

文章编号:1673-9981(2009)02-0089-04

# 粘结 NdFeB 磁体制备工艺因素的研究\*

何红英, 张敏刚, 闫晓燕

(太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:**在不同的模压压力下将 MQ 和 SQP-A<sup>+</sup> 两种磁粉分别制备成粘结磁体, 并对其磁性能进行分析. 研究表明, 压力增大可以增加磁体的密度, 提高磁性能, 但压力过大, 会引起磁性能的显著恶化. 用 MQ 粉制备的磁体的性能显著高于用 SQP-A<sup>+</sup> 粉; MQ 粉制备的大直径磁体的磁性能低于小直径磁体; 在添加剂加入后充分搅拌可提高磁粉包覆均匀性. 在模压温度为 100 ℃、模压压力为 1400 MPa 的条件下, 用 MQ 磁粉制得的最佳磁体的性能为:  $B_r = 0.719$  T,  $H_{c1} = 1052$  kA/m,  $H_{c2} = 467.5$  kA/m,  $(BH)_{max} = 83.6$  kJ/m<sup>3</sup>.

**关键词:** 粘结钕铁硼; 模压压力; 模压温度; 磁性能  
**中图分类号:** TM273      **文献标识码:** A

粘结 NdFeB 磁体是近几年来发展较快的一种新型永磁材料. 由于其性能优良、尺寸精度高和无需二次加工, 特别有利于仪器和零件等的小型化、轻型化和薄型化, 所以在信息和汽车等领域得到广泛的应用. 目前, 国内粘结磁体磁能积平均水平一般为 85 kJ/m<sup>3</sup> 左右<sup>[1]</sup>, 国外平均水平为 80~144 kJ/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>, 因而提高粘结 NdFeB 磁体性能仍是我国粘结磁体行业发展的主要方向之一. 影响粘结 NdFeB 磁体磁性能的因素有很多, 其中最主要的是磁粉本身的磁性能和磁体制备工艺. 本文研究了制备工艺对两种不同磁粉制成的粘结磁体磁性能的影响, 并对有关结果进行了分析讨论.

## 1 实验方法

选用 SQP-A<sup>+</sup> 和 MQ 两种磁粉为实验原料, 添加剂的成分列于表 1. 将磁粉与添加剂混合均匀, 然后将混合粉置于室温下放置 12 h 晾干, 再把混合粉分成若干份, 每份质量为 4 g. 在 769 YP-24B 粉末压机上采用不同的模压压力制备出直径分别为 10 mm 和 13 mm 的圆柱体, 保压时间为 120 s; 然后在干燥箱内 150 ℃ 温度下进行固化处理 3 h. 充磁后, 用 NIM2000 磁性测量仪测试样品的磁性能.

表 1 添加剂的成分

Table 1 Composition of additives

粘结剂	固化剂	偶联剂	润滑剂	助溶剂	溶剂
环氧树脂	三乙醇胺	钛酸脂	聚乙烯醇滑石粉	二甲基甲酰胺	丙酮

收稿日期: 2008-01-08

\* 基金项目: 山西省高校科技研究开发项目(200757); 太原市科技明星专项(070204024)

作者简介: 何红英(1982-), 女, 陕西西安人, 硕士.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 模压压力对磁性能的影响

图1为SQP-A<sup>+</sup>粉和MQ粉在不同压力下制成的磁体的磁能积变化曲线.从图1可知,用MQ粉制备的磁体性能显著高于SQP-A<sup>+</sup>粉.当压力小于1000 MPa时,随压力的增大由SQP-A<sup>+</sup>粉制备的磁体的磁能积增加较快并达到最大值,其后呈下降趋势;而由MQ粉制备的磁体的磁能积随压力的增大增加缓慢,但始终呈上升趋势.考虑到模具的允许压力,未对更高压力进行测试.

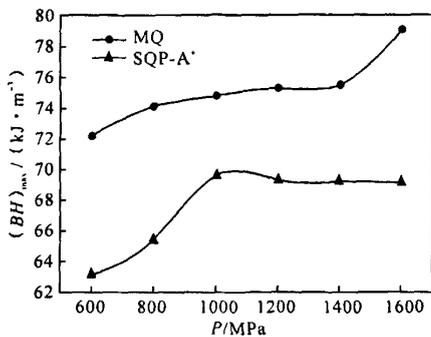


图1 模压压力对磁体性能的影响

Fig. 1 Effect of pressure on the magnetic properties

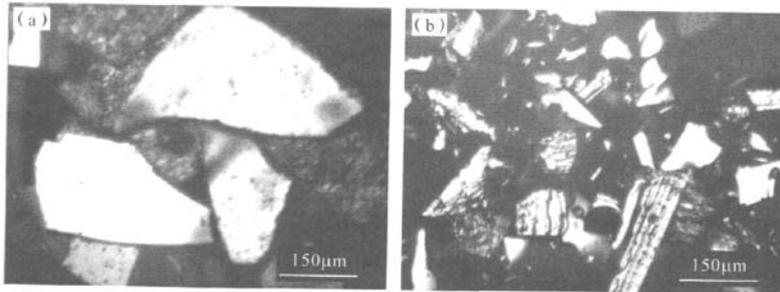


图2 MQ粉(a)和SQP-A<sup>+</sup>粉(b)的金相照片

Fig. 2 The metallograph of MQ powder (a) and SQP-A<sup>+</sup> powder (b)

当压力大于1000 MPa时,SQP-A<sup>+</sup>粉在压制过程中抵抗外力的能力弱,易发生破碎.磁粉的碎裂必然引起内部缺陷和应力的产生,这将是反磁畴核的形成中心,使材料过早的实现反磁化过程.在式(1)中,SQP-A<sup>+</sup>粉的相对密度 $d/d_m$ 此时已变化很小,

两种磁体的磁能积的变化趋势与磁粉的形貌和粒度有很大关系.将少量MQ磁粉和SQP-A<sup>+</sup>磁粉分别分散在载玻片上滴少许水摇匀使磁粉呈平铺状态,图2为此状态下磁粉的金相照片.

从图2(a)可知,MQ粉多呈片状,平均粒度较大,在装料时磁粉大部分呈平铺状态.图2(b)显示SQP-A<sup>+</sup>粉多呈针状,平均粒度较小,较前者易产生拱桥效应,从而导致摇实密度降低.这样在装料时相同质量的混合粉其所占的体积较大<sup>[3]</sup>,因此在压力小于1000 MPa且压力相同的条件下,用SQP-A<sup>+</sup>粉制成的磁体的密度变化将明显大于MQ粉.密度的提高将引起磁能积的增大,粘结磁体磁能积与磁体密度的关系<sup>[4]</sup>如下:

$$(BH)_{\max} = [A \overline{\cos\theta} (1 - \beta) \frac{d}{d_m} \mu_0 M_s]^2 / 4 \quad (1)$$

在相同的工艺条件下,同一磁粉的非磁性相体积分数 $\beta$ 、真空磁导率 $\mu_0$ 、磁粉的饱和磁化强度 $M_s$ 为定值.对于各向同性磁粉来说,粉末颗粒易磁化轴取向混乱,则 $\overline{\cos\theta} = 0.5$ .正向畴的体积分数 $A$ 在压力不大的条件下变化很小,可忽略,因此密度变化大的磁粉,其 $(BH)_{\max}$ 变化趋势也较大.所以,当压力小于1000 MPa时,在相同压力下由SQP-A<sup>+</sup>粉制成的磁体的磁能积的增大趋势大于MQ粉.

$\beta, \mu_0$ 和 $M_s$ 为定值,在加反向磁场时,反磁畴的增大将可能引起 $A$ 的减小,从而导致磁能积的下降.而MQ粉多呈片状,压制时受力均匀且硬度较大,不存在明显的应力集中现象,磁粉内部产生缺陷较少,没出现明显的反磁畴,对 $A$ 的影响很小,所以当压力

不断增大时磁能积仍呈上升趋势.

### 2.2 样品尺寸对磁性能的影响

图3为用MQ粉制成的直径10 mm和13 mm样品在不同压力下剩磁和最大磁能积的变化曲线.

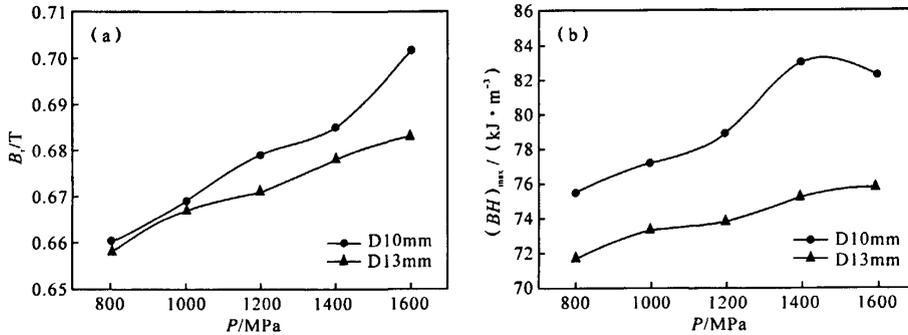


图3 不同直径磁体磁性能的对比

(a) 剩磁随压力变化的曲线;(b) 最大磁能积随压力变化的曲线

Fig.3 The magnetic properties of magnets with different diameters

(a)  $B_r$  versus pressure; (b)  $(BH)_{max}$  versus pressure

在压制磁体的过程中混合粉首先发生相对位移,使孔隙之间的空气逐步向外逸出.颗粒间相互啮合,在接触处先产生弹性变形,随之发生塑性变形,以及脆性断裂(亦称冷焊现象)<sup>[5]</sup>,颗粒间从点接触转变为面接触.同时在压力的作用下,磁粉颗粒之间相对移动存在内摩擦力;磁粉在模腔中移动产生外摩擦力,这种摩擦力随模压压力增大而增加,并对模壁横向产生一定的压力,即为侧压力,它们之间的关系如下式:

$$F_{外} = \mu F_{侧} \quad (2)$$

$$P = F/S \quad (3)$$

式(2)中 $\mu$ 为模壁的摩擦系数, $F_{侧}$ 为模壁对磁粉的侧压力, $F_{外}$ 为外摩擦力.由压强的计算公式(3)可知,在单位面积压力 $P$ 不变的前提下,横截面积 $S$ 变大则 $F$ 变大,随着 $F$ 的增大 $F_{侧}$ 增大.由(2)式可知, $F_{外}$ 也将变大,即大直径磁体的外摩擦力大

由图3可以看出,两者的 $B_r$ 和 $(BH)_{max}$ 都随着压力的增大呈上升趋势,但直径10 mm磁体的磁性能明显高于直径13 mm磁体.

于小直径磁体.随着 $F_{外}$ 的增大,颗粒之间的相互流动受到限制,这将引起压坯密度分布不均,导致内应力增大,从而引起磁体的 $B_r$ 和 $(BH)_{max}$ 下降.因此,直径13 mm磁体的磁性能低于直径10 mm的磁性能.

### 2.3 磁粉包覆的均匀性对磁性能的影响

磁粉的包覆即磁粉与粘结剂之间的混合,是粘结磁体制作过程中很重要的环节,磁粉包覆的好坏直接影响磁体的磁性能.如果在磁粉中加入添加剂和溶剂后没有及时充分地搅拌,磁粉很容易团聚,流动性也很差,压制后不能得到致密的磁体,直接影响磁体的性能.在模压温度为100℃、模压压力为1400 MPa的条件下,MQ磁粉的包覆均匀性对磁体性能的影响列于表2.

表2 磁粉包覆的均匀性对磁性能的影响

Table 2 The effect of coating uniformity on magnetic properties

均匀性	$B_r$ / T	$H_g$ / (kA·m <sup>-1</sup> )	$H_{cb}$ / (kA·m <sup>-1</sup> )	$(BH)_{max}$ / (kJ·m <sup>-3</sup> )
包覆均匀	0.719	1052	467.5	83.6
包覆不均匀	0.702	1042	445.6	80.2

添加剂中的偶联剂相当于在磁粉表面覆上了一层薄膜,可以改善磁粉表面的结合状态,使粘结剂在磁粉颗粒表面分布均匀,减少磁体在压制和充磁过程中的氧化,及在充磁过程中磁粉颗粒在磁场中的旋转和取向,最终使磁体中磁粉颗粒的原子磁矩取向一致,原子磁矩的方向性好,从而使磁体的磁性能得以提高<sup>[6-7]</sup>。此外,偶联剂只有在磁粉表面形成单分子层结构才能获得良好的分散性、润湿性和偶联效率,从而改变磁粉外部的表面能,提高磁粉的流动性和在树脂中的分散能力<sup>[8]</sup>。

当加入添加剂和溶剂后,如果没有及时充分的搅拌,磁粉很容易发生块状偏聚,这必然导致有的磁粉之间粘结剂很少甚至没有粘结剂,从而引起磁体各部分的密度差异加大。即在模压过程中混合粉不能致密地压制成型,造成大量的空隙,使磁体的密度和磁性能下降。同时,磁粉包覆不均匀也将导致在固化过程中各部分热膨胀不一致,在磁体内部产生应力,使磁体固化后发生断层现象,这也将严重影响磁体的最终性能。

### 3 结论

模压成型时,压力增大可以增加磁体的密度,提高磁性能。但压力过大,颗粒变形而产生的反向畴会引起正向畴体积分数的减小,从而引起磁性能的显著恶化。对于 SQP-A<sup>+</sup>粉,模压压力为 1000 MPa 较合适。用 MQ 粉制备的磁体的性能显著高于用

SQP-A<sup>+</sup>粉。对于同一种磁粉,在压力不变的前提下,大直径磁体的磁性能低于小直径磁体。对磁粉进行包覆处理时,要及时充分搅拌,以保证溶剂充分挥发,避免磁粉团聚,从而提高磁体性能。

#### 参考文献:

- [1] 李文学,任慧平,周维娜,等.成型工艺对粘结钕铁硼永磁材料磁性能的影响[J].稀土,2006,27(3):85-87.
- [2] BROWN D, MA Bao-min, CHEN Zhongmin. Developments in the processing and properties of NdFeB-type permanent magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2002,248:432-440.
- [3] 白书欣,吕丽,张虹. Nd-Fe-B 磁粉对粘结磁体性能的影响[J]. 磁性材料及器件,2002,33(6):6-8.
- [4] 周寿增,董清飞. 超强永磁体—稀土铁系永磁材料[M]. 北京:冶金工业出版社,1999:66.
- [5] 张华诚. 粉末冶金实用工艺学[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:103.
- [6] SPELIOTIS T, NIARCHOS D, SKUMRYEV V. Effect of post deposition annealing on the hysteresis loops of sputtered NdFeB films[J]. J Magn Magn Mater,2004,87(7):272-276.
- [7] 赵东林,卢振明,沈曾民. 镀 Ni<sub>2</sub>P 和 Ni<sub>2</sub>N 合金碳纳米管的磁性能及其复合材料的微波吸收性能[J]. 复合材料学报,2004,21(3):4-58.
- [8] 毋伟,贾梦秋,陈建峰,等. 硅烷偶联剂对溶胶凝胶法纳米二氧化硅复合材料制备及应用的影响[J]. 复合材料学报,2004,21(2):70-76.

## A study on the processing of bonded NdFeB magnets

HE Hong-ying, ZHANG Min-gang, YAN Xiao-yan

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The magnetic properties of magnets made of MQ powder and SQP-A<sup>+</sup> powder respectively at different molding pressure were investigated in this paper. It was found that properties of MQ magnets were significantly higher than those of SQP-A<sup>+</sup>, properties of MQ magnets with a big diameter were lower than that of the small one. The coating uniformity of powder can be improved by fully agitation after adding the additives. The optimally magnetic properties, obtained under 100°C molding temperature and 1400 MPa molding pressure for MQ powder, were that  $B_r$  of 0.719T,  $H_c$  of 1052kA/m,  $H_{cb}$  of 467.5kA/m and  $(BH)_{max}$  of 83.6 kJ/m<sup>3</sup>.

**Key words:** bonded NdFeB magnets; molding pressure; molding temperature; magnetic properties