

用铁鳞制备 Y33H-2 永磁铁氧体预烧料 工艺稳定性的探索与实践

王自敏¹, 蒋世强², 谢瑞兵¹, 喻声频¹, 张云程¹

(1. 宜宾职业技术学院 材料工程技术教研室, 四川宜宾 644003;

2. 西北师范大学 外国语学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 从铁鳞的预处理、配方优化、混合工艺、对铁鳞进行二次氧化处理、预烧等环节对铁鳞制备 Y33H-2 永磁铁氧体预烧料的工艺稳定性进行了讨论。将铁鳞在 850 ~ 900℃ 下氧化处理 1.5 ~ 2h 后, 按 $\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$ 进行配料, 另加 0.1wt% 的 H_3BO_3 并混合均匀, 在 650 ~ 700℃ 下氧化处理 2h 后, 于 1280±5℃ 预烧, 细粉碎时, 配入 0.6wt% 的 CaCO_3 、0.4wt% 的 SiO_2 、0.5wt% 的山梨糖醇, 可制备出 Y33H-2 永磁铁氧体材料。

关键词: 铁鳞; 铁氧体预烧料; 工艺; 磁性能

中图分类号: TM277

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2010)05-0051-06

Exploration and Practice of Process Stability of Y33H-2 Hard Ferrite Pre-sintered Materials From Iron Scale

WANG Zi-min¹, JIANG Shi-qiang², XIE Rui-bing¹, YU Sheng-pin¹, ZHANG Yun-cheng¹

1. Teaching and Research Office of Material Engineering and Technology, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;

2. College of Foreign Language, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Process stability of Y33H-2 hard ferrite pre-sintered materials from iron scale was analyzed, including pre-treatment of iron scale, ingredient optimization, mixing, secondary oxidation of iron scale and pre-sintered. Proper process conditions and parameters for stably producing Y33H-2 hard ferrite pre-sintering material from iron scale was determined as follows: oxidation pre-treatment of 850 to 900℃ for 0.5 to 2h, ingredient of $\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$ with H_3BO_3 additive of 0.1wt%, secondary oxidation at 650 to 700℃ for 2h, presintering at 1280±5℃, fine crushing after adding CaCO_3 of 0.6wt%, SiO_2 of 0.4wt%, and sorbitol of 0.5wt%.

Key words: iron scales; pre-sintered ferrite powder; technology; magnetic properties

1 引言

用资源丰富、成本低廉的铁鳞为原材料生产永磁铁氧体, 是我国永磁行业的一项重大技术创新。但是, 到目前为止, 用铁鳞生产永磁铁氧体的许多企业, 其产品质量仍然不稳定, 仅能生产 Y30H-1 材料的产品。若能用铁鳞稳定生产 Y33H-2 永磁铁氧体预烧料, 其销售价格将提高到 Y30H-1

材料的 2~3 倍。本文分析了用铁鳞生产永磁铁氧体的现状, 总结了导致其产品质量不稳定的因素并提出了相应的、实践中可行的解决措施。

2 用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的现状分析

铁鳞又称氧化铁皮、氧化皮, 通常是指钢材在加热或轧制过程中, 由于钢材表面受到氧化而形成氧化铁层, 剥落下来的鱼鳞状物质。目前, 国内用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的方法通常有两种, 一是干法, 即铁鳞一级过筛(粗筛)→烘干→二级过

收稿日期: 2010-03-09 修回日期: 2010-04-02

作者通信: E-mail: zll197000@163.com

表 1 国内、外用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的比较

单位	材料牌号	B_r/mT	$H_{CB}/kA \cdot m^{-1}$	$H_{CJ}/kA \cdot m^{-1}$	$(BH)/kJ \cdot m^{-3}$	平均销售价格/(元/吨)	工艺
北矿磁材科技	BMS-4	390±8	223±8	239±16	29.5±1.6	2600~2800	干、湿法
	BMS-4BH	395±5	239±8	247±8	30.3±1.6		
	BMS-5	405±5	231±8	239±16	31.9±1.6	3800~4200	
	BMS-5H	385±5	271±8	303±16	28.7±1.6		
华凌高恒磁材	Y30H-1	395±5	239±8	247±8	30.3±1.6	2200~2500	干法
攀钢西磁	Y30H-1	395±5	239±8	247±8	30.3±1.6	2300~2500	湿法
武汉丹斯克	Y30H-1	395±5	239±8	247±8	30.3±1.6	2300~2500	干法
浙江安特磁材	ZMS-2	390±5	230±4	235±4	28.8±0.8	2500~2800	干、湿法
	ZMS-2E	390±5	254±4	262±4	30.4±0.8		
	ZMS-3H	405±5	227±4	230±4	32.0±0.8	3800~4200	
	ZMS-6H	415±5	230±4	238±4	32.0±0.8		
日本住友	YBM-6BB	430±10	246±15	255±15	34.7±1.6	5000~5500	湿法 ^[1]
本课题	Y33H-2	420±10	303±12	318±12	33.4±1.6	6000~7000	湿法

筛(细筛)→处理后的铁鳞与碳酸锶按一定比例进行干式混合→造球→铁鳞的氧化处理→预烧→破碎;二是湿法,除主配方的混合方式(湿混)、入窑方式(直接入窑或烘干、造球后入窑)不同外,其他与干法相同。国内外用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的相关情况如表 1 所示。

从表 1 可以看出,国内企业与国外(如日本)企业相比,其产品磁性能、平均销售价格偏低。而在国内,除北矿、浙江安特等少数企业,用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的部分产品,可以生产优于 Y30H-1 的材料外,其他如攀钢西磁等大多数企业,仅能生产 Y30H-1 材料。这主要是由于钢材品种、收集情况等因素导致了铁鳞的成分极不稳定。且在铁鳞中含杂质较多。其中,各批次 Fe、Si 等元素含量的不稳定,是永磁铁氧体预烧料性能不稳定的首要原因,而国内用铁鳞制备永磁铁氧体预烧料的许多企业,对原料中 Fe、Si 等元素含量的波动未能进行有效的控制。Fe 含量的不稳定,将直接导致永磁铁氧体预烧料主配方的偏差,从而导致其磁性能的不稳定。另一方面,由于少量的 Si^{4+} 可以进入铁氧体晶格,导致相应部分的 Fe^{3+} 转变成 Fe^{2+} , SiO_2 与 FeO 反应生成低熔点(1205℃)的硅酸铁,这样,可降低预烧和烧结温度,抑制晶粒长大。而大生产的预烧温度是相对固定的,如遇到 Si^{4+} 含量波动较大的铁鳞原料批次,其对应预烧料的磁性能也将随之波动。如 Si^{4+} 的含量超过一定值,将导致如下反应: $SrFe_{12}O_{19} + SiO_2 \rightarrow SiSrO_3 + 6Fe_2O_3$, 这将使材料的磁性急剧恶化。

3 用铁鳞生产 Y33H-2 永磁铁氧体预烧料的工艺要点

3.1 铁鳞预处理

铁鳞预处理的主要目的是使其成分相对稳定,减少有害杂质。先用 10 目的粗筛,除去铁鳞(全铁 $TFe \geq 72\%$, $FeO \geq 38\%$, $MnO \leq 0.2\%$, $SiO_2 \leq 0.2\%$, $S \leq 0.1\%$)中的大异物,经磁选之后,进入球磨机中进行研磨,至 $3.0 \sim 3.5 \mu m$ 之后,将其送入氧化窑中进行氧化处理。铁鳞的氧化处理温度、保温时间对 Fe_2O_3 纯度的影响如图 1 所示。图 1 中曲线 1~5 分别为铁鳞在不同温度下保温 0.5、1、1.5、2、2.5h 时 Fe_2O_3 纯度的变化情况。图 1 表明,在 $850^\circ C \sim 900^\circ C$ 的氧化窑中氧化处理 1.5~2h,氧化后其 Fe_2O_3 的含量在 95% 以上。再继续升温或延长保温时间, Fe_2O_3 纯度的提高不明显。

事实上,如果氧化温度低于 $600^\circ C$ 时,铁鳞中的 FeO 难以充分转化成 Fe_2O_3 ,而当温度高于 $900^\circ C$ 时,部分铁鳞容易变成熔融状态,这对后续工艺的处理不利。另外,铁氧体固相反应本身需要消耗大量的氧气,如果铁鳞在第一次氧化处理后,其 Fe_2O_3 的质量分数达不到 95%,在后面的预烧过程中,即使有第二次氧化处理的机会,也难以完全被氧化。这样,在预烧料中容易出现异相,这对材料的磁性能极为不利。

3.2 配方优化

将预处理过的同一批次铁鳞,同二氧化锆粉末(纯度为 99%)、碳酸锶(纯度为 98.5%)、碳酸钙

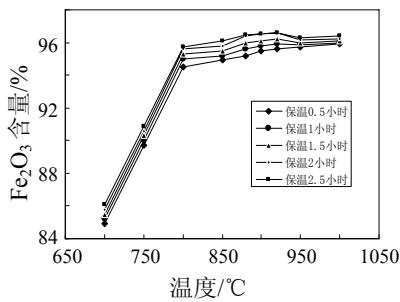


图1 铁鳞的氧化处理温度、保温时间对 Fe_2O_3 纯度的影响

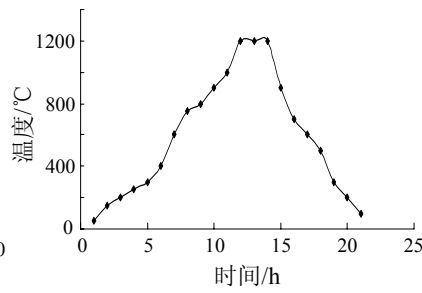


图2 烧结曲线

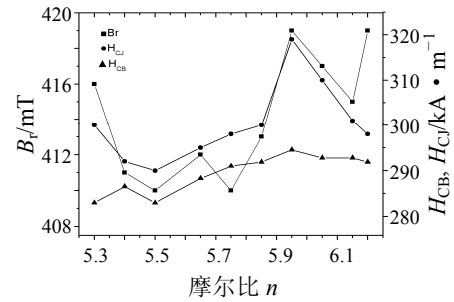


图3 配方对材料磁性能的影响

表2 工艺对比试验

编号	对比试验方案	主配方	B_r/mT	$H_{CB}/\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	$H_{CJ}/\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$
本课题	$n=5.95$,其余按前述配方实验	$\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$	419	291	319
对比1	预烧前,不加硼酸	$\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$	413	289	311
对比2	细粉碎时,不加分散剂	$\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$	411	290	320
对比3	预烧前,不加碳酸钙	$\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$	412	291	316
对比4	预烧前,不加氧化锆	$\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.9}\text{O}_{19}$	408	288	308
对比5	预烧前,不加氧化镧	$\text{Sr}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$	416	260	272
对比6	常规一次配方	$\text{SrO}\cdot 5.95\text{Fe}_2\text{O}_3$	403	247	258

(纯度为 98.5%) 粉末按主配方 $\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{2n-0.05}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$, 以总量为 1kg/次进行配料, 其中取摩尔比 $n=5.3\sim 6.2$ 。将配好的原料、水与材质为 Gr15 ($\text{HRC}\geq 62$) 的 $\varnothing 6$ 轴承钢球, 按料:球:水=1:12:1.5 的比例, 装入转速为 75r/min 的 $\varnothing 200\times 220$ 的四缸球磨机中, 另加质量分数为 0.1% 的 H_3BO_3 (纯度为 99%), 混合 6h 后, 将料浆烘干; 在空气中, 于 $650\sim 700^\circ\text{C}$ 下保温 2h, 以使铁鳞进一步氧化; 然后, 升温到 1280°C 保温 2h, 进行预烧处理。

将预烧处理后的料块, 粗破碎至平均粒度为 $(3\pm 0.02)\mu\text{m}$ 的细粉末。在细粉末中加入 0.6wt% 的 CaCO_3 、0.4wt% 的 SiO_2 , 同时加入 0.5wt% 的山梨糖醇作为分散剂, 研磨 14~15h。当料浆的平均粒度在 $(0.78\pm 0.02)\mu\text{m}$ 时出料 (用丹东华宇仪器有限公司 WLP-208 费氏粒度仪测量)。出料后, 将料浆的含水率控制在 $(40\pm 2)\%$ 。用宜宾大正电子 100t 自动压机湿压磁场成型, 成型压力为 4.4~4.5MPa, 保压时间为 6~8s, 充、退磁电流分别为 45A、20A, 真空度为 $(0.1\sim 0.3)\times 10^{-4}\text{Pa}$, 均成型为 $\varnothing 30\text{mm}\times (15\pm 2)\text{mm}$ 的坯体, 其含水量控制在 $(13\pm 0.2)\%$ 。在同一高温箱式炉中, 按图 2 所示的烧结曲线进行烧结。用中国计量科学研究所的 NIM-2000F 永磁铁氧体测量仪进行磁性能检测, 所得样品磁性能见图 3。

为了进一步对上述配方实验进行分析, 我们进行了如下的对比试验: 各对比实验的摩尔比均取 $n=5.95$, 工艺对比方案见表 2, 其余工艺条件与前述相同。所得样品的磁性能也列于表 2 中。

从图 3、表 2 的试验数据对比中可以看出, 当 n 在 5.95~6.05 范围内变化时, 预烧前添加适量的微量元素如钙、锆、镧等, 在所述的配方试验工艺条件下, 可以满足 Y33H-2 永磁铁氧体材料的技术要求。这是由于 Ca^{2+} 与 O^{2-} 的离子半径比较接近, 不会破坏磁铅石结构, 而 Ca^{2+} 的半径远大于 Fe^{3+} 的半径, 却相近于 Sr^{2+} 的半径, 因此, Ca^{2+} 离子可以取代 Sr^{2+} 离子的晶位。而当 CaO 取代 $\text{SrO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 中的 SrO 时, 能加速 c 平面的生长, 促使片状晶体的形成, 从而使得其在磁场作用下, 易于取向; 而 ZrO_2 是一种微观结构控制剂^[2], 它可以在预烧过程中引入到铁氧体晶格中, 分布于铁氧体的晶界, 从而提高了产品的脆性。这样, 在细粉碎时, 可以获得粒度分布更窄的料浆, 这对改善材料的磁性能是有利的。而 La^{3+} 具有细化晶粒的作用, 当它取代部分 Sr^{2+} 时, 能明显改善 M 型铁氧体的内禀磁性^[3]。

试验数据表明, 当 $n=5.95$ 时, 材料磁性能处于最优水平。这是由于 n 稍低于 6 时, 可使晶格点阵产生一些空位或导致一些晶格缺陷的形成, 这些空位或缺陷有利于烧结时离子的迁移, 从而促进了

烧结时固相反应的进行,其结果是材料的收缩率增大,密度上升,活性增高,饱和磁化强度与剩余磁化强度增大^[4]。试验数据进一步表明,预烧前添加适量的硼酸与不加硼酸相比,其磁性能得到了改善。这是因为,在预烧阶段,适量起助熔剂作用的硼酸加入,有利于控制晶粒的生长。另外,在细粉碎时,适量分散剂的添加,也有利于产品磁性能的改善。

3.3 原料混合

用已预处理过的铁鳞与碳酸锶进行混合,除了混合时间不同外,其他工艺条件与前述配方实验均相同,所获得样品的磁性能如图4所示。

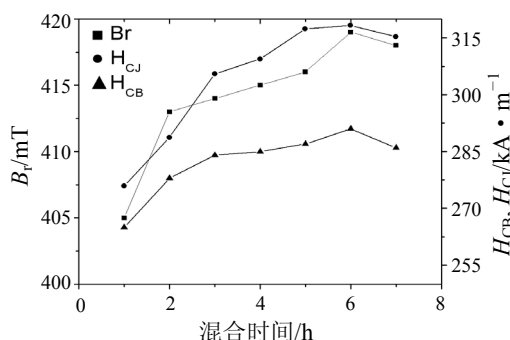


图4 主原料混合时间对永磁铁氧体预烧料磁性能的影响

图4中的数据表明,铁鳞与碳酸锶的混合时间为6h,二者混合相对均匀,材料的磁性能相对较理想。当混合时间继续延长,微粒由于高表面能、高表面活性而处于不稳定状态,粒子之间由于范德华力发生团聚现象导致材料的磁性能下降。

3.4 预烧

除预烧温度曲线不同外,其他工艺与前述配方实验均相同。在650~700℃下保温2h,以使铁鳞进一步(二次)氧化,然后分别升温到1300、1290、1280、1270、1260℃保温2h预烧,除最高点的温度不同外,其他温度点的设置均相同;最高预烧温度及其保温时间对产品磁性能的影响如图6所示。调整铁鳞的二次氧化温度,分别在400~500℃、710~800℃下保温2h,其他温度点的设置与前述最高温度为1280℃时相同。二次氧化温度对产品磁性能的影响见表3。

表3 二次氧化温度对产品磁性能的影响

二次氧化温度	B_r/mT	$H_{CB}/kA \cdot m^{-1}$	$H_{CJ}/kA \cdot m^{-1}$
400~500℃	406	285	313
650~700℃	419	291	319
710~800℃	408	286	315

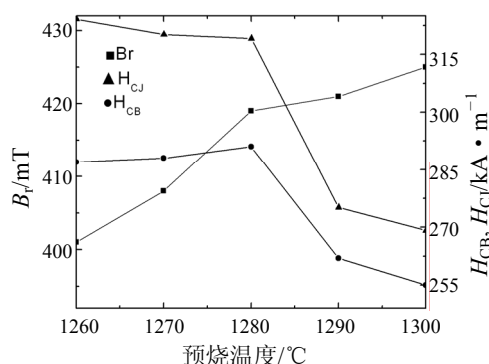


图5 预烧温度对产品磁性能的影响

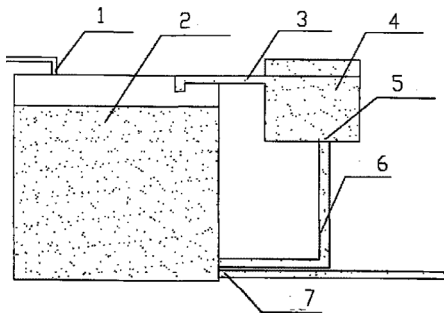
图5表明,在1280℃附近预烧,样品的综合磁性能最优。如果预烧温度偏高(如图5中的1290℃),尽管可使预烧料中铁氧化物的成分增多,但化学活性较差,而且预烧温度偏高会使粉碎颗粒度分布不均匀,烧结时出现晶体不连续生长,使产品矫顽力大大下降。原料中含有低熔点成分时,过高的预烧温度还会使预烧料块(球)部分熔融,以至无法用后期调节烧结温度的方法来补救。预烧温度偏低,铁氧化物粉末的松装密度较小,坯件烧结后的收缩率较大^[5],其固相反应不完全,二次球磨时容易出现“跑锶”现象,产品在烧结后,表面往往会出现花斑^[6];另一方面,因反应不充分而残存在预烧料中的非磁性相,对产品的磁性能不利,同时,由于这些非磁性相不能与六角片状晶体协调生长,产品在烧结后,容易产生碎裂。

表3中的数据表明,二次氧化温度为650~700℃时,效果较理想。由于在450℃~550℃时,斜方晶系SrFeO_{2.5}已经出现,600℃时结晶、低温不稳定的SrFe₁₂O₁₉磁铅石型铁氧体已开始形成^[7]。如果在700℃以上时,再对未彻底氧化的铁鳞进行氧化处理,达不到预期的目的。如在低于650℃对其氧化处理,由于处理的温度偏低,进一步氧化反应不充分。

4 用铁鳞稳定批量生产Y33H-2永磁铁氧体预烧料的实践与效果

4.1 混料

图6是混料工艺优化控制方案的示意图。按Sr_{0.85}Ca_{0.05}La_{0.1}Fe_{11.85}Zr_{0.05}O₁₉,取n=5.95,称取原料,另加0.1wt%的H₃BO₃作为添加剂,将各原料一起投入到球磨机内磨制,磨制后的料浆送到与砂磨机上、下部通过管道相连接的搅拌储存罐进行搅拌,再用泵送入到砂磨机内研磨。在砂磨机研磨过程中,粒度较小的料会浮在上面,通过溢流槽返回



1-进料口；2-搅拌储存罐；3-溢流槽；4-砂磨机；
5-砂磨机进料口；6-管道；7-连接管道

图6 混料工艺的优化控制

到搅拌储存罐中；粒度较大的料继续研磨成粒度较小的料后，浮在上面，通过溢流槽再返回到搅拌储存罐中。此过程可反复循环。循环磨料的时间根据料浆检测情况确定。对搅拌磨制后的料浆进行成份、粒度检测分析，合格的料浆输送至回转窑，不合格的则继续调整并搅拌磨制，可以反复循环^[8]。这样，可以确保进入回转窑的料浆粒度、成份均符合要求。

4.2 预烧

由于在预烧高温区，即在铁氧体的形成过程中，要消耗大量的氧气，因此，在原料的进料处，预烧气氛中的 O_2 含量会减至 5% 或更低。在铁鳞预处理阶段，未完全氧化的铁鳞在这种低氧气氛下很难进一步被氧化。未被预先氧化的铁鳞在铁氧体的形成过程中，很容易生成异相 ($SrO \cdot 2Fe_2O_3$)。如果预烧料里一旦存在这种异相，将最终恶化磁体的磁性能。如果原料在窑炉的进料处， O_2 含量能控制在 8% 以上，预处理后的铁鳞能在这种氧气气氛下，于 $650 \sim 700^\circ C$ 时进一步充分氧化，则可以预防此现象的出现。如果 O_2 含量小于 8%，则铁鳞难以进一步被氧化。

可以在链蓖机出口处增加一处引风装置，由于此处负压较甚，因此采用自然引风(自然引风是利

用引风机内外压力差而产生的气流运动实现的)是可行的。

最高预烧温度控制在 $1280 \pm 5^\circ C$ 。控制好几支关键性的热电偶。对 $\varnothing 1.8m \times 18m$ 的回转窑来说，靠近窑头 4~5m 处高温区的热电偶控制尤为重要，或用远红外温度计并辅以光学高温计或其他温度计监测温度，以控制预烧温度稳定。

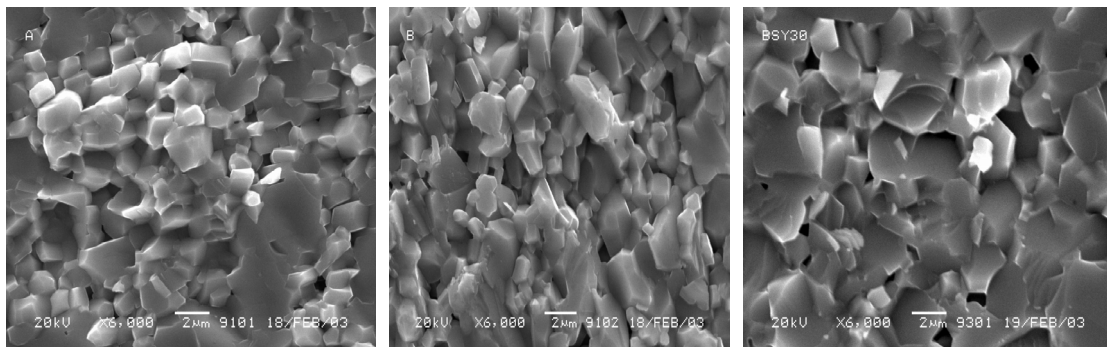
要保证烧结区的温度稳定，还必须考虑窑尾的温度及压力。要稳定窑内的气氛，就需要稳定窑内的压力。在回转窑的预热带、链蓖机处，一般都控制为负压，这不仅对排除废气有利，而且有利于氧化气氛的形成。

4.3 批量生产预烧料的性能

用本课题确定的生产工艺制备的预烧料，在前面配方实验中提到的二次工艺条件下获得的烧结磁体，X 射线衍射定量分析发现，其 M 型铁氧体相的纯度为 99.12%。产品中依然有少量的异相 ($SrO \cdot 2Fe_2O_3$) 存在。这可能是由于铁鳞的氧化还不够彻底或者主配方中的 Fe_2O_3 略偏少造成的。

图 7 是常规工艺样品、北矿 BSY30 样品与本研究样品的 SEM 照片。常规工艺样品晶粒细小，但局部出现熔融状态；北矿 BSY30 样品与本研究样品均未发现熔融状物质，说明二者的氧化处理工艺合理。BSY30 样品晶粒明显较大，说明其预烧温度略偏高。而本研究样品的晶粒细小、均匀，这有利于材料磁性能的改善，其产品磁性能的典型数据为： $B_r=0.419mT$ 、 $H_{CB}=290kA/m$ 、 $H_{CI}=317kA/m$ 。

通过对铁鳞的预处理、配方、混料工艺、预烧工艺的优化，特别是通过对铁鳞两次的氧化处理，微量元素钙、硼、铅、镧等元素的添加来制备 Y33H-2 永磁铁氧体预烧料的 6 个月生产实践表明，其批次合格率为 100%。



(a) 常规工艺样品

(b) 本研究样品

(c) 北矿 BSY30 样品

图7 几种样品的显微结构对比

4 结论

(1) 用铁鳞生产永磁铁氧体预烧料时, 按 $\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.05}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.85}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{19}$ 配料, 另加质量分数为 0.1% 的 H_3BO_3 并混合均匀, 在 $1280\pm 5^\circ\text{C}$ 预烧, 细粉碎时配入质量分数为 0.6% 的 CaCO_3 、0.4% 的 SiO_2 、0.5% 的山梨糖醇, 可制备 Y33H-2 永磁铁氧体材料。

(2) 在 $850\sim 900^\circ\text{C}$ 的氧化窑中氧化处理 1.5~2h, 预烧前于 $650\sim 700^\circ\text{C}$ 进一步氧化处理, 有利于磁性能的改善。

参考文献:

- [1] 滨村敦. 铁素体磁铁用煅烧材料的制备方法[P]. 中国专利: CN1101164.1995-04-05.
- [2] A·默里尔, 等. M 型六角铁氧体粉末或团块的制造方法[P]. 中国专利: CN1364145.2002-08-14.

(上接 50 页)

4.4 线圈匝数 N 的计算

选定磁芯后, 根据磁芯生产厂家说明书上的参数表, 查表得到该磁芯的 A_e 值, 然后根据

$$N = \frac{V_{in,m} T_{on}}{\Delta B_m A_e} \quad (13)$$

算出所需的线圈匝数 N 。

4.5 磁芯气隙深度 δ 的计算

可据下式先算出磁芯的有效磁导率 μ_e :

$$\frac{L_1}{N^2} = \mu_0 \mu_e \frac{A_e}{l_e} \quad (14)$$

式中的 l_e 为磁芯有效磁路长度, 可在厂家提供的磁芯参数表中查到, 或测量磁芯尺寸后自己进行计算。

由于气隙深度远小于磁路长度, 可近似用下式算出磁芯所需气隙深度 δ :

$$\frac{1}{\mu_e} = \frac{\delta}{l_e} + \frac{1}{\mu_i} \quad (15)$$

(15) 式中 μ_i 是磁芯所用材料的起始磁芯率, 严格来说, 应使用磁芯真实工作条件下磁芯本体所表现出的振幅磁导率, 但由于磁芯开有气隙, 故基本可用 μ_i 代入计算, 简化运算。

4.6 磁芯所用功率铁氧体材质的选择

BOOST 电感器中, 流过的电流是三角波电流, 有较大的直流成分, 与没有直流偏置的情况相比, 有直流偏置的电感器电感量会有一个较明显的跌落, 故 BOOST 电感器用磁芯除了要考虑到磁芯的高频损耗要小外, 还要考虑到磁芯的抗直流偏置能力、抗饱和能力。

对于 BOOST 电感磁芯所用的材质, 市场常用

- [3] 刘先松, 等. 稀土 La^{3+} 离子取代对 M 型锶铁氧体的结构和磁性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(5): 385-387.
- [4] 周文运. 烧结永磁铁氧体[Z]. 绵阳: 中国电子科技集团公司九所信息中心, 2004. 130-239.
- [5] 宋玉升. 铁氧体工艺[M]. 北京: 电子工业出版社, 1984: 68-69.
- [6] 曾维勇, 等. 工艺参数对锶铁氧体预烧料磁性能的影响[J]. 矿冶工程, 1997, 3: 71-74.
- [7] 赵文俞, 等. 柠檬酸法合成 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 磁铅石型铁氧体的晶化过程研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(1): 21-24.
- [8] 杨宗维, 等. 用于湿法生产永磁铁氧体预烧料料浆的方法及装置[P]. 中国专利: CN101289315A.2008-10.

作者简介: 王自敏 (1972-), 男, 宜宾市技术拔尖人才, 1996 年毕业于电子科技大学电子材料与元器件专业, 一直从事磁性材料产品的生产、工艺、新品开发等相关工作。

PC40、PC44 类两种典型功率软磁铁氧体材质, 这两种材质虽然具有一定的抗直流偏置的能力, 但并没有针对此项指标进行过特别优化, 有时为了达到抗直流叠加要求时, 不得不选用大一号尺寸的磁芯。

5 结语

目前国内磁材行业中, 一些研发实力较强的磁性材料生产企业, 如风华高科微硕电子研发的高抗直流叠加低损耗双重特性 PG232B 材料, 其抗直流偏置能力有一个明显的提升。该公司开发的另一款高温高 B_s 特性 PG182A 材料, 在高温下具有比 PC40、PC44 类材料更高的 B_s 值, 抗饱和能力强, 可有效缩小 BOOST 电感器的体积。

参考文献:

- [1] 毛兴武, 祝大卫. 电子镇流器原理与制作[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 39.
- [2] 毛兴武, 祝大卫. 新型电子镇流器电路原理与设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 112.
- [3] 陈炜, 赵修科. 电流临界连续时 PFC 电路分析[J]. 南通工学院学报, 1997, 13(1): 45-47.
- [4] 何可人. 软磁铁氧体磁心开关电源变压器的原理与设计[Z]. 49-51.
- [5] 赵修科. 实用电源技术手册-磁性元器件分册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002, 50, 68.

作者简介: 王京平 (1967-), 男, 高级工程师, 1990 年毕业于华中理工大学 (现华中科技大学) 磁性材料与器件专业, 长期从事软磁铁氧体研发、生产工艺、应用及技术管理等工作, 在国内外发表论文 10 余篇, 获得国家、省、市科技成果奖励 20 多项, 现任广东风华高科微硕/海特电子有限公司总经理。