

Current Research Development of Mn-Zn Ferrites

Chun-xiang Ke, Yu-jiao Li, Chun-cheng Zhu

Chemistry Department of Harbin Normal University, Harbin, China, 150080

Email: kechunxiang0110@163.com

Abstract: Mn-Zn ferrite, with its excellent performance widely used in the electronics industry. This article summarized up the Mn-Zn ferrite materials performance, formula, synthesis methods, additives such as the research situation in recent years from the theory. Comparing the traditional methods and new methods of the advantages and disadvantages, Expound the mechanism of some commonly used additives. And reviewed the development trends and application prospects of Mn-Zn ferrite.

Keywords: Mn-Zn ferrite; high permeability; preparation process; development trend

锰锌铁氧体研究的最新进展

柯春香, 李玉胶, 朱春城

哈尔滨师范大学化学系, 哈尔滨, 中国, 150080

Email: kechunxiang0110@163.com

摘要: 锰锌铁氧体凭借其优良的性能被广泛应用于电子工业。本文主要从理论上对 Mn-Zn 铁氧体近几年来在材料性能、配方、工艺合成方法、添加剂等方面的研究现状进行了概括。比较了传统合成方法与新方法的优缺点, 阐述了一些常用添加剂的作用机理, 并综述了 Mn-Zn 铁氧体的发展趋势及应用前景。

关键词: 锰锌铁氧体; 高磁导率; 制备工艺; 发展趋势

1 引言

近年来, 随着电子信息产业的飞速发展, 磁性材料愈来愈多地被应用到电子器件中, 已成为电子技术发展的主导材料。而这其中尤以软磁铁氧体的广泛应用为主, 用软磁铁氧体制得各种磁性元件, 如回扫变压器, 偏转线圈, 抗电磁干扰变压器等。由于软磁铁氧体具有高电阻率、高频特性等优点, 由软磁铁氧体制成的性能优良的磁性元器件已被广泛应用到家电、通信、医疗卫生及摄录器材等领域^[1]。其中, 锰锌铁氧体材料一直是国内外软磁材料的研究重点之一, 因其具有高磁导率、高饱和磁化强度及高频低损耗等特点, 而被广泛应用于滤波器、记录磁头、共模扼流圈, 以及日常生活的照明变压器、电子镇流器中^[2]。与此同时, 在制作感力元件方面也是其他磁性材料所不能及的^[3]。本文主要以锰锌铁氧体为代表, 介绍其各方面的最新研究情况。

2 锰锌系铁氧体材料分类

锰锌系铁氧体大体可分为两类: 一类是高磁导率铁氧体(磁导率大于 5000), 主要用于信号传输与转换, 应用在光纤通讯和数字网络技术中的宽带变压器、脉冲变压器以及电磁兼容(EMC)领域中的抗电磁干扰(EMI)器件^[4-5]; 另一类是功率铁氧体, 主要用于功率传输与转换, 应用在各种开关电源(AC-DC、DC-DC 变换器)以及显示器的回扫变压器等^[6-7]。

2.1 高磁导率 Mn-Zn 铁氧体

磁导率是软磁铁氧体材料的基本参数之一, 通常, 把磁导率 $\mu_i \geq 5000$ 的铁氧体材料称为高磁导率材料。高磁导率材料在通信技术、广播、电视、电子仪表、计算机等领域中的应用不断扩大。近年来, 各种整机对高磁导率材料高频特性要求越来越高, 要求磁导率 μ_i 也越来越高。若材料的磁导率较高, 线圈电阻损耗就可以有效地减少, 而且, 器件及整机可以小型化、轻量化。早在 60 年代, 德国 Siemens(Epcos)公司的研

基金项目: 黑龙江省教育厅基金资助(11541101)

究人员就在实验室制得起始磁导率 $\mu_i=40000$ 的材料^[8]。目前,国外一些公司,如日本川崎(JFE)、西门子、飞利浦、美国 TOMITA 公司能生产 $\mu_i=15000$ 的铁氧体材料,国内有少量的企业能生产 $\mu_i=(10000-13000)$ 的铁氧体材料。

2.2 高频 Mn-Zn 功率铁氧体

高频低功耗 Mn-Zn 铁氧体又称功率铁氧体,由于电子整机系统向集成智能化,平面贴装化、小型轻量化方向发展,从而要求作为整机系统必不可少的组成部分的电源向高频化发展,而高频化电源的核心是高频低损耗的功率铁氧体材料,对该类材料的基本要求是要有高磁导率(μ_i 、 μ_a)、高饱和磁感应强度 B_s 、高居里温度(T_c)、高电阻率(ρ)和低的功率损耗(P_L)。

近年,国外一些发达国家已有能工作于 0.5~2MHz 高频开关电源的功率铁氧体产品(如日本 TDK 公司 PC50 材料、荷兰 Philip 公司 3F4 材料、德国 Siemens 公司 N49 材料等),而我国的功率铁氧体材料只能工作于 0.3MHz 以下,极大地制约了我国电力电子技术的进步^[9]。表1为锰锌铁氧体主要分类和特性^[10]。

Table 1 The mainly classify and characteristic of Mn-Zn ferrite
表1 锰锌铁氧体主要分类和特性

锰锌铁氧体分类	结构	特性	应用频率范围
高磁导率 Mn-Zn 铁氧体	尖晶石型	高 μ_i 、 Q 、 B_s ; 低 α_r	1kHz~5MHz
高频 Mn-Zn 功率铁氧体	磁铅石型	高 Q 、 f_r ; 低 tgd	0.5 MHz ~2MHz

3 锰锌铁氧体制备工艺的研究

3.1 Mn-Zn 铁氧体传统制备方法

Mn-Zn 铁氧体粉体常用的制备方法分为干法和湿法两种。干法主要是氧化物法,而湿法则主要包括化学共沉淀法、溶胶-凝胶法、喷雾烧法、超临界法等。干法和湿法在应用中都有其各自的优缺点,例如有些湿法工艺路线长,条件敏感,稳定性差,但此工艺制备的铁氧体粉末烧结活性和均匀性好;而干法(主要指氧化物法)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性受到限制,从而制约了产品性能的进一步提高。下面就针对几种主要方法做详细介绍。

3.1.1 氧化物法

氧化物法是目前工业生产锰锌铁氧体主要采用的一种方法,属干法,即选用纯度较高的氧化铁、氧化锰(或碳酸锰)、氧化锌等作为原料,按一定配比要求混合后烧结成型制得。氧化物法工艺简单,易于大规模工业生产。但是,高纯度的氧化铁、氧化锰、氧化锌的价格很昂贵,使得生产 Mn-Zn 铁氧体产品成本非常高。与此同时,采用固相物作先驱体原料,各组分氧化物的反应活性都不高,混合也不可能做到微观均匀。另外,用氧化物配料球磨时,容易发生团聚,球磨时间过长,还会引入杂质和过量的铁^[11-12]。

3.1.2 化学共沉淀法

化学共沉淀法制备铁氧体微粉是选择一种合适的可溶于水的金属盐类,按所制备材料组成计量,将金属盐溶解,并以离子状态混合均匀,再选择一种合适的沉淀剂,将金属离子均匀沉淀或结晶出来,再将沉淀物脱水或热分解而制得铁氧体微粉。这种方法与氧化物法相比,具有颗粒细小、均匀、纯度高、化学活性好等优点,有很大的发展潜力。但该法的缺点是粉体的团聚难以克服。为此,研究者也正逐渐改善这种方法,以减弱并消除团聚。同时,化学共沉淀法还存在着成本高、污染重、生产规模小等缺点,所以要在大规模的生产中广泛应用,可能还存在着一定的局限性^[13]。

3.1.3 溶胶凝胶法

溶胶-凝胶法是近年来发展起来的一种新的湿化学合成方法,被广泛应用在各种无机功能材料的合成当中。此法将金属有机化合物,如醇盐等溶解于有机溶剂中,通过加入蒸馏水等使其水解、聚合,形成溶胶,再采取适当的方法使之形成凝胶。并在真空状态下低温干燥,得疏松的干凝胶。再作高温煅烧处理,即可制得纳米级氧化物粉末。溶胶-凝胶法制得的粉体具有纯度高、均匀性好、化学组成准确、合成温度低、活性好等优点,是一种较好的制备超微粉的方法。该法制备的 Mn-Zn 铁氧体原始粉末成分均匀性取决于溶胶-凝胶转变能否完全实现,酸度对溶胶的形成、凝胶的转化和凝胶性质都有很大的影响。所以此法在控制酸度值方面尤为重要^[14,15]。

3.1.4 喷雾焙烧法

喷雾焙烧法是采用工业原料 $FeCl_2$ 和 $MnCl_2$ 按比例混合成氯化物溶液,然后置于 Ruthner 焙烧炉中,在 800℃ 进行喷雾焙烧形成 Fe 和 Mn 的氧化物,为了获得确定的 Mn-Zn 铁氧体成分,还要加入经 850℃,

3 h 预烧后的 $ZnFe_2O_4$ 一起放在研磨机中湿式混合, 适量添加杂质, 这样就制成了锰锌铁氧体粉末。此法的优点是粒径分布窄、均匀性好、无预烧环节和粉碎加工, 因此工艺较简单^[16]。

3.2 Mn-Zn 铁氧体新型合成方法

3.2.1 自蔓延高温合成法

自蔓延高温合成 (Self-propagating High-temperature Synthesis, 简称 SHS) 法, 是近年来发展起来的新方法, 属高新技术领域。这种方法最大特点是利用反应物内部的化学能来合成材料, 一经点燃, 燃烧反应即可自我维持, 一般不再需要补充能量。且整个工艺过程极为简单、能耗低、生产率高、产品纯度高^[17-18]。

由于 SHS 法减少了传统铁氧体工艺中的铁氧体化步骤, 这就降低了能耗, 缩短了合成时间, 节能高效。另外, 此法与传统氧化物陶瓷工艺相比, SHS 合成技术用小型、高效的自蔓延合成器取代了大型回转窑, 减少了占地面积。这些优点使 SHS 技术的应用越来越广, 目前, 用此法已经合成了大量性能优良的难熔材料、耐磨材料、复合材料等, 应用领域正不断拓展。

3.2.2 机械化学合成法

机械化学合成法是近年发展起来的, 通过高能球磨的作用使不同金属元素相互作用形成纳米化合物的新方法。它可以使材料远离平衡状态, 从而获得其它技术难以获得的特殊组织、结构的材料。该方法是一个无外部热能供给的干式高能球磨过程, 是一个由大晶粒变成小晶粒的过程。目前, 通过机械化学反应合成的 Ni-Zn 铁氧体晶粒尺寸为纳米级, 经 800°C 热处理后, 晶粒表现为亚铁磁性。在机械球磨过程中, 颗粒内产生大量的缺陷, 显著降低元素的扩散激活能, 使得组元间在室温下可显著进行原子或离子扩散; 颗粒不断冷焊、断裂、组织细化, 形成了无数的扩散/反应偶, 同时扩散距离也大大缩短^[19-20]。

3.2.3 低温燃烧合成法

低温燃烧合成是采用硝酸盐水溶液和有机燃料混合物为原料, 在较低的点火温度和燃烧放热温度下, 简便、快捷地制备出多组分氧化物粉体。此法优点为: 利用原料自身的燃烧放热即可达到化合反应所需的高温; 燃烧合成速度快、产生气体, 使形成的粉末不易团聚生长, 能够合成比表面积高的粉体; 液相配料,

易于保证组分的均匀性。在低温燃烧合成工艺中, 燃烧火焰温度是影响粉末合成的重要因素之一, 可以通过控制原料种类, 燃料加入量以及点火温度等控制燃烧合成温度, 进而控制粉体的粒度等特性。目前已用此法成功的合成了 Mn-Zn 及 Ni-Zn 铁氧体^[21]。

3.2.4 水热合成法

水热合成法的原理是在加热、加压时一些氢氧化物在水中的溶解度大于对应的氧化物在水中的溶解度, 于是氢氧化物溶入水中的同时析出氧化物。该合成方法的特点是: 可直接得到结晶良好的粉体, 无需作高温灼烧处理和球磨, 从而避免了粉体的硬团聚、杂质和结构缺陷等。粉体在烧结过程中表现很强的活性; 易得到合适的化学计量比和晶粒形态; 可使用较便宜的原料, 工艺较为简单。所以这种方法是低能耗、低污染、低投入的, 且粉体质量好, 产量也较高。目前用水热法合成铁氧体已经取得了较大的进步^[22-23]。

4 影响 Mn-Zn 铁氧体材料性能的因素

随着 Mn-Zn 铁氧体材料应用日趋广泛, 其各种性能要求也逐渐提高, 而在制备 Mn-Zn 系铁氧体过程中, 如果制备方法一旦确定, 主要因素在于两个方面:

(1) 配方 (2) 添加剂。

4.1 配方

一种材料的本征性能, 如饱和磁化强度 M_s 、磁晶各向异性常数 K 、磁致伸缩系数 λ_s 等, 主要取决于基本配方。这是由于原材料的纯度和活性对铁氧体材料的工艺和性能有很大的影响, 纯度低的原材料在烧结过程中会形成巨晶, 从而使磁导率降低损耗增大。基于配方的选择决定了产品性能的好坏, 成分一旦确定材料的磁性能也就确定了, 所以应尽可能选择纯度高、杂质少、粒度细和活性高的材料^[24-25]。一些常见 Mn-Zn 系铁氧体材料配方如表 2。

Table 2 The compose of some typical Mn-Zn ferrite
表 2 几种典型 Mn-Zn 铁氧体的配方 (摩尔比)

MnZn 铁氧体类型	Fe_2O_3	MnO	ZnO	添加剂	文献
高磁导率	52	26	22	SnO_2	3
	51.5	24.5	24.0		26
	53.8	33.2	13		10
高磁导率	$Zn_{0.16}Mn_{0.76}Fe_{2.08}O_4$			CaO , V_2O_5	25
	$Mn_{0.57}Zn_{0.34}Fe_{0.09}Fe_2O_4$			CaO	21
低功耗	$Mn_{0.51}Zn_{0.45}Fe_2Fe_{0.04}O_4$			SiO_2 , $CaCO_3$	27

4.2 添加剂

在几种影响因素中,添加剂是主要影响因素之一,添加剂在铁氧体材料中的作用有助熔、矿化、阻晶和改善电磁性能等。随着各种新的添加剂不断出现,锰锌铁氧体的磁性能也随之不断改善。添加剂可以改变烧结条件和物料活性,有效的影响烧结速度。不同添加剂的机理不同,表3为几种常见添加剂的作用机理。

Table 3 the mechanism of some commonly used additives
表3几种常见添加剂作用机理

添加剂	作用机理	对性能影响	文献
SiO ₂	改善晶粒尺寸,提高晶界电阻率	降低功率损耗,如果过量则晶粒异常长大,功耗增加	28
CaO	形成高阻层,提高电阻率	降低涡流损耗,过量磁致损耗增大,性能恶化	28,29
V ₂ O ₅	助熔,提高烧结密度,降低气孔率	增大起始磁导率,过量气孔进入晶粒内,致使起始磁导率下降	28,30
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	28,31,32
Bi ₂ O ₃	促进晶粒生长,降低气孔率	增大材料密度,过量晶粒分布不均,起始磁导率下降	28,33
P ₂ O ₅	在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,但过量掺杂会使损耗增加,起始磁导率下降	34
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	28,35
CaCO ₃	晶粒的平均尺寸增大,均匀性改善	使起始磁导率增加,改善起始磁导率的频率特性,掺入过量会使晶粒熔结成块	40
Bi ₂ O ₃ -MoO ₃	改善材料的致密性,促使晶粒长大	提高起始磁导率	36
SnO ₂ -ZrO ₂	促进晶粒的均匀性和致密性	提高饱和磁感强度	37
TiO ₂ -MoO ₃	加入MoO ₃ 可以减小内部极化强度	减缓TiO ₂ 的不良影响,提高磁性能	28,38
SiO ₂ -CaO	改善晶粒尺寸,提高晶界电阻率,而加入CaO可降低涡流损耗	降低功率损耗,控制晶粒的异常长大	28,39
CaCO ₃ -SiO ₂	聚集在晶界,增加晶界厚度	降低功耗	40

6 致谢

本论文在朱春城教授的精心指导下完成。在此,衷心感谢导师在我工作、学习和生活等方面给予的指导、建议、批评和帮助。

References (参考文献)

- [1] S. Modak, S. Karan, S. K. Roy, S. Mukherjee, D. Das, P. K. Chakrabarti. Preparation and characterizations of SiO₂-coated nanoparticles of Mn_{0.4}Zn_{0.6}FeO₂ [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321:169-174.
- [2] Wang Jian, Yu Li Ming, Zhang Jian, Yuan Shu Juan, Cao Shi Xun. Effect of value regulators on the formation magnetic properties of Mn-Zn ferrite nano-crystallite [J]. *Nano-processing Technique*, 2008, 5 (3):28-34.
- [3] Wei Tan, Changzhen Wang, Ganyu Zhou, Siqi Zhang. Current status of high initial permeability MnZn ferrite materials [J]. *China's Manganese Industry*, 2002, 2 (1): 33-36. 谭维, 王长振, 周甘宇, 章四琪. 高磁导率锰锌铁氧体材料研究现状[J]. *中国锰业*, 2002, 2 (1): 33-36.
- [4] Fangfang He, Pichi Xu, Zhongshi Zhang, Yuanlin Zhou. Applications and development of Mn-Zn soft ferrites for electromagnetic interference suppression [J]. *Materials Review*, 2008, 22 (10):28-31. 何方方, 许丕池, 张忠仕, 周元林. 抗电磁干扰 Mn-Zn 铁氧体的应用及发展[J]. *材料导报*, 2008, 22(10):28-31.
- [5] S. Dasgupta, K. B. Kim, J. Ellrich, J. Eckert, I. Manna. Mechano-chemical synthesis and characterization of microstructure and magnetic properties of nanocrystalline Mn_{1-x}Zn_xFe₂O₄ [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 424: 13-20.
- [6] Jiugao Liu, Xiaomin Fu. Development of Mn-Zn ferrite in magnetic properties [J]. *Journal of Magnetic Materials and devices*, 2005, 36(2): 7-9.

- 刘九皋, 傅晓敏. 锰锌铁氧体材料技术性能的拓展[J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(2): 7-9.
- [7] Ke Sun, Zhongwen Lan, Zhong Yu, Lezhong Li, Haining Ji, Zhiyong Xu. Effects of NiO addition on the structural, microstructural and electromagnetic properties of manganese-zinc Ferrite[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 113: 797-802.
- [8] Roess E. Magnetic properties and microstructure of high permeability MnZn ferrites.[J]. *Proceeding of the International Conference*, 1966:105-108.
- [9] Zhong Yu, Zhongwen Lan. Progress in Research on MnZn Power Ferrite J]. *Materials Review*, 2005, 19 (4) :101-103.
余忠, 兰中文. MnZn 功率铁氧体研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19 (4) :101-103.
- [10] Xiaorong Guan, Jianguang Zhang, Chuncheng Zhu, Xiaodong He. Current Research Situation and Development of Mn-Zn and Ni-Zn Ferrites [J]. *Materials Review*, 2006, 20 (12): 109-112.
关小蓉, 张剑光, 朱春城, 赫晓东. 锰锌、镍锌铁氧体的研究现状及最新进展[J]. 材料导报, 2006, 20 (12): 109-112.
- [11] Guoxi Xi, Lumai Xi. New Development of Synthesis of Manganese-zinc Ferrite Materials[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005, 34 (1):164-168.
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):164-168.
- [12] Susumu Handa, Yasuo Ohshima, Yousuke Nakasato. Low-Temperature Sintering of Mn-Zn Ferrites Using a Media Agitation mill [J]. *Materials Science Forum*, 2007, 534-36(2):1337-1340.
- [13] Weiqing She, Tai Qiu. Study on MnZn ferrite micropowder prepared by co-precipitation method [J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, 28 (3) : 53-56.
余维清, 丘泰. 共沉淀法制备锰锌铁氧体微粉的研究[J]. 电子元件与材料, 2009, 28 (3) : 53-56.
- [14] Jun-Gang Hou, Yuan-Fang Qu, Wei-Bing Ma. Effect of CuO-Bi₂O₃ on low temperature sintered MnZn-ferrite by sol-gel auto-combustion method [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2007, 44 :15-20.
- [15] J. Azadmanjiri. Preparation of Mn-Zn ferrite nanoparticles from chemical sol-gel combustion method and the magnetic properties after sintering [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353: 4170-4173.
- [16] Changzhen Wang, Ganyu Zhou, Siqi Zhang. The progress on the study of preparation method of soft magnetic ferrite powder [J]. *China's Manganese Industry*, 2002, 20 (3) : 37-40.
王长振, 谭维, 周甘宇, 章四琪. 锰锌铁氧体粉制备技术综述[J]. 中国锰业, 2002, 20 (3) : 37-40.
- [17] Yang Ke, Guo Zhimeng, Akhtar Farid, Zhang Bin, Tu Yifan . Effect of inner oxidant on self-Propagating high-temperature synthesis of MnZn-ferrite powder [J]. *Rare Metals*, 2006, 25:553-556.
- [18] A.C.F.M.Costa, V.J.Silva, C.C.Xin, D.A.Vieira, D.R.Cornejo, R.H.G.A.Kiminami. Effect of Urea and Glycine Fuels on the Combustion Reaction Synthesis of Mn-Zn Ferrites: Evaluation of Morphology and Magnetic Properties [J]. *Accepted Manuscript*, 2009, 65:1-4.
- [19] Juhua Luo, Jiafang Wang. Study on preparation of MnZn ferrites powder by mechanochemical method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 2008, 27 (1):95-98.
罗驹华, 王加芳. 机械力化学法制备MnZn铁氧体粉体的研究[J]. 硅酸盐学报, 2008, 27(1):95-98.
- [20] M. Mozaffari, F. Ebrahimi, S. Daneshfozon, J. Amighian. Preparation of Mn-Zn ferrite nanocrystalline powders via mechanochemical processing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 449: 65-67.
- [21] Yao Li, Jiupeng Zhao, Jiecai Han, Xiaodong He, Shanyi Du. Recent advances in preparation of ferrite powders [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2000, 18(1):51-54.
李垚, 赵九蓬, 韩杰才, 赫晓东, 杜善义. 铁氧体粉末制备工
- 艺的新进展[J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(1):51-54.
- [22] Darko Makovec, Miha Drogenik, Andrej Znidarsic . Sintering of Mn-Zn ferrite powders prepared by hydrothermal reactions between oxides [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21: 1945-1949.
- [23] Yimin Xuan, Qiang Li, Gang Yang. Synthesis and magnetic properties of Mn-Zn ferrite nanoparticles[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 12: 464-469.
- [24] Cernik.RJ, Freer.R, Leach.C, Mongkolkachit.C, Barnes.P, Jacques.S, Pile.K, Wander.A. Direct correlation between ferrite microstructure and electrical resistivity[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101 (10) : 104912-1-104912-6.
- [25] Jian Mao, Cheng Hua, Hongjun Mo, Qianhua Luo, Ying Liu, Mingjing Tu. Effect of the amount of doped nano-SiO₂ on the microstructure and power loss of Mn-Zn ferrites[J]. *Journal of Sichuan University*, 2006, 38(1):141-144.
毛健, 华程, 莫红军, 罗强华, 刘颖, 涂铭旌. 纳米SiO₂添加量对Mn-Zn铁氧体显微结构及功耗的影响[J]. 四川大学学报, 2006, 38(1):141-144.
- [26] Shutao Ai, Guoguang Hu. Study on the formula and sintering of high permeability Mn-Zn ferrite [J]. *Journal of Anhui University*, 1999, 23 (1) :31-35.
艾树涛, 胡国光. 高磁导率 Mn-Zn 铁氧体的配方和烧结工艺的研究[J]. 安徽大学学报, 1999, 23 (1) :31-35.
- [27] Shaoming Hu, Jun Wang, Junfeng Ren, Quanzhou Chen, Yanyang Dong. Production of high permeability and low attrition MnZn ferrite[J]. *Electronics Process Technology*, 2005, 26 (5) :289-291.
胡少明, 王军, 任俊峰, 陈全周, 董艳阳. 高磁导率低损耗锰锌铁氧体的生产[J]. 电子工艺技术, 2005, 26 (5) :289-291.
- [28] H.Shokrollahi, K.Janghorban. Influence of additives on the magnetic properties, microstructure and densification of Mn-Zn soft ferrites.[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2007, 141: 91-107.
- [29] V.T.Zaspalis, V.Tsakaloudi, M.Kolenbrander. The effect of dopants on the incremental permeability of MnZn-ferrites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 313(1): 29-36.
- [30] K.Janghorban, H.Shokrollahi. Influence of V₂O₅ addition on the grain growth and magnetic properties of Mn-Zn high permeability ferrites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 308(2): 238-242.
- [31] J. Zhu, K. J. Tseng. Reducing Dielectric Losses in MnZn Ferrites by Adding TiO₂ and MoO₃. [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40 (5):3339-3345.
- [32] Ke Sun, Zhongwen Lan, Daizhong Chen, Lezhong Li, Yu Chen, Zhong Yu. Effect of titanium and tin additives on microstructure and high frequency properties of manganese-zinc ferrite [J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2006, 34 (7):818-822.
孙科, 兰中文, 陈代中, 李乐中, 陈昱, 余忠. 添加钛和锡对锰锌铁氧体微结构和高频性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(7):818-822.
- [33] Yu.Z, Sun K, Li LH, Liu YF, Lan ZW, Zhang HW. Influences of Bi₂O₃ on microstructure and magnetic properties of MnZn ferrite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 2008, 320(6):919-923.
- [34] Yongming Wang, Xin Wang, Qimin Wang, YinFang Cui, Shunli Hao. Influence of additive on properties of MnZn ferrite and mechanism [J]. *Journal Of Synthetic Crystals*, 2006, 35 (3) : 645-648.
王永明, 王新, 王其民, 崔银芳, 郝顺利. 添加剂对锰锌功率铁氧体材料性能的影响及机理分析[J]. 人工晶体学报, 2006, 35 (3) : 645-648.
- [35] Zaspalisa V T, Antoniadisa E, Papazogloua E, et al. The effect of Nb₂O₅ dopant on the structural and magnetic properties of MnZn-ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 2002, 250:98-109.
- [36] Yudi Chi, Jing Peng, Qiming Xu. Effect of Bi₂O₃-MoO₃ addition on magnetic properties of Mn-Zn ferrites with high

- permeability [J]. *Metallic Functional Materials*, 2009, 16(3): 21-24.
- 迟煜頔, 荆鹏, 许启明. Bi₂O₃-MoO₃ 复合掺杂对高磁导率 MnZn 铁氧体磁特性的影响 [J]. *金属功能材料*, 2009, 16(3): 21-24.
- [37] Shunli Zhang, Yingang Wang, Wei Wu. Effect of ZrO₂ and SnO₂ Co-doping on magnetic and electrical properties of MnZn ferrite with Fe-poor composition [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(3): 416-420.
- 章顺利, 王寅岗, 吴玮. ZrO₂-SnO₂ 复合掺杂对贫铁配方的 MnZn 铁氧体磁性能和电性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(3): 416-420.
- [38] Haining Ji, Zhongwen Lan, Zhong Yu, Lezhong Li, Ke Sun, Huaiwu Zhang. Influence of Ti substitution on microstructure and magnetic performance of MnZn power ferrites [J]. *Materials Review*, 2008, 22(2): 101-104.
- 姬海宁, 兰中文, 余忠, 李乐中, 孙科, 张怀武. Ti 取代对 MnZn 功率铁氧体微结构及磁性能的影响 [J]. *材料导报*, 2008, 22(2): 101-104.
- [39] Ammad H, Qureshi. The influence of hafnia and impurities (CaO/SiO₂) on the microstructure and magnetic properties of Mn-Zn ferrites [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 286: 365-370.
- [40] Wei Wang, Jinhui Wang. Development of MnZn ferrites by combinatorial synthesis and high throughput screening method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 463: 112-118.