

第六届全国钹铁硼会议

论文集



中国黄山市

全国磁性材料与器件行业协会

1996年10月15日

目 录

Nd-Fe-B系永磁体新进展	(1)
钕铁硼永磁材料发展概况	(8)
国内外粘钕铁硼永磁发展现状及预测	(27)
钕铁硼永磁建厂、生产二年经验总结报告	(30)
工业生产钕铁硼磁体氧含量的影响因素	(32)
介绍一种生产N40高性能NdFeB磁体的方法	(35)
特高矫顽力永磁体的研究和生产	(37)
关于双相烧结NdFeB磁体工艺的讨论	(39)
高性能 α -Fe/Nd ₂ Fe ₁₄ B稀土永磁材料的研究	(41)
NdFeB合金的腐蚀行为与涂层保护	(43)
高性能RFeB合金凝固组织的研究	(45)
快淬(NdPr)Fe ₁₄ B/ α -Fe双相纳米复合永磁研究	(47)
(NdPr)-Fe-B-Al烧结永磁材料的研究	(49)
合金元素对NdFeBo烧结永磁材料显微结构的影响及提高磁体强度的径 ^送	(51)
含有混合稀土的(MmPr)-Fe-B烧结永磁制作工艺	(55)
低钕铁基复相稀土永磁材料的研制和生产	(58)
烧结NdFeB薄磁瓦新工艺的研究报告	(64)
钕铁硼永磁电机发展前景分析	(67)
研究一致性问题的数学方法	(70)
NdFeB液相烧结的动力学研究	(72)
批量生产微小型粘结NdFeB磁体工艺探讨	(74)
NdFeB合金中富硼相(Nd _{11.1} Fe ₄ B)的超高压电镜和穆斯堡尔谱学研究	(76)
化合物Nd ₂ Fe ₁₇ N _x 的交换耦合和磁性(x=0.3)	(82)
铁基稀土永磁的结构缺陷和矫顽力	(84)
NdFeB快淬工艺研究	(88)
氢化法生产各向同性NdFeB磁粉	(93)
加铅、铈、镱的钕铁硼粘结磁体	(94)
添加物对NdFeB磁体的影响	(97)
具有改良热稳定性的高矫顽力NdFeB磁体的工艺技术探讨	(101)
双向浮动压制在钕铁硼成型中的应用	(105)

有关NdFeB干压磁场成型取向要上新台阶的探讨·····	(109)
多元高梯度永磁强磁磁选机·····	(111)
深扁长结构的水冷钢锭铜模·····	(121)
人工神经网络对烧结型NdFeB永磁合金配方的优化·····	(123)
一种适应症厂的高效磁疗器·····	(127)
稀土永磁粘胶除铁降粘装置·····	(129)
大尺寸钕铁硼磁性能无损检验设备在钕铁硼生产中的应用·····	(131)
油冷压制取向电磁铁在钕铁硼生产中的应用·····	(133)
钕铁硼磁铁的磁性能测量和分选·····	(135)

读者注意

1. 爱护公共图书切勿任意卷折和涂写，损坏或遗失照章赔偿。
2. 请在借书期限前送还以便他人阅读请予合作。

成1106-1

Nd-Fe-B 系永磁体新近进展

唐与谏

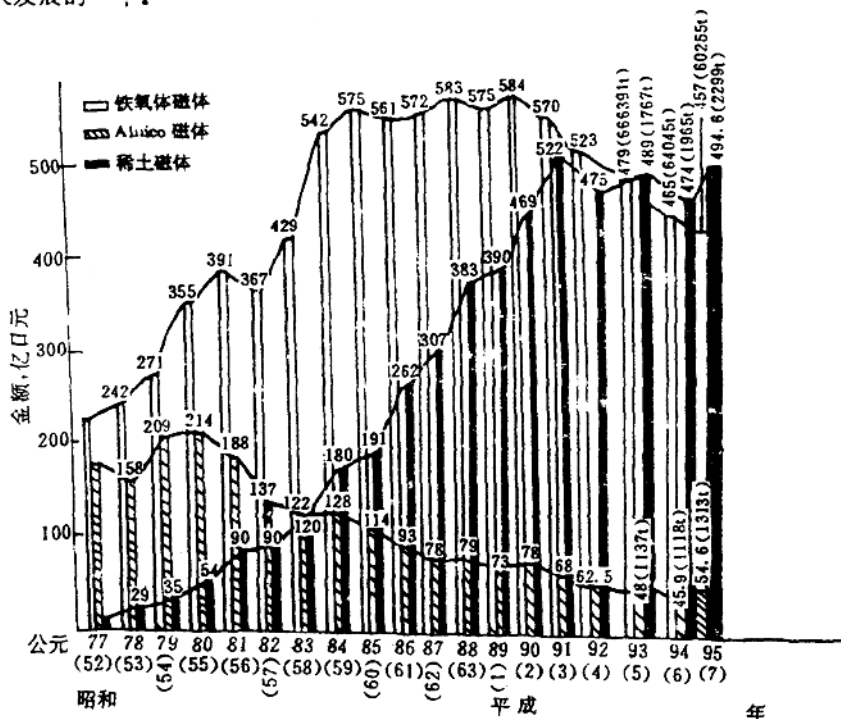
(冶金部钢铁研究总院 北京市 100081)

赵凤山

(北京奥瑞特磁体材料有限公司 北京市 100084)

1 前言

近两年来, Nd-Fe-B 系永磁体的生产、研究开发工作发展迅速。预计, 1995 年全球的 Nd-Fe-B 系永磁体的产量超过 5500t。日本 1995 年稀土永磁体产量达 2299t (年增长率为 17%), 其中绝大部分是烧结 Nd-Fe-B 系磁体, 如图 1 所示; 1995 年的稀土粘结磁体可望达到 545t (Nd-Fe-B 系粘结磁体约 485t)。日本是生产 Nd-Fe-B 系永磁体最多的国家, 其产量约占世界总产量的 50%。中国 1995 年 Nd-Fe-B 系磁体的产量约 1700t (1994 年约 1200t), 年增长率为 $\approx 41\%$, 已成为世界上生产 Nd-Fe-B 系磁体的第二大国。目前, 中国几乎全是烧结 Nd-Fe-B 系磁体。在美国的中美合营的 Magnequench International Inc. 1995 年生产的快淬 Nd-Fe-B 系磁体合金粉末超过 1000t。显然, 1995 年是 Nd-Fe-B 系磁体大发展的一年。



1 日本永磁材料产值的变化

Nd-Fe-B 系磁体的大发展主要是由于其应用的不断扩大所致。随着磁体器件,尤其是信息、通信领域所用器件(如 HDD、FDD、CD-ROM、FAX 等)的小型化、轻量化、高速化、低噪声化,近来不断推出高性能 Nd-Fe-B 系磁体;为了适应潜在的应用领域(如汽车等)的需要,目前还在积极开发耐热耐蚀高性能 Nd-Fe-B 系磁体。总之,近两年在开发新工艺、新材料方面也是非常活跃的。

2 烧结 Nd-Fe-B 系磁体

烧结 Nd-Fe-B 系磁体在美国和欧洲主要用于信息领域,例如用于 VCM(音圈电动机)的磁体约占 Nd-Fe-B 系烧结磁体总用量的 70%;近年来,日本在这方面的应用也超过 50%,如日本 1994 年烧结 Nd-Fe-B 磁体应用领域所示:(1)VCM 54%;(2)各种电动机 17%;(3)MRI(磁共振诊断装置) 11%;(4)音响器件(扬声器等) 5%;(5)通信、仪表等 5%;(6)其他 8%。

近两年,在材料开发方面,主要集中如下两方面。

2.1 高性能 Nd-Fe-B 系磁体^[1,2]

目前,烧结 Nd-Fe-B 磁体的实验室最高水平为:最大磁能积 $(BH)_{\max} = 433\text{kJ/m}^3$ (54.2MGOe)、剩磁 $B_r = 1.495\text{T}$ (14.95kG)、内禀矫顽力 $H_c = 845\text{kA/m}$ (10.62kOe),其退磁曲线如图 2 所示。

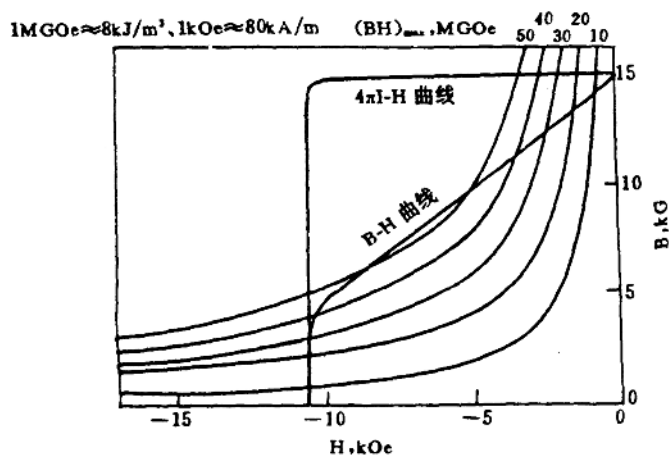


图 2 新开发磁体的退磁曲线

$$B_r = 1.495\text{T}, H_c = 845\text{kA/m}, (BH)_{\max} = 433.6\text{kJ/m}^3 (54.2\text{MGOe}),$$

$$iH_c = 849.6\text{kA/m}, H_i = 839.2\text{kA/m}$$

获得高性能 $[(BH)_{\max} \geq 360\text{kJ/m}^3 (45\text{MGOe})]$ 烧结 Nd-Fe-B 系磁体,主要是通过如下几种方法实现的:

2.1.1 采用橡胶模等静压(RIP)技术

利用 RIP 技术,可将 $(BH)_{\max}$ 值提高 24kJ/m^3 (3MGOe),如图 3 所示。

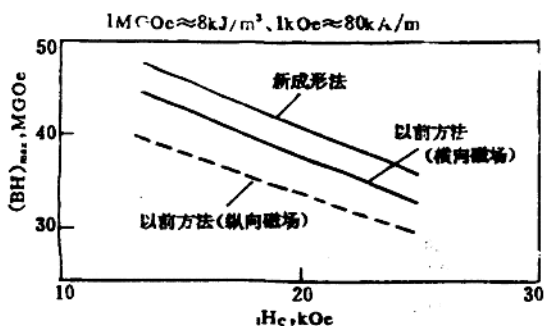


图3 采用不同成形法得到的Nd-Fe-B系统烧结磁体的内禀矫顽力 iH_c 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 的比较

2.1.2 采用控制微粉粒度分布和等静压技术

利用这种技术的同时,得到高体积分数($>95\text{vol}\%$)的 T_1 相($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相)是非常重要的。图4示出Nd-Fe-B烧结磁体的 iH_c 和 $(BH)_{max}$ 随 T_1 相体积分数的变化。

2.1.3 采用两合金法制造技术

利用这种技术,容易实现工业生产高性能烧结Nd-Fe-B磁体。图5示出利用两合金法制造的高性能Nd-Fe-B磁体系列。

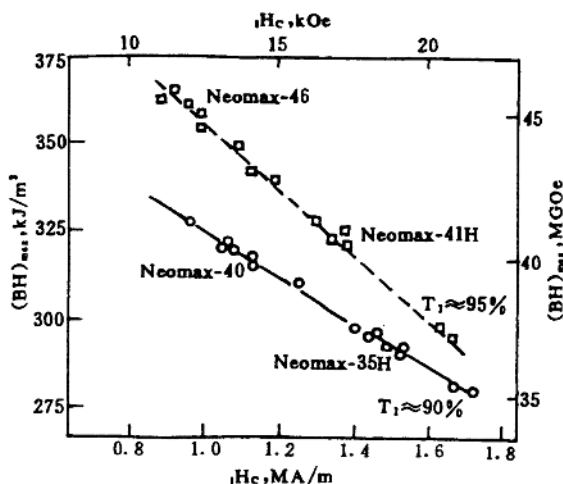


图4 Nd-Fe-B烧结磁体的内禀矫顽力 iH_c 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 随 T_1 相体积分数的变化

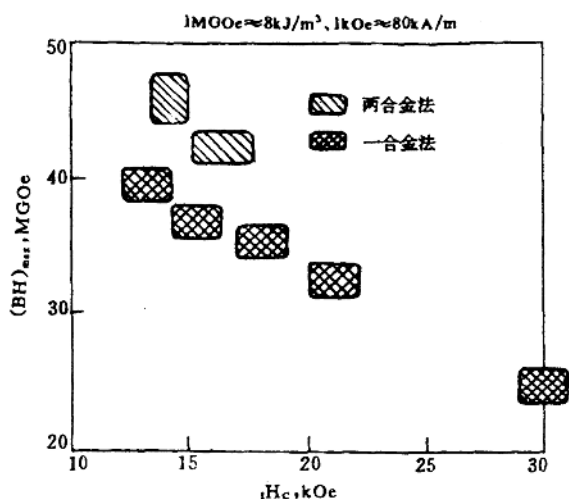


图5 用两合金法制造的新型Nd-Fe-B系磁体

2.1.4 采用湿式磁场成形技术

利用这种成形技术,可以工业生产 $(BH)_{max}$ 高于 416kJ/m^3 (52MGOe)的烧结Nd-Fe-B磁体。这样得到的磁体中残存的氧浓度和非磁性夹杂物(重量)含有率比干式成形品低 $1/3$,并且晶粒粒径均一且微细。

通常所说的 50MGOe (400kJ/m^3)级的磁体,大都是指 $(BH)_{max} \geq 352\text{kJ/m}^3$ (44MGOe)的磁体,因为 $(BH)_{max}$ 值需与 H_c 值搭配。例如,TDK公司的这类产品根据矫顽力值的不同而分为六个牌号,其中Neorec-50的 $H_c \geq 800\text{kA/m}$ 、Neorec-47B的 $H_c \geq 1120\text{kA/m}$ 、Neorec-44的 $H_c \geq 1360\text{kA/m}$ 。

2.2 耐热、耐蚀Nd-Fe-B系磁体^[2]

该类磁体主要为扩大Nd-Fe-B系磁体的应用领域而开发的。目标是能在 200°C 的环境下工作而不严重恶化永磁体特性。通常的要求是:在较高的温度下(如 180°C 、 200°C)的不可逆磁通损失 $< 5\%$ 。目前,大部分是通过开发高 H_c (H_c 达 2500kA/m)的Nd-Fe-B系磁体来实现的,相应的 $(BH)_{max}$ 值有所降低。目前,许多Nd-Fe-B磁体生产厂都推出这种高 H_c 磁体。

获得这类磁体的途径主要是调整磁体合金的组成,有些制造高磁能积Nd-Fe-B烧结磁体的技术也适于制造高 H_c 烧结Nd-Fe-B磁体。

至于耐蚀Nd-Fe-B磁体,除调整成分外,有的还要进行表面处理^[2]。

3 粘结Nd-Fe-B系磁体^[3]

目前,市场上出售的大都是各向同性粘结Nd-Fe-B系磁体。所用磁体合金粉末主要或全部来自美国GM公司,现为中美合营的Magnequench International Inc. (MQI)。日本是生产粘结Nd-Fe-B磁体的最多的国家,从美国进口的快淬Nd-Fe-B磁体合金粉末逐年增加,1994年 $\approx 700\text{t}$ 、1995年 $\approx 1100\text{t}$ 。预计,1997年全球粘结磁体用Nd-Fe-B粉末的需要量将达 2000t 。当然,日本是其用户。表1示出日本稀土粘结磁体的生产推移(日本粘结磁体协会资料)。可以看出,日本稀土粘结磁体的产量是不断增加的。其中主要是Nd-Fe-B系粘结磁体,例如1994年的 516t 粘结磁体中有 460t 是Nd-Fe-B系粘结磁体。

表1 日本稀土粘结磁体的生产推移

年	1990	1991	1992	1993	1994	1995*
数量,t	349	420	463	487	516	545
(与前一年比)		(20.3%)	(+10.2%)	(+5.2%)	(+6%)	—
金额,亿日元	—	110	108	112	117	122
(与前一年比)			(-1.8%)	(+4%)	(+4%)	

* 预测值

粘结稀土磁体的各应用领域(1994年,以重量为基础计算)所占比率如下:(1)主轴电动机 40%;(2)步进电动机 26%;(3)无刷电动机 20%;(4)其他 14%。最终市场将为:(1)计算机 50%;(2)OA装置 10%;(3)汽车电气仪表 9%;(4)家电 9%;(6)其他 22%。

日本Nd-Fe-B系粘结磁体的主要生产厂家及其所占的比率为:(1)Seiko Epson 35%;(2)松下电器产业 23%;(3)大同特殊钢 22%;(4)其他 20%。

稀土粘结磁体主要用于电动机,而且电动机所用的稀土粘结磁体的比例愈来愈大。1992年电动机中使用的烧结稀土磁体占51%(330t)、粘结稀土磁体占49%(315t);1994年则分别为37%(330t)和63%(560t)。

松下电器产业株式会社制造的电动机所用Nd-Fe-B系粘结磁体的变化如表2所示。

表2 松下电动机用Nd-Fe-B系粘结磁体(t)

年	1993	1994	1995	1996	1997
日本国内	19	30	33	40	60
海外(东南亚等)	41	45	54	80	90
合计	60	75	87	120	150

最近在材料开发方面取得明显进展的项目如下。

3.1 耐热性Nd-Fe-B系粘结磁体

最近推出的能耐180℃的Nd-Fe-B系粘结磁体有压缩成型的NP-8SR和注射成型的NP-6SR。NP-8SR的特性为: $B_r=0.55\sim 0.65T$, $H_c=880\sim 1120kA/m$, $(BH)_{max}=56\sim 72kJ/m^3$, B_r 的温度系数 $\alpha=-0.12\%/^{\circ}C$ 、密度 $d=5.8\sim 6.1g/cm^3$;NP-6SR的特性为: $B_r=0.45\sim 0.50T$, $H_c=880\sim 1120kA/m$, $(BH)_{max}=36\sim 44kJ/m^3$, $\alpha=-0.12\%/^{\circ}C$, $d=5.0\sim 5.5g/cm^3$ 。这类磁体将有助于推动Nd-Fe-B系磁体在汽车方面的应用。

3.2 各向异性 Nd-Fe-B 系粘结磁体

日本三菱材料株式会社开发的各向异性 HDDR Nd-Fe-B 系粘结磁体 Diamax-NA 开始工业化。Diamax-NA 的磁特性为： $(BH)_{max} = 120 \sim 135 \text{kJ/m}^3 (15 \sim 17 \text{MGOe})$ 、 $B_r = 0.87 \sim 0.90 \text{T}$ 、 $H_c = 0.96 \sim 1.10 \text{MA/m}$ 、 B_r 的温度系数 $= -0.09\%/^{\circ}\text{C}$ 、 H_c 的温度系数 $= -0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 。

日本爱知制钢株式会社最近确立了工业生产各向异性 Nd-Fe-B 粘结磁体 Magfine 17 的生产技术(使用 HDDR Nd-Fe-B 合金粉末)。Magfine 17 的 $(BH)_{max} = 136 \text{kJ/m}^3 (17 \text{MGOe})$ 。该公司的技术特点是,在树脂熔融、硬化之前的瞬间在磁场中进行压缩成形,即磁场温压(参见图 6 和图 7)。据称, Magfine 17 粘结磁体的第一个应用是家庭净化槽振子磁体,每个振子磁体为 120g,日本国内的潜在市场为 1200t。

该类高性能 Nd-Fe-B 粘结磁体的目标是 $(BH)_{max}$ 达到 $200 \text{kJ/m}^3 (25 \text{MGOe})$ 。

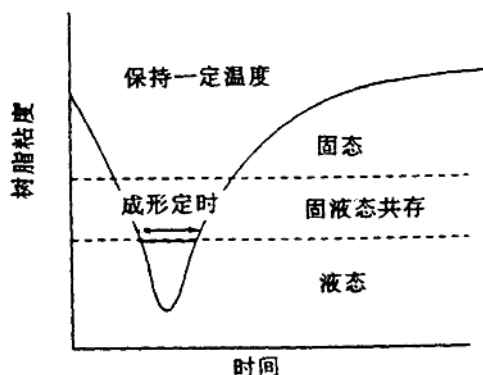


图 6 磁场中温压原理

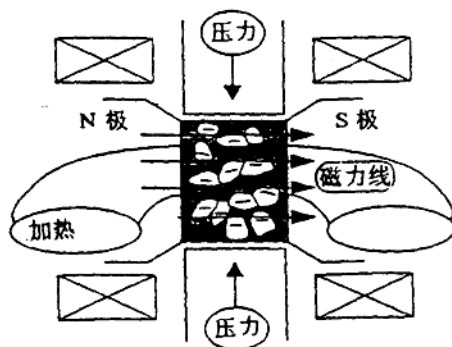


图 7 磁场中温压

3.3 弹簧-交换磁体

最近日本住友特殊金属株式会社把低Nd($\approx 4\text{at}\% \text{Nd}$)的纳米晶Nd-Fe-B粘结磁体(交换-弹簧磁体)工业化。该类磁体是低成本高性能的各向同性粘结磁体,其组成和特性示于表3。可以看出:该类磁体的 $(\text{BH})_{\text{max}}$ 可达 $72.4\text{kJ/m}^3(9\text{MGOe})$, H_c 可达 $597.1\text{kA/m}(7500\text{Oe})$ 。

表3 纳米晶Nd-Fe-B压缩成形粘结磁体的组成和特性

材料牌号	组成,at%	B_r T	H_c kA/m	$(\text{BH})_{\text{max}}$ kJ/m ³	d Mg/m ³
SP 280	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{7x.5}\text{B}_{12.5}\text{Co}_1\text{Si}_1$	0.90	278.7	58.1	5.9
SP 310	$\text{Nd}_{2.5}\text{Fe}_{7.5}\text{B}_{12.5}\text{Co}_2\text{Ga}_1$	0.86	310.5	66.1	6.0
SP 360	$\text{Nd}_{2.5}\text{Dy}_1\text{Fe}_{7.5}\text{B}_{12.5}\text{Co}_2\text{Ga}_1$	0.84	358.3	72.4	6.1
SP 460	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{7x.5}\text{B}_{12.5}\text{Co}_2\text{Cr}_1$	0.70	461.8	53.3	6.0
SP 600	$\text{Nd}_{2.5}\text{Fe}_{6.5}\text{B}_{12.5}\text{Co}_1\text{Cr}_1$	0.59	597.1	47.8	6.1

d—成型密度

粘结磁体适于制作具有复杂形状、尺寸精度高的部件,如环形薄壁磁体,因此,许多厂家十分重视高压环强度薄壁环形粘结磁体的开发。现已推出高 $(\text{BH})_{\text{max}}$ (80kJ/m^3)、高强度(为压缩成形磁体的1.6倍)的挤压成形粘结Nd-Fe-B磁体。

4 总结

从近两年Nd-Fe-B系磁体的发展可以清楚地看出该领域有如下的趋势。

4.1 Nd-Fe-B系磁体产业正处于大发展时期,中国将成为Nd-Fe-B系磁体生产的第一大国。

4.2 高性能Nd-Fe-B系磁体(包括烧结磁体、粘结磁体)是当前的开发热点。为了实现高性能磁体的产业化,工艺技术的开发极为重要。

4.3 弹簧-交换磁体将是今后值得注意的方面。

4.4 Sm-Fe-N/C系磁体将受到重视。由于Nd量的需求的急剧增加以及Nd-Fe-B系磁体的一些固有缺点,有可能促使Sm-Fe-N/C系磁体的加速开发。

5 参考资料

- 1 唐与谋,高性能Nd-Fe-B系磁体的制造方法,冶金部钢铁研究总院内部资料,1994年
- 2 唐与谋,耐热、耐蚀Nd-Fe-B系磁体,冶金部钢铁研究总院内部资料,1995年
- 3 唐与谋,稀土粘结磁体,印制中。

钕铁硼永磁材料发展概况

刘英烈

(中国科学院 北京三环新材料高技术公司 邮编:100080)

一、市场

1. 世界钕铁硼永磁材料发展现状和市场预测

钕铁硼永磁材料走上市场以来已经有 10 年的历史,这 10 年中钕铁硼永磁材料的技术和市场有了惊人的发展。表 1 给出世界范围内钕铁硼永磁材料产量逐年变化的情况。

这里特别指出,粘结 NdFeB 市场增长率在所有各种永磁材料中是最快的。各向同性 NdFeB 粘结磁体 1994 年全世界产量为 840 吨。而到 2004 年市场需求量将达到 6300 吨。各向异性 NdFeB 粘结磁体目前尚未批量生产,但到 2004 年市场对各向异性 NdFeB 粘结磁体的需求量可达到 5300 多吨。

表 1 世界 NdFeB 永磁材料的产量

年份	烧结 NdFeB (T)					粘结 NdFeB (T)			
	日本	中国	美国	欧洲	合计	日本	美国	欧洲	合计
1985	45	10	12	5	72				
1986	97	20	22	16	155	1	4	—	5
1987	147	40	35	23	245	20	19	1	40
1988	320	75	74	51	520	100	60	5	165
1989	460	120	110	75	765	152	90	13	255
1990	910	180	230	110	1430	250	40	20	310
1991	1100	340	300	120	1860	350	45	20	415
1992	1200	490	350	130	2170	460	60	15	535
1993	1435	740	430	185	2790	520	70	20	610
1994	1555	1120	645	250	3570	710	90	40	840

表 2 和表 3 分别给出西方世界和中国 1994 年 NdFeB 永磁材料的销售额和对 2004 年市场的预测。做为参考和比较,表中也给出其他几种永磁材料相应的数据。

表 2 西方世界市场预测(百万美元)

材 料	1994	2004
粘结 NdFeB	65	819
烧结 NdFeB	577	3034
粘结 SmCo	170	231
烧结 SmCo	231	517
粘结铁氧体	690	1153
烧结铁氧体	1000	2100
AlNiCo	210	252
总 计	2951	8106

表 3 中国市场预测(百万美元)

材 料	1994	2004
铁氧体	147	441
NdFeB	89	712
AlNiCo	46	110
SmCo	30	86
总 计	320	1349

2. 中国钕铁硼永磁材料发展情况

目前中国钕铁硼永磁材料工业是以烧结钕铁硼永磁材料为主,而粘结钕铁硼永磁材料仅处于起步阶段。

表 4 给出 1985 年到 1994 年中国烧结钕铁硼永磁材料产量逐年增长的情况。

由表 4 可以看到中国烧结钕铁硼永磁材料工业从开始到现在一直以极高的速度在发展,近年来产量的年增长率均在 50%左右。1994 年中国烧结钕铁硼永磁材料的产量达 1120 吨(指售出的成品)约占全世界总产量的 1/3,仅次于日本,居世界第 2 位。

由表 4 也可看到,从 85 年到 90 年这一期间中国烧结钕铁硼永磁材料的产量一直约占世界总产量的 15%上下。这说明在这一期间中国烧结钕铁硼工业的发展速度大体上与欧美日相当。但 1991 年以后情况发生了变化,从 91 年到 94 年中国烧结钕铁硼永磁材料产量占世界总产量的百分比由 18.3%逐年稳步增长到 31.4%,这说明在这一期间中国烧结钕铁硼工业的发展速度明显优于欧美日。按这样的发展速度发展下去,在不久的将来中

国烧结钕铁硼永磁材料的产量一定会超过日本,而跃居世界首位。到那时中国就成为名符其实的永磁材料生产大国。

表 4 中国烧结钕铁硼永磁材料的年产量

年 份	中国产量 (吨)	全世界总产量 (吨)	中国产量占世界 总产量百分比(%)	中国产量的年 增长率(%)
1985	10	72	13.9	
1986	20	155	12.9	100
1987	40	245	16.3	100
1988	75	520	14.4	88
1989	120	765	15.7	60
1990	180	1430	12.6	50
1991	340	1860	18.3	89
1992	490	2170	22.6	44
1993	740	2790	26.5	51
1994	1120	3570	31.4	51
1995	1782			59

3. 烧结钕铁硼永磁材料的应用

自从烧结 NdFeB 永磁材料走上市场以来,其最主要的应用领域一直是 VCM(voice coil moter)。估计 2000 年以前会一直保持这一状态。90 年代西方世界生产的烧结 NdFeB 永磁材料大约有一半用于 VCM。中国生产的烧结 NdFeB 永磁材料目前尚未进入这一应用领域。

表 5 1962 年到 1992 年 VMC 的变化

VCM 特征	1962	1992
存取时间	600ms	10ms
永磁体类型	AlNiCo	NdFeB
VCM 的重量	54.5Kg	23.4g
VCM 的成本	1000—2000 美元	10—50 美元
间隙磁通密度	5000G	8000G
组装环境	工厂	100 级超净房间
磁体涂层	无	镀 Ni
VCM 的设计	直线	旋转
环境试验	无	85°C RH85% 1500 小时

VCM 是用于驱动磁盘驱动器读写磁头的装置。实际是一个线圈在强磁场中运动,线

圈可在 $\frac{1}{1000}$ 秒时间内启动或停止。早期的 VCM 中使用的永磁体是 AlNiCo, 而 NdFeB 的出现使 VCM 发生了革命性的变化。表 5 给出 1962 年到 1992 年 VCM 的变化情况。

由于计算机工业的迅速发展, 对磁盘驱动器的需要量也急剧地增加, 1992 年为 3500 万台(需要 NdFeB 磁体 840 吨), 1994 年为 4300 万台(需要 NdFeB 磁体 1030 吨)。

表 6 给出西方世界烧结 NdFeB 磁体应用领域分布情况。由表 6 可以看到除了 VCM 以外应用较多的领域是电动机和发电机。随着汽车工业的发展, 今后这一领域对 NdFeB 磁体的需求量将有较大的增长。

表 6 1993 年烧结 NdFeB 磁体应用领域分布

应用领域	日本		美国		欧洲		西方世界	
	重量(T)	%	重量(T)	%	重量(T)	%	重量(T)	%
音响设备	55	4	25	8	20	11	100	5
电动机发电机	210	15	75	25	45	25	330	17
VCM	805	56	150	50	75	42	1030	54
MRI	210	15	—	—	—	—	210	11
通讯、控制、仪表	70	5	15	5	15	8	100	5
其他	80	5	35	12	25	14	140	8
总计	1430	100	300	100	180	100	1910	100

近年烧结 NdFeB 磁体出现了一些新的应用领域, 一个是用于电动车辆, 电动汽车是汽车发展的重要方向, 目前日本已有约 2000 辆在使用中, 预计在 2000 年美国将有 30 万辆电动汽车, 需要上百吨的 NdFeB 磁体。在亚洲电动自行车, 电动摩托车也在发展中。另一个是涡流制动器减速系统, 是卡车和大轿车制动器的附属系统。欧美原来使用的是电磁减速器和液压减速器, 缺点是大而重, 约 200—300kg。1991 年日本首先将烧结 NdFeB 磁体用于减速器, 优点是轻, 仅 40kg, 结构简单、可靠耐用, 很有发展前途。

4. NdFeB 粘结磁体的应用

稀土粘结磁体主要用于各种小型电机。现在以生产稀土粘结磁体最多的国家日本来说明这一点。用产值来计算, 日本 1991 年生产的稀土粘结磁体 79% 用于各种小型电机, 13% 用于传感器和仪表等, 8% 用于其他方面。

稀土粘结磁体很容易做成高精度的径向取向环, 这种环大量用在直流无刷电机上, 特别是其中的步进电机。

直流无刷电机动作准确、快、寿命长、噪音低、工作温度低。特别是其中的步进电机可进行开环数字控制, 最适合于与计算机控制技术相配合使用。

直流无刷电机已广泛地用于各种工业领域, 特别是家用电器和计算机外围设备。汽车上电机也开始无刷化。

80年代微机在各个领域的普及和数字技术的发展,极大地促进了作为动力部件的稀土粘结磁体的发展。今后,努力开发新的应用领域、提高磁性、降低成本是90年代稀土粘结磁体发展的关键。90年代开发新的应用领域,仍将以电机为主,特别是家用电器用和汽车用电机是主要目标。家用电器方面:空调、洗衣机、电冰箱、除尘器等,汽车方面:汽车上的所有电机。电机输出功率将不仅是30W以下的小型电机,而将进入数十瓦到数百瓦的大型电机。总之90年代将是开发大型直流无刷电机新应用领域的时代。

二、技术

1. 烧结 NdFeB 永磁材料

10年来烧结 NdFeB 永磁材料的生产技术有了很大的提高,目前日本一些厂家已经可以批量生产 N48,44H,39SH 和 33UH 档次的产品。1995年日本住友特殊金属公司宣布已开发出 N50 的产品,并可批量进行生产。中国烧结 NdFeB 永磁材料的生产技术与国际水平相比尚有一定的差距,多数厂家只能生产 N35、33H、30SH、24UH 档次的产品,只有少数厂家可生产 N38、N40、35H、33SH、27UH 档次的产品。

目前无论国际上还是在中国,烧结 NdFeB 永磁材料的开发方向都是在磁性能、抗氧化性、温度特性三个方面使产品高性能化。

生产高磁能积烧结 NdFeB 永磁材料要从下述四个方向上进行工作:

(1) 提高烧结 NdFeB 磁体中磁性相的磁化强度。

大量的实验已经证明,除元素 Co 以外,用任何元素置换 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 中的 Nd 或 Fe 都导致磁性相磁化强度的降低。但烧结 NdFeB 中用 Co 置换部分 Fe 后在晶粒边界会生成非磁性相 Nd_3Co ,使磁性相比例减少,故用加 Co 的方法增加磁性相的磁化强度不能被有效的利用。

实际上要做的工作是尽量降低原材料中有害杂质(如 C、Si、...)的含量,从而使烧结 NdFeB 中磁性相的磁化强度由于杂质引起的降低减到最低限度。总之要在原材料的纯度上下功夫。

(2) 使 NdFeB 磁体的密度接近理论密度值

(3) 增加烧结 NdFeB 磁体中磁性相的体积比,使非磁性相的体积比率降为最低。

为了实现上述要求,应使烧结 NdFeB 成分接近 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 单相的组成。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 单相中 Nd 占的重量百分比约为 26.7%。目前中国各厂家生产烧结 NdFeB 磁体所用的配方中,总稀土元素所占的重量百分比为 34%左右。多余的 Nd 一部分生成必需的富 Nd 相,另一部分被氧化生成 Nd_2O_3 。

由上述分析我们可以看到,要想增加烧结 NdFeB 磁体中的磁性相,减少非磁性相,首先要在整个生产工艺中防止氧化,其次在保证足够大矫顽力的前提下尽量减少富 Nd 相。

(4) 提高磁性相的取向度。

一方面在熔炼和制粉两个工艺过程中要保证每个颗粒都是单晶颗粒或准单晶颗粒。为此熔炼后形成的铸锭要有较好的晶粒结构,粉碎后颗粒分布要窄,平均颗粒度在 3μ 左

右为好。另一方面在加磁场成型的工艺过程中要有足够强的磁场,并采取措施减少颗粒间的磨擦使颗粒能克服阻力在磁场方向排列好。

日本住友特殊金属公司在上述四个方向上进行了认真的工作,取得了很好的结果,表7给出日本住友特殊金属公司高磁能积系列1995年新产品的磁性能。

表7 日本1995年高磁能积系列新产品

压制方式	型号	Br (KG)		H _c (KOe)			(BH) _{max} (MGOe)	
				iH _c		iH _c		
		标准值	最小值	标准值	最小值	最小值	标准值	最小值
垂直压	NEDMAX-48	13.9	13.6	12.0	11.0	11	47	45
	NEOMAX-46BH	13.6	13.3	13.0	12.5	14	45	43
	NEOMAX-44H	13.3	13.0	12.6	12.1	17	43	41
平行压	NEOMAX-42	13.3	12.9	11.9	11.1	11	42	40
	NEOMAX-40BH	12.9	12.5	12.3	11.7	14	40	38
	NEOMAX-38H	12.5	12.1	12.1	11.5	17	38	36

2. 粘结 NdFeB 永磁材料

(1) 各向同性 NdFeB 粘结磁体

近年来日本大同钢铁公司与美国 GM 公司合作开发出一种高工作温度各向同性 Nd-FeB 系粘结磁体,最高工作温度为 180℃。大同钢铁公司已于 1993 年开始批量生产这种新型磁体,商品牌号是 NP-8SR(压缩成型)和 NP-6SR(注射成型)。NP-8SR 牌号粘结磁体在室温下的磁性能为:

剩磁 Br(T)	0.55—0.65
内禀矫顽力;H _c (kA/m)	875.6—1114.4(11—14KOe)
(BH) _{max} (kJ/m ³)	55.7—71.6(7—9MGOe)

用 GM 公司生产的快淬粉 MQP-A, MQP-B 制造的粘结磁体其最高工作温度分别为 150℃和 120℃。只能用于办公室自动化设备中,而不能用于汽车工业。汽车工业在未来的十年中将是粘结 NdFeB 磁体的重要应用领域,要求磁体的最高工作温度为 180℃,上述高工作温度各向同性粘结磁体正是根据这种市场需求而研制开发出来的。

这种高工作温度各向同性 NdFeB 粘结磁体是在 MQP-A 粉的基础上添加 Nb 或 Zr 而研制出来的。同时在环氧树脂中加入了一种磁粉颗粒表面包覆材料,有效地减少了结构变化引起的不可逆损失。

(2) 各向异性 NdFeB 粘结磁体

研究开发各向异性 NdFeB 粘结磁体是目前永磁材料领域最热门的话题。研究开发工作十分活跃。但目前尚未批量生产。

制备 NdFeB 各向异性磁粉目前有两种不同的工艺路线。一种是美国 GM 公司开发的 NdFeB 系各向异性磁粉,这种磁粉是将用快淬磁粉经过热压、热变形制成的各向异性

NdFeB 磁体 MQ3 粉碎而得到的。一种是 1990 年日本三菱材料公司开发的用氢处理法制备的 NdFeB 系各向异性磁粉。氢处理法又称 HDDR 方法,这一方法是建立在全新构思基础上的方法。

目前各向异性 NdFeB 粘结磁体已接近实用化。

(3) 交换耦合永磁材料(纳米晶体混合物)

这是一种以软磁相为主相的永磁材料,这一点与过去所有的永磁材料都不同,从矫顽力的形成机制来看这是一类崭新的永磁材料。因为在这一类永磁材料中晶粒的大小与畴壁的厚度很接近,软磁相与硬磁相晶粒边界的交换相互作用在矫顽力的形成上起着关键性的作用,故这类材料称为交换耦合永磁材料。这种材料是 1988 年荷兰非利浦研究实验室 Coehoorn 等人首先发现的,近年来日本住友特殊金属公司研究开发部 S. Hiroswawa 和 H. Kanekiyo 对交换耦合永磁材料进行了较系统的研究。

交换耦合永磁材料目前在研究的有两个系列,一个是 $\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系列,一个是 $\text{Fe}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系列。 Fe_3B 和 Fe 均为软磁相。

$\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系列中成份为 $\text{Nd}_5\text{Fe}_{70.5}\text{Co}_5\text{Ga}_1\text{B}_{18.5}$ 的快淬带,带的性能为 $(\text{BH})_m = 121.0\text{kJ}/\text{m}^3$ (15.2MGOe), $H_c = 340\text{kA}/\text{m}$ (4.27K0e)。联合加 Ga 和 Co 使晶粒由三元系的 50nm 细化到 20nm。晶粒细化后,晶粒间接触面积增加,从而增加了晶粒边界总的交换作用,提高了矫顽力。用 $\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系快淬粉做成的各向同性粘结磁体,目前性能可做到 $(\text{BH}) = 66.07\text{kJ}/\text{m}^3$ ($\sim 8.3\text{MGOe}$), $H_c = 310\text{kA}/\text{m}$ ($\sim 3.9\text{K0e}$), 密度 $\rho = 6\text{Mg}/\text{m}^3$, Br 的温度系数 $\alpha = -0.05\%/^\circ\text{C}$, 优于各向同性 NdFeB 粘结磁本。

$\text{Fe}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系列中成份为 $\text{Nd}_{5.5}\text{Fe}_{66}\text{B}_{18.5}\text{Cr}_5\text{Co}_5$ 的快淬带具有较好的综合磁性,带的性能达到 $(\text{BH})_m = 96.6\text{kJ}/\text{m}^3$ (12.1MGOe), $H_c = 610\text{kA}/\text{m}$ (7.66K0e)。

概括地说,交换耦合永磁材料($\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和 $\text{Fe}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 纳米晶体混合物)和 MQ-1 相比有如下优点:

- 1° 具有较高的剩磁
- 2° 具有很好的温度稳定性
- 3° 容易充磁
- 4° 颗粒在大于 $25\mu\text{m}$ 的很宽范围内磁性没有大的变化,可用较细的粉生产高度均匀的粘结磁体。
- 5° Nd 含量低、成本低。