

高磁导率铁氧体磁心阻抗特性探讨

翟丽红, 徐方, 陆自强

浙江桐乡市耀润电子有限公司, 桐乡 314504

1 引言

随着电子产品日趋小型化、轻量化、薄片化, 整机使用的电感器、滤波器、扼流圈和脉冲变压器等器件引起的电磁干扰 (EMI) 问题日趋严重, 且在电磁兼容 (EMC) 领域, 用作抑制电磁干扰的共模扼流圈等元器件得以迅速发展, 因而软磁铁氧体高 μ i 材料的需求量不断扩大, 加之汽车电子领域的充电桩、通信领域的无线充电等多项应用, 对高 μ i 材料性能有了更高要求。

过去人们重点致力于不断提高高 μ i 材料的初始磁导率, 但随着电子技术的不断进步, 用户对高 μ i 材料的各项稳定性指标提出了更高要求, 如: 随着频率的增高, 磁导率衰减较低 (μ i-F 特性)、阻抗降低较少 ($|z|$ -F 特性)、比损耗系数较低 ($\tan\delta/\mu$ i)、在宽温下磁导率更稳 (μ i-T 特性)、磁导率减落系数要小 (DF) 及谐波失真 (THD) 更低等。为了在产业化生产中实现这一目标, 这就需要深入了解相关的基础理论, 重视制造技术各个工艺细节, 本文试图就此做些粗浅探讨。

2 高磁导率铁氧体材料原料的选择调控要求

原材料的纯度、杂质和活性对高 μ i 材料的性能有很大的影响, 在相同的工艺条件下, 原材料纯度的提高意味着磁导率的提高, 所以, 生产高 μ i 材料对原材料的要求是最高的, 高纯度、低杂质、超细原料可使高 μ i 材料烧成大晶粒, 又避免过烧而出现巨晶。

但各种原料 BET 值适配不当, 会因其组成结构的偏差而导致内部应力的增大, 从而出现产品强度变差最终导致综合性能下降, 因此, 除控制原料的杂质含量外, 还应当注意原料间 BET 值的适配。

3 主配方及掺杂方式

高磁导率软磁铁氧体材料的初始磁导率 (μ i) 与磁晶各向异性常数 (K_1), 磁致伸缩系数 (λ_s)、饱和磁化强度

(MS) 密切相关。要获得高磁导率特性, 在材料设计时应选择饱和磁化强度高、磁晶各向异性常数和磁致伸缩系数小的材料组份, 同时通过最佳工艺控制, 降低材料及产品的内应力、调整微观结构, 以获取优良性能。最佳的配方组合可通过工艺试验, 结合加杂方式和烧结工艺形式优选确定。

微量添加剂的选择与掺杂方式

在 MnZn 铁氧体中微量添加剂的掺入可极大的改善和提高材料的性能, 获得高品质的铁氧体磁心元件。

添加物对 MnZn 铁氧体的作用可分作三类: 第一类添加物在晶界处偏析, 影响晶界电阻率; 第二类影响烧结时的微观结构的变化, 通过烧结温度和氧分压的控制可改善微观结构, 提高频率特性, 改善材料的高频性能; 第三类则固溶于尖晶石结构之中, 影响材料磁的性能。

Ca、Si 等元素的添加物属第一类和第二类, Ti 亦是常用的添加物, 主要作用属第三类, Bi、Mo、V、P、B 等元素属第二类。上述元素添加量和方式是非常重要的, 应结合本企业的工艺特点进行有效的控制, 以获得高品质的铁氧体材料。

Ti 和 Ca 生成的钛酸钙玻璃相使材料具有高阻抗特性, 且能改善材料频率特性。改变烧结、冷却气氛氧分压, 可通过对各频段 Q 值的调控, 达到改善 $|z|$ -F 特性的目的。

为提高初始磁导率, 一般都加入了大量 Bi, 这对 μ i-F 特性、 $|z|$ -F 特性的扩展很是不利, 所以少量 V、Nb 取代 Bi 以降低烧结温度和改善 THD 外, 再加入 Ti 或 Zr, 改善材料频率特性和阻抗特性, 获得高密度的成型坯件。

4 提高锰锌铁氧体材料阻抗途径

高频阻抗主要取决于磁导率的频率特性, 首先要提高材料截止频率, μ' 不降, 阻抗就不掉。

低频阻抗要重视 μ'' 的贡献, 因为:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \omega L_0 \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2},$$

比损耗系数 $\text{tg}\delta/\mu = 1/\mu Q$ 而 $Q = \frac{1}{\text{tg}\delta} = \mu' / \mu''$

从磁谱曲线上看, μ' 在低频恒定, 低频 μ'' 提高才可使低频阻抗提高, 因 $Q = \mu' / \mu''$, 故从工艺上调整材料损耗, 即降低低频 Q 值, 可增大 μ'' , 从而获得低频高阻抗。

高频阻抗和低频电阻率的提高需适当增大氧分压, 低频阻抗的提高则反其道而行之。因为适当降低氧分压使 μ' 不降反升, 又可使低频 Q 值降低, 使 μ'' 提高, μ'' 和 μ' 的双双提高, 则阻抗值上升。亦或使阻抗峰值向低频移动, 从而满足客户对低频高阻抗的要求。

5 高磁导率铁氧体烧结细节控制

材料是基础, 烧结是生产高品质磁心元件的关键, 我国老一代磁应用工作者做了大量的科研工作, 形成了独特的技术工艺保证体系, 为高 μ_i 材料的发展奠定了基础。

目前国内主要高 μ_i 烧结设备有推板式窑炉、钟罩式窑炉及真空气氛烧结钢包炉, 主要烧结工艺形式有常规烧结法、高氧烧结法、纯氧烧结法及低温烧结工艺, 上述工艺形式均可实现高品质高 μ_i 磁心元件的制造。

在高 μ_i 产品的制造过程中, 提高产品烧结一致性是各生产企业努力的目标, 做到产品性能不分检或减少性能分检的数量, 可大大的降低生产成本, 满足用户需求。目前

存在的性能差异主要表现在烧结位置的差异, 上、下坯件之间的性能差异, 要解决上述质量问题, 必须寻找适合高 μ_i 磁心的烧结介质, 防止的 Zn 挥发; 完善现有烧结工艺, 降低磁心内部应力, 达到不同位置烧结磁心性能一致, 缩小上、下层坯件性能的差异。

多晶 MnZn 铁氧体内, 存在晶粒与晶粒间应力、晶界与晶粒间的应力和烧结体表层与内层间应力。作为主成份之一的 Zn 属于易挥发元素, 在磁心表面向外挥发, 引起烧结体表面与内部组分的偏差而产生应力, 而组分的差异又导致晶格常数发生变化。此外, 烧结冷却时, 由于氧离子渗透到烧结体内部不易扩散, 则带来磁心表面与内部的氧化程度不同, 而产生应力。高 μ_i 材料应以降低烧结产品应力为目的, 逐步完善并形成防止 Zn 挥发的烧结工艺技术, 缩小烧结体表面与内部组分的变动, 可得到磁心表面与内部氧化程度差异小的烧结体。降低烧结温度, 可提高高 μ_i 产品性能一致性。

另一方面, 通过改善粉料的制造技术以提高粉体的活性, 可降低高 μ_i 产品的烧结温度 (1330~1380), 形成高密度、低气孔率、晶界直、晶粒大而晶粒尺寸均一的高 μ_i 磁心材料。

6 高磁导率铁氧体制作实例

耀润公司宽温宽频 10K 材料制作实例特性

		测试记录表					测试日期: 2014-07-31				
批号	序号	L(μ H)-1kHz,0.3V				L(200kHz)/ L(10kHz)(%)	μ_i	尺寸 (mm)			密度 g/cm ³
		1kHz	10kHz	100kHz	200kHz			外径	内经	厚度	
YR56405201	2		6.25	6.59	6.12	97.92	8853	21.77	13.98	7.97	
10k	3		6.52	6.89	6.33	97.09	9235	21.77	13.98	7.97	
边上	4		6.56	6.92	6.34	96.65	9292	21.77	13.98	7.97	
	5		6.63	6.91	6.49	97.89	9391	21.77	13.98	7.97	
	6		6.59	6.89	6.1	92.56	9334	21.77	13.98	7.97	
	7		6.67	6.95	6.21	93.10	9448	21.77	13.98	7.97	
	中间	1		7.3	7.68	7.01	96.03	10340	21.77	13.98	7.97
	2		7.26	7.62	6.96	95.87	10283	21.77	13.98	7.97	
	3		7.34	7.65	6.99	95.23	10397	21.77	13.98	7.97	
	4		7.12	7.26	6.85	96.21	10085	21.77	13.98	7.97	
	5		7.16	7.47	6.99	97.63	10142	21.77	13.98	7.97	
备注:											

耀润公司宽温宽频 12K 材料制作实例特性

测试记录表											测试日期：2014-10-08
批号	序号	L(μ H)-1kHz,0.3V				L(200kHz)/	μ i	尺寸 (mm)			密度 g/cm ³
		1kHz	10kHz	160kHz	200kHz	L(10kHz)(%)		外径	内经	厚度	
YR56409065G	7	5.6	5.6	5.616	5.267	94.05	7757	24.86	14.92	7.07	4.99
	8	8.2	8.22	7.96	7.256	88.27	11358	24.86	14.92	7.07	
	9	8.9	8.82	8.408	7.634	86.55	12328	24.86	14.92	7.07	
	10	8.9	8.92	8.492	7.64	85.65	12328	24.86	14.92	7.07	
	11	8.6	8.55	8.177	7.444	87.06	11913	24.86	14.92	7.07	
	12	6.3	6.25	6.293	5.864	93.82	8727	24.86	14.92	7.07	
备注：	小钟罩炉烧结温度 1430℃ 烧结。										

耀润公司宽温宽频 15K 材料制作实例特性

测试记录表											测试日期：2015-05-31
批号	序号	L(μ H)-1kHz,0.3V				L(200kHz)/	μ i	尺寸 (mm)			密度 g/cm ³
		1kHz	10kHz	200kHz	500kHz	L(10kHz)(%)		外径	内经	厚度	
YR1505262g12	1	9.4	9.47	4.482	1.334	47.33	13049	24.83	14.94	7.09	5
	2	10.4	10	4.517	1.31	45.17	14437	24.83	14.94	7.09	
	3	10.6	10.53	4.657	1.307	44.23	14715	24.83	14.94	7.09	
	4	10.5	10.18	4.759	1.33	46.75	14576	24.83	14.94	7.09	
	5	9.1	9.1	4.749	1.426	52.19	12633	24.83	14.94	7.09	
YR1505242G12	26	9.5	9.58	4.8	1.41	50.10	13380	24.78	14.89	6.97	5
	27	10.4	10.38	4.817	1.384	46.41	14647	24.78	14.89	6.97	
	28	10.6	10.55	4.845	1.38	45.92	14929	24.78	14.89	6.97	
	29	10.4	10.35	4.893	1.41	47.28	14647	24.78	14.89	6.97	
	30	9.5	9.56	4.865	1.436	50.89	13380	24.78	14.89	6.97	
备注：	小钟罩炉烧结温度 1410℃ 烧结。										

耀润公司高磁导率 (18-20K) 材料频率特性

批号	μ i HP4192A	L(μ H)0.3V				L(200kHz)	尺寸 (mm)		
		1kHz	100kHz	200kHz	500kHz	/L(1kHz)	外径	内经	厚度
YRFS17071601-1	14709	1052.0	996.0	760.0	183.0	72.24	24.83	14.93	7.03
YRFS17071602-2	20207	1438.0	1021.0	629.0	150.0	43.74	24.85	14.98	7.03
YRFS17071603-3	18958	1339.0	990.0	632.0	156.0	47.20	24.80	14.92	6.95

耀润公司高磁导率 (18-20K) 材料阻抗 (Z-F) 特性

批号	50kHz	100kHz	200kHz	500kHz	600kHz	700kHz	800kHz	900kHz	1000kHz	1200kHz
YRFS17071601-1	344	661	1169	1715	1744	1747	1740	1729	1717	1691
YRFS17071602-2	394	700	1107	1407	1507	1533	1551	1560	1564	1561
YRFS17071603-3	377	676	1089	1170	1513	1540	1558	1566	1570	1569
备注：测试仪器：HP4192A，磁环外径 25 mm，线匝 10 圈，电感量单位 μ H										
2000 年东磁 2 万材料测试的是 16 mm 磁环，TDK 公司的 H5C5 材料是 3mm 磁环测试。大环达以上水平少见。										

下转149页