

光催化法制备GO@Au纳米复合材料及其抗菌性能

孙薇¹, 李福森², 韩存鑫¹, 邓月¹, 魏文林¹, 李冰¹, 时东方²

(1. 长春师范大学物理学院, 2. 科技创新研究院, 长春 130032)

摘要 采用光催化法合成了氧化石墨烯(GO)和Au纳米粒子的复合材料. 研究发现, 金纳米粒子的尺寸可以通过光照时间进行调控, 当光照小于20 min时, GO和Au纳米粒子复合材料的吸收光谱没有明显的吸收峰, 说明金纳米团簇(GO@Au NCs)生成; 随着光照时间增加, 在540 nm处出现吸收峰, 说明金纳米粒子的尺寸增大, 金纳米颗粒(GO@Au NPs)生成. GO的光生电子被用于还原Au³⁺生成Au纳米粒子, 因此GO中的大量氧化官能团得以保留, 使得GO@Au NCs和GO@Au NPs均具有极好的亲水性. 金纳米粒子的抗菌性能与尺寸密切相关, GO@Au NCs展现出了良好的抗菌性能, 对金黄色葡萄球菌的抗菌率高达99%. GO@Au NPs无明显抗菌效果, 这是由于GO@Au NCs的高比表面积和高缺欠态有利于活性氧的生成.

关键词 氧化石墨烯; 金纳米粒子; 纳米复合材料; 抗菌性能

中图分类号 O643

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240461

Photocatalytic Preparation and Antibacterial Activity of GO@Au Nanocomposites

SUN Wei¹, LI Fusen², HAN Cunxin¹, DENG Yue¹, WEI Wenlin¹,

LI Bing^{1*}, SHI Dongfang²

(1. College of Physics, 2. Institute of Innovation Science and Technology,
Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

Abstract A composite material composed of graphene oxide (GO) and gold nanoparticles was synthesized via photocatalytic method. The research results indicate that the size of the Au nanoparticles can be controlled by adjusting the illumination time. When the illumination time is less than 20 min, the absorption spectrum of the GO and Au nanohybrids does not exhibit any significant absorption peaks, suggesting the formation of GO loaded Au nanoclusters (GO@Au NCs). As the illumination time increases, an absorption peak appears at 540 nm, indicating an increase in the size of the Au nanoparticles and the formation of GO loaded Au nanoparticles (GO@Au NPs). Furthermore, since the photogenerated electrons from GO are utilized to reduce Au³⁺ to form Au nanoparticles, a large number of oxidative functional groups in GO are preserved, endowing both GO@Au NCs and GO@Au NPs with excellent hydrophilicity. Notably, the antibacterial performance of Au nanoparticles is closely related to their size. GO@Au NCs demonstrated outstanding antibacterial properties, with a bacterial inhibition rate against *Staphylococcus aureus* as high as 99%. In contrast, GO@Au NPs showed hardly significant antibacterial effect. This is

收稿日期: 2024-10-11. 网络首发日期: 2024-12-23.

联系人简介: 李冰, 女, 博士, 副教授, 主要从事低维材料的制备及性质研究. E-mail: libing@ccsfu.edu.cn

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金(批准号: 20210101164JC)、吉林省教育厅科学技术研究项目(批准号: JJKH20220824KJ)和长春师范大学自然科学基金(批准号: 2020-010)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of the Jilin Provincial Science & Technology Department, China(No.20210101164JC), the Science and Technology Project of Jilin Provincial Department of Education, China(No. JJKH20220824KJ) and the Natural Science Foundation of Changchun Normal University, China(No.2020-010).

attributed to the high specific surface area and high defect states of GO@Au NCs, which favor the generation of reactive oxygen species (ROS).

Keywords GO; Au nanoparticles; Nanocomposites; Antibacterial activity

近年来, 纳米材料作为新型抗菌剂被广泛关注, 并且在体外和动物模型中证明了它们在治疗感染性疾病(包括抗生素耐药性疾病)方面的有效性^[1,2]. 与传统有机抗菌剂相比, 纳米材料具有抗菌谱广, 抗菌机制多样、不易产生耐药等特点^[3-5]. 金纳米粒子是一种典型的抗菌纳米材料, 由于其优异的广谱抗菌效果以及良好的化学稳定性和生物相容性, 被广泛应用于生物传感、生物成像、药物递送、癌症治疗和细菌杀灭等生物医学领域^[6-8]. 金纳米粒子的抑菌能力受尺寸的影响较大, 尺寸越小, 抗菌性能越强^[9,10]. 尺寸大于 10 nm 的金纳米颗粒(Au NPs)基本不具备抗菌性能^[11], 而超微尺寸(<5 nm)的金纳米簇(Au NCs)由于具有高比表面积、高缺陷态和离散的电子态, 不仅能够破坏细菌细胞膜结构、抑制细菌蛋白质合成, 还能够诱导细菌内产生局部高浓度的活性氧(ROS), 使得细菌凋亡^[12-14]. 然而, 由于表面能较高, 金纳米团簇容易聚集, 因此金纳米团簇的合成对反应条件的要求极高, 常用的方法有微乳化法、模板法、配体诱导蚀刻法等^[15-17]. 传统方法往往需要使用有毒的还原剂, 并且反应条件较为苛刻, 限制了其在生物医药、环境监测等领域的应用. 因此, 开发一种无毒、稳定性高、方法简单且可控性强的 Au NCs 合成方法具有重要意义.

氧化石墨烯(GO)是表面带有大量氧化官能团的石墨烯材料. 氧化官能团的引入使 GO 不仅具有较好的水溶性, 还使其成为半导体材料, 具有光催化特性^[18]. 在紫外光照条件下, GO 内部分布的 sp^2 杂化的碳团簇(sp^2C)可以产生电子和空穴对, 其中光生空穴具有氧化性, 光生电子具有还原性^[19], 可以用于还原 Au^{3+} 合成 Au 金纳米粒子(Au NPs). 光催化法合成金纳米粒子不需要引入还原剂和表面活性剂, 并且易于通过控制光照的强度和时间调控生长速度^[20]. 本文利用 GO 的光催化活性制备了稳定性高、亲水性好的 GO 和金纳米粒子的复合材料. 通过调节光照时间实现了对金属粒子尺寸的控制, 得到了尺寸小于 5 nm 的 Au NCs, 相比于大尺寸的 Au NPs, Au NCs 表现出极好的抗菌效果, 抗菌率可以达到 99%.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

氧化石墨(GO, 分析纯), 北京新兴百瑞技术有限公司; 氯金酸($H AuCl_4$, 分析纯), 南京化学试剂股份有限公司; 3,3',5,5'-四甲基联苯胺(TMB, 分析纯), 克拉玛尔公司; 过氧化氢(H_2O_2 , 质量分数 30%), 北京化工试剂公司; 超纯水(电阻率 18.25 $M\Omega \cdot cm$); 金黄色葡萄球菌(ATCC6538)、马铃薯葡萄糖液体培养基(PDB 液体培养基, 营养肉汤)和马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA 固体培养基, 营养琼脂), 北京保藏生物科技有限公司.

紫外氙灯光源(功率为 400 W, 主波长为 365 nm), 北京天脉恒辉光源电器公司; UVmini-1280 型紫外-可见吸收光谱仪(UV-Vis), 日本 Lodin 公司; ESCALABMKLL 型 X 射线光电子能谱仪(XPS, $Al K\alpha$ 射线, $E=1486.6 eV$), 英国 VG 公司; JEM-2100HR 型透射电子显微镜(TEM), 日本 JEOL 公司.

1.2 样品的制备

将 2 mL $H AuCl_4$ 溶液(0.12 mg/mL)加入到 10 mL GO 悬浮液(0.2 mg/mL)中, 将混合后的溶液置于紫外灯下分别光照 10, 20, 30 和 40 min. 在光催化反应后, 将混合溶液离心.

1.3 催化性能测试

GO, GO@Au NCs(光照 20 min)和 GO@Au NPs(光照 30 min)的催化性能检测过程: 首先, 将 600 μL TMB(5 mmol/L)和 200 μL H_2O_2 (10 mmol/L)进行混合, 加入 1.5 mL 超纯水, 然后分别加入 100 μL GO, GO@Au NCs 和 GO@Au NPs 对其进行实时监测, 测试其吸收光谱.

1.4 抗菌效果测定

采用平板菌落计数法测试抗菌性能, 抗菌对象为革兰氏阳性细菌的典型代表——金黄色葡萄球

菌. 用接种环取出菌株, 接种至 1 mL PDB 液体培养基中, 在 37 °C, 160 r/min 的环境中培养 24 h. 取出培养结束的菌液, 在 PDA 固体培养基上划线, 于 37 °C 下倒置过夜培养, 直到长出单菌落, 备用. 将单菌落接种至 1 mL PDB 液体培养基中, 在 37 °C, 160 r/min 的环境中培养 24 h. 取 4 个无菌 15 mL 离心管, 分别标记为空白对照组、GO 组、GO@Au NCs 组和 GO@Au NPs 组, 分别加入 8 mL PDB 培养基、GO、GO@Au NCs 和 GO@Au NPs, 随后分别加入 100 μ L 菌液, 在 37 °C、160 r/min 的条件下进行培养. 将培养后的菌液涂布于平板, 置于恒温培养箱中继续培养 24 h, 统计培养皿上的菌落数(单位为 cfu/cm², 表示每平方厘米的菌落数). 通过公式抗菌率=[(对照的菌落数-样品的菌落数)/对照的菌落数] \times 100% 计算抗菌率(%), 评估样品的抗菌性能^[21].

2 结果与讨论

2.1 GO 和 Au 纳米粒子复合材料的表征

图 1 给出了 GO, GO 和 Au 纳米粒子的复合材料的 UV-Vis 吸收光谱, 其中 227 nm 处的吸收峰来自于 GO 片层内电子的 π - π^* 跃迁, 300 nm 处的吸收峰来自于 C=O 的 n - π^* 跃迁^[19]. 由图 1 插图可见, 光照 10 和 20 min 时 GO 溶液发生了明显的颜色变化, 但在 540 nm 处未见明显的吸收峰, 而从 200 nm 到可见区范围内吸收增强, 这是 GO@Au NCs 生成的有利证据^[9]. 金团簇由于其尺寸小, 电子结构呈现出分立的能级, 与大尺寸金纳米颗粒不同, 不具有连续的能带结构. 这种分立的能级结构使得金团簇在光照下产生单电子跃迁, 而不是集体激发产生表面等离子体共振 (SPR). 因此, 在 UV-Vis 光谱中, 金团簇通常不会表现出明显的 SPR 吸收峰. 光照时间增加到 30 min 时, 反应溶液颜色进一步加深, 并且在 540 nm 处出现新的吸收峰, 这是金纳米粒子典型的 SPR 吸收峰, 表明金团簇尺寸变大, GO@Au NPs 生成^[22].

Au NCs 和 Au NPs 的形成与 GO 表面发生的光化学反应有关. GO 中随机分布两种不同类型的碳团簇: sp^2 C 团簇和含氧 sp^3 C 团簇. sp^3 C 团簇具有约 5.5 eV 的宽带隙^[23], 而 sp^2 C 团簇的带隙较窄, 且与其尺寸直接相关, 形成了独特的多量子阱模型^[24], 其中 sp^2 C 团簇作为势阱, 而 sp^3 C 团簇则作为势垒^[25], 具体结构见 Scheme 1. 在紫外光照射下, sp^2 C 团簇处产生光生电子和空穴, 并且被限域在高势垒的 sp^3 C 团簇内, 其中, 电子用于还原 Au^{3+} 生成 Au 单质, 空穴和水反应生成 O_2 和 H^+ .

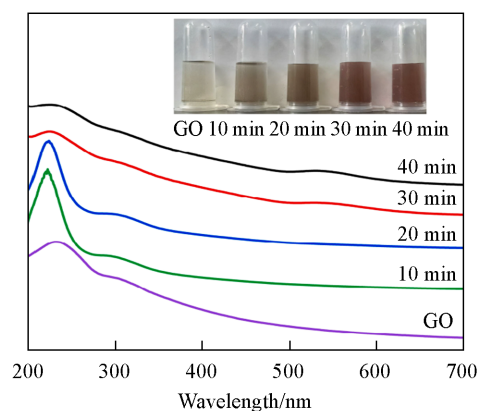
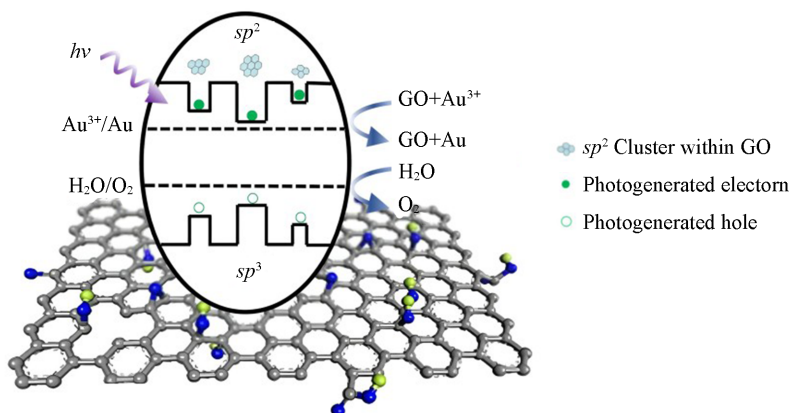


Fig. 1 UV-Vis absorption spectra of GO and the mixed solution of GO and HAuCl₄ after UV irradiation
Inset: the optical photograph of GO and the mixed solution of GO and HAuCl₄ after UV irradiation.



Scheme 1 Schematic diagram of photochemical reaction mechanism of GO@Au NCs

由于 Au^{3+} 的存在, 在紫外光激发下, GO 不再发生自身的还原反应, 这可由 GO 的 $\pi-\pi^*$ 跃迁和 $n-\pi^*$ 跃迁吸收光谱不随光照变化而变化得到证明(图 1). sp^2 C 团簇的光生电子能够向 Au^{3+} 转移的原因可归结为: (1) 静电吸附作用, 带正电的 Au^{3+} 和表面带负电荷的 GO 可以充分接触^[26]; (2) GO 的标准电极电势(SHE=0.38 eV)低于 Au^{3+} (SHE=1.498 eV), 因此电子可以有效地从 GO 转移到金属阳离子上^[27].

为了确定 GO@Au NCs 的生成, 图 2(A) 给出了 GO 光照前后的 XPS 谱图. 可见, 在光照 20 min 后, 有 Au 元素存在. 图 2(B) 给出了 GO@Au NCs 样品的 Au_{4f} 电子的高分辨 XPS 谱图, 83.3 和 86.2 eV 处的两个峰分别对应于 $\text{Au}_{4f_{7/2}}$ 和 $\text{Au}_{4f_{5/2}}$ 的结合能, 证明了 Au 单质的生成^[28]. 另外, 图 2(C) 为 GO 中 C_{1s} 的 XPS 数据拟合图, 位于 284.6, 286.5, 287.1 和 288.7 eV 处的峰分别对应 sp^2 杂化中的 C=C—C 键. sp^3 杂化中的 C—O 键、C=O 键和 O—C=O 键的结合能^[29]. 紫外光照 20 min 后, GO@Au NCs 的 XPS 谱图与 GO 相比没有明显变化[图 2(D)], 证明了紫外光照射下 GO 没有发生自身的还原反应, 光生电子全部用于 Au^{3+} 的还原, 这一结果与 UV-Vis 吸收光谱的结果一致. GO@Au NCs 中氧化官能团的保留使得复合材料在水中具有较好的分散性, 这利于其在药物缓释、抗菌等领域的应用.

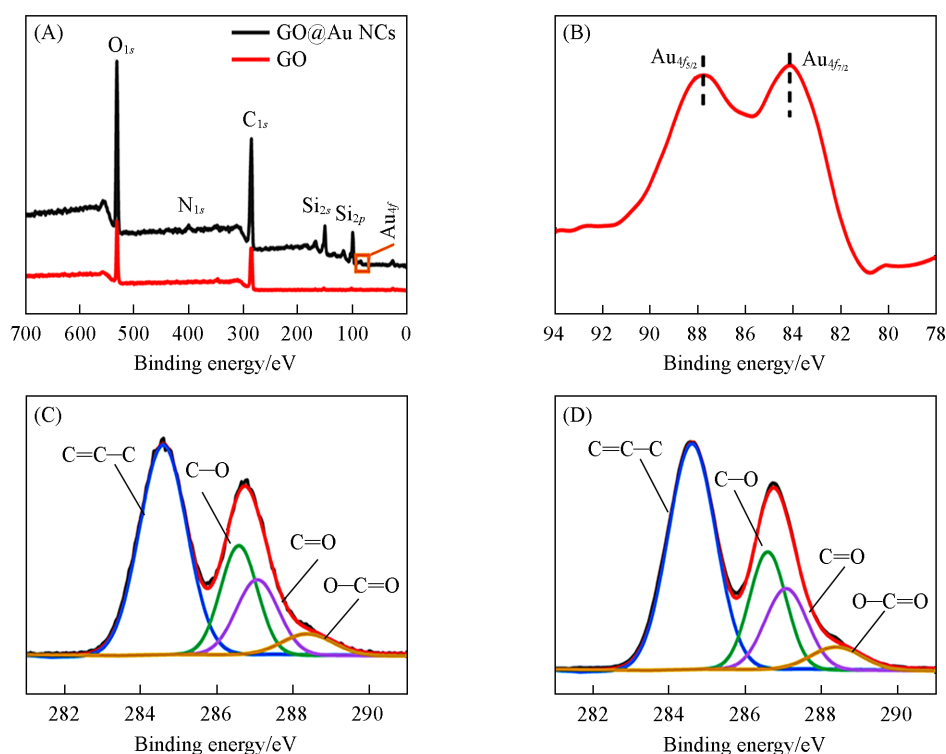


Fig. 2 XPS survey spectra of GO and GO@Au NCs(A), XPS spectra of Au_{4f} of GO@Au NCs(B), curve-fitted C_{1s} region of GO(C) and GO@Au NCs(D)

图 3(A) 为光照 20 min 后 GO@Au NCs 的高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)照片, 可见, 金纳米颗粒呈球状, 尺寸主要分布在 1~4 nm 之间[图 3(C)], 并且分散性较好. 从局部放大的图片(红色标注)可以明显看出金纳米粒子的晶格排列, 其晶格间距为 0.235 nm, 与 Au 立方晶体(111)面相对应^[30]. 另外, 由于 Au NCs 的尺寸较小, 粒子表面的缺欠较多[图 3(A)中绿色标注区, 可见 Au NCs 表面存在大量的缺欠态]. 图 3(B) 为光照 30 min 时, GO@Au NPs 的 HRTEM 照片, 可见, 生成的纳米金颗粒尺寸较大, 且分布较广, 在 4~18 nm 之间[图 3(D)]. 从局部放大图(蓝色标注)可以看到, 其晶格间距为 0.235 nm, 与 Au 立方晶体(111)面相对应^[30]. 可以看出, 尺寸较大的 Au NPs 结晶性明显优于 GO@Au NCs.

众所周知, Au NCs 尺寸小, 表面原子的配位不足, 使得它们具有更高的活性, 导致纳米粒子的表面能显著增加. 这种高的表面能使得纳米粒子在热力学上处于不稳定状态, 倾向于通过团聚等方式来降低表面能, 从而达到更稳定的状态. 因此 Au NCs 极易出现聚集, 需要借助表面活性剂和配体等实现

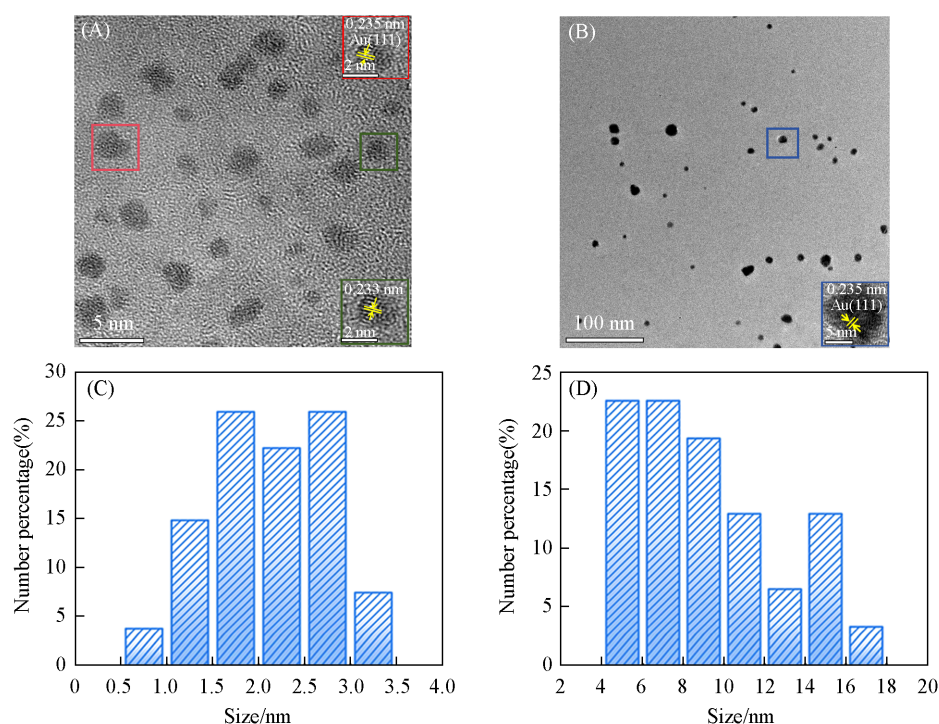


Fig. 3 HRTEM images(A, B) and particle size distributions(C, D) of Au NCs(A, C) and Au NPs(B, D)

稳定. 由于GO的存在, Au NCs可以稳定存在, 不发生聚集, 这使得它的缺欠态完全暴露, 有利于增加Au NCs的催化性能, 增强抗菌性能.

2.2 GO和Au纳米复合材料的抗菌性能

活性氧(ROS)指代氧来源的自由基和非自由基, 包含超氧阴离子(O_2^-)、羟自由基($\cdot OH$)和臭氧(O_3)等, 这些物质由于含有不成对的电子, 从而具有很高的化学反应活性^[31,32]. 分光光度法可以用于检测ROS, 其中, TMB常被用作检测 $\cdot OH$ 的探针^[33]. 图4(A)为检测原理, 羟基自由基具有强氧化性, 可以将无色的TMB氧化成蓝色产物, 该产物在特定波长(如652 nm)下具有显著的吸收峰, 从而可以通过分光光度法进行定量检测. 将GO, GO@Au NCs, GO@Au NPs分别与 H_2O_2 和TMB进行混合测试[图4(B)], 可见, GO@Au NCs组产生显色反应[图4(B)插图], 且在652 nm处存在显著的吸收峰, 这表明GO@Au NCs在 H_2O_2 的存在下生成 $\cdot OH$. 而GO和GO@Au NPs组在 H_2O_2 的存在下, 在652 nm处未见吸收峰, 表明GO和GO@Au NPs没有产生ROS. 上述结果与文献[34,35]报道一致, 小尺寸的GO@Au NCs具有更高的催化活性, 其表面缺欠态利于ROS的生成. 相比之下, 大尺寸的GO@Au NPs

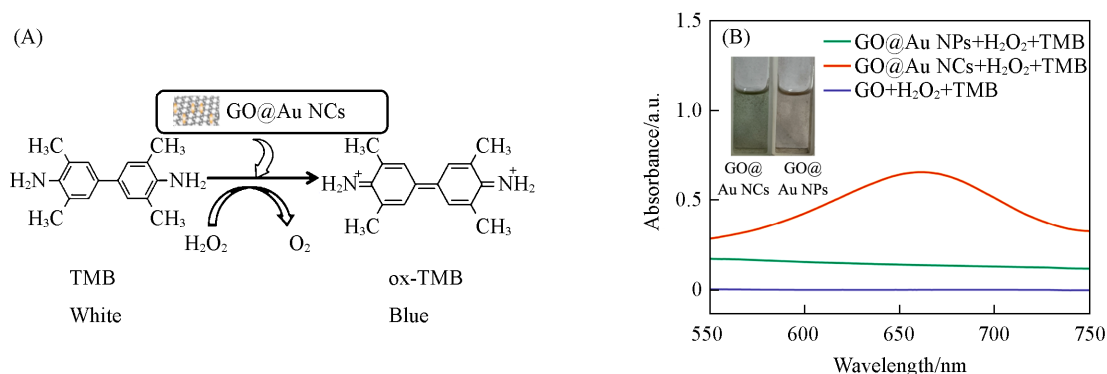


Fig. 4 Schematic diagram of color reaction principle of GO@Au NCs and TMB(A), the absorbance value of TMB chromogram of GO, GO@Au NCs and GO@Au NPs added 10 mmol/L H_2O_2 (B)
Inset of (B): optical photos of GO@Au NPs+ H_2O_2 +TMB and GO@Au NCs+ H_2O_2 +TMB.

较稳定,不利于ROS的产生^[34-36].

图5给出了空白、GO、GO@Au NCs和GO@Au NPs的抑菌圈照片.可见,与GO和GO@Au NPs相比,GO@Au NCs表现出了优异的抑菌性能.

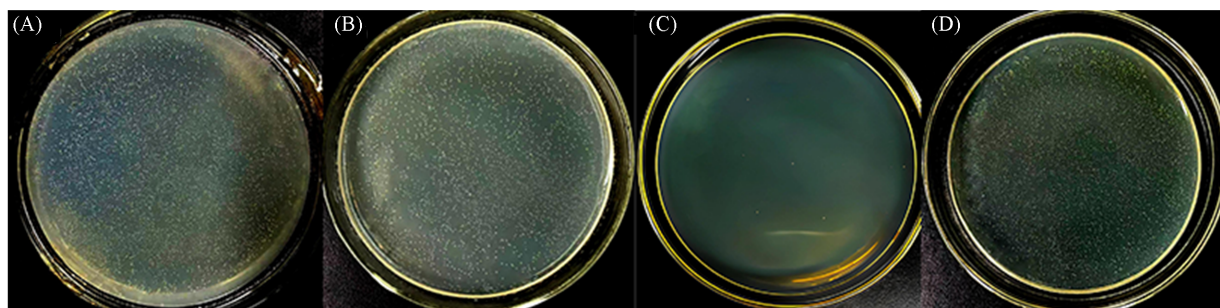


Fig. 5 Antibacterial test results against *Staphylococcus aureus* of blank(A), GO(B), GO@Au NCs(C) and GO@Au NPs(D) after 24 h incubation

为了定量评估GO@Au纳米复合材料的抗菌性能,采用菌落计数器对浸有不一样品的培养皿中的菌落数量进行统计,并通过计算抗菌率来评价样品的抗菌活性.由图6可见,GO表现出一定程度的抗菌活性,对金黄色葡萄球菌的抗菌率为45.79%,这是由于GO黏附在细菌膜中的氢键和脂多糖上,从而阻止了细菌的营养吸收过程,导致细菌膜受损,最终细胞死亡^[37].在保持相同颗粒浓度的条件下,GO@Au NCs抗菌活性显著增强,对金黄色葡萄球菌的抗菌率达到99%.相比之下,GO@Au NPs其抗菌性能并未出现明显提升,抗菌率仅达到48.32%,表明大尺寸Au NPs基本不具备抗菌能力.GO@Au NCs和GO@Au NPs抗菌能力产生差异的主要原因是GO@Au NCs尺寸小、表面缺欠态高,催化能力强,有利于ROS的产生^[38,39].

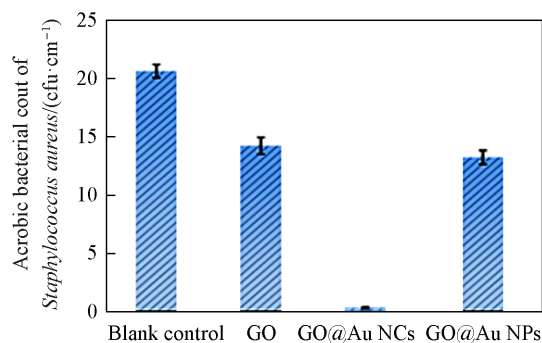


Fig. 6 Inhibition rate of GO, GO@Au NCs and GO@Au NPs on *Staphylococcus aureus*

3 结 论

采用光化学方法制备了GO和Au的复合材料,可以通过光照时间调控Au纳米粒子的尺寸.光照小于20 min时,GO@Au NCs生成,尺寸分布在1~4 nm之间,其表面缺欠态较高,催化活性强,有利于ROS的生成.随着光照时间的增加,金纳米粒子的尺寸增大,GO@Au NPs生成,其尺寸分布较广,在4~18 nm之间,其结晶性明显改善.金纳米粒子的抗菌性能与尺寸密切相关,GO@Au NCs展现出了良好的抗菌性能,对金黄色葡萄球菌的抗菌率高达99%.相比之下,GO@Au NPs无明显抗菌效果,这是由于GO@Au NCs的高比表面积和高缺欠态有利于活性氧的生成.另外,由于氧化石墨烯表面官能团的存在,使得GO@Au NCs在水中具有较好的分散性和稳定性,这将拓展其在抑菌材料领域中的应用.

参 考 文 献

- [1] Cheeseman S., Christofferson A. J., Kariuki R., Cozzolino D., Daeneke T., Crawford R. J., Truong V. K., Chapman J., Elbourne A., *Adv. Sci.*, 2020, 7, 1902913
- [2] Jiang S., Lin K., Cai M., *Front. Chem.*, 2020, 8, 1—5
- [3] Rajapaksha P., Orrell-Trigg R., Shah D., Cheeseman S., Vu K. B., Ngo S. T., Murdoch B. J., Choudhury N. R., Yin H., Cozzolino D.,

- Truong Y. B., Lee A. F., Truong V. K., Chapman J., *Mater. Today Chem.*, **2023**, *27*, 101242
- [4] Kaur K., Reddy S., Barathe P., Shriram V., Anand U., Proćków J., Kumar V., *Front. Microbiol.*, **2021**, *12*, 1—18
- [5] Wu X., Abbas K., Yang Y., Li Z., Tedesco A. C., Bi H., *Pharmaceuticals*, **2022**, *15*, 487
- [6] Lipengolts A. A., Finogenova Y. A., Skribitsky V. A., Shpakova K. E., Anaki A., Motiei M., Semkina A. S., Abakumov M. A., Smirnova A. V., Grigorieva E. Y., Popovtzer R., *Int. J. Mol. Sci.*, **2022**, *24*, 70
- [7] Pallavicini P., Chirico G., Taglietti A., *Chem-Eur J.*, **2021**, *27*, 15361—15374
- [8] Ahmad S., Ahmad S., Ali S., Esa M., Khan A., Yan H., *Int. J. Nanomed.*, **2024**, *19*, 3187—3215
- [9] Zheng K., Setyawati M. I., Leong D. T., Xie J., *ACS Nano*, **2017**, *11*, 6904—6910
- [10] Genji Srinivasulu Y., Yao Q., Goswami N., Xie J., *Mater. Horiz.*, **2020**, *7*, 2596—2618
- [11] Zheng K., Setyawati M. I., Leong D. T., Xie J., *Bioact. Mater.*, **2021**, *6*, 941—950
- [12] Zhang H., Peng R., Luo Y., Cui Q., Gong F., Li L., *ACS Appl. Bio. Mater.*, **2022**, *5*, 3115—3125
- [13] Guo W., Gao W., Li Q., Qu S., Zhang L., Tan L. L., Shang L., *J. Mater. Chem. A*, **2023**, *11*, 2391—2401
- [14] Pearl W. G., Selvam R., Karmenyan A. V., Perevedentseva E. V., Hung S. C., Chang H. H., Shushunova N., Prikozhdenko E. S., Bratashov D., Tuchin V. V., Cheng C. L., *RSC Adv.*, **2024**, *14*, 3321—3334
- [15] Levi-Kalisman Y., Jadzinsky P. D., Kalisman N., Tsunoyama H., Tsukuda T., Bushnell D. A., Kornberg R. D., *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, 2976—2982
- [16] Whetten R. L., Khoury J. T., Alvarez M. M., Murthy S., Vezmar I., Wang Z. L., Stephens P. W., Cleveland C. L., Luedtke W. D., Landman U., *Adv. Mater.*, **2004**, *8*, 428—433
- [17] Dong H., Liao L., Wu Z., *J. Phys. Chem. Lett.*, **2017**, *8*, 5338—5343
- [18] Pandey A., Qureshi A., *J. Alloys Compd.*, **2017**, *703*, 500—507
- [19] Li B., Zhang X., Chen P., Li X., Wang L., Zhang C., Zheng W., Liu Y., *RSC Adv.*, **2014**, *4*, 2404—2408
- [20] Li B., Zhang X., Li X., Wang L., Han R., Liu B., Zheng W., Li X., Liu Y., *Chem. Commun.*, **2010**, *46*, 3499—3501
- [21] Kim H. J., Kim D. G., Yoon H., Choi Y. S., Yoon J., Lee J. C., *Adv. Mater. Interfaces*, **2015**, *2*, 1500298
- [22] Nguyen T. T., Nguyen T. T., Pham H. T., Nguyen D. T., Le V. V., Dao K. A., *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **2016**, *27*, 11379—11389
- [23] Papworth A. J., Kiely C. J., Amaratunga G. A. J., *Microsc. Microanal.*, **2020**, *5*, 652—653
- [24] Choi K. K., Leung K. M., Tamir T., Monroy C., *IEEE J. Quantum Electron.*, **2004**, *40*, 130—142
- [25] Kim I. S., Shim C. E., Kim S. W., Lee C. S., Kwon J., Byun K. E., Jeong U., *Adv. Mater.*, **2022**, *35*, 2204912
- [26] Maleki M. J., Ghasemi Y., Pourhassan-Moghaddam M., Asadi N., Dadashpour M., Abolghasem Mohammadi S., Akbarzadeh A., Zarghami N., *IET Nanobiotechnol.*, **2019**, *13*, 887—890
- [27] Awais A., Hussain J., Usman M., Akram W., Shahzad K., Ali T., Ahmad I., Maaza M., *Nucl. Sci. Tech.*, **2017**, *28*, 64
- [28] Schmitz M., Kesper L., Schulte M. G. H., Roese P., Berges U., Westphal C., *J. Phys.: Condens. Matter*, **2021**, *33*, 275001
- [29] Idisi D. O., Oke J. A., Bello I. T., *Int. J. Energy Res.*, **2021**, *45*, 19772—19788
- [30] Oliveira-Filho G. B., Atoche-Medrano J. J., Aragón F. F. H., Mantilla Ochoa J. C., Pacheco-Salazar D. G., da Silva S. W., Coaquira J. A. H., *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, *563*, 150290
- [31] Hu K., Relton E., Locker N., Phan N. T. N., Ewing A. G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*, 15302—15306
- [32] Zhao C., Deng H., Chen X., *Adv. Drug Delivery Rev.*, **2022**, *188*, 114456
- [33] Rubio C. P., Cerón J. J., *BMC Vet. Res.*, **2021**, *17*, 2—13
- [34] Zheng Y., Liu W., Qin Z., Chen Y., Jiang H., Wang X., *Bioconjugate Chem.*, **2018**, *29*, 3094—3103
- [35] Zheng Y., Liu W., Chen Y., Li C., Jiang H., Wang X., *J. Colloid Interface Sci.*, **2019**, *546*, 1—10
- [36] Zheng K., Setyawati M. I., Leong D. T., Xie J., *Chem. Mater.*, **2018**, *30*, 2800—2808
- [37] Shalini A., Priya K., Kothai S., Pandian K., Anbalagan G., Jaisankar V., *Chem. Pap.*, **2022**, *76*, 6861—6867
- [38] Yang Y., Fan S., Chen Q., Lu Y., Zhu Y., Chen X., Xia L., Huang Q., Zheng J., Liu X., *J. Nanobiotechnol.*, **2022**, *20*, 37
- [39] Lee E., Lee M., Kwon S., Kim J., Kwon Y., *Nano Convergence*, **2022**, *9*, 27

(Ed.: Y, K, S)