



永磁铁氧体预烧料的粉磨工艺与磁性研究

王自敏^{1,2}, 邓志刚²

(1. 宜宾职业技术学院 现代制造工程系, 四川 宜宾 644003; 2. 自贡江阳磁材有限责任公司, 四川 自贡 643200)

摘要:采用不同工艺对永磁铁氧体预烧料进行粉磨处理,以平均粒度测试仪结合沉降法比较颗粒料粒度及其分布,利用永磁铁氧体标准测量装置及压力试验机对产品相关磁性能进行检测。结果表明:与传统粉磨工艺相比,在2个阶段中不同速度、钢球直径、料-球-水质量比的粉磨工艺的球磨效率提高22%,成型周期缩短8%以上,磁体的综合合格率提高7.6%以上,产品承受负荷极限压强增大8.3%;磁体的剩余磁感应强度、内禀矫顽力分别增大1.17%、4.4%;成型用料浆的空隙率、生坯密度、磁体的显微结构等也均得到明显的改善。

关键词:永磁铁氧体; 磁性能; 粉磨工艺

中图分类号:TM273 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2016)01-0101-05

Pre-sintered Materials Fine Grinding Technology and Magnetic Property of Permanent Magnetic Ferrite

WANG Zimin^{1,2}, DENG Zhigang²

(1. Modern Manufacturing Engineering Department, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;

2. Zigong Joint-Mag Co., Ltd., Zigong 643200, China)

Abstract: The pre-sintered materials of permanent magnetic ferrite were ground by different processes. The particle size distribution of the granular materials was compared by an average particle size tester in combination with the method of sedimentation. The related magnetic property of the products was tested by a standard measuring device for permanent magnetic ferrite and a product pressure testing machine. The results show that compared with the traditional fine grinding process, there are the following conclusions for fine grinding technology with different speeds, steel ball diameters, mass ratios of materials, ball and water in two stages. The ball milling efficiency is improved by 22%, the molding cycle is shortened more than 8%. The overall pass rate of the magnet is improved by more than 7.6%. The bearing load limit of the products is increased by 8.3%. The residual magnetic flux density and coercive force of the magnet are increased by 1.17% and 4.4%, respectively. The porosity of the molding slurry, green density, microstructure of the magnet and so on are also significantly improved.

Keywords: permanent magnetic ferrite; magnetic property; fine grinding

收稿日期:2015-03-17, 修回日期:2015-04-02。

基金项目:四川省重大科技成果转化项目,编号:2013GC0109。

第一作者简介:王自敏(1972—),男,副教授,市杰出创新人才,研究方向为磁性材料产品的生产、工艺及新品开发。E-mail:1040544572@qq.com。

永磁铁氧体预烧料粉磨的主要目的是将其粉碎并磨细,以便获得成型所要求的粒度和烧结所需要的化学反应接触面,促进产品的致密化和晶粒的生长。粉磨后的粒度分布如果过宽,容易引起明显的不连续晶粒生长,从而使铁氧体的磁性能变差;粒度分布越窄,即颗粒尺寸越均匀,越有利于成型和烧结^[1]。成型用料的平均粒度小可以减小磁体的气孔率,增大磁体的致密度,从而增大材料的剩余磁感应强度 B_r 。料浆颗粒越小,越接近单畴尺寸 $1\mu\text{m}$,成型时料浆的取向度提高越明显。料浆取向度的提高。有利于材料 B_r 的进一步增大;另一方面,成型用料的粒度越单畴化、均匀化,对增大材料的内禀矫顽力 H_{cj} 越有利。目前,行业里常用的粉磨方法主要是球磨法。本文中基于研磨设备的内部结构及其转速、钢球直径、料-球-水质量比、细粉碎时间^[2]、是否进行分级粉磨^[3]等影响粉磨效果的主要因素,进行粉磨用钢球直径的优化设计,同时结合分散剂的应用进行不同粉磨阶段、转速、料-球-水质量比实验,以改善铁氧体产品的制备工艺及其磁性能。

1 细粉碎用钢球直径的计算

分级球磨主要是利用不同尺寸的磨球对粉体的粉碎机理不同而设计的^[4],参考国外的分级研磨工艺^[3],粉磨阶段采用两级研磨技术。在阿里斯·查尔默斯公式的基础上,永磁铁氧体粉磨阶段钢球直径的经验计算公式^[5]如下:

$$D_b = 25.4k_1 \left(\frac{d_f}{k_m} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho w_i}{c_s \sqrt{\frac{D}{304.8}}} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

式中: D_b 为钢球的直径,mm; d_f 为进料粒径, μm ; ρ 为原料密度, g/cm^3 ; w_i 为待磨原料的功指数, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$; D 为球磨机的内径,mm; c_s 为球磨机的转速率,即工作转速与其理论临界转速之比,%; k_m 为系数,取为200; k_1 为湿法研磨粒径为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的微米级永磁铁氧体预烧料粉体时的修正系数,取为0.4。

根据式(1),在第1阶段,进料粒径 d_f 为 $3\sim 5\mu\text{m}$,原料密度为 $4.1\sim 4.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。按行业目前常用球磨机(简

体直径为 1 500 mm, 长度为 1 900 mm) 1.5 t 料的实际运行参数(电压为 380 V, 电流为 100 A, 功率因素 $\cos \psi$ 为 0.925, 电机的工作效率 η 为 95%), 结合球磨机的相对可磨度修正算法^[6], 求出单位原料粉磨

11 h 所需的功耗 $W = \frac{11}{1\ 500} \sqrt{3} UI \cos \psi = 381.76 \text{ kW}$,

其中 U 、 I 分别为球磨机运行时的工作电压、电流。如果将 1.5 t 料的粒径粉磨至 1.2~1.25 μm , 粉磨时间为 11 h, 参考邦德脆性物料粉碎过程的第三理论即裂缝

说基本公式^[7], 磨机的功耗 $W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{d_p}} - \frac{10}{\sqrt{d_f}} \right)$,

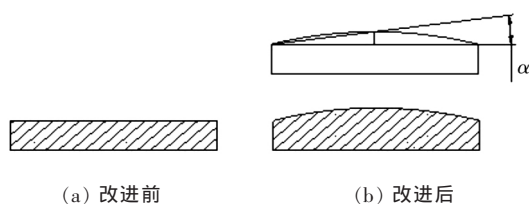
其中 d_p 为出料粒径, μm 。由此可求出 $W_i = 86.80 \sim 133.76 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$, 进而可算出钢球直径为 7.1~12.3 mm。

在第 2 阶段, 进料粒径 d_f 为 1.2~1.25 μm ; 按行业目前常用球磨机(筒体直径为 1 500 mm, 长度为 1 900 mm)将 1.5 t 物料从粒径为 1.2~1.25 μm 粉磨到粒径为 0.75~0.80 μm 的时间 11 h 进行计算, 可求出 $W = 162.73 \sim 206.96 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$, 进而可算出第 2 阶段中钢球直径为 5.5~7.1 mm。

2 实验

2.1 球磨机的改进

根据生产实践中球磨机筒体两端的磨损比筒身的磨损严重的实际情况, 进行如下分析^[8]: 粉磨永磁铁氧体常用的球磨机通常在其筒体左、右 2 个端盖内部分别等角度焊接 6~8 根钢筋, 球磨机在工作时, 筒体的圆周运动不停地将钢球向筒体左、右 2 个端盖排挤; 另一方面, 筒体左、右 2 个端盖随筒体运动时, 附筋的端盖将带动钢球向中间挤压, 这 2 种横向强烈的挤压作用是料粉被快速粉磨的不可忽视的因素, 也是筒体端盖及其上面附着钢筋的磨损比筒身及其上面附着的筋的磨损严重的重要原因。将传统筒体 2 个端盖上的条状筋(见图 1(a))设计成向上呈圆弧状凸起的形式(见图 1(b)), 凸起的最高点与圆弧一个端点的连线与水平线的夹角 α 为 7~10°^[9]。球磨机筒体直径为 1 500 mm, 长度为 1 900 mm, 并配备变频电机 1 台。



(a) 改进前

(b) 改进后

图 1 球磨机端盖上的钢筋改进前、后对比图

Fig. 1 Comparison of steel bars on end caps of mill before and after improvement

2.2 分级粉磨工艺实验

选择同一批次的永磁铁氧体预烧料, 经筛分控制

其粒径为 3.5 μm , 每次磨料质量为 1.5 t, 过程分为 2 个阶段, 采用不同的转速进行研磨。第 1 阶段: 料-球-水质量比为 1:6:1.3, 选取直径为 8~12 mm 的钢球, 材质为 Gr15 轴承钢, 其洛氏硬度 HRC 不小于 60, 添加辅料, 其中 CaCO_3 、 H_3BO_3 、 SiO_2 、 SrCO_3 、 La_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Co_3O_4 的质量分数分别为 1.1%、0.4%、0.36%、0.8%、1.2%、0.5%、0.2%。球磨机的转速设计为 30 r/min, 研磨时间为 6 h, 料浆粒径为 1.20 μm 。第 2 阶段: 1) 将在第 1 阶段中研磨好的料浆用高压气流打进另一台球磨机, 观察没有料浆从管道流进球磨机时, 再用高压气压 5 min, 这期间将会每隔 20 s 喷出一股料浆; 2) 加 150 kg 清水清洗球磨机, 开机 6 min, 再重复出料过程步骤 1), 如此清洗 3 次, 即本阶段料-球-水的质量比为 1:6:1.6, 在第 2 阶段开机前加入质量分数分别为 0、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 的分散剂三乙醇胺($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$), 相应的实验编号分别为 1#—5#。钢球选取直径为 5~7 mm 的 Gr15 轴承钢, 其洛氏硬度 HRC 不小于 60, 筒体的转速为 20 r/min, 研磨时间为 8 h。成型、烧结、磨加工及检测的工艺条件相同。

2.3 工艺对比实验

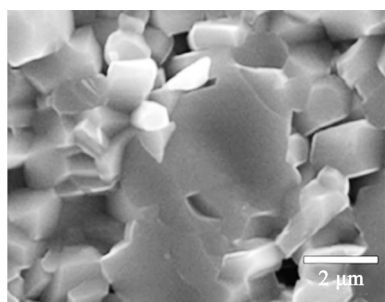
6# 实验采用传统的一级粉磨方式, 匀速转动, 整个粉磨过程中的转速均为 20 r/min, 料-球-水的质量比为 1:6:1.3, 所用钢球按行业传统钢球配比工艺进行搭配^[1], 即直径为 16~20 mm 的大球占 15%, 直径为 12~16 mm 的中球占 35%, 直径为 8~12 mm 的小球占 50%。预烧料、辅料、分散剂、平均粒度的控制等与 3# 实验中的相同。7# 实验采用直径为 5~7 mm 的钢球, 其他工艺条件与 3# 实验的相同。8# 实验采用改进的球磨机, 并参考 7# 实验中的钢球进行搭配, 参考 3# 实验按不同转速分 2 个阶段进行研磨, 进入第 2 阶段时加水 450 kg, 即各阶段中料-球-水的质量比与 3# 实验中的相同。

2.4 产品的表征及测试

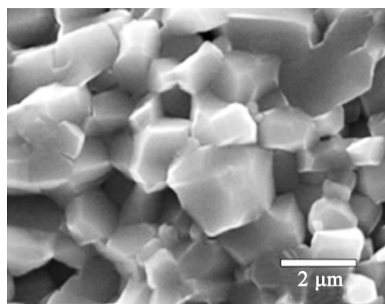
采用辽宁省丹东华宇仪器有限公司的 WLP-208 型费氏粒度仪测试成型用料浆的平均粒度及空隙度。对于不同工艺条件下制得的料浆, 在含水率相同时, 分别取质量相同的料浆, 装入带刻度的相同容器中, 同时、同速、均匀搅拌, 然后取不同的时间点, 通过并排拍照方式获取料浆沉降之后面上清水的高度, 用沉降法比较颗粒料粒度及其分布。将刚成型好的生坯用蜡液密封, 并结合排水法测其生坯密度。采用中国计量科学研究院的 NIM-2000F 型永磁铁氧体标准测量装置在相同的条件下测试其性能; 采用上海拓丰仪器科技有限公司的 TF-212 型压力试验机测试产品的承受负荷极限压强; 采用日本电子株式会社的 JSM-6490LV 型扫描电子显微镜观察产品的断面形貌。

3 结果与讨论

图2为不同粉磨工艺制备铁氧体预烧料成型磁体断面的扫描电子显微镜(SEM)图像。可以看出,采用改进工艺获得的产品晶粒细小、均匀,无异常晶粒生长现象;而常规工艺条件下获得的产品,明显出现了晶粒异常生长现象,原因是铁氧体粉料被粉碎的时间过长,粉料颗粒粒度分布不均匀^[1]。



(a) 6# 传统工艺



(b) 3# 改进工艺

图2 不同工艺制得磁体断面的扫描电子显微镜图像

Fig. 2 SEM images of ferrite sections obtained by different processes

图3所示为不同工艺条件下制得料浆的沉降数据。由图可知,3#实验中料浆沉降最快,然后依次是5#、1#、8#、7#、6#实验中的料浆。根据斯托克斯定律,即颗粒料在静止、均匀液体中缓慢沉降时,降落速度与颗粒料直径的平方成正比,在平均粒度相近时,沉降

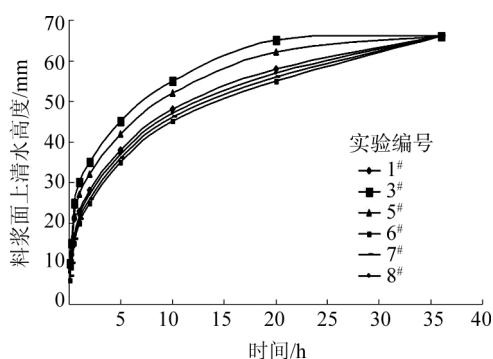


图3 不同工艺条件下制得料浆的沉降数据

Fig. 3 Relation between slurry sedimentation and time under different conditions

较快,说明其粒度分布更均匀,超细颗粒料的比例小。超细颗粒料相对较少的物料在成型时,颗粒料之间的排水通道相对更畅通,成型效率高,生坯密度大,磁体的综合合格率高。

图4所示为1#—5#实验中三乙醇胺的添加量对永磁铁氧体磁性能的影响规律。由图可知,随着分散剂三乙醇胺添加量的增大,产品剩余磁感应强度 B_r 明显增大,当其添加质量分数超过0.5%时, B_r 增大的趋势变缓;随着三乙醇胺添加量的增加,产品的矫顽力 H_{cb} 、内禀矫顽力 H_{cj} 变化不明显,但是当添加的质量分数大于0.5%时, H_{cb} 、 H_{cj} 开始减小,大于0.7%时, H_{cb} 、 H_{cj} 明显减小。当三乙醇胺添加质量分数过小时(质量分数小于0.3%),其作为分散剂的优势发挥不了。适量(质量分数为0.3%~0.7%)三乙醇胺的添加改善产品性能的原因是它在粉碎过程中,能有效防止颗粒料的聚集,提高颗粒的流动性,从而提高湿压磁场成型时产品的取向度。当三乙醇胺添加量过多(质量分数大于0.7%)时,由于三乙醇胺为碱性物质,过量添加将增大料浆的黏度,从而影响湿压磁场成型时的排水,降低成型效率,劣化产品的磁性能。

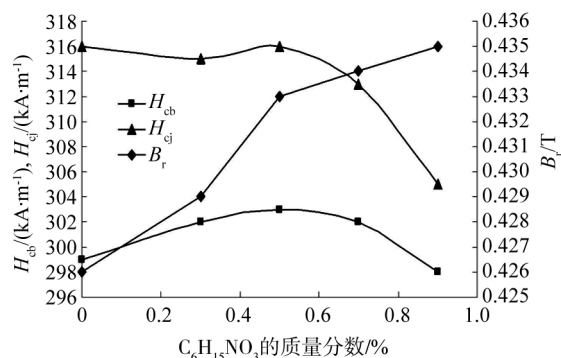


图4 三乙醇胺的添加量对永磁铁氧体性能的影响

Fig. 4 Effect of $C_6H_{15}NO_3$ addition on properties of permanent magnetic ferrite

表1所示为相关实验的工艺及磁体磁性参数的对比。6#、7#实验的对比结果表明,粉磨时直接用直径为5~7 mm的钢球的研磨效果比传统大、中、小钢球搭配的研磨效果好,产品的可成型性及磁性能也得到了较明显的改善,这说明根据实验设计的微米级永磁铁氧体预烧料粉磨用钢球直径的计算方法相对更理想。3#、8#的实验对比结果进一步验证了永磁铁氧体粉磨用钢球的直径与待磨原料的粒度紧密相关的规律:第1阶段中的粗颗粒料适用直径略大的钢球进行研磨,第2阶段中的小颗粒料的研磨适用直径略小的钢球进行研磨。3#、8#、7#实验的对比结果表明,不同阶段中不同转速的分级粉磨比整个粉碎过程中转速匀速粉磨的效果好,球磨效率提高22%,成型周期

表 1 工艺与磁性参数对比

Tab. 1 Contrast between technology and magnetic parameters

实验 编号	研磨 时间/h	空隙率	料浆平均 粒径/ μm	生坯成型 周期/s	磁体综合 合格率/%	负荷极限 压强/MPa	生坯密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	剩余磁感应 强度 B_r/T	矫顽力 $H_{cb}/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	内禀矫顽力 $H_{cj}/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	矩形比/%
3 [#]	14	0.601	0.80	93	93.8	25.68	3.15	0.433	303	316	96
6 [#]	20	0.543	0.81	155	70.0	21.25	2.98	0.412	250	278	82
7 [#]	18	0.585	0.79	102	82.6	22.86	3.05	0.425	286	295	90
8 [#]	14	0.597	0.79	95	90.2	24.75	3.11	0.430	298	308	92

缩短 8%以上,磁体的综合合格率提高 7.6%以上,产品承受负荷极限压强增大 8.3%,磁体的 B_r 、 H_{cj} 分别增大 1.17%、4.4%,成型用料浆的空隙率、生坯密度等也均得到了明显的改善。

产品承受负荷极限压强增大的原因是成型用料浆粒度分布好,超细颗粒含量少,湿压磁场成型时单畴颗粒排列更整齐,烧结后产品致密度高。

球磨效率提高的原因是当球磨机运行时,筒体内部介质的运动状态大致有 2 种:抛落状态和泻落状态^[9]。根据磨介运动形态的分析以及球磨机能量利用的有限元法分析结果^[10],球磨机的最佳转速与待磨颗粒料的粗细密切相关。当物料粒径较大时,以冲击粉碎为主,这就需要适当增大筒体的转速,使其内部研磨介质呈现以抛落为主的运动状态,如平均粒径为 3~5 μm 的永磁铁氧体预烧料主要利用这种冲击力对其进行粉碎,随着粉磨的进行,磨机中细小颗粒不断累积,当物料达到一定的细度时,如平均粒径为 1.2~1.25 μm 的永磁铁氧体预烧料,利用冲击作用不足以将物料进一步粉碎,这时物料的粉碎应以研磨方式为主,这就需要适当减小筒体的转速,使其内部的介质呈现泻落运动状态^[11-12]。

H_{cj} 明显增大的原因是不同阶段中不同转速的球磨方式使制得的料浆中超细颗粒少,单畴颗粒的比例增大。在传统的粉磨工艺中,料浆中超细颗粒较多,颗粒的各向异性减小,热扰动的影响逐渐变得明显,导致 H_{cj} 减小;另一方面,随着超细颗粒的增加,缺陷晶粒增多,这些缺陷晶粒容易导致晶格畸变,从而减小 H_{cj} 。另外,在单畴尺寸以下,单位质量的磁粉颗粒体积越大,磁矩沿磁场方向转动越容易,即越容易取向;单位质量的磁粉颗粒体积越小,如超细颗粒,越容易凝聚成团,磁矩沿磁场方向转动将变得更加困难,即越不易取向^[1,13]。由此可知,超细颗粒越少、粒度分布越好的物料在湿压磁场成型时越容易取向,随着取向度的增加,产品的 B_r 增大。

对比 3[#]、8[#]、7[#] 实验,颗粒料的空隙率增大,成型性能得到了改善,尤其是 3[#]、6[#] 实验相比,颗粒料孔隙率的改善程度更加明显。被粉碎颗粒的粒度愈小,其抗

粉碎的能力愈强,颗粒群的存在将引起流体湍流动能的额外耗散,湍流被阻尼。平均粒度相同的颗粒的空隙率越大,阻尼系数越小,这样的料浆流动性好,成型时便于取向,产品磁性能好。

不同阶段中不同转速的分级粉磨效果较好,还表现在第 2 阶段中的料-水质量比 1:1.6 略大于第 1 阶段中的 1:1.3。在第 2 阶段开始时加的水可以降低料浆的温度,预防料浆因温度过高而跑锆,同时,减小料浆的浓度与黏度,改善粉料的流动性,提高粉磨效率。永磁铁氧体料浆悬浮液为非牛顿流体,微细颗粒悬浮体的黏度比粗颗粒悬浮体的黏度大得多。随着颗粒粒度的减小,其表面电化学力增大,料浆的黏度增大,被吸附的液体总量增加,能自由活动的液体分子相对减少,同时浆料中颗粒间的距离减小,吸附在颗粒表面的有机物链相互搭接,使得颗粒间移动困难,料浆的流动性及颗粒料的分散性变差;同时,随着颗粒粒度的减小,其表面积急剧增大,颗粒表面能增大,物料颗粒会自发地聚集在一起以减小表面能,容易发生凝聚现象。不饱和键力的影响使得颗粒粘附在磨机筒体及研磨介质上,容易发生覆膜现象,凝聚及覆膜现象将阻碍细磨的进一步进行。另一方面,随着温度的升高,液体的黏度将减小,对于永磁铁氧体料浆,温度升高容易出现跑锆现象,一旦出现跑锆,材料的配方将偏移,产品磁性能劣化,料浆的 pH 明显增大。当 pH 增大至大于 10 时,浆料的黏度随着 pH 的增大呈现明显的增大趋势。pH 对浆料黏度的影响实质上反应在对颗粒表面 zeta 电位的影响上,pH 较大的料浆会使颗粒对水的饱和吸附量减小,悬浮体中出现过剩的高聚物,其长链互相缠绕严重,导致浆料的黏度增大。由此可知,在永磁铁氧体的粉磨过程中,尽可能采取各种方式冷却永磁铁氧体料浆。

4 结论

在永磁铁氧体预烧料的粉磨过程中,通过添加分散剂,结合 2 个阶段中不同速度、钢球直径、料-球-水质量比的粉磨工艺明显优于传统的粉磨工艺,与传统

(下转第 108 页)

的流动性,这是丁苯乳液的缓凝作用和较多的水的润滑作用的结果。

在相同水灰比和丁苯乳液掺量的条件下,随着硫铝酸盐水泥掺量的增加,试样的黏度增大,试样的流动性变差,这主要是由硫铝酸盐水泥的快硬、早强的特性所致,随着硫铝酸盐水泥掺量的增加,流动性劣化的幅度明显增大。

3 结论

1)复合水泥中掺入适量的丁苯乳液能在水泥浆体中形成网络结构,提高了水化浆体的致密性,在复合水泥组成一定的前提下,随着丁苯乳液掺量的增加,养护至 3、7、28 d 的试件的抗压强度均呈现先增大后减小的趋势。复合水泥中掺入的硫铝酸盐水泥可以明显增大复合水泥试件的早期强度。

2)在水灰比和丁苯乳液掺量相同的条件下,复合水泥中掺入硫铝酸盐水泥可以缩短净浆的初凝和终凝时间。当硫铝酸盐水泥掺量一定时,由于丁苯乳液中的羧基能够延缓硅酸盐水泥中熟料矿物 C_3S 、 C_2S

和 C_3A 的水化速率,因此试样的初凝和终凝时间明显延长。

3)当硫铝酸盐水泥掺量一定时,丁苯乳液的缓凝作用导致水化时间相同的复合水泥净浆的黏度逐渐减小。

参考文献 (References):

- [1] 向才旺, 郭俊才, 姚大喜. 水泥应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 1-2.
- [2] 王培铭, 许绮, STARK J. 桥面用丁苯乳液改性水泥砂浆的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(1): 1-6.
- [3] 张金喜, 金珊珊, 张江, 等. 聚合物乳液改性水泥砂浆基本性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(8): 1062-1068.
- [4] SINGH N B, RAI S. Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(2): 239-243.
- [5] 王复生, 杨海燕, 汤仕发. 复合硫铝酸盐水泥的试验研究[J]. 北京建材, 1997(6): 4-6.
- [6] 吴科如, 张雄. 土木工程材料[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [7] 王燕谋, 苏慕珍, 张量. 硫铝酸盐水泥[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999.

(上接第 104 页)

工艺相比,球磨效率提高 22%,成型周期缩短 8%以上,磁体的综合合格率提高 7.6%以上,产品承受负荷压强极限增大 8.3%,磁体的剩余磁感应强度 B_r 、内禀矫顽力 H_{cj} 分别增大 1.17%、4.4%,成型用料浆的空隙率、生坯密度、磁体的显微结构等也均得到了明显的改善。

参考文献 (References):

- [1] 林其壬. 铁氧体工艺原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 65-70.
- [2] 电子九所磁性产品信息中心. 磁性材料关键工艺技术分析研究[M]. 绵阳: 磁性材料及器件专业情报网, 1997: 17-32.
- [3] 徐文生, 朱红. 永磁铁氧体工艺技术的新进展[J]. 磁性材料及器件, 2004, 35(5): 36-38.
- [4] 周婷, 张蓉, 李雪莹, 等. 球磨工艺对钕铁氧体浆料粒径和磁性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(2): 39-41.
- [5] 王自敏, 李春明, 贺大松, 等. 一种永磁铁氧体预烧料的粉碎方法:

中国, 201210014605[P]. 2012-01-10.

- [6] 章晋叔. 选择磨机的直接功耗计算法与相对功耗计算法[J]. 金属矿山, 2001(1): 38-40.
- [7] 吴建明. Bond 粉磨功指数研究与应用的进展[J]. 有色设备, 2005(3): 1-3.
- [8] 王自敏. 高性能永磁铁氧体细粉碎工艺[J]. 中国陶瓷工业, 2009, 16(5): 36-39.
- [9] POWERLL M S, NURICK G G. A study of charge motion in rotary mills: part 2: experimental work[J]. Minerals Engineering, 1996, 9(3): 343-350.
- [10] 王文涛. 复合运动球磨机磨介运动研究及振动参数的选取[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [11] 董铭峰. 基于离散元法的球磨介质运动及参数优化[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [12] 马自荣, 黄家林, 唐文, 等. 一种永磁铁氧体料浆的球磨工艺: 中国, 200910216165.1[P]. 2009-11-06.
- [13] 王自敏. 铁氧体生产工艺技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 120-160.