

PEI 修饰磁性 Fe_3O_4 纳米粒的制备和表征

蔡元元^{1,2}, 高福平¹, 周晶^{1,2}, 欧阳伟伟¹, 唐劲天¹

1. 清华大学工程物理系; 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084
2. 北京中医药大学中药学院, 北京 100102

摘要 为了制备性能良好的聚乙烯亚胺(PEI)修饰的磁性 Fe_3O_4 纳米粒, 以及为进一步开展体内外生物学效应分析奠定基础, 采用化学共沉淀法制备 PEI 修饰的磁性 Fe_3O_4 纳米粒。PEI- Fe_3O_4 纳米粒的制备包括磁性 Fe_3O_4 纳米粒的制备和 PEI 修饰磁性 Fe_3O_4 纳米粒两部分, 采用 4 因素 2 水平的正交实验对各因素进行优化, 得到较佳的制备工艺。反应过程中用过量氨水保持 pH 值为 9.3~9.7, Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的物质的量比为 1:1.75, PEI 水溶液的质量百分数为 20%, 反应温度始终保持为 85℃, 机械搅拌速率为 1400r/min。采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR)、透射电子显微镜 (TEM)、X 射线衍射分析仪 (XRD)、振动样品磁强计 (VSM)、热重分析仪 (TGA) 对磁性纳米粒的物化特征进行表征。结果表明, 制得的磁性 PEI- Fe_3O_4 纳米粒为接近圆形或椭圆形粒子, 具尖晶石结构, 粒径约 9.4nm, 磁含量为 82.3%, 饱和磁化强度为 61.962emu/g, 矫顽力几乎为 0, 具超顺磁性, 稳定性和分散性良好。

关键词 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒; 制备; 优化; 表征

中图分类号 R312

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)19-0068-05

Preparation and Characterization of Polyethyleneimine Modified Fe_3O_4 Magnetic Nanoparticles

CAI Yuanyuan^{1,2}, GAO Fuping¹, ZHOU Jing^{1,2}, OUYANG Weiwei¹, TANG Jintian¹

1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education; Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. School of Chinese Materia Medica, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100102, China

Abstract The orthogonality test was used to obtain the optimal technology for preparing magnetic nanoparticles coated with covalently-bound biofunctional polyethyleneimine (PEI). We propose PEI- Fe_3O_4 magnetic nanoparticles as a mediator for hyperthermia *in vitro* and *in vivo*. The processing of polyethyleneimine modified Fe_3O_4 magnetic nanoparticles includes the preparation of magnetic Fe_3O_4 nanoparticles and then integrating the Polyethyleneimine modified magnetic nanoparticles and Fe_3O_4 . Examination and characterization of the polyethyleneimine modified Fe_3O_4 magnetic nanoparticles were performed using simple methods. Simple analyses of the factors affecting the preparation of polyethyleneimine modified Fe_3O_4 magnetic nanoparticles were made, and the optimal technology was obtained after the optimization of these factors by means of a $L_8(2^7)$ orthogonality test. The optimal technological conditions obtained were: use of ammonium chloride to keep the pH in the range of 9.3~9.7; the ferric ions must be kept in the ratio $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}=1:1.75$; a polyethyleneimine solution with mass-fractional of 20% should be used; a mechanical stirring at of 1400r/min should be maintained; and the reaction temperature should be held at 85℃. The resulting polyethyleneimine modified Fe_3O_4 magnetic nanoparticles were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, transmission electron microscope, X-ray diffraction, vibrating sample Magnetometry, and

收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2010-09-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA021805); 北京市科委基金项目(Z070002005407C4); 中国博士后科学基金面上项目(20090450417)

作者简介: 蔡元元, 硕士研究生, 研究方向为肿瘤纳米治疗与诊断, 电子信箱: caiyuanyuan@sina.com; 唐劲天(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S090800253M, E190003065S), 教授, 研究方向为肿瘤磁感应治疗, 电子信箱: tangjt@mail.tsinghua.edu.cn

Thermogravimetric Analysis. The results show that the particles have a spinel structure, are superparamagnetic, and have good performance. Their diameter is about 9.4nm, their magnetic concentration is 82%, and their magnetization is 61.962emu/g. Further investigation is needed to confirm the nanoparticles effectiveness as a mediator for hyperthermia *in vitro* and *in vivo*.

Keywords polyethyleneimine modified Fe₃O₄ magnetic nanoparticles; preparation; optimization; characterization

0 引言

磁性纳米粒(10~100nm)具有良好的磁导向性、生物相容性、磁场响应性等特性,在生物医学领域有着广泛的应用。经过合适的表面修饰,磁性纳米粒可分散于合适的溶剂中,形成均匀分散体系,即所谓的磁流体。这种分散体系能在外加磁场的作用下定位在靶向部位,易于进行核磁共振成像的医学诊断^[1]。另外,磁流体还可在外加交变磁场下产热,可对肿瘤实施精确的靶向加热治疗,保护正常组织,并能激发机体的免疫机制^[2]。在磁性纳米粒表面偶联具有肿瘤选择性的配体,可提高肿瘤对磁性纳米粒的摄取,减少对正常组织的损害,实现细胞内热疗^[3]。在磁性纳米粒表面偶联或包裹抗癌药物还可以实现热疗和化疗的协同增敏作用,减少化疗中的毒副作用^[4]。研究证明,载药超顺磁性纳米粒具有药物载体和核磁造影剂的双重功能,且其特异性增强、体内半衰期长、对肿瘤细胞毒性大,可实现肿瘤诊断治疗一体化,具有在肿瘤治疗上应用的潜力^[5];此外磁性纳米粒在细胞标记或分选、基因转染等方面也有着广泛的应用^[6-7]。

在生物医学应用上,磁性纳米粒的关键指标是磁性和稳定性。影响磁性的因素有磁性颗粒本身的性质,包括种类、粒径、表面活性剂的应用及介质的影响等;影响稳定性的因素主要有磁性纳米颗粒、表面活性剂和基液的物理化学性质及它们之间的相互作用,以及外部重力和磁场。磁性纳米粒由于具有巨大的比表面能和磁粒之间的吸引力,磁粒存在永久性的聚集作用,且表面未加修饰的磁性纳米粒容易被空气中的氧气所氧化,这些都不利于磁性纳米粒功能的发挥。因此,利用生物医学材料对磁性纳米粒进行表面修饰,防止聚集,提高生物相容性,是充分发挥磁性纳米粒功能的必要前提^[8]。合适的表面修饰能将一些具有组织选择性的抗体、配体等偶联到磁性纳米粒上,实现磁性纳米粒在体内的组织靶向功能,满足各种肿瘤的治疗需求^[9-10]。

聚乙烯亚胺(PEI)是一种水溶性聚胺,具有较低的生物毒性,其大分子链上拥有大量的氨基,常用作体内基因转染和药物递送的载体^[11]。PEI修饰的磁性 Fe₃O₄ 纳米粒作为新一代的水溶性磁流体,表面上大量的氨基活性基团,可与许多配体、抗体、药物连接,集肿瘤诊断与治疗于一体,使肿瘤治疗更安全有效^[12]。本文拟用化学共沉淀法制备 PEI 修饰的磁性 Fe₃O₄ 纳米粒,通过改变制备过程中 Fe²⁺/Fe³⁺、温度、碱源和 PEI 用量,筛选出最佳工艺和配方,并对其特征进行分析,以期得到磁性强、稳定性、分散性和升温性良好的磁性纳米粒,为其进一步生物医学应用提供实验依据。

1 材料与方法

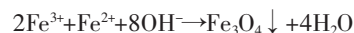
1.1 试剂及仪器

主要试剂:FeCl₃·6H₂O、FeCl₂·4H₂O、26%~28%氨水、无水乙醇,分析纯,均购自北京现代东方精细化学品有限公司;聚乙烯亚胺,分子量为 25000,购自上海朗顺化工有限公司;超纯水。

主要仪器:顶置式机械搅拌器(IKA-RW 20 Digital 型,德国 Memmert 公司),电热恒温水浴锅(WNB10 型,德国 Memmert 公司),电子万能测试机(DSS-25T,日本岛津公司),交变磁场(深圳上平仪器有限公司),热电偶(IT-18 型,美国 Physitemp 公司),差示扫描量热仪(北京昆仑天辰仪表科技有限公司,xs01A-4 型),电子天平(AL204-IC,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司)。

1.2 PEI 修饰磁性 Fe₃O₄ 磁性纳米粒制备

采用化学共沉淀法制备 Fe₃O₄ 磁性纳米粒,化学反应式为



将 FeCl₃·6H₂O、FeCl₂·4H₂O 水溶液以某种比例混合后,用过量的氨水或氢氧化钠溶液调节 pH 值至 9.3~9.7,在一定温度和 N₂ 保护下,以 1400r/min 速率搅拌 30min 进行沉淀反应合成粒子。所得 Fe₃O₄ 溶液分别用无水乙醇和超纯水清洗 3 次,超声,加入不同质量百分数的 PEI 水溶液,在同样条件下继续搅拌 30min,即得 PEI 修饰磁性 Fe₃O₄ 纳米粒。在实验中考虑 Fe²⁺/Fe³⁺、温度、碱的类型和 PEI 用量 4 个影响因素,每个因素分别设定 2 个水平,筛选出最佳工艺和配方,设计正交实验因素见表 1。

表 1 正交实验影响因素

Table 1 Factors of the orthogonal test

因素	A (Fe ²⁺ /Fe ³⁺)	B (温度/°C)	C (碱类型)	D (PEI 用量/%)
1	1:1	75	NH ₃ ·H ₂ O	20
2	1:1.75	85	NaOH	25

1.3 性能测试

实验中主要以升温性能(包括最高温度和升温至最高温度所需时间)、磁性和分散性评价磁流体性能,针对这 3 个指标设计了一套较易的测试方法。

1.3.1 升温性能

取等量磁流体至 1.5mL 离心管中,置于频率为 300kHz 的交变磁场中 30min,调节电流为 273mA,用电偶连接差示扫描量热仪监测升温温度 T ,单位为 °C,同时监测温度升至最高所需时间 t ,单位为 s。 T 越高, t 越小,表明磁性纳米粒升温性

能越好。

1.3.2 磁性和分散性

取等量磁流体至烧杯中,置于圆形磁铁上,检测其磁性,同时观察其分散性。实验中发现有两种情况:有磁性,溶液分层,分散性差;无磁性,溶液不分层,分散性良好,分别用 R、Q 表示这两种情况。

1.4 表征检测

1.4.1 表面包覆结构的测定

采用 Wicolet 560 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 检测 PEI 改性前后 Fe_3O_4 纳米粒表面官能团的变化。

1.4.2 磁性纳米粒的形态及粒径的分析

采用日立 H7650 型透射电子显微镜 (TEM) 观察 PEI 修饰后 Fe_3O_4 纳米粒的形态及分析大致粒径。

1.4.3 晶体结构分析

采用 Diff-rac tometer TTR-III 型 X 射线衍射分析仪 (XRD) 对 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒进行物相分析。

1.4.4 磁饱和强度的测定

采用 Lake Shore 7303 型振动样品磁强计 (VSM) 测试 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒的磁滞回线,计算其饱和磁化强度。

1.4.5 热重分析

采用德国耐驰公司生产的 PC 500 型热重分析仪 (TGA) 进行热重分析。称取一定质量干燥后的包覆样品,从室温以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度开始加热,随着温度的不断升高, Fe_3O_4 颗粒外层包覆的 PEI 开始解析,从而得到剩余样品质量和环境温度的关系。

1.4.6 相对稳定的观察

磁流体相对稳定性通过观察是否分层及沉淀确定,分层发生的时间越短,稳定性越差。具体步骤:在无外磁场下,将制备好的磁流体样品放入 10mL 的玻璃瓶中静置数月,观察样品有无沉淀及分层现象发生。

2 结果与分析

2.1 正交实验结果分析

相同条件下的磁性纳米粒的升温性能、磁性和分散性的优劣取决于粒子本身的性质,与实验中所用 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、反应温度、碱的类型和 PEI 用量密切相关。

2.1.1 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的影响

反应溶液中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 影响 Fe_3O_4 的纯度,从反应方程式看,当 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 为 1:2 时产物的浓度最大,单位体积内磁性颗粒数量较多,但产物溶液浓度较高,更易造成颗粒长大和团聚;反之,当产物溶液浓度较小时,磁性颗粒更易悬浮稳定,但其磁性较弱,所以适当提高 Fe^{2+} 的比例有利于得到磁性强、分散性良好的 Fe_3O_4 。

2.1.2 反应温度的影响

温度降低,水解速度慢,反应时间长,且沉淀转换不完全;温度升高,反应速度加快,反应时间缩短,但过高的温度使溶液中 Fe^{2+} 易氧化成 Fe^{3+} ,不利于水解反应的进行,降低产物的纯度。

2.1.3 碱源的影响

强碱和弱碱初始 pH 值相同,则强碱液中 OH^- 浓度下降快,而弱碱中由于 OH^- 不断地解离出来,其 OH^- 浓度下降缓慢,更有利于生成分散性好的粒子。

2.1.4 高分子修饰材料用量的影响

高分子修饰材料用量过少时,粒子表面不能形成完整的吸附层,因而不能形成完整的表面弹性外壳,粒子之间的斥力不足以克服粒子之间的吸引力和重力的作用从而使稳定性下降;反之,过厚的表面包覆层之间会发生黏连,引起絮凝,降低粒子稳定性和磁性。

采用 4 因素 2 水平的正交实验对各因素进行综合分析,正交实验原始数据见表 2。从表 2 可以看出,在 $A_2B_2C_1D_1$ 条件下制得的 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒子的升温性能、磁性能和分散性能均良好。

表 2 正交实验原始数据

Table 2 Raw data of the orthogonal test

测试	A	B	C	D	t/s	T/ $^\circ\text{C}$	磁性和分散性评价
1	1	1	1	1	408	70	R
2	1	1	1	2	558	68	R
3	1	2	2	1	600	52.5	Q
4	1	2	2	2	594	53	Q
5	2	1	2	1	582	55.5	R
6	2	1	2	2	510	60	R
7	2	2	1	1	378	108	Q
8	2	2	1	2	402	103	Q

2.2 表征分析

2.2.1 FTIR 测定结果

为了确认 PEI 对 Fe_3O_4 的包覆,将 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒真空干燥后,粉末进行红外光谱测定,由图 1 谱线可以看出,2928,2830 和 1466cm^{-1} 分别对应于 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒中 PEI 亚甲基 (CH_2) 不对称伸缩振动峰 ν_{as} 、对称伸缩振动峰 ν_{s} 和变形振动峰 δ 。 1644cm^{-1} 对应伯胺的面内变形振动,由于伯胺官能团含量很少,这种面内摇摆振动峰不明显。在 584cm^{-1} 出现了 Fe_3O_4 的特征吸收峰,由此可以判断 PEI 已成功包覆在 Fe_3O_4 纳米粒表面。PEI 的包覆在磁性纳米凝胶的表面引入 $-\text{NH}_2$ 官能团。

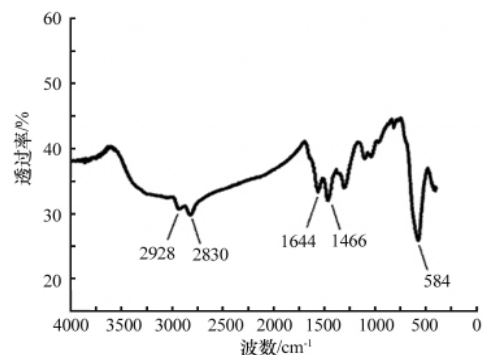


图 1 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒的红外图谱
Fig. 1 FTIR spectra of Fe_3O_4 magnetic particles coated with PEI

2.2.2 形态观察

通过透射电镜观察制备的 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的粒径约为 10nm,图 2 是 PEI-Fe₃O₄ 的 TEM 照片,粒子呈近似圆球形,分散性较好。

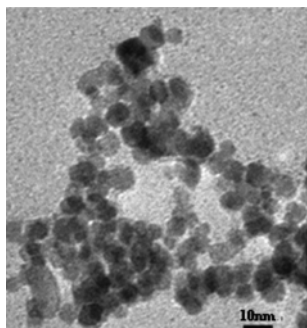


图 2 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的 TEM 照片
Fig. 2 TEM micrograph of Fe₃O₄ magnetic particles coated with PEI

2.2.3 结构分析

通过 XRD 检测产物的晶体结构 (图 3)。从图 3 可以看出,制备的 PEI 修饰的 Fe₃O₄ 磁性纳米粒有几个尖锐的晶体结构特征峰,晶体特征峰对应的衍射角 2θ 值与文献[13]报道的 Fe₃O₄ 的晶体结构峰的衍射角 2θ 值一致,说明表面修饰的 PEI 没有改变 Fe₃O₄ 磁性纳米粒子的晶体结构。通过 Scherrer 方程计算得 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒子粒径为 9.4nm。

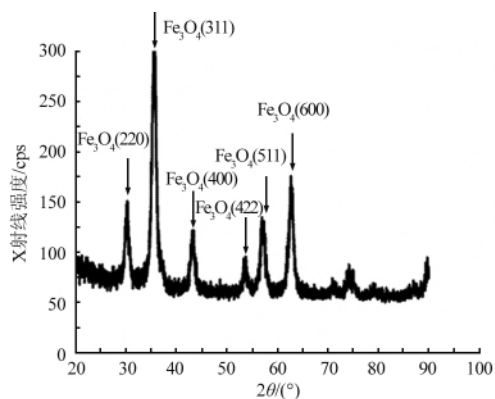


图 3 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的 XRD 衍射图
Fig. 3 X-ray diffraction pattern of Fe₃O₄ magnetic particles coated with PEI

2.2.4 磁学性能

用振动样品磁强计测量 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒粉末饱和磁化强度为 61.962emu/g。PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的磁滞回线过原点,且以原点成中心对称,证明该粒子矫顽力为 0,且具超顺磁性(图 4)。结果表明,制备的 PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒具有较高的饱和磁化强度,有利于该磁性纳米粒较好地发挥其生物医学应用。

2.2.5 热重分析

图 5 为 PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒的 TGA 曲线。由室温升至 120℃时,PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒的失重率为 2.7%,说明真空干燥得到的 PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒仍含有少量结合水;当温

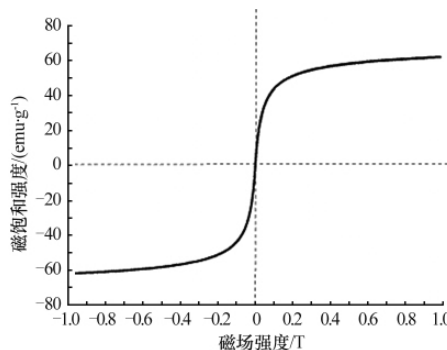


图 4 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的磁滞回线
Fig. 4 Magnetic hysteresis curve for Fe₃O₄ magnetic particles coated with PEI measured at room temperature

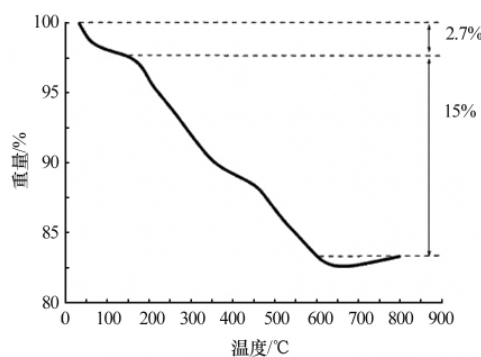
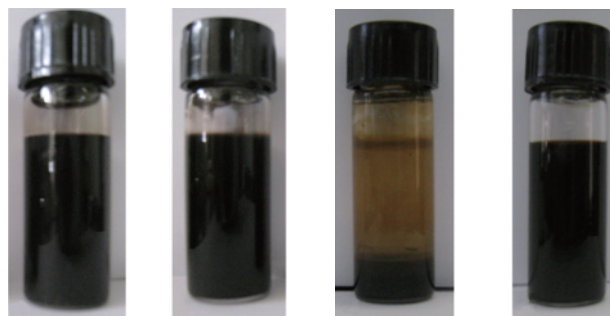


图 5 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒热重分析
Fig. 5 TGA curve of Fe₃O₄ magnetic particles coated with PEI

度由 120℃升至 500℃时,PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒的失重率为 15%,推测在此温度下磁性粒中的 PEI 发生分解;当温度达到 500℃后,样品重量趋于恒定,约占总重量的 82.3%,为 Fe₃O₄ 粒子,故 PEI-Fe₃O₄ 磁性纳米粒的磁含量为 82.3%。

2.2.6 稳定性

图 6 是 PEI 表面修饰对磁流体相对稳定性的影响。图 6 (a)、(c)分别为未修饰 Fe₃O₄ 刚制备出来和放置 2 个月后的形貌,图 6(b)、(d)分别为 PEI 修饰 Fe₃O₄ 刚制备出来和放置 2



(a) 新鲜 Fe₃O₄ (b) 新鲜 PEI-Fe₃O₄ (c) 放置 2 个月的 Fe₃O₄ (d) 放置 2 个月的 PEI-Fe₃O₄
(a) Fresh Fe₃O₄ (b) Fresh PEI-Fe₃O₄ (c) Fe₃O₄ of two months ago (d) PEI-Fe₃O₄ of two months ago

图 6 PEI-Fe₃O₄ 纳米粒的相对稳定性

Fig. 6 Stability test of Fe₃O₄ magnetic particles coated with PEI

个月后的形貌,可以看出,2个月后,未修饰 Fe_3O_4 已出现明显分层和沉淀现象,而 PEI 修饰 Fe_3O_4 未出现分层和沉淀现象,说明修饰后粒子的相对稳定性得到显著改善。

3 讨论与结论

国内外研究表明,超顺磁性纳米粒同时具备介导肿瘤热疗和成像的能力,集肿瘤诊断与治疗于一体,多功能磁性纳米粒将推动肿瘤磁热疗研究进一步向更精确、有效、安全方向发展^[14]。

本文通过对化学沉淀法制备 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒中各种影响因素的优化,制定最优生产条件,获得稳定性优良的水溶性 PEI- Fe_3O_4 磁性纳米粒,兼具超顺磁性,提出多功能型磁性纳米粒的概念,使后续研究更具潜能。

利用简易性能测定手段,通过4因素2水平的正交实验对制备工艺进行优化,得到较佳的制备条件:反应过程中 pH 值保持在 9.3~9.7, $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}=1:1.75$, 选用 20% 的高分子材料 PEI 水溶液,机械搅拌速率为 1400r/min,反应温度为 85°C,同时通入 N_2 保护。对此条件下制备的微粒进行 FTIR、TEM、XRD、TGA、VSM 分析,表明制得超顺磁性 PEI- Fe_3O_4 纳米粒子,该粒子具有近似圆球型结构,磁含量为 82.3%,粒径约为 9.4nm,饱和磁化强度为 61.962emu/g。

本实验制得的 PEI- Fe_3O_4 纳米粒升温性能和稳定性良好,具备进行体内外实验的基本条件要求,为其进行下一步体外生物性能分析、体内生物学效应分析的可行性和有效性奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] Jain T K, Richey J, Strand M, *et al.* Magnetic nanoparticles with dual functional properties: Drug delivery and magnetic resonance imaging[J]. *Biomaterials*, 2008, 29(29): 4012-4021.
- [2] Ito A, Tanaka K, Kondo K, *et al.* Tumor regression by combined

immunotherapy and hyperthermia using magnetic nanoparticles in an experimental subcutaneous murine melanoma[J]. *Cancer Sci*, 2003, 94(3): 308-313.

- [3] Suzuki M, Shinkai M, Honda H, *et al.* Anticancer effect and immune induction by hyperthermia of malignant melanoma using magnetite cationic liposomes[J]. *Melanoma Res*, 2003, 13(2): 129-135.
- [4] Jordan A, Maier-Hauff K. Magnetic nanoparticles for intracranial thermotherapy[J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2007, 7(12): 4604-4606.
- [5] Herranz F, Morales M P, Roca A G, *et al.* A new method for the aqueous functionalization of superparamagnetic Fe_2O_3 nanoparticles [J]. *Contrast Media Mol Imaging*, 2008, 3(6): 215-222.
- [6] Ding J F, Jiang J S. Preparation and application of core-shell silicon/magnetic nanoparticle composites [J]. *Materials Review*, 2006, 20(11): 201-205.
- [7] Li G P, Zhang H, Wang Y X. Progress of application of magnetic nanoparticles in magnetic separation technique [J]. *Journal of Radioimmunology*, 2005, 18(5): 380-383.
- [8] 张心亚, 沈慧芬, 黄洪, 等. 纳米粒子材料的表面改性及其应用研究进展[J]. *材料工程*, 2005(10): 58-63.
- Zhang Xinya, Shen Huifen, Huang Hong, *et al.* *Journal of Materials Engineering*, 2005(10): 58-63.
- [9] Huang G, Diakur J, Xu Z, *et al.* Asialoglycoprotein receptor-targeted superparamagnetic iron oxide nanoparticles [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2008, 360(1-2): 197-203.
- [10] Chandran S S, Banerjee S R, Mease R C, *et al.* Characterization of a targeted nanoparticle functionalized with a urea-based inhibitor of prostate-specific membrane antigen (PSMA)[J]. *Cancer Biol Ther*, 2008, 7(6): 974-982.
- [11] 王旭朋, 高保娇, 郭建峰, 等. 固定化青霉素酰化酶新型载体 PEI/SiO₂ 的制备及其特性[J]. *高等学校化学学报*, 2006, 27(6): 1167-1172.
- Wang Xupeng, Gao Baojiao, Guo Jianfeng, *et al.* *Chem J Chinese Universities*, 2006, 27(6): 1167-1172.
- [12] Park I K, Ng C P, Wang J N, *et al.* Determination of nanoparticle vehicle unpackaging by MR imaging of a T2 magnetic relaxation switch [J]. *Biomaterials*, 2008, 29(6): 724-732.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·

“2011 年全国第一届水下安保技术 学术交流大会”征文

中国声学学会将于 2011 年 3 月 1 日在北京召开“2011 年全国第一届水下安保技术学术交流大会”。

征文内容如下:水下安保系统总体技术;水下安保中的水声技术;水下运动目标探测及跟踪,水下爆炸物的探测,水下目标分类识别,水下目标处置等;水下安保中的非声学技术:光学,电、磁学,水下机器人,物理防护网等;水下安保实际应用案例等。

征文截止日期:2010 年 10 月 31 日。

联系方式:北京市北四环西路 21 号中国科学院声学研究所图像声纳技术实验室(100190),杨娟;电话:010-62565804-809;电子信箱:yangjuan@mail.ioa.ac.cn,网址:www.aschina.org。