

软磁铁氧体材料

沈庆峰, 杨显万, 刘春侠

(昆明理工大学 材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 总结了近几十年来软磁铁氧体材料的发展过程, 评述了国内软磁铁氧体材料及器件的发展现状、应用和市场, 并对其中的锰锌系和镍锌系两大类型的软磁铁氧体材料做了重点介绍, 指出了在其广泛的应用领域内, 软磁铁氧体将进一步向高频、高磁导率和低损耗方向发展, 以适应由新科技新设备的不断推出所带来的其产品如电感、线圈等器件向小型化片式化的发展要求。

关键词: 软磁铁氧体; 锰锌铁氧体; 镍锌铁氧体; 高磁导率

中图分类号: TM277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0017-06

Soft Magnetic Ferrite Material

SHEN Qing-feng, YANG Xian-wan, LIU Chun-Xia

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The development of soft magnetic ferrite materials in recent decades is summarized and the domestic developing conditions, applications, the market of soft magnetic ferrite materials and devices are reviewed. Mn-Zn ferrite and Ni-Zn ferrite, two types of soft magnetic ferrite materials, are introduced. It also points out that progress will be made in soft magnetic ferrite materials concerning higher frequency, higher magnetic conductivity and lower loss to fulfill the miniaturization demand of the ferrite components such as inductances, coils, and so on, along with the emergence of new technologies and devices.

Key words: soft magnetic ferrite; Mn-Zn ferrite; Ni-Zn ferrite; high-magnetic conductivity

0 引言

20 世纪 40 年代二次世界大战中发明了雷达, 要求使用能在中高频和高频领域中工作的软磁材料(指矫顽力小, 容易磁化的磁性材料), 从而发明了锰锌软磁铁氧体和镍锌软磁铁氧体。由于软磁铁氧体在高频下具有高磁导率、高电阻率、低损耗等特点, 并且具有批量生产容易、性能稳定、机械加工性能高, 可利用模具制成各种形状的磁心, 特别是成本低等特点, 而迅速推广应用于通信、传感、音像设备、开关电源和磁头工业等方面。

从 20 世纪 40 年代到现在, 随着技术的进步, 软磁铁氧体也在不断地发展。其主要的方向一是改变软磁铁氧体的成分。如今, 锰锌铁氧体已派生出锰镁锌铁氧体和锰铜锌铁氧体, 镍锌铁氧体已派生出镍铜锌铁氧体。另外除了基本的氧化物外, 还添加 CaO, SiO₂, Nb₂O₅, ZrO₂, Ta₂O₅ 等氧化物, 以提高铁氧体的性能; 二是改变生产工艺, 使粉体细化, 从而减少损失和提高工作频率^[1]。经过几十多年的发展完善, 如今软磁氧体材料已成为一类应用广泛、种类繁多的功能材料。

目前, 工业生产的软磁铁氧体材料从成分上分主要有: Mn-Zn, Ni-Zn 系等尖晶石和平面型六角晶系两大类(也有分为三类的)。从应用角度讲, 它又可分为高磁导率(μ_i)、高频大功率(又称功率铁氧体)和抗电磁干扰的(EMI)铁氧体等几类。

收稿日期: 2002-08-30.

第一作者简介: 沈庆峰(1976~), 男, 博士研究生; 主要研究方向: 湿法冶金。

1 软磁铁氧体材料的种类及性能特点

1.1 锰锌系软磁铁氧体材料

锰锌系软磁铁氧体主要是具有尖晶石结构的 $m\text{MnFe}_2\text{O}_4 \cdot n\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 与少量 Fe_3O_4 组成的单相固溶体,用锰锌系铁氧体磁性材料做成的电感磁芯及磁性器件,应用频率从数百赫兹到几千兆赫兹,是最重要的软磁铁氧体材料,其产量占了软磁铁氧体磁性材料总产量的60%以上,因此,锰锌铁氧体的发展更为引人注目.主要应用器件见表1.

表1 软磁铁氧体的主要用途

材料类型	应用器件
锰锌系软磁铁氧体材料	开关电源用功率磁芯,高清晰度数字彩电和高分辨率显示器用回扫变压器,计算机网络用局域网隔离变压器和共模滤波器,钟表、BP机、手机、笔记本电脑以及数字仪表用场致发光电源变压器,程控交换机中的话频变压器,电流互感器,低功率驱动变压器,输入滤波器等.
镍锌系软磁铁氧体材料	如在电视机中作为高频阻抗变压器,CATV系统中作为分支分配器,通讯系统中作为功率分解/合成器、混频器、射频放大器、定向耦合器、相位检波器等.

锰锌铁氧体材料主要分为高频低功耗铁氧体(又称功率铁氧体)和高磁导率即高 μ_i 铁氧体两类.

1.1.1 功率铁氧体^[1-6,8-9]

功率铁氧体的主要特征是在高频(几百千赫兹)高磁感应(几千高斯)的条件下,仍旧保持很低的功耗,而且其功耗随磁芯的温升而下降,在80℃左右达到最低点,从而可以形成良性循环.功率铁氧体的主要用途是以各种开关电源变压器和彩电回扫变压器为代表的功率型电感器件,用途十分广泛,是目前产量最大的软磁铁氧体.

20世纪70年代初,日本、欧洲厂商为适应开关电源市场的需要,开发出第一代功率铁氧体,典型牌号为TDK的H35、FDK的H45及飞利浦的3C85.这类材料由于功耗较大,且使用时温升显著,故一般只用于20kHz左右的民用开关电源.20世纪80年代初,经改进的第二代功率铁氧体被开发出来,其最大特点是呈现负温度系数功耗(20~80℃,随温度升高,功耗呈下降趋势),能有效防止温升造成的电磁性能下降,且综合指标较好,代表性的产品有TDK的PC30、FDK的N49、西门子的N27.20世纪80年代中后期,为适应高频开关电源的发展,国外又开发出高频功耗大幅降低、实用频率一般可达100~500kHz的第三代材料,如TDK的PC40、FDK的H63B、西门子的N67、飞利浦的3F3,这类材料特别适用于频率为数百kHz的开关电源,现在被广泛应用于工业类的开关电源中.进入20世纪90年代后,由于信息技术对器件小型化、片式化的要求,第四代功率铁氧体又开发成功,向着高频、低耗方向发展,代表牌号有TDK的PC50,日立的SB-1M,西门子的N49,FUJI的7H10,飞利浦的3F4等,其功耗大大低于第三代材料,使用频率一般可达500~1000kHz,可望满足显示器用回扫变压器等器件向小型化、高频化和低损耗发展的要求,是今后功率软磁铁氧体的发展方向.

我国新发布的“软磁铁氧体材料分类”行业标准,把功率铁氧体材料分为PW1~PW5五类,其适用工作频率也逐步提高.如适用频率为15~100kHz的PW1材料;适用频率为25~200kHz的PW2材料;适用频率为100~300kHz的PW3材料;适用频率为300~1MHz的PW4材料;适用频率为1~3MHz的PW5材料.目前,国内的企业已能生产相当于PW1~PW3材料,PW4材料只有部分企业小批量试生产,PW5材料有待于进一步开发和生产.

日本TDK的功率铁氧体材料无论是质量还是产量均处于国际领先地位.据说TDK公司目前有10多名博士从事锰锌铁氧体的开发工作,PC30等牌号已基本不再生产,转向从我国及东南亚进口,集中精力研发PC45~50等高档产品.我国的情况正好相反,1999年的统计数字表明,全行业PC40的产量很小,主要是B档和C档,即PC30及以下的产品(表2).2000年以后情况有

表2 1999年我国Mn-Zn功率铁氧体的生产水平

磁性能水平	相当于TDK牌号	产量份额/%
A	PC40	1.5
B	PC30	46.2
C	≤PC30	52.3

所改观,不少单位加大技术创新力度,积极实施 PC40 批量生产技术攻关,A 档产品不断增加,C 档产品有所减少,四川、江苏、浙江的一些企事业单位先后完成了 PC40,PC44,PC50 的研制工作,有的通过了 PC44,PC50 的设计定型鉴定,有的开始规模化生产 PC40 等高档产品.表 3 中列出了部分国内外功率铁氧体产品的性能指标.

表 3 功率铁氧体的部分产品性能指标

生产厂家及牌号		μ_i	B_s/mT	$H_c/A \cdot m^{-1}$	$\theta_r/^\circ C$	f_{max}/kHz	$P/mW \cdot cm^{-3}$		
							25 $^\circ C$	60 $^\circ C$	100 $^\circ C$
TDK	PC40	2 300 \pm 25%	510	14.3	> 215	500	600	450	410
	PC50	1 400 \pm 25%	470	31.0	> 240	1 000	130	80	80
FDK	H49N	1 600 \pm 20%	500	12.8	> 230	100			
	H63B	2 000 \pm 20%	500	10.2	> 200	300	640	440	410
TOKIN	2500B3	2 500 \pm 20%	500	15.1	205	500	200		
飞利浦	3C85	2 000 \pm 20%	500		\geq 200	200	230		165
	3F3	2 000 \pm 20%	500		\geq 200	500	110		80
日立	SB-9C	2 600	490	11.9	> 200	300	680	450	400
1409 所	R2KDP	2 300 \pm 20%	510	16.0	\geq 215	500	560	410	450
898 厂	R2KB1	2 300 \pm 25%	510	14.4	230		120	94	83

1.1.2 高磁导率铁氧体^[5-9]

磁导率是衡量软磁铁氧体材料性能的主要基本参数之一,通常将初始磁导率(μ_i) > 5 000 的 Mn-Zn 铁氧体材料称为高磁导率铁氧体,高磁导率铁氧体的主要特性是磁导率特别高,一般均达到 10 000 以上,从而使磁芯体积缩小很多,适应元器件向小型化、轻量化发展的需要.

另外为了满足使用要求,这类高磁导率小磁芯的表面质量必须很好,平滑圆整,没有毛刺,而且在其表面上必须涂覆一层均匀、致密、绝缘、美观的有机涂层,这是一个技术难点.高磁导率铁氧体在电子工业和电子技术中是一种急需和应用广泛的功能材料,可以做通讯设备、测控仪器、家用电器及新型节能灯具中的宽频带变压器、微型低频变压器、小型环行脉冲变压器和微型电感元件等更新换代的电子产品.

表 4 1999 年我国高磁导率铁氧体的生产水平

磁性能水平	初始磁导率(μ_i)	产量份额/%
A	\geq 6 000	1.5
B	5 000 ~ 6 000	46.2
C	\leq 5 000	52.3

TDK、西门子、飞利浦、TOKIN

及美国 SPANG 磁性分公司等是世界上高 μ_i 软磁铁氧体材料研究开发和规模化生产的先行者.TDK 在生产 H5C2 的基础上又先后开发出了 H5C3、K5D 和 H5E 等系列高磁导率铁氧体材料;TOKIN 推出了 1200IH、18000H 材料;西门子上市了 T42、T46 高磁导率材料.据磁性行业协会的统计,1999 年我国生产的称得上高 μ_i (8 000 ~ 10 000) 即 A 档的产量很少(表 4).2000 年后情况则有所改观,山东及浙江、江苏、

表 5 高磁导率铁氧体的部分产品性能

生产厂家及牌号		μ_i	$(tg\delta/\mu_i)/10^{-6}$	B_s/mT	$T_c/^\circ C$
TDK	H5C3	15 000 \pm 30%	< 15(100 kHz)	360	> 105
	H5C4	12 000 \pm 25%	< 8(10 kHz)	380	> 110
TOKIN	1200IH	12 000 \pm 30%	< 15(10 kHz)	420	> 125
	18000H	18 000 \pm 30%	< 15(10 kHz)	390	> 110
飞利浦	3E6	12 000 \pm 25%	< 75(10 kHz)	400	> 130
	3E7	15 000 \pm 30%	< 75(10 kHz)	400	> 130
西门子	T42	12 000 \pm 25%		400	> 130
	T46	15 000 \pm 30%		400	> 130
美 SPANG	MAT-W	10 000 \pm 30%	< 7(10 kHz)	430	> 125
	MAT-H	15 000 \pm 30%	< 15(10 kHz)	420	> 120
涿水磁材厂	R12K	12 000 \pm 30%	< 15(10 kHz)	340	> 120
898 厂	R10K	10 000 \pm 30%	< 7(10 kHz)	400	> 150

四川、北京等地一些企事业单位近几年来先后完成了 μ_i 为 10 000 ~ 15 000 材料的研制,并通过了设计定型鉴定,部分厂家实现了 $\mu_i = 10 000$ 及以上的高导锰锌铁氧体材料的批量生产.四川等地一些企业研发的 R15K 高导锰锌铁氧体项目获得了国家中小企业科技创新基金的大力支持,在大生产技术方面有所突破

和创新.表5中列出了几种主要高磁导率铁氧体产品的性能指标.

真正意义上的高 μ_i 软磁铁氧体材料,其 μ_i 值应在10 000以上,这样才能满足通讯、计算机等IT产业和电子整机对各种器件超小型化、微型化的需求.近年来,高 μ_i 铁氧体的水平还在不断提高,目前国内外技术创新的奋斗目标是规模化生产高 $\mu_i = 15\ 000 \sim 18\ 000$ 的锰锌铁氧体以及更为实用的具有宽频、宽温特性的高磁导率铁氧体材料.

1.2 镍锌系软磁铁氧体材料^[9,10]

Ni-Zn系软磁铁氧体材料是另一类产量大、应用广泛的高频软磁材料.当应用频率在1 MHz以下时其性能不如Mn-Zn系铁氧体,而在1 MHz以上时,由于它具有多孔性及高电阻率,其性能大大优于Mn-Zn铁氧体,非常适宜在高频中使用.

用镍锌软磁铁氧体材料做成的铁氧体宽频带器件,使用频率可以做到很宽,其下限频率可做到几千赫兹,上限频率可达几千兆赫兹,大大扩展了软磁材料的频率使用范围,主要功能是在宽频带范围内实现射频信号的能量传输和阻抗变换.由于它们具有频带宽、体积小、重量轻等特点而被广泛应用在雷达、电视、通讯、仪器仪表、自动控制、电子对抗等领域.

世界上现已工业化生产镍锌铁氧体的国家中,目前,日本TDK、FDK、德国西门子、美国Stealword等公司的产品技术水平被公认为是世界上最高的,射频宽带Ni-Zn(磁芯)的工作频率可达0.1 MHz~1.5 GHz,品种规格上千种.而国内起步较晚,仅有少数厂家在开发低噪声滤波器和铁氧体吸收与抑制元件,但与国外的差距较大,尚未系列化、标准化.表6中列出了TDK公司部分镍锌铁氧体的性能指标.

表6 日本TDK公司部分NiZn铁氧体材料性能指标

型号	$\mu_i \pm 20\%$	$\alpha_{\mu} \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (20~60 $^{\circ}\text{C}$)	B_s/mT ($H = 1\ 600\ \text{A/m}$)	$\theta_f/^{\circ}\text{C}$	$P/\Omega \cdot \text{cm}$
HF70	1 500	1~3	280	> 100	10^7
HF60	900	8~14	300	> 130	10^7
HF55	550	5~35	320	> 150	10^7
HF50	250	9~15	320	> 180	10^7
HF40	120	9~18	350	> 250	10^7
HF30	45	5~15	290	> 300	10^7

目前,随着信息网络的飞速发展,在有线电视系统和闭路电视系统的基础上迅速发展起来的光纤同轴电缆混合(HFC)网络系统,作为综合信息宽带网络,具有显著的优势.

HFC网络系统的改造和建设,需要各种射频宽带铁氧体器件,而射频宽带铁氧体材料(磁芯)系列是制造上述铁氧体器件的关键磁性材料.HFC的发展,大大刺激了对射频宽带铁氧体材料及器件的需求.Ni-Zn软磁铁氧体材料除广泛用于HFC宽带网络外,还大量用于抗电磁干扰.使用镍锌系软磁铁氧体材料制成的滤波器、铁氧体抑制器是其中最有效、简单、经济的办法之一.因此,在各种电子、电子线路中使用大量各种特性和各种形状的EMI软磁铁氧体磁芯,以满足抗电磁干扰和电磁兼容的要求.抗电磁干扰产品和电磁兼容产品发展的方向是各类磁芯向高磁导率、高频化、高速、小型化和薄片高组装密度化发展.如今用Ni-Zn等软磁材料做成的铁氧体浆料和导体浆料交替叠层厚膜印刷和烧结而成、实现小型化表面安装的器件已经实用化,发展前途光明.

2 国产材料的市场发展及问题^[11,12]

近几十年中,随着科学技术的不断进步,软磁铁氧体的需求量也跟着迅速增加.世界软磁铁氧体的产量由1985年11万t增长到1997年的22万t再增加到2000年的30万t,其中我国和东南亚增长速度最快.1985年我国产量约7千t,到1997年发展到5万t,2000年达到了6万t.相反的,美国却呈负增长,而西欧的增长率近似为零(表7)^[2].目前我国的软磁铁氧体产量已居世界首位,2000年我国产量占世界的1/5,这表明软磁铁氧体

表7 1985~1997年世界软磁铁氧体产量情况

国家或地区	产量/t				年均增长率/%
	1985年	1990年	1995年	1997年	
日本	40 000	46 500	49 000	48 000	1.5
美国	25 000	10 000	20 000	20 000	-0.02
西欧	20 000	23 000	24 000	28 000	0.3
中国	7 000	15 000	30 000	50 000	17.8
东南亚	10 000	18 000	40 000	50 000	14.4
其他	8 000	12 500	21 000	24 000	1.0
合计	110 000	125 000	184 000	220 000	5.9

的生产中心已由欧美转移到我国和东南亚地区,这主要是因为原材料和劳动力的原因。

随着科技的不断发展,新产品和产量的不断增加,在 21 世纪,磁性材料在工业上诸如计算机、汽车、通讯设备、自动化和消费类家电中的应用将更加拓展,软磁铁氧体材料在电子产品中所占的比重也会越来越大,如在一台电视机中,25%以上是软磁铁氧体元件与器件,在计算机、通信设备中间同样亦占有相同的比例,软磁铁氧体的 80%以上用于家电产品中。预计到 2005 年全世界软磁铁氧体的产量将达到 50 万 t,我国的产量也会增长到 10 万 t,世界市场将保持在 10% 以上的速度增长,我国也将以 10% ~ 15% 左右的年增长率发展。其中发展较快的高性能软磁产品有以下几类:功率铁氧体,约占软磁铁氧体总产量的 25%;高磁导率材料,约占 20%;宽带射频铁氧体和电子镇流器与照明变压器用铁氧体,约占 15%;还有抗电磁干扰器件。这几类高档铁氧体材料和元器件的年均增长率达 20% 以上,远高于世界软磁铁氧体的整体发展水平^[3]。随着科技的不断进步,软磁铁氧体材料的需求量会不断增加,有着广阔的国内国际市场。

日本国内高清晰度电视、大屏幕彩电的产量在上升,配套的回扫变压器因而随之增加;台湾省生产全球彩色显示器产量的 50%。彩显中双聚焦回扫变压器磁芯从日本或中国大陆进口,未来几年内预计需求量每年以 30% 的速度增长;韩国也是彩色显示器主要生产国,其中软磁铁氧体磁芯除本国生产一部分外,其余亦依赖进口。此外东南亚市场对软磁铁氧体磁芯的需求量亦不断增长。

我国的软磁材料有着巨大的发展市场,截至到 2002 年 4 月底,我国手机用户达 1.6 亿户,移动用户正在以平均每月 550 万户左右速度快速增长;寻呼机用户目前也有 8 000 多万。家电市场中,我国目前占有全球彩电加工量的 50%,2002 年全国彩电产量将保持在 2 500 万台以上。此外,联想、实达、长城等国产品牌的计算机也呈迅速的发展趋势,电脑显示器等外部设备亦需要各种铁氧体元器件。另外,不断涌现的众多电子产品更需要大量的铁氧体磁性材料。

我国磁性产品生产规模已经形成,生产技术上了一个台阶,特别是在中低档产品方面占有较大优势。目前,固定资产投资超过 1 000 万元的软磁铁氧体生产厂家已有五六十家,其中尚未计入港台厂商在珠江三角洲创办的独资、合资企业 20 余家。产量上,2000 年达到了 6 万 t,已经超过了日本,位于世界首位。并且随着生产中心的转移和市场的蓬勃发展,我国亦将成为软磁铁氧体材料的出口大国。

我国的磁性科技虽然取得了长足发展,但与世界相比,差距仍然很大,在基础理论研究,技术开发和工程产业三个方面均未步入良性循环的轨道。总的来说,我国的铁氧体产品档次低,技术含量不高,多为中低档产品,而且品种雷同,多数企业技术创新能力薄弱。虽然目前我国部分厂家的产品水平与国外大致相当,但从规模效益上都远低于国外,例如日本的 TDK 公司年产量达 2.4 万 t,而我国仅数家工厂年产量达 2 千 t,从国际市场售价来看,我国产品十分低廉,大 U、E 形磁芯每吨售价 5 ~ 6 万元,小 U、E 形磁芯也只有 8 ~ 9 万元,仅为日本同类产品的 1/2 ~ 1/3。这除了销售渠道的原因外,还与我国产品批量小、外观差、缺少名牌、供货不及时有直接的关系。形不成规模优势和名牌效应,在市场上受制于人。

虽然国内铁氧体总产量很大,但是大多数企业长期滞留于低档产品,一方面影响了本身技术水平的提高,另一方面由于售价低、获利薄,影响了扩大再生产,造成原材料及能源浪费,难以形成良性循环。快速发展起来的高档软磁产品有着广阔的发展前景和较高的利润可寻,而我国大部分供应份额被进口产品占据。中国加入 WTO 以后,市场将无国界之分,随着需求市场的迅速增长,我国软磁铁氧体的生产将面临巨大的机遇,我们必须改变观念,抓住机遇,认清形势,放远眼光,认准软磁铁氧体向一低、两高三化(即低损耗;高频、高磁导率;小型化、片式化和薄膜集成表面贴装化)方向发展的趋势,组织人力物力进行高档产品的技术攻关,瞄准国际先进水平,坚持技术创新与制度创新、自主创新与技术引进相结合,在高起点上跨越式发展高档产品,紧跟科技发展步伐。此外,还要加强原材料基地的建设,改变我国原材料质量差以及供应不够的现状,建设一批高纯氧化锰、氧化铁、氧化镍和氧化锌等原材料的生产基地,为我国发展高性能软磁铁氧体材料提供保证;积极开发高性能专用设备和仪器,倡导生产过程精密控制技术。以实现高性能软磁铁氧体大批量生产的要求,逐步占领高档产品市场,使我国不仅成为磁性材料生产大国,更要成为磁性材料生产强国。

(下转第 37 页)

应用 ANSYS 有限元分析软件, 我们计算出导轨在 8 000 N 的均布载荷作用下, y 方向上的最大压应力为 121 MPa, 最大等效应力 (Von Mises 应力) 为 117 MPa, 均超过了材料的屈服强度 σ_s , 如下所示: 图 6 为导轨所受最大压应力处的截面应力云图, 图 7 为最大等效应力处的截面应力云图. 在试验中, 我们在导轨的上表面施加 8 000 N 的载荷, 结果在此载荷作用下导轨发生塑性变形, 表明计算结果与试验结果基本吻合.

6 结 论

采用有限元数值分析方法, 根据米赛斯 (Mises) 准则, 使用大型有限元分析软件 ANSYS, 分析复杂截面导轨在均布载荷作用下的变形情况, 提供了一种在导轨成形加工之前仿真导轨变形情况的方法, 可以有目的地预测并避免可能出现的问题, 并为解决问题提供参考依据.

参考文献:

- [1] 陈精一, 等. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. 9 ~ 10.
- [2] 刘北辰, 等. 工程计算力学——理论与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 477 ~ 480.
- [3] 孙训方, 等. 材料力学 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 215, 388 ~ 401.

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] 徐泽玮. 电源技术中应用的软磁铁氧体材料发展回顾和分析(一) [J]. 金属功能材料, 2001, 8(5): 1 ~ 7.
- [2] 黄刚. 软磁铁氧体的市场综述 [J]. 电子外贸, 1999, 6: 24 ~ 26.
- [3] 唐敏, 思潮. 软磁铁氧体的应用和技术 [J]. 世界电子元器件, 1999, 7: 65 ~ 66.
- [4] 徐敏, 邬文波. 浅谈现代功率铁氧体材料的现状及发展方向 [J]. 磁性材料及器件, 1999, 30(5): 42 ~ 50.
- [5] 何水校. 锰锌铁氧体材料的未来发展动向 [J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(6): 27 ~ 30.
- [6] 王耕福. 不断发展的软磁铁氧体技术 [J]. 世界产品与技术, 2000, 8, 24 ~ 27.
- [7] 廖绍彬. 高磁导率软磁铁氧体材料的应用 [J]. 电子元器件应用, 2000, 2(7): 19 ~ 20.
- [8] 陈国华. 21 世纪软磁铁氧体材料和元件发展趋势 [J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(4): 34 ~ 36.
- [9] 刘玉红. 软磁铁氧体材料的现状及其发展趋势 [J]. 材料导报, 2000, 14(7): 30 ~ 31.
- [10] 翁兴国. NiZn 软磁铁氧体材料应用与市场发展 [J]. 新材料产业, 2002, 4, 23 ~ 24.
- [11] 何水校. 软磁铁氧体材料的应用与市场 [J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(1): 44 ~ 47.
- [12] 余声明. 迈向新世纪的此行科学技术(二) [J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(5): 1 ~ 9.