

纳米复合永磁材料的有效各向异性与矫顽力*

高汝伟^{1)†} 冯维存¹⁾ 王 标¹⁾ 陈 伟¹⁾ 韩广兵¹⁾ 张 鹏¹⁾
刘汉强¹⁾ 李 卫²⁾ 郭永权²⁾ 李岫梅²⁾

¹⁾ 山东大学物理与微电子学院, 济南 250100)

²⁾ 钢铁研究总院功能材料研究所, 北京 100081)

(2002 年 4 月 26 日收到, 2002 年 8 月 16 日收到修改稿)

研究了纳米 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 复合永磁材料中晶粒交换耦合相互作用对有效各向异性的影响和变化规律. 结果表明: 晶粒之间的交换耦合作用使材料的有效各向异性 K_{eff} 随晶粒尺寸的减小而下降, 随软磁性相成分的增加而降低. 当晶粒尺寸减小到 4nm 时, K_{eff} 值减小为其各自通常各向异性常数值值的 1/3—1/4. 有效各向异性的变化特点与矫顽力的变化规律基本相同. 纳米复合永磁材料矫顽力的降低主要由于有效各向异性的减小而引起.

关键词: 纳米复合永磁材料, 交换耦合相互作用, 有效各向异性, 矫顽力

PACC: 7530E, 7530G, 7560G, 7560J

1. 引 言

当两个相邻磁性晶粒直接接触时, 界面处不同取向的磁矩产生交换耦合相互作用, 使混乱取向的磁矩趋于平行排列, 导致磁矩沿外磁场方向的分量增加, 产生剩磁增强效应. 当晶粒尺寸减小到纳米量级(1—10² nm)时, 材料的磁性能发生显著改变. Kneller 等人^[1]从理论上阐述了纳米复合永磁材料中软、硬磁性相晶粒之间的交换耦合相互作用可使材料同时具有硬磁性相的高矫顽力和软磁性相的高饱和磁化强度, 因此可具有很高的磁能积. Skomski 和 Coey 进一步指出^[2]: 取向排列的纳米双相复合磁体的理论磁能积可达 1MJ/m³, 比目前永磁性能最好的烧结 NdFeB 磁体的磁能积高一倍, 有可能发展成为新一代永磁材料. 这个预言引起了许多磁性材料研究者的极大兴趣, 大家纷纷开展纳米复合永磁材料的理论和实验研究工作. 实验结果表明: 虽然纳米复合磁体的剩磁有很大提高, 但是矫顽力下降太多, 致使这类磁体的磁能积尚未达到烧结磁体磁能积的 1/2, 远低于其理论预期值. 例如, Bauer 等人^[3]的实验表明: 当软磁性相 $\alpha\text{-Fe}$ 的体积分数为 30% 时, 纳

米复合永磁体的性能最好, 剩磁为 1.25T, 矫顽力为 422kA/m (5.3kOe), 磁能积为 185kJ/m³ (≈ 23.3 MGOe). Wang 等人^[4]通过添加元素 Dy 和 Nb, 改进制备和热处理工艺, 使纳米复合永磁体的矫顽力提高到 702kA/m (8.82kOe), 但剩磁下降到 1.02T, 磁能积下降到 134kJ/m³ (≈ 16.8 MGOe). 矫顽力太低是制约纳米复合永磁材料性能的关键影响因素. Bauer 和 Kronmüller 等人提出^[3] 纳米复合 NdFeB 永磁体的矫顽力与通常的烧结及快淬粘结磁体相同, 由成核反磁化机理决定. 其矫顽力公式与由微米级晶粒构成的烧结磁体的矫顽力公式相似, 其区别是插入一个交换耦合系数 α_{ex} , 以表示纳米晶粒交换耦合相互作用对磁体矫顽力的影响. Zhang 等人^[5]进一步指出: 可以用 $1/(1 + 6\beta L_{\text{ex}}/d)$ 表示交换耦合系数 α_{ex} , 其中 β 表示耦合程度的系数, 与晶粒边界性质有关, L_{ex} 表示铁磁交换长度, d 表示晶粒尺寸. 本文以 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合永磁材料为例, 研究晶粒交换耦合相互作用对有效各向异性的影响及其随晶粒尺寸和软、硬磁性相成分比例的变化, 并与矫顽力的变化规律进行比较, 为研究这类磁体的矫顽力影响因素提供参考.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002A A324050)和国家自然科学基金(批准号: 59971026)及山东省自然科学基金(批准号: Y2000F10)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gaorwbox@sdu.edu.cn

2. 不同晶粒界面纳米磁性材料的交换耦合相互作用与有效各向异性

在纳米(软、硬磁性相)复合永磁材料中可能存在软磁性晶粒-软磁性晶粒、软磁性晶粒-硬磁性晶粒、硬磁性晶粒-硬磁性晶粒三种不同的界面接触情况. 首先分别计算这三种不同晶粒界面的交换耦合相互作用与有效各向异性.

2.1. 纳米单相软磁晶粒的交换耦合相互作用与有效各向异性

Herzer^[6]提出随机各向异性(random anisotropy)模型解释纳米晶软磁材料的优异软磁性能. 他指出: 纳米晶粒之间交换耦合相互作用的影响范围, 即铁磁交换长度 L_{ex} 可表示为

$$L_{ex} = (A / \langle K \rangle)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 A 为交换积分, $\langle K \rangle$ 为铁磁交换长度内各晶粒各向异性的平均值, 即有效(或随机)各向异性常

表 2 不同尺寸(D) α -Fe 相晶粒对应的有效各向异性常数 $\langle K_s \rangle$

D/nm	23.3	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4
$\langle K_{1s} \rangle / (\text{kJ}/\text{m}^3)$	46	42.2	36.6	31.2	26.1	21.4	17.0	12.9	9.25	6.01	3.27
$\langle K_{2s} \rangle / (\text{kJ}/\text{m}^3)$	15	13.8	11.9	10.2	8.52	6.98	5.54	4.21	3.01	1.96	1.07

2.2. 纳米单相硬磁晶粒的交换耦合相互作用与有效各向异性

与纳米软磁材料相似, 纳米单相硬磁材料的交换耦合相互作用也使磁体的剩磁增强、有效各向异性减小. 把表 1 中 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相的有关磁性参数代入上述 Herzer 理论公式, 得出 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相的铁磁交换长度 L_{ex} 约为 1.34nm. 按照这个计算结果判断, 晶粒尺寸减小到纳米量级时有效各向异性不会减小, 从而磁体的矫顽力不会明显下降, 这个结论显然与实验结果不符. Schmidts 等人^[9]引用 Kneller 等人的研究结果, 指出 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相小晶粒具有单畴行为的临界尺寸 L_{crit} 与铁磁交换长度 L_{ex} 之间满足关系: $L_{crit} = 10L_{ex}$. 假设当 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 硬磁性相的晶粒尺寸 $D \geq L_{crit}$ ($\approx 13.4\text{nm}$) 时, 其各向异性常数没有明显改变. 当 $D < L_{crit}$ 时, 其有效各向异性值按(3)式的规律随 D 的减小而减小. 表 3 给出用 L_{crit} ($\approx 13.4\text{nm}$) 代替 L_{ex} 根据(3)式计算的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 硬磁性相晶粒的有效各向异性常数 $\langle K_h \rangle$ 随晶粒尺寸 D 的变化.

数, $\langle K \rangle$ 的数值与晶粒尺寸相对于铁磁交换长度的比值有关:

$$\langle K \rangle = K_1 (D/L_{ex})^3, \quad (2)$$

式中 K_1 为材料的第一磁晶各向异性常数, D 为晶粒直径. 当 $D < L_{ex}$ 时, 经过迭代计算, 得

$$\langle K \rangle = K_1^4 \times D^6 / A^3. \quad (3)$$

Schreff^[7]和 Kronmüller 等人^[8]给出了软磁性 α -Fe 相和硬磁性 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相的内禀磁性参数, 如表 1 所示.

表 1 一些磁性相的内禀磁性参数

相成分	$K_1 / (\text{MJ}/\text{m}^3)$	$K_2 / (\text{MJ}/\text{m}^3)$	J_s / T	$A / (\text{pJ}/\text{m})$
$\alpha\text{-Fe}$ ^[7]	0.046	0.015	2.15	25
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ^[8]	4.3		1.61	7.7

把表 1 中软磁性 α -Fe 相的数据代入(1)式, 计算出铁磁交换长度 L_{ex} 为 23.3nm. 对于不同的晶粒尺寸 D ($D < L_{ex}$), 应用(3)式, 计算出有效各向异性常数 $\langle K_s \rangle$ 随晶粒尺寸的变化, 如表 2 所示.

表 3 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 硬磁性相的有效各向异性常数 $\langle K_h \rangle$ 随晶粒尺寸 D 的变化

D/nm	13.4	13	12	10	8	6	4	2
$\langle K_h \rangle / (\text{MJ}/\text{m}^3)$	4.3	4.12	3.66	2.78	1.99	1.29	0.71	0.25

2.3. 纳米软、硬磁性相晶粒之间的交换耦合相互作用与有效各向异性

关于纳米软-硬磁性晶粒之间交换耦合作用对各向异性的影响, 目前还没有严格的理论计算. 我们采用与纳米单相晶粒类似的计算方法, 取文献[10]给出的数据: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和 α -Fe 纳米晶粒之间的交换作用为 $A = 10 \times 10^{-12} \text{J}/\text{m}$, 并取 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和 α -Fe 各向异性常数的平均值作为其软-硬磁性晶粒的平均各向异性常数 \bar{K}

$$\begin{aligned} \bar{K} &= \frac{K_1(\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}) + K_1(\alpha\text{-Fe})}{2} \\ &= \frac{4.3 + 0.046}{2} \\ &= 2.173 (\text{MJ}/\text{m}^3). \end{aligned} \quad (4)$$

把 \bar{K} 和 A 的数值代入(1)式, 初步计算 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和

α -Fe 之间的铁磁交换长度 L_{ex} 为 2.15nm. 类似于对硬磁性单相 $Nd_2Fe_{14}B$ 纳米晶粒的处理, 设 $L_{crit} = 10L_{ex} = 21.5nm$, 按照 (3) 式计算出 $Nd_2Fe_{14}B$ 和 α -Fe 纳米晶粒之间的有效各向异性常数 $\langle K_{sh} \rangle$ 随晶粒尺寸 D 的变化, 如表 4 所示.

表 4 $Nd_2Fe_{14}B$ 和 α -Fe 之间的有效各向异性常数 $\langle K_{sh} \rangle$ 随晶粒尺寸 D 的变化

D/nm	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4
$\langle K_{sh} \rangle / (MJ/m^3)$	2.17	1.96	1.67	1.40	1.15	0.91	0.69	0.49	0.32	0.18

3. 纳米软、硬磁性相复合永磁材料的有效各向异性

Skomski 和 Coey^[2] 提出了计算纳米(软、硬磁性相)复合永磁材料有效各向异性常数 K_{eff} 的理论公式为

$$K_{eff} = \int \psi^*(r) K_1(r) \psi(r) dr$$

$$= \langle K_1(r) \rangle = f_s K_s + f_h K_h, \quad (5)$$

式中 K_s, K_h 为软、硬磁性相的各向异性常数, f_s, f_h 为其体积分数. (5) 式表明: 复合永磁材料有效各向异性常数等于软、硬磁性相各向异性常数的统计平均值. 我们认为应该对 (5) 式进行修正: 一个修正是应考虑交换耦合相互作用对各向异性的减小, 用随晶粒尺寸变化而改变的有效各向异性常数 $\langle K \rangle$ 代替通常采用的固定各向异性常数 K . 另一个修正是考虑到复合磁体中通常存在软-软、软-硬、硬-硬磁性晶粒三种不同的界面, 应同时考虑三种可能的晶粒界面之间的交换耦合相互作用对有效各向异性的影响. 通常各种界面所占的比例与软、硬磁性相体积分数、晶粒尺寸及形状分布有关. 为便于计算, 设软、硬磁性相具有相同的晶粒形状和尺寸, 且各种晶粒随机分布, 其体积分数分别为 V_s 和 $V_h (V_h = 1 - V_s)$, 则表面积之比 $S_s/S_h = (V_s)^{2/3} / (V_h)^{2/3}$. 软-软(及硬-硬)磁性晶粒直接接触的界面所占的比例应当为软(硬)磁性晶粒表面积分数与软(硬)磁性晶粒表面积分数的乘积

$$f_{ss} = S_s \times S_s, \quad f_{hh} = S_h \times S_h, \quad (6)$$

软-硬晶粒界面所占的比例应当为软磁性晶粒表面积分数与硬磁性晶粒表面积分数的乘积加上硬磁性晶粒表面积分数与软磁性晶粒表面积分数的乘积, 即

$$f_{sh} = S_s \times S_h + S_h \times S_s = 2S_s \times S_h. \quad (7)$$

纳米(软、硬磁性相)复合永磁体的有效各向异性常数 K_{eff} 可以用软-软、软-硬、硬-硬三种不同晶粒界面所占的比例与对有效各向异性的乘积之和表示, 即 (5) 式应改写为

$$K_{eff} = f_{ss} \langle K_s \rangle + f_{hh} \langle K_h \rangle + f_{sh} \langle K_{sh} \rangle. \quad (8)$$

4. 结果与讨论

设纳米 $Nd_2Fe_{14}B/\alpha$ -Fe 复合磁体中软、硬磁性相具有相同的平均晶粒尺寸 D , 当磁体中软磁性相的体积分数 V_s 从 10% 逐渐增加到 70% 时, 两种晶粒的表面积之比 S_s, S_h , 以及软-软、硬-硬、软-硬三种不同晶粒界面所占的比例 f_{ss}, f_{hh}, f_{sh} 按照 (6) 和 (7) 式分别计算, 如表 5 所示.

表 5 不同软磁性相体积分数 V_s 对应的表面积比 S_s, S_h 及三种磁性晶粒界面所占的比例 f_{ss}, f_{hh} 和 f_{sh}

$V_s/\%$	10	20	30	40	50	60	70
$S_s/\%$	18.8	28.4	36.2	43.3	50.0	56.7	63.8
$S_h/\%$	81.2	71.6	63.8	56.7	50.0	43.3	36.2
$f_{ss}/\%$	3.52	8.07	13.14	18.73	25.00	32.17	40.65
$f_{hh}/\%$	65.98	51.25	40.65	32.17	25.00	18.73	13.14
$f_{sh}/\%$	30.50	40.68	46.21	49.10	50.00	49.10	46.21

由表 2 至表 4 给出的有效各向异性常数 $\langle K_s \rangle, \langle K_h \rangle, \langle K_{sh} \rangle$ 和表 5 给出的三种晶粒界面所占的比例 f_{ss}, f_{hh} 和 f_{sh} , 按照 (8) 式计算平均晶粒尺寸 D 由 23nm 减小到 4nm 时, 各种软磁性相体积分数 V_s 的 $Nd_2Fe_{14}B/\alpha$ -Fe 纳米复合磁体有效各向异性常数 K_{eff} 随 D 的变化如图 1 所示.

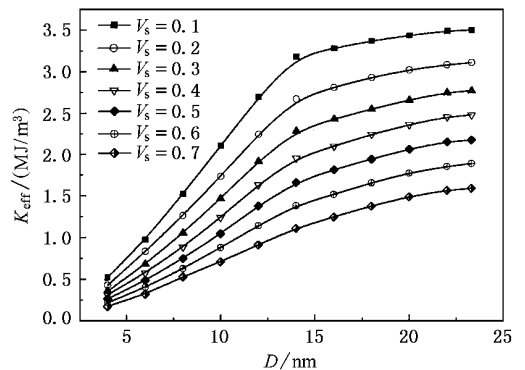


图 1 不同软磁性相体积分数 $Nd_2Fe_{14}B/\alpha$ -Fe 纳米复合磁体有效各向异性常数 K_{eff} 随晶粒尺寸 D 的变化. 左上角不同符号代表的数字表示软磁性相的体积分数

图 1 给出的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合磁体有效各向异性常数 K_{eff} 的变化规律如下:

1) 当软磁性相体积分数较低 ($V_s < 30\%$), 且平均晶粒尺寸 $D \geq 15\text{nm}$ 时, K_{eff} 基本保持通常各向异性常数数值不变; 当 $D < 15\text{nm}$ 时, K_{eff} 随 D 的减小而明显下降. 当 D 减小到 4nm 时, K_{eff} 值减小为通常各向异性常数值的 $1/3$ — $1/4$.

2) K_{eff} 随软磁性相比例 V_s 的增加而下降. 当 V_s 为 50% 时, K_{eff} 值下降为硬磁性相对应值的 $1/2$ 左右. 随 V_s 的进一步增加, K_{eff} 值在整个尺寸 D 的变化范围内随 D 的减小近似呈线性关系下降.

图 2 为文献 [11] 给出的具有不同软磁性相体积分数的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合磁体矫顽力随晶粒尺寸 D 的变化规律.

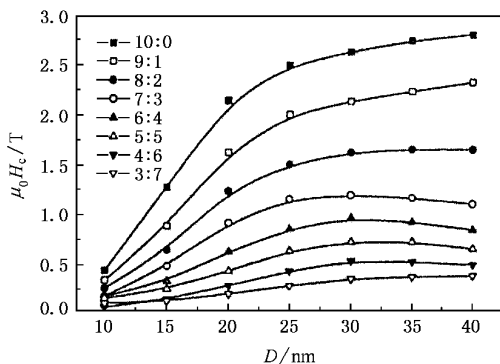


图 2 不同成分比例 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 的纳米复合磁体矫顽力 H_c 随晶粒尺寸 D 的变化. 左上角不同符号代表的数字比表示硬、软磁性相的体积分数比

对比图 1 和图 2 可以看出, 我们计算的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合磁体有效各向异性常数 K_{eff} 随晶粒尺寸 D 和软磁性相的体积分数的变化规律与文献 [11] 计算的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合磁体矫顽力的变化规律基本相似. 二者有所不同的是: 图 2 中晶粒尺寸 D 的变化范围扩大到 40nm , 当 D 小于 20nm 时, 矫顽力明显下降, 而图 1 的资料显示当 D 小于 15nm 时有效各向异性才开始下降; 另外, 图 2 显示, 当软磁性相的比例在 30% — 70% 范围时, 复合磁体矫顽力在晶粒尺寸为 25nm 左右出现极大值, 而图 1 显示的有效各向异性随 D 的减小单调下降, 不出现极值. 这些差别表明, 矫顽力并非完全由各向异性决定, 可能随软、磁硬性相成分比例和晶粒尺寸的变化,

复合磁体的反磁化过程和矫顽力机理有所改变而造成的.

Kronmüller 等人^[8]在纳米复合永磁合金的矫顽力公式中插入一个交换耦合系数 α_{ex} , 经与实验结果拟合, 得出 α_{ex} 值约为 0.2 — 0.38 . 本文的计算结果 (图 1) 显示: 当平均晶粒尺寸 D 减小到 4nm 时, 各种软磁性相比比例的复合磁体的 K_{eff} 值约减小为其各自通常值的 $1/3$ — $1/4$, 与 Kronmüller 等人理论与实验的拟合结果基本符合, 这说明交换耦合系数 α_{ex} 实际上就是有效各向异性常数 K_{eff} 的减小量. 文献 [5] 中用 $1/(1 + 6\beta L_{\text{ex}}/d)$ 表示交换耦合系数 α_{ex} , 也得出 α_{ex} 随晶粒尺寸的减小而降低的结果.

本文对 K_{eff} 的计算与文献 [12] 稍有不同, 本文计算的晶粒尺寸范围限于 $D < L_{\text{ex}}$, 相当于文献 [12] 的第一种情况, 即晶粒间完全耦合. 对 $D > L_{\text{ex}}$ 的情况, 文献 [12] 考虑了部分耦合, 但忽略了软磁性相各向异性常数的影响, 仅考虑硬磁性相的各向异性常数. 我们的计算则同时考虑了软、硬磁性相各向异性常数的影响, 没有考虑部分耦合. 两种理论计算得出了相同的结果: 即纳米复合永磁合金的有效各向异性随晶粒尺寸的减小而下降, 随软磁性相成分的增加而降低. 纳米复合永磁合金矫顽力的下降主要是由于有效各向异性减小而引起. 由于采用了不同的简化模型, K_{eff} 值的具体变化曲线有所区别. 更完善的模型应同时考虑软、硬磁性相各向异性常数的影响、完全耦合 ($D < L_{\text{ex}}$) 和部分耦合 ($D > L_{\text{ex}}$) 的情况, 还应考虑晶粒边界微结构对耦合程度的影响, 进一步的研究工作在继续进行中.

5. 结 论

纳米复合永磁材料中的晶粒交换耦合相互作用随晶粒尺寸减小而增强, 其有效各向异性常数 K_{eff} 可以用软-软、软-硬、硬-硬三种不同晶粒界面所占的比例与对应的有效各向异性的乘积之和表示. 纳米复合永磁材料的有效各向异性随晶粒平均尺寸的减小而下降, 随软磁性相成分的增加而降低. 当晶粒尺寸 D 减小到 4nm 时, K_{eff} 值减小为通常各向异性常数值的 $1/3$ — $1/4$. 纳米复合永磁合金矫顽力的下降主要是由于有效各向异性常数的减小而引起.

- [1] Kneller E F and Hawig R 1991 *IEEE Trans. Mag.* **27** 3588
- [2] Skomski R and Coey J M D 1993 *Phys. Rev. B* **48** 15812
- [3] Bauer J, Seeger M, Zem A and Kronmüller H 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 1667
- [4] Wang Z C, Zhang M C and Zhou S Z 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 5097
- [5] Zhang H W, Sun Z G, Zhang S Y, Han B S and Shen B G 1999 *Phys. Rev. B* **60** 64
- [6] Herzer G 1990 *IEEE Trans. Mag.* **26** 1397
- [7] Schrefl T, Fidler J and Kronmüller H 1994 *Phys. Rev. B* **49** 6100
- [8] Kronmüller H, Fischer R, Seeger M and Zem A 1996 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** 2274
- [9] Schmidts H F and Kronmüller H 1994 *J. Magn. Magn. Mater.* **129** 361
- [10] Gao Y H *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1749
- [11] Sun X K, Zhang J, Chu Y L, Liu W, Cui B Z and Zhang Z D 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1740
- [12] Arcas J, Hernando A, Barandiarán J M, Prados C and Neuweiler A 1998 *Phys. Rev. B* **58** 5193

Effective anisotropy and coercivity in nanocomposite permanent materials^{*}

Gao Ru-Wei¹⁾ Feng Wei-Cun¹⁾ Wang Biao¹⁾ Chen Wei¹⁾ Han Guang-Bing¹⁾ Zhang Peng¹⁾
Liu Han-Qiang¹⁾ Li Wei²⁾ Guo Yong-Quan²⁾ Li Xiu-Mei²⁾

¹⁾*School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250100, China*

²⁾*Department of Functional Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China*

(Received 26 April 2002 ; revised manuscript received 16 August 2002)

Abstract

The effects of exchange-coupling interactions between grains on the effective anisotropy and the variation in Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe nanocomposite permanent materials were investigated. The calculated results showed that due to the exchange-coupling interactions, the effective anisotropy K_{eff} of the nanocomposite decreases with the decrease of grain size and the increase of magnetically soft phase component. When the average grain size decreases to 4nm, K_{eff} decreases to about 1/3—1/4 of the value of the ordinary anisotropy constant. This variation character is basically similar to that of the coercivity. The decrease of coercivity for the nanocomposite permanent materials is mainly due to the decrease of the effective anisotropy.

Keywords : nanocomposite permanent materials, exchange-coupling interaction, effective anisotropy, coercivity

PACC : 7530E, 7530G, 7560G, 7560J

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No.2002A A324050) ,the National Natural Science Foundation of China(Grant No.59971026) ,and the Natural Science Foundation of Shandong Province ,China(Grant No. Y2000F10).