

文章编号: 1003-7837(2000)02-0121-04

Nd-Fe 基永磁材料的研究

刘 经 树

(阳春市潭水磁业公司, 广东 阳春 529629)

摘 要: Nd₁₅Fe₇₇B₈ 永磁材料由具有极高磁单轴各向异性的化合物组成. 它的主相 Nd₂Fe₁₄B 呈四方相结构, 其晶格常数 $a=0.880\text{ nm}$, $c=1.221\text{ nm}$, 饱和磁感应强度值达 1.61 T , Nd₁₅Fe₇₇B₈ 永磁性能为: $B_r=1.23\text{ T}$, $H_c=880\text{ kA/m}$, $(BH)_{\max}=290\text{ kJ/m}^3$, B_r 的温度系数为 $-1260\times 10^{-4}/\text{K}$.

关键词: Nd-Fe-B 永磁材料; 各向异性; 磁性

中图分类号: TG132.2⁺7 **文献标识码:** A

早期研究发现轻稀土(LR)与过渡族金属的二元化合物具有高的饱和磁感应强度, 根据洪德(Hund)法则可知, 轻稀土(LR)与过渡族化合物中 $3d$ 与 $4f$ 电子磁距是属于铁磁性耦合. 然而, LR-Fe 永磁体尚未研制出来, 主要有三个原因: (1) LR-Fe 化合物居里温度太低; (2) LR 与 Fe 没有稳定的中间相; (3) LR-Fe 化合物不具备单轴各向异性. 但是人们仍然对该体系合金做了大量的研究工作. 1983 年日本的佐川真人发现在二元体系中加入 B 可得到高性能的永磁材料. 在前人研究成果的基础上, 我们研制了一种由 Nd, Fe, B 形成的三元化合物 Nd₁₅Fe₇₇B₈, 该化合物具有作为永磁材料的优异磁性. 这种磁体的磁性能超过第二代稀土永磁材料 Sm-Co 磁体, 成为一种实用的磁性材料.

1 试验部分

1.1 钕铁硼材料的制备

在氧化铝坩埚中于氩气氛下, 用感应炉熔炼成分为 Nd₁₅Fe_{100-x-y}B_y ($x=13\sim 19$, $y=4\sim 17$, 原子分数, %, 下同) 的合金. 在氩气氛中用颚式破碎机将铸锭粉碎成粒度约 1 mm 的颗粒, 再用盘磨机将其磨碎到约 $100\text{ }\mu\text{m}$, 然后在不锈钢球磨机中加入 1,1,2 三氯-1,2,2 三氯乙烷, 研磨到约 $3\text{ }\mu\text{m}$. 将此粉末在 800 kA/m 的磁场中取向, 在垂直于取向方向施加 200 MPa 的压力将其压制成型, 压制坯置于氩气中在 $1310\sim 1430\text{ K}$ 温区内烧结约 1 h , 然后快速冷却至室温. 再将烧结过的磁体在 $400\sim 1400\text{ K}$ 温度下进行 1 h 左右的热处理, 并迅速冷却.

1.2 测试

取上述由铸锭研磨所得平均粒度小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的粉末进行 X 射线衍射测量. 取在合金熔

收稿日期: 2000-03-27

作者简介: 刘经树 (1963-), 男, 广东阳春人, 工程师, 学士.

点附近温区内冷却得到的铸锭作试样,用旋转晶体法来分析浇铸温度对铸锭磁性能的影响.用振动样品磁强计(VSM)测量从室温到居里温度以上温区内烧结试样的磁感应强度与温度的关系曲线.从烧结体上切取直径2 mm、厚1 mm的圆片作试样.在平行于试样的磁取向方向施加800 kA/m的磁场,检测居里温度.在最大磁场强度1 200kA/m下,用VSM测出平行或垂直于同一试样的磁取向方向的初始磁化曲线.用光学显微镜和电子探针研究烧结试样的结构.

2 试验结果与讨论

2.1 钕铁硼系合金 X 射线分析

$\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{85-y}\text{B}_y$ 合金中加入不同量的 B ($y=0\sim 8$),其粉末 X 射线谱如图 1 所示.由图 1 可见,随着 B 的加入,谱线中出现了一组未知的衍射峰,这些衍射峰的强度随 B 加入量的增加而加强.借助单晶碎粒旋转晶体法的测量,这组未知的衍射峰可标定为晶格常数 $a=0.880$ nm, $c=1.221$ nm 的四方结构.试验中发现,随着 B 的加入,出现了 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ 的磁单轴各向异性,这正是我们所期望的.由此可见,加入 B 的作用是将 Nd-Fe 二元合金转变为 Nd-Fe-B 三元合金,形成 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 四方相结构,获得高的磁各向异性,发挥了 Nd-Fe 原有的高饱和磁感应强度.

2.2 B 含量和温度对 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{85-y}\text{B}_y$ 合金磁感应强度的影响

试验测得 $\text{Nd}_{15}\text{-Fe}_{85}$ 合金的居里温度约为 310K.在 $H=800$ kA/m 条件下,B 含量和温度对 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{85-y}\text{B}_y$ 合金磁感应强度的影响见图 2.由图 2 可见,合金的磁感应强度随 B 含量的增加而增高,并且在 B 含量(原子分数)为 6% 时达到最大值.同时,随温度升高,磁感应强度下降.这说明加入少量 B,使 Nd-Fe-B 合金形成了具有高居里温度的四方相三元合金.低磁场测量表明, $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ 的居里温度为 585K.

2.3 元素含量对合金磁性的影响

不同合金元素含量对试样永磁特性的影响见图 3 和图 4.从图 3 和图 4 可以看出,在 6%~8%B 和 14%~15%Nd 附近得到最大的磁能积 $(BH)_{\max}=280\sim 290$ kJ/m³;开始, H_c 随 B 和 Nd 的增加而增高,当 B 增加到 10%,Nd 增加到 16%时,再进一步增加 B 和 Nd, H_c 只略微增加.

2.4 平行和垂直于烧结试样易磁化轴的初始曲线

平行和垂直于烧结试样易磁化轴的初始曲线示于图 5.在最大磁场强度 1 200kA/m 下,

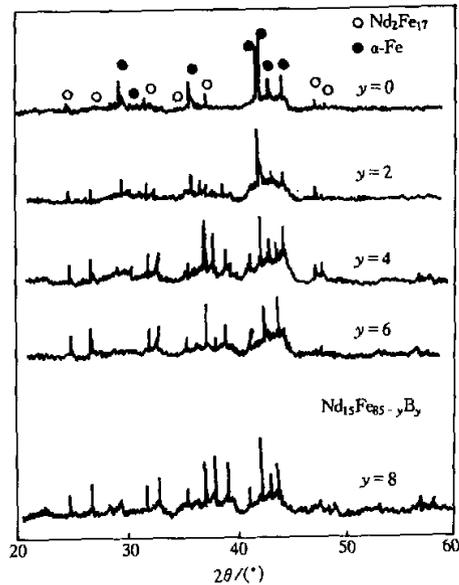


图 1 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{85-y}\text{B}_y$ 合金系的 X 射线衍射谱
Fig. 1 X-ray diffraction pattern of $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{85-y}\text{B}_y$ alloys

易磁化轴的磁感应强度为 1.3 T, 而难磁化轴仅为 0.4 T. 这表明 $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ 具有高的单轴各向异性. 测量表明, $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ 的各向异性接近 8.8 MA/m, 相当于约 3.5 MJ/m³ 的各向异性常数 K_1 . 饱和磁感应强度约为 1.35 T.

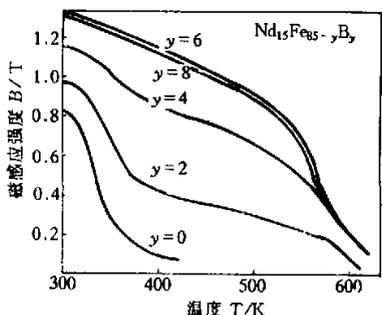


图 2 $Nd_{15}Fe_{85-y}B_y$ ($y=0\sim 8$) 合金的磁感应强度与温度的关系

Fig. 2 Relationship between magnetic induction density of $Nd_{15}Fe_{85-y}B_y$ ($y=0\sim 8$) alloys and temperature

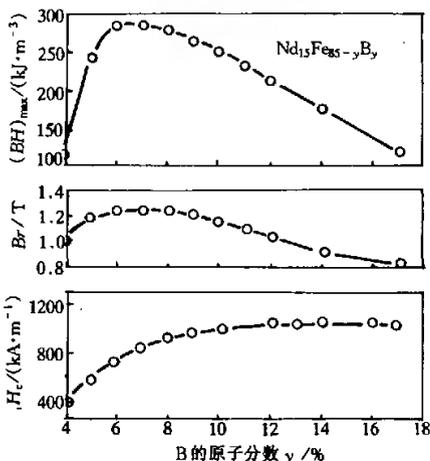


图 3 B 含量对 $Nd_{15}Fe_{85-y}B_y$ 合金永磁性能的影响
Fig. 3 Effect of B content on the permanent magnetism of $Nd_{15}Fe_{85-y}B_y$ alloys

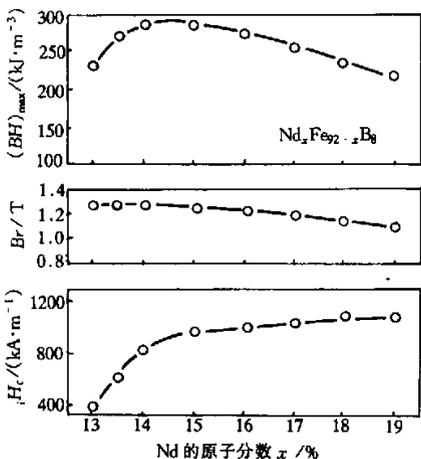


图 4 Nd 含量对 $Nd_2Fe_{92-x}B_8$ 合金永磁性能的影响
Fig. 4 Effect of Nd content on the permanent magnetism of $Nd_2Fe_{92-x}B_8$ alloys

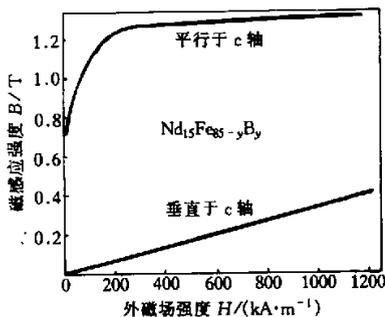


图 5 $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ 合金在易磁化轴和难磁化轴的磁感应强度随外磁场的变化
Fig. 5 Dependence of magnetic induction density of $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ alloy along the axis of easy magnetization and axis of hard magnetization on the change of external magnetic field strength

2.5 金相分析

对 $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ 的金相研究得到如下结果: (1) $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ 合金主要由三个相组成: 主相四方相 ($Nd_2Fe_{14}B$)、次要相富 Nd 相和富 B 相; (2) 四方相平均粒度约 15 μm ; (3) 含 Nd 超过 80% 的富 Nd 相沿四方相晶粒边界分布; (4) 富 B 相以孤立块状或颗粒状存在于晶界交隅处或

Nd₂Fe₁₄B晶界上.

2.6 Nd₁₅Fe₇₇B₈的磁性能

Nd₁₅Fe₇₇B₈试样的磁特性: $B_r=1.23\text{ T}$, ${}_B H_c=880\text{ kA/m}$, ${}_i H_c=960\text{ kA/m}$, $(BH)_{\max}=290\text{ kJ/m}^3$, B_r 的温度系数为 $-1\ 260\times 10^{-6}/\text{K}$, ${}_i H_c$ 的温度系数为 $-6\ 000\times 10^{-6}/\text{K}$.

3 结 论

四方相Nd₂Fe₁₄B具有极高的磁各向异性,从而使该三元系合金Nd₁₅Fe₇₇B₈具有极高的磁性能.该磁性材料的磁性能参数为: $B_r=1.23\text{ T}$, ${}_B H_c=880\text{ kA/m}$, ${}_i H_c=960\text{ kA/m}$, $(BH)_{\max}=290\text{ kJ/m}^3$, B_r 的温度系数为 $-1\ 260\times 10^{-6}/\text{K}$, ${}_i H_c$ 的温度系数为 $-6\ 000\times 10^{-6}/\text{K}$.

Study on a Nd-Fe base permanent magnetic material

LIU Jing-shu

(Yangchun Tanshui Magnet Industrial Company, Yangchun 529629, China)

Abstract: A permanent magnetic material Nd₁₅Fe₇₇B₈, which consists of compounds with extremely high magnetic performance and uniaxial anisotropy, was developed. Its main phase Nd₂Fe₁₄B has a tetragonal phase structure, and its lattice constants is $a=0.880\text{ nm}$ and $c=1.221\text{ nm}$, its saturated magnetic induction density is up to 1.61 T . Nd₁₅Fe₇₇B₈ has the following properties: $B_r=1.23\text{ T}$, ${}_B H_c=880\text{ kA/m}$, $(BH)_{\max}=290\text{ kJ/m}^3$ and the temperature coefficient of B_r is $-1\ 260\times 10^{-6}/\text{K}$.

Key words: Nd-Fe-B permanent magnetic material; anisotropy; magnetism