

江西某砂质高岭土超导磁分离除铁增白试验研究*

谭琦^{1,2}, 马瑛³, 赵恒勤^{1,2}, 刘玉林^{1,2}, 赵毅^{1,2}, 张亮^{1,2}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006; 3. 江苏旌凯中科超导高技术有限公司, 江苏 江阴 214404)

摘要:为研究精制高岭土绿色环保制备技术,以江西某砂质高岭土为研究对象,进行了工艺矿物学和超导磁分离除铁增白试验研究。主要研究了不同磁选方式、超导磁选中磁场强度、分散剂用量、进料速度、分选介质尺寸、电磁预处理等对高岭土磁选的影响。最终确定采用“电磁预选—超导磁选”工艺,电磁磁场强度为1.1 T,超导磁场强度为4 T,且在分散剂用量为0.4%、进料速度为0.8 cm/s、使用2#钢毛的超导磁选条件下,获得Fe₂O₃含量为0.48%、白度为93.4%、产率为60.08%的精制高岭土,极大地提高了该砂质高岭土的产品附加值。

关键词:砂质高岭土;超导磁分离;除铁增白;白度

中图分类号:TD973⁺.2 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)02-0079-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.037

Study on Iron Removal and Whitening of Sandy Kaolin from Jiangxi by Superconducting Magnetic Separation

TAN Qi^{1,2}, MA Ying³, ZHAO Hengqin^{1,2}, LIU Yulin^{1,2}, ZHAO Yi^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. National Engineering Research Center for Multipurpose Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China; 3. Jiangsu Jack-zhongke Superconducting Technologies Co. Ltd, Jiangyin 214404, China)

Abstract: In order to study the green preparation technology of refined kaolin, taking sandy kaolin from Jiangxi as a research object, process mineralogy, iron removal and whitening by superconducting magnetic separation were studied. Different magnetic separation, magnetic intensity, dispersant dosage, feed rate, media size and pretreatment were mainly studied. Finally, “pre-electromagnetic separation - superconducting magnetic separation” was adopted. The refined kaolin with Fe₂O₃ content of 0.48%, whiteness of 93.4%, and yield of 60.08% was obtained, while the intensity of electromagnetic separation and superconducting magnetic separation were 1.1 T and 4 T, respectively, and under the superconducting magnetic separation condition of dispersant dosage of 0.4%, feed rate of 0.8 cm/s, and 2# steel wool. This method has greatly improved the additional value of sandy kaolin.

Key words: sandy kaolin; superconducting magnetic separation; iron removal and whitening; whiteness

* 收稿日期:2018-11-02

基金项目:国家自然科学基金(51404219);中国地质调查局地质调查项目(121201017000172206);河南省重点研发与推广专项(软科学研究)(182400410432)

作者简介:谭琦(1983-),女,山东潍坊人,副研究员,博士,主要从事非金属矿产资源综合利用研究。

前言

高岭土是一种含铝的硅酸盐矿物,与云母、石英、碳酸钙并称为四大非金属矿。高岭土具有可塑性、粘结性、分散性、吸附性、化学稳定性等多种理化特性,可应用于造纸、陶瓷、塑料、橡胶、涂料、油漆、医药、化妆品等行业^[1],是一种用途广泛的工业矿物资源^[2]。我国非煤系高岭土资源已探明储量为 35 亿 t,居世界前列,其中矿石类型以砂质高岭土为主,大约占储量的 60% 以上^[3]。

砂质高岭土属风化型或沉积型矿床,主要分布在南方亚热带多雨地区,其主要矿物组成是高岭石、石英、长石和云母等^[4,5]。砂质高岭土中,高岭石含量一般在 15% ~ 30% 左右^[6-8],粒径 > 50 μm 的石英、长石、云母等矿物的含量 ≥ 50%。我国砂质高岭土主要以开采原矿和产品粗加工为主,淘洗率较低,生产精制高岭土能力不足。决定高岭土品质和应用价值的重要指标之一是白度,尤其是用于陶瓷领域的高岭土需要具有较高的烧成白度,而影响白度的主要因素是 Fe、Ti 等染色物质^[6]。因此查明影响高岭土白度的杂质种类和赋存状态,并采用低耗环保工艺将其去除,对提高高岭土的白度和附加值具有

重要的意义。本研究通过对江西某砂质高岭土进行详细的工艺矿物学研究,查明了影响白度的杂质元素和赋存状态,并采用超导磁分离技术进行了除铁增白试验研究,确定制备精制高岭土绿色环保工艺参数及流程。

1 原矿性质与试验准备

1.1 原矿性质

试验采用的高岭土原矿取自江西某地,属花岗岩风化残积型矿床,外观呈砂土状,浅红色。高岭土原矿 X 射线衍射图谱见图 1,高岭土原矿与不同粒级产品的化学多元素分析结果见表 1。

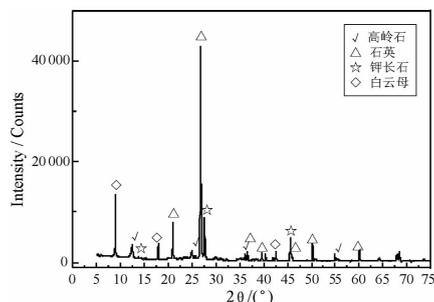


图 1 高岭土原矿 XRD 图谱
Fig. 1 XRD image of kaolin raw

表 1 不同粒级及原矿的化学成分分析

Table 1 Chemical composition of different size fraction and raw ore

粒度/mm	产率/%	LOSS/%	Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	K ₂ O/%	Na ₂ O/%	TiO ₂ /%
+1	29.16	1.37	11.56	79.56	0.83	0.03	0.28	5.52	0.58	0.08
-1+0.5	13.45	1.40	10.43	81.48	0.76	0.02	0.28	4.96	0.43	0.08
-0.5+0.28	24.07	1.69	12.51	78.00	0.92	0.03	0.31	5.71	0.55	0.09
-0.28+0.15	4.36	2.67	16.93	70.28	1.28	0.06	0.28	6.92	1.32	0.11
-0.15+0.074	8.83	2.91	20.46	65.27	1.43	0.12	0.25	6.56	2.69	0.12
-0.074+0.045	6.52	4.73	24.52	60.02	1.3	0.22	0.25	4.96	3.71	0.10
-0.045	13.61	9.95	33.33	51.23	0.97	0.15	0.18	2.2	1.73	0.10
原矿	100.00	4.26	21.42	65.01	1.35	0.10	0.17	5.73	1.75	0.08

由图 1 可见,高岭土中的主要矿物有高岭石、石英、钾长石和白云母。由表 1 可见,矿石中主要化学成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,其次为 K₂O、Na₂O 和 Fe₂O₃,TiO₂ 含量较低,因此铁是该砂质高岭土的主要着色体和杂质元素,随着粒度的减小,Fe₂O₃ 出现了先增加后减小的趋势,需进一步查清楚铁的赋存状态。

图 2、图 3 和表 2 是高岭土原矿和 -325 目产品的 MLA 面扫描和电子探针照片及分析结果。

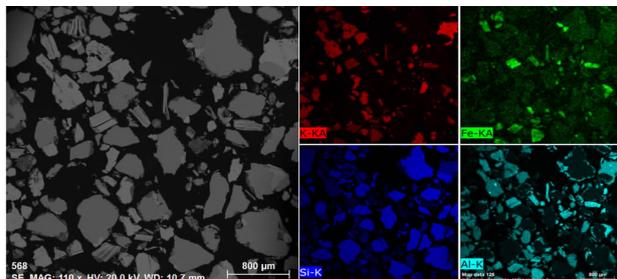


图 2 MLA 面扫描照片
Fig. 2 Surface scan images of MLA

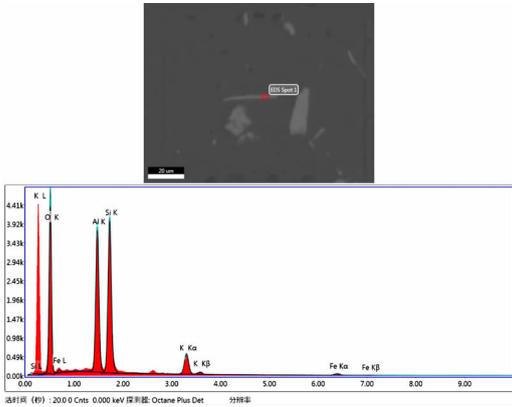


图 3 电子探针分析

Fig. 3 Analysis of electron microprobe

表 2 电子探针元素分析结果

Table 2 Element analysis of electron microprobe

元素	含量/%	原子/%	净强度	Error/%
O	43.23	58.33	2 922.12	7.08
Al	20.87	16.70	3 136.82	3.26
Si	25.77	19.81	3 461.39	3.71
K	7.52	4.15	577.64	4.07
Fe	2.62	1.01	59.32	15.78

由图 2、图 3 和表 2 可见,铁主要赋存在同时含有 K 和 Al 的白云母中。推测铁的存在方式主要有两种:一种是铁以类质同像存在于云母中;一种是在云母片间夹杂有微细粒铁矿物和金红石,他们是由于云母在风化过程中,铁从云母中析出形成铁矿物^[9],该部分含量极少,无法通过 XRD 检测出。

1.2 试剂、设备及检测方法

试验中采用的分散剂是六偏磷酸钠,化学纯。

试验中采用的超导磁选机为江苏旌凯中科超导高技术有限公司的 102 型高梯度超导磁选试验机;立环脉动高梯度磁选机为赣州金环磁选设备有限公司生产的 SLon-1000 立环脉动高梯度磁选机;浆料磁选机为佛山高明星源机械有限公司生产的 XYDC-28-13K 全自动浆料电磁磁选机。

白度按照 GB/T 5950—2008 建筑材料与非金属矿产品白度测试方法进行检测,检测设备采用的是 SC-80C 全自动色差仪;Fe₂O₃ 的测试方法采用的是原子吸收光谱法。

2 试验研究

通过工艺矿物学研究可知,试验所用砂质高岭土中的染色物质 Fe 主要赋存在白云母中,而白云母和高岭土的粒度极细,目前工业上大多采用磁选和

化学漂白工艺进行去除。在化学漂白过程中需加入硫酸、保险粉等化学药剂^[10],不仅污染环境、腐蚀设备,而且还能改变高岭土原有性质,缩小产品适用领域。随着企业环保意识增强,该工艺应用会越来越减少。而磁选是一种绿色无污染的物理分选工艺,是非金属矿除铁应用最广泛和有效的方法。本研究开展了不同磁选方式对砂质高岭土白度的影响,并选取最佳磁选方式进行条件优化试验研究,最终确定了砂质高岭土最佳磁选工艺。

2.1 砂质高岭土不同磁选方式研究

由于砂质高岭土中铁杂质含量少、磁性弱、粒度细,故应选用强磁选设备进行除铁。本试验选取了立环脉动高梯度磁选机、高梯度浆料磁选机、高梯度超导磁选机等具有较高磁场强度的磁选机对 -325 目高岭土进行除铁增白试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同磁选方式对砂质高岭土磁选的影响

Table 3 Effect of different magnetic separation on sandy kaolin separation

磁选方式	磁场强度/T	精矿产率/%	Fe ₂ O ₃ 含量/%	烧成白度/%
立环脉动高梯度磁选机	1.56	46.66	0.76	81.6
浆料磁选机	1.30	50.00	0.60	85.0
超导磁选机	3.50	59.66	0.52	88.8

由表 3 可见,立环脉动高梯度磁选机和浆料磁选机可将 Fe₂O₃ 含量分别降到 0.76% 和 0.60%,白度增加到 81.6% 和 85.0%,而精矿产率较低,并且采用的 1.56 T 和 1.3 T 是立环脉动高梯度磁选机及浆料磁选机的最大背景磁场强度,因背景磁场强度越高,激磁功率越大,设备能耗越高,单位生产成本越高,因此采用电磁磁选机的选矿成本较高;超导磁选机采用了 3.5 T 的背景磁场强度,磁选效果在这三种磁选机中是最好的,Fe₂O₃ 含量降到 0.52%,白度 88.8%,产率为 59.66%,而且超导磁选机易于在很大的分选空间获得较高的磁场强度、体积小、重量轻、能耗和运行成本低,因此采用超导磁选机是制备细粒级精制高岭土较为有效的方法。以下试验均采用超导磁选机对砂质高岭土进行除铁增白,研究各个试验条件对高岭土磁选效果的影响。

2.2 磁场强度对高岭土超导磁选效果的影响

矿物按照磁性不同,分为强磁性矿物、弱磁性矿

物和非磁性矿物。白云母是一种弱磁性矿物,比磁化系数为 $(2 \sim 4) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,而高岭土是一种非磁性矿物,比磁化系数为 $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[12]。当磁场一定时,物体比磁化系数越大,矿粒在磁场中所受的比磁力越大,因此在强磁场中弱磁性矿物易与非磁性矿物实现有效分离,且物料粒度越细要求的磁场力越大。固定进料速度为 0.8 cm/s ,2#钢毛,分散剂用量为 0.4% (样品的质量分数,下同),分别在磁场强度为 1.5 、 2.5 、 3.5 、 4.5 、 5.5 T 的条件下,进行高岭土超导磁选试验,结果如图4所示。

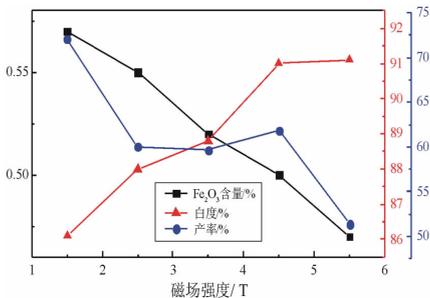


图4 不同磁场强度对高岭土磁选的影响
Fig. 4 Effect of different magnetic intensity on sandy kaolin separation

在超导磁选机中,被分选的材料受到磁力、重力、摩擦力、流体阻力、浮力等的作用,当多种作用力的矢量和朝向高梯度磁介质时,磁颗粒则向高梯度磁介质运动,到达受力平衡点后即附着在高梯度磁介质表面,进而实现与无磁性组分分离^[13]。高岭土矿浆中的弱磁性颗粒在磁场中受磁力由公式(1)表示:

$$F_m = V_p \rho \chi_m H \nabla B \quad (1)$$

式中, ρ 为颗粒密度, H 为外磁场强度, V_p 、 ρ 、 χ_m 为颗粒固有属性, ∇B 为磁场梯度。钢毛为铁磁体,其在背景磁场为 1 T 左右时即可达到磁饱和。当钢毛达到磁饱和后,磁场强度继续升高对钢毛周边的磁场梯度理论上无影响。因此,弱磁性颗粒受磁力随磁场强度 H 增大而增加,从而增大钢毛捕捉颗粒概率,提高杂质去除率^[14]。

由图4可见,随着磁场强度的增加, Fe_2O_3 含量和白度均出现了相反的变化趋势,但总体上精矿中 Fe_2O_3 含量随着磁场强度的增大而下降,这表明增加磁场强度能提高铁矿物的去除能力。而磁场强度的增加或多或少会影响产率的变化,当磁场强度由 2.5 T 升高到 4.5 T 时,产率出现轻微波动,这说明

磁介质表面吸附的颗粒质量基本一致,只是随着磁场强度的增加吸附的颗粒中弱磁性矿物所占比重增多,而当磁场强度继续增加到 5.5 T 时,磁介质捕捉能力更强,会捕捉到部分非磁性矿物,造成产率的降低。综合考虑,最终选择最佳磁场强度为 4.5 T 。

2.3 分散剂用量对高岭土超导磁选效果的影响

由于高岭土粒度较细,为取得更好的分选效果,会在矿浆中加入一定量的分散剂,使高岭土颗粒在矿浆中分散均匀。固定 18% 的料浆质量浓度, 4.5 T 的磁场强度,2#钢毛,进料速度为 0.8 cm/s ,分别在分散剂用量为 0.1% 、 0.2% 、 0.3% 和 0.4% 的条件下进行超导磁选试验,结果如图5所示。

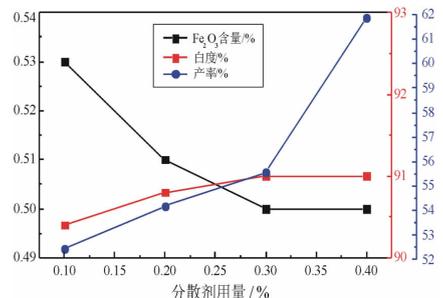


图5 不同分散剂用量对高岭土磁选的影响
Fig. 5 Effect of different dispersant dosage on sandy kaolin separation

由图5可见,随着分散剂用量的增加, Fe_2O_3 含量先降低后升高,产率逐渐提高。分散剂的使用可改善矿浆的分散性,减弱磁选过程的机械夹杂与包裹,在细粒级矿物分选过程中十分必要,但过量的分散剂会影响矿浆的流动性和分散性,并且增加成本。综合考虑,最终选择最佳的分散剂用量为 0.4% 。

2.4 进料速度对高岭土超导磁选效果的影响

固定2#钢毛,分散剂用量为 0.4% ,磁场强度为 4.5 T ,分别在进料速度为 0.6 、 0.8 、 1.0 、 1.5 cm/s 的条件下,进行高岭土超导磁选,结果如图6所示。

由图6可见,随着进料速度的增加, Fe_2O_3 含量也是逐渐增加的,说明进料速度过快,影响磁选介质对铁矿物的捕收能力,以及矿物在分选腔中的停留时间,因此精矿产率就会相应提高,但是进料速度过慢会影响设备的处理能力。综合考虑,最终选择最佳进料速度为 0.8 cm/s 。

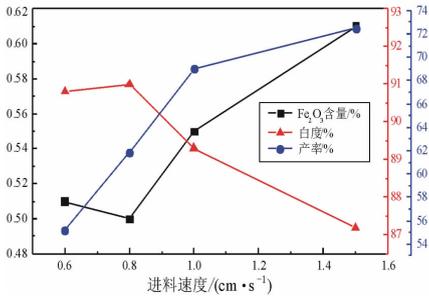


图 6 不同进料速度对高岭土磁选的影响

Fig. 6 Effect of different feed rate on sandy kaolin separation

2.5 分选介质尺寸对高岭土超导磁选效果的影响

钢毛是一种很微细(一般为十几微米至几十微米)的不锈钢磁性材料,有矩形断面和圆形断面两种。钢毛置于均匀的背景磁场中,在钢毛周围产生很高的磁场梯度,但磁场力的作用范围很小^[12]。因此,钢毛只适合分选磁性颗粒较细的矿物,本试验采用的矩形钢毛。固定分散剂用量为 0.4%,磁场强度为 4.5 T,进料速度为 0.8 cm/s,分别在 1#钢毛、2#钢毛和 3#钢毛的条件下,进行高岭土超导磁选,结果如表 4 所示。钢毛型号尺寸如表 5 所示,经磨具压实,按 8% 体积填充充分选腔。

表 4 不同介质种类对高岭土磁选的影响

Table 4 Effect of different media size on sandy kaolin separation

介质种类	Fe ₂ O ₃ 含量/%	白度/%	产率/%
1#钢毛	0.60	87.1	64.29
2#钢毛	0.50	91.0	61.85
3#钢毛	0.57	87.6	68.09

表 5 钢毛型号尺寸

Table 5 Size of different steel wool

型号	宽/mm	厚/mm
1#	0.10	0.07
2#	0.12	0.10
3#	0.13	0.27

由表 4 可见,钢毛类型对高岭土磁选有一定的影响,可能是受到钢毛有效通道堵塞,非磁性颗粒夹杂的影响。2#钢毛的磁选效果最好,精矿中 Fe₂O₃ 能降到 0.50%,白度提高到 91.0%,产率为 61.85%。

2.6 电磁预处理对高岭土超导磁选效果的影响

为消除高岭土中大颗粒磁性矿物对超导磁选机

中介质有效通道的堵塞,进一步提高产品白度,对 -325 目高岭土先经 1.1 T 浆料磁选机磁选预处理,电磁精矿再进入 4 T 超导磁选机进行二次磁选。超导磁选条件为:进料速度为 0.8 cm/s,分散剂用量为 0.4%,2#钢毛。试验流程如图 7 所示,所得精矿结果与未经预处理结果比较如表 6 所示。

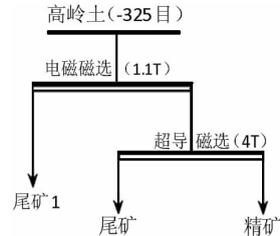


图 7 高岭土电磁磁选-超导磁选工艺流程

Fig. 7 Electromagnetic separation - superconducting magnetic separation process flowsheet

表 6 预处理对高岭土磁选的影响

Table 6 Effect of pretreatment on sandy kaolin separation

磁选流程	Fe ₂ O ₃ 含量/%	白度/%	精矿产率/%
超导磁选(4.5 T)	0.50	91.0	61.85
电磁预选(1.1 T) - 超导磁选(4 T)	0.48	93.4	60.08

由表 6 可见,采用电磁预选-超导磁选工艺流程,所得精矿 Fe₂O₃ 含量低于经一次 4.5 T 超导磁选后的精矿,且白度由 91% 提高至 93.4%,产率相差不大,因此电磁预选-超导磁选工艺要优于单一超导磁选工艺。主要原因有两个:一是因为磁性颗粒在外磁场中磁化,相互吸引形成磁团聚现象。磁团内部除磁性颗粒外,还包裹着高岭土颗粒,高岭土颗粒随磁团被分离出来,因而降低了产品产量。磁团产生速率与外界磁场强度有关,其随磁场强度增大而增加。若矿浆未经预处理易造成 4.5 T 强磁处理过程中磁颗粒负荷过高,产生大量磁团,造成高岭土流失严重。当采取分段处理工艺时,在 1.1 T 预处理过程中虽产生磁团聚现象,但磁团数量相对较少,因而高岭土损失较少。预选阶段去除了大量杂质,减轻了强磁处理过程中磁颗粒负荷,降低了磁团数量,减少了高岭土损失;二是因为钢毛表面吸附大量磁颗粒,且随磁场强度增加而增多。若直接进行强磁处理,易造成大量磁颗粒吸附在钢毛上堵塞通路,形成物理截留,影响高岭土颗粒通过。若先经过弱磁预处理,会减轻下一步强磁处理的杂质负荷,使得在强磁处理过程中高岭土颗粒能顺利通过钢毛。因此,分段磁选有利于高岭土降铁增白^[14]。

3 结论

(1)以 -325 目江西某砂质高岭土为研究对象,分别采用三种湿式强磁选机对其进行磁选除铁制备精制高岭土。结果表明,超导磁选机磁场强度高、体积小、重量轻、能耗和运行成本低,是制备精制高岭土最为有效的磁选设备。

(2)磁场强度、分散剂用量、进料速度、分选介质尺寸及预处理均影响高岭土的磁选效果。在分散剂用量为 0.4%,进料速度为 0.8 cm/s,使用 2#钢毛的条件下,先经 1.1 T 弱磁预处理,再经 4 T 强磁处理后,高岭土精矿中 Fe₂O₃ 含量为 0.48%,白度为 93.4%,产率为 60.08%,取得了理想的分选指标。

参考文献:

[1] 卢党军. 我国砂质高岭土资源特点与开发利用现状[J]. 非金属矿, 2009, 32(3): 52-54.

[2] 夏光华, 李晓鸣, 赵晓东. 北海高岭土矿物特征及铁赋存状态的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(2): 289-293.

[3] 尤振根. 国内外高岭土资源和市场现状及展望[J]. 非金属矿, 2005, 28(S1): 1-8.

[4] 罗正杰. 北海高岭土与云母分选技术研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007(3): 41-43.

[5] 曹健, 陈小罗, 陈铮, 等. 海南省某砂质高岭土选矿试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2013(2): 44-49.

[6] 熊涛, 黄会春, 谢美芳, 等. 某砂质高岭土矿 SLon 浆料机除铁提纯试验研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(6): 76-78.

[7] 黄会春, 熊涛, 张宏亮, 等. 江西某高岭土除铁提纯试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(2): 76-78.

[8] 杨启帆, 于阳辉, 安卫东, 等. 江西某低品位高岭土矿综合利用技术研究[J]. 矿产保护与利用, 2017(6): 57-61.

[9] 罗正杰. 北海高岭土与云母分选技术研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2007(3): 41-43.

[10] 林琦玮. 高岭土漂白除铁生产中酸性废水回收利用方法浅探[J]. 科技展望, 2016(1): 62.

[11] 辛延龄, 刘凤春, 刘家第. 风化高岭土的利用[J]. 矿产综合利用, 2002(5): 50-52.

[12] 魏德州. 固体物料分选学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 81-93.

[13] 陈丽昆, 李亦然, 王军, 等. 超导磁分离工艺替代化学漂白用于高岭土除杂增白的可行性研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(3): 57-59.

[14] 李亦然, 蒋浩, 张为民, 等. 超导磁分离技术用于信阳高岭土提纯除杂研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 212-217.

引用格式: 谭琦, 马瑛, 赵恒勤, 等. 江西某砂质高岭土超导磁分离除铁增白试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 79-84.

TAN Qi, MA Ying, ZHAO Hengqin, et al. Study on iron removal and whitening of sandy kaolin from Jiangxi by superconducting magnetic separation[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(2): 79-84.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第 78 页)

[9] 孟庆森, 石宗利, 王顺花. 凹凸棒土表面改性及其在废水处理中的应用[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(5): 996-999.

[10] 吴国华, 丁文江, 罗吉荣. 凹凸棒粘土对消失模涂料流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(1): 81-85.

[11] A Neaman, A Singer. Rheological properties of aqueous suspensions of palygorskite[J]. Soil science society of America, 2000, 64(1): 427-436.

引用格式: 姚义俊, 齐贵君, 刘斌. 凹凸棒石粉末提纯及浆料流变性能的研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 75-78, 84.

YAO Yijun, QI Guijun, LIU Bin. Study on purification of attapulgite powder and rheological properties of slurry[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(2): 75-78, 84.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn