用于电力电子的大电流高阻抗锰锌铁氧体材料

沈小燕，陆自强，徐方，茅柳强

桐乡市耀润电子有限公司，浙江桐乡 314504

摘　要：介绍了用于电力电子的大电流高阻抗锰锌铁氧体材料特征和各大公司典型材料性能，推荐了日立和耀润公司制作技术、典藏案例，并依据基本理论提供了控制大磁环高、低频阻抗的工艺细节。

关键词：高Bs低功耗，剩余磁通密度Br，直流叠加（DC-Bias），恒导特性，宽频高阻抗

1 引言

磁学和磁技术工程的发展必然会促进材料性能的飞跃，高档软磁就是在上述前提下应运而生的产物。大家知道，软磁铁氧体材料是一种用途广、产量大的基础功能材料，广泛应用于网络通信、汽车电子及航天军工等诸多领域。特别是电力电子领域（如充电桩）的应用，要求功率材料具有低功耗 Pc，高饱和磁通密度 Bs、低剩余磁通密度 Br 即更好的直流叠加（DC-Bias）特性；要求高磁导率材料具有更低的比损耗系数 tg δ / μ i 和更低的谐波失真系数 (THD)；两种材料都必须具有宽频率高阻抗和更广的使用温度范围。简言之，就是要求磁心能耐受大电流和具有宽频高阻抗值。

2 充电桩用磁心规格

充电桩的电源用到较多电子变压器、电感器，电感器多一些。用量视其功率大小而定，一个充电桩起码要用到 20 多个磁性元件。所用磁性元件必须体积小、性能优、高频化。防水、防腐、高效率、高可靠 。因为充电桩要求充电快，这就意味着充电电流要大，所用变压器磁心必须具有高 Bs、高 DC-Bias、宽温低功耗等材料特性，电源滤波的电感器高导磁心还要求具有宽温宽频高阻抗特性。

充电桩用铁氧体磁心规格除通用标准系列外，常用铁氧体大磁芯规格有：

EE 型：如 EE55、65、70、85、100、110、118、120、128、130、140、150、160、188、193、200、210、240、320、400、480；

UF 型：UF60、64、70、73、75、80、85、86、93、94、96、100、101、105、113、115、120、125、126、130、160、240；

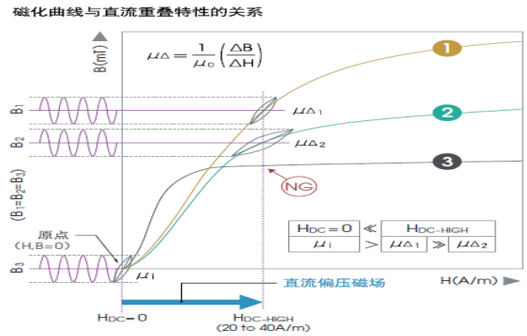
UY 型：UY20、22、UY30、UY34、UYF26、42；

PM 型：PM74，PM87，PM114 以及各类 PQ 型大磁芯和 T 型大磁环。

这些磁心作为整流滤波电感的核心部件，工作在直流大电流条件下，这就要求电流变化时引起电感值的变化越小越好。也就是说直流磁化对磁心的影响越小越好，即磁材应具有恒导特性。由于直流磁化的影响，电感趋向于饱和，电感量会随着工作电流增加而减小。所谓恒导特性，就是指要求材料 Bs 高而 Br 低，从而改善直流叠加（DC-Bias）特性。

3 改善材料直流叠加特性的办法

在较高的交变场下，随着场强幅度的高低，所产生的磁滞回线也随着工作点的变化而呈现不同倾斜状态，如图所示。这些小磁滞回线的倾斜度可用它的平均斜率来计量，称作叠加磁导率，即增量磁导率 μ Δ：μ Δ $=\frac{1}{\mu_0}\left(\frac{\Delta B}{\Delta H}\right)$。



当交变场即工作场足够小时，磁心制造厂家通常在规定的频率下用较小电压（或电流）测量处于直流偏置下的

磁心电感量，即 ΔH→0 时，这时外推的增量磁导率 μΔ 就等于可逆磁导率 μrev，又假如此时直流偏置场也趋近于 0 时，这时的可逆磁导率 μrev 就等于起始磁导率 μi; 如图中 B3 小磁滞回线，

但是电感变压器的制造商设计时却并不是这种理想的极端状态。增量磁导率 μΔ 与可逆磁导率 μrev，并非单纯受磁场强度的作用，而是与磁化过程有关，如 图中 B1，B2 小磁滞回线。

虽然 B1 = B2，但是 μΔ1 大于 μΔ2，曲线 1Bs 最高，Br 最低 DC-Bias 特性最好。

增量磁导率 μΔ 为磁通密度增量与磁场强度增量之比。即增量磁导率 μΔ 与尖叶形小回线中心线的斜率成正比。斜率越大，μΔ 越高，可以看出，材料 Bs 越高、Br 越低，小回线中心线斜率越大，则增量磁导率 μΔ 越高，直流叠加特性越好。

材料磁滞回线呈倾斜型恒导回线时，Br 越低，磁导率在直流场下稳定性越好。这就是说，要改善材料的交直流叠加性能，在保证高 Bs 值的前提下，还必须尽力降低 Br 值。

为了使磁心工作在较大磁通密度下不致于饱和，通常在磁路中加开气隙，气隙越大，磁滞回线越是倾斜，Br 越小，则交直流叠加性能越好，但 AL 值越低。

为减少交直流叠加造成的影响，通常提高材料 Bs，但降低材料 Br 却应当是更有效的途径，包括对磁路开具气隙，以稳定电感，降低工作 Br。因此，改善磁心直流叠加特性是制造和使用部门双方共同面对的一个课题，既要提高材料性能，又要正确设计，合理选用。

4 各大公司的高 Bs 低功耗材料水平

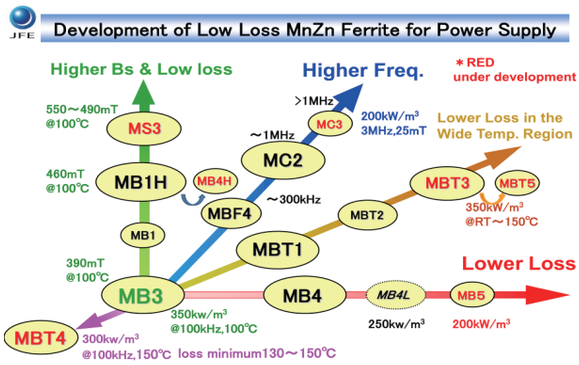
2003 年 FDK 就推出高温 Bs 100 度为 450mt，功耗为 450mw/cm3 的 4H45，和高温 Bs 100 度为 470mt，功耗为 650mw/cm3 的 4H47 材料；

2004 年 TDK 推出高温 Bs 100 度为 450mt，功耗为 320mw/cm3 的 PC90 材料；

2006 年东磁投产等同 PC90 的 DMR90 材料、2014 年推出高 TcDMR96 材料；

2012 年耀润电子、江粉磁材分别推出综合 PC95 和 PC90 特性的 YR950 和 JPP96 材料；

2015 年 JFE 公司推出居里点高达 300 度功耗谷点高达 140 度的 MBT4 高温 Bs 100 度为 460mt，140 度为 400mt，Ms3 高温 Bs 100 度大于 490mt。如下图：



川崎（JFE）公司居里点高达 300 度功耗谷点高达 140 度的 MBT4 性能指标

MnZn Ferrite Working at Higher Temperatures above 100°C: MBT4

Material			MB3	MB4	MB1H	MBT1	MBT4
Initial Permeability	μi	23°C	2500	2500	1700	3400	1500
Saturation Flux Density @1200A/m	Bms [mT]	23°C	510	520	540	510	537
		60°C	450	470	505	460	503
		100°C	390	400	460	390	460
		130°C	325	350	410	340	405
		140°C	300	330	400	325	400
Core Loss @100kHz,200mT	Pcv [kW/m³]	23°C	650	575	980	395	900
		60°C	440	375	600	365	605
		100°C	350	270	380	340	407
		120°C	390	350	550	390	332
		130°C	430	440	675	420	299
		140°C	485	525	775	465	286
Curie Point	Tc [°C]		215min	215min	300min	230min	300min
Resistivity	ρ [Ωm]		6.0	4.5	6.0	4.0	5.0
Density	d [kg/m³]		4.9×10^3		4.9×10^3		4.9×10^3

(provisional values of the lab. level)

川崎（JFE）公司高电阻率 MBF4 材料性能指标

MnZn Ferrite Suitable for Drive at100k～500kHz: MBF4

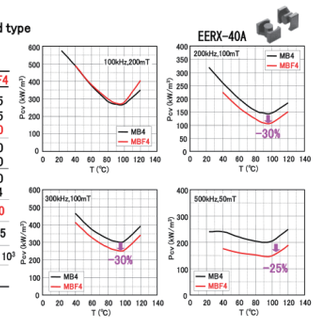
Lower loss at from 100 to 500kHz than that of MB4

Application／
SMPS general; suitable for forward type

Material properties

Material			MB4	MBF4
Core loss (at 100kHz, 200mT)	Pcv (kW/m³)	23°C	575	575
		60°C	375	375
		100°C	270	270
Effective saturation flux density (at 1200A/m)	Bms (mT)	23°C	520	520
		100°C	400	400
Effectivs saturation residual flux density	Brms (mT)	23°C	130	130
		100°C	54	54
Initial permeability	μ_i/μ_o		2500	2100
Curie point	Tc (°C)		≧215	≧215
Core density	d (kg/m³)		4.9×10^3	4.8×10^3
Resistivity	ρ (Ωm)		4.5	15

μ_o :vacumm permeability



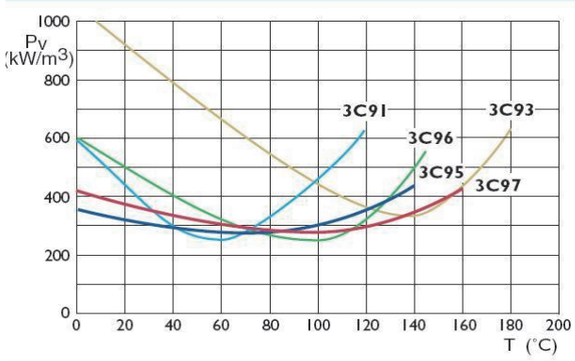
江粉磁材高 Bs 低功耗材料性能

特性	單位	測量條件	JPP-90	JPP-95	JPP-96
初始磁導率 μ_i		25℃	2200±25%	3300±25%	3000±25%
飽和磁通密度 B_s	mT	25℃	540	530	540
1194A/m		100℃	450	410	450
剩磁 B_r	mT	25℃	170	80	90
		100℃	60	60	60
矯頑力 H_c	A/m	25℃	13	9.5	10
		100℃	6.5	6.5	6.5
		25℃	680	350	360
單位體積損耗 P_{cv}	kW/m^3	60℃	-	290	
100kHz, 200mT		100℃	320	300	300
		120℃	-	360	
電阻率 ρ_e	Ω·m		6	6.5	6
居里溫度 T_c	℃		>250	>215	>250
密度 d_x	kg/m^3		4.9x10^3	4.8x10^3	4.9x10^3

耀润电子 YR950 材料与各牌号高 Bs 低功耗材料性能比较表

公司	牌号	初始磁导率 μi 25℃ ±20%	常温 (25℃) Bs/mT H=1200A/m	高温 (100℃) Bs/mT H=1200A/m	谷点功耗 mW/cm^{-3} 100kHz, 200mT
EPCOS	N95	3000	525	415	25℃ 425 100℃ 350
PHILIPS	3C95	3000	530	410	25℃ 350 100℃ 290
TDK	PC47	2500	530	420	25℃ 600 100℃ 270
	PC95	3300	530	410	25℃ 350 100℃ 290
	PC90	2200	540	450	25℃ 680 100℃ 320
FDK	4H45	2000	520	450	100℃ 450
	4H47	1200	530	470	100℃ 650
耀润电子	YR950	3300	540	440	25℃ 350 100℃ 350

菲磁新 3C97（宽温，高谷点）3C95（宽温低功耗）材料性能（据称最近又推出了改善型 3C97+ 及居里点高达 300 度的 3C99）



5 高直流叠加、低功耗材料开发技术

高 Bs 材料配方：氧化铁含量较高，氧化锌含量较低；低功耗材料配方：氧化铁含量较低，氧化锌含量较高；同一种材料上实现高 Bs 和低功耗是一大技术难题。

要使材料高温 Bs 高，就要提高居里点 Tc，除采用高铁低锌配方外，还得添加 NiO 和 Li2O 等杂质，但这样会增大材料各向异性常数和磁致伸缩系数，从而使功耗特性恶化；

增大晶粒直径以提高烧结密度，可提高 Bs，但材料涡流损耗与晶粒直径的平方成正比，此举又会使功耗特性恶化。

所以，提高材料 Bs、同时降低功耗是一对矛盾，必须找到兼顾二者的技术工艺诀窍，特别是掌控有效杂质及相应的烧结规程来降低 Br，以获得束腰或倾斜形恒导回线。

5.1 日立公司试验方案推荐

日立公司研制的宽温高 Bs 材料见下表 1，17 号料 20℃时 Bs 为 580mt、100℃时 Bs 为 560mt，功耗为 480mw/cm^3，基本配方和掺杂见下列各表。

試料 No.	μi	Bm (mT) 20°C	Bm (mT) 100°C	Bm (mT) 150°C	Bm 低下率 (%)	ρ (Ω·m)	Tc (°C)	Rcal (%)	R (%)
1*	126	534	514	501	3.7	0.59	508	27.5	26.5
2	173	558	535	515	4.1	0.67	485	25.0	24.3
3	218	553	544	527	1.6	0.73	470	22.2	21.9
4	229	571	548	526	4.0	0.71	456	22.2	21.7
5	226	570	535	506	6.1	0.68	448	22.2	22.1
6*	212	515	471	435	8.5	0.67	445	22.2	21.9
7*	219	476	476	405	0	0.63	457	19.0	18.7
8	289	563	560	490	0.5	0.63	442	19.0	18.9
9	363	575	552	500	4.0	0.75	428	19.0	19.0
10	428	576	535	483	7.1	0.62	415	19.0	18.9
11*	352	540	499	445	7.6	0.44	403	19.0	19.0
12	311	615	520	456	15.4	0.77	406	15.4	15.4
13	967	634	531	465	16.2	0.75	391	15.4	15.7
14	1134	620	533	467	14.0	0.73	379	15.4	15.3
15*	675	562	476	398	15.3	0.65	346	11.1	11.2
16*	765	520	445	388	14.4	0.01	306	11.1	12.0
17	327	580	560	505	3.4	0.55	428	19.0	18.3

基本配方和掺杂技术

試料 No.	コアロス (kW/m^3) 20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	コアロスが極小になる温度(°C)
8	1582	1265	947	620	1089	1397	1530	80°C
9	1650	1392	1128	883	606	459	505	120°C
10	1429	1243	1065	868	671	493	372	140°C 以上
11*	1496	1301	1106	928	772	656	559	140°C 以上
14	520	351	223	326	457	583	710	60°C
17	1344	1071	872	696	481	664	683	100°C

表2 高温高Bs功率MnZn铁氧体材料的组成与性能

编号	主配方（mol%）					Bs（mT）（100℃）	Pcv（kW/m³）（100℃）	μi（25℃）	副成分（ppm）
	Fe_2O_3	MnO	ZnO	NiO	$LiO_{0.5}$				
1	63.0	17.0	18.0	2.0	—	494	661	1059	
2	67.0	18.5	14.0	0.5	—	505	988	702	
3	64.0	19.0	16.0	—	1.0	510	951	890	SiO_2=100
4	64.0	18.0	16.0	—	2.0	504	901	732	$CaCO_3$=1500
5	63.0	17.5	18.0	1.0	0.5	507	1167	803	Nb_2O_5=200
6	64.0	16.5	18.0	0.5	2.0	504	1026	799	
7	67.0	18.0	15.0	—	—	483	1013	658	

耀润公司高叠加材料制作案例

高 Bs 样环 T25*15*8 性能测试

样品批号 T25*15*8	编号	功耗pcv					叠加（0.2A）%		Bs（mt）		μi
		25℃	60℃	80℃	100℃	120℃	25℃	100℃	25℃	100℃	μi
99A#	1	587	415	366	431	455	85.3	83.4	555	441	2115
	2	591	418	370	425	451	83.2	82.5	565	445	2098
	3	592	417	375	426	453	84.4	82.7	561	444	2108

高叠加 T25*15*8 性能测试

样品批号 T25*15*8	编号	功耗pcv					叠加（0.2A）%		Bs（mt）		μi
		25℃	60℃	80℃	100℃	120℃	25℃	100℃	25℃	100℃	μi
YRFS150 61502	1	591	359	359	382	398	109	95.7	510	410	2320
	2	598	363	360	383	391	108	95.8	509	408	2378
	3	595	368	362	385	395	110	95.7	512	411	2330

5.2 材料烧结工艺规范

大尺寸产品烧结程序（富氧）1350℃ /6Hr b=7.9–8.1 Top O2：10%

	设定温度（℃）	设定时间（小时）	温升（℃/Hr）	设定（O2%）
1	10-150	9.3	15	21
2	150-300	12.3	12.2	21
3	300-400	6	16.7	21
4	400-500	5	20	21
5	500-700	3.3	60.6	21
6	700-900	3	66.7	18
7	900-1100	2	100	15
8	1100-1300	2	100	10
9	1330-1350	1	20	8
10	1350-1350	6	0	6
11	1350-1000	4h-3	-87.5	
12	1000	自由降温		

超大尺寸（高表面电阻率承受大电流）产品烧结程序

	设定温度（℃）	设定时间（小时）	温升（℃/Hr）	设定（O2%）
	初始温度	2	0	21
	——150	12	10	21
1	150-150	1	0	21
2	150-200	15	3.33	21
3	200-200	1	0	21
4	200-300	20	5	21
5	300-300	1.5	0	21
6	300-400	20	5	21
7	400-400	1.5	0	21
8	400-600	10	20	21
9	600-600	1	0	21
10	600-1100	9	55.56	21
11	1100-1315	2.5	86	15
12	1315-1315	7	0	8
13	1315-1000	4	-78.75	
14	1000	自由降温		

Mn–Zn 铁氧体的烧结是最重要的工艺过程，它决定了 Mn–Zn 铁氧体形成，并最终获得了正确的化学组成和优良的微观结构，烧结过程中最重要的工艺参数是气氛控制和烧结冷却曲线。

烧结过程中氧分压决定 Fe2+/Fe3+ 比率，平衡冷却曲线中 PO2 与温度的关系由 Blank 方程试验决定，烧结温度、加热速率、保温时间和冷却速度是得到优良微观结构的重要保证。

6 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 tg δ / μ = 1/ μ Q 而 $Q=\frac{1}{tg\delta}=\mu'/\mu''$

从磁谱曲线上看，低频 μ" 提高才可使低频阻抗提高，而 Q= μ ' / μ " ，故从工艺上调整材料损耗，即 Q 值大小，可影响 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可使低频 Q 值降低，使 μ" 提高，从而满足客户对低频高阻抗的要求。

7 结语

采用多铁低锌配方，添加氧化镍等，可大大提高饱和磁通密度 Bs，但 Pcv-T 曲线尾巴上翘，高温功耗奇大；适当减铁增锰，以钛替铁，优选相互牵制与平衡的微量成分，如 K+、Li+ 等行之有效的碱金属离子去除、冲淡以致消除为压平陡翘曲线掺入 Co3+、Ti4+ 的负面影响。配方和掺杂体系确保了高 Bs 和低 Pcv 的宽温特性；

烧结气氛与降温速率和温度正确配伍，能有效降低锰锌铁氧体的磁芯损耗，提高材料密度，精准调控氧分压提高 μ" 数值，可获得兼顾高、低频阻抗的宽温高叠加材料；

多铁低锌配方可获得高 Bs、高密度材料改善叠加特性；但适当减铁加杂，即使 Bs 不太高，降低 Br 后，也可获得高叠加、宽温低功耗特性。

材料综合性能的提高，才能保证大磁芯在大电流下可靠稳定运行。

参考文献

[1] introduction of JFEs MnZn Ferrite (November 5th,2014).

[2] FERROXCUBE Technology Roadmap (2013-2014).

[3] 颜 冲 MnZn 铁氧体材料进展及应用 技术交流会议报告.

[4] 刘九皋 宽温高直流叠加低功耗 YR950 锰锌铁氧体材料 磁性材料及器件 2014，6 期.

上接158页

[3] 常江. 大功率直流充电桩多路输出模式研究[J]. 科技创新与应用，2015(9):58-58.

[4] 张厚升，胡振营，刘雪婷. 基于单周期控制的通用三相 PFC 控制器的研究[J]. 电工技术学报，2004，19(9):73-76.

[5] 叶建盈，陈为，汪晶慧. PWM 波及直流偏磁励磁下磁芯损耗模型研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(10):2601-2606.

[6] 汪晶慧，陈为. 超低损耗角磁芯损耗测量的量热计法[J]. 电工电能新技术，2012，31(4):6-9.

[7] 董纪清，陈为，卢增艺. 开关电源高频变压器电容效应建模与分析[J]. 中国电机工程学报，2007，27(31):121-126.

[8] 赵慧超，张青利，刘洪昌，等. 半桥 LLC 型谐振变换器的高频变压器设计[J]. 广东电力，2012，25(11):87-91.

[9] 旷建军，阮新波，任小永. 集肤和邻近效应对平面磁性元件绕组损耗影响的分析[J]. 中国电机工程学报，2006，26(5):170-175.

[10]Ferreira J A. Appropriate modelling of conductive losses in the design of magnetic components[C]. //Power Electronics Specialists Conference, 1990. PESC '90 Record., 21st Annual IEEE. IEEE, 1990:780 - 785.

[11]Ferreira J A. Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components[J]. IEEE Trans. on Power Electronics，1994，9(1)：127-131.

[12]Nymand M, Madawala U K, Andersen M A E 等. Reducing ac-winding losses in high-current high-power inductors[C]. //Industrial Electronics, Iecon 09, Annual Conference of IEEE. IEEE, 2009:777 - 781.