

# Pluronic F127 Regulated Coprecipitation Preparation and Characterization of $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles

Yang Hu, Guangfu Yin\*, Ximing Pu

College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan  
Email: [nic0700@scu.edu.cn](mailto:nic0700@scu.edu.cn)

Received: May 4<sup>th</sup>, 2015; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2015; published: May 27<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

$\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles have great potentials in Magnetic Resonance Imaging and tumor hyperthermia. However for biomedical applications, the main challenges would be of great difficulty to synthesize  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles with homogeneous size and morphology, high magnetization, and good biocompatibility. Pluronic F127 was utilized to regulate the coprecipitation process of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. Objective: The regulation of Pluronic F127 in the coprecipitation process was expected to facilitate the formation of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles with uniform size and morphology, higher magnetization, and low cytotoxicity. Methods:  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles were prepared by chemical coprecipitation method in presence of Pluronic F127. X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and vibrating sample magnetometer (VSM) were used to characterize the composition, microstructure, morphology, and magnetization of the prepared  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. And MTT assays were conducted to investigate their cytotoxicity. Results: The ferromagnetic  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles (F127-NPs) were successfully synthesized in the presence of Pluronic F127 via coprecipitation method. Compared to the nanoparticles prepared without Pluronic F127, F127-NPs exhibited a more uniform size of ca. 50 nm and a sphere-like shape. Moreover, F127-NPs possessed a higher magnetization (44.8 emu/g) and exhibited little inhibition to HUVE cells. Conclusion: Pluronic F127 could regulate the coprecipitation process to form the high quality  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles and improve the cytocompatibility of nanoparticles. And this method is of a great potential to be applied in the field of biomedicine.

## Keywords

$\text{MnFe}_2\text{O}_4$  Nanoparticles, Pluronic F127, Coprecipitation, Ferromagnetism, Cytocompatibility

\*通讯作者。

# 普朗尼克F127调控下 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 纳米粒子的共沉淀制备及其性能表征

胡 杨, 尹光福\*, 蒲曦鸣

四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都

Email: [nic0700@scu.edu.cn](mailto:nic0700@scu.edu.cn)

收稿日期: 2015年5月4日; 录用日期: 2015年5月20日; 发布日期: 2015年5月27日

## 摘 要

$\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子在核磁共振成像和肿瘤磁热疗的应用上具有很大潜力。但是其应用于生物学领域的主要障碍是难以制备形貌均一、分散性好、磁性能优异且生物相容性良好的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子。目的: 通过 F127 调控下的共沉淀法制备粒径均匀且磁性能较好的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子, 且通过普朗尼克 F127 的修饰提高其分散性并降低  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的细胞毒性。方法: 以 F127 为模版, 采用共沉淀法制备  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  磁性纳米粒。利用 X 射线衍射 (XRD)、透射电子显微镜 (TEM)、振动样品磁强计 (VSM)、傅立叶变换红外光谱 (FT-IR) 等对样品的成分、微观结构、形貌和粒径以及磁性能进行表征。通过 MTT 实验对样品的细胞毒性进行评价。结果: 采用普朗尼克 F127 调控下的共沉淀法成功制备大约 50 nm 的球形  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  铁磁性纳米粒子, 其比饱和磁化强度为 44.8 emu/g, 对 HUVEC 细胞无明显毒性。结论: 共沉淀过程中, F127 能够控制  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的形貌、粒径, 从而提高其磁性能, 另外还可以降低其细胞毒性。该方法在生物学应用上具有很大的潜力。

## 关键词

$\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子, 普朗尼克 F127, 共沉淀法, 铁磁性, 细胞相容性

## 1. 前言

由于具有特殊的光学、电学、磁学以及生物学性质, 纳米粒子受到了广泛的研究和应用[1]。尤其是在生物学领域, 如核磁共振成像 (MRI) 造影剂[2], 肿瘤磁热疗介质[3]等, 具有特殊磁性能的纳米粒子被广泛研究和应用[4] [5]。而这些生物学应用通常要求磁性纳米粒子具有良好的分散性、均匀的形貌和粒径、特殊的磁性能 (例如超顺磁性、顺磁性、铁磁性) 以及良好的生物相容性[6], 尤其是应用于人体内的磁性纳米粒子的粒径应介于 10 nm~100 nm 从而避免被肾脏清除或者被巨噬细胞吞噬[7]。 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子在生物学应用上具有极大的潜力和广阔的前景[8]。但其应用往往受到其形貌、粒径以及生物相容性的限制。虽然许多研究都致力于  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的表面修饰和功能化, 使其能更好的应用于生物学领域。但是制备形貌和粒径均匀、分散性良好、磁性能优异且生物相容性良好的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子仍然是目前研究中的一个难题。 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的制备方法多种多样。其中, 化学共沉淀法由于具有操作简便、成本低廉、制备条件温和等优势被广泛使用。但该方法对  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的形貌、尺寸以及粒径分布缺乏控制, 从而导致所制备的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子具有不均匀的磁学性质, 因此限制了其在生物学领域的应用。然而其它化学方法, 例如水 (溶剂) 热法[9]、高温分解法[10]等, 虽然可以合成具有良好

形貌、均匀粒径且分布窄的纳米粒子,但通常会涉及有毒的化学试剂或苛刻的条件,从而降低了所制备  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的生物相容性。本文采用在模板剂普朗尼克 F127 调控下的化学共沉淀过程制备  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子。并利用生物相容的普朗尼克 F127 与  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子结合,以降低其细胞毒性。另外,普朗尼克 F127 在水溶液中能稳定地形成球状自组装结构,利用这一性质来控制  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的形貌和粒径,提高其磁学性能。作为对照,在水溶液中不能形成稳定自组装结构且含有羧基官能团的聚丙烯酸也被用作模板剂来调控  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的共沉淀形成过程。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试剂与仪器

实验所用的试剂  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaOH}$ 、无水乙醇,聚丙烯酸(PAA)均为分析纯,购置于成都科龙化工有限公司。普朗尼克-F127(F127)亦为分析纯,购置于阿拉丁(中国)化工有限公司。

使用的主要仪器包括德国布鲁克 D8-Advance X 射线衍射仪(Cu 靶,  $K\alpha$  射线,  $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$ ); 日本电子 JEM-100CX 透射电子显微镜(TEM); 美国 Lake shore-7400 振动样品磁强计(VSM); 日本岛津 IR Prestige-21 红外光谱仪(KBr 压片); 美国 Molecular Devices VM 酶标仪等。

### 2.2. 实验方法

#### 2.2.1. $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 纳米粒的制备

称取一定质量的普朗尼克 F127 并充分地溶解于 50 ml 去离子水中,另称取一定质量的  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  并溶于 50 ml 去离子水中。将上述两种溶液充分混合后,加热到一定温度,然后滴加化学计量数的 0.1 mol/L 的  $\text{NaOH}$  溶液。化学共沉淀法制备  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  的反应方程式为  $\text{Mn}^{2+} + 2\text{Fe}^{3+} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{MnFe}_2\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$ 。最后,产物经离心分离,用去离子水和无水乙醇分别洗涤 3 次,在  $60^\circ\text{C}$  下真空干燥。作为对照,在以 PAA 为模板的情况下,以相同的方法进行实验。实验条件设计如表 1 所示。

#### 2.2.2. 材料表征

本文采用德国布鲁克 D8-Advance X 射线衍射仪(Cu 靶,  $K\alpha$  射线,  $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$ )对纳米粒子的物相进行分析;采用日本电子 JEM-100CX 透射电子显微镜(TEM)对  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的表面形貌、粒径大小及尺寸分布进行了表征;采用美国 Lake shore-7400 振动样品磁强计(VSM)对  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的磁性能进行了考察;采用日本岛津 IR Prestige-21 红外光谱仪(IR, KBr 压片)对  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的表面成分进行了分析。

#### 2.2.3. 细胞毒性测试

采用 MTT 法对  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的细胞毒性进行评价。具体方法如下:首先将人脐静脉血管内皮细胞(HUVEC)接到 96 孔板中,保证细胞初始浓度为  $2 \times 10^4$  个/孔。当细胞聚集后,加入不同浓度(6.25, 12.5, 25, 50, 100  $\mu\text{g/mL}$ )的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子悬浊液。然后,分别在培养 1 天、2 天和 3 天之后加入 20  $\mu\text{L}$  MTT 溶液(5  $\text{mg/mL}$ )。继续培养 4 小时之后,除去培养孔中细胞培养液,加入 200  $\mu\text{L}$  的二甲亚砷。最后,通过酶标仪(美国 Molecular Devices, VM)在波长为 490 nm 处测量吸光度。作为对照,在不加入  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的情况下用相同的条件培养细胞并测量。

#### 2.2.4. 统计学分析

本文使用版本为 13.0 的 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)软件进行统计学分析。每组平行样品数为 5 个( $n = 5$ ),数据以平局值  $\pm$  标准差的形式表示,显著水平为小于 0.05 ( $P < 0.05$ )。对所比较样品进行了单因素方差分析。

**Table 1.** Design of the experiment condition  
**表 1.** 实验条件设计

| 样品编号     | 模板剂  | 温度(°C) |
|----------|------|--------|
| C40-NPs  | None | 40     |
| C60-NPs  | None | 60     |
| C80-NPs  | None | 80     |
| F127-NPs | F127 | 80     |
| PAA-NPs  | PAA  | 80     |

### 3. 结果与讨论

图 1 是不同条件下制备样品的 X 射线衍射(XRD)图谱。从图中可以看出, C60-NPs 和 C40-NPs 样品的图谱中其特征衍射峰很不明显甚至没有,且杂峰较多。而 C80-NPs 样品在 2-Theta 为  $18.2^\circ$ ,  $29.8^\circ$ ,  $35.2^\circ$ ,  $42.7^\circ$ ,  $51.3^\circ$  以及  $61.9^\circ$  处显现出明显的衍射峰, 分别对应于尖晶石型  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  标准衍射图谱(JCPDS 为 88-1965)中的(111), (220), (311), (400), (511)和(440)晶面, 并且其特征衍射峰的峰位与标准图谱基本一致, 且无杂峰。这说明采用化学共沉淀法, 在  $80^\circ\text{C}$  制备的样品为纯的尖晶石型  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体, 而在  $40^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  没能形成  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体。由此得出结论, 反应温度对产物的物相和结晶性质有很大的影响。在  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  共沉淀过反应温度对产物的物相和结晶性质有很大的影响。在  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  共沉淀过程中, 首先生成无定型的  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  先驱体, 然后它们再反应从而生成  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 。而较低的温度不利于物质传输和能量转换, 因此阻碍了  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的反应从而导致所得到产物结晶性差。因此, 采用 F127 调控下的化学共沉淀法制备  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子时, 其反应温度设为  $80^\circ\text{C}$ 。如图所示, F127-NPs 样品在 2-Theta 为  $18.2^\circ$ ,  $29.8^\circ$ ,  $35.2^\circ$ ,  $42.7^\circ$ ,  $51.3^\circ$  以及  $61.9^\circ$  处也出现了对应于尖晶石型  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ (111), (220), (311), (400), (511)和(440)晶面的特征衍射峰, 并且峰位与标准图谱相同, 且无杂峰。这就说明采用 F127 调控下的化学共沉淀法制备的产物为纯相的尖晶石型结构的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体。另外, PAA-NPs 样品几乎没有出现明显的特征衍射峰, 这说明其结晶度很低, 可能没有形成  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体或者无定型的杂质较多。由此看来, 模板剂都对产物的物相以及结晶性质也有很大的影响。PAA 含有许多羧基, 其水溶液为酸性, 在反应过程中会消耗一部分  $\text{OH}^-$ , 从而导致  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  以及  $\text{OH}^-$  之间的反应不完全, 生成的中间体无法结晶, 从而所得到的产物无定型程度高。而 F127 没有能与  $\text{OH}^-$  反应的基团, 因此能顺利的形成  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体。另外, PAA 在水溶液中不能自发形成稳定的自组装结构来限制  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  与  $\text{OH}^-$  的反应也可能是没有形成  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  晶体的重要原因之一。

图 2 是 F127-NPs 和 C80-NPs 的透射电子显微镜(TEM)照片。从图中可以看出, C80-NPs (图 2(a))的形貌和粒径不均匀, 分布较宽, 一般在  $20\text{ nm}\sim 80\text{ nm}$  之间。且粒子团聚较为严重, 分散性较差。而 F127-NPs (图 2(b))的粒径较均匀, 平均在  $30\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$  之间。并且形貌多为球形, 没有严重的团聚现象, 分散性较好。由此可见, F127 在  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的形成过程中对其形貌和粒径具有一定的调控作用。F127 是一种聚氧乙烯-聚氧丙烯-聚氧乙烯(PEO-PPO-PEO)三嵌段共聚物, 这种三嵌段共聚物在水溶液中通常可以自发形成多分子聚集的胶束。其内核以疏水 PPO 嵌段为主成分, 掺有若干的 PEO 嵌段, 其余的 PEO 嵌段环绕在外构成外壳[11] [12]。而这种胶束为  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  的形成提供了一个微型反应环境, 不仅可以调控其成核位点和物质传输, 还可以限制其晶粒的生长。因此, 在 F127 的调控下形成的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的形貌和粒径都较为均匀。

图 3 是 F127-NPs 和 C80-NPs 的磁滞回线。从图中可以得知, F127-NPs 和 C80-NPs 都具有明显的铁磁性, 其比饱和磁化强度分别为  $44.8\text{ emu/g}$  和  $27.5\text{ emu/g}$ , 矫顽力分别为  $69.8\text{ Oe}$  和  $66.6\text{ Oe}$ 。由此看出,

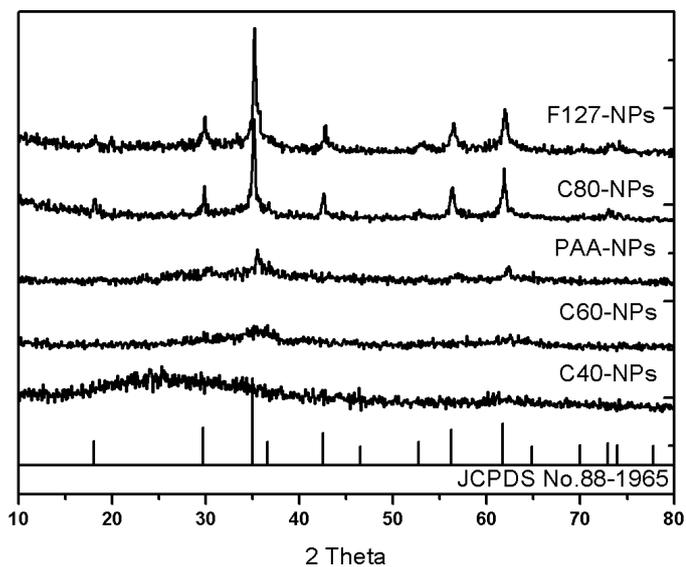


Figure 1. XRD patterns of the samples prepared under different conditions

图 1. 不同条件下制备的样品的 XRD 衍射图谱

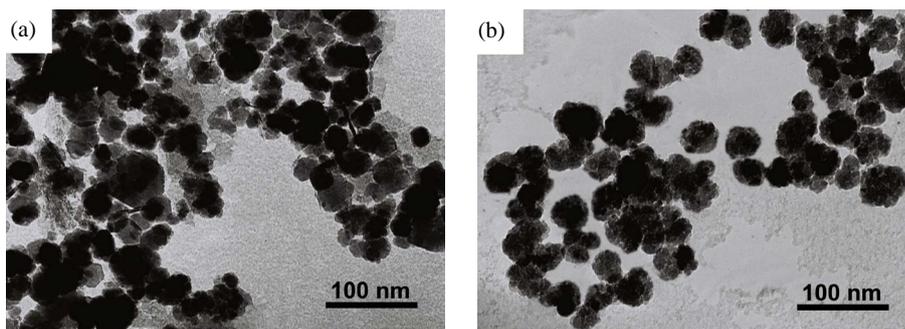


Figure 2. TEM images of (a) C80-NPs and (b) F127-NPs

图 2. (a) C80-NPs 和 (b) F127-NPs 的 TEM 照片

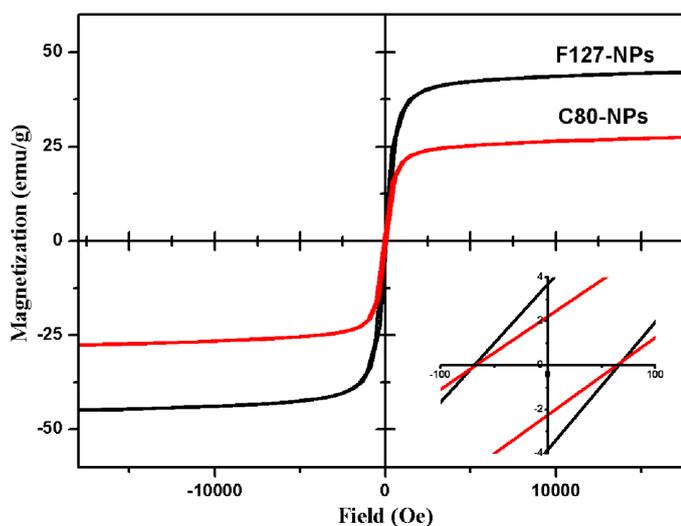


Figure 3. Magnetic hysteresis loops of F127-NPs and C80-NPs

图 3. 室温下 F127-NPs 和 C80-NPs 的磁滞回线

F127-NPs 具有较高的比饱和磁化强度,这是由于在 F127 的调控下,所生成的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子具有更均匀的形貌和粒径以及更高的结晶度。这与 XRD 结果和 TEM 结果是相一致的。通过这种方法制备的具有良好磁性能的 F127-NPs 在生物医学应用上具有很大潜力。

图 4 是 F127-NPs、C80-NPs 以及纯的 F127 的红外吸收光谱。从图中可以看出,F127-NPs 与纯的 F127 在波数为  $2880\text{ cm}^{-1}$ 、 $1460\text{ cm}^{-1}$ 、 $1280\text{ cm}^{-1}$ 、 $1230\text{ cm}^{-1}$ 、 $1100\text{ cm}^{-1}$  以及  $840\text{ cm}^{-1}$  处具有相同的吸收峰,而 C80-NPs 在这些波数处不具有明显的吸收峰。这就说明 F127-NPs 中有 F127 的存在。并且, F127 可能是在制备过程中包覆、缠绕于  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子,或者是通过静电吸引以及氢键作用与  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子相互结合。

F127 具有良好的生物相容性[13],在 F127 调控下制备的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子可能通过 F127 的修饰从而改善其细胞毒性。因此,MTT 法被用来考察 F127-NPs 是与 F127-NPs 和 C80-NPs 共培养后 HUVEC 的细胞对人脐静脉上皮细胞(HUVEC)的细胞毒性。图 5 为活性统计图。由图可知,与不同浓度的 C80-NPs

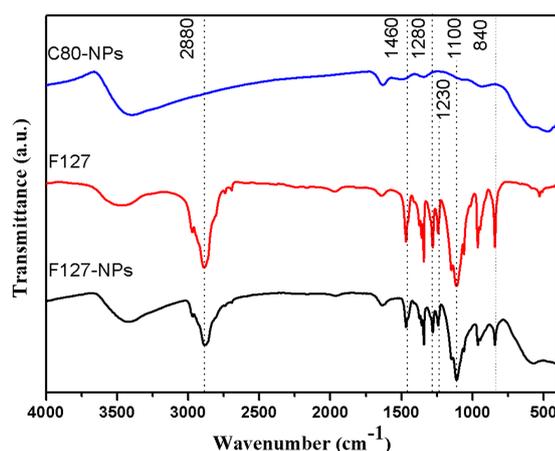


Figure 4. IR spectrum of F127-NPs, F127, and C80-NPs  
图 4. F127-NPs、F127 以及 C80-NPs 的红外吸收光谱

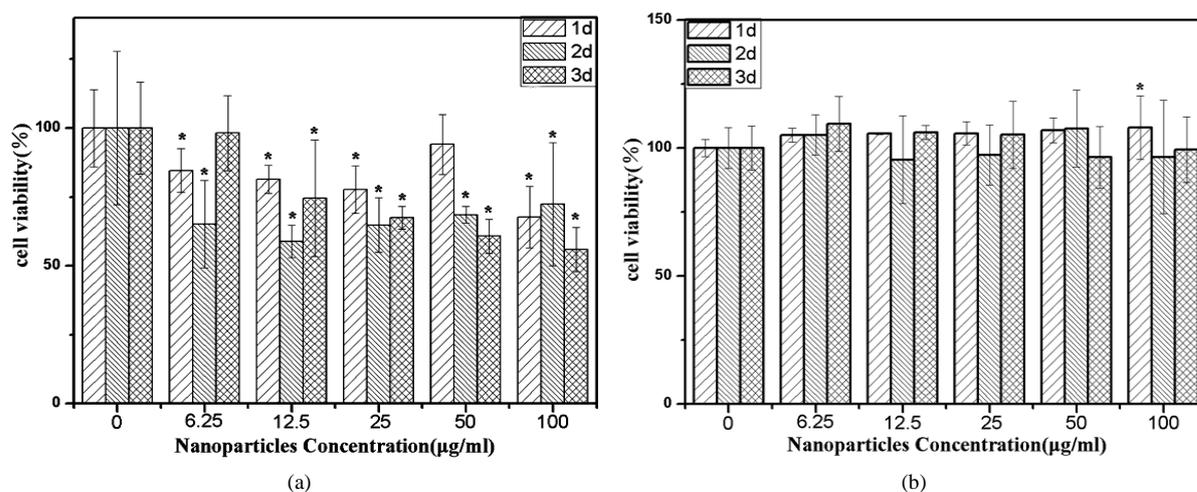


Figure 5. Cell viability of HUVEC cells incubated with (a) C80-NPs and (b) F127-NPs of concentrations (0/control, 6.25, 12.5, 25, 50 and  $100\text{ }\mu\text{g/ml}$ ) after different time. Error bars indicate standard deviation ( $n = 5$ ). The asterisk (\*) represents a significant difference,  $P < 0.05$

图 5. 分别与浓度为 6.25、12.5、25、50 和  $100\text{ }\mu\text{g/ml}$  的(a) C80-NPs 和(b) F127-NPs 共培养后的 HUVEC 细胞的细胞活性

共培养 1 天、2 天或者 3 天后, HUVEC 的细胞活性几乎都明显地下降(显著水平  $P < 0.05$ ), 这说明 C80-NPs 对 HUVEC 的增殖具有明显的抑制作用。然而, 与  $100 \mu\text{g/ml}$  的 F127-NPs 共培养 1 天后, HUVEC 的细胞活性明显上升。并且在与其他浓度的 F127-NPs 共培养 1 天、2 天或者 3 天后, HUVEC 的细胞活性没有显著性地上升或者下降(显著水平  $P < 0.05$ )。这说明 F127-NPs 对 HUVEC 的增殖没有明显的促进或者抑制作用。由以上结果可知, F127-NPs 的细胞毒性明显低于 C80-NPs。以上结果说明在 F127 调控下的化学共沉淀法制备过程中, F127 的确可以通过某种作用方式与  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子结合, 从而降低其所其细胞毒性。

#### 4. 结论

用化学共沉淀法在三嵌段共聚物 F127 的调控下成功制备了形貌和粒径都较均匀且分散性较好的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子。相比之下, 通过该方法制备的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子具有良好的铁磁性, 其比饱和磁化强度为  $44.8 \text{ emu/g}$ 。并且在制备过程中, 通过 F127 的修饰可有效降低其细胞毒性。总之, 通过该方法制备的  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  纳米粒子在生物医学应用, 特别是作为核磁共振成像造影剂以及肿瘤磁热疗介质, 具有很大的潜力和广阔的前景。

#### 致 谢

感谢国家自然科学基金(No. 51372157)对本研究的资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] Laurent, S., Forge, D., Port, M., et al. (2008) Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews*, **108**, 2064-2110.
- [2] Lam, T, Pouliot, P, Avti, P.K., et al. (2013) Superparamagnetic iron oxide based nanoprobe for imaging and theranostics. *Advances in Colloid and Interface Science*, **199-200**, 95-113.
- [3] Liu, X.L. and Fan, H.M. (2014) Innovative magnetic nanoparticle platform for magnetic resonance imaging and magnetic fluid hyperthermia applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **4**, 38-46.
- [4] Gupta, A.K. and Gupta, M. (2005) Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*, **26**, 3995-4021.
- [5] Gebreel, D., Shalaby, T., Yousef, Y., et al. (2014) Magnetic fluid based on  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles: Preparation and hyperthermia application. *International Journal of Chemical and Applied Biological Sciences*, **1**, 24.
- [6] Shokrollahi, H. (2013) Structure, synthetic methods, magnetic properties and biomedical applications of ferrofluids. *Materials Science & Engineering C, Materials for Biological Applications*, **33**, 2476-2487.
- [7] Bañobre-López, M., Piñeiro, Y., López-Quintela, M.A. and Rivas, J. (2014) Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications. *Handbook of Nanomaterials Properties*, Springer, 457-493.
- [8] Kim, D.-H., Nikles, D.E. and Brazel, C.S. (2010) Synthesis and characterization of multifunctional chitosan- $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles for magnetic hyperthermia and drug delivery. *Materials*, **3**, 4051-4065.
- [9] Alvani, C., Ennas, G., La Barbera, A., et al. (2005) Synthesis and characterization of nanocrystalline  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ : advances in thermochemical water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**, 1407-1411.
- [10] Zeng, H., Rice, P.M., Wang, S.X., et al. (2004) Shape-controlled synthesis and shape-induced texture of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, **126**, 11458-11459.
- [11] Nivaggioli, T., Alexandridis, P., Hatton, T.A., et al. (1995) Fluorescence probe studies of pluronic copolymer solutions as a function of temperature. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, **11**, 730-737.
- [12] Alexandridis, P. and Hatton, T.A. (1995) Poly(ethylene oxide)/poly(propylene oxide)/poly(ethylene oxide) block copolymer surfactants in aqueous solutions and at interfaces: thermodynamics, structure, dynamics, and modeling. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **96**, 1-46.
- [13] Yildirim, A., Demirel, G.B., Erdem, R., et al. (2013) Pluronic polymer capped biocompatible mesoporous silica nanocarriers. *Chemical Communications*, **49**, 9782-9784.