

文章编号: 0254-5357(2012)04-0621-06

## 邻菲罗啉光度法测定高岭土中可溶铁和非可溶铁

傅翠梨<sup>1</sup>, 陈文瑞<sup>2</sup>, 郭阿明<sup>2</sup>, 李锦堂<sup>1</sup>, 罗学涛<sup>1</sup>

(1. 厦门大学材料学院, 福建 厦门 361005; 2. 龙岩高岭土有限公司, 福建 龙岩 364000)

**摘要:** 高岭土中铁的赋存状态和含量影响其白度和增白效果, 因此快速准确地测定高岭土中不同种类的铁含量具有实际应用意义。高岭土中自由铁和结构铁定量分析困难, 为此本文将高岭土中的铁分为可溶铁和非可溶铁两类。高岭土经盐酸酸溶处理后溶液中的铁含量为可溶铁含量, 经氢氧化钠碱熔处理后溶液中的铁含量为总铁含量, 非可溶铁含量由总铁含量减去可溶铁含量计算得出。采用邻菲罗啉光度法测定溶液中的铁含量, 该方法的相对标准偏差小于 5%, 加样回收率范围在 95% ~ 105%, 最低检测含量为 1.06  $\mu\text{g/g}$ 。高岭土中的其他元素对铁的测定均没有干扰。所测得的可溶铁为大部分自由铁和少数结构铁。通过对高岭土中的可溶铁进行定量分析, 可得知漂白工艺中可除去的最大铁含量。

**关键词:** 高岭土; 可溶铁; 邻菲罗啉光度法; 漂白工艺

中图分类号: TD873.2; O614.811; O657.31 文献标识码: A

## Determination of Soluble and Insoluble Iron in Kaolin by Phenanthroline Spectrophotometry

FU Cui-li<sup>1</sup>, CHEN Wen-rui<sup>2</sup>, GUO A-ming<sup>2</sup>, LI Jin-tang<sup>1</sup>, LUO Xue-tao<sup>1</sup>

(1. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Longyan Kaolin Clay Co., LTD, Longyan 364000, China)

**Abstract:** The whiteness and whitening effect of kaolin are influenced by the status and content of iron in kaolin. It is meaningful in practical application to determine the contents of different species of iron in kaolin rapidly and accurately. However, it is difficult to analyze the contents of free and structural iron in kaolin. In this article, iron in kaolin is divided into soluble and insoluble iron. The soluble iron in kaolin can be obtained by leaching with hydrochloric acid, while the total iron is achieved by calcining with sodium hydroxide. The content of insoluble iron is equal to the content of total iron minus soluble iron. The phenanthroline spectrophotometry method is used to determine the content of iron. The relative standard deviation of this method is less than 5%, and sample recoveries range from 95% to 105%. The detection limit of iron is 1.06  $\mu\text{g/g}$ . Other elements in kaolin did not interfere with iron determination by this method. Soluble iron was almost free iron with little structural iron in kaolin. The maximum content of removal iron for the whitening technique can be estimated by quantitative analysis of soluble iron in kaolin.

**Key words:** kaolin; soluble iron; Phenanthroline Spectrophotometry; bleach pretreatment

收稿日期: 2011-10-24; 接受日期: 2012-04-27

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2007J0012)

作者简介: 傅翠梨, 硕士研究生, 从事矿物测试分析研究。E-mail: phoebe2948@sina.com。

通讯作者: 罗学涛, 教授、博士生导师, 从事高岭土的深加工、冶金法多晶硅冶金提纯研究。E-mail: xuetao@xmu.edu.cn。

高岭土是一种以高岭石族矿物为主要成分的黏土矿物原料<sup>[1]</sup>。因其本身具有的片状结构、色白、高可塑性及煅烧加工后的绝缘性、遮光性等优良性能,被广泛应用于陶瓷、造纸、耐火材料、橡胶、塑料、油漆等多个行业中<sup>[2-6]</sup>。无论是陶瓷工业还是其他工业部门,对高岭土的白度都有一定的要求<sup>[7-8]</sup>。影响高岭土白度的主要因素之一是铁杂质<sup>[9]</sup>,它会使高岭土呈现不同程度的灰色、绿色、褐色、粉红色等,从而导致高岭土的白度降低。高岭土中的铁杂质主要有结构铁和自由铁两种形式。结构铁存在于高岭石和副矿(如白云母)中<sup>[10]</sup>,自由铁以独立的铁矿物形式存在<sup>[11]</sup>。快速准确地测定高岭土中不同存在形式的铁含量,对于指导生产和其他科学研究极为重要。

目前高岭土中铁含量的测定方法有电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)<sup>[12]</sup>、磺基水杨酸比色法<sup>[13]</sup>、EDTA络合滴定法<sup>[13]</sup>和邻菲罗啉法<sup>[14-15]</sup>等。而关于高岭土中结构铁和自由铁的定量分析,则少有报道。王锦荣等<sup>[16]</sup>采用关系式 $w = x_1 w_1 + x_2 w_2$ (式中 $x_1$ 、 $x_2$ 分别为高岭土中高岭石和白云母的含量, $w_1$ 、 $w_2$ 分别为高岭石和白云母中铁的含量)计算了高岭土中结构铁的含量。 $x_1$ 和 $x_2$ 通过X射线物相定量分析的K值法算出, $w_1$ 和 $w_2$ 由电子探针仪测定。该方法操作简便,但只有当高岭土中各矿物清晰可辨时才适用。由于X射线物相定量分析的精确度低,并受到电子探针仪本身探测极限的限制,所得结果误差很大。李顺生等<sup>[17]</sup>采用草酸和五羟基乙酸内酯混合物为还原-络合剂,将高岭土矿中自由铁去除。测得剩余沉淀物中铁的含量,即高岭土中结构铁的含量。但并没有提供“自由铁被完全去除,结构铁没有部分流失”的科学依据,所采用的还原-络合剂能否去除硅酸铁,有待进一步研究。

高岭土中自由铁的种类多样,难以找到一种方法,将高岭土中的自由铁全部溶出,同时不破坏其中的结构铁。若对高岭土中每一种含铁矿物进行定量分析,则工作量大,分析难度高,而且分析意义不大。为了便于对高岭土中不同种类的铁进行定量分析,本文将高岭土中的铁分为两类:一类是可溶铁,指能溶于盐酸的铁;另一类是非可溶铁,指难溶于盐酸的铁。本文分别对高岭土进行盐酸酸溶和氢氧化钠碱熔处理,然后参考工业硅中铁的分析方法<sup>[18]</sup>,采用邻菲罗啉光度法测定高岭土中的可溶铁和总铁含量,非可溶铁含量由总铁含量减去可溶铁含量计算得出。并探讨高岭土中自由铁、结构铁与可溶铁、非

可溶铁的关系,指出了高岭土中可溶铁的定量分析对漂白工艺的指导意义。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器及工作条件

752型紫外-可见分光光度计(上海光谱仪器有限公司):配有比色皿架,1 cm和3 cm石英比色皿。紫外-可见分光光度计的工作参数为仪器全自动调谐优化给出,满足仪器安装标准要求的灵敏度、稳定性等各项指标。本实验所采用的工作波长为510 nm,采用3 cm石英比色皿。

DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器(郑州长城科工贸有限公司)。

KSS-1700℃高温节能电炉(洛阳市永泰试验电炉厂)。

Xpert PRO X射线衍射分析仪(荷兰Panalytical分析仪器):辐射源为Cu K $\alpha$ 射线,波长 $\lambda = 0.15406$  nm,工作电流30 mA,工作电压40 kV,扫描步长 $0.0167^\circ$ ,每步扫描时间10 s, $2\theta = 5^\circ \sim 70^\circ$ 。

WSB-3数显白度仪(上海昕瑞仪器仪表有限公司)。

### 1.2 主要试剂

铁标准储存溶液(0.4 mg/mL):称取0.702 g六水合硫酸亚铁铵置于烧杯中,加入10 mL浓HCl,再加入约100 mL水,溶解后置于250 mL容量瓶中,用水稀释至刻度,混匀。

铁标准溶液(5  $\mu$ g/mL):移取12.5 mL铁标准储存溶液于1000 mL容量瓶中,用水稀释至刻度,混匀。

盐酸羟胺(10 g/L)。

邻菲罗啉(2.5 g/L):称取0.625 g邻菲罗啉置于烧杯中,加入1 mL浓HCl,再加入约150 mL水,溶解后用水稀释至250 mL,混匀。

乙酸-乙酸钠缓冲溶液:取136 g乙酸钠(NaAc $\cdot$ 3H $_2$ O)置于烧杯中,加入250 mL水,溶解后置于500 mL容量瓶中,加入120 mL冰乙酸( $\rho = 1.05$  g/mL),用水稀释至刻度,混匀。

混合显色溶液:移取1单位体积盐酸羟胺溶液,1单位体积邻菲罗啉溶液,2单位体积乙酸-乙酸钠缓冲溶液,混匀。一周内使用。

NaOH,浓HCl,15%(体积分数,下同)的HCl,Al $_2$ (SO $_4$ ) $_3$  $\cdot$ 18H $_2$ O,Na $_2$ SiO $_3$  $\cdot$ 9H $_2$ O,NaCl,NH $_4$ Cl,KCl,CaCl $_2$ ,MgCl $_2$  $\cdot$ 6H $_2$ O,Ti(SO $_4$ ) $_2$ 。

所用试剂均为分析纯以上,实验用水为去离子水。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 高岭土的盐酸酸溶处理

将 20 mL 15% 的 HCl 倒入 50 mL 三口烧瓶中,在恒温水浴中预热到 80℃,恒温。准确称取 1.000 g 高岭土试样,迅速倒入 HCl 溶液中,搅拌反应 2 h。将三口烧瓶中的液固混合物冷却、过滤、洗涤。将滤液移入 250 mL 容量瓶内,用水稀释至刻度,摇匀。作为 A 液供高岭土中可溶铁含量测定用。

#### 1.3.2 高岭土的氢氧化钠碱熔处理

准确称取 0.500 g 高岭土试样,置于用 2 g NaOH 铺好的银坩锅中,加数滴无水乙醇使试样润湿,再在试样上盖一层 2.5 g NaOH,加坩锅盖。将坩锅置于高温节能电炉中,逐渐升温至 650℃,保温 10 min,取出冷却。将坩锅外部擦净,连盖一同放入 250 mL 烧杯中,以沸水浸取熔块,用热水及淀粉洗净坩锅及坩锅盖,在不断搅拌下一次加入 25 mL 的浓 HCl 使沉淀全部溶解,冷至室温,将溶液移入 250 mL 容量瓶中,用水稀释至刻度,摇匀。作为 B 液供高岭土中总铁含量测定用。

#### 1.3.3 铁标准工作曲线的绘制

移取 0、1、3、5、10、15 mL 的 5 μg/mL 铁标准溶液分别置于一组 50 mL 容量瓶中,用水稀释至约 15 mL。加入 10 mL 混合显色液,用水稀释至刻度,混匀。放置 15 min 后,将上述溶液移入 3 cm 吸收皿中,于分光光度计波长 510 nm 处测量其吸光度。以铁的质量为横坐标  $x$ ,测得吸光度减去空白溶液的吸光度为纵坐标  $y$ ,绘制铁标准工作曲线。

#### 1.3.4 高岭土中铁含量的测定

移取一定量的 A 液或 B 液(移取量视样品浓度而定),置于 50 mL 容量瓶中,用水稀释至约 15 mL。加入 10 mL 混合显色液,用水稀释至刻度,混匀。放置 15 min 后,将上述溶液移入 3 cm 吸收皿中,于分光光度计波长 510 nm 处测量其吸光度。每次分析均随同试样进行空白试验。空白试验与试样测定采用完全相同的试剂和分析步骤,并进行平行操作。测得的吸光度,记为空白吸光度。根据吸光度,利用铁标准工作曲线的斜率按式(1)可计算出高岭土中的铁含量。

$$w(\text{Fe}) = \frac{(A - A_0) \times V}{k \times m \times V_1} \quad (1)$$

式中, $A$ —样品溶液吸光度; $A_0$ —空白吸光度; $V$ —样品溶液总体积(mL); $V_1$ —移取样品溶液体积(mL); $k$ —铁标准工作曲线斜率( $\mu\text{g}^{-1}$ ); $m$ —高岭土的质量(g)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铁标准工作曲线的拟合

不同铁含量标准溶液的吸光度列于表 1。求得回归方程为  $y = 0.01179x$ ,该标准工作曲线的相关系数  $R$  值达到 0.99979,线性拟合度很好。其表观摩尔吸光系数为  $1.097 \times 10^4$ ,与文献[19]中所述的邻菲罗啉铁(II)络合物( $\lambda_{\text{max}} = 512 \text{ nm}$ )的  $\varepsilon = 1.1 \times 10^4$  相差不多,所得到的铁标准工作曲线可靠度很高。

表 1 不同铁含量标准溶液对应的吸光度

Table 1 Absorbance of standard solution with different iron content

$m(\text{Fe})/\mu\text{g}$	A	$m(\text{Fe})/\mu\text{g}$	A
0	0.040	25	0.333
5	0.097	50	0.642
15	0.216	75	0.917

### 2.2 方法精密度和准确度分析

分别按照 1.3.1 节和 1.3.2 节中的高岭土处理方法,对龙岩铁染高岭土进行 6 次盐酸酸溶处理和 6 次氢氧化钠碱熔处理,并按照 1.3.4 节中的测试方法进行铁含量的测定,结果列于表 2。从表中可以看出,相对标准偏差 RSD 均小于 5%,方法的精确度是理想的。可以看出,该龙岩铁染高岭土中的铁以非可溶铁为主,可溶铁只占了 22% 左右。

表 2 方法精密度测定

Table 2 Analytical results of precision measurement

铁种类	$V/\text{mL}$	$V_1/\text{mL}$	$w(\text{Fe})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$			RSD/%	
			分次测定值	平均值	标准偏差		
可溶铁	100	1	1.65	1.55	1.61	0.0531	3.300
			1.67	1.54	1.63		
总铁	250	2.5	7.31	7.29	7.28	0.1041	1.434
			7.36	7.06	7.24		

往龙岩铁染高岭土分别加入 10、30、50 mg/g 的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,分别按照 1.3.1 节和 1.3.2 节中的高岭土处理方法对其进行 3 次盐酸酸溶处理和氢氧化钠碱熔处理,并按照 1.3.4 节中的测试方法进行铁含量的测定,结果列于表 3(表中本底值为加  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  前高岭土的铁含量,加入量是由加入的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  量换算而成的铁含量)。从表中可以看出,回收率在 95% ~ 105% 之间,平均值达到 97% 以上,较为理想。加入的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  是作为添加物机械混入的铁的化合物,以独立的氧化铁形式存在于高岭土中<sup>[20]</sup>。高岭土盐酸酸溶处理使加入的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  溶出,因此可溶铁的回

收率在96%以上。这也说明了盐酸酸溶处理过程中,所采用的盐酸浓度、酸溶温度和时间足够使高岭土中22 mg/g的可溶铁溶出。

### 2.3 共存元素的干扰

高岭土的主要成分为高岭石,而高岭石的晶体化学式为 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ <sup>[21]</sup>。因此高岭土的理想成分为Al占209.0 mg/g, Si占217.6 mg/g。2.2节中测得Fe占7.26 mg/g,按此换算,Al与Fe的质量比约为28.79, Si与Fe的质量比约为29.97。高岭土氢氧化钠碱熔处理得到的B液中,若高岭土按理想成分计算,则Na与Al的质量比约为24.75, Cl与Na的质量比约为4.11。取质量比 $w(Al) : w(Fe) = 30 : \mu(Si) : w(Fe) = 30 : \mu(Na) : w(Al) = 25 : \mu(Cl) : w(Na) = 4$ ,则所配制的B液中 $w(Fe) : w(Al) : w(Si) : w(Na) : w(Cl) = 1 : 30 : 30 : 750 : 3000$ 。因此接下来探讨相当于Fe含量3000倍的Cl, 750倍的Na, 30倍的Si, 30倍的Al对铁测定的影响。由于高岭土中还含有少量的K、Ti、Mg、Ca等元素,而K含量一般较多。因此还探讨了相当于Fe含量3倍的K和与Fe等量的Ti、Mg、Ca对铁测定的干扰。

称取不同质量的下列物质,分别置于8个烧杯中,加水溶解后置于一定规格的容量瓶中。加入铁标准储存溶液,用水稀释至刻度,混匀。移取一定量的上述溶液,移取量使所取溶液含有50 μg的铁,按照1.3.4节中的测试方法测定吸光度,然后按式(2)换算成铁的质量,结果列于表4。

$$m(Fe) = \frac{A - A_0}{k} \quad (2)$$

式中, A—样品溶液吸光度;  $A_0$ —空白吸光度; k—铁标准工作曲线斜率( $\mu g^{-1}$ )。

从表4可以看出,当测定相对误差在 $\pm 3\%$ 时,相当于Fe含量3000倍的 $Cl^-$ 、750倍的 $Na^+$ 、30倍的 $Al^{3+}$ 、3倍的 $K^+$ 、1倍的 $Ti^{4+}$ 、1倍的 $Mg^{2+}$ 、1倍的 $Ca^{2+}$ ,均不干扰测定。而相当于Fe含量30倍的Si元素,由于加入的 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 会水解生成NaOH和硅酸,溶液呈碱性,引起 $Fe^{3+}$ 水解生成 $Fe(OH)_3$ 。虽然测定时加入了盐酸羟胺和乙酸-乙酸钠缓冲溶液,但 $Fe(OH)_3$ 的稳定性比 $Fe(OH)_2$ 强<sup>[22]</sup>,因此盐酸羟胺难以将 $Fe(OH)_3$ 还原成 $Fe(OH)_2$ 。 $Fe(OH)_3$ 的存在破坏了 $Fe^{2+}$ 与邻菲罗啉生成的橙红色络合物,使溶液颜色减弱<sup>[23]</sup>,因此测得的铁质量偏低。

表3 方法准确度

Table 3 Analytical results of accuracy measurement

铁种类	$w(Fe) / (mg \cdot g^{-1})$		V/ mL	V <sub>1</sub> / mL	回收率/%			
	本底值	加入量			分次测定值		平均值	
可溶铁	1.61	6.99	250	1	94.51	100.39	99.36	98.09
		13.99	500	1	96.62	101.23	96.77	98.21
		20.98	1000	1	95.57	98.95	96.43	96.98
总铁	7.26	6.99	250	1	102.03	101.79	102.19	102.00
		13.99	500	1	99.82	103.92	102.84	102.19
		20.98	500	1	101.08	95.91	96.45	97.81

表4 共存元素的干扰测定结果

Table 4 Interference measurement of coexisting elements

样品溶液编号	加入物质	对应元素	对应元素与铁元素的质量比	铁质量 $m(Fe) / \mu g$	误差/%
1	$NH_4Cl$	Cl	3000 : 1	49.746	-0.508
2	NaCl	Na	750 : 1	49.830	-0.340
3	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	Al	30 : 1	51.103	2.206
4	$Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$	Si	30 : 1	39.228	-21.544
5	KCl	K	3 : 1	50.339	0.678
6	$Ti(SO_4)_2$	Ti	1 : 1	50.000	0.000
7	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Mg	1 : 1	49.576	-0.848
8	$CaCl_2$	Ca	1 : 1	50.000	0.000

除4#样品溶液外,上述溶液的pH值均小于1。在高岭土铁含量的测定中,所采用的A液和B液,  $pH < 1$ 。在4#样品溶液中加入HCl,将其pH值调为1以下。测得铁质量为50.137 μg,相对误差为0.274%,因此可以排除Si的干扰。

### 2.4 方法检测限

752型紫外-可见分光光度计的吸光度读数精确到小数点后三位,因此 $(A - A_0)$ 的最小值为0.001。考虑到测试时,最后一位读数会上下波动,因此取 $(A - A_0)$ 的最小值为0.01。假设样品溶液体积最小为50 mL,高岭土质量为1 g,移取样品溶液体积最大为40 mL,按式(1)可得到该方法的最低检测含量为1.06 μg/g。

## 3 高岭土中可溶铁、非可溶铁与自由铁、结构铁的关系

对酸溶前后的龙岩铁染高岭土和加入50 mg/g  $Fe_2O_3$ 的龙岩铁染高岭土进行X射线衍射(XRD)分析,结果如图1所示。从图1可以看出,龙岩铁染高岭土的主要物相为高岭石、白云母和石英。酸溶后的高岭土衍射峰位置几乎未变,说明盐酸酸溶处理不会使高岭土中高岭石、白云母和石英的晶格结构

遭受明显破坏。加入 50 mg/g  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的龙岩铁染高岭土有赤铁矿相,但酸溶后赤铁矿相消失,说明加入的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为可溶铁。

高岭土中自由铁以独立的铁矿物形式存在,常见的含铁矿物如褐铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )、赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、菱铁矿 ( $\text{FeCO}_3$ ) 可溶于盐酸中,少数含铁矿物如黄铁矿 ( $\text{FeS}_2$ ) 难溶于盐酸。高岭土中的含铁矿物以三价氧化铁最为普遍<sup>[24]</sup>,因此大部分的自由铁可溶于盐酸中。结构铁主要是指置换了高岭石(或副矿)八面体中的铝而进入其晶格结构的铁<sup>[25]</sup>。由于盐酸酸溶处理不会明显破坏高岭石和白云母的晶格结构,因此酸溶对存在于晶格中的结构铁影响甚微,体现在 XRD 图中也没有明显的变化。所以,本方法测得的可溶铁为可溶于盐酸的大部分自由铁和少数因晶格破坏而溶于盐酸的结构铁,非可溶铁为绝大多数结构铁和少数难溶于酸的自由铁。

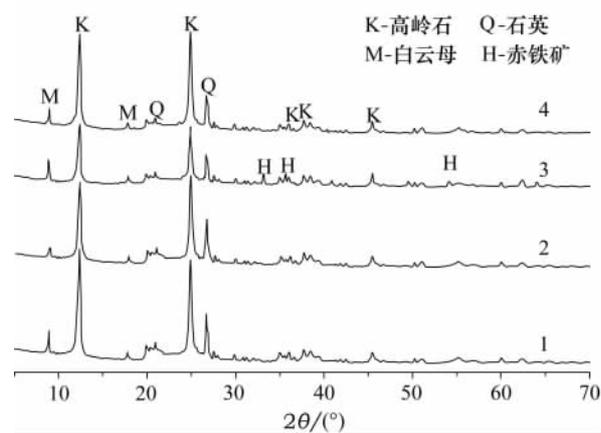


图1 高岭土的 XRD 分析

Fig. 1 XRD pattern of kaolin

1—龙岩铁染高岭土酸溶前; 2—龙岩铁染高岭土的酸溶后; 3—加入 50 mg/g  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的龙岩铁染高岭土酸溶前; 4—加入 50 mg/g  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的龙岩铁染高岭土酸溶后。

#### 4 测定高岭土中可溶铁的意义

选用保险粉为漂白剂,草酸为络合剂,对漳州铁染高岭土进行 3 次漂白实验<sup>[26]</sup>。测试原样及漂白后样品的可溶铁、总铁含量和白度,结果如图 2 所示,其中非可溶铁含量为总铁含量减去可溶铁含量。

从图 2 可以看出,随着漂白次数增加,高岭土的白度呈上升趋势,总铁含量和可溶铁含量均呈下降趋势,而非可溶铁含量基本保持不变。可见,高岭土的白度值与可溶铁含量明显负相关。漂白只能除去

高岭土中的可溶铁,对非可溶铁的含量没有影响。因此,可以通过测定高岭土中的可溶铁含量,得知高岭土漂白过程中可除去的最大铁含量,从而对现有的高岭土漂白工艺进行理论指导。

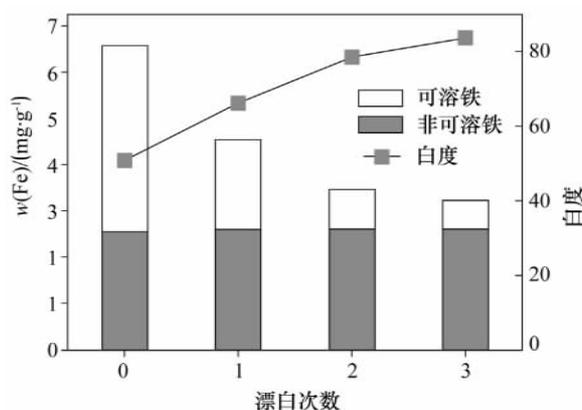


图2 漂白对高岭土中铁的影响

Fig. 2 Effect of iron in kaolin by bleaching

#### 5 结语

将高岭土中的铁分为可溶铁和非可溶铁两类,并建立了可溶铁和非可溶铁的测定方法。高岭土经酸溶和碱熔处理后溶液中的铁含量分别为可溶铁含量和总铁含量,非可溶铁含量为总铁含量减去可溶铁含量。采用邻菲罗啉光度法测定铁含量,该方法结果准确可靠,所测得的可溶铁为大部分自由铁和少数结构铁。漂白只能去除高岭土中的可溶铁,因此高岭土漂白过程中可除去的最大铁含量为可溶铁含量,对其进行定量分析可为现有的高岭土漂白工艺提供理论指导。

#### 6 参考文献

- [1] 张锡秋,方邨森,胡立勋. 高岭土[M]. 北京: 轻工业出版社,1988: 14.
- [2] Prasada M S, Reida K J, Murray H H. Kaolin: Processing, properties and applications [J]. *Applied Clay Science* 1991, 6(2): 87-119.
- [3] Chandrasekhar S, Ramaswamy S. Influence of mineral impurities on the properties of kaolin and its thermally treated products [J]. *Applied Clay Science* 2002(21): 133-142.
- [4] 程寿森. 非金属矿的开发利用[J]. 岩矿测试, 1992, 11(1-2): 156-161.
- [5] Bundy W M. The diverse industrial applications of kaolin [J]. *The Clay Minerals Society* 1990(1): 43-74.

- [6] Murray H H. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and paligorskite: A general overview [J]. *Applied Clay Science* 2000(17): 207-221.
- [7] 陈文瑞. 我国陶瓷超级高岭土的开发与应用[J]. *中国陶瓷* 2008, 44(11): 59-62.
- [8] Murray H H, Jessica E K. Engineered clay products for the paper industry [J]. *Applied Clay Science* 2005, 29: 199-206.
- [9] Bertolino L C, Rossi A M, Scorzelli R B, Torem M L. Influence of iron on kaolin whiteness: An electron paramagnetic resonance study [J]. *Applied Clay Science* 2010, 49(3): 170-175.
- [10] Jepson W B. Structural iron in kaolinites and in associated ancillary minerals [M]. *NATO Advanced Science Institutes Series*, 1988: 467-536.
- [11] Schroeder P A, Pruett R J, Hurst V J. Effects of secondary iron phases on kaolinite  $^{27}\text{Al}$  MAS NMR spectra [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1998, 46(4): 429-435.
- [12] 陈永欣, 阮贵武, 谢毓群, 蔡维专. 电感耦合等离子体发射光谱法测定高岭土中杂质元素[J]. *岩矿测试*, 2008, 27(6): 473-474.
- [13] GB/T 14563—2008 高岭土及其试验方法[S].
- [14] 蔡宏伟, 王勤华, 柳振作. 微波消解光度法测定高岭土中的铁含量[J]. *陕西科技大学学报* 2006, 24(2): 63-65.
- [15] 乔淑萍, 张凤兰, 高智. 煤系高岭土中铁含量的测定[J]. *内蒙古工业大学学报*, 1999, 18(2): 128-130.
- [16] 王锦荣, 周汉文, 曾伟能, 杨增良, 柳婷, 瞿思思. 合浦高岭土矿物特征对白度的影响[J]. *中国非金属矿工业导刊* 2010(3): 24-30.
- [17] 李顺生, 李鸿钧, 赵景总. 铁、钛对高岭土白度的影响[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 1989, 17(2): 73-76.
- [18] 实用工业硅技术编写组. 实用工业硅技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 191-193.
- [19] Marzenko Z. 元素的分光光度测定[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 270.
- [20] 于瑞敏. 过渡金属氧化物及化学漂白对高岭土白度影响规律的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008: 5.
- [21] 李中和, 张典奎, 叶卓麟. 陶瓷原料与瓷相分析[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1989: 12.
- [22] 陈国珍, 黄贤智, 刘文元, 郑朱梓, 王尊本. 紫外-可见光分光光度法(下册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 159.
- [23] 陈国珍, 黄贤智, 刘文元, 郑朱梓, 王尊本. 紫外-可见光分光光度法(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1983: 59-60.
- [24] 吕宪俊. 高岭土中染色物质的赋存形式及其漂白工艺的选择[J]. *中国非金属矿工业导刊* 2004(4): 8-12.
- [25] 姚林波. 高岭石的结构缺陷、杂质元素存在形式及热转变研究[J]. *地质地球化学*, 1996(6): 118-122.
- [26] 戴瑾. 铁染高岭土的漂白及煅烧增白工艺研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009: 6.