



$R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 金属间化合物的 成相、结构和内禀磁性

Formation, Structure and Intrinsic Magnetic Properties
of the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ Intermetallic Compounds

潘洪革



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



$R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 金属间化合物的 成相、结构和内禀磁性

Formation, Structure and Intrinsic Magnetic Properties
of the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ Intermetallic Compounds

潘洪革



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书在全面评述永磁材料研究状况的基础上,对新型 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的成相、结构和内禀磁性进行了详细的研究. 全书内容包括绪论、磁学基本理论、实验方法、 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的成相条件、 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的结构特性、 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的内禀磁性、 $R_3(Fe, Mo)_{29-N_x}$ 化合物的内禀磁性等.

图书在版编目(CIP)数据

$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的成相、结构和内禀磁性/潘洪革. —北京:高等教育出版社, 2002. 11

ISBN 7-04-011354-6

I. R... II. 潘... III. 有机金属化合物—研究
IV. 0627

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 066793 号

$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的成相、结构和内禀磁性
潘洪革

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn

经 销	新华书店北京发行所
排 版	高等教育出版社排版中心
印 刷	高等教育出版社印刷厂

开 本	850×1168 1/32	版 次	2002 年 11 月第 1 版
印 张	6.5	印 次	2002 年 11 月第 1 次印刷
字 数	160 000	定 价	10.90 元
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换.

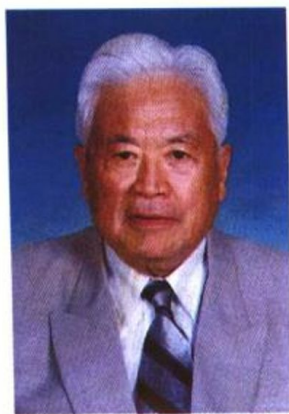
版权所有 侵权必究

作者简介



潘洪革,男,1968年1月生,研究员,博士生导师。1986年9月考入西安理工大学材料系攻读学士学位,1990年7月免试推荐为西安理工大学材料系硕士研究生,1993年3月考入浙江大学金属材料及热处理专业攻读博士学位,为浙江大学与中国科学院物理研究所联合培养的博士生。1996年博士毕业后留浙江大学材料系新材料及材料物理研究所从事贮氢材料、贮氢电极合金和镍金属氢化物(Ni/MH)二次电池的研究开发工作以及新型稀土永磁材料、燃料电池的基础理论研究。1997年10月特批晋升为副研究员,1999年12月特批晋升为研究员,2000年被批准为博士生导师。1996年以来,在 *Electrochimica Acta*, *Phys. Review B*, *Journal of Physics: Condensed Matter* 等国外期刊和《物理学报》、《金属学报》等国内期刊上发表研究论文近60篇,SCI收录论文49篇,其中第一作者论文收录23篇;SCI引用67次,其中第一作者论文被引用35次。

导师简介



王启东,男,1921年9月出生于江苏南京,浙江大学材料科学与工程系教授。1943年毕业于浙江大学,获机械工程学士学位,1948年获美国斯坦福大学工学硕士学位,1951年获美国爱荷华大学博士学位,1951年起在浙江大学任教,曾在机械系教授《传热学》、《产品检验与质量控制》、《机械设计与焊接学》等课程。1953年起先后负责筹建铸工教研组、矿冶系、冶金系及材料科学与工程系,先后任机械系副主任,冶金系主任、材料系主任、副校长、校学位委员会主任等职务;并先后兼任浙江省政协第三届委员,浙江省人大常委会第五、六、七、八届副主任,浙江省人大常委会教科文卫委员会主任,全国人大第八届常委会委员,浙江省科协第五届主席,中国能源研究会氢能专业委员会副主任,浙江省金属学会理事长,国际氢能协会材料组常务理事等职。

研究方向涉及冶金炉及金属材料与热加工工艺两个学科,先后在冲天炉强化、铸造高速钢及其刀具、储氢金属材料及其应用三方面开展工作。他所提出的“用冲天炉网状特性曲线比较各种强化措施”对澄清与规范当时强化冲天炉的措施混乱、评价不一的状况起到积极与规范化作用。研究的钨当量为11的铸造高速钢与制作铸造刀具的工艺为多家工厂所采用,并获得浙江省科技进步二等奖两次。与同仁一同发明与开发的富钨混合稀土——镍氢储氢合金系列分别适用于氯化物的回收、储存、净化、压缩、制冷与空调及电化学应用等方面以及在氯化物的净化与压缩等方面设计开发的新装备均属首创,共获八项发明专利,获国家发明四等奖一次,浙江省科技进步二等奖两次,三等奖两次。在储氢金属材料及其应用方面先后发表论文180余篇。

摘 要

本论文在全面评述永磁材料研究状况的基础上,对新型 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的成相、结构和内禀磁性进行了详细的研究. 其主要研究内容包括:

1. Mo 作为稳定元素用来稳定 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的可行性, 并确定其化学成分和热处理工艺.

2. 寻找一种比较简捷的用来制备 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的方法.

3. 在 $R(Fe, Mo)_{12}$ 和 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物中, 对于不同的稳定元素 Mo, 其所需要的最低含量不同的原因.

4. $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的结构特性和内禀磁性.

5. $R_3(Fe, Mo)_{29}N_x$ 化合物的结构和内禀磁性.

6. Ga 取代 $R(Fe, Mo)_{12}$ 和 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物中的部分 Fe 对其结构和内禀磁性的影响.

本文中, 首次在国际上成功地使用电弧炉熔炼制备出单相 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ ($R = Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Y$) 金属间化合物. 单相 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的制备成功, 为研究 Mo 作为稳定元素所形成的 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的基本内禀磁性、相结构、磁结构等奠定了基础, 特别是首次在国际上合成单相 $Y_3(Fe, M)_{29}$ 化合物, 对于研究次晶格铁的磁性、次晶格稀土 R 的磁性行为具有极其重要的理论价值. 研究结果表明: 用 Mo 稳定 3:29 化合物所需要的 Mo 含量略低于用 Ti 稳定 3:29 化合物所需要的 Ti 含量; 在研究 Mo 对 2:17 相居里温度 T_C 的影响的基础上, 确定了制备单相 $R_3(Fe_{1-x}, Mo_x)_{29}$ 化合物所需稳定元素 Mo 的含量 x , 从而大大降低了 3:29

化合物制备过程中的工作量,避免了以前制备 3:29 化合物时所出现的“大海捞针”似的情形.另外本文还使用电子浓度的有关理论成功地解释了 3:29 及 1:12 化合物中稳定元素的作用,以及不同的稳定元素在 1:12 及 3:29 结构中的最低含量不同的原因.

精修 X 射线衍射谱和中子射线衍射谱的研究分析结果表明: $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 化合物属 $A_{2/m}$ 空间群;3:29 结构是 1:12 和 2:17 结构的混合物,由 1:12 和 2:17 结构的原子坐标向 3:29 结构的原子坐标的转换关系可分别用以下方程:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{5}y - \frac{2}{5}z \\ -x \\ \frac{4}{5}y + \frac{1}{5}z \end{pmatrix}$$

和

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{5}x + \frac{3}{5}y + \frac{2}{5}z - \frac{1}{10} \\ -\frac{1}{2}x - \frac{1}{2}y \\ \frac{3}{10}x - \frac{3}{10}y + \frac{4}{5}z - \frac{1}{5} \\ 1 \end{pmatrix}$$

来表示.

$R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 金属间化合物的居里温度和饱和磁化强度介于 1:12 和 2:17 化合物之间.取向 X 射线衍射谱的结果表明: $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 金属间化合物均为面各向异性. $\text{Nd}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 化合物在 230 K 左右存在自旋重取现象.

$R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 化合物吸氮后可显著提高 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 化合物的居里温度 T_C 及饱和磁化强度 M_s , 其提高率分别为 71% 和 24%; $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ 化合物中 Fe 次晶格的平均磁矩由 $1.80\mu_B$ 提高到 $2.04\mu_B$. 在 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ 化合物中, Fe 次晶格为面各向

异性, $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ 化合物为单轴各向异性, 其易磁化方向为 $[102]$, 其余均为面各向异性; $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ 化合物在 4.2 K 时的内禀磁性为: $M_s = 152 \text{ Am}^2/\text{kg}$, $T_C = 704 \text{ K}$, $B_s = 20.5 \text{ T}$, 具有用作永磁体的前景.

Ga 在 $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{1.3}\text{Ga}_x$ ($x \leq 2.0$) 化合物中占据 8j 和 8f 晶位. 在此化合物中, Ga 增大晶胞体积, 降低居里温度, 减小饱和磁化强度, 降低 Fe 原子的平均磁矩; 随 Ga 含量的提高, $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{1.3}\text{Ga}_x$ 化合物由单轴向锥面各向异性转变. 在 $\text{R}_3(\text{Fe}, \text{Mo}, \text{Ga})_{29}$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{Sm}$) 化合物中, 随着 Ga 含量的增加, 晶胞体积膨胀, 居里温度升高 ($\text{Ga} < 0.15$), 饱和磁化强度下降, Fe 原子的平均磁矩降低, $\text{Sm}_3(\text{Fe}_{0.966-x}\text{Mo}_{0.034}\text{Ga}_x)_{29}$ 化合物的各向异性由平面向锥面结构转变, 继续增加 Ga 含量, 有可能出现单轴各向异性.

关键词: 稀土-过渡族金属间化合物; 相结构; 居里温度; 磁化强度; 磁晶各向异性

Abstract

In this thesis, the formation, structure, and intrinsic properties of $R_3(Fe, Mo)_{29}$ ($R = Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy$ and Y) compounds have been systematically studied based on the review of the research and development of permanent magnetic materials. The main contents are as follows:

1. Whether Mo can be used as a kind of stabilizing element to stabilize the 3:29 compounds, if so, what are the contents of Mo and the annealing temperatures.

2. Whether a simpler method to prepare the single phase $R_3(Fe, Mo)_{29}$ can be found.

3. Why the lowest content of stabilizing element M is different for a different stabilizing element M in $R(Fe, M)_{12}$ or $R_3(Fe, M)_{29}$ compounds.

4. The structure and intrinsic magnetic properties of $R_3(Fe, Mo)_{29}$ intermetallic compounds.

5. The structure and intrinsic magnetic properties of $R_3(Fe, Mo)_{29}N_x$ compound.

6. The effects of partial substitution of Ga for Fe on the structure and magnetic properties in $R(Fe, Mo)_{12}$ or $R_3(Fe, Mo)_{29}$ compounds.

In this thesis, a series of polycrystalline intermetallic compounds $R_3(Fe, Mo)_{29}$ ($R = Ce, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy$ and Y) have been first synthesized by arc melting. The successful preparation of

$R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds makes it possible to study the magnetic properties, structure characteristics and magnetic structure, especially for $Y_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compound which is for the first time to be synthesized as the single phase 3:29 compound and makes it possible to isolate the magnetic properties of Fe sublattice for the class of compounds. Experimental results show that the content of stabilizing element Mo in $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds is slightly lower than the content of stabilizing element Ti in $R_3(\text{Fe}, \text{Ti})_{29}$ compounds. A simple method has been put forward to determine the Mo content in $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds by observing the effects of Mo on the Curie temperature T_C , which makes it much easier to prepare the 3:29 compounds. The rule of electronic concentration was successfully used to explain why the lowest content of stabilizing element M is different for a different stabilizing element M in $R(\text{Fe}, \text{M})_{12}$ or $R_3(\text{Fe}, \text{M})_{29}$ compounds.

The results of refined X-ray and neutron diffraction patterns for $Y_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compound indicate that the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds belong to space group $A_{2/m}$. The structure 3:29 is a kind of mixture of structure 1:12 and 2:17. The transformation relationship of atomic coordinate system from structure 1:12 and 2:17 can be expressed as following matrices:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{5}y - \frac{2}{5}z \\ -x \\ \frac{4}{5}y + \frac{1}{5}z \end{pmatrix}$$

and

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{5}x + \frac{3}{5}y + \frac{2}{5}z - \frac{1}{10} \\ -\frac{1}{2}x - \frac{1}{2}y \\ \frac{3}{10}x - \frac{3}{10}y + \frac{4}{5}z - \frac{1}{5} \\ 1 \end{pmatrix}$$

The Curie temperatures and saturation magnetization of $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds are between those of 2:17 and 1:12 compounds. The X-ray powder diffraction patterns on magnetically aligned samples of $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compounds show that all the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ ($R = \text{Ce}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$ and Y) compounds are planar anisotropy at room temperature. The $\sigma - T$ curve, a.c. susceptibility and Mossbauer spectroscopy revealed that the spin reorientation from cone to plane occurred at 230 K in the $\text{Nd}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compound. A first order magnetization process has been observed in the magnetization curves and SPD signal of $\text{Tb}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ compound.

The interstitial nitrides retain the structure of their parent compounds, but the unit cell volumes are 4.6% ~ 6.6% greater. The average moment of Fe sublattice in the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ compounds which was obtained by studying the yttrium compound increase from $1.80 \mu_B$ to $2.04 \mu_B$. The $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ nitride is the only member in the $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ compounds to exhibit uniaxial anisotropy and its EMD is [102]. The Curie temperature T_C , saturation magnetization M_s and anisotropy field at 4.2 K of $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}\text{N}_x$ nitride are 704 K, $152 \text{ Am}^2/\text{kg}$ and 20.5 T, respectively, so it is a potential permanent magnet.

The results of refined X-ray powder diffraction show that Ga

preferentially occupies 8i and 8f sites in $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{1.3}\text{Ga}_x$ compounds. The partial substitution of Ga for Fe in $\text{SmFe}_{10.7}\text{Mo}_{1.3}$ compounds leads to an increase of unit cell volume and a decrease of Curie temperature, saturation magnetization and the average moment of Fe sublattice. The magnetocrystalline anisotropy of $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{1.3}\text{Ga}_x$ compounds change from uniaxial to cone – plane with the increase of Ga contents in the $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{1.3}\text{Ga}_x$ compounds. The partial substitution of Ga for Fe in $\text{R}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ (R Sm and Y) compounds results in an increase of unit cell volume and Curie temperature ($\text{Ga} < 0.15$), but a decrease of saturation magnetization and the average moment of Fe sublattice. The magnetocrystalline anisotropy of $\text{Sm}_3(\text{Fe}_{0.966-x}\text{Mo}_{0.034}\text{Ga}_x)_{29}$ compounds change from easy plane to cone – plane with the increase of Ga contents in the $\text{Sm}_3(\text{Fe}_{0.966-x}\text{Mo}_{0.034}\text{Ga}_x)_{29}$ compounds. The magnetocrystalline anisotropy of $\text{Sm}_3(\text{Fe}_{0.966-x}\text{Mo}_{0.034}\text{Ga}_x)_{29}$ compounds may change from cone – plane to uniaxial with an increase of Ga content further in $\text{Sm}_3(\text{Fe}_{0.966-x}\text{Mo}_{0.034}\text{Ga}_x)_{29}$ compounds.

Keywords: Rare earth – Transition metal intermetallic compounds; Structure; Curie temperatures; Magnetization; magnetocrystalline anisotropy

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 永磁材料的性能	3
1.1.1 永磁材料的内禀磁性	4
1.1.2 永磁材料的应用参数	5
1.2 永磁材料发展历史的回顾	7
1.3 永磁材料的研究现状	11
1.3.1 $R_2Fe_{17}Z_x$ 及 $R_2Fe_{17-x}M_x$ 金属间化合物的结 构与磁性	11
1.3.2 $R(Fe,M)_{12}N_{1-\delta}$ 的结构与磁性	16
1.3.3 软磁/硬磁复合永磁材料	19
1.3.4 $R_3(Fe,M)_{29}$ 新型稀土-铁金属化合物的研究	22
1.4 问题的提出及本论文的工作	25
参考文献	26
第2章 磁学基本理论	36
2.1 4f、3d 电子与物质的磁性	36
2.1.1 稀土原子(R)的磁性	37
2.1.2 过渡族元素(T)的磁性	38
2.2 自发磁化的基本理论	39
2.2.1 自发磁化的唯象理论(分子场理论)	40
2.2.2 自发磁化的 Heisenberg 交换作用模型	41
2.2.3 Stoner 能带模型	42

2.3 稀土-过渡族金属间化合物的晶体场和交换场	44
2.3.1 晶体场相互作用和磁晶各向异性	45
2.3.2 R-T 金属间化合物的交换相互作用	49
参考文献	51
第3章 实验方法	54
3.1 样品制备	54
3.1.1 原材料准备和熔炼	54
3.1.2 热处理	54
3.1.3 氮化处理	55
3.2 晶体结构的确定	55
3.2.1 X 射线衍射	55
3.2.2 中子衍射	56
3.3 磁性测量原理	57
3.3.1 提拉样品磁强计(ESM)	57
3.3.2 振动样品磁强计(VSM)	59
3.3.3 Mossbauer 测量原理	61
3.4 内禀磁性参数的确定	65
3.4.1 饱和磁化强度 M_s 的确定	65
3.4.2 居里温度 T_C 的确定	65
3.4.3 磁晶各向异性常数 K_1 、 K_2 及各向异性场 B_A 的 确定	65
参考文献	68
第4章 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的成相条件	70
4.1 引言	70
4.2 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物成相条件的研究	71
4.2.1 $R_3(Fe, M)_{29}$ 化合物中稳定元素 Mo 含量及热 处理条件确定	71
4.2.2 稳定元素 Mo 的含量对 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物 成相的影响	77
4.3 稳定元素 M 在 $R_3(Fe, M)_{29}$ 及 $R(Fe, M)_{12}$ 化合物 中的作用讨论	83

4.4	本章小结	86
	参考文献	86
第5章	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的结构特性	88
5.1	引言	88
5.2	Rietveld 方法以及 $P_{21/C}$ 、 $A_{2/m}$ 空间群的简单介绍	89
5.2.1	Rietveld 方法	89
5.2.2	$P_{21/C}$ 及 $A_{2/m}$ 空间群简介	90
5.3	X 射线衍射及中子衍射研究 $R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的结构特性	92
5.4	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物与 RCO_5 、 $R(Fe, M)_{12}$ 、 R_2Fe_{17} 化合物之间的结构关系	103
5.5	本章小结	109
	参考文献	110
第6章	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 金属间化合物的内禀磁性	112
6.1	引言	112
6.2	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的内禀磁性	112
6.2.1	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物的晶体学参数	112
6.2.2	居里温度 T_C	115
6.2.3	饱和磁化强度 M_s	118
6.2.4	磁晶各向异性及各向异性场 B_A	122
6.2.5	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物中 4f 电子、3d 电子的性质及 R-T 之间的交换作用	131
6.3	本章小结	137
	参考文献	138
第7章	$R_3(Fe, Mo)_{29}N_x$ 化合物的内禀磁性	140
7.1	引言	140
7.2	$R_3(Fe, Mo)_{29}$ 化合物吸氮条件的确定	140
7.3	$R_3(Fe, Mo)_{29}N_x$ 化合物的晶体学特性	146
7.4	$R_3(Fe, Mo)_{29}N_x$ 化合物的内禀磁性	149
7.5	本章小结	158

参考文献	158
第8章 Ga 取代 $R(\text{Fe}, \text{Mo})_{12}$ 及 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ 化合物中	
部分 Fe 对其结构及磁性的影响	161
8.1 引言	161
8.2 $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{0.3}\text{Ga}_x$ 化合物的结构特性及内禀磁性	162
8.2.1 $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{0.3}\text{Ga}_x$ 化合物的结构特性	162
8.2.2 $\text{SmFe}_{10.7-x}\text{Mo}_{0.3}\text{Ga}_x$ 化合物的内禀磁性	166
8.3 Ga 取代 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$ ($R = \text{Y}, \text{Sm}$) 化合物中部分	
Fe 对其结构及内禀磁性的影响	170
8.3.1 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo}, \text{Ga})_{29}$ ($R = \text{Y}, \text{Sm}$) 单相样品的制备	
及其晶体学特性	170
8.3.2 $R_3(\text{Fe}, \text{Mo}, \text{Ga})_{29}$ ($R = \text{Y}, \text{Sm}$) 化合物的内禀磁性	173
8.4 Ga 对 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 、 $\text{Sm}(\text{Fe}, \text{Mo})_{12}$ 以及 $\text{Sm}_3(\text{Fe}, \text{Mo})_{29}$	
化合物内禀磁性的影响	177
8.5 本章小结	180
参考文献	180
第9章 结论	182
攻读博士学位期间发表的论文	186
致谢	190

第1章

绪 论

永磁材料作为一种重要的能量与信息转换功能材料,已广泛应用于电机工程、汽车工程、自动化工程、微波通讯工程、音响技术、计算机工程、生物工程、石油工程、航天航空技术、仪表工程、医疗领域等等.目前,永磁材料已渗透到工业文明的每一个角落.

早在公元前四世纪,我们的祖先就开始利用地磁场和磁体的相互作用用天然磁石(Fe_3O_4)制成指南针和罗盘并用于航海和军事,这就是中国古代的四大发明之一——指南针^[1],图 1-1 给出了我国古代司南的示意图.沈括于 1088 年在他的《梦溪笔谈》中对此做了详细的描述.这是中国有关磁学的第一篇论文.

在欧洲,第一篇关于磁学的论文是 1600 年 Willam Gibert 撰写的“De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete teure: Physiologia nova, Plurimi et argumentis et experimentis demonstrata.”^[2].这篇论文被认为是磁学的奠基石,它总结了所有当时的磁学知识,测量了磁体的方向及大小,并提出了地球本身就是一个大磁体的观点.他的工作对以后的磁学产生了巨大的影响,并且对万有引力的发展作出了贡献,此外他还预言了居里温度的存在.