

锰锌、镍锌铁氧体的研究现状及最新进展*

关小蓉^{1,2}, 张剑光¹, 朱春城¹, 赫晓东¹, 周善东²

(1 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001; 2 玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

摘要 对常用的锰锌、镍锌软磁铁氧体材料的应用及其性能进行了介绍, 着重从配方要求、添加剂的作用等方面综合介绍了国内外的研究情况及最新进展, 指出了今后软磁铁氧体研究的主要方向及所要达到的性能要求。研究表明, 配方是决定铁氧体材料性能好坏的决定性因素, 加入添加剂是改善铁氧体材料性能的有效方法之一, 烧结工艺是制备高性能铁氧体的关键。今后软磁铁氧体发展的重点是高频低功耗、高磁导率材料和片式化的表面贴装元件, 还应开展纳米软磁铁氧体的研究。

关键词 软磁铁氧体 高磁导率 进展

Current Research Situation and Development of Mn-Zn and Ni-Zn Ferrites

GUAN Xiaorong^{1,2}, ZHANG Jianguang¹, ZHU Chuncheng¹, HE Xiaodong¹, ZHOU Shandong²

(1 Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2 Department of Physics and Information Science, Yulin Normal University, Yulin 537000)

Abstract In this paper, the applications and properties of the manganese-zinc and nickel-zinc soft ferrites are presented. The requirements for the recipe and the effects of additives are emphasized and reviewed with reference to the current research situation and development. Finally, the future work of soft magnetic ferrites, including prospective research aspects and properties to be reached, are proposed. The recipe is the key factor to determine the properties of the ferrites. The additive is one of the effective methods to improve the properties of the ferrites. The sintering technique is the key point to fabricate high-performance ferrites. The ferrites with properties, such as high frequency, low power waste, and high permeability, and surface mounting device will be the future trends. Also, nano magnetic ferrites need further investigation.

Key words soft ferrites, high permeability, development

0 引言

随着科学技术的进步, 软磁铁氧体材料作为一种重要的基础功能材料, 广泛用于通讯、传感、音像设备、滤波器、变压器等电子工业中, 为软磁铁氧体的应用打开了广阔的市场^[1~4]。同时, 由于通讯、计算机网络等电子信息产业的快速发展, 电子仪器、设备的体积趋于小型化, 对高密度化、轻量化、薄型化的高性能电子元器件的需求大幅度增长, 使得高性能软磁铁氧体材料的需求量与日俱增, 也使软磁铁氧体的制备工艺日益完善, 发展成为种类繁多、应用广泛的功能材料, 促使软磁铁氧体材料向更高的频率和更低的功耗方向发展^[5~7]。21 世纪, 软磁铁氧体材料将会沿着怎样的方向发展, 是每个科技工作者和企业界都会关注的问题。本文从应用、性能要求、研究现状及发展趋势等方面对常用的锰锌铁氧体以及镍锌铁氧体进行了综合介绍。

1 软磁铁氧体材料的种类、应用及其性能要求

1.1 软磁铁氧体的种类

软磁铁氧体材料应用广泛, 种类繁多。表 1 列出了当前工业生产的软磁铁氧体的主要系列及其特性^[8]。目前应用最广泛

的软磁铁氧体材料当属尖晶石型的锰锌系列和镍锌系列, 从应用角度来看, 它们又可分为高磁导率、高频大功率(又称功率铁氧体)和抗电磁干扰的(EMD)铁氧体等几种类型。

表 1 软磁铁氧体的主要系列和特性

代表性铁氧体	晶系	结构	主要特性	频率范围
锰锌系铁氧体系列	立方	尖晶石型	高 μ_i 、 Q 、 B_s	1kHz ~
			低 μ	5MHz
镍锌系铁氧体系列			高 Q 、 f_T 、 低 t_g	1kHz ~ 300MHz
甚高频铁氧体系列	六角	磁铅石型	高 Q 、 f_T 低 t_g	300MHz ~ 1000MHz

1.2 软磁铁氧体材料的应用及其性能要求

对软磁铁氧体, 通常希望磁导率 μ_i 和电阻率 要高, 矫顽力 H_c 和损耗 P_c 要低。根据使用的不同, 还会对材料的居里温度、温度稳定性、磁导率减落系数、比损耗系数等有不同的要求。

锰锌系铁氧体材料分为高磁导率铁氧体和高频低功耗铁氧体(又称功率铁氧体)两类。

* 黑龙江省博士后科研基金(LBH-Z05064), 黑龙江省教育厅基金资助项目

关小蓉: 女, 1964 年生, 副教授 E-mail: lylgxr@sohu.com

锰锌高磁导率铁氧体的主要特性是磁导率特别高,通常把 $\mu_i = 5000$ 的材料称为高磁导率材料,一般要求 $\mu_i = 12000$ 。常用于通讯设备、测控仪器、家用电器以及新型节能灯具中的宽频变压器、微型低频变压器、微型电感元件等电子产品中。目前国外大批量生产的高磁导率铁氧体 μ_i 已达 10000,有些公司(例如日本 TDK、Tokin、美国 CMC 公司)已能批量生产 $\mu_i = 13000$ 甚至更高的产品^[9,10]。

锰锌高频低功耗铁氧体又称功率铁氧体,最初应用在低频开关电源和电视机、收音机等视听设备中的功率变压器和回扫变压器,逐步发展到用于高频 AC-DC、DC-DC 变换器和笔记本电脑的适配变压器中。具有代表性的是以日本 TDK 公司生产的 PC30、PC40、PC50 和 PC95 等产品。对功率铁氧体材料,在性能上的要求是:较高的磁导率(一般要求 $\mu_i = 2000$)、高的居里温度、高表观密度、高饱和磁感应强度和高频下的超低磁芯损耗^[11]。

在 1MHz 以下的低频范围内,NiZn 系铁氧体材料的性能比不上 MnZn 系,但在 1MHz 以上,由于它具有多孔性及高电阻率,因而大大优于 MnZn 系而成为高频应用中性能最好的软磁材料。其电阻率可达 $10^8 \Omega \cdot m$,高频损耗小,特别适用于高频 1~300MHz;而且 NiZn 系材料的居里温度较 MnZn 高, B_s 亦高至 0.5T, H_c 亦可小至 10A/m,适用于各种电感器、中周变压器、滤波线圈、扼流圈。镍锌高频铁氧体材料具有较宽的频宽和较低的传输损耗,常用于高频抗电磁干扰以及高频功率与抗干扰一体化的表面贴装器件,作为抗电磁干扰(EMD)和射频干扰(RFI)磁芯。镍锌功率铁氧体可以做成射频宽带器件,在宽频带范围内实现射频信号的能量传输和阻抗变换,其频率下限在几千赫兹,而上限频率可达几千兆赫兹;镍锌功率铁氧体材料用在 DC-DC 变换器中可以使开关电源的频率提高,使电子变压器的体积和重量进一步缩小^[12,13]。

2 软磁铁氧体材料的研究状况

当前软磁铁氧体材料的研究重点主要仍集中在两个方面:一方面研究配方以及添加剂对材料性能的影响,另一方面研究生产工艺的优化及新设备的开发对提高材料性能的作用。大量的研究表明,配方、添加剂、粉体的制备方法、烧结工艺中的各种因素等都会对铁氧体的性能产生很大的影响。

2.1 配方

理论研究和实践表明,配方是产品性能好坏的决定性因素,基本配方决定了材料的饱和磁化强度 M_s 、磁晶各向异性常数 K_1 、磁致伸缩系数 λ_s 等本征性能。MnZn、NiZn 铁氧体的基本配方区域见表 2。

表 2 MnZn、NiZn 铁氧体材料配方区域(摩尔比 %)

类型	Fe ₂ O ₃	MnO	NiO	ZnO	文献
高磁导率 MnZn 铁氧体	51.5~52.5	25.0~27.0		21.5~23.0	5
MnZn 功率铁氧体	53.5~55.5	28.0~32.0		14.0~18.0	14
NiZn 铁氧体	50~70		5~40	5~40	15

MnZn 铁氧体的磁导率与材料的各向异性常数 K_1 、磁致伸缩系数 λ_s 有密切的关系。当各向异性常数 K_1 和磁致伸缩系数 λ_s 接近于 0 时,材料就有较好的初始磁导率。研究表明,过量的

Fe₂O₃ 在烧结时形成 Fe₃O₄,它除了降低铁氧体的 K_1 和 λ_s 值之外,还可以使 B_s 和 T_c 提高;ZnO 过量,能有效地促使 K_1 和 λ_s 趋于零,大幅度提高初始磁导率 μ_i 。因此,实际应用中可在一定范围内增加 ZnO 和 Fe₂O₃。对于高磁导率铁氧体,应适当增加 Zn 含量,提高材料的磁导率和饱和磁感应强度,并使磁损耗降低,但过多的 Zn 会使居里温度降低;功率铁氧体在高功率状态下工作,温度较高,应使 ZnO 含量较少,Fe₂O₃ 含量较多^[11,16]。NiZn 铁氧体一般在高频范围内使用,Fe₂O₃ 的含量应保持在 50%左右,频率越高,ZnO 含量应该越低,相应地 NiO 含量随之提高^[15]。

目前研究和开发的铁氧体基本遵守上述成分选择原则。表 3 示出了近年来国内外研究开发的 MnZn 和 NiZn 铁氧体材料的配方情况。

表 3 近年 MnZn、NiZn 铁氧体材料配方情况表
(摩尔比 %或分子式)

系列	类型	Fe ₂ O ₃	MnO	NiO	ZnO	掺入的杂质	文献
MnZn 系	高磁导率	52.8	24.2		23		5
	高磁导率 低功耗	53.8	33.2		13		14
	高频宽温 低功耗	52.8	36.5 (MnCO ₃)		10.7	SiO ₂ , TiO ₂ , CaCO ₃	16
	高温高 B _s 低功耗	55	41 (Mn ₃ O ₄)		4	SiO ₂ , TiO ₂ , CaCO ₃	17
	高磁导率	52	26		22	SnO ₂	18
	高磁导率	Zn _{0.454} Mn _{0.493} Fe _{0.053} Fe ₃ ²⁺ O ₄				P ₂ O ₅	19
	高 B _s 高 μ	Zn _{0.3} Mn _{0.629} Fe _{2.071} O ₄				CoO, TiO ₂ , Nb ₂ O ₅ Bi ₂ O ₃ , V ₂ O ₅	20
	高频功率	Zn _{0.16} Mn _{0.76} Fe _{2.08} O ₄				CaO, V ₂ O ₅	21
	高频功率	Zn _{0.15} Mn _{0.78} Fe _{2.07} O ₄				Nb ₂ O ₅	22
NiZn 系	高起始磁 导率	50.5		12.5~18.5	31	CuO, WO ₃ MoO ₃	23
		51		19	30	Co ₂ O ₃ , V ₂ O ₅	15
	高磁导率	Ni _{0.20} Zn _{0.60} Cu _{0.20} Fe _{1.98} O ₄				CuO, V ₂ O ₅	7
		Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄					5
	Ni _{0.24} Zn _{0.6} Fe _{1.98} O ₄				Co ₂ O ₃	24	

2.2 添加剂

添加剂对软磁铁氧体的性能有着重要的影响,也是制备高性能铁氧体材料的有效方法之一,添加剂的研究已逐渐成为铁氧体制备中的关键技术,也是各研究者的技术秘密。添加剂对铁氧体性能的影响,近年来国内外已进行了许多研究,这些研究情况见表 4。

添加剂的作用主要有矿化、助熔、阻止晶粒长大和改善电磁性能,可将其分为几类:第一类添加剂在晶界处偏析,影响晶界电阻率,如 CaO、SiO₂ 等;第二类影响铁氧体烧结时的微观结构变化,改善微观结构,降低材料损耗 P_c ,提高材料的起始磁导率 μ_i ,如 V₂O₅、P₂O₅、MoO、Bi₂O₃ 等;第三类添加剂不仅可富集于晶界,而且也可以固溶于尖晶石结构之中,影响材料磁性能,如 TiO₂、SnO₂、Nb₂O₅、Co₂O₃、NiO、CuO 等^[11,25,26]。

表 4 常见添加剂及其对铁氧体材料性能的影响

类型	添加剂	添加剂的作用	对铁氧体性能的影响	文献
锰 锌 铁 氧 体	SnO ₂	促使晶粒均匀生长	提高起始磁导率及烧结密度,降低比损耗因子	18
	Nb ₂ O ₅	细化晶粒,促进晶粒均匀致密,还有助于阻止 Zn 的挥发	提高起始磁导率和电阻率,降低损耗	20
	纳米 SiO ₂	有助于晶粒生长,起到助熔作用	提高铁氧体密度,降低烧结温度、涡流损耗和磁滞损耗	27
	TiO ₂	实现磁晶各向异性常数和磁致伸缩系数的补偿	提高磁导率并改善磁导率温度系数,降低涡流损耗和磁滞损耗	16
	P ₂ O ₅	较低的烧结温度,促进晶粒的生长及致密化	提高起始磁导率,过量掺杂会使损耗增加,起始磁导率下降	19
	Bi ₂ O ₃	细化晶粒,降低气孔率,增大材料密度	提高起始磁导率以及饱和磁感应强度	20
	CoO	起正负 K 值的补偿作用,同时能降低材料磁致伸缩系数	在宽温范围得到低的功率损耗	20
	CaCO ₃	使晶界明显,晶粒均匀	使起始磁导率增加,改善起始磁导率的频率特性	17
	CaO	富集于晶界使晶界电阻率增大	降低涡流损耗	21
	V ₂ O ₅	形成液相烧结并使晶粒细化,降低晶界和晶粒内的气孔率	增大起始磁导率,过量掺杂会使起始磁导率下降,涡流损耗增加	20
镍 锌 铁 氧 体	MoO ₃	加速晶界移动,促进尺寸增大	提高起始磁导率,过量掺杂会使烧结密度和起始磁导率降低	23
	Co ₂ O ₃	促使晶粒均匀生长,阻止晶粒异常长大	提高截止频率,降低损耗	24
	CuO	降低烧结温度,使晶粒更加完整,组织更加致密	提高初始磁导率,改善温度特性,降低磁致损耗	4
	V ₂ O ₅	降低烧结温度,细化晶粒	对起始磁导率影响复杂,适量添加能够使起始磁导率增加	4
	复合添加 SiO ₂ 、Bi ₂ O ₃	降低烧结温度,抑制晶粒增长	会使磁导率降低,但能够提高截止频率	28
	Bi ₂ O ₃	使晶粒尺寸增大,降低烧结温度和气孔率	提高磁导率和品质因数	28

在添加剂的应用方面有很多实例,如上海化源磁业有限公司推出了自己的专利。上海化源在合理选择基本配方的前提下,加入微量添加剂 V₂O₅ (0.02% ~ 0.03% wt)、SiO₂ (0.00125% ~ 0.0025% wt)、CaCO₃ (0.025% ~ 0.05% (wt)),并结合适当的烧结工艺制备了中高频(100kHz)下功率损耗 P_c 400kW/m³ 的 MnZn 功率铁氧体^[11]。

2.3 粉体的制备方法

软磁铁氧体粉体常用的制备方法分为干法和湿法两种。干

法将氧化物直接球磨混合,经成型和高温烧结制成铁氧体。这种方法工艺简单,配方准确,应用较为普遍。但采用氧化物作原料,烧结活性和混合的均匀性受到限制,制约了产品性能的进一步提高。湿法工艺主要有:共沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法/溶胶-沉淀法、喷烧法、超临界法等。湿法工艺制备的铁氧体粉烧结活性和均匀性好,越来越受到人们的重视。

近年,自蔓延高温合成法制备铁氧体备受关注,它是材料合成的一种新方法。其最大的特点是利用反应物内部的化学能合成材料,反应体系一经点燃,燃烧反应即可自我维持,一般不再需要补充能量。这种方法简单,不需要复杂的实验装置,与传统方法比较省却了耗时耗能的预烧环节,成本低,效率高,占地少,铁氧体磁粉纯度高,烧结性好而越来越受到重视^[15]。

2.4 烧结工艺

烧结工艺是制备高性能铁氧体的关键,即使有合理的配方、适宜的掺杂,其微观结构也会因烧结工艺的不同而呈明显的差别。国内外对软磁铁氧体的烧结工艺开展了大量的研究,探讨了升温速度、烧结温度、烧结时间、降温速度、烧结气氛等因素对铁氧体密度、晶相结构、晶粒尺寸的影响^[4,29,30]。研究表明,要使烧结得到的磁芯成为密度高、气孔率小、晶界直以及晶粒尺寸均一的烧结体,在烧结过程中必须严格控制升降温模式、烧结温度、保温时间以及平衡气氛,确保烧结过程中固相反应完全。在升温过程中,因为还没有形成单一的尖晶石相,对周围的气氛要求不是很苛刻,在空气、真空或保护气氛中升温都可以;在保温过程中,除了使晶粒长大和完善之外,还应当使材料成为化学成分固定的单一尖晶石结构的铁氧体,这就要求控制正确的保温气氛来完成。传统烧结工艺的烧结温度比较高,一般均在 1100 以上,过高的烧结温度容易导致晶粒异常长大,晶粒不均匀,致使损耗和温度特性恶化;而且过高的烧结温度对烧结炉的设计制造要求也高,能源消耗大,不利于环保和降低成本。为了降低铁氧体材料的烧结温度,国内外在低温烧结工艺方面展开了研究^[4,7,13]。结果表明,低温烧结的铁氧体具有更高的密度、更低的损耗和更好的温度特性,晶粒更完整,组织更致密。

近年来,人们还对微波烧结进行了深入研究。微波烧结是利用铁氧体所具有的良好吸波能力,在高频电磁场中,通过其介质损耗和磁损耗,将微波能转化为热能而进行烧结的。与常规烧结相比,微波烧结具有如下特点:(1)烧结温度大幅度降低,有的甚至比常规烧结低 500 左右;(2)烧结时间缩短,致密速度加快;(3)比常规烧结节能 70% ~ 90%,降低了烧结费用;(4)微波烧结安全无污染。研究表明,微波加热方式不但大大优于传统加热方式,而且,利用微波烧结技术烧结的铁氧体材料的各项性能均达到或超过传统烧结方式的产品^[7,31,32]。

3 软磁铁氧体材料发展趋势

软磁铁氧体材料可预期的市场潜力,使其成为世界各大铁氧体公司争相发展的重点。21 世纪,随着科技的不断发展,新产品的不断出现和产量的不断增加,软磁铁氧体材料在电子产品中所占的比重也会越来越大。市场对于软磁铁氧体材料的性能也提出了更高的标准和要求,如元器件的小型化、片式化、高频化、高性能、低损耗等,这将大大推动软磁铁氧体材料的研究。当前,国内外的软磁铁氧体研究开发,都朝着高饱和磁感应强度(B_s)、高磁导率(μ)、高居里温度(T_c)、低损耗(P_c)、低矫顽力

(H_c) 和高频化、薄型化、宽温特性方向发展。在今后一段时期内,软磁铁氧体发展的重点是高频低功耗、高磁导率材料和片式化的表面贴装元件。

还应关注的是,20世纪90年代发展起来的非晶态软磁合金及纳米微晶金属软磁材料,其高频特性优良、起始磁导率高、矫顽力低,性能远优于软磁铁氧体材料。虽然目前在性价比上尚处于劣势,在市场占有率上一时还不会对软磁铁氧体材料构成威胁,但在高技术领域的应用中它们将大显身手,逐步成为软磁铁氧体材料有力的竞争者。因此,开展纳米软磁铁氧体的研究已成为软磁铁氧体材料研究的重要课题,令人可喜的是,已有研究人员开始致力于纳米软磁铁氧体的研究^[33~35]。

参考文献

- Kawano T, Fujita A, Gotoh S. Analysis of power loss at high frequency for MnZn ferrites [J]. J Appl Phys, 2000, 87(9):6214
- Ott G, Wrba J, Lucke R. Recent developments of Mn-Zn ferrites for high permeability applications [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 254-255:535
- Caltun O F, Spinu L, Stancu Al, et al. Study of the microstructure and of the permeability spectra of Ni-Zn-Cu ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2002, 242-245:160
- Hu J, Yan M, Luo W. Preparation of high-permeability NiZn ferrites at low sintering temperatures [J]. Physica B, 2005, 368:251
- 谭维,王长振,周甘宇,等.高磁导率锰锌铁氧体材料研究现状[J].中国锰业,2002,20(1):33
- Costa A C F M, Tortella E, Morelli M R, et al. Synthesis, microstructure and magnetic properties of Ni-Zn ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 256(1):174
- Yan M, Hu J. Microwave sintering of high-permeability ($Ni_{0.20}Zn_{0.60}Cu_{0.20}$) $Fe_{1.98}O_4$ ferrite at low sintering temperatures [J]. J Magn Magn Mater, 2006, 305:171
- Mitsuo Sugimoto. The past, present, and future of Ferrites [J]. J Am Ceram Soc, 1999, 82(2):269
- Ravinder D, Ramana A V, et al. Abnormal dielectric behaviour in polycrystalline zinc-substituted manganese ferrites at high frequencies [J]. Mater Lett, 2002, 52:259
- Gonchar A, Gorelik S, et al. The regularity of microstructure formation and its influence on the properties of soft magnetic ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2000, 215-216:221
- 孙科,兰中文,余忠. MnZn 功率铁氧体的研究进展 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(12):17
- Ken Hirota, Yoshihiko Takano, et al. A new composite material with high saturation magnetization density and high electrical resistivity [J]. Mater Res Bull, 2000, 35:1137
- Zhang Hongguo, Li Longtu, Wu Pingui. Investigation on structure and properties of low-temperature sintered composite ferrites [J]. Mater Res Bull, 2000, 35:2207
- 席国喜,路迈西. 锰锌铁氧体材料的制备研究新进展 [J]. 人工晶体学报, 2005, 34(1):164
- 李焱. [博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2000
- 钟家全. 高频宽温低功耗 MnZn 铁氧体材料的研制 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(4):41
- 樊志远, 祁关泉. 高温高 B_s 和低功耗 MnZn 铁氧体材料的研制 [J]. 磁性材料及器件, 2006, 37(1):39
- 黄爱萍, 何华辉, 冯则坤, 等. 掺杂对高导 MnZn 铁氧体材料性能的影响 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2):39
- 戴煜辉, 尉旭波, 苏桦, 等. P_2O_5 掺杂对高磁导率 MnZn 铁氧体性能的影响 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(2):29
- 罗海清, 范仲康, 傅朕. 高 B_s 高 μ_i MnZn 铁氧体材料的制备及性能 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(2):23
- 余忠, 兰中文, 王京梅. 添加 CaO, V_2O_5 对高频 MnZn 功率铁氧体性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2004, 18(2):176
- 张益栋, 兰中文, 余忠. Nb_2O_5 掺杂对高频 MnZn 功率铁氧体微结构和性能的影响 [J]. 磁性材料及器件, 2003, 34(5):8
- 苏桦, 张怀武, 唐晓莉. CuO , MoO_3 和 WO_3 掺杂对 NiZn 铁氧体磁性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2005, 19(5):549
- 文雯, 张怀武, 钟慧. Co 离子添加对 NiZn 铁氧体电磁性能的影响 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(3):24
- Ammad H Qureshi. The influence of hafnia and impurities (CaO/SiO_2) on the microstructure and magnetic properties of Mn-Zn ferrites [J]. J Crystal Growth, 2006, 286:365
- Zhu J, Tseng K J. Reducing dielectric losses in MnZn ferrites by adding TiO_2 and MoO_3 [J]. IEEE Trans Magn, 2004, 40(5):3339
- Nie Jianhu, Li Haihua, et al. The effect of nano- SiO_2 on the magnetic properties of the low power loss manganese-zinc ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 265:172
- 何新华, 张庆秋. $SiO_2 \cdot Bi_2O_3$ 对铁氧体的烧结和磁性能的影响 [J]. 中国陶瓷, 2003, 39(2):10
- Chen S H, Chang S C, Lin I N. The influence of grain boundary internal stress on permeability: temperature curve for Mn-Zn ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2000, 209:193
- 邓尚斌. MnZn 铁氧体烧结工艺研究 [J]. 磁性材料及器件, 1996, 27(1):50
- Sorescu M, Diamandescua L, et al. Structural and magnetic properties of NiZn ferrites prepared by microwave sintering [J]. J Magn Magn Mater, 2004, 279:195
- Tsakaloudi V, Papazoglou E, Zaspalis V T. Microwave firing of MnZn ferrites [J]. Mater Sci Eng B, 2004, 106:289
- Verma Seema, Pradhan S D, Pasricha Renu. A novel low-temperature synthesis of nanosized NiZn ferrites [J]. J Am Ceram Soc, 2005, 88(9):2597
- Zhong Zhifeng, Li Qiang, Zhang Yiling. Synthesis of nanocrystalline Ni-Zn ferrite powders by refluxing method [J]. Powder Techn, 2005, 155:193
- Hsu W C, Chen S C, Kuo P C, et al. Preparation of NiCuZn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and the magnetic properties after sintering [J]. Mater Sci Eng B, 2004, 111:142

(责任编辑 张明)