

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.02.005

磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子的 制备与抑菌性能测试

黄春艳, 李凌琰, 贺诗阳, 潘耀武, 梁洁, 贺全国

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用水热法合成了磁性空心 MnFe_2O_4 纳米粒子, 然后用 3-氨基丙基三乙氧基硅烷对其表面进行了改性并吸附银离子, 还原后成功制备了磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子, 并采用 X 射线衍射仪、透射电镜、磁强计、紫外光谱等对试样进行了表征。通过抑菌圈法对 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子的抑菌性能进行了测试。结果表明: 磁性空心 MnFe_2O_4 纳米粒子没有抑菌性能; $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对大肠杆菌的抑菌圈半径为 1.78 cm, 对金黄色葡萄球菌的抑菌圈半径为 2.14 cm; $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的抑菌持久性检测结果说明, 所制备的载银磁性复合纳米粒子抑菌剂的稳定性较好, 抑菌性能较持久。

关键词: 空心 MnFe_2O_4 ; $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子; 抑菌性能; 3-氨基丙基三乙氧基硅烷

中图分类号: TQ465.91

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)02-0021-05

The Preparation and Antibacterial Property Testing of Magnetic $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ Composite Nanoparticles

Huang Chunyan, Li Lingyan, He Shiyang, Pan Yaowu, Liang Jie, He Quanguo

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Magnetic hollow MnFe_2O_4 nanoparticles were prepared by hydrothermal method and the nanoparticles surface were modified by (3-aminopropyl) triethoxysilane (APTES), then absorbed silver ions. After reduction the magnetic $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ composite nanoparticles were successfully prepared. The X-ray diffraction, transmission electron microscopy, magnetometer and ultraviolet spectrometer were applied to characterize the samples. Inhibition zone method was used to detect the antimicrobial effect of $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ composite particles. The characterization and detection results showed that the parent hollow magnetic MnFe_2O_4 was not active in antimicrobial property, and the inhibition zone radius of the composite $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ to *E. coli* was 1.78 cm and that to *S. aureus* was 2.14 cm. The $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ antibacterial durability test results showed that Ag-carrying magnetic composite particles had high stable and lasting antibacterial performance.

Keywords: hollow MnFe_2O_4 ; $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ composite particles; antibacterial property; (3-aminopropyl) triethoxysilane

收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (11JJ6038, 11JJ5042), 大学生创新计划基金资助项目 (湖工大教字[2011-12])

作者简介: 黄春艳 (1987-), 女, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为生物传感器与纳米功能材料,

E-mail: hcy7207@163.com

通信作者: 贺全国 (1973-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事生物传感器和纳米功能材料方面的教学与研究, E-mail: hequanguo@126.com

0 引言

目前的抗菌剂由于难于从基体中完全分离,因而会对环境造成一定的污染,且浪费资源。如果磁性纳米粒子表面被包覆上金或银,则所构成的复合纳米粒子可以体现出金或银纳米粒子的表面化学性质和磁性纳米粒子的磁学性质的双重优点。同时,其有利于将金或银从反应混合物中分离出来,且复合粒子有低毒性和生物相容性等优点^[1-4]。章桥新等人以硅烷偶联剂 γ -巯丙基三甲氧基硅烷(γ -mercaptopropyl trimethoxysilane, MPTMS)为添加剂,甲醛为还原剂,在 $\text{Ag}[(\text{NH}_3)_2]^+$ 溶液中制备出 Ag 壳层厚度为10~15 nm的纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ 核壳复合粒子,其粒径为40~60 nm^[5]。Gong Ping等人制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子不仅具有超顺磁性,还对大肠杆菌(*E. coli*)、表皮葡萄球菌(*S. epidermidis*)、枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)均具有良好的抑菌性能^[6]。B. Chudasama等人制备了核壳结构的 Fe_3O_4 - Ag 复合粒子,该粒子对革兰氏阴性菌和阳性菌均具有很好的抑菌效果,且其最低抑菌浓度比某些抗生素的还要低,这种抗菌剂表现出优良的抗菌特性和良好的分离效果^[7]。

本课题组人员以银和磁性空心结构 MnFe_2O_4 纳米粒子作为构筑材料,制备了磁性纳米 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子,并且以大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)作为抑菌实验的菌种,测试了复合粒子的抑菌性能和抑菌持久性能。

1 试验部分

1.1 试验材料与仪器

实验材料包括: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4Ac , 乙二醇(ethylene glycol, EG), 3-氨基丙基三乙氧基硅烷((3-aminopropyl)triethoxysilane, APTES), CH_3COOAg , HCOONa , 乙醇(纯度为99.7%),均为国产分析纯;实验用水为自制超纯水(18.2 M Ω)。

主要仪器有:透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM), JEM1230型,日本电子;X射线粉末衍射仪(X-ray diffraction, XRD), Advanced-D8型,德国Bruker公司;振动样品磁强计(vibrating sample magnetometer, VSM), HH-15型,南京大学仪器厂,南京百丁电子研究所;双光束紫外分光光度计(UV-vis), Purkinje General T-1901型,北京普析通用公司。

1.2 磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子的制备与表征

1) 复合粒子的制备

首先,根据已有文献^[8]报道的水热法,制备磁

性空心 MnFe_2O_4 纳米粒子;然后,用APTES对制备好的空心 MnFe_2O_4 纳米粒子进行表面改性,使粒子表面接枝上氨基^[9];最后,取25 mL质量浓度为1 g/L的APTES- MnFe_2O_4 乙醇溶液、20 mL浓度为0.1 mol/L的 CH_3COOAg 水溶液,将它们混合并搅拌均匀后,缓慢滴加浓度为0.1 mol/L的 HCOONa 溶液10 mL。反应在 $T=35^\circ\text{C}$, $R=500$ r/min条件下进行。当溶液由棕褐色变为黑色时,保持搅拌,80 min后冷却至室温,所有反应均在 N_2 保护下进行。反应结束后用去离子水清洗数次,即可得黑色 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子^[10]。

2) 纳米粒子的表征

采用TEM观察 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子和空心 MnFe_2O_4 纳米粒子的内部结构,并观察粒子的粒径;

采用XRD对 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子和空心 MnFe_2O_4 纳米粒子的晶型结构和组成成分进行测定分析;

采用VSM检测磁性纳米粒子的磁饱和强度,绘制磁滞回线;

利用UV-vis测定空心 MnFe_2O_4 粒子改性前后和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 粒子的紫外光谱吸收情况。

1.3 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的抑菌性能测试

取浓度为 10^6 CFU/mL量级的*E. coli*和*S. aureus*菌液250 μL ,分别滴在培养皿中的琼脂培养基上,在培养基表面用涂布棒均匀涂抹3次(每涂抹一次,平板旋转 60°);盖好平皿,在室温下干燥5 min。然后,将压制好的抑菌片(抑菌样品和对照样品,直径约0.5 cm)小心放入已涂布好的培养皿中;再将培养皿置于生化培养箱中,于 30°C 条件下培养18~24 h;最后对其进行观察和测量,并计算抑菌圈半径 R :

$$R = \text{抑菌圈外沿半径} - \text{抑菌片半径}。$$

将抑菌圈测试的平板置于生化培养箱中,继续培养8 d后测量 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的抑菌圈 R 值,并与前面的试验结果进行对比,以验证样品的抑菌持久性。

2 结果与讨论

磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子的制备原理见图1。

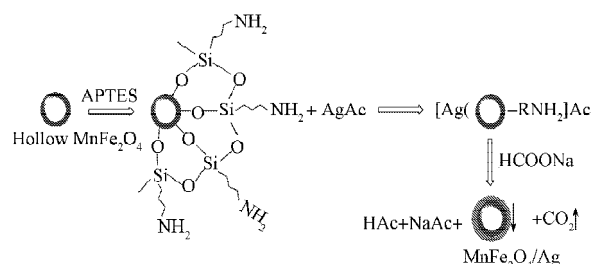


图1 磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子的合成图
Fig. 1 The synthesis of magnetic $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ composite particles

首先, 用水热法制备磁性空心 MnFe_2O_4 纳米粒子, 由于 MnFe_2O_4 纳米粒子的表面富含羟基, 因而可以和多种基团进行缩合。用 APTES 进行表面改性后, MnFe_2O_4 纳米粒子表面接枝上裸露的氨基。游离的 Ag^+ 可以与氨基形成配位键, 使得 Ag^+ 紧密地吸附在 MnFe_2O_4 纳米粒子表面。最后, 用甲酸根离子还原吸附的银离子, 即变为纳米银负载在 MnFe_2O_4 粒子上, 形成 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子。

2.1 TEM 和粒径分布分析

图 2 是 MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的 TEM 图和对应的粒径分布图。

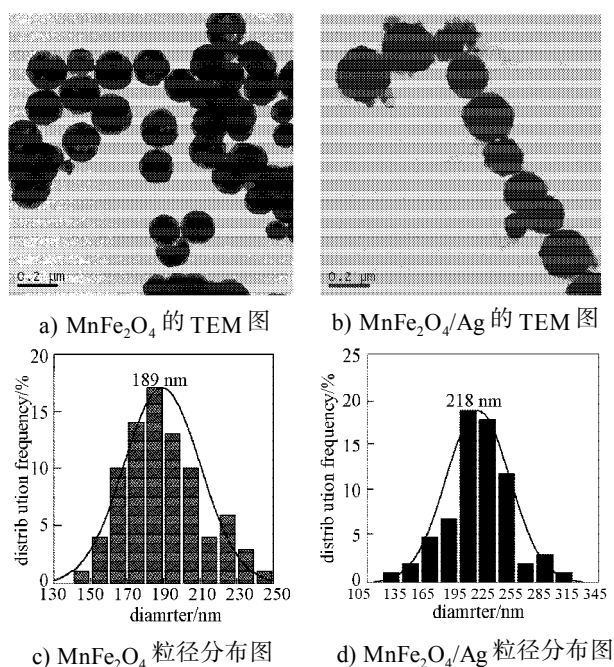


图 2 样品的 TEM 图和对应的粒子粒径分布图

Fig. 2 TEM images of samples and the corresponding diameter distribution

从图 2 所示的 TEM 图 (图 a 和图 b) 中可以看出, MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 均为多孔或空心结构的纳米微粒。对比图 a 和图 b 可以发现, 图 a 中的粒子有部分的空心结构, 在图 b 中没有看到比较明显的空心结构, 但在粒子表面可以看到有粒子包覆。因此, 可认为这是图 b 中的空心结构被负载的实心粒子填充而未显示出来。

从 MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 粒子的粒径分布图中可知, 经过负载后的粒子相比负载前的粒子, 其粒径明显增大。这说明 MnFe_2O_4 粒子被 Ag 包裹, 即成功制备了 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子。

2.2 XRD 分析

为了确定复合粒子的晶型结构和组成成分, 对 MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 纳米微粒进行了 XRD 测定, 所得结果见图 3。

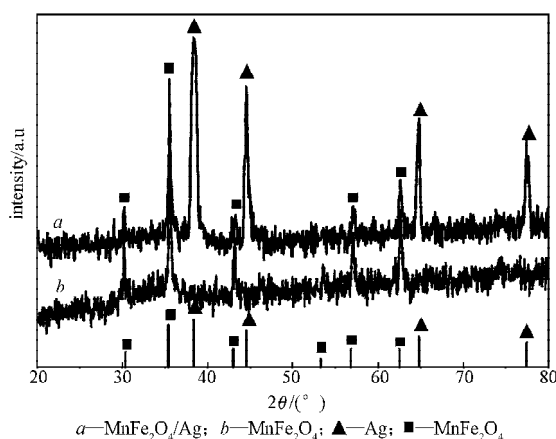


图 3 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 和 MnFe_2O_4 的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ and MnFe_2O_4 nanoparticles

由图 3 所示 XRD 图谱中, 可以观察到尖锐的衍射峰, 这说明各粒子的结晶状态良好。将图中曲线 b 的主要衍射峰与 PDF 卡片 74-2403 号一一比对, 可以发现其与标准 MnFe_2O_4 相近, 因而可以证明所得产物成分主要为 MnFe_2O_4 。此外, 图中曲线 a 中除了有 MnFe_2O_4 的衍射峰外, 还出现了与 PDF 卡片 89-3722 号相对应的衍射峰, 而这正是 Ag 的标准图谱。因而说明在此样品中, 除了 MnFe_2O_4 外, 还有纳米银的存在, 而且由于纳米银附着在 MnFe_2O_4 粒子的表面, 从而导致了 MnFe_2O_4 的峰谱减弱。这一结果同样验证了 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子的成功制备。

2.3 磁学性能分析

用 VSM 磁强计检测了 MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 样品的磁饱和强度, 并绘制了其磁滞回线, 见图 4。

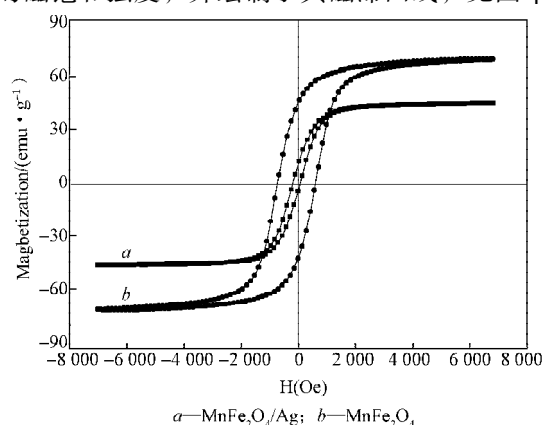


图 4 $T=300\text{ K}$ 时 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 和 MnFe_2O_4 的磁滞回线图

Fig. 4 Hysteresis loops of $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ and MnFe_2O_4 at 300 K

图 4 中, 曲线 b 所示磁滞回线是没有经过修饰和改性的 MnFe_2O_4 粒子的, 它表现出了良好的超顺磁性, 磁饱和强度高达 $68.51\text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。图中曲线 a 所示磁滞回线是经过银包覆的 MnFe_2O_4 纳米粒子的, 其

磁饱和强度为 $44.48 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这是由于 Ag 的负载降低了 MnFe_2O_4 的导磁系数作用，其磁饱和强度比原始的 MnFe_2O_4 纳米粒子要小，这也从侧面证实了有 Ag 负载在 MnFe_2O_4 纳米粒子表面^[11-12]。

2.4 紫外光谱分析

图 5 所示为 MnFe_2O_4 改性前后以及 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的紫外-可见光谱图。

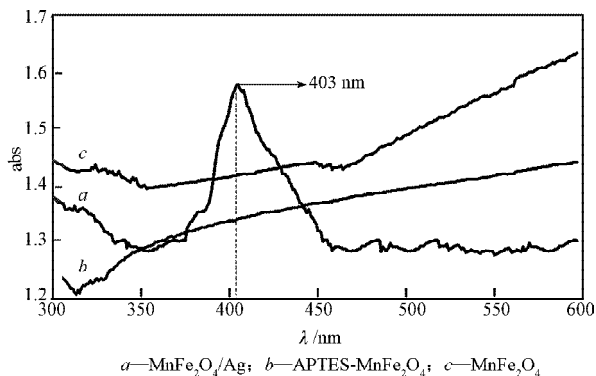


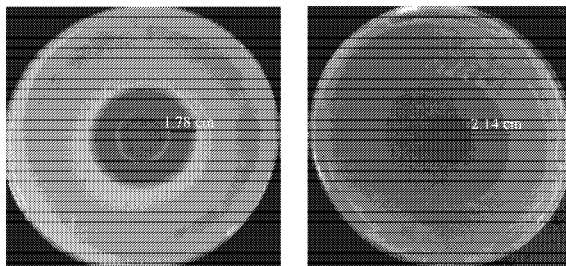
图 5 MnFe_2O_4 改性前后和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 溶液的紫外-可见吸收光谱图

Fig. 5 UV visible absorption spectra of aqueous solutions of MnFe_2O_4 , APTES- MnFe_2O_4 and $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$

从图 5 中可以看出，改性前的 MnFe_2O_4 从 300 nm 一直到 600 nm 均没有出现明显的紫外吸收峰（见曲线 a），而经过 APTES 改性后的 MnFe_2O_4 在相同的波长范围内同样没有出现紫外吸收峰（见曲线 b）。然而在 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 的紫外吸收曲线中（见曲线 c），在 401 nm 处出现了一个明显的吸收峰，与纳米银的特征吸收峰很相近。由此进一步说明 Ag 纳米粒子负载在 MnFe_2O_4 粒子表面^[13-15]。

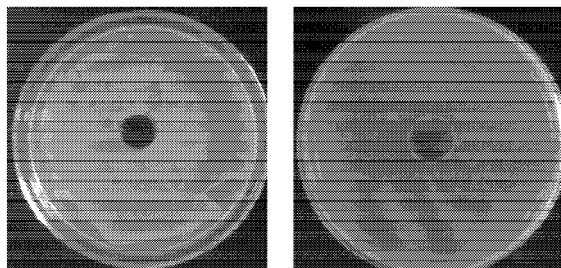
2.5 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子的抑菌性能测定

图 6 是 MnFe_2O_4 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 分别对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌圈图。由图 6 中的图 a，可测量得 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *E. coli* 的抑菌圈 R 值为 1.78 cm；由图 6 中的图 b，测得 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *S. aureus* 的抑菌圈 R 值为 2.14 cm。而图 6 中的图 c 和 d 中，没有观察到明显的抑菌圈，这表明原始的 MnFe_2O_4 粒子对 *E. coli* 和 *S. aureus* 均没有明显的抑制效果。



a) $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *E. coli* 的抑菌圈

b) $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *S. aureus* 的抑菌圈



c) MnFe_2O_4 对 *E. coli* 的抑菌圈

d) MnFe_2O_4 对 *S. aureus* 的抑菌圈

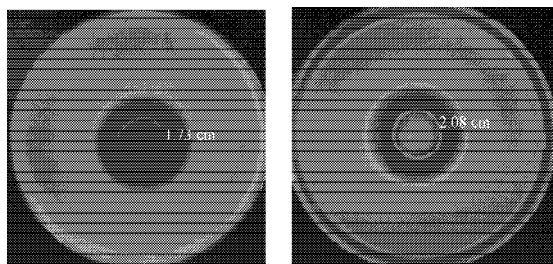
图 6 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 和 MnFe_2O_4 分别对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌圈图

Fig. 6 Bacteriostatic circle diagram of $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ and MnFe_2O_4 to *E. coli* and *S. aureus*

图 6 所示测试结果表明， $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *S. aureus* 的抑菌性能比对 *E. coli* 的强，这一结果与一般抗菌剂的结论一致；而采用本方法制备的空白 MnFe_2O_4 粒子对这两种菌均没有明显的抑菌作用。

2.6 抑菌持久性检测

将上述 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 抑菌圈测试的平板在 30°C 恒温箱中培养 8 d，然后通过观察抑菌圈的大小情况来判断其抑菌性能的持久性。图 7 所示是培养 8 d 后的 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 抑菌持久性检测结果图。



a) *E. coli* 的抑菌圈

b) *S. aureus* 的抑菌圈

图 7 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 抑菌平板培养 8 d 后的抑菌圈图

Fig. 7 Bacteriostatic circle diagram of $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ after 8 days of antibacterial plate culture

从图 7 可知，抑菌平板培养 8 d 后， $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *E. coli* 的抑菌圈 R 值为 1.73 cm，对 *S. aureus* 的抑菌圈 R 值为 2.08 cm；相较于 8 d 前的抑菌圈（大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的 R 值分别为 1.78 cm 和 2.14 cm）仅有 0.05 ~ 0.06 cm 的减小。由此说明， $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合粒子的稳定性较好，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌性持久有效。

3 结论

本研究用水热法制备了空心结构的 MnFe_2O_4 纳米粒子，然后在 APTES 改性的基础上，合成了磁性空心 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子：

1) TEM, VSM, XRD, UV-vis 表征结果证明了

MnFe_2O_4 载银的成功;

2) 抑菌圈实验结果表明, $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 对 *E. coli* 的抑菌圈 R 值为 1.78 cm, 对 *S. aureus* 的抑菌圈 R 值为 2.14 cm; 而本方法制备的空白 MnFe_2O_4 对选用的 2 种菌没有抑菌性能;

3) 抑菌性能的持久性检测结果表明, 所制备的磁性 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子的稳定性较强, 抗菌性能较持久。

4) 所制备的空心磁性载银复合纳米粒子在常温下具有优良的磁学性能, 容易进行磁性分离。因此, 它在水和其他材料的消毒和抑菌方面有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] Zhou Li, Gao Chao, Xu Weijian. Magnetic Dendritic Materials for Highly Efficient Adsorption of Dyes and Drugs [J]. Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(5): 1483-1491.
- [2] Gao Jinhao, Gu Hongwei, Xu Bing. Multifunctional Magnetic Nanoparticles: Design, Synthesis, and Biomedical Applications[J]. Accounts of Chemical Research, 2009, 42(8): 1097-1107.
- [3] Corr S A, Rakovich Y P, Gun'ko Y K. Multifunctional Magnetic-Fluorescent Nanocomposites for Biomedical Applications[J]. Nanoscale Research Letters, 2008, 3(3): 87-104.
- [4] 吴朝辉, 曾蕾, 贺全国. 磁性空心纳米粒子的制备及其生物医学应用[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 69-74.
Wu Zhaohui, Zeng Lei, He Quanguo. Magnetic Hollow Nanoparticles Preparation and Its Biomedical Application [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(4): 69-74.
- [5] 章桥新, 杨丽宁, 张佳明, 等. 磁性核壳 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ 纳米复合粒子的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(8): 987-990.
Zhang Qiaoxin, Yang Lining, Zhang Jiaming, et al. Preparation of Magnetic Core-Shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ Nanoparticles and Its Properties[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(8): 987-990.
- [6] Gong Ping, Li Huimin, He Xiaoxiao, et al. Preparation and Antibacterial Activity of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ Nanoparticles[J]. Nanotechnology, 2007, 18: 1-7.
- [7] Chudasama B, Vala A K, Andhariya N, et al. Enhanced Antibacterial Activity of Bifunctional $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ Core-Shell Nanostructures[J]. Nano Research, 2009, 2: 955-965.
- [8] He Quanguo, Huang Chunyan, Wu Zhaohui, et al. Hollow Magnetic Ferrites MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Zn}$) Fabrication and Comparison by Using Double Ammonium Salts Orientation[J]. Nanoscience and Nanotechnology Letters, 2012, 4(6): 585-592.
- [9] He Quanguo, Zeng Lei, Wu Wei, et al. Preparation and Magnetic Comparison of Silane-Functionalized Magnetite Nano-Particles[J]. Sensors and Materials, 2010, 22(6): 285-291.
- [10] 贺全国, 刘军, 黄春艳, 等. 磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ 复合纳米粒子制备与抗菌性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013 (已接收).
He Quanguo, Liu Jun, Huang Chunyan, et al. Preparation and Antibacterial Activity of Magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ Composite Nanoparticles[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2013 (Accepted).
- [11] Santra S, Tapeç R, Theodoropoulou N, et al. Synthesis and Characterization of Silica-Coated Iron Oxide Nanoparticles Inmicroemulsion: The Effect of Nonionic Surfactants[J]. Langmuir, 2001, 17(10): 2900-2906.
- [12] Wang Lingyan, Luo Jin, Fan Quan, et al. Monodispersed Core-Shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ Nanoparticles[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2005, 109(46): 21593-21601.
- [13] Mandal M, Kundu S, Ghosh S K, et al. Magnetite Nanoparticles with Tunable Gold or Silver Shell[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 286(1): 187-194.
- [14] Gao Jining, Ren Xiangling, Chen Dong, et al. Bimetallic Ag-Pt Hollow Nanoparticles: Synthesis and Tunable Surface Plasmon Resonance[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(8): 687-690.
- [15] Chen Langxing, Zhao Wenfeng, Jiao Yufen, et al. Characterization of Ag/Pt Core-Shell Nanoparticles by UV-vis Absorption, Resonance Light-Scattering Techniques[J]. Spect Acta Part A, 2007, 68(3): 484-490.

(责任编辑: 廖友媛)