

# 3:29 型 $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$ 化合物的成相与结构<sup>\*</sup>

王文全<sup>1,2)</sup> 王建立<sup>1)</sup> 唐 宁<sup>1)</sup> 包富泉<sup>1)</sup> 吴光恒<sup>1)</sup> 杨伏明<sup>1)</sup> 金汉民<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室, 北京 100080)

<sup>2)</sup> 吉林大学物理系, 长春 130023)

(2001 年 3 月 2 日收到)

通过 X 射线衍射分析和磁测量研究了 Gd-Fe-Co-Cr 四元系中对应于化学式  $\text{Gd}_3(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cr})_{29}$  且 Gd 含量为一定值的截面内富 Fe, Co 区的相关关系, 重点探索了高 Co 含量 3:29 型化合物合成的可能性, 研究了 3:29 型  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的结构与磁性. 研究结果表明, 获得 3:29 型单相  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的范围为:  $y = 5$ ,  $0 \leq x \leq 0.7$ ;  $y = 5.5$ ,  $0.7 \leq x \leq 0.8$  和  $y = 6$ ,  $0.8 \leq x \leq 0.9$ . 基于对  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物成相条件的研究, 成功地合成了纯 Co 基  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物, 其固溶范围为  $6.5 \leq y \leq 7.3$ . 3:29 型单相  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的晶体结构都属于单斜晶系,  $\text{Nd}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}$  型结构, 空间群为  $A2/m$ . 得到 3:29 型单相  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的固溶极限即 Co 含量的极大值与稳定元素 Cr 含量有关, Co 原子的含量越高, 所需稳定元素 Cr 的含量越大. 值得注意的是, 用 Co 原子替代 Fe 原子会导致  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物磁晶各向异性的显著改变. 当  $x \geq 0.4$  时, 化合物的磁晶各向异性从易面型转变为易轴型.

关键词:  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物, 相关关系和相结构, X 射线衍射, 磁晶各向异性

PACC: 6110, 8230B, 7530G, 7530K

## 1 引 言

新近, 在探索新型富 Fe 稀土永磁材料的过程中, Collocott 等<sup>[1]</sup>合成了一种他们认为是  $\text{Nd}_2(\text{Fe}, \text{Ti})_9$  的新相稀土-过渡族金属间化合物. 随后的 X 射线衍射和中子衍射分析结果表明它的化学式应为  $\text{Nd}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}$ , 属于单斜晶系和  $A2/m$  空间群. 世界各国不少研究小组对这一新相 3:29 型  $R_3(\text{Fe}, M)_{29}$  ( $R$  = 稀土,  $M$  = 稳定元素) 稀土-过渡族金属间化合物结构和磁性研究十分重视. 这些化合物一般都不具备室温单轴磁晶各向异性, 不能直接用作永磁材料. 其后, Yang 等<sup>[2]</sup>和 Hu 等<sup>[3]</sup>利用气固相反应合成了具有很好室温单轴磁晶各向异性的  $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}\text{N}_y$  和  $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}\text{C}_y$  化合物, 显示出优异的内禀永磁特性. 但是与所有间隙型化合物一样,  $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}\text{N}_y$  和  $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}\text{C}_y$  化合物的高温稳定性不尽人意, 因而限制了它在宽温度范围内的应用. 因此, 寻找具有室温单轴磁晶各向异性的非间隙型高性能稀土永磁材料一直成为永磁材料研究的热点.

到目前为止, 关于 Co 基 1:12<sup>[4,5]</sup>, 2:17<sup>[6,7]</sup> 型稀土过渡族化合物的研究比较多, 但是 Co 基 3:29 型具有室温单轴磁晶各向异性的化合物尚未见文献报道. 最近, 孙志刚等<sup>[8]</sup>在  $\text{Pr}_2\text{Co}_{17-x}\text{Mn}_x$  化合物中观察随 Mn 含量增加, 化合物发生从 2:17 到 3:29 型结构的转变, 可是由于稳定元素 Mn 含量较高 ( $x = 13$ ), 5 K 以上化合物表现为顺磁性. 另外, 阳东等<sup>[9]</sup>以 Co 替代  $\text{Gd}_3(\text{Fe}, \text{Cr})_{29}$  中的 Fe 原子, 成功制备了  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{25}\text{Cr}_4$  ( $0 \leq x \leq 0.6$ ) 化合物, 并发现随着 Co 含量的增加,  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{25}\text{Cr}_4$  的磁晶各向异性在  $x \geq 0.4$  时由平面各向异性转变为单轴各向异性, 遗憾的是在  $x = 0.6$  以上的单相化合物没有成功制备出来, 所以无法讨论 Co 次晶格的贡献. 为了研究新相 Co 基 3:29 型稀土化合物的结构与磁性, 我们选择了 Co 离子替换的办法, 系统地研究了 Gd-Fe-Co-Cr 四元系中对应于化学式  $\text{Gd}_3(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Cr})_{29}$  且 Gd 含量为一定值的截面内富 Fe, Co 区的相关关系, 探索获得  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ,  $4 \leq y \leq 8$ ) 单相化合物的成相条件. 在此基础上, 成功合成出具有室温单轴磁晶各向异性的纯 Co 基 3:29 型  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$

( $y = 6.5, 7.0$ ) 化合物, 为探索非间隙型具有室温单轴磁晶各向异性的稀土永磁材料提供了一条新途径.

2 实 验

制备 Gd-Fe-Co-Cr 合金所使用的金属 Gd, Fe, Co 和 Cr 的纯度均为 99.9%. 按名义成分  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0, 4 \leq y \leq 8$ ) 配料, 利用电弧炉在高纯氩气保护下将组成元素熔炼成合金, 每个合金锭子熔炼 5 次以保证成分均匀. 考虑到稀土的挥发, 实际中 Gd 按其质量的 2% 过量加入. 将熔炼好的合金锭子在高纯氩气保护下分别于 1403 K 温度下退火 72 h, 然后水淬.

利用 X 射线粉末衍射和热磁曲线测量(磁场约为 50 mT)研究样品的相组成. 将磁性上为单相的样品在石油醚保护下粉碎成颗粒度为 30  $\mu\text{m}$  的粉末, 与环氧树脂及其固化剂均匀混合, 在室温下置于大约 1 T 的磁场下取向并固化, 得到取向粉末样品, 用以研究磁晶各向异性.

3 结果与讨论

为了获得单相 Co 基 3:29 型化合物, 我们对  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0, 4 \leq y \leq 8$ ) 化合物

成相条件进行了研究. 发现在  $y = 4$  不变的情况下, 能得到 3:29 相的 Co 含量最大值是  $x = 0.6$ , 这与阳东等<sup>[9]</sup>的研究结果相一致. 保持  $y = 4$  不变再进一步增加  $x$  值, 无论是提高退火温度和退火时间, 还是降低退火温度和退火时间, 都出现具  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相. 于是我们改变  $y$  的值. 按名义成分  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 4.5, 0.7 \leq x \leq 1.0; y = 5.0, 0.7 \leq x \leq 1.0$ ) 配料, 利用电弧炉在高纯氩气保护下将组成元素熔炼成合金. 考虑到化合物  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{25}\text{Cr}_4$  为高温稳定相, 单相  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_{25}\text{Cr}_4$  化合物的退火温度为 1383 K 左右, 比 Co 含量少时退火温度略高. 所以在  $x \geq 0.7$  时退火温度确定为 1403 K, 退火时间仍为 72 h, 然后水淬. X 射线衍射分析和热磁曲线表明, 在  $y = 4.5, 0.7 \leq x \leq 1.0$  时, 都出现具  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相, 只有在  $y = 5.0, x = 0.7$  时出现 3:29 相, 而  $0.8 \leq x \leq 1.0$  时, 又都出现具  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相. 据此可以推断, 较多的 Co 替代 Fe 时所需要的稳定元素 Cr 的含量要高一些. 为了验证上述推断, 我们又进行了两个系列实验: 一是固定  $y$  的值改变  $x$ , 即  $y = 5.5, 0.7 \leq x \leq 1.0$  和  $y = 6.0, 0.7 \leq x \leq 1.0$ ; 二是固定  $x$  的值改变  $y$ , 即  $x = 0.8, 5.5 \leq y \leq 8.0$  和  $x = 0.9, 5.5 \leq y \leq 8.0$ .

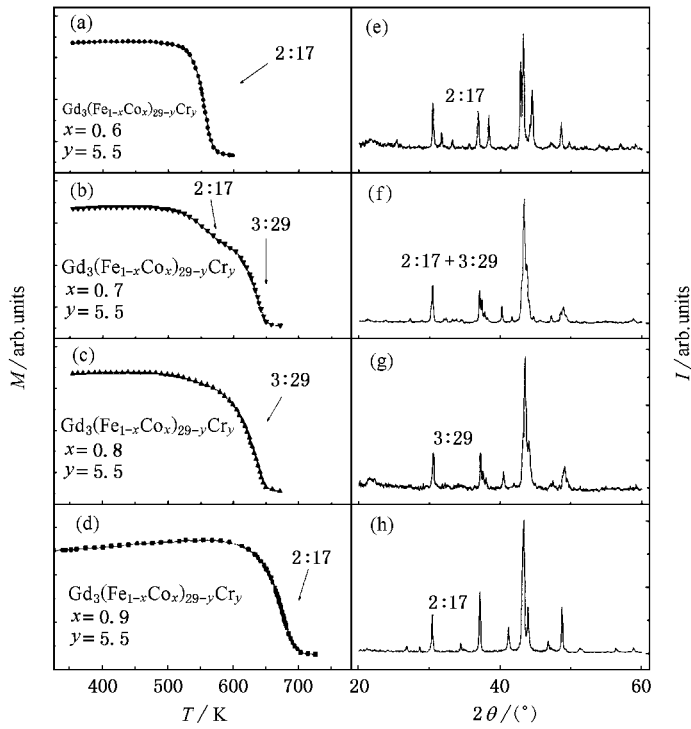


图 1  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物在  $y = 5.5$  时  $x$  具不同数值的几个样品在低场下的热磁曲线 (a) (b) (c) (d) 和它们的 X 射线粉末衍射谱 (e) (f) (g) (h)

首先,固定  $y$  的值改变  $x$ . 图 1 是  $y = 5.5$  时  $x$  具不同数值的几个样品的热磁曲线和它们的 X 射线衍射谱. 从图 1 可以发现,在稳定元素 Cr 含量不变的情况下,Co 含量较低时,出现具有  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构的 2:17 相,如图 1 中的(a)和(e).随着 Co 含量的

增加出现具有  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构的 2:17 相和 3:29 相两相共存,如图 1 中的(b)和(f);在  $x = 0.8$  时出现纯的 3:29 相,如图 1 中的(c)和(g).随着 Co 含量的进一步提高,出现具有  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相,如图 1 中的(d)和(h).

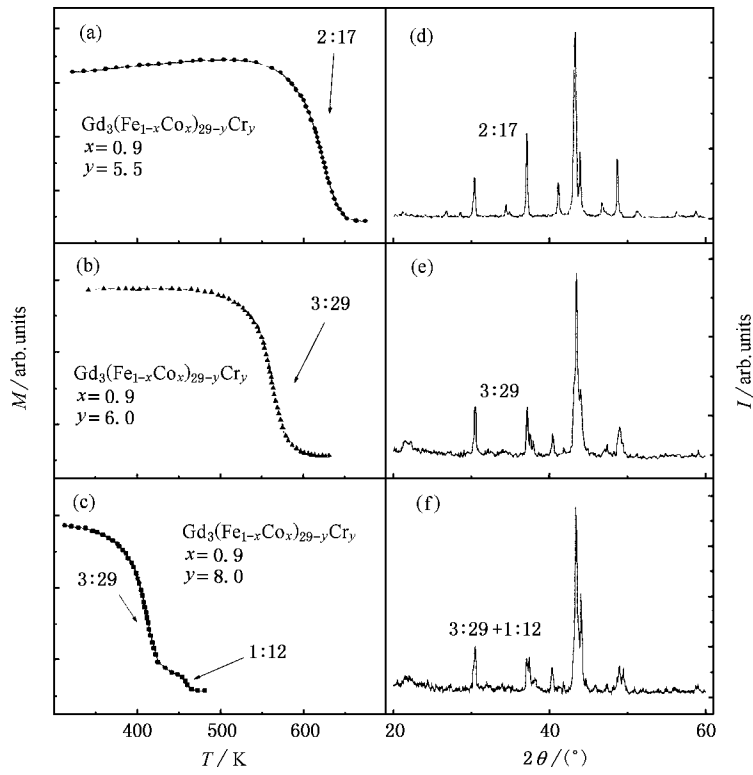


图 2  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物在  $x = 0.9$  时  $y$  具不同数值的几个样品在低场下的热磁曲线(a)(b)(c)和它们的 X 射线粉末衍射谱(d)(e)(f)

其次,固定  $x$  的值改变  $y$  的值. 图 2 是  $x = 0.9$  时  $y$  具不同数值的几个样品的热磁曲线和它们的 X 射线衍射谱. 从图 2 可以发现,在 Cr 含量较低时,出现具  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相,如图 2 中的(a)和(d).随着 Cr 含量的增加出现 3:29 相,如图 2 中的(b)和(e);进一步提高 Cr 含量,出现具  $\text{ThMn}_{12}$  型结构的 1:12 相和 3:29 相两相共存,如图 2 中的(c)和(f).

上述实验结果表明,通过改变  $x, y$  的数值,在  $y = 5.0, x = 0.7, y = 5.5, x = 0.8$  及  $y = 6.0, x = 0.9$  时都制备出了单相 3:29 型化合物. 由此可以推断要想得到纯的 Co 基 3:29 型化合物,稳定元素 Cr 含量还要进一步提高. 比较( $y = 5.0, x = 0.7$ )( $y = 5.5, x = 0.8$ )及( $y = 6.0, x = 0.9$ )这三组数值发现,Co 含量每提高 0.1,稳定元素 Cr 含量约提高 0.5,那么要得到纯的 Co 基 3:29 型化合物,稳定元素 Cr 的含量

应该在  $y = 6.5$  左右. 因此,按名义  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  ( $5 \leq y \leq 9$ )成分配料,利用电弧炉在高纯氩气保护下将组成元素熔炼成合金,退火温度仍为 1403 K,退火时间为 72 h,然后水淬. X 射线衍射分析和热磁曲线表明,在  $y = 6.5$  和 7.0 时样品为纯的 3:29 相. 这样通过对  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物成相条件的总结,制备出纯 Co 基 3:29 型化合物.

在  $\text{R}_3(\text{Fe}, \text{M})_{29}$  化合物中,由于二元稀土-Fe 化合物  $\text{R}_3\text{Fe}_{29}$  相并不存在,必须加入一定量的稳定元素 M 才能把结构稳定下来. 从实验结果来看,过渡族元素不同所需稳定元素有很大差异. 阳东等<sup>[9]</sup>在稳定元素 Cr 含量在 3.5—5 时都制备出了  $\text{Gd}_3(\text{Fe}, \text{Cr})_{29}$  化合物;可是在新获得的  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物中,稳定元素 Cr 含量为  $6.5 \leq y \leq 7.3$ ,远大于铁基 3:29 相所需的稳定元素含量. 一般而言,金属间化合物的结构稳定性主要由三大因素控制,即电化因素

(电负性)几何因素(原子半径的大小)和电子浓度<sup>[10]</sup>.在稀土过渡族化合物中,几何因素即原子半径的大小对化合物结构的稳定性起着主要作用,稀土元素的原子半径与过渡族元素的原子半径之比必须满足一定的范围,化合物的结构才能稳定<sup>[11]</sup>.用 Co 替代  $\text{Gd}_3(\text{Fe},\text{Cr})_{29}$  中的 Fe 原子,由于 Co 原子和 Fe 原子同属过渡族,它们的物理化学性质差别不大,电化因素(电负性)及电子浓度对稳定性的影响较小,而明显的是几何因素起着主要的作用.由于 Co 的原子半径比 Fe 的原子半径小,所以,新相 Co 基 3:29 型化合物必须要有较多的稳定元素 Cr,才能保证稀土元素的原子半径与过渡族元素及稳定元素的平均原子半径之比满足一定的几何因素,而使化合物结构得到稳定.

人们在用 Ti, V, Cr, Mn, Mo 等元素稳定  $\text{R}_3\text{Fe}_{29-x}\text{M}_x$  化合物时,均发现必须使用快淬的方法才能得到 3:29 纯相<sup>[12,13]</sup>,我们得到  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的情况也是如此. Huang 等<sup>[14]</sup>发现  $\text{Gd}_3\text{Fe}_{29-x}\text{Nb}_x$  化合物是一个室温稳定相,即不用高温退火快淬处理就能得到 3:29 相.为了进一步确定  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的成相条件,按名义  $\text{Gd}_3\text{Co}_{22.5}\text{Cr}_{6.5}$ ,  $\text{Gd}_3\text{Co}_{22.0}\text{Cr}_{7.0}$  成分配料,利用电弧炉在高纯氩气保护下将组成元素熔炼成合金,不用高温退火, X 射线衍射分析和热磁曲线表明,所得到的都是具  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构的 2:17 相.这说明 Gd-Co-Cr 的 3:29 相是一个在 1403 K 左右存在的高温相,其 X 射线衍射谱分析表明,它们都属于单斜晶系  $\text{Nd}_3(\text{Fe},\text{Ti})_{29}$  型结构,  $A2/m$  空间群.

由样品的 X 射线衍射分析和热磁曲线测定的 Gd-Fe-Co-Cr 四元系中对应于化学式  $\text{Gd}_3(\text{Fe},\text{Co},$

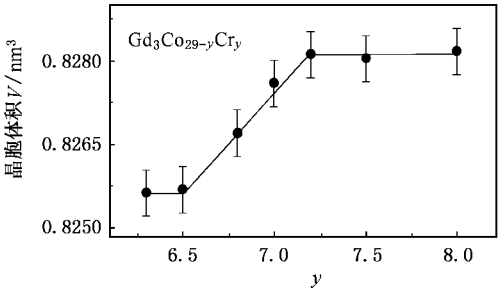


图 4  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的晶胞体积  $V$  随 Cr 含量  $y$  的变化曲线

$\text{Cr})_{29}$  且 Gd 含量为一定值的截面内富 Fe, Co 区的相关系示于图 3. 该体系中可分为 7 个相区: 1 是 2:17 相 + 固溶体 ( $\gamma\text{-Fe}, \alpha\text{-Co}$ ); 3 是 2:17 相 + 3:29 相; 4 是 3:29 单相; 5 是 1:12 相 + 3:29 相; 7 是 1:12 相 + 固溶体 (Cr, Gd). 2 和 6 分别是根据相区连接规则作出的 2:17 相 + 3:29 相 + 固溶体 ( $\gamma\text{-Fe}, \alpha\text{-Co}$ ) 和 1:12 相 + 3:29 相 + 固溶体 (Cr, Gd) 两个示意相区. 我们通过分析  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的晶格常量随成分的变化关系确定了  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物的固溶范围. 图 4 是晶胞体积  $V$  随成分  $y$  的依赖关系, 这表明其固溶范围为  $6.5 \leq y \leq 7.3$ .

图 5 是所得到的单相  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  化合物磁场取向样品的 X 射线衍射谱和  $x = 1.0, y = 6.5$  混乱取向样品的 X 射线衍射谱. 从图 5 中可以看出, 在磁场取向的  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  样品中, 当  $x = 0.0, y = 4.0$  时 (40-2) 峰十分突出; 当  $x = 0.5, y = 4.0; x = 0.8, y = 5.5$  和  $x = 1.0, y = 6.5$  时, (204) 峰十分突出. 考虑到 3:29 型结构是由  $\text{CaCu}_5$  型结构衍变而来, 晶面指数可以表示为

$$\begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix}_{3:29} = \begin{pmatrix} -2 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix}_{1:5}$$

因而 (40-2) 峰和 (204) 峰分别对应 1:5 型的 (110) 峰和 (002) 峰. 所以 (40-2) 峰突出表明化合物具有易面型磁晶各向异性的, (204) 峰突出表明化合物具有易轴型磁晶各向异性的.

4 结 论

通过 X 射线衍射分析和磁测量研究了 Gd-Fe-Co-Cr 四元系中对应于化学式  $\text{Gd}_3(\text{Fe},\text{Co},\text{Cr})_{29}$  且 Gd 含量为一定值的截面内富 Fe, Co 区的相关系, 研究

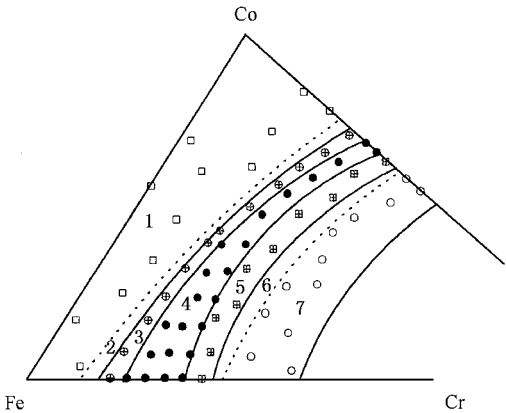


图 3 Gd-Fe-Co-Cr 四元系中对应于化学式  $\text{Gd}_3(\text{Fe},\text{Co},\text{Cr})_{29}$  且 Gd 含量为一定值的截面内富 Fe, Co 区的相关系

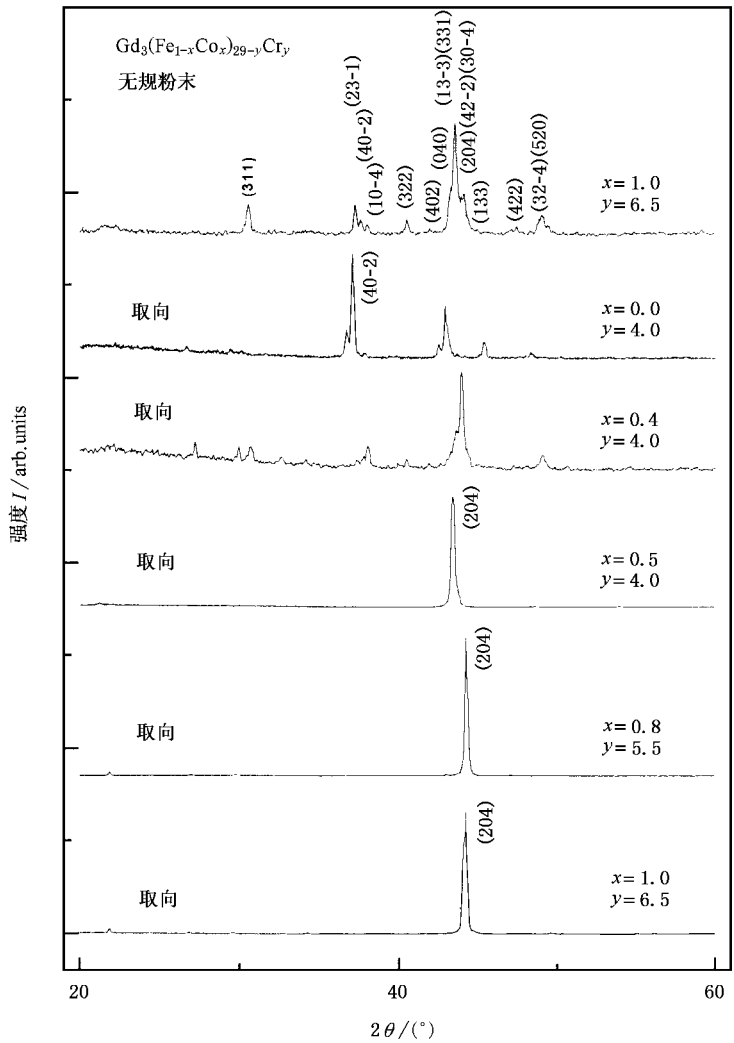


图 5 具不同 Co 含量和 Cr 含量的几个单相  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物的磁场取向样品的 X 射线衍射谱和混乱取向的  $x=1.0, y=6.5$  时样品的 X 射线衍射谱

表明,获得 3:29 型单相  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物的范围为:  $y=5.0 \leq x \leq 0.7$ ;  $y=5.5, 0.7 \leq x \leq 0.8$  和  $y=6.0, 0.8 \leq x \leq 0.9$ . 基于对  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物成相条件的研究,成功地合成了纯 Co 基  $Gd_3Co_{29-y}Cr_y$  化合物,其固溶范围为  $6.5 \leq y \leq 7.3$ . 3:29 型单相  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物的晶体结构都属于单斜晶系,  $Nd_3(Fe, Ti)_{29}$  型结构,空

间群为  $A2/m$ . 得到 3:29 型单相  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物的固溶极限即 Co 含量的极大值和稳定元素 Cr 含量有关. Co 原子的含量越高,所需稳定元素 Cr 的含量越大. 值得注意的是用 Co 原子替代 Fe 原子会导致  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{29-y}Cr_y$  化合物磁晶各向异性的显著改变. 当  $x \geq 0.4$  时,化合物的磁晶各向异性从易面型转变为易轴型.

[1] S. J. Collocott, R. K. Day, J. B. Dunlop, R. L. Davis, Proc. 7th Int. Symp. on Magnetic Anisotropy and Coercivity in Rare-Earth-Transition Metal Alloy (Canberra, 1992), pp. 437-444.

[2] F. M. Yang, B. Nasunijleg, J. L. Wang, H. Y. Pan, W. D. Qin, R. W. Zhao, B. P. Hu, Y. Z. Wang, G. C. Liu, H. S. Li, J. M. Cadogan, J. Appl. Phys., **76**(1994), 1973.

[ 3 ] B. P. Hu , G. C. Liu , Y. Z. Wang , B. Nasunjilegal , N. Tang , F. M. Yang , H. S. Li , J. M. Cadogan , *J. Phys. Condens. Matter* , **6**( 1994 ) , 1595 .

[ 4 ] J. M. D. Coey , H. S. Li , In Handbook of Magnetic Materials , Vol. **6** , ed. K. H. J. Buschow ( North Holland , Amseerdam 1991 ) .

[ 5 ] J. L. Wang , F. M. Yang , N. Tang , X. F. Han , D. Yang , *Acta Phys. Sin.* , **47**( 1998 ) , 990 ( in Chinese ) [ 王建立、杨伏明、唐 宁、韩秀峰、阳 东 , 物理学报 **47**( 1998 ) , 990 ] .

[ 6 ] J. J. M. Franse , R. J. Radwanski , In Handbook of Magnetic Materials , Vol. **7** , ed. K. H. J. Buschow ( North Holland , Amseerdam , 1993 ) .

[ 7 ] L. G. Zhang , B. G. Shen , S. Y. Zhang , H. W. Zhang , *Acta Phys. Sin.* , **47**( 1998 ) , 817 ( in Chinese ) [ 张立刚、沈保根、张绍英、张宏伟 , 物理学报 , **47**( 1998 ) , 817 ] .

[ 8 ] Z. G. Sun , H. W. Zhang , J. Y. Wang , B. G. Shen , *Appl. Phys. Lett.* , **75**( 1999 ) , 3850 .

[ 9 ] D. Yang , J. L. Wang , N. Tang , Y. P. Shen , F. M. Yang , *Acta Phys. Sin.* , **48S**( 1999 ) , 80 ( in Chinese ) [ 阳 东、王建立、唐 宁、沈宇平、杨伏明 , 物理学报 , **48S**( 1999 ) , 80 ] .

[ 10 ] X. S. Lu , Phase Diagram and Phase Transition ( Science Press , Beijing , 1990 ) , p. 145 ( in Chinese ) [ 陆学善 , 相图与相变 ( 科学出版社 北京 , 1990 ) 第 145 页 ] .

[ 11 ] J. K. Liang , Phase Diagram and Phase Structure ( Science Press , Beijing , 1993 ) , p. 438 ( in Chinese ) [ 梁敬魁 , 相图与相结构 ( 科学出版社 北京 , 1993 ) 第 438 页 ] .

[ 12 ] J. M. Cadogan , H. S. Li , A. Margarian , J. B. Dunlop , D. H. Ryan , S. J. Collocott , R. L. Davis , *J. Appl. Phys.* , **75**( 1994 ) , 6138 .

[ 13 ] B. P. Hu , H. S. Li , J. P. Gavigan , J. M. D. Coey , *J. Phys. : Condens. Matter* , **1**( 1990 ) , 755 .

[ 14 ] F. Huang , J. K. Liang , Q. L. L. Liu , X. L. Chen , G. Y. Huo , *J. Appl. Phys.* , **85**( 1999 ) , 6686 .

FORMATION AND STRUCTURE OF 3:29-TYPE  
 $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  COMPOUNDS\*

WANG WEN-QUAN<sup>1,2)</sup> WANG JIAN-LI<sup>1)</sup> TANG NING<sup>1)</sup> BAO FU-QUAN<sup>1)</sup>

WU GUANG-HENG<sup>1)</sup> YANG FU-MING<sup>1)</sup> JIN HAN-MIN<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> State Key Laboratory of Magnetism , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

<sup>2)</sup> Department of Physics , Jilin University , Changchun 130023 , China )

( Received 2 March 2001 )

ABSTRACT

Based on a study of the phase relation in the Fe- and Co-rich region of the equi-gadolinium content section with the Gd content corresponding to the chemical formula  $\text{Gd}_3(\text{Fe},\text{Co},\text{Cr})_{29}$  in the Gd-Fe-Co-Cr quaternary system , formation , structure and magnetic properties of the 3:29-type  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  compounds have been investigated. It has been found that the composition range of formation of the single phase  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  Compounds is  $0 \leq x \leq 0.7$  for  $y = 5.0$  ,  $0.7 \leq x \leq 0.8$  for  $y = 5.5$  , and  $0.8 \leq x \leq 1.0$  for  $y = 6.0$  . A pure Co-based  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-x}\text{Cr}_x$  compound series have been synthesized. The solubility limit of the Cr atoms in the  $\text{Gd}_3\text{Co}_{29-x}\text{Cr}_x$  compounds was found to be from  $x = 6.5$  to  $x = 7.3$  . The results indicate that all the synthesized  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  compounds crystallize in  $\text{Nd}_3(\text{Fe},\text{Ti})_{29}$ -type structure of the monoclinic system and the space group  $A2/m$  . The solubility limit of Co atoms in the  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  compounds increases with increasing the stabilizing element Cr. It is noteworthy that substitution of Co for Fe leads to a remarkable change of the magnetocrystalline anisotropy of the  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  compounds. When  $x \geq 0.4$  the anisotropy changes from the easy plane type to the uni-axial type , which is important for permanent magnet application.

**Keywords :**  $\text{Gd}_3(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{29-y}\text{Cr}_y$  compounds , phase relation and structure , X-ray diffraction , magnetocrystalline anisotropy

**PACC :** 6110 , 8236B , 7530G , 7530K

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No.58971061 ) .