

CHAOQIANG YONGCITI

超强
永磁体

——稀土铁系
永磁材料

周寿增 董清飞 著

冶金工业出版社

超强永磁体

——稀土铁系永磁材料

周寿增 董清飞 著

北京
冶金工业出版社
1999

前 言

永磁材料已成为现代科学技术,如计算机技术、信息技术、航空航天技术、通讯技术、交通运输(汽车)技术,办公自动化技术、家电技术与人体健康和保健技术等重要物质基础。近几年尽管金融危机冲击着许多国家的经济,但世界对 Nd-Fe-B 系永磁材料的需求量仍以每年 20%~30% 的速度增长。稀土铁系永磁材料将成为永磁材料的主体产品。该材料的制造技术与工艺还在不断发展,产品的质量也在不断地提高,产品的品种还在不断地扩展。撰写本书的目的是为了推动我国稀土铁系(列)永磁材料产业和相关高技术产业的发展,促进新型稀土永磁材料的研究与创新;为 21 世纪初中国稀土永磁材料产业技术与产品创世界一流水平,为在 21 世纪初中国成为世界稀土永磁材料开发与生产基地(或中心)贡献一份力量。

本书共 10 章。第 1 章重点介绍稀土永磁材料的发展及其与高新技术的关系;第 2 章是永磁材料磁学基础,除了扼要叙述铁磁学基本原理外,还论述了永磁材料的内禀与技术磁参量的物理本质与影响因素;第 3 章介绍了 R-Fe-B 系相图,第 4 章是稀土铁系化合物的晶体结构与内禀磁特性,这两章是了解与认识稀土铁系永磁材料的结构,显微结构变化、成分、性能与工艺之间关系的物理学与材料学的基础;第 5 章讨论了烧结 R-Fe-B 系永磁材料的制造原理与技术,重点讨论工艺理论;第 6 章用较大篇幅讨论了烧结 R-Fe-B 系永磁材料的材料学原理,包括材料的成分、显微结构、工艺与性能之间关系的规律和各种 R-Fe-B 系永磁材料的成分、工艺与磁性能;第 7、第 8 章分别论述粘结 R-Fe-B 系永磁材料和热变形 R-Fe-B 系永磁材料,粘结 R-Fe-B 系永磁材料将占越来越重要

的地位;第9和第10章分别论述两类正在发展中的新型 R-Fe-B 系永磁材料,即稀土铁系间隙化合物永磁材料和双相纳米晶复合交换耦合永磁材料,后一种永磁材料有可能会大大地促进粘结永磁材料的发展。

本书是作者多年从事稀土永磁材料的科学研究,培养硕士与博士研究生,从事材料科学教学和从事稀土永磁材料生产与开发工作的积累与总结。撰写此书力求做到理论联系实际,把材料科学、物理学、热力学与晶体学等的理论融会贯通起来,有针对性地阐述稀土铁系永磁材料科研与生产中遇到的理论与实际问题。尽量深入浅出地阐述基本概念与原理,希望能给读者有较全面、较系统的知识。

我们在撰写本书的过程中,得到了中国工程院王震西院士、吉林大学张裕普教授、美国国际高技术集团公司及美国稀土公司总裁陶一飞博士和副总裁何进博士、天津经济技术开发区三环乐喜新材料有限公司总经理李景宏高级工程师、北京京磁技术总公司总经理陈平安先生、北京环星磁性材料制造有限公司总经理游峰先生、宁夏石嘴山环星磁体厂厂长泰大英先生、山西阳泉市京宇磁性材料总公司及该公司总经理贾建华先生,山西太原开源永磁设备公司经理董永安先生,北京新大科机电技术有限责任公司总经理谢怀宝先生,中国计量科学研究院瞿清昌研究员和林安利研究员以及赵文彤先生等的热情鼓励与支持;得到作者所在单位的同事与家人的理解与支持;在本书撰写的过程中,夏守余副教授帮助做了大量繁杂的文字方面的工作;此外还得到王佐诚博士、刘湘涟博士研究生、高学绪博士研究生、赵青博士研究生、何叶青博士研究生、乔祎工程师、张茂才高级工程师、史振华副教授等的多方面支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

作者学识有限,且稀土铁系永磁材料还在发展中,书中难免有失误或欠妥之处,敬请广大读者赐教。

著者

1999年3月10日于北京

第 1 章 绪 论

1.1 永磁材料的功能特性与种类

1.1.1 永磁材料

可用于制造磁功能器件的强磁性材料称为磁性材料。它包括硬磁材料、软磁材料、半硬磁材料、磁致伸缩材料、磁性薄膜、磁性微粉、磁性液体、磁致冷材料以及磁蓄冷材料等。它们统称为磁功能材料,其中用量最大和用途最广的是硬磁材料和软磁材料。硬磁材料和软磁材料的主要区别是硬磁材料的各向异性场(H_A)高,矫顽力(H_c)高,磁滞回线面积大,磁化到技术饱和需要的磁化场大。现代硬磁材料的矫顽力一般均大于 4000kA/m ,而软磁材料的矫顽力一般小于 80A/m ,最低可达 0.08A/m 左右。由于软磁材料的矫顽力低,技术磁化到饱和并去掉外磁场后,它很容易退磁(失去磁性),而硬磁材料由于矫顽力高,经技术磁化到饱和并去掉外磁场后,它仍能长期保持很强的磁性,因此硬磁材料又称永磁材料或恒磁材料。

1.1.2 永磁材料的功能特性

永磁材料放在外磁场中磁化时,外磁场对永磁体做的功,称为磁化功。对于闭路永磁体来说,磁化功以磁能(BH)的形式贮存于永磁材料内部。对于开路永磁体来说,磁化功一部分贮存于永磁材料内部,另一部分以磁场的形式贮存于两磁极附近的空。永磁体在气隙中贮存的磁场能与永磁体的磁能积成正比。永磁体是一个贮能器。利用永磁体磁极的相互作用和气隙的磁场可以实现机械能或声能和电磁能的相互转换,可做成多种多样的功能器件。例如,利用磁场与运动导线的相互作用,制造发电机、话筒、传

感器,将机械能或声能转变为电能或电信号,利用磁场与载流导线的相互作用制造各种永磁电机诸如音圈电机(VCM)、步进电机以及扬声器、耳机等,将电能或电信息转变为机械能、声能或非电信息等;利用磁极间的相互作用力可实现磁传动、磁悬浮、磁起重、磁分离等;利用磁场与荷电粒子的相互作用做成各种微波功率器件,如微波通讯中的行波管、返波管、环行器等;利用磁场对物质作用产生的各种物理效应,如磁共振效应、磁化学效应、磁生物效应、磁光效应、磁霍耳效应等,制造核磁共振成像仪以及使宏观物质(包括固态、液态和气态)磁化以改变物质内部结构或它们键合力的性质与状态,制造磁水器、磁防蜡器、磁疗器件等等。永磁功能器件具有节能、高效率、与系统兼容、便于操作与可靠性高的优点。

1.1.3 永磁材料的种类

现代工业与科学技术广泛应用的永磁材料有铸造永磁材料、铁氧体永磁材料、稀土永磁材料和其他永磁材料等四大类。它们的代表性成分和磁性能列于表 1-1。表 1-2 是近几年来世界永磁材料产量增长趋势。由表 1-1、表 1-2 可见,铸造 AlNiCo 永磁材料的居里温度 T_C 高,温度稳定性好,磁感温度系数低; $\alpha_B \approx -0.03\% / ^\circ\text{C}$ 。但它含有较多的战略金属钴和镍。在 20 世纪 60 年代稀土永磁出现之前,它的产量曾高达 23000t。到 1995 年铸造永磁材料全球产量已降低到约 8000t,今后还有逐年降低的趋势。铁氧体永磁材料的主要特点是原材料资源丰富,价格低,虽然磁性能不高,但仍然在汽车工业、音响、通讯、家用电器、办公室自动化设备中得到广泛的应用,其产量将持续增长,平均年增长率约 10%。 Sm-Co 系永磁材料居里点高,温度稳定性好,但含有较高金属 Co 和 Sm (钐)。 Sm 在稀土矿中含量较少,且价格高,因此 Sm-Co 系永磁的应用受到限制,自 1994 年以来其产量逐年降低。稀土铁系永磁材料,如 NdFeB 系永磁(包括烧结和粘结永磁)材料磁性能高,不含战略金属钴和镍,相对价格较低,因而得到广泛应用,平均年增长率高达 20%~30%。

表 1-1 永磁材料的成分与性能^[1,2]

类别	型号	代表性成分	磁性能				
			B_r / T	H_c / $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	$(BH)_m$ / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	T_C / $^{\circ}\text{C}$	
铸造 永磁 材料	AlNiCo5 系	8% ~ 12% Al, 15% ~ 22% Ni, 5% ~ 24% Co, 3% ~ 6% Cu, 余 Fe(质量分数)	0.7 ~ 1.32	40 ~ 60	9 ~ 56	890	
	AlNiCo8 系	7% ~ 8% Al, 14% ~ 15% Ni, 34% ~ 36% Co, 5% ~ 8% Ti, 3% ~ 4% Cu 余 Fe(质量分数)	0.8 ~ 1.05	110 ~ 160	40 ~ 60	860	
铁 氧 体 永 磁 材料	Ba 铁氧体永磁, Sr 铁氧体永磁, 粘结铁氧体永磁	BaO·6Fe ₂ O ₃ (分子式) SrO·6Fe ₂ O ₃ (分子式)	0.3 ~ 0.44	250 ~ 350	25 ~ 36	450	
稀 土 永 磁 材料	稀 土 钕 系 材料	1:5 型 Sm-Co 永磁	62% ~ 63% Co, 38% ~ 37% Sm(质量分数)	0.9 ~ 1.0	1100 ~ 1540	117 ~ 179	720
		2:17 型 Sm-Co 永磁	Sm(Co _{0.69} Fe _{0.2} Cu _{0.1} Zr _{0.01}) _{7.2}	1.0 ~ 1.30	500 ~ 600	230 ~ 240	800
		粘结 Sm-Co 永磁	Sm(Co _{0.67} Fe _{0.22} Cu _{0.1} Zr _{0.07} Ti _{0.01}) _{7.1}	1.0 ~ 1.07	800 ~ 1400	160 ~ 204	810
	稀 土 铁 系 材料	烧结 Nd-Fe-B 系永磁	Nd _{13.5} (Fe, M) _余 B _{6.1-7.0}	1.1 ~ 1.4	800 ~ 2400	240 ~ 400	310 ~ 510
		粘结 Nd-Fe-B 永磁	Nd ₄₋₁₃ (Fe, M) _余 B ₆₋₂₀	0.6 ~ 1.1	800 ~ 2100	56 ~ 160	310
		2:17 与 1:12 型间隙化合物永磁	Sm ₂ Fe ₁₇ N _x , Nd(Fe, Mo) ₁₂ N _x , Sm ₃ (Fe, M) ₂₉ N _x	0.6 ~ 1.1	600 ~ 2000	56 ~ 160	310 ~ 600
		纳米复合型永磁	Nd ₂ Fe ₁₄ B/ α -Fe, Sm ₂ Fe ₁₇ N _x / α -Fe 等	1.0 ~ 1.3	240 ~ 640	80 ~ 160	
热变形永磁	Pr-Fe-Cu-B 系, MQIII 永磁等	1.2 ~ 1.35	440 ~ 1100	240 ~ 360			
其 他 永 磁 材料	Fe-Cr-Co 系永磁	33Cr-16Co-2Si-余 Fe(质量分数)	1.29	70.4	64.2	500 ~ 600	
	Fe-Ni-Cu 系	16Ni-15Cu-余 Fe(质量分数)	1.30	4.8	50 ~ 60		
	Pt-Co 系	76 ~ 78Co-余 Pt(质量分数)	0.79	320 ~ 400	40 ~ 50	520 ~ 530	
	Fe-Pt 系	78Pt-余 Fe(质量分数)	1.08	340	154		

表 1-2 近几年世界永磁材料产量增长趋势 (kt)

材 料	1994 年	1995 年	1996 年	2000 年 ^①
铁氧体永磁材料 ^[3]	420	460	500	约 680
Sm-Co 永磁材料 ^[4]	0.7	0.66	0.62	
烧结 Nd-Fe-B 永磁材料 ^[4]	3.4	4.5	6.05	13.5
粘结 Nd-Fe-B 永磁材料 ^[4]	0.86	1.1	1.37	约 5.5
AlNiCo ^[4]	1967 年全球 产量 23	8.0(产值 2.8 亿美元)	5.0~7.0	2.0~3.0
总产值 ^[4] /亿美元	33		50	约 90~100

①预测值。

1.2 永磁材料的发展和寿命评估^[5,6]

永磁材料的应用主要利用它在气隙中产生的磁场强度 H_g , 而 H_g 的大小与永磁材料的最大磁能积 $(BH)_m$ 的平方根成正比, 因此可用 $(BH)_m$ 的不断地提高来说明永磁材料的发展。图 1-1 是 20 世纪近百年内永磁材料最大磁能积 $(BH)_m$ 的进展。可见在 20 世纪期间, 每隔 10 年左右, $(BH)_m$ 就出现跳跃式的发展。 $(BH)_m$ 从 20 世纪初的 $15\text{kJ}/\text{m}^3$ 到 90 年代初的 $400\text{kJ}/\text{m}^3$, 平均每 10 年提高 $40\text{kJ}/\text{m}^3$, 其中, 最近两次 $(BH)_m$ 的跳跃增加值最大, 20 世纪 70 年代从约 $100\text{kJ}/\text{m}^3$ 提高到 $260\text{kJ}/\text{m}^3$, 而 80 年代又从约 $260\text{kJ}/\text{m}^3$ 提高到 $400\text{kJ}/\text{m}^3$, 10 年内提高了约 $140\text{kJ}/\text{m}^3$ 。人们十分关心从 20 世纪的最后三年到 21 世纪初的 10~20 年内, $(BH)_m$ 能否从 $400\text{kJ}/\text{m}^3$ 提高到 $500\sim 600\text{kJ}/\text{m}^3$ 呢? 一些学者认为这种可能性很小。一种材料的磁能积提到一定程度后就饱和了, 或者说达到了一个平台, 要想有一个新的飞跃, 就需一种新材料的出现。

永磁材料的发展过程一般经历: (1) 基础研究期 (I); (2) 发明期 (II); (3) 发展期 (III); (4) 成熟期 (IV); (5) 萎缩期 (V), 如图 1-2 所示。基础研究是指基础理论或应用基础理论的研究, 它是新材料发明的基础。有成效的或者说可导致发明新材料的基础研究

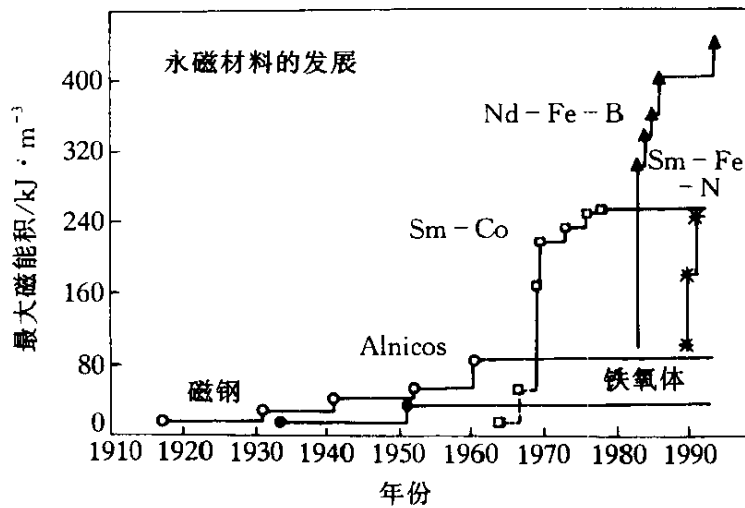


图 1-1 20 世纪永磁材料磁能积的进展

与下列因素有关:国家的科技水平,知识积累,资金的投入,人才、信息的获得和创造知识的能力等。发明期是发现新材料,找到材料成分、晶体结构、显微组织与性能的关系。发展期是工业试验和工业生产,开展工艺理论研究,研制出符合新材料要求的新技术、新设备与新工艺,完善工艺与管理过程,最大限度地挖掘材料的潜力。在一种材料成熟期,第二种新材料的基础研究已经在进行,并酝酿着新材料的发明。材料的发展是研究与创新的过程。

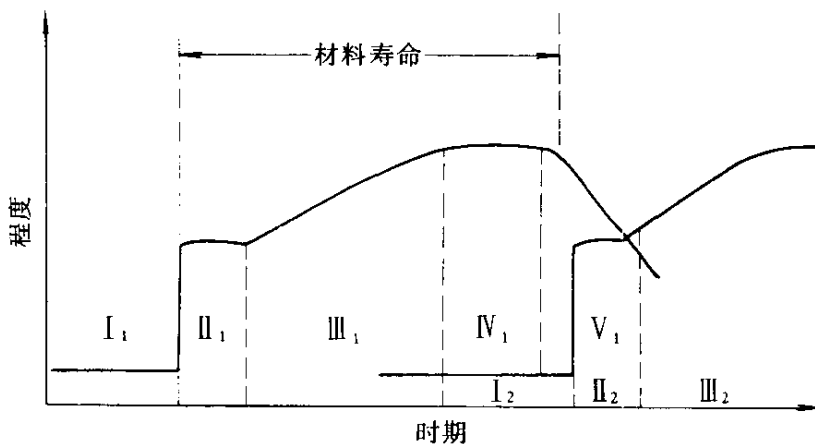


图 1-2 材料发展的示意图

永磁材料的寿命期是从材料的发明到材料的萎缩期止。萎缩期的到来意味着已有另一种价格性能比更好的新材料出现,它可

大部分取代该种材料,并不是该种材料完全停止使用。现有永磁材料的寿命如表 1-3 所示,可见马氏体磁钢(如 KS-磁钢, MK-磁钢, NKS-磁钢等)的寿命有 30 年,铸造永磁寿命 45 年,1:5 至 Sm-Co 永磁的寿命 16 年,2:7 型 Sm-Co 永磁的寿命约 8 年。Fe-Cr-Co、Fe-Co-V、Fe-Ni-Cu 和铂(Pt)基永磁合金一直未能成为主流永磁体。伸长单畴磁体、Mn-Al-C 未到成熟期就开始萎缩。

表 1-3 现有永磁材料的寿命

材料名称	发明年	萎缩年	材料寿命/年
马氏体磁钢	1900	1931	30
铸造永磁材料	1930 初	1975	45
Ba 系铁氧体永磁材料	1950 初	?	?
稀土永磁			
Sm-Co 永磁材料			
1:5 型材料	1960 初	1976	16
2:17 型材料	1976	1994	8
Nd-Fe-B 系永磁材料	1983	?	?

Ba 系铁氧体永磁材料的市场需求量还在以每年 10% 左右的速度增长,并且其成分和工艺技术还在不断地改进和完善,还处于发展期,预测未来 20~30 年内,铁氧体永磁材料仍然是广泛应用的永磁材料。稀土铁永磁材料,即 Nd-Fe-B 系永磁材料的寿命如何?首先要看有没有磁极化强度 J_s 、磁晶各向异性常数 K_1 、居里温度 T_C 和价格都比 $Nd_2Fe_{14}B$ 化合物的更好的新材料出现。从 1983 年 Nd-Fe-B 永磁材料产生的那一天开始,人们就开始研究替代 Nd-Fe-B 系永磁材料的新型材料。在欧共体国家内,以都柏林大学应用物理系教授 Coey 为首席专家,组织欧共体国家的十几个实验室,投入数百万美元,先后经历十多年时间,到 1995 年 Coey 教授在韩国召开的第三届国际磁性材料物理讨论会上说,经过 10 多年的研究目前还没发现一种新材料,其 J_s 、 K_1 和 T_C 比 $Nd_2Fe_{14}B$

的更好的材料。近十几年来发现的新材料的内禀磁参量与 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的比较如表 1-4 所示。可见亚稳定的 Fe_3B 的 J_s 和 T_C 已接近 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的相应值,但 K_1 过低; Fe_{23}B_6 也是亚稳相。 Fe_{16}N_2 的 J_s 达 2.8~3.0T,它是目前已知 J_s 最高的材料。但还存在问题,即 Fe_{16}N_2 的 J_s 是用 VSM,或 Mossbauer 测量薄膜得出的,测量准确性有疑。大块的 Fe_{16}N_2 尚未制造出, Fe_{16}N_2 也是亚稳定的过渡相,它具有正方结构,但它的磁晶各向异性尚未测出。3:29 型的氮间隙化合物 $\text{Nd}_3\text{Fe}_{27}\text{V}_2\text{N}_4$ 的 σ_s (质量磁化强度)和 T_C 比 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的还高, H_A 也与 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的接近,但 3:29 相氮化物与 2:17 相氮化物和 1:12 相氮化物存在相同的问题。

表 1-4 近期研究的新化合物内禀磁性与 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的比较

化合物	晶体结构	磁化强度	各向异性	居里温度 /°C	文献
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	Teter	$\sigma_s = 170\text{Am}^2/\text{kg}$ $J_s = 1.61\text{T}$ $M_s = 1.28 \times 10^6\text{A/m}$	$K_1 = 9.4 \times 10^6\text{J/m}^3$ $H_A = 7.0\text{T}$	315	
Fe_3B	Teter	$J_s = 1.60\text{T}$ $M_s = 1.28 \times 10^6\text{A/m}$	$K_1 = 0.6 \times 10^6\text{J/m}^3$	510	[7]
Fe_{23}B_6	Cub	$J_s = 1.70\text{T}$ $M_s = 1.36 \times 10^6\text{A/m}$	$K_1 = 0.01 \times 10^6\text{J/m}^3$	425	[7]
Fe_{16}N_2	Teter	$J_s = 2.8 \sim 3.0\text{T}$			[8]
1:11 相 $\text{Pr}(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_9\text{Si}_2$		$\sigma_s = 92.5\text{Am}^2/\text{kg}$		390	
3:29 相					[9]
$\text{Nd}_3\text{Fe}_{27.0}\text{V}_{2.0}$	单斜晶体		$H_A = 2.4\text{T}$	282	
$\text{Tb}_3\text{Fe}_{28}\text{V}_{1.0}$	单斜晶体		$H_A = 4.2\text{T}$	299	
$\text{Tb}_3\text{Fe}_{27.0}\text{V}_{2.0}\text{N}_4$		$\sigma_s = 165.4\text{Am}^2/\text{kg}$	$H_A = 5.1\text{T}$	402	
$\text{Tb}_3\text{Fe}_{28}\text{V}_{1.0}\text{N}_4$		$\sigma_s = 127.4\text{Am}^2/\text{kg}$	$H_A = 11.0\text{T}$	420	
$\text{Sm}_3\text{Fe}_{26.7}\text{V}_{2.3}\text{N}_4$		$\sigma_s = 135.7\text{Am}^2/\text{kg}$	$H_A = 6.7\text{T}$	410	

近几年来发现了稀土铁化合物与 α -Fe 两相纳米复合的新型永磁体^[10], 如 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$, 当 $\alpha\text{-Fe}$ 的体积分数为 20%, 晶粒尺寸为 10nm 时, 其理论磁能积可达 $880\text{kJ}/\text{m}^3$, 称为“兆焦耳”磁体(详见第 11 章)。发展纳米晶复合交换耦合永磁体是当前的主要研究方向之一。由于它有剩磁增强效应, 它可取代各向异性磁粉, 用于制造粘结永磁体, 将引起粘结永磁体的革命。问题是纳米晶复合交换耦合永磁体的工艺要求苛刻, 需要严格控制相晶粒尺寸, 使之在纳米范围之内复合。此技术一旦突破, 就可能做出磁能积为 $398\text{kJ}/\text{m}^3$ 的纳米晶复合交换耦合永磁粉末。它是烧结 Nd-Fe-B 永磁体的潜在对手, 预计这一技术的突破需要经历相当长的时间。因此人们预计在未来的 20~30 年内找出可取代 Nd-Fe-B 永磁体的新型永磁材料的可能性很小。

Nd-Fe-B 系永磁材料(包括烧结永磁与粘结永磁)还处于发展阶段, 主要标志是:(1)烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的磁性能还有待提高。目前 Nd-Fe-B 系实际永磁材料的磁能积, 其实验值($430\text{kJ}/\text{m}^3$)^[11]仅有理论值($509\text{kJ}/\text{m}^3$)的 83%, 工业小批量试生产的磁能积($398\text{kJ}/\text{m}^3$)^[12]和工业大批量生产的磁能积($358\sim 382\text{kJ}/\text{m}^3$)分别仅有理论值的 69% 和 74%, 而实际烧结 Nd-Fe-B 永磁体的矫顽力($1350\text{kA}/\text{m}$)仅有其理论值($6368\text{kA}/\text{m}$)的 21% 左右。目前实际生产的粘结各向异性 NdFeB 的性能还很低, 提高性能的潜力还很大;(2)生产 Nd-Fe-B 系永磁材料的工艺、技术、设备正在不断改进和完善;(3)市场对 Nd-Fe-B 系永磁材料的需求量还在不断地增加。全世界烧结 NdFeB 的年产量由 1985 年的 50t 上升到 1996 年的 6050t, 十年增长了 120 倍, 其产值(总销售额)已超过铁氧体永磁材料。预测到 2010 年全球对烧结 Nd-Fe-B 系永磁材料的需求量将增加到 10 万 t 左右;(4)Nd-Fe-B 永磁材料的温度稳定性、工作温度、抗腐蚀性能还处于研究、改进与发展之中;(5)Nd-Fe-B 系永磁材料在现代科学技术中的应用范围还在扩大。基于上述情况, 本书的任务是讨论稀土铁系永磁材料的磁学、材料学原理、成分, 显微组织结构, 工艺与性能之间的关系规律, 以及其制备技术

与工艺原理,以促进稀土铁系永磁材料的发展。

1.3 Nd-Fe-B 系永磁材料与高新技术

Nd-Fe-B 系永磁体是一种能量密度很高的贮能器。利用它可以高效率地实现能量与信息的相互转换,而它本身的能量并不消耗。因此,永磁体能量密度越高,在其气隙或周围空间产生一定的磁场 H_g 所需要磁体体积就越小。图 1-3 是具有不同贮能密度的永磁体在其周围空间产生一定磁场所需磁体体积的比较。图中横坐标的数字是磁体出现的年代,磁体下面标注的是磁体的类型。可见在空隙产生相同磁场(磁通),需要 Nd-Fe-B 磁体的体积是马氏体磁钢(C 钢)的 $1/60$, AlNiCo 永磁体的 $1/5$, SmCo₅ 磁体的 $\frac{2}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。现代科学技术与信息产业正在向集成化、小型化、超小型化、轻量化、智能化方向发展,而具有超高能密度的 Nd-Fe-B 永磁材料的出现,有力地促进现代科学技术与信息产业的发展,Nd-Fe-B 永磁材料是促进当代技术与社会进步的重要的物质基础之一,为新型产业的出现提供了物质保证。

表 1-5 是 1993 年日本、美国、欧共体国家烧结 Nd-Fe-B 永磁体产量和应用领域的比较。可见在计算机硬磁盘驱动器(HDD)中的应用占一多半(54%),其次是电机(Motor)的应用(占 17%)和人体核磁共振成像仪(MRI)中的应用(占 11%),而永磁电机主要应用于计算机、工业自动化、办公室自动化和家电,再其次是应用于通讯、仪器、磁分离器和电声器件。1995 年日本烧结 Nd-Fe-B 永磁体的产量已上升到 1900t,其应用领域如图 1-4 所示。可见 VCM 方面的应用由 56% 扩大到 59%,在电机方面应用维持 15%,而在 MRI 方面的应用为 13%,在音响方面的应用由 1993 年 4% 降到 3%,其原因是由于 50% 以上的用于音响器件(包括移动电话)的 Nd-Fe-B 磁体已改由中国提供。通讯方面的应用仍为 5%,其他为 5%。

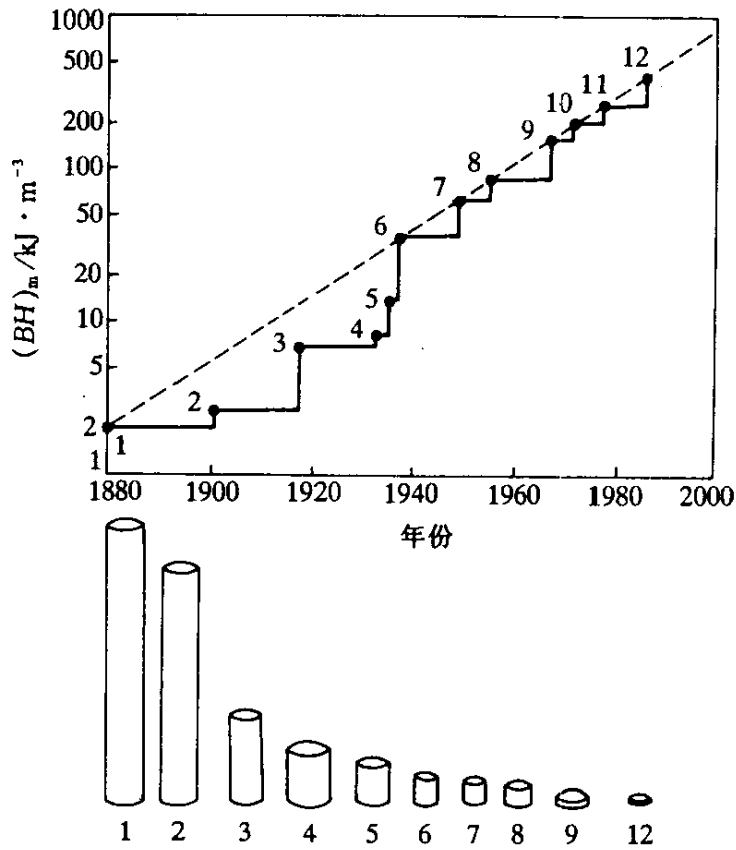


图 1-3 产生相同磁场(磁通)的不同磁体的体积比较^[13]

1—C 钢; 2—W 钢; 3—Co 钢; 4—AlNiCo; 5—TiConal II;
 6—TiConalG; 7—TiConalGG; 8—TiConalxx; 9—SmCo₅;
 10—(Sm, Pr)Co₅; 11—Sm₂Co₁₇; 12—Nd-Fe-B

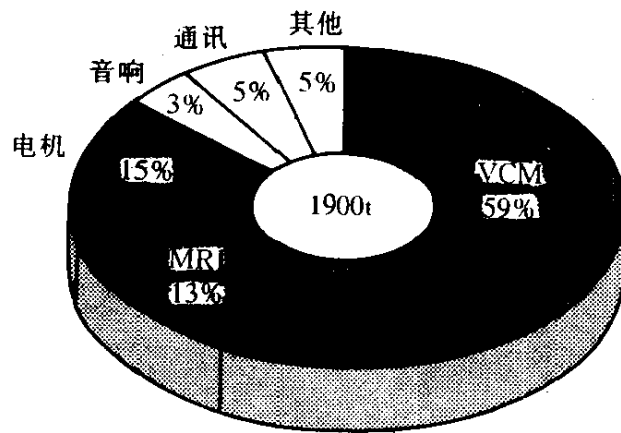


图 1-4 1995 年日本烧结 Nd-Fe-B 应用领域^[14]

表 1-5 1993 年日、美、欧共同体国家烧结 Nd-Fe-B 永磁体的应用领域比较^[4]

应 用	日本		美国		欧共同体国家		日美欧合计	
	质量/t	%	质量/t	%	质量/t	%	质量/t	%
电声器件	55	4	25	8	20	11	100	5
电动机、发电机	210	15	75	25	45	25	330	17
计算机硬磁盘驱动器(HDD)、音圈电机(VCM)	805	56	150	50	75	42	1030	54
人体核磁共振成像仪(MRI)	210	15					210	11
通讯、控制器、仪表	70	5	15	5	15	8	100	5
其他(电子束、磁分离设备、磁卡盘等)	80	5	35	12	25	14	140	8
总 计	1430	100	300	100	180	100	1910	100

Nd-Fe-B 永磁体在 HDD 方面的应用还将扩大, 据统计^[14], 1995 年全球生产 HDD 9000 万台, 比 1994 年增加 28%, 而过去几年平均每年增长 18%。因个人计算机、多媒体和国际互联网(Internet)的应用将会促进这一增长势头。除 HDD 的应用外, 高性能 Nd-Fe-B 永磁器件还应用于软磁盘驱动器(FDD), 只读光盘驱动(CD-ROM)、传真机(Fax)和数字视盘(DVD)。DVD 已应用于个人计算机, 其存贮量比 CD-ROM 更高。预计仅是 CD-ROM 和 DVD 的产量到 2010 年将达到 9000 万台。为满足磁头定位精度高和存、取速度快的要求, 用于制造 VCD 的 Nd-Fe-B 永磁材料的磁性能不断地提高。1993 年以前要求其 $(BH)_m$ 为 $288\text{kJ}/\text{m}^3$, 到 1996 年提高到 $336 \sim 368\text{kJ}/\text{m}^3$, 今后还将会进一步提高。据统计, 每辆汽车要用 17 块永磁体, 豪华轿车每辆要用永磁体 70 多块, 1997 年全世界汽车用永磁体约 16 万 t, 到 2002 年将增加到 24 万 t。为改善城市空气污染状况, 目前世界上有七家大汽车公司, 包括通用汽车公司(GM)、福特(Ford)、克莱斯特(Chrysler)公司、

丰田(ToyoTa)公司、本田(Honda)、日产(Nissan)和马自达公司等正在筹建电动汽车生产线,1998年已有少量电动汽车进入市场。据估计每辆电动汽车的永磁电动机用Nd-Fe-B系永磁材料约1.2kg(2.6磅),到2005年和2010年,用于制造电动汽车用永磁电动机的Nd-Fe-B系永磁材料的需求量将分别达到1080t和4200t。此外,正在发展中的电动摩托车和电动自行车也需要数量可观的Nd-Fe-B永磁材料。

日本的Mitsubishi公司宣布已研制出一种新型的发动机的汽油直接喷射装置(GDI),装有GDI的发动机比传统的可节约汽油35%,二氧化碳排放量减少35%。GDI的关键部件是用Nd-Fe-B永磁材料制造的,它的推广使用,将为Nd-Fe-B永磁材料提供更加广阔的市场。

目前全世界有9000台核磁共振人体成像仪(MRI),其中13%为永磁式(约1200台),1996年日本生产2700台^[14],其中1/3(约1000台)为永磁式的,预计全世界永磁式的MRI每年将会以10%的速度增长。永磁式的MRI若用铁氧体永磁材料制造,每台用21t,整机质量达70t,若用Nd-Fe-B永磁材料制造,每台用量2.6t,整机质量可减至24t^[15],发展Nd-Fe-B磁体式的MRI是一个方向,预计到2005年,世界用于制造MRI的Nd-Fe-B永磁材料可达2500~3500t或更多。此外正在发展的磁悬浮列车和自动化高速公路也需要大量的永磁材料。图1-5是自动化高速公路示意图^[14]。

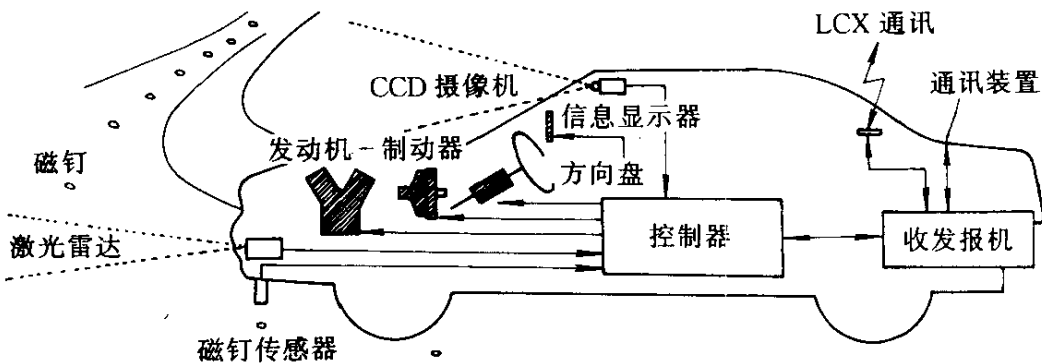


图 1-5 自动化高速公路示意图

1.4 中国 Nd-Fe-B 永磁材料的发展

中华民族是勤劳、智慧和富有创造性的民族。公元前一千多年中国史书已有磁的论述,公元前 300 年在中国汉代已用天然磁铁(Fe_3O_4)来制造指南针^[16];公元 1020 年中国已制造出悬浮磁针,如图 1-6,比欧洲早 170 年;中国已于 1030 年发现地磁偏角,比欧洲早 420 年;早在 1117 年中国已制造出罗盘并应用于航海。我们祖先对磁学的认识和对磁体的应用是中华民族对人类文明的贡献的突出例子之一。

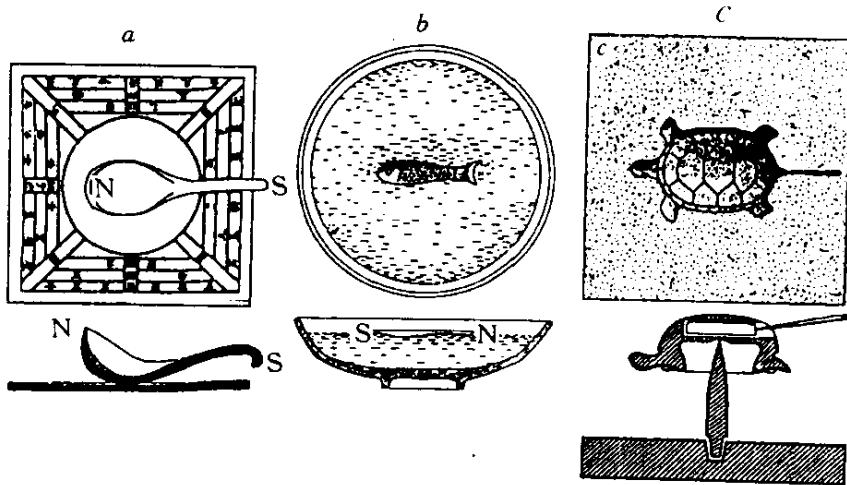


图 1-6 中国古代利用永磁材料实例

a—古代中国用天然磁铁制造的指南匙;b—早期中国制造的指南针;c—中国早期制造的轴光悬浮指南针

烧结 Nd-Fe-B 和快淬 Nd-Fe-B 永磁材料是 1983 年分别由日本^[17]和美国^[18]发现的。1984 年上半年我国研制的烧结的 Nd-Fe-B 永磁材料磁能积达到 $240 \sim 280 \text{ kJ/m}^3$, 1985 年已将研究成果转化为工业化生产,年产量仅为 10t,而日本月产达 12t。但到 1996 年日本生产烧结 Nd-Fe-B 的产量为 2400t,而同期我国烧结 Nd-Fe-B 的产量已增加到 2600t,在产量上超过日本,居世界第一位。当然中国的 Nd-Fe-B 永磁材料产业还存在许多问题,如产品性能较低,工艺与设备落后,生产厂分散、规模小。中国发展 Nd-Fe-B 永磁材料产业的突出优势是我国稀土资源丰富。我国稀土资源工业储量约 4800 万 t(稀土氧化物 REO),远景储量约 12000