

# Sm-Co-Ti 三元系相关关系及某些单相化合物的结构与磁性\*

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)

(2000 年 9 月 18 日收到,2000 年 11 月 10 日收到修改稿)

通过 X 射线衍射和磁性测量研究了 Sm-Co-Ti 三元体系富 Co 区固相线下的相关关系,并探索了 Co 基 3:29 型化合物存在的可能性,进而研究了某些单相化合物的结构和磁性.实验表明,该体系中存在三个三元化合物  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$ , 其固溶区分别为  $0.32 \leq x \leq 0.54$ ,  $0 \leq x \leq 1.13$  和  $1.45 \leq x \leq 1.95$ . 按  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) 成分配料, Sm 按其质量的 15%、20%、25% 三个比例过量加入,在 1303—1403K 温度范围内退火,均未发现 3:29 相.在制备出的  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  两个系列化合物中,随着 Ti 含量的增加,它们的居里温度和饱和磁化强度都单调降低.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  化合物在居里温度以下表现为单轴各向异性,而  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物表现为面各向异性.  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  化合物 1.5K 下的磁晶各向异性场随 Ti 含量的变化都呈现一个极大值,这可能与 Ti 原子的择优占位有关.

关键词:稀土过渡族化合物, X 射线衍射, 相图, 磁晶各向异性

PACC: 6110, 7530G, 8130B, 7530K

## 1 引 言

Nd-Fe-B 永磁材料的问世<sup>[1]</sup>推动了人们对富 Fe 的稀土永磁材料的研究.一个时期以来,对新型稀土(R)-过渡族(T)金属间化合物永磁材料的探索,主要集中在稀土铁基 1:12<sup>[2,3]</sup>, 2:17<sup>[4,5]</sup>和 3:29<sup>[6,7]</sup>型化合物上.1994 年杨伏明等<sup>[8]</sup>在国际上首次报道了  $\text{Sm}_3(\text{FeTi})_{29}\text{N}_4$  化合物具有高居里温度和高饱和磁化强度,且在室温下具有很强的单轴各向异性,显示出优异的内禀永磁特性.但是和所有的间隙型化合物一样,  $\text{Sm}_3(\text{FeTi})_{29}\text{N}_4$  化合物的热稳定性差,使其应用受到限制.因此寻找具有室温单轴各向异性,高居里温度和高饱和磁化强度的非间隙型高性能稀土永磁材料一直成为稀土永磁材料研究的热点.到目前为止,关于 Co 基 1:12, 2:17 及 1:5 型化合物的研究比较多,可是 Co 基 3:29 型稀土过渡族金属间化合物还未见文献报道.最近,阳东等<sup>[9]</sup>以 Co 替代  $\text{Gd}_3(\text{FeCr})_{29}$  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.但是由于 Gd 与 Co 磁矩之间的亚铁磁耦合使化合物饱和磁矩不高,难于得到实际应用.为了探索 Co 基 3:29 型化合物存在的可能性,我们选取 Sm-Co-Ti 三元体系,对其在富 Co 区固相线下的相关关系进行了研究.

## 2 实 验

制备 Sm-Co-Ti 合金所使用的金属 Sm, Co 和 Ti 的纯度均为 99.9%. 按名义成分  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) 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.由于 Sm 易挥发,实际中按其质量的 (15—25)% 过量加入.一般情况下,熔炼后的样品失重不超过 2%. 将熔炼好的合金锭子在高纯氩气保护下分别于 1303, 1323, 1343, 1353, 1363, 1383,

\* 国家自然科学基金(批准号 58971061)资助的课题.

1403K 等温度下退火 24h, 然后水淬. 对 X 射线衍射谱进行分析, 在确认出现  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物后, 再按名义成分  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$  ( $0.25 \leq x \leq 0.7$ ),  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  ( $0 \leq x \leq 1.5$ ) 和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  ( $1.37 \leq x \leq 2.12$ ) 配料, 重复上面实验以确定各单相化合物的固溶范围.

利用 X 射线粉末衍射和热磁曲线 (磁场约为 50 mT) 研究样品的相组成和晶体结构. 将磁性上为单相的样品在石油醚保护下粉碎成颗粒度约为  $30\mu\text{m}$  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 1T 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. 用振动样品磁强计测量化合物在低场下的磁化强度  $M$  与温度  $T$  的依赖关系, 作出  $M^2-T$  曲线并将  $M^2$  外推到零, 以得到样品的居里温度  $T_C$ . 用提拉样品磁强计测量样品在 1.5 K 下的磁化曲线, 通过作出  $M-B^{-1}$  曲线并将  $B^{-1}$  外推到零得到饱和磁化强度  $M_s$ . 利用易向和难向磁化曲线相交的方法得到磁晶各向异性场  $\mu_0 H_a$ .

## 3 结果与讨论

### 3.1 Sm-Co-Ti 三元体系富 Co 区固相线下的关系

由样品的 X 射线衍射谱和热磁曲线测定的 Sm-Co-Ti 三元体系富 Co 区固相线下的关系见图 1 和表 1. 该体系中存在三个三元化合物  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$ . 在所研究范围内分为 6 个两相区, 4 个三相区和三个单相固溶区.  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$  固溶区范围为  $0.32 \leq x \leq 0.54$ , 属六角晶系,  $\text{TbCu}_7$  型结构, 点阵常量  $a = 0.4852-0.4855\text{nm}$ ,  $c = 0.4088-0.4092\text{nm}$ .  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  固溶区范围为  $0 \leq x \leq 1.13$ , 属菱形晶系,  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构, 空间群为  $R\bar{3}m$ , 点阵常量  $a = 0.8391-0.8441\text{nm}$ ,  $c = 1.2214-1.2282\text{nm}$ .  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  固溶区范围为  $1.45 \leq x \leq 1.95$ , 属四方晶系,  $\text{ThMn}_{12}$  型结构, 空间群为  $I4/mmm$ , 点阵常量为  $a = 0.8426-0.8446\text{nm}$ ,  $c = 0.4741-0.4751\text{nm}$ . 单相化合物的固溶区范围是用晶格常量随成分的变化关系曲线确定的. 作为一个例子, 图 2 给出了具  $\text{ThMn}_{12}$  型结构的  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物的晶格常量随 Ti 含量  $x$  的变化曲线.

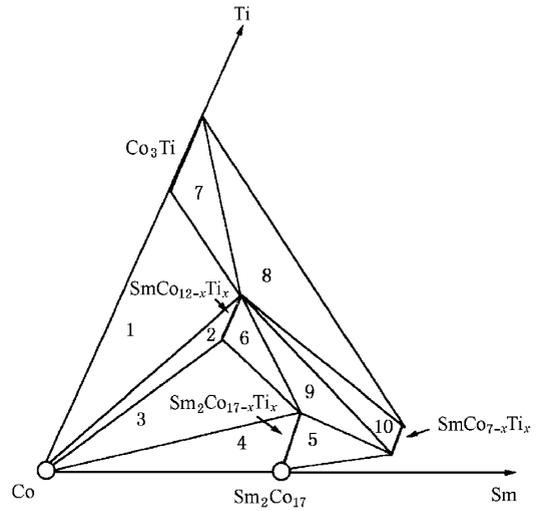


图 1 Sm-Co-Ti 三元体系富 Co 区固相线下的关系

表 1 Sm-Co-Ti 三元体系富 Co 区固相线下的关系

区域	相组成	区域	相组成
1	1:12 + $\text{Co}_3\text{Ti}$ + Co	6	2:17 + 1:12
2	1:12 + Co	7	1:12 + $\text{Co}_3\text{Ti}$
3	1:12 + 2:17 + Co	8	1:12 + 1:7 + $\text{Co}_3\text{Ti}$
4	2:17 + Co	9	1:12 + 2:17 + 1:7
5	1:7 + 2:17	10	1:12 + 1:7

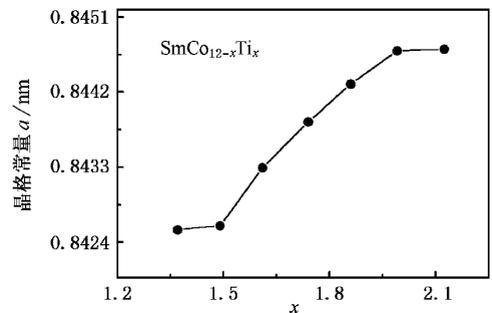


图 2 具  $\text{ThMn}_{12}$  型结构的  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物的晶格常量随 Ti 含量  $x$  的变化

1:7 相, 2:17 相和 1:12 相结构都是从具  $\text{CaCu}_5$  结构的  $\text{SmCo}_5$  相中通过部分 Sm 原子被 Co 原子对替代演变而成, 不同之处在于其中 Sm 原子被替代的比例不同. 另外, 具有  $\text{ThMn}_{12}$  和  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构化合物中的 Co 哑铃对原子替代是有序的, 而具有  $\text{TbCu}_7$  结构化合物中 Co 哑铃对原子的替代是无序的<sup>[10]</sup>.

在 Sm-Co-Ti 所构成的三元体系中, 为了探索 3:29 相存在的可能性, 我们按  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  ( $3 \leq$

$x \leq 15$ ) 成分配料, 考虑到 Fe 基 3:29 型为高温稳定相, 并且在  $Gd_3(Fe_{1-x}Co_x)_{25}Cr_4$  化合物中当  $x = 0.6$  时退火温度为 1380K 左右, 所以退火温度取在 1303 和 1403K 之间. 采用 X 射线粉末衍射及热磁曲线分析合金的相组成.

X 射线衍射和热磁分析研究表明,  $Sm_{9.31}Co_{90-x}Ti_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) 样品在 1303 和 1323K 之间温度退火 24h 的条件下, 当 Ti 含量  $x < 5$  时出现 1:7 单相, 当 Ti 含量为  $5 \leq x < 12$  时, 出现 1:7 和 1:12 两相共存, 当 Ti 含量  $x \geq 12$  时, 出现 1:12 单相. 图 3(a) 给

出了样品在 1303K 退火时, 具有不同 Ti 含量的几个  $Sm_{9.31}Co_{90-x}Ti_x$  样品的热磁曲线. 可以看出, 随着 Ti 含量的增加, 1:7 相化合物含量逐步减少, 而 1:12 相化合物含量逐渐增加. 从图 3(a) 还可以看出, 1:12 相的居里温度比 1:7 相的居里温度低, 这一点与 Fe 基化合物中的情况正好相反, 如在  $SmFe_{11}Ti$  化合物中 1:12 相的居里温度为 593K, 而 1:7 相的居里温度只有 515K<sup>[11]</sup>. 图 3(b) 给出了与热磁曲线对应的这些化合物的 X 射线粉末衍射谱. 在此热处理条件下, Ti 含量从 3 增加到 15, 未发现 3:29 相.

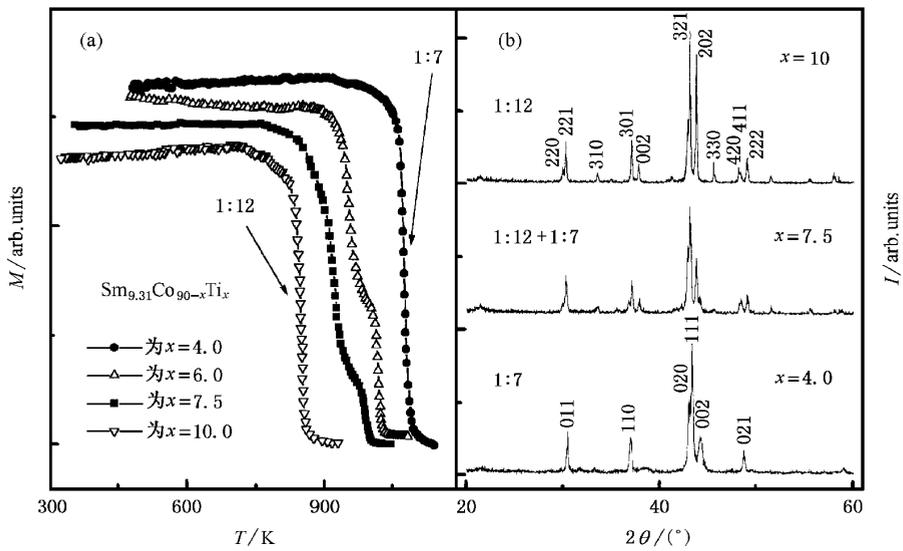


图 3  $Sm_{9.31}Co_{90-x}Ti_x$  三元系样品 (退火温度  $T^a = 1303K$ ) 低场下的热磁曲线 (a) 和 X 射线粉末衍射谱 (b)

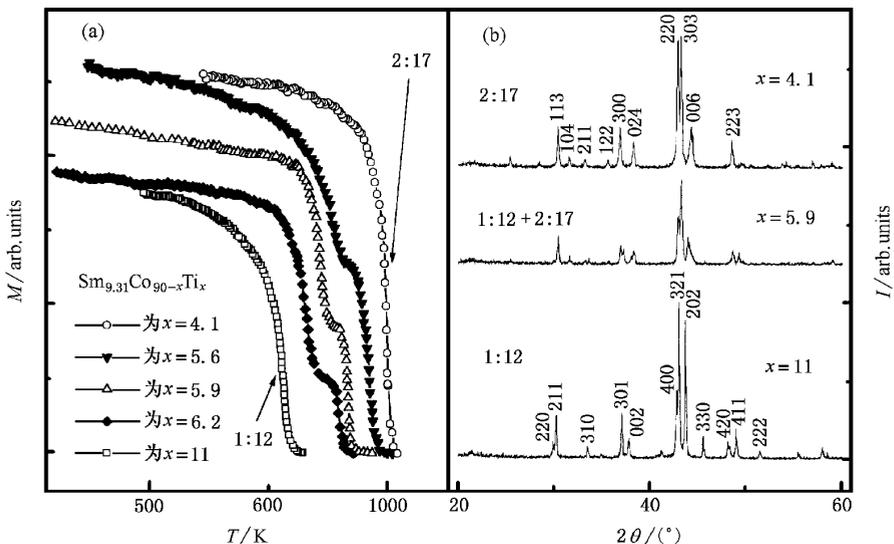


图 4  $Sm_{9.31}Co_{90-x}Ti_x$  三元系样品 (退火温度  $T^a = 1353K$ ) 低场下的热磁曲线 (a) 和 X 射线粉末衍射谱 (b)

将  $Sm_{9.31}Co_{90-x}Ti_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) 样品的退火温

度提高到 1343, 1353 和 1363K, 退火时间不变发现,

Ti 含量  $x < 5$  时出现 2:17 单相 ( $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  型结构), 随着 Ti 含量的增加, 当  $x \geq 5$  时 2:17 和 1:12 两相共存. 当 Ti 含量进一步增加到 11 附近时, 出现 1:12 单相. 图 4(a) 给出了在 1353K 退火时, 具有不同 Ti 含量的几个  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  样品的热磁曲线. 值得注意的是在两相共存的情况下, 1:12 相的居里温度比 2:17 相的居里温度低, 这一点与 Fe 基情况正好相反<sup>[12]</sup>. 图 4(b) 给出了与热磁曲线对应的这些样品的 X 射线粉末衍射谱. 在上述热处理条件下, Ti 含量从 3 增加到 15, 未发现 3:29 相.

进一步提高  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) 样品

的退火温度到 1383 和 1403K, 退火时间仍为 24h, 发现当 Ti 含量  $x < 5$  时出现 2:17 单相, 和退火温度为 1343, 1353 和 1363K 所不同的是 2:17 单相为  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  型结构. 随着 Ti 含量的增加, 当  $x \geq 5$  时 2:17 和 1:12 两相共存. 在 Ti 含量增加到 11 附近时, 出现 1:12 单相. 图 5(a) 给出了在 1403K 退火温度时, 具有不同 Ti 含量的几个  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  样品的热磁曲线. 图 5(b) 给出了与热磁曲线对应的这些样品的 X 射线粉末衍射谱. 在此热处理条件下, Ti 含量从 3 增加到 15, 仍未发现 3:29 相.

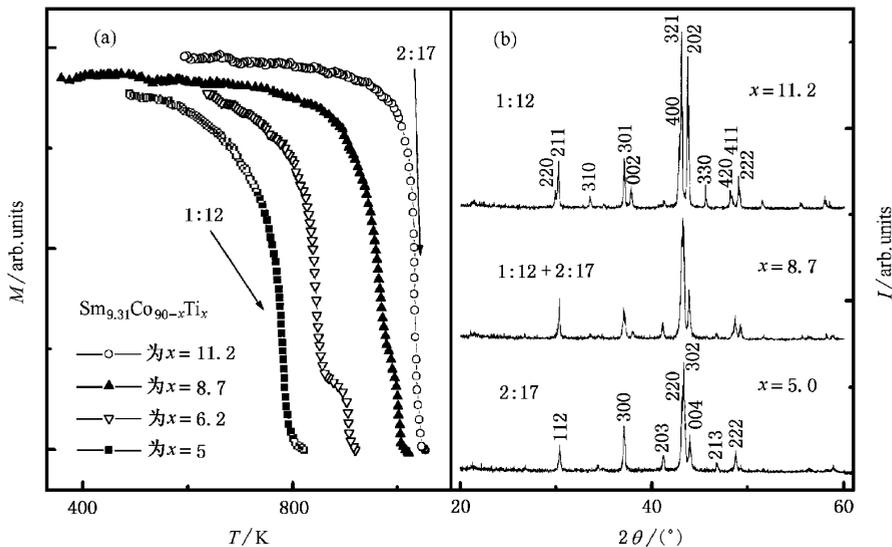


图 5  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  三元系样品 (退火温度  $T^a = 1403\text{K}$ ) 低场下的热磁曲线 (a) 和 X 射线粉末衍射谱 (b)

为了研究  $\text{Sm}_{9.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  三元体系在富 Co 区和 Sm 含量及快淬速度的依赖关系, 我们把 Sm 按 15%、20%、25% 三个比例过量加入, 采取水冷和气冷两种快淬方式, 重复上面的实验. 实验结果表明, 改变 Sm 含量及淬火速度仍未发现 3:29 相.

### 3.2 单相化合物的结构与磁性研究

表 2 是制备出的两个单相系列化合物  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  的结构和磁参量. 随着 Ti 含量的增加, 两个系列化合物晶格都发生了膨胀, 它们的居里温度和饱和磁矩都单调降低. 通过室温下磁场取向样品的 X 射线衍射谱并结合沿着磁场取向方向和垂直于磁场取向方向的磁化曲线可以确定化合物的磁晶各向异性. 如果化合物室温下具

有单轴各向异性, 则室温下取向样品 X 射线衍射谱上的 001 峰会有显著增强; 而如果化合物具有室温面各向异性, 则室温下取向样品 X 射线衍射谱上的  $hk0$  峰则显著增强, 而 001 峰会显著减弱或消失. 我们的实验结果表明,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  化合物在居里温度以下表现为单轴各向异性; 而  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物为面各向异性. 它们的磁晶各向异性场都随 Ti 含量的增加而增大, 在某一 Ti 含量处达到极大值, 然后随 Ti 含量的进一步增加而减小.

我们知道, 在 R-Co 基化合物中 Co 磁矩之间的交换作用都是铁磁的, 而相应的在一些 R-Fe 基化合物中则存在着反铁磁交换作用, 反铁磁交换作用会显著降低居里温度, 从而导致一些 R-Fe 基化合物的居里点比较低, 如  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  化合物<sup>[13]</sup>. 在  $\text{R}_2\text{Co}_{17}$

化合物中由于不存在 Co-Co 之间的反铁磁交换作用, 所以用 Ti 来替代  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  中的 Co 减少了磁性离子的数目, 引起了总的交换作用的降低, 从而降低了居里温度. 对  $\text{Y}_2\text{Co}_{17}$  化合物的核磁共振研究表明<sup>[14]</sup>, 在 Co 次晶格中 18f 位的 Co 原子对各向异性

的贡献是正的, 6c, 9d 和 18h 位的贡献是负的, 可见不同晶位对各向异性的贡献明显不同, 上述两个系列中磁晶各向异性场与 Ti 含量的关系出现极大值可能与 Ti 原子的择优占位有关.

表 2  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  两个系列化合物的结构与磁参量

	晶体结构	$a/\text{nm}$	$c/\text{nm}$	$v/\text{nm}^3$	$M_s(1.5\text{K})$ ( $\mu_B/\text{f.u.}$ )	$T_C/\text{K}$	$\mu_0 H_a/\text{T}$	EMD	$T^*/\text{K}$
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$									
$x=0.00$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8391	1.2214	0.7447	23.7	1193	—	单轴	1353
$x=0.55$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8421	1.2242	0.7519	23.5	1095	17.9	单轴	1353
$x=0.70$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8421	1.2550	0.7526	23.2	1068	19.9	单轴	1353
$x=0.85$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8429	1.2265	0.7547	22.9	1029	20.7	单轴	1353
$x=1.00$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8427	1.2273	0.7547	22.7	996	21.7	单轴	1353
$x=1.13$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8441	1.2282	0.7578	22.3	956	20.8	单轴	1353
$x=0.94$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8336	0.8236	0.7525	22.7	1024	19.0	单轴	1403
$x=1.00$	$\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	0.8336	0.8243	0.7531	—	1006	—	单轴	1403
$\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$									
$x=1.49$	$\text{ThMn}_{12}$	0.8426	0.4741	0.3366	12.4	792	25.3	平面	1403
$x=1.61$	$\text{ThMn}_{12}$	0.8433	0.4746	0.3375	11.9	748	26.0	平面	1403
$x=1.74$	$\text{ThMn}_{12}$	0.8438	0.4748	0.3380	11.2	699	27.3	平面	1403
$x=1.86$	$\text{ThMn}_{12}$	0.8443	0.4750	0.3386	10.5	656	28.4	平面	1403
$x=1.95$	$\text{ThMn}_{12}$	0.8447	0.4752	0.3389	9.7	607	26.1	平面	1403

注: EMD 表示室温下的易磁化方向

## 4 结 论

为了探索 Co 基 3:29 型稀土过渡族金属间化合物存在的可能性, 本文详细研究了 Sm-Co-Ti 三元系在富 Co 区固相线下的相关关系, 结果表明在该体系中存在三个三元化合物  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$ , 其固溶区分别为  $0.32 \leq x \leq 0.54$ ,  $0 \leq x \leq 1.13$  和  $1.45 \leq x \leq 1.95$ . 按  $\text{Sm}_{0.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  成分配料, 在 1303—1403K 温度范围内退火 24h, 并按 Sm 重量的 15%, 20%, 25% 三个比

例过量加入 Sm 和改变淬火速度, 均未发现 3:29 相存在.

在制备出的  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  二个系列化合物中, 随着 Ti 含量的增加, 它们的居里温度和饱和磁化强度都单调降低.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  化合物在居里温度以下表现为单轴各向异性, 而  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  化合物为面各向异性.  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  和  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  化合物中的磁晶各向异性场与 Ti 含量的关系都出现一个极大值, 这可能与 Ti 原子的择优占位有关.

感谢刘泉林博士的有益讨论.

[1] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, Y. Matsuura, *J. Appl. Phys.* **55** (1984) 2083.

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

[3] 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.]

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

[5] 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.]
- [6] S. J. Collocott, R. K. Dog, J. B. Dunlop, K. L. Davis, Proceedings of the seventh Int. Symp. on Magnetic Anisotropy and Coactivity in Rare Earth Transition Metal Alloys (Canberra, July 1992), pp. 437—444.
- [7] X. F. Han, Y. D. Zan, Q. Y. Wang, J. Wang, *Acta Phys. Sin.*, (*Overseas Edition*) **7**(1998) 38.
- [8] F. M. Yang, B. Nasunjilegal, J. L. Wang, H. Y. Pan, W. D. Qin, R. W. Zhao, B. P. Hu, Y. Z. Wang, C. C. Liu, H. S. Li, J. M. Cadogan *J. Appl. Phys.* **76**(1994), 1971.
- [9] D. Yang, J. L. Wang, N. Tang, Y. P. Shen, F. M. Yang, *Acta Phys. Sin.* **48**(1999) 80 [in Chinese] 阳东、王建立、唐宁、沈宇平、杨伏明 *物理学报* **48**(1999) 80.]
- [10] K. H. J. Buschow, A. S. Van der Goot, *Acta Cryst.*, **B27**(1971), 1085.
- [11] H. Saito, M. Takahashi, T. Wakiyama, *J. Appl. Phys.*, **64**(1988) 5965.
- [12] B. P. Hu, H. S. Li, J. M. D. Coey, *J. Appl. Phys.*, **67**(1990), 4838.
- [13] D. Zhang, Ph. D. Thesis (Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 1997) [张丹, 博士学位论文 (中国科学院沈阳金属所, 1997)].
- [14] R. L. Streever, *Phys. Rev.* **B19**(1979) 2704.

## Sm-Co-Ti PHASE DIAGRAM AND STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOME SINGLE-PHASE COMPOUNDS\*

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

WU GUANG-HENG<sup>a)</sup> YANG FU-MING<sup>a)</sup> JIN HAN-MIN<sup>b)</sup>

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

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

(Received 18 September 2000; revised manuscript received 10 November 2000)

### ABSTRACT

The phase diagram of Co-rich Sm-Co-Ti system was obtained by X-ray diffraction analysis and magnetic measurement. It was found that there exist three series of compounds,  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Ti}_x$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  and  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$ . The formation ranges for these three series are  $0.32 \leq x \leq 0.54$ ,  $0 \leq x \leq 1.13$  and  $1.45 \leq x \leq 1.95$ , respectively. The 3:29 phase was not found after annealing  $\text{Sm}_{0.31}\text{Co}_{90-x}\text{Ti}_x$  ( $3 \leq x \leq 15$ ) prepared with an excess Sm of 15%, 20% and 25% added, at temperatures ranging from 1303 to 1403 K. It was also found that the Curie temperatures  $T_C$  and saturation magnetization  $M_s$  decrease with increasing Ti content for both  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  and  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  compounds. Below  $T_C$ , the uniaxial and planar anisotropies were observed for  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  and  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  compounds, respectively. The anisotropy fields  $B_a$  measured at 1.5 K for both  $\text{SmCo}_{12-x}\text{Ti}_x$  and  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  compounds as a function of Ti content  $x$  exhibits a peak at certain compositions, which is thought to be associated with the preferential substitution of Ti for Co.

**Keywords**: magnetic anisotropy, phase diagrams, X-ray diffraction, rare-earth transition-metal compounds

**PACC**: 6110, 7530G, 8130B, 7530K

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