

载银磁性 Fe₃O₄ 纳米粒子的制备与催化及抗菌性能

左 芳¹, 陈朝喜¹, 安 鹏², 陈 园¹, 李欣华¹, 程昌敬¹

(1. 西南民族大学, 四川 成都 610041)

(2. 中科院成都有机化学研究所, 四川 成都 610054)

摘 要: 利用磁性纳米粒子 Fe₃O₄ 表面的聚多巴胺 (PDA) 对银离子的吸附作用, 采用种子诱导法制备了载银磁性纳米粒子 (PDA-Fe₃O₄@Ag)。采用 UV-Vis (紫外-可见) 光谱对 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的制备过程进行了分析, 采用 FTIR (红外光谱)、XRD (X 射线衍射仪)、TEM (透射电镜) 和 VSM (振动样品磁强计) 等手段对所得的 PDA-Fe₃O₄@Ag 粒子进行表征; 研究了 PDA-Fe₃O₄@Ag 对 4-硝基苯酚还原反应的催化作用, 还测试了其抗菌性能。结果表明, 纳米金种子的存在是制备 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的关键; 在外加磁场作用下该磁性催化剂可以容易地从反应体系中分离, 经多次循环使用后仍具有良好的催化性能; 此外 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子具有杀菌性能, 且经磁分离回收循环利用 5 次后仍呈现对金黄色葡萄球菌较好的杀菌效果。

关键词: 载银; 纳米粒子; 催化; 抗菌; 磁分离

中图分类号: TM27

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)07-1887-06

纳米银粒子由于其卓越的光学^[1]、抗菌^[2-5]和催化^[6-8]性能引起了人们的广泛关注。纳米银作为抗菌材料具有抗菌谱广、抗菌力强、且细菌对其不产生耐药性等优点, 其作为一种长效性抗菌材料在医学领域中得到越来越广泛的应用, 是近年来医用抗菌材料研究的重点^[2-5]。作为催化剂, 纳米银粒子对环氧化^[6]、加氢^[7]和醛化^[8]等反应具有很高的催化活性。单纯的纳米银粒子作为催化剂及抗菌剂价格较为贵重, 且不易从体系中分离, 未分离的银粒子会对环境产生污染^[9]。将纳米银负载于磁性纳米粒子表面, 在进行抗菌及催化后实现磁分离, 可循环利用, 这样就降低了材料的应用成本及减少了银粒子在环境中的残留^[10-14]。

含有儿茶酚和氨基基团的小分子-多巴胺 (DA) 作为仿贻贝黏附蛋白的前驱体, 在弱碱性条件下, 会被溶解氧化, 并自发聚合形成多功能化、含邻苯二酚单元的聚多巴胺 (PDA)^[15]。PDA 能够黏附在几乎所有材料的表面, 形成一层均匀的纳米薄膜。聚多巴胺涂层中的邻苯二酚单元所表现出来的金属束缚能力可以使金属离子附着并通过无电镀还原到基体表面上^[16]。

采用种子诱导银沉积在磁粒子表面制备载银功能化纳米粒子 (PDA-Fe₃O₄@Ag), 首先合成聚多巴胺功能化 Fe₃O₄ (PDA-Fe₃O₄) 纳米粒子, 然后合成粒径在

3 nm 左右的纳米金粒子 (Au seed), 并将其吸附在 PDA-Fe₃O₄ 作为晶种, 得到金纳米修饰的 PDA-Fe₃O₄ 粒子, 再向此粒子溶液中分批加入 AgNO₃ 和抗坏血酸, 还原银离子得到载银磁性 (PDA-Fe₃O₄@Ag) 纳米粒子。由于反应是在水系条件下进行的, 所用试剂毒性小, 是一种绿色的合成方法。采用一系列测试手段对载银磁性纳米粒子进行了形貌及性能表征; 并且以硼氢化钠还原 4-硝基苯酚反应为模型, 考察了该粒子的催化性能及作为催化剂循环使用性能。此外还以大肠杆菌 (E. coli) 和金黄色葡萄球菌 (S. aureus) 作为抑菌实验的菌种, 测试了 PDA-Fe₃O₄@Ag 粒子的抗菌性能和循环抗菌性能。

1 实 验

抗坏血酸、盐酸多巴胺、四水合氯金酸、硝酸银、三羟甲基氨基甲烷盐酸盐, 分析纯, 国药集团; 琼脂、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌, 营养肉汤培养液作为培养基, 西南民族大学生命科学院提供; 自制 MH 肉汤: 牛肉粉、可溶性淀粉、酸水解酪蛋白, 培养基; 自制 MH 琼脂: 琼脂、牛肉粉、可溶性淀粉、酸水解酪蛋白; 自制 LB 肉汤: 胰蛋白胍、酵母浸粉、氯化钠; 其他试剂购于成都长征试剂有限公司; 实验用水

收稿日期: 2015-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (50903011, 51273220); 西南民族大学 2014 年研究生学位点建设项目 (2014XWD-S0703)

作者简介: 左 芳, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 西南民族大学化学与环境保护工程学院, 四川 成都 610041, 电话: 028-85523315, E-mail: polymerzf@126.com

均为去离子水。

采用 Thermo Nicolet IR200 型红外光谱仪测定样品的红外光谱; 采用岛津公司 UV-500 型光谱仪测定粒子溶液的紫外-可见光谱; 纳米粒子的形貌用 Hitachi HU-11B TEM 透射电镜进行观察, 加速电压为 100 kV; 采用 Shimadzu XD-D1 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试, Cu-为辐射源, 工作电压为 30 kV, 工作电流 30 mA; 采用南京大学仪器厂的 LH-3 型振动样品磁强计 (VSM) 表征纳米粒子的磁性能。

PDA-Fe₃O₄ 纳米粒子的制备参考文献[17], 金纳米种子制备参考文献[18]。PDA-Fe₃O₄@Ag 的制备过程如下: 取 PDA-Fe₃O₄ (28.35 mg/mL) 1.06 mL 于烧杯中, 加入 60 mL 金种子溶液, 超声 2 min, 静置 20 min, 磁分离, 去除清液后用 30 mL 水分散加入到三口烧瓶中, 搅拌 (600 r/min); 取 0.5 mL AgNO₃ (37.2 mg/mL) 溶液加入到三口烧瓶中, 30 min 后加入 0.5 mL 抗坏血酸 (19.2 mg/mL); 60 min 后分别加入 0.5 mL AgNO₃ (37.2 mg/mL) 和 0.5 mL 抗坏血酸 (19.2 mg/mL); 重复步骤上述步骤 2 次; 产品磁分离, 水洗 2 次, 用 30 mL 水分散 (在加入下一次 AgNO₃ 之前, 取出 0.5 mL 样液, 水洗 2 次, 测试紫外-可见光谱)。

在反应瓶中, 加 4-硝基苯酚溶液 (浓度为 1 mmol/L) 8 mL, NaBH₄ 0.0367 g, 再加入 1 mL 的 PDA-Fe₃O₄@Ag 的水分散液, 室温条件下进行催化反应。每隔一定时间间隔, 用磁铁进行分离, 然后取少量液体用 UV-Vis 光谱进行测试。

考察循环催化性能时, 一次催化反应完成后 (反应溶液颜色从黄色变为无色), 用磁铁将 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子分散液吸附到瓶壁, 除去催化完成的溶液, 然后重新加入 4-硝基苯酚和 NaBH₄, 进行下一循环的催化反应。

配置浓度为 36 μg/mL 的 MH 琼脂, 倒入培养皿; 用 LB 肉汤分别对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行稀释, 使含菌量为 10⁵ cfu/mL; 取稀释后的细菌 2 mL 于试管中, 分别加入 1 mL Fe₃O₄ (1 mg/mL)、PDA-Fe₃O₄ (1 mg/mL)、PDA-Fe₃O₄@Ag (3.85 mg/mL), 振荡 30 min; 取作用后的混合液 0.1 mL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 每种试样接种 3 板; 将培养物置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h。

循环抗菌实验如下: 配置浓度为 36 μg/mL 的 MH 琼脂, 倒入培养皿; 用 LB 肉汤对金黄色葡萄球菌进行稀释, 使含菌量为 10⁵ cfu/mL; 取稀释后的细菌 2 mL 于试管中, 加入 1 mL PDA-Fe₃O₄@Ag (3.85 mg/mL), 振荡 30 min, 取作用后的混合液 100 μL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒

温箱中培养 12 h; 磁分离后, 向试管中加入 0.93 mL 水和 1.87 mL 菌液, 振荡 30 min 取作用后的混合液 100 μL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h; 磁分离后, 向试管中加入 0.87 mL 水和 1.73 mL 菌液, 振荡 30 min 取作用后的混合液 100 μL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h; 磁分离后, 向试管中加入 0.80 mL 水和 1.60 mL 菌液, 振荡 30 min 取作用后的混合液 100 μL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h; 磁分离后, 向试管中加入 0.73 mL 水和 1.47 mL 菌液, 振荡 30 min 取作用后的混合液 100 μL 接种到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h; 磁分离后, 向试管中加入 0.67 mL 水和 1.33 mL 菌液, 振荡 30 min 取作用后的混合液 100 μL 接种, 到琼脂平板培养基表面, 涂布均匀, 接种 2 板, 置于 35 °C 恒温箱中培养 12 h。

2 结果与讨论

2.1 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的合成

PDA-Fe₃O₄ 粒子表面含有带正电的氨基, 金纳米种子表面吸附了带负电的柠檬酸根, 因此静电引力将种子吸附到磁粒子表面, 种子之间的库仑排斥作用使它们彼此分散开^[17]。抗坏血酸可以将银离子还原为银原子。由于体系中已经含有种子晶核, 银原子不是克服巨大的成核势垒形成新的球形晶核再长大, 而是直接沉积到已存在的种子晶核上使其长大^[19]。图 1 是金种子存在及未存在情况下抗坏血酸还原硝酸银溶液的 UV-Vis 谱图。从图中对比可以看出若磁粒子表面不存在金种子, 所得到的粒子 UV-Vis 谱图中 400 nm 附近^[14]未见明显纳米银的特征吸收峰。故此金种子的存在对合成载银磁性纳米粒子起了很大的作用。

图 2 是在载有纳米金种子的 PDA-Fe₃O₄ 粒子水分散液中, 随着 AgNO₃ 和抗坏血酸的分批加入, 所得产物溶胶的紫外-可见吸收光谱。从图 2 中可以看出, 随着 AgNO₃ 和抗坏血酸的加入次数的增加, 410 nm 处银的吸收峰逐渐增强, 即 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子上包覆的银含量逐渐增加。载银粒子的吸收峰与纳米银相比发生了红移^[2], 这是因为银包覆在磁粒子表面后, 粒径和介电常数都发生了变化, 所以银的最大吸收峰发生红移。

2.2 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的表征

图 3 是 PDA-Fe₃O₄ 和 PDA-Fe₃O₄@Ag 的红外光谱图。由 PDA-Fe₃O₄ 的红外光谱图可知, 1627 及 1486 cm⁻¹ 出现的吸收峰归属于苯环的伸缩振动吸收峰,

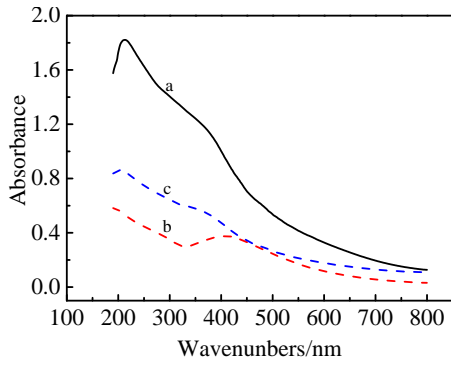


图 1 PDA-Fe₃O₄，金种子存在及不存在下制备载银纳米粒子水分散液的紫外-可见光图谱

Fig.1 UV-Vis spectra of PDA-Fe₃O₄ (a), silver loaded PDA-Fe₃O₄ in the presence (b) and absence (c) of gold seeds

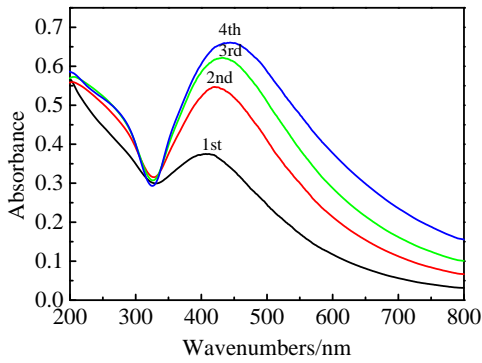


图 2 不同反应阶段产物溶胶的紫外-可见吸收光谱

Fig.2 UV-Vis spectra of the products at different stages

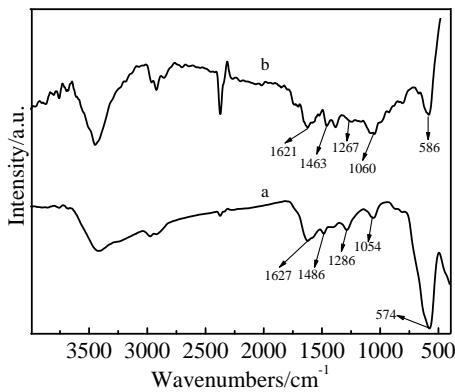


图 3 PDA-Fe₃O₄ 和 PDA-Fe₃O₄@Ag 红外谱图

Fig.3 FTIR spectra of PDA-Fe₃O₄ (a) and PDA-Fe₃O₄@Ag (b)

1286 cm⁻¹ 出现了对应于 C-O 伸缩振动吸收峰。与 PDA-Fe₃O₄ 相比, PDA-Fe₃O₄@Ag 红外光谱图中出现了对应于 PDA 的特征吸收峰, 但是强度明显减弱。

PDA-Fe₃O₄@Ag 在 580 cm⁻¹ 左右处 Fe-O 吸收峰发生蓝移, 且吸收强度减弱, 这应该是由银的引入引起的。

图 4 是 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的 XRD 图谱。从图中可以看出 Fe₃O₄ 的 6 个特征衍射峰(JCPDS card No.75-1609), 对应 2θ值分别为 32.2°(100), 35.7° (311), 57.1° (511), 62.7° (440), 74.2° (533), 81.5° (711)。此外, 图中曲线中除了有 Fe₃O₄ 的衍射峰外, 还在 2θ值分别为 38.1° (111), 44.4° (200), 64.4° (220), 77.4° (311) 出现了衍射峰, 这些特征衍射峰与 Ag 标准图谱(JCPDS card No.89-3722)很好的吻合, 结果表明银成功沉积于磁粒子表面。

图 5 是 PDA-Fe₃O₄ 和 PDA-Fe₃O₄@Ag 的透射电镜照片。通过二者对比可以发现, 引入银以后粒子粒径

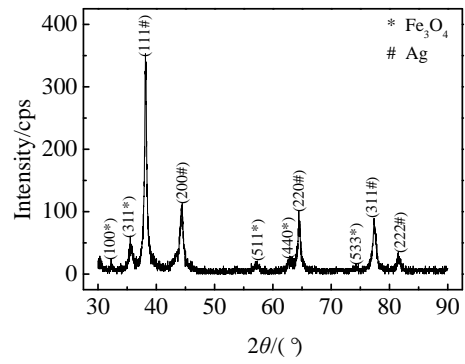


图 4 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern of PDA-Fe₃O₄@Ag nanoparticles

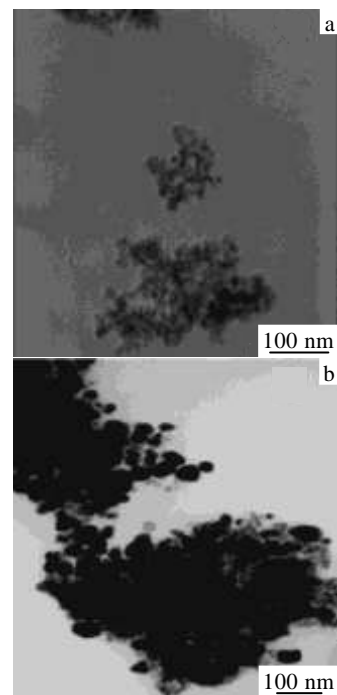


图 5 PDA-Fe₃O₄ 和 PDA-Fe₃O₄@Ag TEM 照片

Fig.5 TEM images of PDA-Fe₃O₄ (a) and PDA-Fe₃O₄@Ag (b)

变大, 颜色变深, 这是因为银本身电子密度大引起的。

图 6 是 PDA-Fe₃O₄、PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的磁滞回线图。从图 6 中可以看出, 室温条件下, 2 种纳米粒子矫顽力和剩磁都为零, 说明纳米粒子都是超顺磁性的。当磁性纳米粒子的尺寸在临界尺寸以下时, 在室温条件下, 纳米粒子的热振动能量大于各向异相能量, 从而表现出超顺磁性。从图中还可看出, PDA-Fe₃O₄、(A)PDA-Fe₃O₄@Ag 粒子饱和磁化强度分别为 59.0 和 27.0 (A·m²)·g⁻¹, PDA-Fe₃O₄ 的饱和磁化强度远大于 PDA-Fe₃O₄@Ag。这是因为, Ag 是非磁性材料, 磁性纳米粒子表面包覆上 Ag 后, 粒子的磁性会降低, 因此饱和磁化强度明显降低^[19]。

2.3 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的催化性能

金属纳米粒子催化 NaBH₄ 还原芳香族的硝基化合物反应速度快, 反应过程容易监测, 通常作为模型反应被用于考察纳米粒子的催化性能^[20,21]。为了考察所制备的 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的催化性能, 选择 NaBH₄ 还原 4-硝基苯酚来考察纳米粒子的催化活性。图 7 是 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子催化 4-硝基苯酚还原时, 紫外-可见吸收峰的曲线变化过程。随着催化反应的进行, 吸收波长在 400 nm 处的 4-硝基苯酚特征吸收峰逐渐降低, 而吸收波长在 300 nm 处的 4-氨基苯酚特征吸收峰逐步增加, 溶液颜色也发生明显变化, 由此说明在 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子催化下, NaBH₄ 可以将 4-硝基苯酚还原成 4-氨基苯酚。

纳米粒子分散液作催化剂的最大难题之一是, 催化完成后不易从体系中分离, 难以回收利用^[17], 而 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子集催化性能和磁性为一体, 催化反应完成后, 通过外界磁场将纳米粒子从体系中分离出来, 实现了催化剂的快速分离。而且, 分离后的纳米粒子还可以继续催化 NaBH₄ 还原 4-硝基苯酚的反应, 达到循环利用的目的 (图 8)。从图 8 的左上角

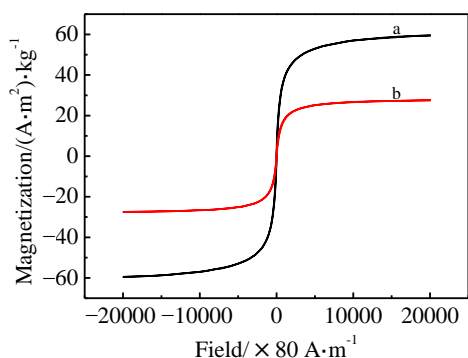


图 6 PDA-Fe₃O₄ 和 PDA-Fe₃O₄@Ag 在 T=300 K 时的磁滞曲线
Fig.6 Hysteresis loops of PDA-Fe₃O₄ (a) and PDA-Fe₃O₄@Ag (b) measured at 300 K

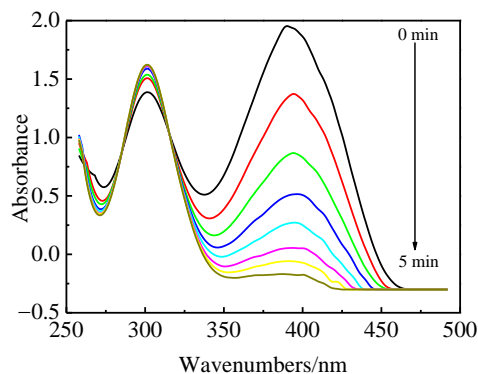


图 7 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子催化 4-硝基苯酚还原过程溶液紫外-可见光谱图

Fig.7 UV-Vis spectra during the reduction of 4-nitrophenol catalyzed by PDA-Fe₃O₄@Ag nanoparticles

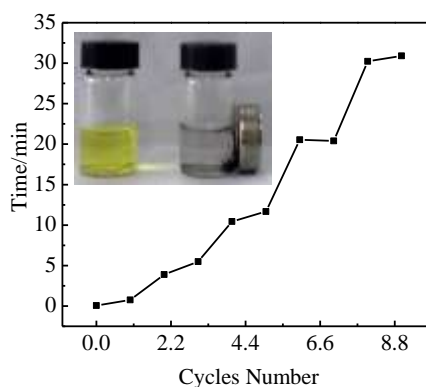


图 8 PDA-Fe₃O₄@Ag 作为催化剂催化硼氢化钠还原 4-硝基苯酚的循环使用图

Fig.8 Reusability of PDA-Fe₃O₄@Ag nanoparticles as a catalyst for the reduction of 4-nitrophenol with NaBH₄

插图可以看出, 催化还原反应前, 溶液为黄色, 反应结束后, 4-硝基苯酚被完全降解, 体系变成无色 (见网络版)。用磁铁可以很快将纳米粒子从体系中分离出来, 然后用于下一循环的催化反应。实验发现, PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的循环催化连续进行 9 次, 都能在 35 min 内使 4-硝基苯酚的还原转化率达到 100%。

从图 8 中还可以看出, 随着循环次数的增加, 每次催化速率都逐渐降低, 4-硝基苯酚的转化率也降低, 可能是因为在催化反应过程中有部分纳米粒子发生了团聚, 降低了有效接触面积, 所以循环次数越多, 催化反应速率越慢。

2.4 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子的抗菌性能

图 9 是 PDA-Fe₃O₄@Ag 纳米粒子对金葡菌 (A) 和大肠杆菌 (B) 的抗菌结果照片。从图中可以看出

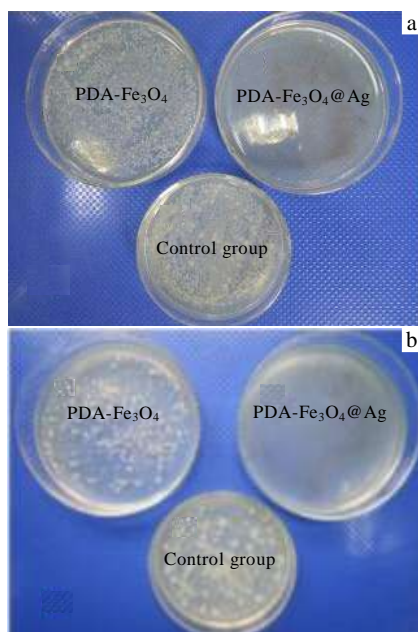


图 9 对金黄色葡萄球菌及大肠杆菌的抗菌结果照片

Fig.9 Photographs of the growth of *S. aureus* (a) and *E. coli* (b) after 24 h incubation with controlling solution

$\text{PDA-Fe}_3\text{O}_4\text{@Ag}$ 纳米粒子对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有一定的抗菌效果。

图 10 是磁粒子循环抗菌实验照片。磁分离循环使用 5 次仍然具有一定的抗菌效果, 6 次循环利用后抗菌效果显著下降, 这可能是因为随着与细菌溶液接触时间的增加粒子表面杀菌实验后吸附了少量细菌破裂碎片, 影响了粒子表面银的释放, 此外也有可能多次使用后粒子表面的银会流失, 也会引起载银粒子的抗菌性能降低。

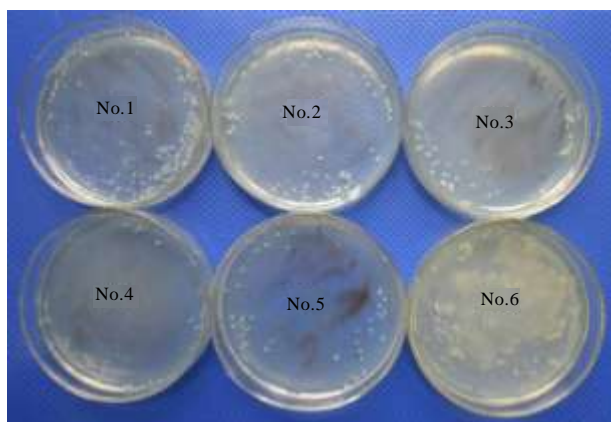


图 10 $\text{PDA-Fe}_3\text{O}_4\text{@Ag}$ 纳米粒子对金黄色葡萄糖菌的循环抗菌效果

Fig.10 Antibacterial effect of recycled $\text{PDA-Fe}_3\text{O}_4\text{@Ag}$ nanoparticles against *S. aureus*

3 结 论

1) 利用聚多巴胺对银离子的吸附性, 采用种子诱导沉积法成功制备了载银磁性纳米粒子 $\text{PDA-Fe}_3\text{O}_4\text{@Ag}$ 。该粒子可以高效的催化硼氢化钠还原 4-硝基苯酚, 并且磁分离循环使用 9 次仍有催化性能。

2) 粒子具有抗菌效果, 而且磁分离循环使用 5 次, 仍具有较好的抗菌效果。 $\text{PDA-Fe}_3\text{O}_4\text{@Ag}$ 作为磁-光功能材料在催化剂、抗菌、吸附剂等领域具有潜在的用途, 尤其是其磁分离循环使用性能, 可大大降低使用成本及减少材料对环境的污染。

参考文献 References

- [1] Rycenga M, Cobley C M, Zeng J *et al.* *Chem Rev*[J], 2011, 111(6): 669
- [2] Liu Y, Zheng Z, Zara J N *et al.* *Biomaterials*[J], 2012, 33(34): 8745
- [3] Gao A, Hang R, Huang X *et al.* *Biomaterials*[J], 2014, 35(13): 4223
- [4] Kelly F M, Johnston J H. *ACS Appl Mater Interfacs*[J], 2011, 3(4): 1083
- [5] Fei X, Jia M, Du X *et al.* *Biomacromolecules*[J], 2013, 14(12): 4483
- [6] Christopher E P, Linic S. *J Am Chem Soc*[J], 2008, 130(34): 11 264
- [7] Naraginti S, Sivakumar A. *Spectrochim Acta Part A*[J], 2014, 128: 357
- [8] Beier M J, Hansen T W, Grunwaldt J D. *J Catal*[J], 2009, 266(2): 320
- [9] Hun Park H, Park S, Ko G *et al.* *J Mater Chem B*[J], 2013, 1: 2701
- [10] Xiong R, Lu C, Wang Y *et al.* *J Mater Chem A*[J], 2013(1): 14 910
- [11] Jiang W, Zhou Y, Zhang Y *et al.* *Dalton Trans*[J], 2012, 41: 4594
- [12] Sun L, He J, An S *et al.* *Chinese J Catal*[J], 2013, 34: 1378
- [13] Wang H, Shen J, Li Y *et al.* *ACS Appl Mater Interfacs*[J], 2013, 5(19): 9446
- [14] He Quanguo(贺全国), Liu Jun(刘 军), Huang Chunyan(黄春艳) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(10): 2169
- [15] Lee H, Dellatore S M, Miller W M *et al.* *Science*[J], 2007, 318(5849): 426
- [16] Wang W, Jiang Y, Wen S *et al.* *J Colloid Interf Sci*[J], 2011, 368: 241

- [17] An P, Zuo F, Wu Y *et al.* *Nano*[J], 2013, 8(6): 1 350 061
- [18] Brown K R, Walter D G, Natan M. *J Chem Mater*[J], 2000, 12(2): 306
- [19] Salgueiri O-maceira V, Correa-Duarte M A, Farle M *et al.* *Chem Mater*[J], 2006, 18(11): 2701
- [20] Dotzauer D M, Dai J, Sun L *et al.* *Nano Lett*[J], 2006, 6(10): 2268
- [21] Huang J, Vongehr S, Tang S *et al.* *Langmuir*[J], 2009, 25(19): 11890

Preparation, Catalytic and Antibacterial Properties of Silver-deposited Fe₃O₄ Nanoparticles

Zuo Fang¹, Chen Zhaoxi¹, An Peng², Chen Yuan¹, Li Xinhua¹, Cheng Changjing¹

(1. Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

(2. Chengdu Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610054, China)

Abstract: Silver-deposited magnetic nanoparticles (PDA-Fe₃O₄@Ag) were prepared through the seed-mediated method exploiting the adsorption of silver ions by the polydopamine (PDA) which was coated on the surface of Fe₃O₄. The preparation process was studied using UV-Vis spectra and the prepared nanoparticles were characterized with several analytical techniques including Fourier-transform infrared (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and vibrating sample magnetometer (VSM). The catalytic action on the reduction of 4-nitrophenol and the antibacterial property of PDA-Fe₃O₄@Ag were studied. The result indicates that the existence of gold seeds is the key to prepare PDA-Fe₃O₄@Ag nanoparticles. The magnetic catalyst can be separated easily from the reaction system by applied magnetic field, and still has good catalytic performance after repeated recycling. In addition, PDA-Fe₃O₄@Ag nanoparticles exhibit bactericidal properties, and still shows good bactericidal effect on *S. aureus* after recycling use for 5 times.

Key words: silver-deposited; nanoparticles; catalytic; antibacterial; magnetic separation

Corresponding author: Zuo Fang, Ph. D., Associate Professor, College of Chemistry & Environment Protection Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, P. R.China, Tel: 0086-28-85523315, E-mail:polymerzf@126.com