

世界 MnZn 铁氧体发展近况

Current development of Mn-Zn ferrite, in world

浙江锐克复合材料有限公司 陆明岳 (上虞 312300)

摘要: 主要介绍了 MnZn 铁氧体近几年来, 在理论、材料、工艺、技术等方面的进展及其发展趋势。

关键词: MnZn 铁氧体 材料 工艺技术

中图分类号: TM27

文献标识码: A

文章编号: 1606-7517 (2005) 01-06-127

1 引言

自 1935 年日本 TDK 公司向铁氧体发明人日本武井武博士购买铁氧体专利, 并进入工业化大生产以来, 世界铁氧体已经有 68 年的生产历史。随着世界电子市场的飞速发展, 铁氧体材料由于其特殊的电磁性能, 例如: 电阻率高、高频特性优良等, 由铁氧体材料制成的磁心被广泛应用到各种元器件中, 如: 偏转线圈、回扫变压器、普通变压器、旋转变压器、抗电磁干扰变压器、电感器及扼流圈等。这些元器件被广泛应用在电脑、手机、通信、办公自动化、远程监控、视听设备、家用电器、电磁兼容、绿色照明以及电子信息技术中。

世界电子技术的高速发展, 对软磁铁氧体提出了愈来愈苛刻的要求, 也促使了软磁铁氧体技术不断进步和发展, 同时软磁铁氧体理论也日趋完善。以下简要介绍近几年来 MnZn 铁氧体在材料、工艺、技术及理论等方面的进展情况。

2 MnZn 铁氧体理论研究进展

2.1 纳米尺寸铁氧体理论研究进展

A.H.Morrish 等认为与其它材料一样, 当铁氧体颗粒细到一定程度时, 应当出现一些不同于块状材料的性能。由此, 将会出现一系列理论问题, 如: 如果一种或几种离子出现在不同的位置, 他们的能量差异如何? 纳米材料晶胞与块状材料有何不同? 一个或多个晶胞的基态是什么样? 制备工艺如何影响晶胞的结构? 随着温度的变化, 为了降低能量, 离子如何重新定位? 磁结构如何随着磁相互作用而改变? 表面的磁性离子是如何作用的? 多大尺寸的颗粒(由数个晶胞构成)仍然受这些理论支配? 要回答这些问题, 需要借助于很多实验, 很多新的理论可能由此出现, 这将为磁学研究者提供更多的研究机会。

作为一个例子, A.H.Morrish 采用共沉淀方法而制得不同尺寸的纳米颗粒, 测量了其磁化强度随温度的变化, 发现颗粒越小, 其有序化温度越高。原因是 A 座和 B 座交换作用随颗粒变小而增强。不同尺寸的纳米颗粒是通过改变溶液中金属氢氧化物的浓度而获得的。

2.2 磁心电磁参数模拟计算及损耗机理研究

S.Gotch 等从电磁理论出发, 推导了以磁心尺寸、电阻率以及介电常数等作为变量的磁导率 μ_i 与频率 f 的复杂函数关系式。从理论上揭示了磁心尺寸、电阻率以及介电常数对磁心的 $\mu_i \sim f$ 关系有较大的影响, 特别

是对于MnZn铁氧体,由于其晶粒结构导致的介电常数很高,这将成为影响 $\mu_i \sim f$ 曲线形状的主要因素。

ZhuJun利用复合极化理论,分析了MnZn铁氧体磁心在无线电频率(RF)下复合介电常数的变化,并计算了环形磁心的介电损耗,理论计算结果表明,当频率 f 超过1MHz,介电损耗将在磁心总损耗中占有相当大的比例。

作为例子,研究了西门子公司以N30材料制成的环形磁心,理论计算表明,当频率 $f=2\text{MHz}$ 时,介电损耗在总损耗中的比例将达25%。

S.Yamada等研究了不同晶粒尺寸的磁心(配方完全相同)其剩余损耗随温度的变化。具有较大晶粒尺寸的磁心其剩余损耗在 $T_{\min}$ 处最小,此与磁滞损耗随温度的变化类似。而具有较小晶粒尺寸的磁心则完全不同。这种差别在于,尽管两种磁心化学成份完全相同,但其畴结构完全不同,晶粒尺寸为 $12\mu\text{m}$ 的磁心中每个晶粒至少有一个畴壁,而晶粒尺寸数为 $5\mu\text{m}$ 的磁心中大部分晶粒呈单畴,剩余损耗主要是由畴壁运动引起的。

按照过去的理论,剩余损耗 P_r 应等于阻尼因子 β 与畴壁运动速度的平方的乘积,即: $P_r = \beta \cdot V^2$,当励磁电流采用正弦波形式时,畴壁运动速度则正比例于频率与磁感应强度的平方: $P_r \propto f^2 \cdot B_m^4$ 。

然而,实际情况表明,磁感应强度在10mT到100mT范围内,公或 $P_r \propto B_m^\alpha$ 中的幂指数 α 在各频率下的值在2.2~3之间,大大偏离理论计算值2,原因是磁共振和畴壁阻尼一样,对剩余损耗也有贡献。

荷兰飞利浦实验室的P.J.Vander Zaag通过中子去极化实验,研究了功率铁氧体的损耗机理,得出了最新结论,即认为损耗有4种成份构成:磁滞损耗、涡流损耗、软磁共振损耗和晶粒内部畴壁损耗等。明确指出,过去一直无法解释的剩余损耗,实际上是由铁磁共振和晶粒内部畴壁损耗两部份组成。

P.J.Zang通过中子去极化实验研究了铁氧体由单畴向双畴(或多畴)转变的临界晶粒尺寸,例如:对于MnZn铁氧体为 $2.9 \pm 0.2\mu\text{m}$,P.J.Zang研究了单畴($d=0.4 \sim 3.2\mu\text{m}$)与双畴及多畴($d=4.5 \sim 9\mu\text{m}$)MnZn功率铁氧体功耗 P_c 随频率 f 的变化($B_m=50\text{mT}$)关系,发现对于单畴 $P_c \propto f^{1.55}$,并且在 $f=100 \sim 200\text{kHz}$ 范围内,两者 P_c 差别不大,但当 $f>200\text{kHz}$ 时, P_c 之差随 f 增大而明显变大。

2.3 磁心机械可靠性研究

A. Fujita等研究了应力对MnZn铁氧体磁心功耗的影响。为此,制作了最低功耗点分别在 -20°C , 30°C , 72°C 的三种环形磁心,分别以A、B、C表示,这三种磁心在最低点的功耗均为 250mW/cc 。如图1所示。

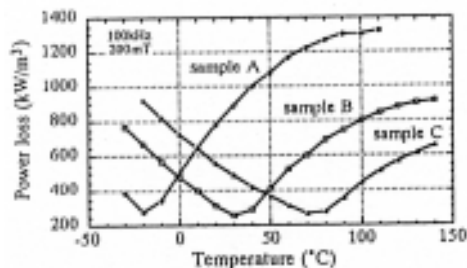


图1 磁心功耗随温度的变化

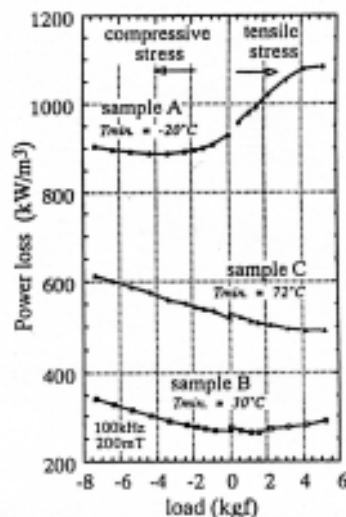


图2 磁心功耗随外加应力的变化

研究结果表明,这三种磁心功耗随外加应力的变化趋势完全不同(测试在室温进行),对于样品A($T_{\min}=-20^\circ\text{C}$),受到拉应力时功耗上升,而受到压应力时功耗下降;对于样品B($T_{\min}=72^\circ\text{C}$),受拉应力时功耗下降,而受压应力时功耗上升;对于样品C($T_{\min}=30^\circ\text{C}$)则无论是拉应力还是其压应力其功耗均是上升。(见图2)

R.Lucke等研究了MnZn铁氧体磁心的机械可靠性。选取了三种材料的磁心,即:高频功率铁氧体N87材料,高磁导率MnZn铁氧体T38材料($\mu_i=10000$),改进型T38i材料($\mu_i=10000$,频率特性优于T38)。

由于磁心显微结构的不同导致不同材料的机械强度平均值分布宽度不同。其中功率铁氧体N87由于具有

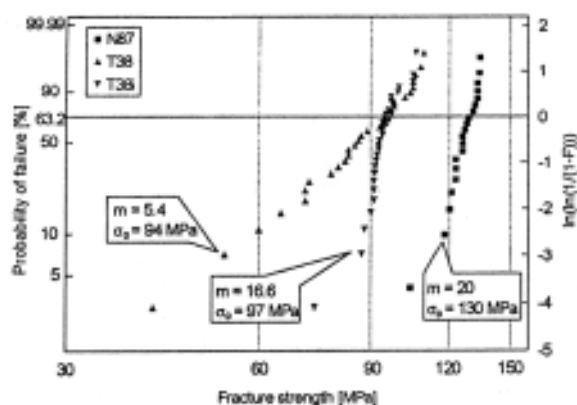


图3 断裂机械强度的维泊尔曲线

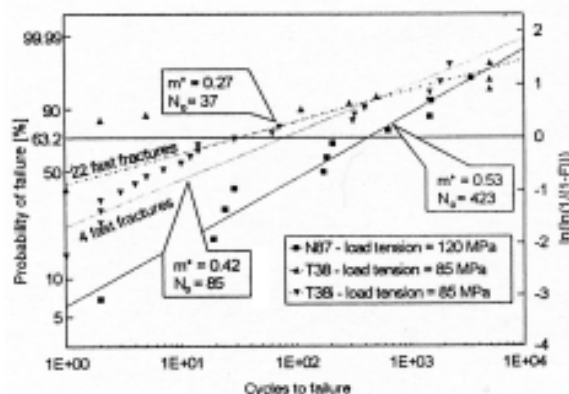


图4 循环疲劳曲线

细小的晶粒, 断裂机械强度较高, T38i 优于 T38 材料。

循环疲劳试验表明, 在相同的断裂概率下, 功率铁氧体的循环次数比高 μ_r 材料高出一个数量级。显微结构和烧结条件对铁氧体机械性能有较大影响。

3 关于材料方面研究

综观世界 MnZn 铁氧体近几年的发展, 可以看出各国铁氧体公司在新材料研制开发方面沉寂了一段时间后 (1998~2001 年), 又取得了很大的突破。我们似乎又看到了铁氧体发展美好的未来。

3.1 超低功耗功率铁氧体材料

大家知道, 早在 1984 年日本 TDK 公司就研制开发出 PC44 材料。并在 1989 年又最早推出了能用至 1MHz 的高功率铁氧体材料 PC50, 几年前 TDK 又推出了几个新材料, 例如: PC45、PC46 和 PC47 材料, 这些材料主要是针对不同的应用而开发的, 其主要差别在于功耗最低点的温度有所不同。PC45 为 60~80℃, PC46 为 40~50℃, PC47 则为 100℃附件近。但这些材料都有明显的缺

点, 就是一旦偏移功耗最低点, 则功耗会急剧上升。

为此, TDK 于去年上半年又推出一个令人耳目一新的新材料, 即 PC95 材料。该材料是一种宽温低功耗功率 MnZn 铁氧体材料。聚集了 PC45、PC46、PC47 这些材料的优点, 在 25℃~120℃温度范围内均小于 350mW/cc(100kHz × 200mT 条件下)。在 25℃和 120℃时功耗 350mW/cc, 在 80℃时功耗 280mW/cc。该材料的其他指标为: $\mu_r=3300 \pm 25\%$, $B_s=540\text{mT}(25^\circ\text{C})$, 而在高温 100℃时, $B_s=430\text{mT}$ 。

PC95 是目前性能最优良的功率铁氧体材料, 相信在不久的将来, 无论是国内还是国际上一定会掀起一股宽温低功耗铁氧体材料开发热潮。因为日本 TDK 实际上又把铁氧体同行们远远甩在后头。

3.2 高温高 B_s 铁氧体材料

随着电动汽车的快速发展, 要求大量高温高 B_s 铁氧体材料。TDK 由此开发了 PE33 材料, $\mu_r=1700 \pm 25\%$, $B_s \geq 435\text{mT}(100^\circ\text{C})$, 典型值为 450mT, $T_c > 290^\circ\text{C}$, $P_c \leq 1100\text{mW}/\text{cm}^3(100^\circ\text{C}, 100\text{kHz} \times 200\text{mT 条件下})$ 。

TDK 还开发了一种适用于开关电源中平滑扼流圈的高温高 B_s 材料, 与 PE33 相比, 功耗得到较大幅度的改善, 其性能指标为:

$$\mu_r=1400 \pm 25\%, B_s=510\text{mT}(25^\circ\text{C}), 440\text{mT}(100^\circ\text{C});$$

$$P_c \leq 600\text{mW}/\text{cm}^3(100^\circ\text{C}, 100\text{kHz} \times 200\text{mT 条件下}), T_c > 290^\circ\text{C}$$

日本 FDK 公司也开发了类似的材料 4H 系列, 目前公布的有 4H45、4H47。其中 4H45 主要指标为:

$$\mu_r=2000 \pm 25\%, B_s=520\text{mT}(23^\circ\text{C}), 450\text{mT}(100^\circ\text{C});$$

$$P_c=450\text{mW}/\text{cm}^3(100^\circ\text{C}, 100\text{kHz} \times 200\text{mT 条件下}), T_c > 200^\circ\text{C}$$

4H47 材料主要指标为:

$$\mu_r=1200 \pm 25\%, B_s=530\text{mT}(23^\circ\text{C}), 470\text{mT}(100^\circ\text{C});$$

$$P_c=650\text{mW}/\text{cm}^3(100^\circ\text{C}, 100\text{kHz} \times 200\text{mT 条件下}), T_c > 200^\circ\text{C}$$

据说, 日本 FDK 实验室已开发出 $B_s=500\text{mT}(100^\circ\text{C})$ 新材料。

德国 Epcos 也开发出了相应材料 N45, 所不同的是该材料同时还具有较高磁导率,

$$\mu_r=3800 \pm 25\%, B_s=550\text{mT}(25^\circ\text{C}), 435\text{mT}(100^\circ\text{C});$$

$T_c > 255^\circ\text{C}$

Ferroxcube 类似的材料为 3B46, $\mu_i = 3800 \pm 20\%$, $B_s = 545\text{mT}(25^\circ\text{C})$, $435\text{mT}(100^\circ\text{C})$; $T_c > 255^\circ\text{C}$

3.3 高频低功耗功率铁氧体

日本 TDK 公司于 1989 年首次推出能使用到 1MHz 高频功率铁氧体材料 PC50, 此后一些著名的铁氧体公司也相应推出了自己的材料牌号, 其中 Ferroxcube 公司材料最为齐全, 如 3F3, 3F4, 3F35, 4F1 等, 这些材料分别应用于不同的频率范围。

由于开关电源的高频化进展并没有当初预计的快, 迄今频率高于 1MHz 的开关电源量非常少。因此, 近几年来有关高频功率铁氧体的研究报道较少。

3.4 FBT 功率铁氧体材料

高清晰度彩电以及高分辨率监视器用功率铁氧体, 这种材料一般工作中高频范围 (16kHz~100kHz), 要求材料宽频低功耗、饱和磁通密度高以及直流迭加特性优良等。这类材料以 TDK 公司 HV 系列为典型代表, 最早有 HV22, HV38, HV40, HV45 等, 但现在基本上只保留 HV22 和 HV45 两种材料。

由于轻、薄、节能而又无辐射的液晶显示器 (LCD) 和等离子显示器 (PDP) 近来发展迅猛, 相信不久的将来, 将会逐步取代传统的 CRT 显示器, 这就意味着 FBT 用功率铁氧体 U 型磁心用量将会越来越少。

因此, 从近两年看, FBT 用功率铁氧体材料发展非常缓慢, 几乎停滞。根据其应用特点, 无非在以下三方面改进, 进一步降低磁心功耗; 提高常温和高温 B_s 值; 进一步改善直流迭加特性。

3.5 高磁导率 MnZn 铁氧体材料

随着现代电子技术的飞速发展, 在抗电磁干扰噪声滤波器、电子电路宽带变压器, 综合业务数据网 (ISDN), 局域网 (LAN), 宽域网 (WAN), 背景照明等领域脉冲变压器中需要大量性能优良的高磁导率 MnZn 铁氧体材料。

但是, 现在所讲的高 μ_i 材料, 已经不是传统意义上的仅考虑其磁导率, 而是对其它性能指标也有要求。根据应用领域不同, 可分为六类。

3.5.1 脉冲变压器用高 μ_i 材料

这就是我们过去所讲的传统意义上的高 μ_i 材料,

不少铁氧体公司都有自己的材料系列。如 TDK 公司 H5C3、H5C5; FDK 公司 2H15; 德国 epcos 公司 T56 等。其中 H5C3 和 2H15 磁导率为 $15000 \pm 30\%$; T56 材料磁导率 $\mu_i = 20000 \pm 30\%$, 以日本 TDK 公司 H5C5 为当前国际行业中最高水平, 其 $\mu_i = 30000 \pm 30\%$ 。

3.5.2 抗电磁干扰用高 μ_i 材料

该材料要求具有良好的频率特性和阻抗特性, 以达到抗电磁干扰的目的。

典型代表为日本 TDK 公司 HS52, HS72 及 HS10 材料, 这些材料要求在 $f=500\text{kHz}$ 时, 仍具有较高的磁导率。但对材料的起始磁导率要求并不高, 例如: HS52 只有 $5500 \pm 25\%$, HS72 只有 $7500 \pm 25\%$, HS10 为 $10000 \pm 25\%$ 。

3.5.3 低温高磁导率 MnZn 铁氧体材料

这种材料主要用在综合业务数据网 ISDN 中作脉冲变压器。由于有些设备安装在室外, 考虑到气候与环境温度变化较大, 要求材料在较低温度下仍保留较高的磁导率, 否则设备将无法正常工作。

这种材料代表有 TDK 公司 H5C4, $\mu_i = 12000 \pm 30\%$, 但在 -20°C 时, $\mu_i \geq 9000$ 。(而通常的高 μ_i 材料在 -20°C 时, $\mu_i \leq 4000$)。

日本 TDK 公司 2H15B 材料亦不错, $\mu_i = 10000 \pm 30\%$, 其在 $-30 \sim 85^\circ\text{C}$ 范围内都能保持较高的磁导率。

3.5.4 局域网用宽温高直流迭加铁氧体材料

局域网 (LAN) 大规模发展, 迫切需要大量能适应在较大的温度变化范围 ($-40 \sim 85^\circ\text{C}$) 内, 具有良好的直流迭加特性的铁氧体磁心。

TDK 最先开发了 DN45 材料, $\mu_i = 4500 \pm 25\%$, 与传统的 HP5 材料 ($5000 \pm 25\%$) 相比, 其直流迭加特性提高 30%, 但 DN45 材料使用温度范围在 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 之间。为此, TDK 于去年又开发成功 DNW45 新材料, $\mu_i = 4200 \pm 25\%$, 与 DN45 相比, DNW45 材料直流迭加特性又提高 23%, 并且 DNW45 材料温度使用范围更宽为 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 。

3.5.5 通讯用低谐波失真 (THD) 材料

近年来, 通讯技术快速发展, XDSL 调制器用变压器, 要求大量低谐波失真 (THD) 铁氧体磁心, 以尽量减少数据信号的失真。

日本 TDK 公司, 借助于现代化的分析手段, 利用

透射电子显微镜、俄歇能谱仪等对晶界以及晶粒内的成份偏差及离子排列顺序进行了详细研究,开发出DN40材料 ($\mu_r=4000 \pm 25\%$, $\tan \delta / \mu_r < 2.5 \times 10^{-6}$), 磁滞常数 $\eta_B < 0.8 \times 10^{-6}/\text{mT}$ (25℃, 1.5~3.0mT, 10kc), $T_C > 130^\circ\text{C}$ 。

去年上半年又公布开发了DN70新材料。 $\mu_r=7500 \pm 25\%$, $\tan \delta / \mu_r < 2.0 \times 10^{-6}$ (10kc), $\eta_B < 0.2 \times 10^{-6}$, $T_C > 105^\circ\text{C}$ 。

3.5.6 高磁导率高 B_s MnZn铁氧体材料

以日本TDK公司DN50为典型代理,真正完美结合了高磁导率与高 B_s 功率铁氧体材料的特性, $\mu_r=5200 \pm 20\%$, $B_s=550\text{mT}$ (25℃), 380mT (100℃); $T_C > 210^\circ\text{C}$ 。

4 关于工艺方面的研究

制造高性能的铁氧体磁心,往往需要使用高档原材料。通过加入适量的添加剂、改良制造与烧结工艺等。有时还采用非常规加工工艺,如:化学共沉淀法、活化烧结法、喷雾热分解法、冷冻法、熔融盐类法、金属醇盐法等。随着现代工业技术的飞跃发展,又涌现出一批新的铁氧体制造工艺与方法。

4.1 火花等离子烧结(Spark Plasma Sintering 简称SPS)

SPS是一种新的烧结方法,铁氧体粉料放入石墨制成的模腔中(上下冲头也是由石墨制成),在给粉料加上轴向压力的同时,粉料之间产生高能火花等离子。与传统方法相比,SPS可以使烧结在较低的温度和较短的时间内完成。S.Yamamoto等利用SPS方法成功制成多层MnZn铁氧体/坡莫合金磁心。这种无法以通常方法制成的磁心兼顾了MnZn铁氧体良好的高频性能与坡莫合金高磁导率与高饱和磁通密度的特性,预计这种新型磁心在高频磁性器件方面具有良好的应用前景。

4.2 自燃烧合成法(Self-Combustion)

按照铁氧体配方,配好相应的金属硝酸盐混和物,溶于去离子水中,将溶液加热到40~50℃以保证硝酸盐充分溶解,然后与聚乙烯醇PVA溶液等体积混和。再加入一些氨水,得到溶于PVA溶液中的金属氢氧化物胶体以及硝酸铵溶液,由于溶液呈胶质状态,因此,金

属氢氧化物不会发生絮凝,而被均匀分解。胶体浓度越高,则得到的混合物越均匀。

该混和物在100℃烘干后,变成一种含有金属氢氧化物、PVA、硝酸铵以及微量水的块状固体,稍稍破碎后,放到金属盘中,在托盘一角点火,则硝酸铵与聚乙烯醇PVA发生化学反应,产生大量的热,火焰将沿着粉料表面蔓延开去。

燃烧后的粉料,一般来说,还需要在空气中于450℃保温1小时,以消除其中的碳元素,并使化学反应充分,晶粒长大。

4.3 自蔓延高温合成法(Self-Propagation High Temperature Synthesis 简称SHS)

自蔓延高温合成法(SHS)是近年来发展起来制备材料的新方法,很有发展前途,属高新技术领域。该技术最早由俄罗斯科学家发明,现在成了各国争相研究的对象,其原理是利用反应物内部的化学能来合成材料。反应物一经点燃,燃烧反应即可自行维持一般不再需要补充能量。整个工艺极为简单,能耗低、生产效率与产品纯度也高。同时,由于燃烧过程中高的温度梯度及快的冷却速率,易于获得亚稳态相,使产物具有较好的活性。

SHS过程一般有以下特点:(1)燃烧温度高,一般为1000~3000℃,最高可达4500℃(2)燃烧波传播速度快,反应时间只在秒级,而不是常规的小时级,从而大大缩短合成时间;(3)反应物一经点燃,即不需要外界提供能量,因而可以大大节约能源;(4)一般只有凝聚态产物,对环境无污染;(5)可控制产物的冷却速度等工艺参数,从而达到控制产物结构的目的。

L.Affleck等则利用SHS方法成功合成了Mg铁氧体, MgZn, MnZn, NiZn等铁氧体。

国内浙江脱克复合材料有限公司从美国、日本、俄罗斯等国引进了成套SHS反应设备,使SHS技术真正产业化,目前已批量生成AlN功能陶瓷,并准备用来生产MnZn、NiZn等铁氧体材料。

4.4 快速燃烧合成技术(Flash-Combustion-Technique 简称FCT)

FCT也是一种固态反应合成技术,但是与传统的

氧化物合成技术所不同的是：前者是将金属盐类以分子尺度均匀混合；而后者则需要将金属氧化物通过机械混合(强混、球磨或研磨)方能达到一定的均匀度，但却不可避免地受到污染或引入一些有害杂质。国外有人利用该法合成了NiZn铁氧体，其方法是：按照配方配好金属硝酸盐混匀，加入适量的尿素塑料作为点火剂。将混和物放入加热到500℃的电加热炉中，混和物将会在3分钟内变成泡沫状，多气孔结构，铁氧体粉料即形成。

4.5 水热合成法 (Hydrothermal Method)

利用水热合成法来制备一些特殊性能的铁氧体是十分有效的，例如：应用在高频状态下的高密度、细晶粒、低损耗(包括强场与弱场损耗)MnZn与NiZn铁氧体的制备。该技术尽管早在70年代即被法国人发明，用来合成MnZn铁氧体，但是合成的颗粒较大，而且成份也较难以控制。

近来，日本人在较低温度下，利用弱碱性条件下的水热合成法，制备了较细的MnZn铁氧体颗粒(0.05~0.20 μm)，而且颗粒大小、化学成份可以严格控制。这些颗粒具有较好的形状和很窄的粒度分布，利用水热合成法可以获得具有更细小(2.3 μm)均匀显微结构的铁氧体磁心。

4.6 新型水热合成法

该方法不同于上述介绍的水热合成法，其反应物不是由盐类，而是由金属氧化物开始。将各种金属氧化物与去离子水在球磨机或砂磨机中充分混合均匀，然后将这些氧化物悬浮液送到高压反应锅中，在160~310℃温度下处理一定的时间，得到平均粒度为0.8 μm的粉料。其主要成份为：ZnFe₂O₄、锰铁氧体及一些未反应

的金属氧化物，通过调节反应温度及合成时间，可以控制铁氧体粉料中各相的比例，以及颗粒形态。与传统方法制得的铁氧体粉料相比，发现在260℃处理10小时的水热反应条件下，可以使磁心的功耗大幅度下降，并远远低于传统方法。

4.7 机械合金法

据最近报道，利用机械合金法已经成功制备了Ba-和Sr-六角晶系和Co-尖晶石以及Mn铁氧体等纳米晶铁氧体粉料。其方法是：利用Fe₂O₃、Mn₂O₃和金属锰作原料，于球磨机中在空气或氩气氛下球磨5~110小时；然后在真空炉中于300~900℃退火30分钟，可以合成差不多都是尖晶石Mn铁氧体。这些粉料具有纳米晶结构，平均颗粒尺寸35~40nm，用机械合金法制得的软磁铁氧体粉料，有希望成为高频应用的后备材料，通过低温烧结或者热压，可以开发出高密度的块状材料。

4.8 铁氧体微波烧结工艺。

利用微波烧结工艺可以大大降低MnZn铁氧体的功耗。与传统工艺相比，微波烧结只需在很短的时间即可完成，从而获得细晶粒、高密度的铁氧体磁心，这是由于微波烧结使铁氧体坯件各部分同时受热升温，从而获得均匀的显微结构。而采用传统烧结工艺，铁氧体坯件内部受热要迟于坯件表面；此外，由于微波烧结时间(通常30分钟)远远小于传统时间(18~30小时)在节省大量能源的同时，又避免了Zn的挥发。这无疑对铁氧体性能的提高是有利的。

参考文献(略)