中振荡,模拟不同时间的洗涤过程对抗菌性能的影响。然后将纳米纤维置于细菌培养液中,测试不同振荡时间处理过的纳米纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率的变化,并与未振荡处理的对比,评价 CDA-g-peptide 纳

米纤维的抗菌稳定性。

2 结果与讨论

2.1 多肽的表征

抗菌多肽及氨基酸原料(Arg 和 Trp)的红外吸收光谱如图 4 所示。由图 4 可知,1 775 cm^{-1} 处吸收峰为羰基(C=O)的伸缩振动吸收峰,1 655 cm^{-1} 处对应的是氨基(N-H)弯曲振动和羰基(C=O)伸缩振动的特征吸收峰,1 535 cm^{-1} 处吸收峰为氨基(N-H)的弯曲振动吸收峰,1 145 cm^{-1} 处对应的是醚基(C-O)伸缩振动特征吸收峰、羰基(C=O)伸缩振动和弯曲振动的特征吸收峰。红外吸收光谱表明抗菌多肽中含有大量的酰胺键,与其分子结构一致。

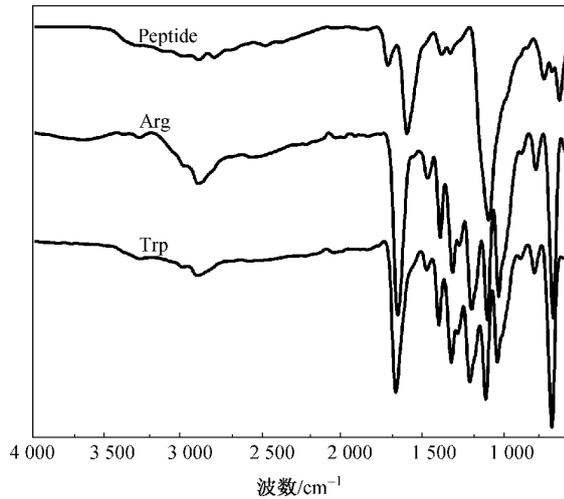


图 4 多肽与氨基酸原料的红外吸收光谱
Fig 4 The infrared absorption spectra of peptide and amino acid material

2.2 CDA-g-peptide 的表征

CDA、CDA-g-SA 和 CDA-g-peptide 的红外光谱如图 5 所示。由图 5 可知,1 737~1 738 cm^{-1} 处吸收峰为羰基(C=O)的伸缩振动吸收峰,1 661 cm^{-1} 处对应的是氨基(N-H)弯曲振动和羰基(C=O)伸缩振动的特征吸收峰,1 368~1 371 cm^{-1} 处对应的是烷烃(C-H)弯曲振动的特征吸收峰,1 219 和 1 038 cm^{-1} 处对应的是醚基(C-O)伸缩振动特征吸收峰。与 CDA 的红外光谱对比可知,peptide 的特征吸收峰位于 1 661 cm^{-1} ,即酰胺 I 带,可证明 CDA-g-peptide 已经成功合成。

2.3 CDA 和 CDA-g-peptide 纳米纤维的表征

2.3.1 表观形貌表征

CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维的 SEM 图如图 6 所示。由图 6 可知:CDA 纳米纤维

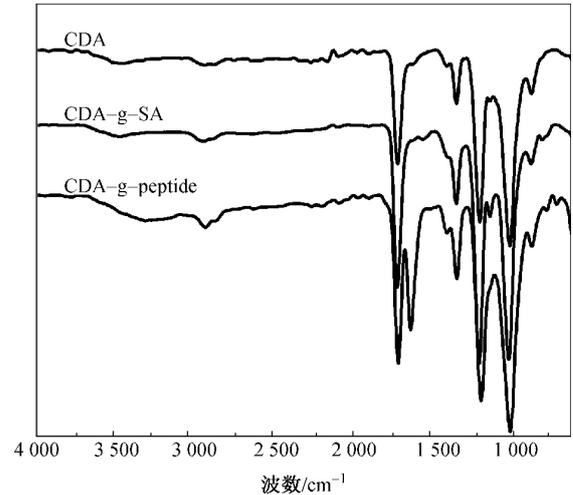
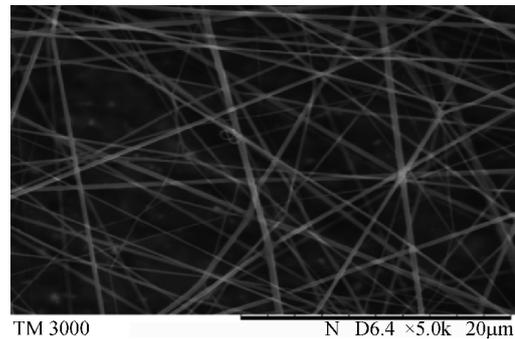
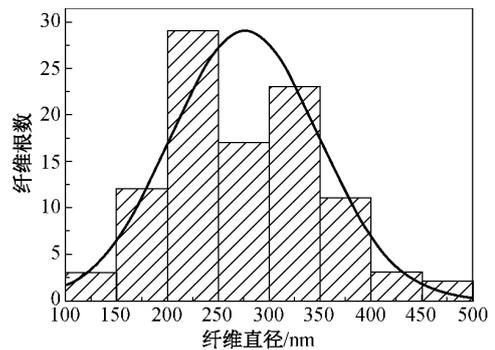


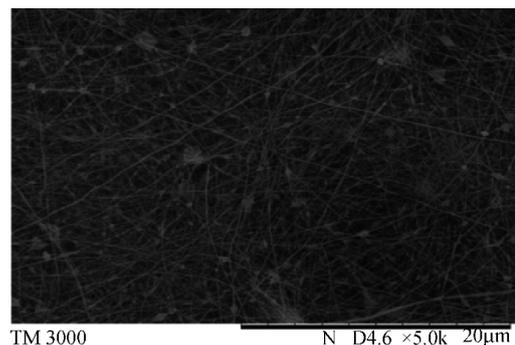
图 5 CDA、CDA-g-SA、CDA-g-peptide 的红外吸收光谱
Fig 5 The infrared absorption spectra of CDA, CDA-g-SA and CDA-g-peptide



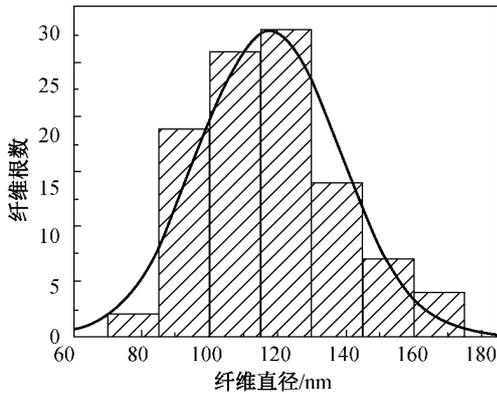
(a) CDA 纳米纤维 SEM 图



(b) CDA 纳米纤维直径分布图



(c) CDA-g-peptide 纳米纤维 SEM 图



(d) CDA-g-peptide 纳米纤维直径分布图

图6 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维 SEM 图和纤维直径分布图

Fig. 6 SEM images and fiber diameter distribution of CDA nanofibers and CDA-g-peptide nanofibers

随机排列,表面比较光滑,平均直径为 275.8 nm,变异系数较大;而 CDA-g-peptide 纳米纤维随机排列,少部分以串珠液滴的形式存在,但纤维的平均直径为 117.6 nm(比 CDA 纳米纤维小得多),且变异系数较小,表面比较光滑。影响纤维直径的主要因素是电导率,CDA 和 CDA-g-peptide 纺丝液的电导率分别为 1.95 和 18.38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。由于 CDA-g-peptide 引入了酰胺键等基团,提高了其纺丝液的电导率,故相同纺丝条件下纤维较细,虽然相对分子质量分布宽并且存在串珠,但纤维直径分布依然较窄。

2.3.2 力学性能表征

CDA 纳米纤维膜和 CDA-g-peptide 纳米纤维膜的平均负荷伸长曲线如图 7 所示。由图 7 可知,

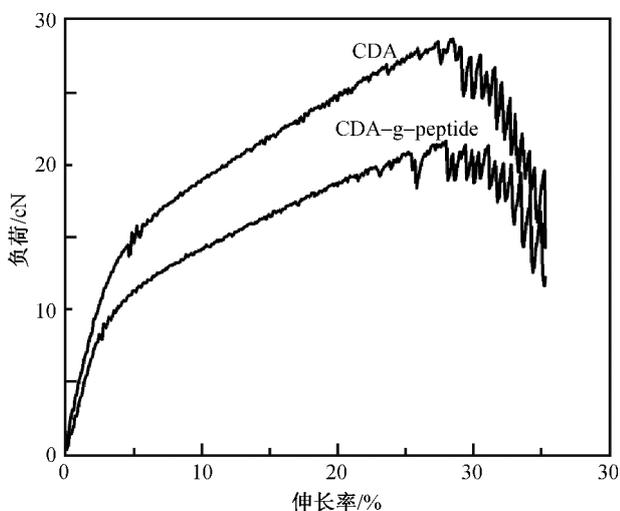


图7 CDA 纳米纤维膜和 CDA-g-peptide 纳米纤维膜的负荷伸长曲线

Fig. 7 Load-elongation curves of CDA nanofiber membranes and CDA-g-peptide nanofiber membranes

CDA 纳米纤维膜最大拉伸负荷大于 CDA-g-peptide 纳米纤维膜,但二者的断裂伸长率相近。当外加负荷一定时,CDA-g-peptide 纳米纤维膜的变形能力要大于 CDA 纳米纤维膜的变形能力,并且 CDA-g-peptide 纳米纤维膜的初始模量小于 CDA 纳米纤维膜,即在小变形条件下,CDA 纳米纤维膜抵抗外力变形的能力更强,二者的力学性能存在一定差异。

3 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌性能测试

大肠杆菌的生长曲线如图 8 所示。大肠杆菌生长曲线可划分为 4 个阶段。其中:0~3 h 为迟缓期,大肠杆菌的繁殖速度很慢,曲线较平缓;4~9 h 为生长期,大肠杆菌快速增殖;10~16 h 为稳定期,大肠杆菌总数基本稳定,这是由于随着大肠杆菌的繁殖,营养物质不断减少,并且代谢产生的有害物积累,大肠杆菌的增长速度不断变慢,其增殖数与死亡数大致相等;17~20 h 为衰亡期,由于培养基中营养物质逐渐减少,而毒性物质逐渐增加,大肠杆菌的繁殖速度逐渐减缓,死亡数明显增多,细菌总数呈现下降趋势。

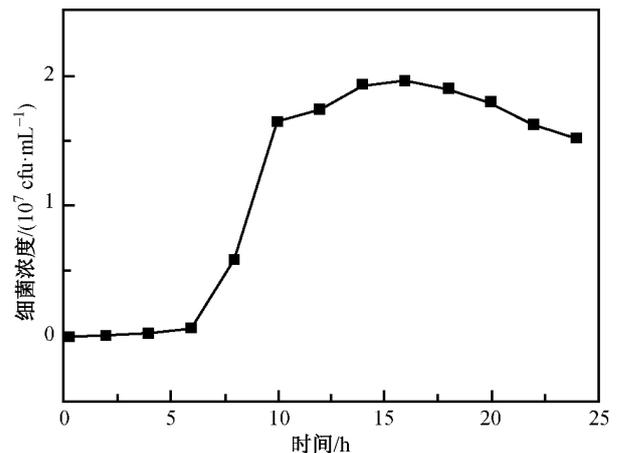


图8 大肠杆菌的生长曲线图

Fig. 8 Growth curve of *E. coli*

CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌的抗菌性能如图 9 所示。由图 9 可知,培养 24 h 后,CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维均没有明显的抑菌圈。但是去除对对照样(CDA 纳米纤维)和试样(CDA-g-peptide 纳米纤维)后,对对照样接触的培养基表面有大肠杆菌的生长,而试样接触的培养基表面没有大肠杆菌生长。经过 48 h 培养后,CDA-g-peptide 纳米纤维接触的培养基表面仍没有大肠杆菌生长(如图 9(a)所示)。进一步采

用振荡法与平板菌落计数法相结合的方法评价其抗菌性能(如图 9(b)所示)。根据平板菌落计数法,得出试验的 F 值为 2.54, 即试验有效。CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌的抑菌率为 98.4%, 大于评价标准中的抑菌率(70%)。由此证明 CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌的抗菌性能优异。

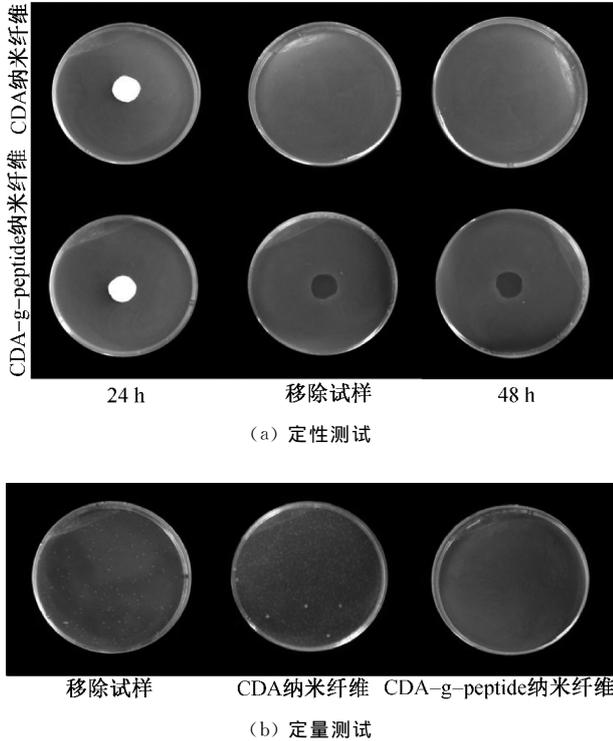


图 9 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌的抗菌性能测试

Fig 9 *E. coli* antibacterial performance tests of CDA nanofibers and CDA-g-peptide nanofibers

金黄色葡萄球菌的生长曲线如图 10 所示。金黄色葡萄球菌的生长曲线可划分为 3 个阶段。其

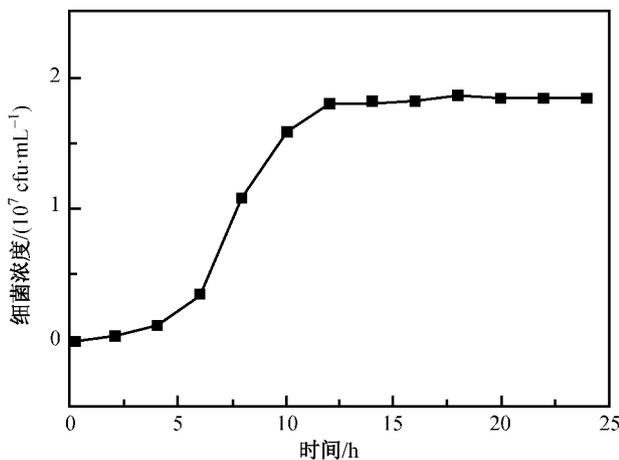


图 10 金黄色葡萄球菌的生长曲线图
Fig 10 Growth curve of *S. aureus*

中,0~4 h 为迟缓期,金黄色葡萄球菌的繁殖速度很慢;5~12 h 为生长期,培养基中的营养物质丰富,金黄色葡萄球菌快速增长;13~24 h 为稳定期,金黄色葡萄球菌的总数基本维持稳定,菌落数目波动较小。这是由于随着金黄色葡萄球菌数目的增多,营养物质不断减少,而代谢产生的毒性物质积累等,金黄色葡萄球菌的繁殖速度逐渐下降,而死亡细菌数逐渐增加,总体上达到一种动态平衡。

CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维对金黄色葡萄球菌的抗菌性能如图 11 所示。由图 11 可知,与大肠杆菌的抗菌性能测试一样,培养 24 h 后,两组试样均未出现明显的抑菌圈,但是去除对照和试样后,CDA 纳米纤维培养基上有细菌生长,而 CDA-g-peptide 纳米纤维接触的培养基表面没有细菌生长。经过 48 h 培养后,CDA-g-peptide 纳米纤维接触的培养基表面仍没有细菌生长。进一步采用振荡法与平板菌落计数法相结合的方法对其抗菌性能进行评价(如图 11(b)所示)。根据平板菌落计数法, F 值为 2.04, 表明试验有效。CDA-g-peptide 纳米纤维对金黄色葡萄球菌的抑菌率为 98.7%, 大于评价标准中的抑菌率(70%)。由此证明 CDA-g-peptide 纳米纤维对金黄色葡萄球菌的抗菌性能优异。

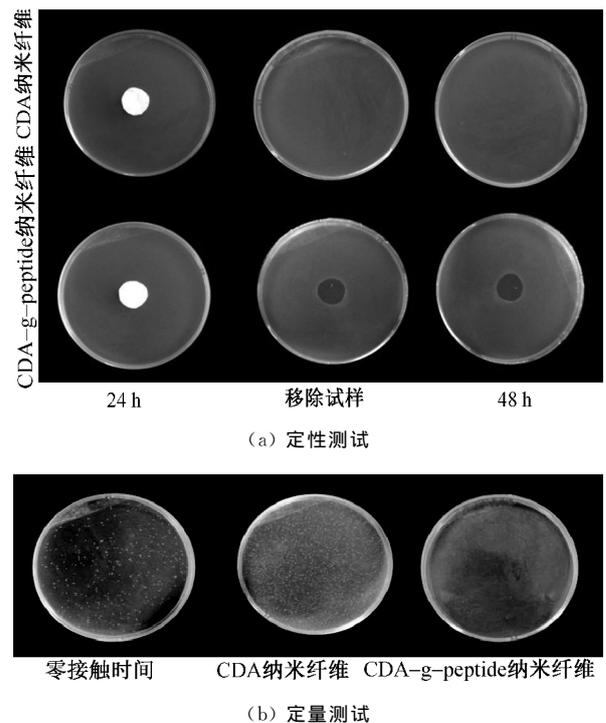


图 11 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维对金黄色葡萄球菌的抗菌性能测试

Fig 11 *S. aureus* antibacterial performance tests of CDA nanofibers and CDA-g-peptide nanofibers

4 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌稳定性评价

经振荡和未经振荡的 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌测试结果如表 2 所示。对照样(CDA 纳米纤维)培养基中长满了菌落,而 CDA-g-peptide 纳米纤维和经振荡处理后的纳米纤维的培养基中几乎没有菌落生长。经平板菌落计数法得出,振荡 12、24、48 h 后的 CDA-g-peptide 纳米纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率与未经振荡的 CDA-g-peptide 纳米纤维基本一致,无显著差异。故 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌效果稳定。

表 2 不同振荡时间对 CDA-g-peptide 纳米纤维抑菌率的影响
Table 2 Effect of different oscillation time on bacteriostatic rate

试样	振荡时间/h	大肠杆菌抑菌率/%	金黄色葡萄球菌抑菌率/%
对照样		0	0
1 [#]	0	98.4	98.7
2 [#]	12	98.5	98.5
3 [#]	24	98.2	98.5
4 [#]	48	98.4	98.6

5 结 语

以抗菌多肽和 CDA 为原料,利用抗菌多肽的氨基自由基将抗菌多肽接枝在羧基化的 CDA 上,合成了具有抗菌功能的 CDA-g-peptide。采用静电纺丝技术,制备了 CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维。由 SEM 图可知,CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维在外观形貌上存在一定差异。在力学性能方面,CDA 纳米纤维膜的断裂强力优于 CDA-g-peptide 纳米纤维膜,但二者的断裂伸长率相差不大,并不会影响其后续加工使用。CDA 纳米纤维和 CDA-g-peptide 纳米纤维的抗菌性能结果表明,后者具有优异的抗菌性能。由于抗菌多肽与纳米纤维之间是化学键作用,而不是简单掺杂、共混,故经不同振荡时间处理后,其抗菌性能未出现明显下降,具有抗菌可靠性和持久性。因此开发新型抗菌醋酸纤维基静电纺丝纳米纤维,可将其与传统棉纤维、聚酯纤维混纺,在不影响其服用性能的前提下,赋予传统纺织品高功能性和高附加值,拓展其在服用领域和医疗卫生领域的应用,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] KANDHAVADIVU P, VIGNESWARAN C, RAMACHANDRAN T, et al. Development of polyester-based bamboo charcoal and lyocell-blended union fabrics for healthcare and hygienic textiles [J]. *Journal of Industrial Textiles* 2011, 41(2): 142-159.
- [2] LUO G Y, XI G H, WANG X Y, et al. Antibacterial N-halamine coating on cotton fabric fabricated using mist polymerization[J]. *Journal of Applied Polymer Science* 2017, 134(22): 44897.
- [3] SUWANTONG O, RUKTANONCHAI U, SUPAPHOL P. Electrospun cellulose acetate fiber mats containing asiaticoside or centella asiatica crude extract and the release characteristics of asiaticoside[J]. *Polymer*, 2008, 49(19): 4239-4247.
- [4] FSUWANTONG O, OPANASOPIT P, RUKTANONCHAI U, et al. Electrospun cellulose acetate fiber mats containing curcumin and release characteristic of the herbal substance[J]. *Polymer*, 2007, 48(26): 7546-7557.
- [5] TAEPABOON P, RUNGSARDTHONG U, SUPAPHOL P. Vitamin-loaded electrospun cellulose acetate nanofiber mats as transdermal and dermal therapeutic agents of vitamin A acid and vitamin E[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2007, 67(2): 387-397.
- [6] LIANG J H, YANG J X, HUANG Y X, et al. Fabrication of TiO₂ nanofibers in a novel solvent system through electrospinning [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2010, 68 (17): 1713-1718.
- [7] LIU R L, HUANG Y X, XIAO A H, et al. Preparation and photocatalytic property of mesoporous ZnO/SnO₂ composite nanofibers[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 503 (1): 103-110.
- [8] CHEN L, BROMBERG L, HATTON T A, et al. Electrospun cellulose acetate fibers containing chlorhexidine as a bactericide [J]. *Polymer*, 2008, 49(5): 1266-1275.
- [9] PERIOLATTO M, FERRERO F, VINEIS C. Antimicrobial chitosan finish of cotton and silk fabrics by UV-curing with 2-hydroxy-2-methylphenylpropane-1-one [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(1): 201-205.
- [10] GRUMEZESCU A M, ANDRONESCU E, FICAI A, et al. Chitin based biomaterial for antimicrobial therapy: Fabrication, characterization and in vitro profile based interaction with eukaryotic and prokaryotic cells[J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2012, 2(5): 438-445.
- [11] DUTTA J, TRIPATHI S, DUTTA P K. Progress in antimicrobial activities of chitin, chitosan and its oligosaccharides: A systematic study needs for food applications [J]. *Food Science and Technology International*, 2012, 18(1): 3-34.
- [12] SU W, WEI S S, HU S Q, et al. Preparation of TiO₂/Ag colloids with ultraviolet resistance and antibacterial property using short chain polyethylene glycol[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2/3): 716-720.
- [13] FERRARIS M, PERERO S, MIOLA M, et al. Silver nanocluster-silica composite coatings with antibacterial properties[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 120 (1): 123-126.

[1] KANDHAVADIVU P, VIGNESWARAN C, RAMACHANDRAN

- [14] ANDERSSON D I, HUGHES D. Microbiological effects of sublethal levels of antibiotics [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2014, 12 (7): 465-478
- [15] BISHT G S, RAWAT D S, KUMAR A, et al. Antimicrobial activity of rationally designed amino terminal modified peptides [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2007, 17 (15): 4343-4346
- [16] RAMESH S, GOVENDER T, KRUGER H G, et al. Short antimicrobial peptides (SAMPs) as a class of extraordinary promising therapeutic agents[J]. *Journal of Peptide Science*, 2016, 22(7): 438-451
- [17] LEE S, BAI H W, LIU Z Y, et al. Optimization and an insightful properties-Activity study of electrospun TiO₂/CuO composite nanofibers for efficient photocatalytic H₂ generation [J]. *Applied Catalysis BL* 2013, 140/141:68-81.
- [18] NISCHALA K, RAO T N, HEBALLAR N. Silica-silver core-shell particles for antibacterial textile application[J]. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*, 2011, 82(1):203-208.
- [19] MA R, LEVARD C, JUDY J D, et al. Fate of zinc oxide and silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant and in processed biosolids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 48(1): 104-112.
- [20] SON W K, YOUK J H, LEE T S, et al. Preparation of antimicrobial ultrafine cellulose acetate fibers with silver nanoparticles [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2004, 25 (18):1632-1637
- [21] ANITHA S, BRABU B, THIRUVADIGAL, D J, et al. Optical, bactericidal and water repellent properties of electrospun nano-composite membranes of cellulose acetate and ZnO[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 97(2): 856-863
- [22] LESNIEWICZ A, WROZ A, WOJCIK A, et al. Mineral and nutritional analysis of polish infant formulas[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2010, 23(5): 424-431
- [23] DAWSON T L. Nanomaterials for textile processing and photonic applications[J]. *Coloration Technology*, 2008, 124 (5): 261-272
- [24] MURR L E. Nano-particulate materials in antiquity: the good, the bad and the ugly[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60 (4):261-270
- [25] LIU H Q, HSIEH Y L. Ultrafine fibrous cellulose membranes from electrospinning of cellulose acetate[J]. *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, 2002, 40(18): 2119-2129
- [26] MARENGO-ROWE A J. Rapid electrophoresis and quantitation of haemoglobins on cellulose acetate[J]. *Journal of clinical pathology*, 1965, 18(6): 790-792

(责任编辑: 杜 佳)

(上接第 858 页)

4585-4592.

- [26] KRUK M, VALENTYN ANTOCHSHUK A, JARONIEC M, et al. New approach to evaluate pore size distributions and surface areas for hydrophobic mesoporous solids[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103(48):10670-10678.

- [27] 刘学洋. PVDF/PSU 复合抗菌纳米纤维空气过滤材料的制备及其在口罩中的应用研究[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2016.

(责任编辑: 徐惠华)