

引用格式: 张亮亮, 李瑞涛. 负载铜纳米粒子碳纳米纤维膜的制备及其抗菌性能研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(7): 614-621.  
ZHANG L L, LI R T. Preparation and Antibacterial Properties of Carbon Nanofiber Films Loaded with Cu Nanoparticles[J]. Materials China, 2025, 44(7): 614-621.

# 负载铜纳米粒子碳纳米纤维膜的制备 及其抗菌性能研究

张亮亮, 李瑞涛

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 铜纳米粒子 (CuNPs) 作为一种可以有效抑制多种微生物生长的抗菌材料, 具有高效、廉价、低毒性等突出优势, 其抗菌性与粒径和分散性息息相关。金属纳米粒子在使用过程中容易发生聚集, 降低材料的抗菌性能。为了提高 CuNPs 的抗菌性能, 先后利用溶液喷射纺丝、碳化及碳热冲击工艺制备了以聚丙烯腈基碳纳米纤维 (CNFs) 为载体、CuNPs 为抗菌主体的复合抗菌材料 (CuNPs/CNFs)。采用 SEM、EDS、XRD 等表征手段对 CuNPs/CNFs 复合材料的形貌与结构进行了分析, 采用抑菌圈法、菌落计数法、SEM 观察法等观察了 CuNPs/CNFs 复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果。结果显示, CuNPs/CNFs 复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌展现出了较高的抗菌活性。

**关键词:** 铜纳米粒子; 溶液喷射纺丝; 碳热冲击; 碳纳米纤维; 抗菌

**中图分类号:** TB383; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)07-0614-08

## Preparation and Antibacterial Properties of Carbon Nanofiber Films Loaded with Cu Nanoparticles

ZHANG Liangliang, LI Ruitao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Copper nanoparticles (CuNPs), as antibacterial materials, can effectively inhibit the growth of various microorganisms. They have the advantages of high efficiency, low cost and low toxicity, and their antibacterial activity are closely related to their particle size and dispersion. Metal nanoparticles tend to aggregate during use, which reduces their antibacterial properties. To improve the antibacterial properties of CuNPs, an efficient and environmentally friendly antibacterial material (CuNPs/CNFs) with polyacrylonitrile based carbon nanofibers (CNFs) as the carrier and CuNPs as the main antibacterial agent was prepared by solution jet spinning, carbonization and carbothermal shock successively. The morphology and structure of CuNPs/CNFs composites were analyzed by SEM, EDS and XRD, and their inhibition effect on Escherichia coli and Staphylococcus aureus was observed by antibacterial zone method, colony counting method and SEM imaging. The results showed that CuNPs/CNFs composites exhibited high antibacterial activity against Escherichia coli and Staphylococcus aureus.

**Key words:** copper nanoparticles; solution jet spinning; carbothermal shock; carbon nanofibers; antibiosis

### 1 前言

随着人类活动范围的扩展和生活环境的变迁, 细菌

的种类日益增多, 大量的抗生素被广泛应用于灭菌<sup>[1, 2]</sup>。然而, 抗生素的过度使用导致了细菌耐药性的产生, 这使得传统的抗生素无法彻底杀灭所有病毒, 进而无法有效保护人们的健康<sup>[3-7]</sup>。鉴于此, 研发一种既高效又环保的抗菌材料显得尤为重要, 这对于维护人们的生命健康具有重大的现实意义。

铜纳米粒子 (copper nanoparticles, CuNPs) 因其独特的性质, 如较大的比表面积、低毒性以及相对低廉的成本, 成为了备受瞩目的无机抗菌材料之一, 在多个领域

收稿日期: 2024-04-02 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 江苏大学人才启动基金项目 (18JDG030)

第一作者: 张亮亮, 男, 1999年生, 硕士研究生

通讯作者: 李瑞涛, 男, 1982年生, 教授, 硕士生导师,

Email: RLI3@e.ntu.edu.sg

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404002

得到了广泛的应用<sup>[8-13]</sup>。其抗菌性能与粒径大小和分散性密切相关,当粒径越小且分散性越佳时,其抗菌效果通常越显著。然而,金属纳米粒子在使用过程中往往容易发生团聚,一旦聚集,其抗菌活性会大大降低,这在一定程度上限制了其应用效果<sup>[14-16]</sup>。

为了解决这一问题,寻找合适的载体来负载金属纳米粒子显得至关重要。碳纳米纤维(carbon nanofibers, CNFs)作为一种常用的金属载体,凭借其出色的化学稳定性、高的比表面积以及优异的导电性等特点,受到了广泛的关注<sup>[17,18]</sup>。CNFs不仅能够为CuNPs提供良好的分散环境,防止其团聚,还能与其产生协同作用,进一步提升抗菌效果。因此,CNFs有望成为CuNPs的理想载体,二者的结合有望开发出更高效、更稳定的抗菌材料。

CNFs的制备过程主要包括溶液喷射纺丝、预氧化和碳化3个步骤。其中,溶液喷射纺丝作为一种高效的纳米纤维制备工艺,其工作原理是利用高速气流对从喷头挤出的聚合物溶液进行牵伸。在牵伸的过程中,溶剂逐渐挥发,溶质则逐渐固化,最终形成纳米纤维<sup>[19,20]</sup>。与传统的熔喷纺丝技术和静电纺丝技术相比,溶液喷射纺丝技术具有显著的优势。熔喷纺丝技术主要局限于加工热塑性聚合物,而溶液喷射纺丝则能够处理更广泛的材料。同时,静电纺丝虽然能够制备纳米纤维,但其生产效率相对较低。相比之下,溶液喷射纺丝不仅材料来源广泛,而且设备操作简单、安全风险低、纺丝效率高。经过溶液喷射纺丝得到的纤维,还需经过预氧化和碳化两个步骤,最终得到CNFs<sup>[17,21,22]</sup>。在预氧化的过程中,在空气中加热聚丙烯腈(PAN)纳米纤维膜,使其发生脱氢、氧化和环化等反应,形成耐热的梯形结构,提升了纳米纤维的热稳定性,以保证其在后续的高温碳化中保持稳定的结构。在碳化过程中,在惰性气体的氛围下加热预氧化纤维,去除其中大部分的非碳元素,形成乱层石墨结构,最后制备出含碳量在90%左右的CNFs。这一制备过程能够制备出具有较多表面缺陷的CNFs,为后续的碳热冲击工艺提供了坚实的基础。

碳热冲击技术作为一种新兴的纳米颗粒制备技术,近年来得到了迅速的发展,并受到了广泛关注<sup>[23-28]</sup>。将碳材料在金属前驱体溶液中浸泡并干燥后,金属前驱体会附着在其表面。当对其施加电流时,会产生焦耳热,由于其热容很小,可快速升温,附着于其表面的金属前驱体也被快速加热升温,而其高温会使金属前驱体分解生成金属和气体,其中金属会附着在碳材料的缺陷处;在断电后,同样是因为其很小的热容,碳材料会快速降温,防止了细小金属颗粒的长大。这种技术不仅使得纳米粒子的制备过程更为高效,同时也保证了纳米粒子在

碳载体上的良好分散性,从而充分发挥其性能优势。

因此,本文基于溶液喷射纺丝技术制备出PAN纳米纤维(PANNFs),再经过预氧化、碳化得到CNFs。最后通过碳热冲击技术将CuNPs引入CNFs中,制备出CuNPs/CNFs复合材料,并研究了CuNPs/CNFs复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌性能。

## 2 实验

### 2.1 实验药品与仪器

聚丙烯腈(PAN,  $M_w = 149\ 000 \sim 151\ 000$ , 上海阿拉丁试剂有限公司); N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 分析纯, 上海国药试剂有限公司); 无水乙醇(分析纯, 上海国药试剂有限公司); 无水氯化铜(II)( $\text{CuCl}_2$ , 浓度98%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); LB琼脂培养基和LB肉汤(常德比克曼生物科技有限公司)。

采用场发射电子显微镜(SEM5000&EDS)对样品形貌进行表征,并对样品元素组成进行分析;采用能量色散谱仪(EDS)对样品组成元素进行分析;采用D8 ADVANCE型X射线衍射仪(XRD)对样品进行物相分析,具体参数如下:射线源为Cu K $\alpha$ 靶,扫描范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$ ,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ ;采用DXF型激光拉曼(Raman)光谱对样品进行测试,激光器波长为532 nm。

### 2.2 CuNPs/CNFs的制备

#### 2.2.1 PANNFs的制备

将PAN按比例加入DMF中并在常温下搅拌至清澈透明,制得质量分数为11%的PAN溶液。用注射器吸入PAN溶液,针头与接收器的距离为55 cm,气压为0.15 MPa,注射速率为0.125 mL/min,在上述参数下进行溶液吹纺,得到PANNFs纤维。

#### 2.2.2 CNFs的制备

将PANNFs纤维放入真空管式烧结炉中预氧化,在空气氛围下以 $5^\circ/\text{min}$ 的升温速率升温至 $260^\circ\text{C}$ ,保温2 h后自然冷却至室温。

将预氧化后的PANNFs放入真空管式烧结炉中碳化,在氮气氛围下以 $5^\circ/\text{min}$ 的升温速率升温至 $800^\circ\text{C}$ ,保温2 h后炉冷至室温,得到CNFs。

#### 2.2.3 CuNPs/CNFs的制备

配置0.05 mol/L的 $\text{CuCl}_2$ 乙醇溶液,将CNFs剪成小片状放入 $\text{CuCl}_2$ 溶液中浸泡5 min。在室温下干燥后,将CNFs放置于石墨毡表面,石墨毡两端连接着正负电极,正负极外接直流电源。在氮气氛围下,采用直流电源对石墨毡进行通电,得到CuNPs/CNFs。采用美恩斯可编程直流电源提供电流,电压调控范围为0~30 V,电流调控范围为0~80 A。电压设置为30 V,通电时间为3 s,电

流分别设置 50, 55, 60 和 65 A, 得到的 CuNPs/CNFs 分别记为 CuNPs/CNFs-50-3、CuNPs/CNFs-55-3、CuNPs/CNFs-60-3 和 CuNPs/CNFs-65-3; 电压设置为 30 V, 电流设置为 60 A, 通电时间分别设置为 1, 3, 5 和 7 s, 得到的 CuNPs/CNFs 分别记为 CuNPs/CNFs-60-1、CuNPs/CNFs-60-3、CuNPs/CNFs-60-5 和 CuNPs/CNFs-60-7。

## 2.3 抑菌性能测试方法

### 2.3.1 抑菌圈法

抑菌圈法又叫扩散法, 是利用待测药物在琼脂平板中扩散使其周围的细菌生长受到抑制而形成透明圈, 即抑菌圈。根据抑菌圈大小判定待测药物抑菌效果的一种方法<sup>[29, 30]</sup>。

将大肠杆菌 (*E. coli*) 与金黄色葡萄球菌 (*MRSA*) 的菌悬液稀释至  $1 \times 10^6$  CFU/mL, 取 100  $\mu$ L 的大肠杆菌与金黄色葡萄球菌菌悬液加入 LB 琼脂培养基中, 用涂布棒在培养基中涂布均匀, 将制备的 CuNPs/CNFs 复合纳米纤维剪成 10 mm 的圆片消毒后放入培养基上, 并紧密接触。将培养基倒置于培养箱中在 37  $^{\circ}$ C 下培养 24 h 后, 观察是否产生抑菌圈。

### 2.3.2 菌落计数法

菌落计数法是通过将样品稀释到适当的范围, 使得每个平板上菌落的数量处于可计数范围内。通过对菌落计数, 并根据稀释倍数进行修正, 可以推算出样品中微生物的浓度或数量<sup>[31]</sup>。

将大肠杆菌与金黄色葡萄球菌菌悬液稀释至  $1 \times 10^6$  CFU/mL, 取 100  $\mu$ L 的稀释后的菌悬液与 900  $\mu$ L 的 LB 肉汤混合, 然后分别加入一定量的 PBS 缓冲液、CNFs 以及 CuNPs/CNFs 复合纤维膜, 将混合液置于震荡培养箱中培养 3 h。取适量混合液在 LB 琼脂培养基表面均匀涂

布, 将培养基倒置于培养箱中在 37  $^{\circ}$ C 下培养 24 h 后, 观察统计平板内的菌落数, 并通过菌落数计算抑菌率。

### 2.3.3 SEM 观察法

将 CNFs 和 CuNPs/CNFs 复合纤维膜裁剪成直径为 10 mm 的圆片, 加入含有  $1 \times 10^6$  CFU/mL 的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的 LB 肉汤, 放置于 37  $^{\circ}$ C 培养箱中培养 5 h。在硅片上滴加混合液滴, 自然风干后用含有 2.5% 戊二醛的 PBS 固定 4 h。用 0.2 mol/L 的 PBS 缓冲液清洗 3 次, 每次持续 15 ~ 20 min, 然后用梯度乙醇 (30%、50%、70% 和 100%) 脱水, 每次持续 20 min。然后用乙酸异戊脂置换样品并过夜。对样品使用离子溅射仪进行喷金处理, 通过 SEM 观察细菌形态变化。

## 3 结果与讨论

### 3.1 形貌与结构分析

图 1a ~ 1e 分别是纯 CNFs 以及不同通电电流下 CuNPs/CNFs 的 SEM 照片。由图 1a 可知, 纯 CNFs 的纤维直径分布较为均匀, 大部分的纤维直径在 500 nm 左右, 表面富含大量缺陷, 这有利于负载金属纳米粒子。随着电流的提高, 可以观察到 CuNPs 的粒径呈现出先变小再变大的趋势 (图 1b ~ 1e)。图 2 统计了图 1a 和图 1b ~ 1e 的纤维直径或 CuNPs 的粒径, 当电流为 50 A 时, CuNPs 粒径较大且粒径分布范围也较大, 平均粒径为 244 nm; 当电流为 55 A 时, 粒径分布较均匀, 但平均粒径仍达到 116 nm; 当电流为 60 A 时, 粒径分布非常均匀, 且平均粒径只有 54 nm; 然而, 随着电流达到 65 A, CuNPs 平均粒径达到 310 nm。

在瞬态高温下, CNFs 表面的  $\text{CuCl}_2$  迅速分解成铜与氯气, 其中铜以纳米粒子的形态负载在 CNFs 载体的缺陷

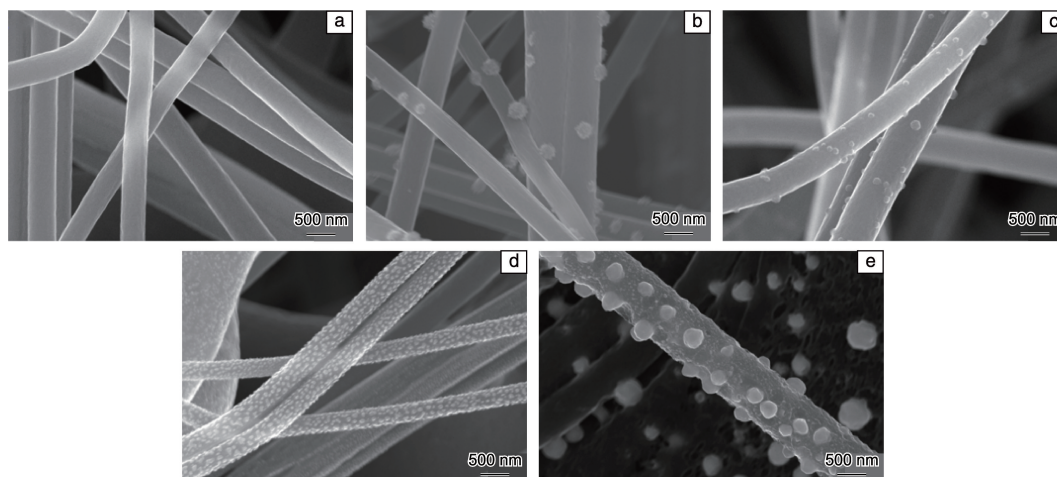


图 1 纯 CNFs 和不同通电电流下纳米纤维膜的 SEM 照片: (a) CNFs, (b) CuNPs/CNFs-50-3, (c) CuNPs/CNFs-55-3, (d) CuNPs/CNFs-60-3, (e) CuNPs/CNFs-65-3

Fig. 1 SEM images of pure CNFs and nanofibers membrane with different currents: (a) CNFs, (b) CuNPs/CNFs-50-3, (c) CuNPs/CNFs-55-3, (d) CuNPs/CNFs-60-3, (e) CuNPs/CNFs-65-3

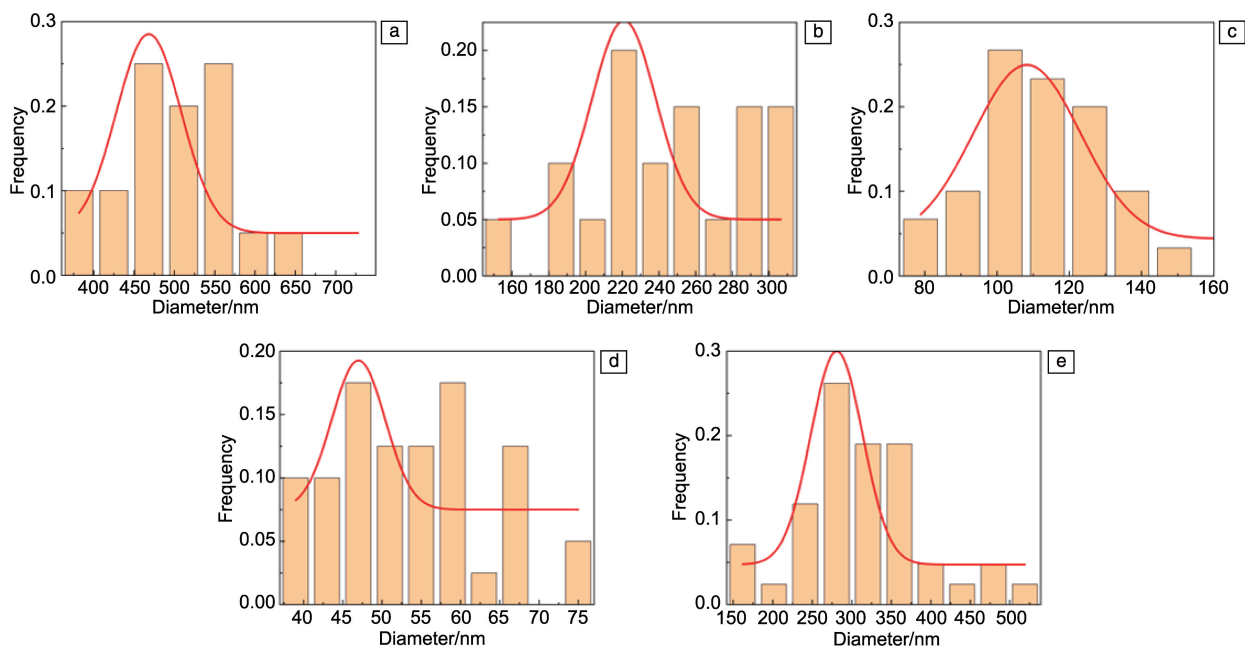


图 2 纯 CNFs 的直径分布图和不同通电电流下 CuNPs 的粒径分布图: (a) CNFs, (b) CuNPs/CNFs-50-3, (c) CuNPs/CNFs-55-3, (d) CuNPs/CNFs-60-3, (e) CuNPs/CNFs-65-3

Fig. 2 Diameter distribution of CNFs and particle size distribution of CuNPs under different currents: (a) CNFs, (b) CuNPs/CNFs-50-3, (c) CuNPs/CNFs-55-3, (d) CuNPs/CNFs-60-3, (e) CuNPs/CNFs-65-3

位置处, 形成 CuNPs。当通电电流增大时, 加热温度升高, 铜在 CNFs 表面有更强的迁移能力, 较大的 CuNPs 也会分裂成更加细小的 CuNPs; 然而, 当电流过大即温度过高时, CNFs 上的缺陷大幅减少, 此时铜因缺乏附着点发生相互团聚, 导致粒径增大。

图 3a~3d 分别是不同通电时间下 CuNPs/CNFs 的 SEM 照片。从图中可以看出, 随着通电时间的增加, CuNPs 的粒径呈现出先变小再变大的趋势, 且其密度也呈现出先变小再变大的趋势。图 4a~4d 分别统计了图 3a~3d 对应的 CuNPs 的粒径, 当通电时间为 1 s 时, CuNPs 的粒径较大且粒径分布范围也较大, 平均粒径为 219 nm; 当通电时间为 3 s 时, 粒径分布非常均匀, 且平均粒径只有 54 nm; 当通电时间为 5 s 时, 粒径分布较均匀, 但平均粒径仍达到 129 nm; 当通电时间达到 7 s 时, CuNPs 的平均粒径达到 186 nm, 且分布密度较低。

通电时间会影响 CNFs 表面的缺陷含量, 即 Cu 颗粒的附着点的数量<sup>[25]</sup>。延长通电时间会使 CNFs 基体结构中的缺陷含量进一步减少, 由于 Cu 的附着点减少, 其颗粒的粒径会变大。因而, 在 CuCl<sub>2</sub> 可以分解的前提下, 缩短通电时间有利于控制 CuNPs 的粒径。

为了进一步检测 CuNPs/CNFs 的成分, 对 CuNPs/CNFs-60-3 进行了 EDS 分析, 如图 5 所示。可以看出 CuNPs/CNFs-60-3 中存在 C, O, Cu 和 Cl 元素, 其中 Cl 的含量仅有 1.9% (质量分数), 这说明 CuCl<sub>2</sub> 已基本分解

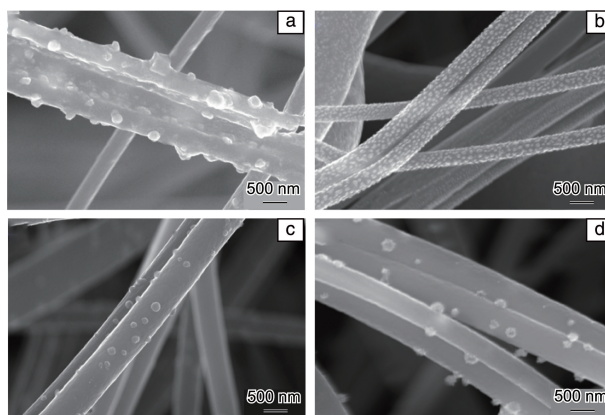


图 3 不同通电时间下纳米纤维膜的 SEM 照片: (a) CuNPs/CNFs-60-1, (b) CuNPs/CNFs-60-3, (c) CuNPs/CNFs-60-5, (d) CuNPs/CNFs-60-7

Fig. 3 SEM images of nanofibers membrane at different electrification time: (a) CuNPs/CNFs-60-1, (b) CuNPs/CNFs-60-3, (c) CuNPs/CNFs-60-5, (d) CuNPs/CNFs-60-7

为 CuNPs, 且 CuNPs 均匀地负载在 CNFs 上。此外, Cu 元素在 CuNPs/CNFs 中含量达到了 34.6%。

图 6 为 CNFs 和 CuNPs/CNFs-60-3 的 XRD 图谱。对于 CNFs 来说, 25° 和 43° 分别对应 CNFs 的 (002) 和 (101) 晶面, 说明 CNFs 已成功碳化; 而对于 CuNPs/CNFs-60-3 复合纳米纤维膜来说, 其 XRD 图谱中没有检测到 Cu 的特征峰, 这可能是因为 CuNPs 的粒径较小, 未达到 XRD 可检出的最低阈值。

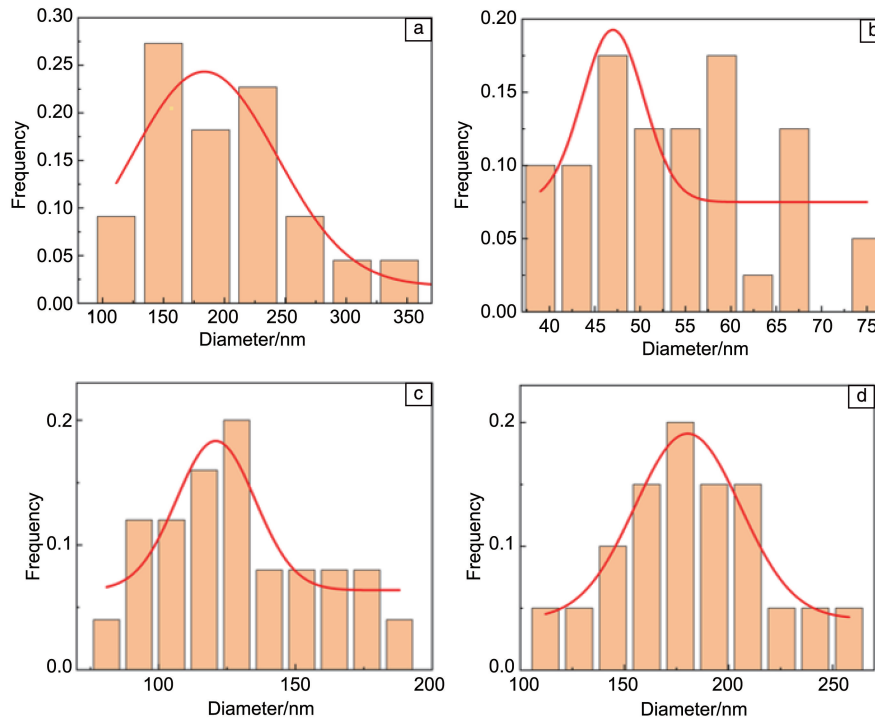


图 4 不同通电时间下的 CuNPs 的粒径分布: (a) CuNPs/CNFs-60-1, (b) CuNPs/CNFs-60-3, (c) CuNPs/CNFs-60-5, (d) CuNPs/CNFs-60-7

Fig. 4 Particle size distribution of CuNPs at different electrification time: (a) CuNPs/CNFs-60-1, (b) CuNPs/CNFs-60-3, (c) CuNPs/CNFs-60-5, (d) CuNPs/CNFs-60-7

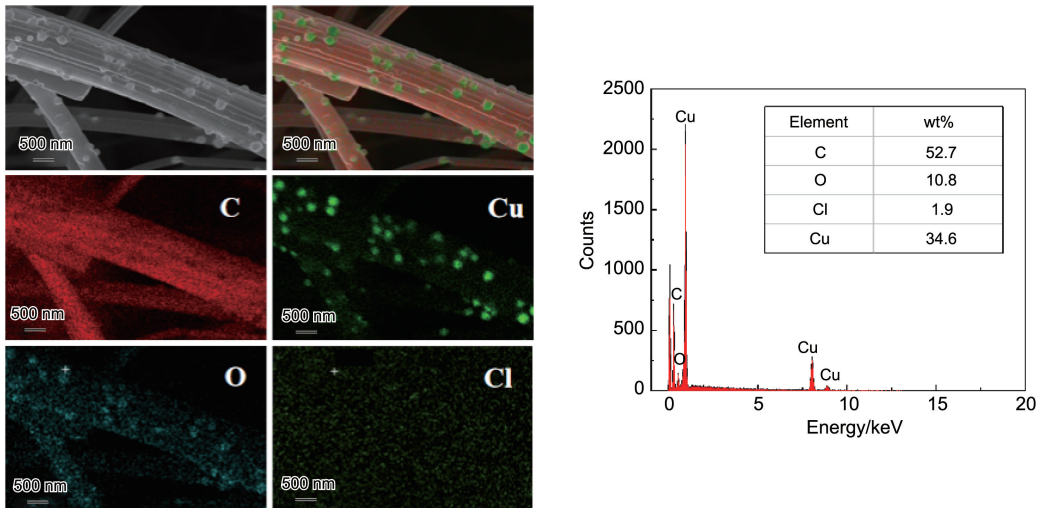


图 5 CuNPs/CNFs-60-3 的元素分布图与 EDS 元素分析

Fig. 5 Element distribution diagram and EDS element analysis of CuNPs/CNFs-60-3

拉曼光谱主要用于分析样品的石墨化程度和缺陷特征,其中 G 峰代表碳材料的石墨化程度,而 D 峰代表碳材料的无序化程度。通常, D 峰和 G 峰的强度比( $I_D/I_G$ )的比值越小,代表碳材料的石墨化程度越高。图 7 为 CNFs 和 CuNPs/CNFs-60-3 的拉曼光谱,从图中可以看出, CuNPs/CNFs-60-3 的  $I_D/I_G$  小于 CNFs 的,这说明 CuNPs/CNFs-60-3 的石墨化程度更高,这是因为在对

CNFs 进行碳热冲击后,其石墨化程度提高,表面缺陷减少,结构更加完整和有序。

### 3.2 抗菌性能

将 CNFs 与 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜平铺在 LB 表面,其抗菌效果如图 8 所示。CNFs 对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌几乎没有抗菌性能,而 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌都产生了明显的抑菌

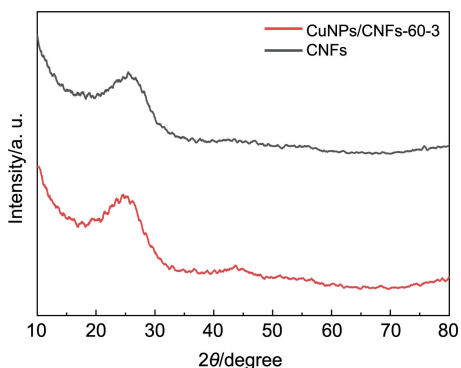


图 6 CNFs 与 CuNPs/CNFs-60-3 的 XRD 图谱  
Fig. 6 XRD patterns of CNFs and CuNPs/CNFs-60-3

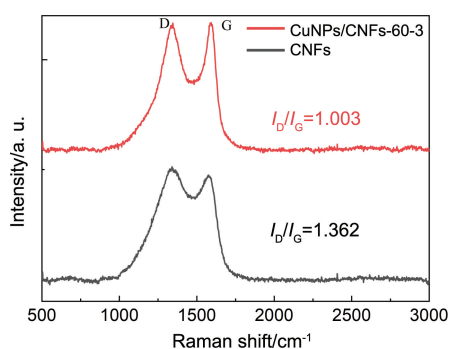


图 7 CNFs 及 CuNPs/CNFs-60-3 的拉曼光谱  
Fig. 7 Raman spectra of CNFs and CuNPs/CNFs-60-3

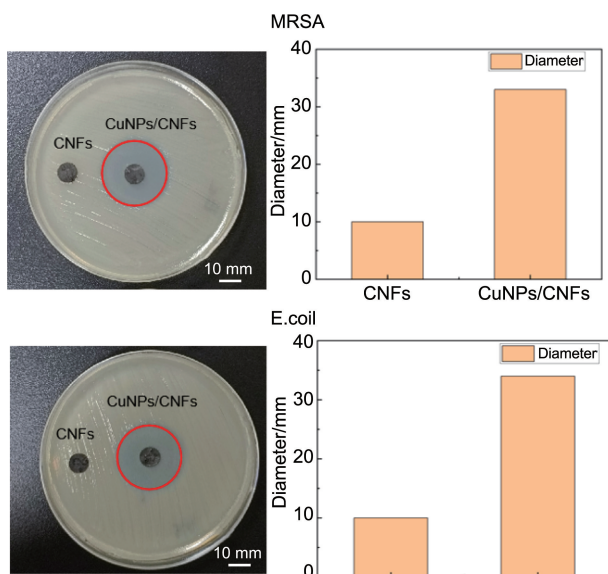


图 8 CNFs 与 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈状况及抑菌圈直径

Fig. 8 The status and diameter of inhibitory zone of CNFs and CuNPs/CNFs-60-3 composite fiber membrane on MRSA and E. coli

效果，抑菌圈直径较前者有了明显的扩大，表明 CuNPs/CNFs-60-3 具有优异的抗菌性能。通过对抑菌圈直径的对

比，CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜对大肠杆菌的抗菌效果要略优于金黄色葡萄球菌，这可能是金黄色葡萄球菌的细菌结构较大肠杆菌更为致密。

将 CNFs、CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜与 LB 肉汤混合培养后，稀释一定倍数取 50 μL 菌悬液在 LB 琼脂上涂布，抗菌效果如图 9 所示。CNFs 所涂布的琼脂平板可观察到较多的金黄色葡萄球菌与大肠杆菌菌落，而 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜所涂布的琼脂平板则有了明显的改善，通过菌落数量计算出 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌的抗菌率分别可达 67% 和 84%，如图 10 所示。这主要归因于 CuNPs 表面和细胞膜之间的直接相互作用使细胞膜破裂，导致细胞失去必要的营养物质和水分，最终萎缩。

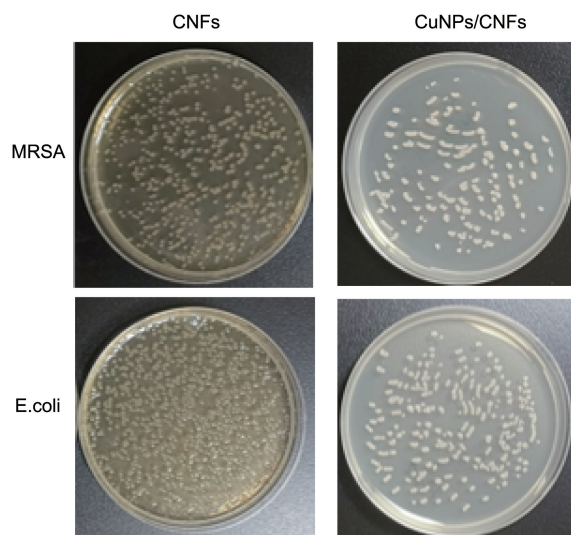


图 9 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜和金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的共培养的抑菌状况

Fig. 9 Bacteriostatic status of CuNPs/CNFs-60-3 composite fiber membrane co-cultured with MRSA and E. coli

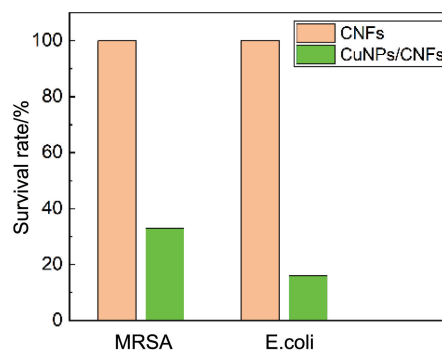


图 10 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜和金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的共培养的细菌存活率

Fig. 10 Bacterial survival rate of CuNPs/CNFs-60-3 composite fiber membrane co-cultured with MRSA and E. coli

为了深入探究 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜的抗菌机制, 通过 SEM 观察了大肠杆菌和金黄色葡萄球菌在与 CNFs 和 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜接触后的细胞形态。如图 11 所示, 在 CNFs 样品上大肠杆菌表现出完整且饱满的杆状细胞结构, 表明细菌是活的; 相反, 在与 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜接触 1 h 后, 大肠杆菌细胞壁出现破裂, 且细胞内容物渗出, 细胞呈现出一种褶皱与粗糙的现象, 表明大肠杆菌已死亡。在与 CNFs 纤维膜接触 1 h 后, 金黄色葡萄球菌细胞表现出圆润光滑的球状细胞结构; 而在与 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜接触 1 h 后, 金黄葡萄球菌的细胞壁被破坏, 原来的球状结构变形成扁平状结构, 且细胞周围存在其死亡后泄露的蛋白质和核酸等物质, 这表明金黄葡萄球菌已经死亡。该结果与上述抑菌圈法和菌落计数法结论一致, CNFs 基本没有抑菌作用, 而 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜展现出优异的抗菌性能。

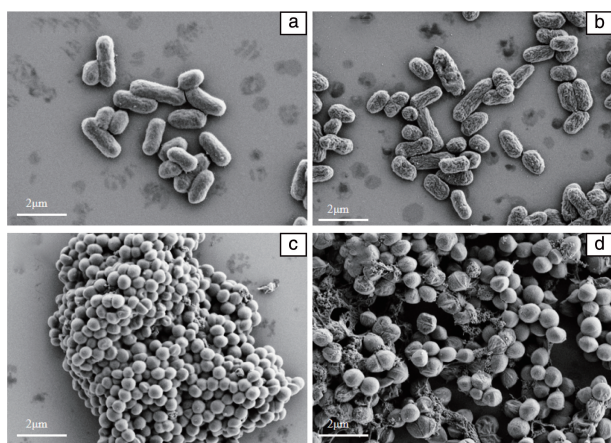


图 11 不同材料与细胞培养后的形貌 SEM 照片: (a) CNFs 与大肠杆菌, (b) CuNPs/CNFs-60-3 与大肠杆菌, (c) CNFs 与金黄色葡萄球菌, (d) CuNPs/CNFs-60-3 与金黄色葡萄球菌

Fig. 11 SEM images of the morphology of different materials and cells after culture: (a) CNFs and *E. coli*, (b) CuNPs/CNFs-60-3 and *E. coli*, (c) CNFs and MRSA, (d) CuNPs/CNFs-60-3 and MRSA

本文在添加低浓度 (0.05 mol/L)  $\text{CuCl}_2$  的条件下, 在较短时间 (3 s) 内制备出了粒径超小、分布均匀 CuNPs/CNFs-60-3 复合纤维膜, 并完成了对大肠杆菌 (84%) 与金黄色葡萄球菌 (67%) 的有效抑制。这与以往的铜抗菌材料的制备工艺相比, 能够大大节约纳米铜成本与时间成本<sup>[32]</sup>。

## 4 结论

本研究以聚丙烯腈和 N,N-二甲基甲酰胺为基础, 通过溶液喷射纺丝技术结合碳化工艺, 制备出了碳纳米纤

维 (CNFs)。随后利用碳热冲击工艺, 将铜纳米粒子 (CuNPs) 有效地负载到 CNFs 上, 从而获得了 CuNPs/CNFs 复合纤维膜。

(1) 在制备过程中, 通过精细调控碳热冲击工艺的电流和时间等关键参数, 不仅将 CuNPs 的粒径降低至 50 nm 左右, 而且使纳米粒子在碳载体上具有较高的分散密度。

(2) 以大肠杆菌和金黄色葡萄球菌作为测试菌种, 通过抑菌圈法、菌落计数法和 SEM 观察法, 研究了 CuNPs/CNFs 复合纤维膜的抗菌效果。结果表明, CuNPs/CNFs 复合纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均表现出显著的抑制作用, 尤其是对大肠杆菌的抗菌率高达 84%, 充分展现了其在医疗消毒、纺织品等实际应用中的潜力。

## 参考文献 References

- [1] LEWIS K. *Cell*[J], 2020, 181(1): 29–45.
- [2] MELO M C, MAASCH J R, de la FUENTE-NUNEZ C. *Communications Biology*[J], 2021, 4(1): 1050.
- [3] 陈曦. 品牌与标准化[J], 2023(3): 115–117.  
CHEN X. *Brand & Standardization*[J], 2023(3): 115–117.
- [4] BANSAL R, JAIN A, GOYAL M, *et al.* *Journal of Family Medicine and Primary Care*[J], 2019, 8(11): 3518–3524.
- [5] CHINEMEREM N D, UGWU M C, OLISELOKE A C, *et al.* *Journal of Clinical Laboratory Analysis*[J], 2022, 36(9): e24655.
- [6] MOBARKI N, ALMERABI B, HATTAN A. *International Journal of Medical and Development Countries*[J], 2019, 40(4): 561–564.
- [7] 程则瑞, 冯永海. 中国材料进展[J], 2025, 44(2): 209–216.  
CHENG Z R, FENG Y H. *Materials China*[J], 2025, 44(2): 209–216.
- [8] 马丛丛, 吴广升. 青岛大学学报(医学版)[J], 2023, 59(3): 471–474.  
MA C C, WU G S. *Journal of Qingdao University (Medical Sciences)* [J], 2023, 59(3): 471–474.
- [9] BHADAURIYA P, MAMTANI H, ASHFAQ M, *et al.* *ACS Applied Bio Materials*[J], 2018, 1(2): 246–258.
- [10] CHATTERJEE A K, CHAKRABORTY R, BASU T. *Nanotechnology* [J], 2014, 25(13): 135101.
- [11] DALECKI A G, CRAWFORD C L, WOLSCHELDORF F. *Advances in Microbial Physiology*[J], 2017, 70: 193–260.
- [12] LI H, LI C, ZHANG C, *et al.* *Journal of Applied Polymer Science* [J], 2014, 131(21): 41011.
- [13] SINGH S, ASHFAQ M, SINGH R K, *et al.* *New Biotechnology*[J], 2013, 30(6): 656–665.
- [14] CHEN F, YAO Y, NIE A, *et al.* *Advanced Energy Materials* [J], 2018, 8(25): 201800466.
- [15] CARTWRIGHT A, JACKSON K, MORGAN C, *et al.* *Agronomy*[J], 2020, 10(7): 1018.
- [16] SHRESTHA S, WANG B, DUTTA P. *Advances in Colloid and Inter-*

- face Science[J], 2020, 279: 102162.
- [17] RUIZ-CORNEJO J C, SEBASTIÁN D, LÁZARO M J. Reviews in Chemical Engineering[J], 2020, 36(4): 493–511.
- [18] YADAV D, AMINI F, EHRMANN A. European Polymer Journal[J], 2020, 138: 109963.
- [19] DADOL G C, KILIC A, TIJING L D, *et al.* Materials Today Communications[J], 2020, 25: 101656.
- [20] DARISTOTLE J L, BEHRENS A M, SANDLER A D, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2016, 8(51): 34951–34963.
- [21] AYDIN H, KURTAN U, DEMIR M, *et al.* Energy & Fuels[J], 2022, 36(4): 2212–2219.
- [22] YANG P, ZHAO H, YANG Y, *et al.* ES Materials & Manufacturing [J], 2020, 7(6): 34–39.
- [23] JUNG W B, PARK H, JANG J S, *et al.* ACS Nano[J], 2021, 15(3): 4235–4244.
- [24] XU X, DU Y, WANG C, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2020, 822: 153642.
- [25] YAO Y, HUANG Z, XIE P, *et al.* Science[J], 2018, 359(6383): 1489–1494.
- [26] XIE H, HONG M, HITZ E M, *et al.* Journal of the American Chemical Society[J], 2020, 142(41): 17364–17371.
- [27] XIE P, YAO Y, HUANG Z, *et al.* Nature Communications[J], 2019, 10(1): 4011.
- [28] YAO Y, HUANG Z, XIE P, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2019, 11(33): 29773–29779.
- [29] 何王美. 基于金属有机框架纳米酶/聚己内酯复合纤维膜的制备及其抗菌应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- HE W M. Preparation of Metal-Organic Framework Nanozyme/Polycaprolactone Composite Fibrous Membrane for Antibacterial Application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [30] 谭才邓, 朱美娟, 杜淑霞, 等. 食品工业[J], 2016, 37(11): 122–125.
- TAN C D, ZHU M J, DU S X, *et al.* The Food Industry[J], 2016, 37(11): 122–125.
- [31] 龚军辉, 王晶. 生物学教学[J], 2018, 43(2): 70–71.
- GONG J H, WANG J. Biology Teaching[J], 2018, 43(2): 70–71.
- [32] 陈丹, 徐晓玲, 段惶, 等. 功能材料[J], 2012, 43(6): 803–805.
- CHEN D, XU X L, DUAN X, *et al.* Journal of Functional Materials [J], 2012, 43(6): 803–805.