

煤系煅烧高岭土吸油值的影响因素

孙涛¹, 周春宇¹, 陈洁渝^{1,2}, 雷新荣¹, 严春杰¹, 朱晓燕¹

(1. 中国地质大学 材料与化学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 教育部纳米矿物材料及应用工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 涂布造纸填料用煅烧高岭土要求有较高的吸油值。本文针对市场上高吸油值煅烧高岭土资源短缺的现状, 研究煅烧高岭土吸油值的影响因素, 寻求提高煅烧高岭土吸油值的方法。实验以唐山煤系高岭土为原料, 在 600~1 000℃ 范围内间隔 50℃ 取点, 分别煅烧 3 h。采用扫描电子显微镜 (SEM) X 射线衍射仪 (XRD) 观察煅烧高岭土的形貌并鉴定其物相。计算煅烧高岭土的烧失量, 并检测其 pH 值、比表面积、Zeta 电位等参数, 分析它们对煅烧高岭土的吸油值的影响。结果表明: 750℃ 煅烧的高岭土吸油值最高, 可达 76.3 g/100 g; 煅烧高岭土的 Zeta 电位、pH 值、比表面积等对其吸油值的影响均较为显著, 其中比表面积对吸油值的影响最大。

关键词: 吸油值; 比表面积; 煅烧高岭土; 煤系高岭土

中图分类号: P579; P578.965

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0232-07

Factors influencing oil adsorption of calcined coal-series kaolin

SUN Tao¹, ZHOU Chun-yu¹, CHEN Jie-yu^{1,2}, LEI Xin-rong¹, YAN Chun-jie¹ and ZHU Xiao-yan¹

(1. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Engineering Research Center of Nano-Geomaterials of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Calcined kaolin used in specific paper filler requires a higher oil absorption value. In view of the resource shortages of the calcined kaolin with high oil absorption value in the market, this study aims at investigating factors influencing the oil adsorption of the calcined coal-series kaolin and seeking for ways to improve the oil absorption value of calcined kaolin. Coal-series kaolin used as raw materials in this study was obtained from Tangshan area, which was calcined in the temperature range of 600~1 000 °C, with the interval of 50°C. Scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were used to conduct morphologic observation and phase identification of calcined kaolin respectively. Calculation of loss on ignition and detection of such parameters as pH value, specific surface area and Zeta potential were used to analyze their influences on oil adsorption value. The results show that the highest oil adsorption value of calcined kaolin is up to 76.3 g/100 g at the temperature of 750°C; and Zeta potential, pH value, specific surface area constitute the notable factors influencing oil adsorption value, with the influence of specific surface area on the oil absorption value of the calcined kaolin being the greatest.

Key words: oil adsorption; specific surface area; calcined kaolin; coal-series kaolin

收稿日期: 2012-10-08; 修订日期: 2012-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(41102025) 教育部纳米矿物材料及应用工程研究中心开放基金(CUGNGM20132)

作者简介: 孙涛(1989-), 男, 硕士研究生, 岩石矿物材料学专业, E-mail: xusunao@gmail.com; 通讯作者: 陈洁渝(1976-), 女, 博士, 讲师, 矿物材料深加工研究方向, E-mail: chenjieyu@cug.edu.cn.

高岭土是一种以高岭石或多水高岭石为主要成分、质地纯净的细粒粘土,具有许多优良的工艺性能,广泛用于造纸、陶瓷、橡胶、塑料、化工等行业(张锡秋,1988)。高岭土的应用市场很分散,经济越发达国家的高岭土使用量越大。国际市场的高岭土基本上由美国、巴西、英国、澳大利亚供应,其它国家只有极少量适合用于造纸的高岭土原料进入国际市场。随着国民经济各领域的日益发展,人们越来越重视高岭土的深加工,因为高岭土具有稳定而长期的市场需求前景。对高岭土的深加工不仅可以获取新的具有特殊性能的材料,还可提高经济效益。

我国主要高岭土矿区有广东茂名、福建龙岩、江西贵溪、江苏苏州和湖南醴陵等。随着国民经济的迅速发展,以高岭土为原料和添加剂的各行业获得了良好的发展机遇,产能和消费量都大幅度提高,高岭土的需求规模也随之大幅度地提高。目前我国高岭土年生产能力超过 600 万吨,2012 年国内高岭土消费需求量将超过 600 万吨,到 2015 年,高岭土消费需求量将达到 750 万吨左右。在我国高岭土消费结构中,陶瓷和造纸行业是高岭土的主要消费领域,占据全国高岭土消费总量的 2/3 以上。

造纸厂是煅烧高岭土的重要用户。煅烧高岭土对油墨的吸收性好,遮盖率高,可部分代替昂贵的钛白粉,尤其适合高速刮刀涂布机使用。随着我国造纸业的发展、产量的扩大以及高速刮刀涂布机的引进,煅烧高岭土的用量也在逐步扩大。目前造纸工业的发展已成为衡量一个国家现代化水平的标志。据中国造纸协会(2010,2011,2012),2009 年我国人均纸张消费量为 64 kg,2010 年为 68 kg,2011 年为 73 kg,呈逐年增长的趋势,略高于世界平均水平,但与发达国家 2009 年的人均消费量 300 kg 左右相比,差距仍然很大。

涂布纸的吸油性能,是纸张和油墨的固有特性在印刷条件下的综合反映,也是印刷适性中最重要的性质(刘子亭等,2006)。许多印刷故障就是因为涂布纸的吸油性能与所采用的印刷条件不相适应造成的。我国造纸用煅烧高岭土以进口产品为主,造纸涂布用煅烧高岭土的市场需求已达到 35 万吨,而国内只能生产 25 万吨,一般用于中低档纸品,每年要从国外进口 10 万吨高档造纸涂布用煅烧高岭土(韩秀山,2004)。

我国煅烧高岭土主要以煤系高岭土为原料。煤系高岭土的煅烧过程其实是内部脱羟基和有机质燃

烧的过程(魏存弟等,2005;黎水平等,2008)。高岭石是铝氧八面体和硅氧四面体组成的层状硅酸盐矿物,其中铝氧八面体的化学键较弱,当高岭土被加热到 450℃ 以上时,其层间的羟基逸出,使高岭石的层状结构变成偏高岭石的无定形结构(Watanabe *et al.*,1987)。

国内煅烧高岭土的质量与进口高白度、超细煅烧高岭土产品还有很大的差距。国内开发煅烧高岭土产品往往只注意了白度、粒度磨耗等,而对各指标间的相互关系和质量特性缺少综合评价。煅烧高岭土的吸油值指标在涂布造纸方面非常重要。高岭土的吸油值越高,印刷适性越好。吸油值低的煅烧高岭土,亦可用于漂白土。

前人研究了原料细度、煅烧条件(许霞等,2000)对煤系高岭土的吸油值的影响,结果表明原料粒度越粗,吸油值越低,煅烧温度、升温速度等对吸油值影响不大。研究表明煤系煅烧高岭土的硬脂酸改性(李娜等,2009)和超细粉碎(林海等,1999)可以降低煅烧高岭土的吸油值。宴全香(2010)对比了不同地区高岭土煅烧产品的吸油值,陈洁渝等(2008)采用溶胶-凝胶法制备了煅烧高岭土/二氧化钛复合颜料,发现随着生成二氧化钛的增多,吸油值逐渐下降,表明通过改进制备工艺可以降低高岭土的吸油值。陈洁渝(2009)、何利喜(2011)等研究了煅烧温度对煅烧高岭土吸油值的影响,结果表明随着煅烧温度的升高,吸油值先增大后减小,但几乎不随恒温时间的延长而变化。孙留根等(2009)的研究表明,煅烧温度低于 950℃ 时,煅烧高岭土的吸油值几乎不随温度的升高而变化。

通过煅烧和改性等手段来提高煅烧高岭土吸油值的方法已经研究的较多,但对吸油值与其它物理性能的关系研究较少。本研究探索了煅烧温度对煤系煅烧高岭土吸油值等物理性能的影响,并从煅烧高岭土吸油值与物理性能的关系出发,研究了吸油值与比表面积、Zeta 电位、pH 值的关系。

1 实验

1.1 实验原料

煤系高岭土样品取自唐山麦迪逊高岭土有限公司,测得其吸油值为 51.2 g/100 g,化学成分分析结果如下: Al_2O_3 38.49%, SiO_2 45.36%, TFe_2O_3 0.32%, TiO_2 0.44%, CaO 0.16%, MgO 0.11%,

Na_2O 0.08% , P_2O_5 0.04% , LOI 14.33%。亚麻仁油为湖北恒硕化工有限公司出品 , 密度 0.897 6 g/mL。

1.2 实验内容

取煤系高岭土 , 于 105℃ 干燥后用多功能粉碎机打散 2 min , 然后在 600~1 000℃ 范围内 , 以 50℃ 为间隔 , 分别煅烧 3 h , 随炉冷却后打散 2 min。根据国标 GB-T 5211.15-1988 测量煅烧产品的吸油值。

1.3 表征方法

用 Zeta-Meter 电位仪测定样品的 Zeta 电位 , 用 ASAP2020 BET 物理吸附仪检测样品的比表面积 , 用 pH 计测定产品的 pH 值 , 用 AXS D8-focus X 射线衍射仪分析样品的物相组成 , 用 FEI Quanta 200 环境扫描电子显微镜观察样品的微观形貌。

2 结果与分析

2.1 煅烧温度对高岭土微观形貌的影响

图 1 为未煅烧煤系高岭土和不同温度下煅烧产品的 SEM 照片。从图 1 可以看出 , 未煅烧的煤系高岭土微观形貌为叠片状 , 煅烧产物虽然也主要呈片状 , 但随着煅烧温度的升高 , 颗粒粘结增多 , 片层堆积更加明显。这是因为随着煅烧温度的升高 , 高岭土脱羟基更彻底 , 烧结作用更明显 , 结构坍塌增多 , 因而块状增多。

2.2 煅烧温度对高岭土物相的影响

图 2 为未煅烧煤系高岭土和不同温度下煅烧产品的 XRD 图谱。由图 2 可见 , d 值为 7.162 2 Å、4.460 6 Å、

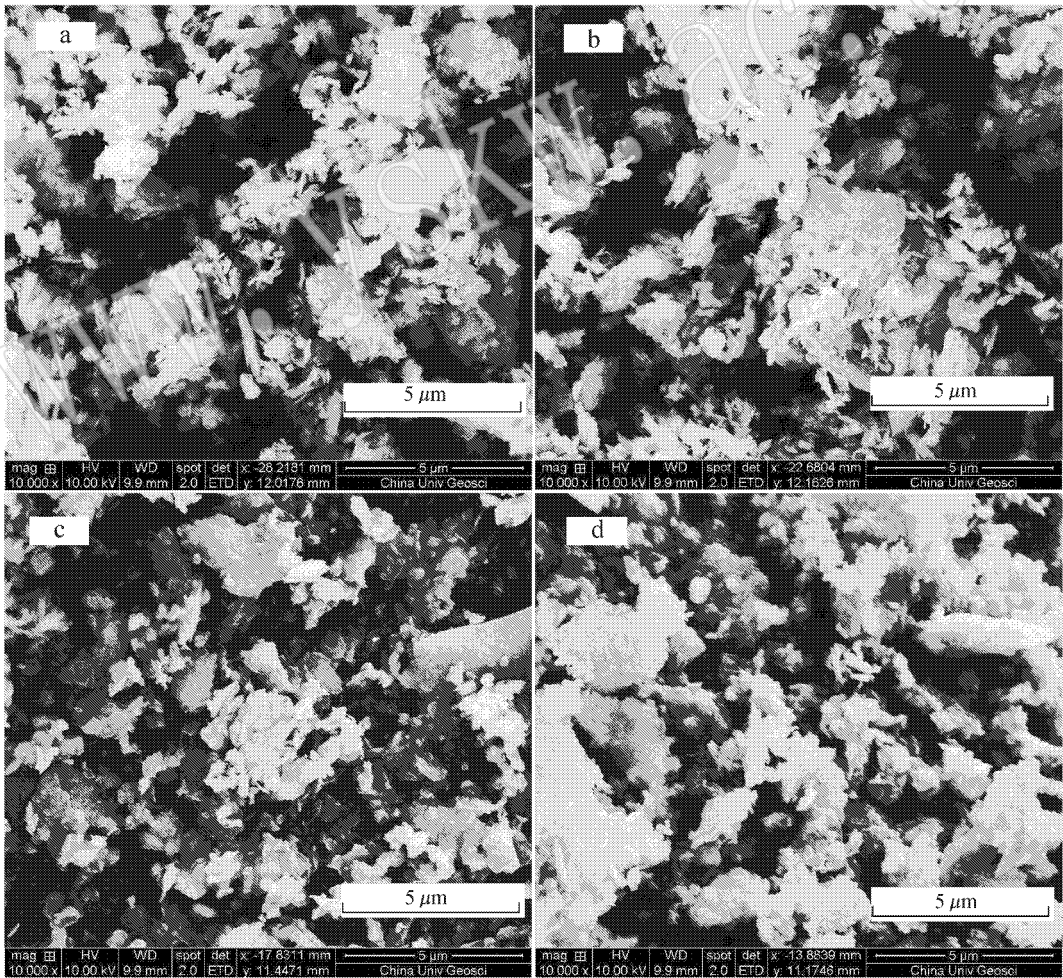


图 1 不同温度下煅烧高岭土的 SEM 图片

Fig. 1 SEM images of calcined kaolin at different temperatures

a—未煅烧 ; b—600℃ ; c—750℃ ; d—1 000℃

a—uncalcined ; b—600℃ ; c—750℃ ; d—1 000℃

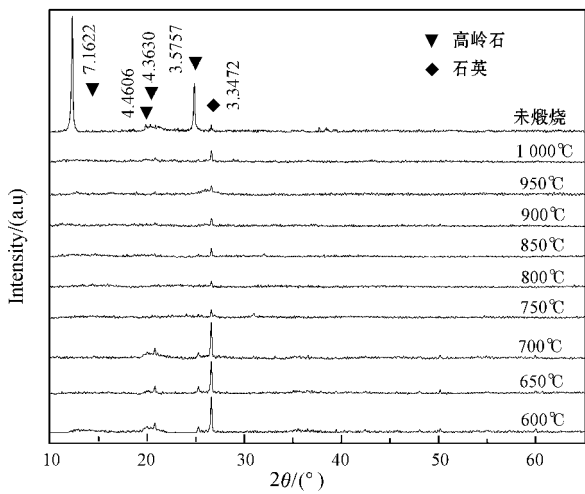


图 2 煤系高岭土及其不同温度煅烧产品的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of coal-series kaolin and its product calcined at different temperatures

4.363 0 Å、3.575 7 Å 所对应的衍射峰都是高岭土的特征峰， d 值 3.347 2 Å 对应的衍射峰为石英的衍射峰。由图 2 还可以看出，随着煅烧温度的升高，石英的衍射峰逐渐降低。600℃ 下煅烧的高岭土中高岭土的各特征峰几乎完全消失，说明内部羟基已经大部分脱除，高岭土结构坍塌 (Watanabe *et al.*, 1987; 魏存弟等, 2005)。

2.3 煅烧温度对煅烧高岭土烧失量的影响

图 3 为煤系高岭土煅烧过程中烧失量与煅烧温度的关系曲线。在 600~750℃ 温度范围内，高岭土的烧失量随温度而增加，750℃ 以后烧失量基本保持

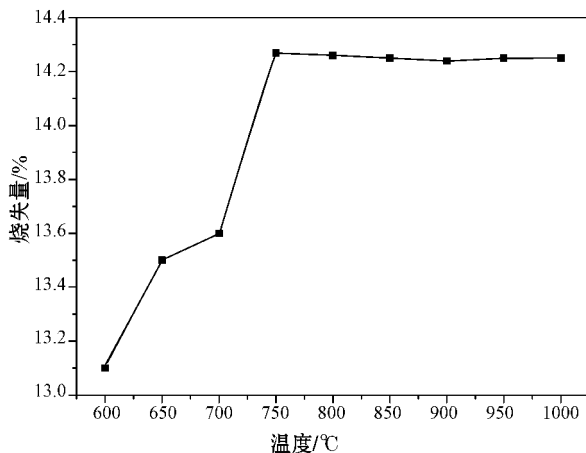


图 3 煅烧温度对煅烧高岭土烧失量的影响

Fig. 3 Effect of temperature on loss ignition of calcined kaolin

不变。这是因为 600~750℃ 的煅烧使高岭土失去吸附水、层间水、结晶水及以羟基形式存在的结构水 (魏存弟等, 2005)，因而烧失量增大；而 750℃ 以后，高岭土结构中的羟基和有机质已脱除的较为彻底，所以烧失量变化不大。

2.4 煅烧高岭土的物理性能及其与吸油值的关系

2.4.1 煅烧高岭土的吸油值

图 4 为煤系高岭土煅烧产品的吸油值与煅烧温度的关系曲线。如图所示，煅烧高岭土的吸油值随煅烧温度的升高先增大后减小。

正如前文 SEM、XRD 及烧失量的分析结果显示，随着煅烧温度的升高，样品发生脱羟基、脱有机质等作用，颗粒结块增大，孔隙增多，因而吸油值增大，且在 750℃ 达到最大值 76.3 g/100 g；850℃ 以后，样品发生烧结，结块增多，孔隙堵塞，所以吸油值减小。

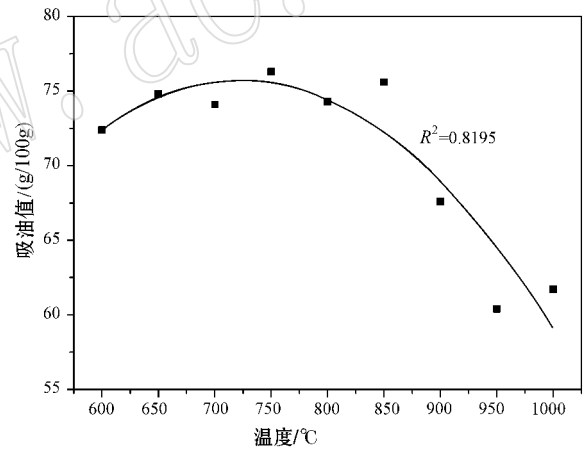


图 4 煅烧温度对煅烧高岭土吸油值的影响

Fig. 4 Effect of temperature on oil adsorption of calcined kaolin

2.4.2 温度对煅烧高岭土悬浮液 Zeta 电位的影响

悬浮液中胶体颗粒的 Zeta 电位反映的是胶体颗粒的稳定性 (凡曼等, 2012)。Zeta 电位在 ± 30 mV 之间的胶体颗粒容易絮凝聚沉；Zeta 电位大于 30 mV 或小于 -30 mV 的胶体颗粒则保持稳定状态，不易聚沉 (张金凤等, 2008)。煅烧高岭土在造纸过程中是作为颜料和填料添加的，其 Zeta 电位的大小对纸张的抄造性能影响较大 (凌永龙, 1988; 李学明, 2010)。

图 5a 为煤系煅烧高岭土的 Zeta 电位与煅烧温度的关系曲线。由图 5a 可知，Zeta 电位随煅烧温度的升高呈逐渐减小的趋势。另外，Zeta 电位小于 -35 mV

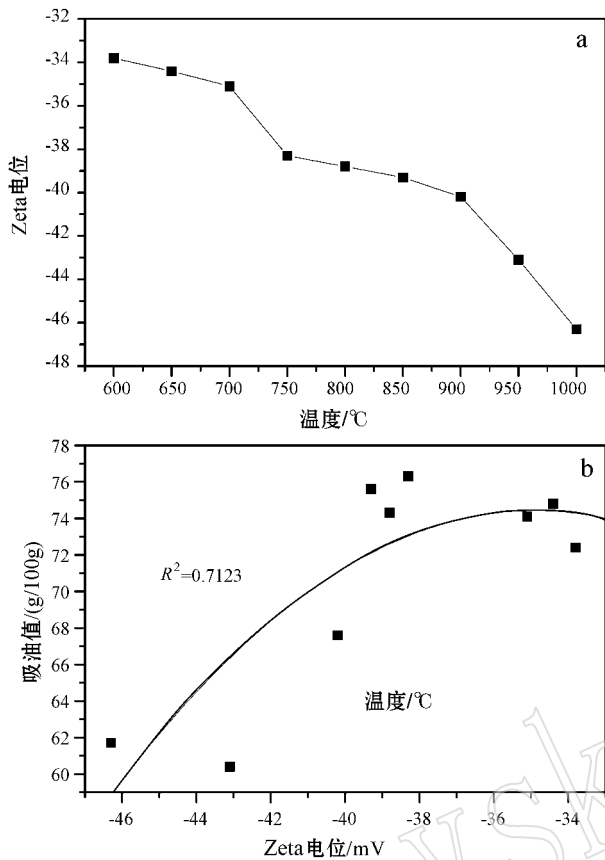


图 5 温度对煅烧高岭土 Zeta 电位的影响 (a) 及 Zeta 电位与吸油值的关系 (b)

Fig. 5 The effect of temperature on Zeta potential of calcined kaolin (a) and the relationship between Zeta potential and oil adsorption (b)

时, 吸油值随 Zeta 电位的增大而升高, Zeta 电位大于 -35 mV 以后, 吸油值不再升高 (图 5b)。因此, 适当地增大高岭土的 Zeta 电位, 可以得到高吸油值的煅烧高岭土。

2.4.3 温度对比表面积的影响

图 6 为煤系煅烧高岭土的比表面积与煅烧温度和吸油值的关系曲线。由图可知, 比表面积随煅烧温度的升高先增大, 在 750°C 时达到最大值 21.53 m^2/g , 随后减小。这是因为煅烧过程中高岭土脱羟基、脱有机质, 形成了很多孔隙, 故比表面积增大。当煅烧温度高过 750°C 后, 高岭土发生烧结, 导致孔隙被填充, 比表面积减小。

从图 6 中还可以看出, 煅烧高岭土的吸油值随其比表面积的增加而升高。这是因为在低温煅烧过程中, 高岭土发生脱羟基和脱有机质作用, 内部形成大量孔隙, 比表面积增大, 吸油值也增大。而高温煅

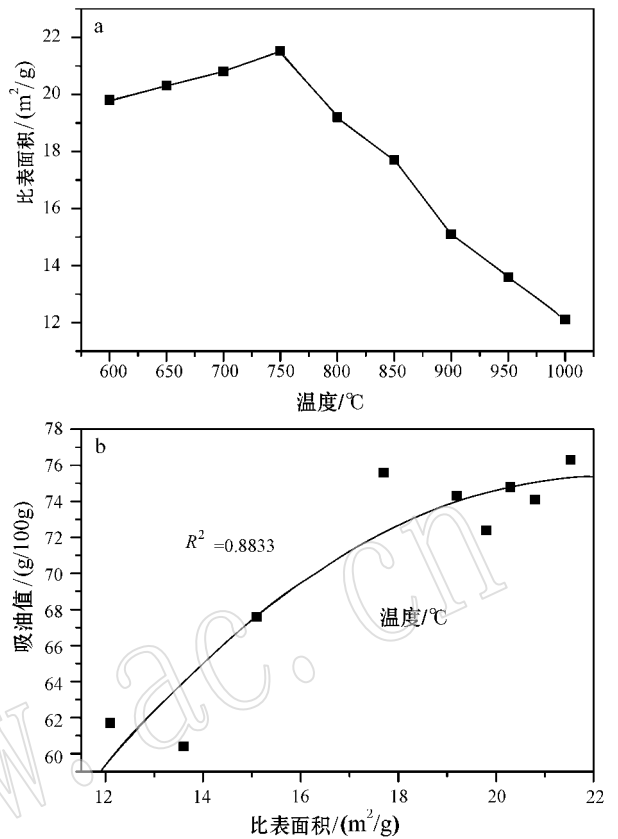


图 6 温度对煅烧高岭土比表面积的影响 (a) 及比表面积与吸油值的关系 (b)

Fig. 6 The effect of temperature on specific surface area of calcined kaolin (a) and the relationship between specific surface area and oil adsorption (b)

烧时, 烧结作用引起的结块较明显, 使高岭土内部孔隙闭塞, 比表面积减小, 因而吸油值也减小。吸油值随煅烧高岭土比表面积的增加而提高, 这一现象说明亚麻仁油在煅烧高岭土的表面的吸附主要为物理吸附, 因此可以研究增大煅烧高岭土比表面积的方法来提高其吸油值。

2.4.4 温度对 pH 值的影响

pH 值反映了煅烧高岭土的酸碱性, 是高岭土脱羟基程度和铝的配位转化的体现。图 7a 为煅烧温度对 pH 值的影响曲线。如图所示, 随煅烧温度的升高, pH 值先降低后升高, 750°C 时达到最小值 4.5 , 这与高岭石在煅烧过程中的结构变化行为密切相关。煅烧温度低于 750°C 时, 高岭土中的羟基快速脱除, 引起 pH 值的降低, 且在 750°C 时达到最小。煅烧温度高于 750°C 后, 煅烧高岭土的 pH 值又开始升高, 这可能与 $\text{Al}-\text{O}$ 八面体变成 $\text{Al}-\text{O}$ 四面体后, $\text{Al}-\text{O}$ 四面体发生活化 (刘钦甫等 2008) 有关。

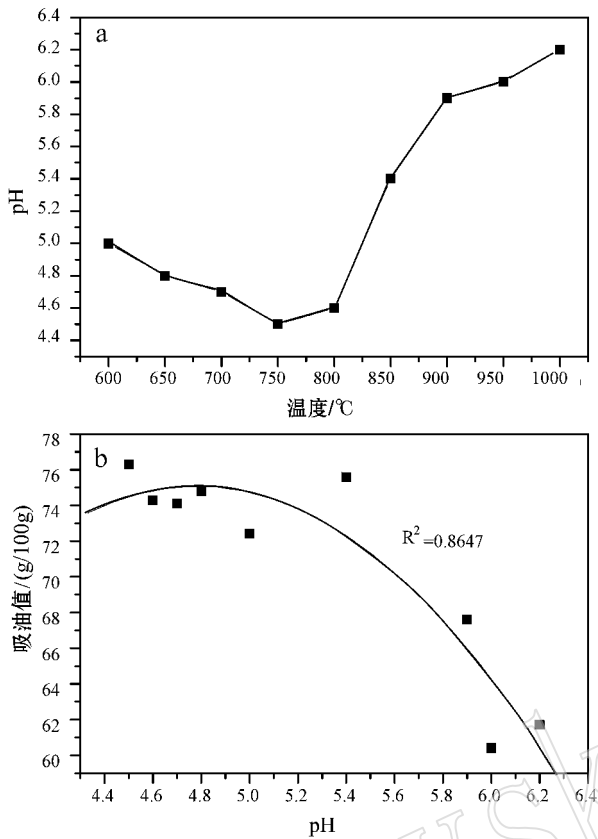


图7 温度对煅烧高岭土 pH 值的影响(a)及 pH 值与吸油值的关系(b)

Fig. 7 The effect of temperature on pH value of calcined kaolin (a) and the relationship between pH value and oil adsorption (b)

由图 7b 可知,煅烧高岭土吸油值随 pH 值的增大而减小。pH 值较低时,脱羟基完全,高岭土内部存在孔隙,吸油值较大;pH 值较高时,脱羟基不完全或发生了铝的活化,因而吸油值较小。

3 结论

(1) 煅烧温度对煤系高岭土的结构、物相影响很大。煤系高岭土在 600°C 以上的煅烧过程,就是脱羟基、脱有机质及铝的配位体转化过程,晶体结构受到破坏而形成非晶态偏高岭石,内部形成大量孔隙,引起煤系煅烧高岭土的吸油值、pH 值、Zeta 电位、比表面积等性能的变化。

(2) 煅烧温度对煤系煅烧高岭土的吸油值影响很大。煅烧温度低于 750°C 时,煤系煅烧高岭土的吸油值随煅烧温度升高而增大,且在 750°C 达到最大吸油值 76.3 g/100 g。温度继续升高,煤系煅烧高岭土

的吸油值逐渐降低。因此,要获得高吸油值的产品,煤系高岭土的最佳煅烧温度为 750°C。

(3) 亚麻仁油在煅烧高岭土的表面的吸附主要为物理吸附,比表面积越大,吸油值越高;反之亦然。高岭土的脱羟基程度、铝的活化及烧结程度,综合决定煅烧高岭土的比表面积和孔隙率,它们进行的程度可以通过 pH 值、Zeta 电位等参数的变化反映出来。

(4) 煅烧高岭土的吸油值与 pH 值、Zeta 电位、比表面积等与吸油值的关系均较为紧密,其中比表面积对吸油值的影响最大,因此可以从增大煅烧高岭土的比表面积等方面入手,来提高其吸油性能。比表面积与粒度、孔径的联系较为紧密,后续研究可以从煅烧高岭土的孔径分布着手,来研究煅烧高岭土吸油值的影响因素。

References

- Chen Jieyu, Yan Chunjie, Han Lixiong, *et al.* 2008. Research on experiment of coating TiO₂ on surface of calcined kaolin [J]. *Non-Metallic Mines*, 31(6): 38~40 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jieyu, Yan Chunjie and Tu Jing. 2009. The structure and property of Suzhou kaolin at different temperaturd [J]. *Non-Metallic Mines*, 32(2): 21~24 (in Chinese with English abstract).
- China Paper Association. 2010. The annual report of China's paper industry in 2009 [J]. *China Pulp & Paper Industry*, 31(11): 8~18 (in Chinese).
- China Paper Association. 2011. The annual report of China's paper industry in 2010 [J]. *China Pulp & Paper Industry*, 32(11): 8~18 (in Chinese).
- China Paper Association. 2012. The annual report of China's paper industry in 2011 [J]. *China Paper Newsletter*, (6): 9~19 (in Chinese).
- Fan Man and Wang Xingyong. 2012. The surface properties of kaolinite and flotation characteristic [J]. *Chemical Intermediate*, 9(3): 52~57 (in Chinese with English abstract).
- Han Xiushan. 2004. The kaolin application status in China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (6): 29 (in Chinese).
- He Lixi. 2011. The Calcination of Washed Kaolin and Performance Research of Product [D]. Guangzhou: South China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Na, Ma Guozhang and Xu Bingshe. 2009. Study on modification and properties of calcined kaolin with stearic acid [J]. *Applied Chemical Industry*, 38(8): 1136~1138 (in Chinese with English ab-

stract).

- Li Shuiping and Wu Qisheng. 2008. Research progress in preparation of mesoporous silica materials from kaolin[J]. Materials Review , 22 (Z2): 12~15(in Chinese with English abstract).
- Li Xueming. 2010. Paper filler and its modification[J]. Tianjin Paper Making , 32(4): 33~36(in Chinese).
- Lin Hai , Li Dingyi , Chen Xiuzhi , et al . 1999. Physical and chemical properties and surface modification of ultrafine coal-series calcined kaolin particles[J]. Non-Metallic Mines , 22(6): 9~10(in Chinese).
- Ling Yonglong. 1988. Control factors of the properties of the fibers and paper papermaking[J]. Shanghai Paper Making , (5): 15~29(in Chinese).
- Liu Qinfu , Hou Lihua , Zhang Liyun , et al . 2008. Study on properties of calcined washed-kaolin[J]. Non-Metallic Mines , 31(4): 12~15(in Chinese with English abstract).
- Liu Ziting and Rong Weihua. 2006. Printability analysis of the coated paper in the flexographic printing[J]. Printing Technology , (35): 32(in Chinese).
- Sun Liugen , Wang Yun , Yuan Chaoxin , et al . 2009. Study of calcining experiment on kaolin of coal-series in Datong Region[J]. Mining and Metallurgy , 18(2): 37~40(in Chinese with English abstract).
- Watanabe T , Shimizu H , Nagasawa K , et al . 1987. ^{29}Si and ^{27}Al MAS NMR study of the thermal transformations of Kaolinite[J]. Clay Minerals , (22): 37~48.
- Wei Cundi , Ma Hongwen , Yang Dianfan , et al . 2005. Phase transformation for calcined coal measures kaolinite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society , 33(1): 77~81(in Chinese with English abstract).
- Xu Xia and Zheng Shuilin. 2000. Study on effects of calcine conditions on physic-chemical character of calcined kaolinite[J]. China Powder Science and Technology , 6(z1): 181~183(in Chinese with English abstract).
- Yan Quanxiang. 2010. Research on structure and performance of kaolin and calcined kaolin from different regions[J]. Non-Metallic Mines , 33(3): 9~15(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinfeng , Wang Qin , Ma Fang , et al . 2008. Analysis on the flocculation morphology of CBF by kaolinite suspension[J]. Sci-Tech Information Development & Economy , 18(24): 132~133(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiqiu. 1988. Kaolinite[M]. Beijing : Publishing Company of Light Industry in Beijing(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈洁渝 , 严春杰 , 韩利雄 , 等 . 2008. 煅烧高岭土表面包覆二氧化钛实验研究[J]. 非金属矿 , 31(6): 38~40.
- 陈洁渝 , 严春杰 , 涂 晶 . 2009. 苏州高岭土在不同温度下的结构与性能[J]. 非金属矿 , 32(2): 21~24.
- 凡 曼 , 王兴涌 . 2012. 高岭石的表面性质和浮选特性的研究[J]. 化工中间体 , (3): 52~57.
- 韩秀山 . 2004. 我国高岭土应用现状[J]. 矿产保护与利用 , (6): 29.
- 何利喜 . 2011. 水洗高岭土的煅烧及产品性能研究[D]. 广州 : 华南理工大学 .
- 黎水平 , 吴其胜 . 2008. 高岭土制备介孔氧化硅材料研究进展[J]. 材料导报 , 22(Z2): 12~15.
- 李 娜 , 马国章 , 许并社 . 2009. 煅烧高岭土的硬脂酸改性及其性能研究[J]. 应用化工 , 38(8): 1136~1138.
- 李学明 . 2010. 造纸填料及其改性[J]. 天津造纸 , 32(4): 33~36.
- 林 海 , 李定一 , 陈秀枝 , 等 . 1999. 超细煤系煅烧高岭土颗粒物化性质与表面改性[J]. 非金属矿 , 22(6): 9~10.
- 凌永龙 . 1988. 纤维的性能与纸张抄造的控制因素[J]. 上海造纸 , (5): 15~29.
- 刘钦甫 , 侯丽华 , 张利云 , 等 . 2008. 煅烧水洗高岭土性能研究[J]. 非金属矿 , 31(4): 12~15.
- 刘子亭 , 荣维华 . 2006. 涂布纸在柔性版印刷中的适印性分析[J]. 印刷技术 , (35): 32.
- 孙留根 , 王 云 , 袁朝新 , 等 . 2009. 大同地区煤系高岭土煅烧实验研究[J]. 矿冶 , 18(2): 37~40.
- 魏存弟 , 马鸿文 , 杨殿范 , 等 . 2005. 煅烧煤系高岭石的相转变[J]. 硅酸盐学报 , 33(1): 77~81.
- 许 霞 , 郑水林 . 2000. 煅烧条件对煤系煅烧高岭土物化性能影响的研究[J]. 中国粉体技术 , (z1): 181~183.
- 晏全香 . 2010. 不同地区高岭土煅烧前后结构性能研究[J]. 非金属矿 , 33(3): 9~15.
- 张金凤 , 王 琴 , 马 放 , 等 . 2008. 高岭土悬液絮凝形态研究[J]. 科技情报开发与经济 , 18(24): 132~133.
- 张锡秋 . 1988. 高岭土[M]. 北京 : 北京轻工业出版社 .
- 中国造纸协会 . 2010. 中国造纸工业 2009 年度报告[J]. 中华纸业 , 31(11): 8~18.
- 中国造纸协会 . 2011. 中国造纸工业 2010 年报告[J]. 中华纸业 , 32(11): 8~18.
- 中国造纸协会 . 2012. 中国造纸工业 2011 年度报告[J]. 造纸信息 , (6): 9~19.