

文章编号: 1000-324X(2008)04-0677-06

Mn_{0.8}Zn_{0.2}Fe₂O₄/MgAl-LDHs 复合材料的磁性能和磁热效应

张小川^{1,2}, 王德平^{1,2}, 姚爱华¹, 黄文昆^{1,2}

(同济大学 1. 生物与信息材料研究所, 材料科学与工程学院; 2. 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用共沉淀法将纳米锰锌铁氧体粒子 (Mn_{0.8}Zn_{0.2}Fe₂O₄) 与镁铝双金属氢氧化物 (MgAl-LDHs) 进行组装合成了磁性纳米镁铝双金属氢氧化物, 并通过 TEM、FTIR、DTA、XRD、VSM 等方法对其进行表征. 样品的结构分析结果表明, 复合材料具有典型的核壳结构, 镁铝双金属氢氧化物被赋予磁性后并没有改变其层状结构的典型特征. 样品的磁学性能和磁热性能测试结果表明, 铁氧体的含量对复合材料的磁性能和磁热效应起着决定性作用; MgAl-LDHs 对铁氧体粒子没有显著的磁屏蔽效应, 复合材料的饱和磁化强度与铁氧体的含量呈正线性相关, 而复合材料的矫顽力随 MgAl-LDHs 含量的增加呈现先减小后增大的趋势, 但整体变化幅度很小, 同时 MgAl-LDHs 对铁氧体粒子磁热效应的影响也极小.

关键词: 锰锌铁氧体; 镁铝双金属氢氧化物; 磁性能; 磁热效应

中图分类号: O643 **文献标识码:** A

Magnetic Properties and Thermomagnetic Effect in Mn_{0.8}Zn_{0.2}Fe₂O₄/MgAl-LDHs Composite

ZHANG Xiao-Chuan¹, WANG De-Ping^{1,2}, YAO Ai-Hua¹, HUANG Wen-Hai^{1,2}

(1. Institute of BioEngineering and Information Technology Materials, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A magnetic layered inorganic-inorganic composite involving manganese zinc ferrite (Mn_{0.8}-Zn_{0.2}Fe₂O₄) and Mg-Al layered double hydroxides (MgAl-LDHs) was assembled by coprecipitation method. The products were characterized by TEM, FTIR, DTA, XRD and VSM. The results indicate that the composite has core-shell structure, the introduction of ferrite particles does not change the typical layered-structure of MgAl-LDHs phase. MgAl-LDHs has infinitely small magnetic shielding effect on ferrite particles, the saturation magnetization values of the composite increase linearly with the ferrite content, however, is the MgAl-LDHs content increasing, the coercivity values of the composite decrease first, then increase subsequently, but these changes are small on the whole. In addition, the LDHs layer also has infinitely small effect on the thermomagnetic effect of ferrite particles. It is obvious that the ferrite content in the composite plays a decisive role on magnetic properties and thermomagnetic effect.

Key words: MnZn ferrite; Mg-Al layered double hydroxides; magnetic properties; thermomagnetic effect

收稿日期: 2007-07-26, 收到修改稿日期: 2007-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (50572072); 上海科委纳米专项基金 (0452nm059)

作者简介: 张小川 (1983-), 男, 硕士研究生. E-mail: 122446883@qq.com

通讯联系人: 王德平, 教授. E-mail: wdpshk@mail.tongji.edu.cn

1 引言

磁热疗法是一种新型的医疗手段,它是将磁性粒子(热籽)在外磁场的引导下选择性地定位于肿瘤病灶区域,然后在交变磁场作用下使热籽因磁滞损耗而将电磁能转化为热能,从而使其周围温度上升到 43℃ 以上达到杀灭肿瘤细胞的目的^[1]. 本研究采用的磁性物质为锰锌铁氧体,它是一种尖晶石型的软磁铁氧体,具有良好的磁性能、生物相容性及化学稳定性等特点^[2,3],所以它在磁靶向热疗领域具有广阔的应用前景^[4,5].

LDHs(Layered double hydroxides)是一类具有层状结构的水滑石类材料,其化学通式^[6]可表示为: $[M_1^{2+}_x M_2^{3+}_{3-x}(\text{OH})_2] \cdot A^{n-}_{x/n} \cdot y\text{H}_2\text{O}$, 其中 M^{2+} 和 M^{3+} 分别代表二价和三价金属阳离子; x 代表 $M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$ 的摩尔比值; A^{n-} 代表层间可交换阴离子,一定条件下能够被带有特殊功能基团的有机分子取代^[7]. 鉴于 LDHs 材料具有生物相容性和层间阴离子可交换性^[8],因此它作为一种全新的药物载体在药物传递系统领域具有很大的应用潜力. Choy 等^[9]选用临床上常用的抗癌药物亚叶酸和甲氨蝶呤来研究 LDHs 运用于药物传递系统的可行性. 结果显示, LDHs 不仅能有效提高药物的稳定性,延长药物的半衰期,还能显著提高药物进入肿瘤细胞的速度与数量,从而减少药物的不良反应.

近年来,对水滑石类材料进行磁性修饰制备各种功能材料的研究已有报道^[10,11],但将锰锌铁氧体作为热籽引入水滑石类材料,还未见报道. 本工作以制备一种兼具磁致发热和药物载体功能的复合材料为目的,采用共沉淀法合成了磁性纳米镁铝双金属氢氧化物,着重研究了复合材料的结构特征、磁学性能和磁热效应,并初步探讨了 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 MgAl-LDHs 两相间的相互影响,而有关复合材料作为药物载体的研究将在后续工作中进行报道.

2 实验

2.1 试剂与仪器

实验所用试剂均为分析纯.

日本 Rigaku 公司的 D/Max-2550 型 X 射线衍射仪;美国 Nicolet 公司的 Nicolet560 型傅立叶变换红外光谱仪, KBr 压片;日本 Hitachi 公司的 H-800 型透射电子显微镜;上海精密科学仪器有限公司的 CRY-2P 型差热分析仪;南京大学仪器厂 Model 4HF 的振动样品磁强计和 GW 系列中频交变磁场

发生器 HG-22A 型,额实功率为 8kW,工作频率为 55~65kHz,最大磁场强度为 7kA/m.

2.2 磁性粒子 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的制备

按化学计量比准确称量硝酸锰、硝酸锌、硝酸铁,用去离子水配成均匀的褐色溶液,在剧烈搅拌下加入 5mol/L 的热 NaOH 溶液,控制 pH 值在 12~13,然后在 90℃ 下充分反应 1h,抽滤,用蒸馏水洗涤至中性,冷冻干燥后即制得 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 磁性粒子.

2.3 MgAl-LDHs 的制备

用去离子水配成 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (6mmol) 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (2mmol) 的混合盐溶液;称量 NaOH(16mmol) 和 Na_2CO_3 (1mmol) 用去离子水配成混合碱溶液;将混合盐溶液及混合碱溶液同时迅速倒入含有 100mL 去离子水的四口瓶中,剧烈搅拌 5min,控制反应体系 pH 值在 12 左右,形成的浆液于 60℃ 晶化 24h,抽滤,用蒸馏水洗涤至中性,40℃ 下真空干燥 48h,得到 MgAl-LDHs .

2.4 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的制备

复合材料采用改良的瞬间共沉淀法制备,具体方法如下:取一定量的 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 磁性粒子和 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (6mmol) 用去离子水配成混合液 A,控制 pH 值在 8 左右,30℃ 恒温水浴下搅拌 6h,使 Mg^{2+} 充分吸附在磁性粒子表面;称量 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (2mmol) 用去离子水配成盐溶液 B;称量 NaOH(16mmol) 和 Na_2CO_3 (1mmol) 用去离子水配成混合碱溶液 C;将盐溶液 B 及混合碱溶液 C 同时迅速倒入混合液 A 中,剧烈搅拌 5min,控制反应体系 pH 值在 12 左右,形成的浆液于 60℃ 晶化 24h,抽滤,用蒸馏水洗涤至中性,40℃ 下真空干燥 48h,得到 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$.

3 结果和讨论

3.1 复合材料的结构分析

图 1 是不同铁氧体含量样品的 TEM 照片. 由图 1(a) 可以看出,实验制备的 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 为近球形粒子,分散较好,大小较均匀,粒径约为 20~40nm. 由图 1(b)、(c) 和 (d) 可以看出,两种不同 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 含量的复合材料均呈现出 LDHs 材料典型的层片状结构特征. 同时,能够观察到浅灰色的晶片 (MgAl-LDHs) 中包裹着黑色的物质(磁核粒子 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 或其聚集体),较好地体现了该复合材料的核壳结构特征.

图 2 是 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 、 $\text{Mn}_{0.8}$ -

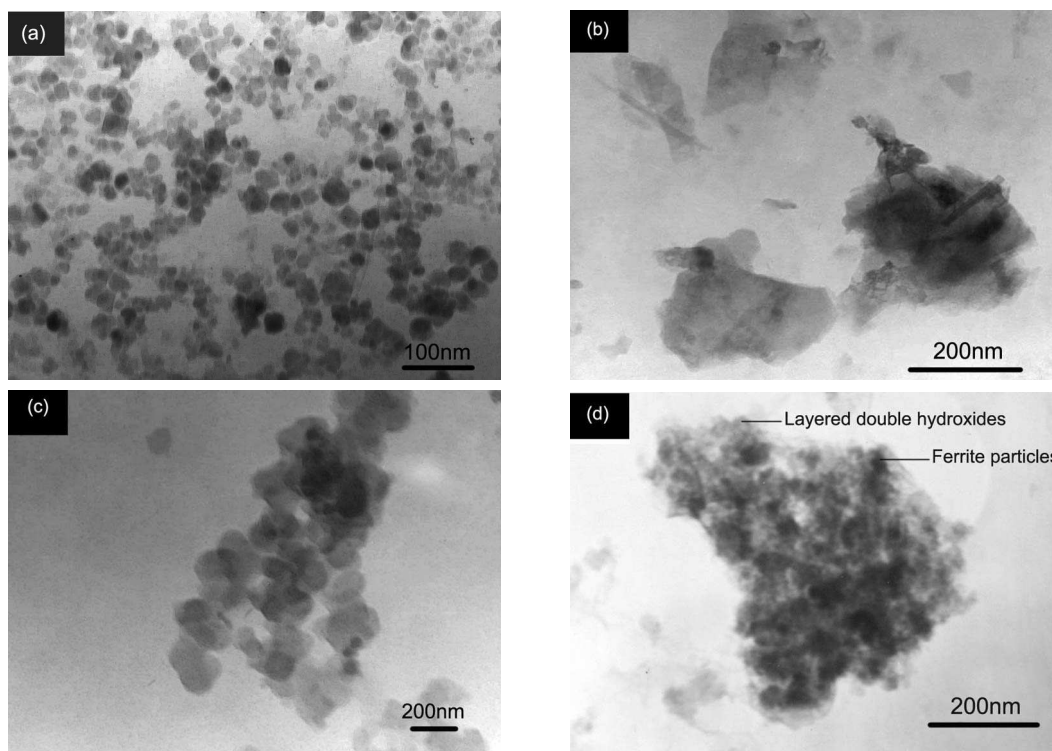


图 1 不同铁氧体含量样品的 TEM 照片

Fig. 1 TEM images of samples with different ferrite contents

(a) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (b)(c) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 10wt% ferrite; (d) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 55wt% ferrite

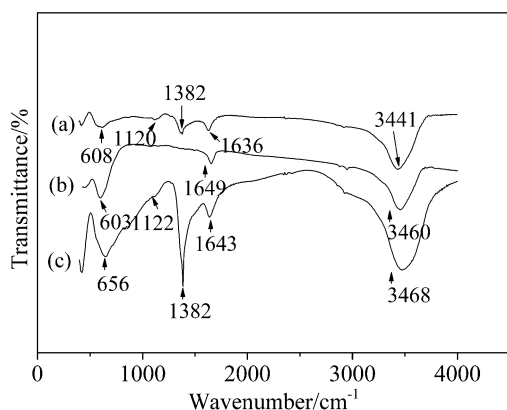


图 2 不同样品的 IR 谱图

Fig. 2 IR spectra of different samples

(a) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 55wt% ferrite;
(b) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (c) MgAl-LDHs

$\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 MgAl-LDHs 的红外光谱图. 由图可知, $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 和 MgAl-LDHs 在 $3400\sim 3500\text{cm}^{-1}$ 处出现的宽吸收峰是由物理吸附水、层间吸附水和层板羟基的伸缩振动共同引起的, 而 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 在该处的宽吸收峰归属于物理吸附水的 $-\text{OH}$ 伸缩振动, 同时三者 1636cm^{-1} 附近出现的吸收峰则归属于 $-\text{OH}$ 弯曲振动; $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 和 MgAl-LDHs 在

1382cm^{-1} 处出现的强吸收峰是由层间阴离子 CO_3^{2-} 的对称振动引起的, 同时两者在 1120cm^{-1} 附近出现的弱吸收峰则归属于层间阴离子 CO_3^{2-} 的面内和面外弱伸缩振动; $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 在 608cm^{-1} 附近出现的较宽吸收峰其位置接近于 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的金属-氧晶格振动吸收峰, 但与 MgAl-LDHs 的层板金属-氧晶格振动吸收峰却有 48cm^{-1} 的偏差, 且吸收峰相对强度较弱, 这表明 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 相和 MgAl-LDHs 相之间存在弱的相互作用力, 这可能是由于在复合材料的两相界面上 Mg 和 Al 通过桥氧同 Zn 相连而形成了 Zn-O-Mg 和 Zn-O-Al 键, 这与文献 [6] 报道的有关 LDHs 与磁核结合的界面键合特征相似.

图 3 是 MgAl-LDHs 和两种不同铁氧体含量复合材料的 DTA 曲线. 结果显示, 三种样品均出现了三段吸热过程: 第一阶段为表面物理结合水的脱附; 第二阶段为层间结构水的脱除; 第三阶段为层间碳酸根和层板羟基的分解, 并生成了 CO_2 和 H_2O . 由图 3 可以看出, (a) 的第三阶段吸热峰所对应的温度比 (b) 和 (c) 中相应的温度均低, 由此可以推测在 MgAl-LDHs 相和 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 相的界面上存在某种化学键, 因而导致复合材料热稳定

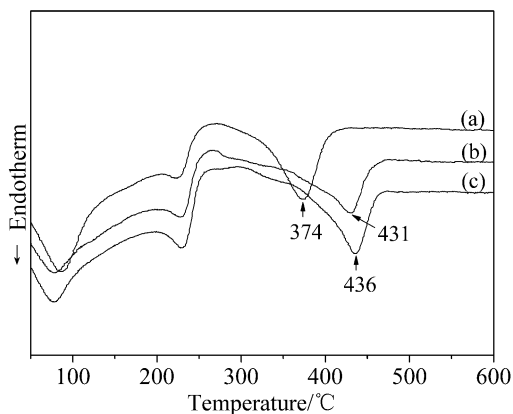


图3 不同样品的 DTA 曲线

Fig. 3 DTA curves of different samples

(a) MgAl-LDHs; (b) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 10wt% ferrite; (c) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 55wt% ferrite

性的提高, 这进一步说明在两相界面上存在 Zn-O-Mg 和 Zn-O-Al 键。

图4中(a)、(b)和(c)分别为 MgAl-LDHs、 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的 XRD 图谱, 相关的参数列于表1中。由图4可以看出, $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 同时具有 LDHs 和尖晶石型铁氧体的特征衍射峰^[12,13]。由表1可以看出, $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的 (003) 晶面衍射峰及其两个高级衍射峰的 d 值之间均存在良好的倍数关系, 这表明复合材料具有较为理想的层状结构。由此可知, 镁铝双金属氢氧化物与铁氧体复合后并没有改变其层状结构的典型特征。

与 MgAl-LDHs 相比, $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的 (003) 晶面层间距略有减小, 而 (110) 晶面参数保持不变。这是由于 $d_{(110)}$ 和晶胞参数 a 反映了 (110) 晶面的原子排列密度, 它们与该晶面中的

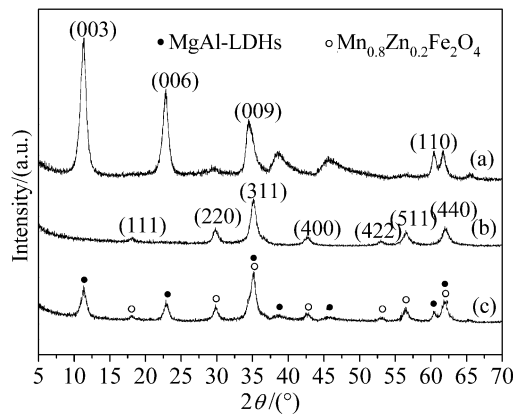


图4 不同样品的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of different samples

(a) MgAl-LDHs; (b) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (c) $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 55wt% ferrite

原子组成比以及层板上原子的半径有关, 显然本实验中如此低的合成温度不足以使磁性粒子中的金属离子扩散进入 MgAl-LDHs 层板而改变其 (110) 晶面上的原子组成; 而 $d_{(003)}$ 和晶胞参数 c 则反映了晶胞厚度, 与层板上的电荷密度有关, 由于复合材料中 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和 MgAl-LDHs 的两相界面上存在 Zn-O-Mg 和 Zn-O-Al 键, 这使得 MgAl-LDHs 层板上的正电荷密度略有增加, 从而使层间的配位阴离子 CO_3^{2-} 与正电荷层板之间的相互作用力增强, 导致 (003) 晶面层间距减小。

3.2 复合材料的磁性能研究

图5是不同铁氧体含量的复合材料样品在外磁场频率为 77Hz 时的磁滞回线。图6显示了饱和磁化强度 M_s 和矫顽力 H_c 随复合材料中铁氧体含量的变化趋势。

由图6可以看出, 随着 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 含量的增加, 复合材料的饱和磁化强度 M_s 不断增大,

表1 MgAl-LDHs 和 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ (55wt% ferrite) 的层板结构与晶胞参数Table 1 Indexing of XRD patterns for MgAl-LDHs and $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with 55wt% ferrite

	ferrite	
	$\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$	MgAl-LDHs
d_{003}/nm	0.777	0.782
d_{006}/nm	0.385	0.389
d_{009}/nm	0.259	0.261
d_{110}/nm	0.153	0.153
Lattice parameter, a/nm^*	0.306	0.306
Lattice parameter, c/nm^*	2.331	2.346

* Layered double hydroxides crystal is in hexagonal symmetry, and the unit cell parameters being c and a can be calculated according to $c=3d_{003}$, $a=2d_{110}$

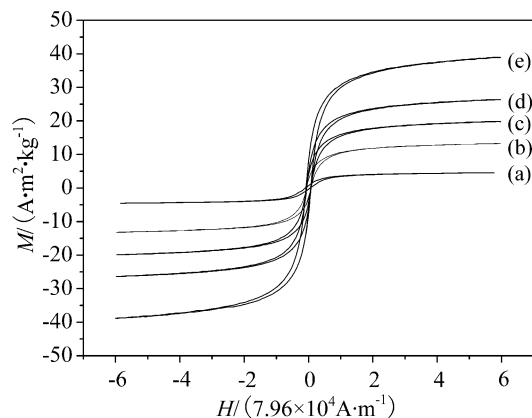


图5 不同铁氧体含量样品 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的磁滞回线

Fig. 5 Hysteresis loops of the samples $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with different ferrite contents

(a) 10wt% ferrite; (b) 40wt% ferrite; (c) 55wt% ferrite; (d) 75wt% ferrite; (e) 100wt% ferrite

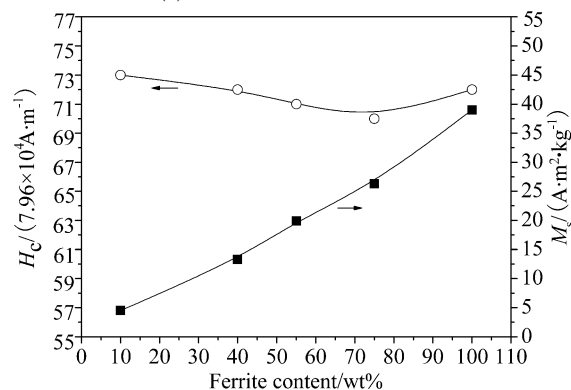


图6 不同铁氧体含量样品 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 的饱和磁化强度和矫顽力

Fig. 6 Saturation magnetization and coercivity of the samples $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with different ferrite contents

并呈现出良好的线性关系, 这说明 MgAl-LDHs 对铁氧体粒子没有显著的磁屏蔽效应, 复合材料的饱和磁化强度主要是由所含有的 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 量决定的。

由图6还可以看出, 随着 MgAl-LDHs 含量的增加 (即 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 含量的减小), 矫顽力 H_c 先减小后增大, 但整体变化幅度很小。对于复合材料来讲, 一方面由于纳米磁性粒子较均匀地分散在 MgAl-LDHs 材料中, 磁性粒子之间相互较为独立, 因而粒子之间的磁耦合作用比较弱, 有利于矫顽力的下降; 另一方面纳米磁性粒子因相互吸引而结合成球链状, 相互之间有较强的静磁作用, 其磁化方向要受到球链的影响, 因而表现出较强的磁各向异性, 而复会后 MgAl-LDHs 包覆层与磁性粒子之间的弱作用力会引起磁性粒子表面磁结

构的变化, 从而减小了磁性粒子的磁各向异性^[14], 有利于矫顽力的下降。但是随着 MgAl-LDHs 含量的不断增加, 包覆层厚度进一步增大, 磁性粒子之间的空间间隔也随之增大, 使磁性粒子对磁场的变化响应减慢^[15], 从而有利于矫顽力的增大, 但由于 MgAl-LDHs 对铁氧体粒子的磁屏蔽效应并不明显, 所以矫顽力增大的幅度也不大。

3.3 复合材料的磁热性能研究

图7是30mg不同铁氧体含量的复合材料样品在60kHz交变磁场作用下的温度变化曲线, 相应的升温量见图8。由图7可以看出, 铁氧体的含量对复合材料的磁热效应有着重要的影响, 铁氧体含量越高的样品, 其升温的速度和幅度越大, 升温量和最终温度也越高, 但各自的最终温度都保持

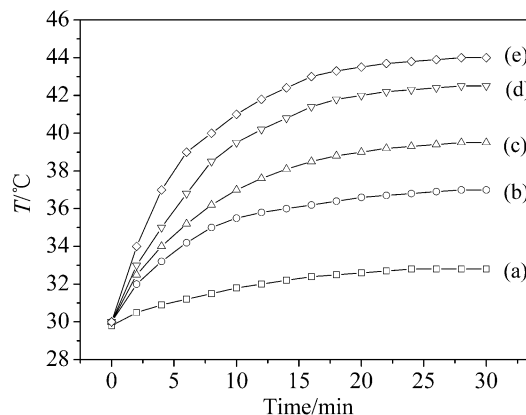


图7 不同铁氧体含量的样品 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ 在60kHz交变磁场下的时间与温度关系曲线

Fig. 7 Time-dependent temperature difference of the samples $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{MgAl-LDHs}$ with different ferrite contents at 60kHz AC field

(a) 10wt% ferrite; (b) 40wt% ferrite; (c) 55wt% ferrite; (d) 75wt% ferrite; (e) 100wt% ferrite

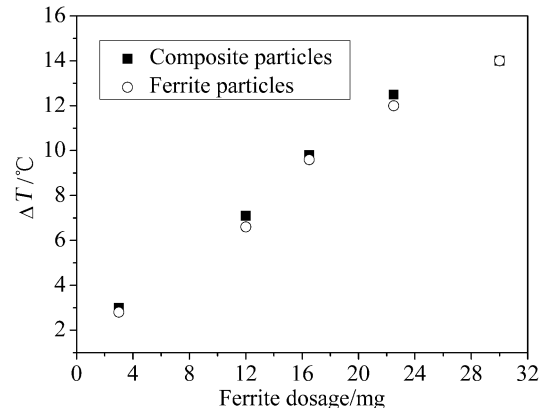


图8 复合材料粒子和相应的铁氧体粒子的升温量对比图

Fig. 8 Contrasts of increase in temperature between composite particles and respective ferrite particles

在一定值.

图 8 是铁氧体粒子与含有相同剂量铁氧体的复合材料样品的升温量对比图. 由图 8 可以看出, 在相同条件下两者的磁致发热能力相差不大, 这进一步说明 MgAl-LDHs 对铁氧体粒子没有显著的磁屏蔽效应, 复合材料的磁热效应主要是由所含有的 $\text{Mn}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 数量决定的, 受 MgAl-LDHs 的影响甚微.

铁氧体在交变磁场作用下发热的原因是其其在交变磁场中对电磁能的损耗, 包括涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗^[16]. 由于本实验采用的锰锌铁氧体具有较高的电阻率, 且实验在低频、弱磁场条件下进行, 因此可以忽略涡流损耗和剩余损耗的影响, 即样品的发热主要来自于磁滞损耗. 单位体积样品磁化 1 周的磁滞损耗可以粗略地表示^[17,18]为:

$$P_{\text{hys}} = p_{\text{hys}} f M_s H_c \quad (1)$$

其中, P_{hys} 为磁性材料在外磁场中的磁滞损耗, p_{hys} 为常数, f 为外磁场频率, M_s 为饱和磁化强度, H_c 为矫顽力. 由此可见, 磁滞损耗的大小与外磁场频率、材料的饱和磁化强度和矫顽力成正比. 在外磁场频率 f 一定的情况下, 磁滞损耗 P_{hys} 由材料的饱和磁化强度 M_s 和矫顽力 H_c 共同决定. 在磁性能研究部分已知, 复合材料的 M_s 基本不受 MgAl-LDHs 含量变化的影响, 且复合材料的 H_c 随 MgAl-LDHs 含量的变化幅度也极小, 这就是 MgAl-LDHs 含量变化对复合材料的磁热效应影响甚微的内在原因.

4 结论

采用共沉淀法将纳米锰锌铁氧体粒子与镁铝双金属氢氧化物组装合成了磁性纳米镁铝双金属氢氧化物. 研究表明, 复合材料形成了典型的核壳结构, 镁铝双金属氢氧化物被赋予磁性后并没有改变其层状结构的典型特征, 且其热稳定性有所

提高. 锰锌铁氧体的含量对复合材料的磁性能和磁热效应起着决定性作用, 而镁铝双金属氢氧化物对铁氧体粒子没有显著的磁屏蔽效应, 复合材料的磁性能和磁热效应受其影响甚微.

参考文献

- [1] 吕永钢, 刘 静. 微纳电子技术, 2004, **9**: 22-28.
- [2] 吴卫和, 王德平, 姚爱华, 等. 功能材料, 2006, **10** (37): 1551-1553.
- [3] Thakur A, Singh M. *Ceramics International*, 2003, **29**: 505-511.
- [4] 樊祥山, 张东生, 郑 杰, 等. 生物医学工程学杂志, 2006, **23** (4): 809-813.
- [5] Hilger I, Hergt R, Kaiser W A. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, **293**: 314-319.
- [6] 孙 辉, 张 慧, Evans D G, 等. 科学通报, 2004, **49** (24): 2525-2530.
- [7] 司丽春, 王治强, 王 戈, 等. 科学通报, 2004, **49** (18): 1840-1844.
- [8] Cavani F, Trifiro F, Vaccari A. *Catal. Today*, 1991, **11**: 173-301.
- [9] Choy J H, Jun J S, et al. *Biomaterials*, 2004, **25** (15): 3059-3064.
- [10] 张永海, 景晓燕, 王 君, 等. 应用化学, 2002, **19** (8): 734-737.
- [11] 郑崇辉, 张密林, 王 君, 等. 哈尔滨工程大学学报, 2004, **25** (6): 803-805.
- [12] 孟锦宏, 张 慧, Evans D G, 等. 科学通报, 2005, **50** (18): 1951-1956.
- [13] 路新丽, 张东生, 顾 宁, 等. 东南大学学报(自然科学版), 2004, **34** (1): 82-84.
- [14] 倪棋梁, 张建成, 刘健敏, 等. 物理化学学报, 2003, **19** (10): 944-947.
- [15] 童国秀, 王 维, 官建国, 等 (TONG Guo-Xiu, et al). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2006, **21** (6): 1461-1466.
- [16] 李海华, 冯则坤, 何华辉, 等. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, **31** (12): 48-50.
- [17] 蔡小军, 吴知方, 黄文显, 等. 建筑材料学报, 2004, **7** (3): 350-353.
- [18] 田 蔚. 材料物理性能. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001. 271-273.