第 50 卷 第 11 期 2001 年 11 月
1000-3290/2001/50(11)/2226-04

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.50, No.11, November, 2001
©2001 Chin. Phys. Soc.

烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能一致性与其微观结构的关系*

成问好 李 卫 李传健 潘 伟

(钢铁研究总院功能材料研究所,北京 100081)

(2001 年 4 月 14 日收到,2001 年 5 月 20 日收到修改稿)

分析了微观结构和热处理工艺对矫顽力的影响,发现在矫顽力一定的情况下,磁体的微观结构越"差",则保证不同批次磁体矫顽力变化不大于某一给定值所需的工艺条件就越严格;反之则越宽松.就同一炉产品而言,微观结构越好的磁体,其矫顽力受烧结(热处理)炉温度梯度的影响越小,其结果是该炉产品的一致性越高.反之,受温度梯度的影响越大,磁体的一致性也就越低.该研究结果说明:在条件许可的情况下,应首先考虑通过改善磁体的微观结构来提高磁性能一致性.

关键词:Nd-Fe-B 永磁体,微观结构,内禀矫顽力,一致性

PACC:7530

1 引 言

由于永磁材料的磁性能一致性直接影响到用它生产的器件的一致性,因而是使用者和生产者都非常关心的问题.计算机、通讯、航空航天等高科技领域对永磁材料一致性的要求尤其严格.虽然 Nd-Fe-B 永磁材料由于很高的磁能积而在很多领域得到了广泛应用,但磁性能一致性仍没有得到较好解决.具体表现在:不仅同一牌号不同批次的烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能差别较大,而且同一批次,甚至同一炉不同位置磁体的磁性能差别也不小.更有甚者同一个大块或同一根圆柱不同位置的磁性能都有差异.例如,将一根圆柱切成薄片后会发现不同磁片的磁性能(表面磁场)常常不相等,有时差别还较大,甚至一个磁片的两个面之间的表面场也往往不一致.尽管有些厂家生产的 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力($_iH_c$),$(BH)_{max}$都达到了某些高科技产品的性能要求,但产品仍不能被接受的一个重要原因就是一致性不够.为解决此难题,绝大多数生产厂家都采用全检的方法,这样做既增大了产品成本又不能从根本上解决问题.

虽然人们对影响烧结 Nd-Fe-B 磁体磁性能的因素做过大量研究[1—6],但对影响磁性能一致性的原因却研究得较少,而该问题的重要性是显而易见的.导致烧结 Nd-Fe-B 磁体磁性能不一致的原因很多,烧结和热处理过程中出现的受热(温度)不均匀、淬火过程中出现的冷却速率不一致而导致的内禀矫顽力差异是重要原因之一.因而保证磁体内禀矫顽力的一致性是保证磁体磁性能一致性的重要方面.本文的目的就是从烧结 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力与微观结构间的关系出发,找到一种提高 Nd-Fe-B 永磁材料磁性能一致性的思路和途径.

2 结果与讨论

通过对大量各向异性烧结 Nd-Fe-B 磁体的宏观磁性能和微观结构进行分析,得到了一个可以将磁体的内禀矫顽力$_iH_c$与磁体的微观结构参量联系起来的关系式

$$_iH_c = \left(1.8612\frac{\sqrt{nS}}{L}\right)^p H_A, \tag{1}$$

其中 n 为某一垂直于 c 轴的能基本代表该磁体微观结构的截面上的 $Nd_2Fe_{14}B$ 晶粒的个数,S 为 n 个晶粒的面积之和,L 为 n 个晶粒的晶界总长度,H_A 为 $Nd_2Fe_{14}B$ 四方相的各向异性场,当用 Dy 或 Tb 部分

* 国家自然科学基金(批准号:50071051)资助的课题.

取代 Nd 后,其各向异性场会发生变化,这种情况下应该修正 H_A 值. p ($\geqslant 1$)为几乎与微观结构无关但与烧结和热处理过程,尤其是热处理过程有关的因子.

为了便于讨论,令

$$m = 1.8612\frac{\sqrt{nS}}{L}, \tag{2}$$

并称 m ($0 < m < 1$)为结构因子,p 为工艺因子. 则(1)式成为

$$_iH_c = m^pH_A \quad 或 \quad \frac{_iH_c}{H_A} = m^p. \tag{3}$$

对(3)式取对数,则

$$\ln\frac{_iH_c}{H_A} = p\ln m. \tag{4}$$

利用(4)式对内禀矫顽力 $_iH_c$,结构因子 m 和工艺因子 p 三者间的变化趋势用计算机计算后得到的结果如图 1 所示.

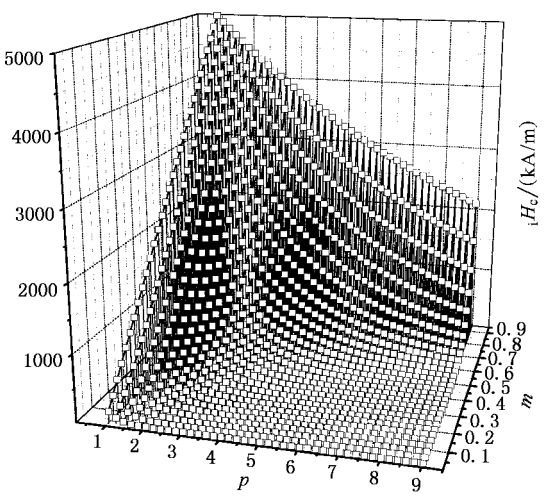

图 1　烧结 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力 $_iH_c$、结构因子 m 和工艺因子 p 之间的三维关系图

图 1 表明,微观结构对烧结 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力有异乎寻常的影响,要提高烧结 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力必须首先考虑改善磁体的微观结构,其次是工艺因素,这与人们的实际经验一致. 例如,若磁体的结构因子 $m = 0.9$,即使是很一般的工艺(如 $p = 9$),磁体的 $_iH_c$ 也可以达到 2000kA/m 以上. 相反,若 $m = 0.1$,即使是最完美的工艺条件($p = 1$),$_iH_c$ 也不会超过 300kA/m.

文献[1]对 $Nd_{15.5-x}Dy_xFe_{79}B_6$ 磁体的 $_iH_c$ 和 H_A 随 Dy 含量的变化情况进行研究后发现,添加 Dy 使磁体的 $_iH_c$ 和 H_A 都提高,但 $_iH_c$ 的提高幅度比 H_A 大得多. 这说明添加 Dy 使 $_iH_c$ 提高的原因不全是因为提高了磁体的 H_A. 进一步分析发现,添加 Dy 使磁体的微观结构改善是 $_iH_c$ 提高的重要原因之一. 文献[2,3]对添加 Nb 对 Nd-Fe-B 铸态合金组织和磁体微观结构的影响进行的研究,文献[4]对添加 Sn 对温度系数的影响进行的研究,以及文献[5]对添加 Cu 对磁性能的影响进行的研究都得到了类似的结论. 而文献[7,8]的研究结果表明,虽然热处理温度对磁体的最终矫顽力有非常大的影响,但在最佳热处理温度附近存在一个较大的温度范围(一般大于 ±10℃),当温度在此范围内变化时,磁体的矫顽力并不会发生显著改变,这与 $_iH_c$ 随晶粒尺寸的增大快速降低形成了鲜明对比[9]. 这些都与图 1 的结论一致.

我们对文献[10]中三种含 Nb 各向异性烧结 Nd-Fe-B 磁体的 m 和 p 进行测量后发现,p 值在 3 左右,m 值在 0.4—0.6 之间. 这说明提高磁体的结构因子 m 还有很大的余地. 下面将讨论如何利用 $_iH_c$, m 和 p 三者之间的关系来控制磁体的内禀矫顽力一致性进而提高磁体磁性能的一致性.

假设有 7 种烧结 Nd-Fe-B 磁体,其内禀矫顽力分别为 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 和 2000kA/m,当结构因子 m 值在 0.4—0.8 之间变化时,根据(4)式,可求出与 $_iH_c$ 和 m 相对应的 p 值,结果如图 2 所示.

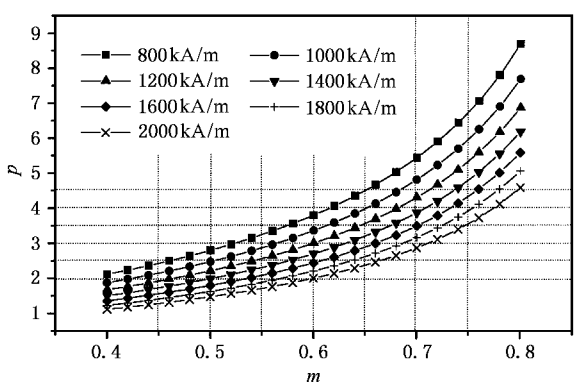

图 2　不同内禀矫顽力时结构因子 m 随工艺因子 p 的变化曲线

从图 2 可以看出,结构因子 m 值越小时,要达到相同内禀矫顽力所需的 p 值就越小,而 p 值越小表示烧结及热处理工艺就必须越接近最佳条件,即对工艺条件要求越严格. 如果某生产线采用最佳烧结及热处理工艺时的 p 值最低只能达到 2,则除非通过调整磁体的化学成分和改进制粉工艺并选择最

佳烧结温度使磁体的结构因子 m 大于 0.45,否则只能生产内禀矫顽力小于 1200kA/m 的产品.而要生产内禀矫顽力大于 2000kA/m 的烧结 Nd-Fe-B 磁体,则必须保证 m 大于 0.6.这一结果表示,只有综合考虑每一个工艺阶段的设备性能才能使整条生产线发挥最大作用,生产出设备条件许可的最好产品.

对图 2 作进一步分析就会发现,同一条曲线(即 ${}_iH_c$ 不变)的斜率随 m 值的增大而增大.这说明 m 值较大时,保证磁体内禀矫顽力的变化不大于某一范围所允许的 p 值,即对工艺要求较低.图 3 给出当内禀矫顽力下降 100kA/m 时,不同 m 值情况下所允许的 p 值增加量(在某种程度上代表了允许工艺条件偏离最佳工艺的程度)随 m 值的变化情况.

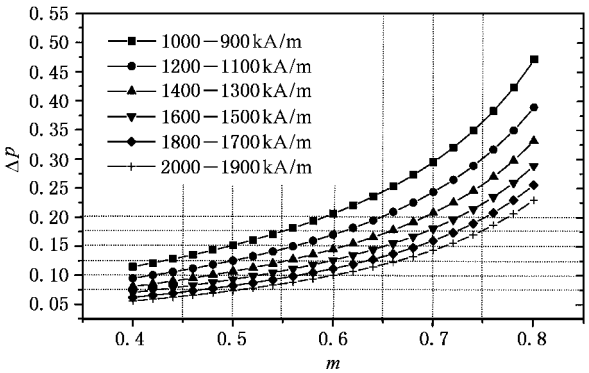

图 3 不同内禀矫动力值下降 100kA/m 时 Δp 随 m 的变化情况

从图 3 可以看出,随 m 值的增大,Δp 值显著增大.例如对于 ${}_iH_c = 1200$kA/m 的磁体,当 $m = 0.4$ 时,要保证 ${}_iH_c$ 值下降不超过 100kA/m,就必须保证 Δp 值小于 0.1;而当 $m = 0.65$ 时,则只要 Δp 值不大于 0.2 就可保证磁体 ${}_iH_c$ 值不低于 1100kA/m.亦即 m 值从 0.4 增大到 0.65,使磁体的 ${}_iH_c$ 值下降不超过 100kA/m,对 Δp 的要求由 0.1 增大到 0.2,m 值更大要求更低.其他几种数值的 ${}_iH_c$ 降低 100kA/m 时,Δp 值随 m 值的变化情况也有类似的趋势.

以上结果对探讨如何控制磁体的磁性能一致性非常有用.生产和研究都证明,Nd-Fe-B 毛坯的一致性较容易控制.所以,导致同一炉产品磁性能不一致的原因首先是烧结炉加热区存在温度梯度,使烧结和热处理过程中不同部位的磁体受热不均匀;其次是淬火冷却过程中冷却速度不相同.此外,还有诸如受力不一致等因素,但一般情况下不是主要原因.这说明,导致磁体磁性能一致性降低的原因是位于烧结(热处理)炉内某些区域的工艺参数(如温度、冷却速率等)偏离了正常值.只要烧结温度不超过引起晶粒异常长大的临界温度,则烧结过程造成的微观结构差异较小,对同一炉产品不同区域,尤其是同一块磁体的不同部位更是如此.因而可以忽略由于烧结温度差异而导致的微观结构差异.这样,工艺参数偏离正常值导致的直接后果是工艺因子 p 值变大.

由图 3 可知,保证磁体的矫顽力不低于某一数值所允许的最大 Δp 值受 m 值限制.烧结(热处理)炉一旦投入使用,其加热区不同区域的 Δp 值就接近一个定值.此时生产某种牌号内禀矫顽力磁体所需的最小 m 值也就可确定.如果 m 值不能大于该值,则用该设备生产的磁体的磁性能一致性就很难保证.但如果通过改变化学组成(如添加微量元素)或改进制粉方法,使粉末的微观结构得到改善,使 m 值增大,则用同样的烧结(热处理)设备也可以生产出内禀矫顽力更高、一致性更好的磁体.因此,图 1 和图 2 包含的信息很有用.

3 结 论

对获得高内禀矫顽力烧结 Nd-Fe-B 磁体的途径和通过提高内禀矫顽力的一致性来提高磁性能一致性的途径进行了探讨.结果说明,烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能一致性不仅仅与人们通常认为的工艺过程和烧结(热处理)设备的性能有关,还与磁体的微观结构有关.而且微观结构对一致性的影响远远大于工艺过程.在生产设备的工艺因子 p 的最小值和最大变化值 Δp 一定的情况下,要生产内禀矫顽力更高、一致性更好的 Nd-Fe-B 磁体必须以更优良的微观结构做依托.该研究结果还表明,在设备配套时如果热处理设备和制粉设备只能选择一种采用高档配置,则与其配置控温精度较高、温度梯度较小的烧结(热处理)炉,不如配置可使粉末粒度分布更集中、形状更规则的制粉设备.原因是微观结构对内禀矫顽力和磁性能一致性的影响比热处理过程大得多.

[1] B. M. Ma, R. F. Krause, In: Bad Soden ed., Proc. 5th Int. Symposium on Anisotropy and Coercivity in Rare-Earth Transition Metal Alloys (Deutsche Physikalische: FRG. 1987), p.141.

[2] W. H. Cheng, W. Li, C. J. Li, X. M. Li, *J. Alloys and Compounds*, **319**(2001), 280.

[3] W. H. Cheng *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **50**(2001), 139 (in Chinese) [成问好等, 物理学报, **50**(2001), 139].

[4] C. Ishizaka, H. Nishio, E. Kato, A. Fukuno, In: H. Kaneko ed., Proc. 16th Int. Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications (Sendai, 2000), p.237.

[5] H. Lemke, G. Thomas, *Scripta Materialia*, **37**(1997), 1651.

[6] R. W. Gao, *Acta Phys. Sin.*, **46**(1997), 861 (in Chinese) [高汝伟, 物理学报, **46**(1997), 861].

[7] M. Tokunaya, N. Meguro, M. Edohn, S. Tanigava, *IEEE Trans. Magn.*, **Mag-21** (1985), 1964.

[8] M. Tokunaya, M. Tobise, N. Meguro, H. Harada, *IEEE Trans. Magn.*, **Mag-22** (1986), 904.

[9] K. Yuji, *IEEE Trans. Magn.*, **36** (2000), 3275.

[10] W. H. Cheng *et al.*, *Acta Metall. Sin.*, **37**(2001), 87 (in Chinese) [成问好等, 金属学报, **37**(2001), 87].

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CONSISTENCE AND MICROSTRUCTURE OF SINTERED Nd-Fe-B MAGNETS*

CHENG WEN-HAO LI WEI LI CHUAN-JIAN PAN WEI

(*Department of Functional Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing* 100081, *China*)

(Received 14 April 2001; revised manuscript received 20 May 2001)

ABSTRACT

One of the most important factors that lower the consistence is the appearance of regions where the technological parameters deviate from the points where the sensors are located. In this paper this was investigated on the basis of the relationship between the intrinsic coercivity and the microstructure parameters of sintered Nd-Fe-B magnets. It is found that the magnet with a fairly good microstructure will have higher consistence than the magnet with a relatively poor microstructure under the same technological conditions. This indicates that the more effective approach to enhance the consistence of a magnet is to optimize its microstructure other than to rigorously enforce the technological conditions. The results obtained show some directive for improving the consistence of the magnetic properties of sintered Nd-Fe-B magnets.

Keywords: Nd-Fe-B, permanent magnets, microstructure, coercivity, consistence

PACC: 7530

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.50071051).