

# 高铝粉煤灰碱溶法制备氢氧化铝的研究

苏双青<sup>1,2</sup>, 马鸿文<sup>1</sup>, 邹丹<sup>2</sup>, 李歌<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 矿物材料国家专业实验室, 北京 100083; 2. 昊青新材技术有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 实验研究了采用两步碱溶法从高铝粉煤灰中提取氢氧化铝的可行性。首先采用浓度为 8 mol/L 的 NaOH 溶液, 在 95℃ 的条件下溶出高铝粉煤灰中部分非晶态 SiO<sub>2</sub>, 所得脱硅粉煤灰再与适量 CaO 混合均匀, 在 260~280℃ 下以浓度 18~20 mol/L 的 NaOH 溶液溶出 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 得到高苛性比的铝酸钠溶液, 经降低苛性比、脱硅和碳酸化分解, 制得氢氧化铝制品。化学成分分析结果表明, 该氢氧化铝制品符合 GB/T 4294-1997 规定的一级标准。与其他从高铝粉煤灰中提取氧化铝的工艺相比, 该方法避免了粉煤灰原料的高温烧结过程, 生产能耗显著降低, 加工过程的环境相容性良好。

**关键词:** 高铝粉煤灰; 碱溶法; 氢氧化铝

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)06-0981-06

## The preparation of aluminum hydroxide from high-alumina fly ash based on alkali dissolution method

SU Shuang-qing<sup>1,2</sup>, MA Hong-wen<sup>1</sup>, ZOU Dan<sup>2</sup> and LI Ge<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Blue Sky Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** A new alkali dissolution method is used to extract aluminum hydroxide from high-alumina fly ash in this study. The first step alkali dissolution is to obtain desilicized fly ash with relatively high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio. The amorphous silica in the fly ash is partly leached when the fly ash is leached with 8 mol/L sodium hydroxide solution at 95℃. The desilicized fly ash is then used for the second step alkali dissolution as the material. The desilicized fly ash mixed with CaO are leached with 18~20 mol/L sodium hydroxide solution at 260~280℃ and the dissolution efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reaches 85%. Then reduced causticity ratio, deep desilication and carbonation decomposition are carried out on the basis of acquired sodium aluminate solution. The features of the prepared product of aluminum hydroxide are determined by XRD, SEM and chemical analysis. The results show that the aluminum hydroxide has fine crystal and slight particle aggregate sphere 70~80μm in diameter. The product can satisfy Class 1 of the China National Chemical Standard GB/T4294-1997. Compared with other technologies, this technology can avoid high temperature sintering procedure and realize low energy consumption, and the process is quite consistent with the environment protection idea.

**Key words:** high-alumina fly ash; alkali dissolution process; aluminum hydroxide

高铝粉煤灰中是一种重要的非传统的氧化铝资源。从粉煤灰中提取氧化铝, 符合我国发展循环经济

和建设资源节约型、环境友好型社会的产业政策, 近年来已成为相关行业关注和研究的热点。从高铝

粉煤灰中提取氧化铝常见的方法有碱法、酸法和酸碱联合法。碱法有石灰石烧结法(方荣利等,2003;余超等,2005;赵喆等,2008)和碱石灰烧结法(唐云等,2008;王佳东等,2009;Bai *et al.*,2010)。石灰石烧结法能耗高(烧结温度 $1\ 300\sim 1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),一次性资源消耗量大(每处理 $1\ \text{t}$ 粉煤灰消耗约 $2.3\ \text{t}$ 石灰石资源),硅钙渣排放量大(每处理 $1\ \text{t}$ 粉煤灰产生约 $3.2\ \text{t}$ 硅钙渣);碱石灰烧结法烧结反应复杂,氧化铝的溶出率不高。酸法有直接酸浸法(Fernandez *et al.*,1998;王文静等,2003;李来时等,2006;吴艳等,2009)和氟铵助溶法(赵剑宇等,2003),酸的大量使用严重腐蚀设备,难以实现大规模工业化生产。酸碱联合法(Matjie *et al.*,2005;张晓云等,2005;丁宏娅等,2006a,2006b;Ji *et al.*,2007)工艺流程复杂,碱的消耗量大。

本实验采用两步碱溶法工艺提取氢氧化铝,避免高铝粉煤灰在提取氧化铝过程中的高温烧结过程,期望能耗显著降低。第一步碱溶得到的富硅滤液可以用来制备无机硅化合物,提铝后的滤渣可以用来制备轻质墙体材料或硅橡胶凝材料等,因而可显著提高粉煤灰的综合利用价值。整个工艺过程无废水、废渣排放,为实现清洁生产提供了一条有效的技术途径。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

实验用高铝粉煤灰(H2F-07)来自陕西某热电厂,化学成分分析结果见表1,其中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 含量分别为 $30.37\%$ 和 $57.44\%$ ,粉煤灰中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 的质量比(A/S)为 $0.53$ 。

表1 高铝粉煤灰的化学成分分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Chemical analyses of the high-alumina fly ash

样品号	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	LOI	Total
H2F-07	57.44	1.16	30.37	1.10	1.91	0.01	2.69	3.12	0.31	1.68	0.02	0.67	100.47

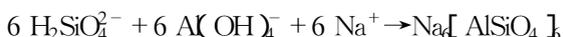
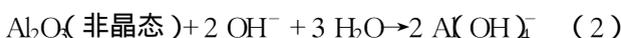
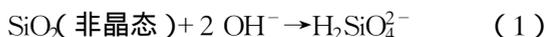
### 1.2 实验方法

高铝粉煤灰(H2F-07)球磨至 $-200$ 目 $>90\%$ 的粒级后与 $\text{NaOH}$ 溶液混合均匀,置于反应釜中反应一段时间后过滤分离,滤饼为脱硅粉煤灰,用作第二步碱溶的原料。脱硅粉煤灰和 $\text{CaO}$ 按一定比例混合均匀,再用浓度 $18\sim 20\ \text{mol/L}$ 的 $\text{NaOH}$ 溶液在反应釜中溶出氧化铝。由此得到的铝酸钠溶液经降低苛性比、脱硅和碳酸化分解后制备氢氧化铝制品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 第一步碱溶

第一步碱溶的目的是,溶出高铝粉煤灰中部分非晶态的 $\text{SiO}_2$ ,提高脱硅粉煤灰中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 的质量比,减少第二步碱溶时 $\text{CaO}$ 的加入量,提高氧化铝的溶出率。高铝粉煤灰中非晶态 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 都能与 $\text{NaOH}$ 溶液反应,溶液中的少量 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 与 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 反应生成羟基方钠石等物相(邬国栋等,2006),各反应方程式如下:



为提高非晶态 $\text{SiO}_2$ 的溶出率,减少 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶出,分别研究了 $\text{NaOH}$ 溶液浓度、反应温度和反应时间对 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率的影响。图1是反应温度为 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,反应时间 $60\ \text{min}$ ,采用不同浓度的 $\text{NaOH}$ 溶液时, $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率的实验结果。由图1可见,随着 $\text{NaOH}$ 浓度的增加, $\text{SiO}_2$ 的溶出率逐渐增大,当 $\text{NaOH}$ 浓度为 $8\ \text{mol/L}$ 时, $\text{SiO}_2$ 的溶出率达到 $36.5\%$ , $\text{NaOH}$ 浓度继续增大, $\text{SiO}_2$ 的溶出率变化不明显,而在此过程中, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶出率变化不明显且均低于 $3\%$ 。

图2是 $\text{NaOH}$ 浓度为 $8\ \text{mol/L}$ ,反应时间为 $90\ \text{min}$ ,不同反应温度对 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率影响的实验结果。由图2可见, $\text{SiO}_2$ 的溶出率在开始阶段随着反应温度的升高而增加,在 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶出率达到最大值为 $38.0\%$ 。在 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, $\text{SiO}_2$ 的溶出率随温度的升高而略有下降,而 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶出率则随温度升高略有增加。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出量的增加,导致反应(3)的速率加快,从而导致溶出的 $\text{SiO}_2$ 重新回到固相。

图3是 $\text{NaOH}$ 浓度为 $8\ \text{mol/L}$ ,反应温度 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不同反应时间下 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率的实验结果。随着反应时间的延长, $\text{SiO}_2$ 的溶出率也在增加,当反

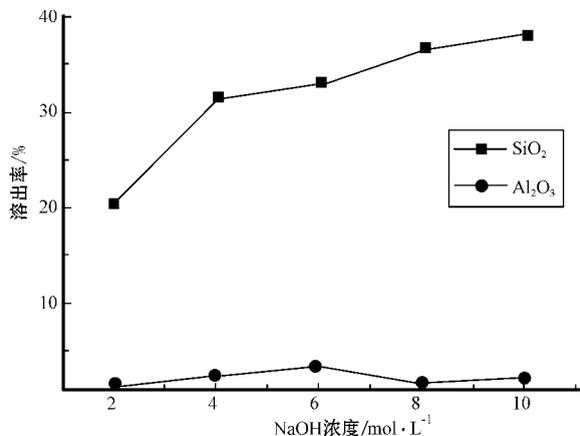


图 1 NaOH 浓度对 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶出率的影响

Fig. 1 Effect of concentration of NaOH solution on the leaching rate of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

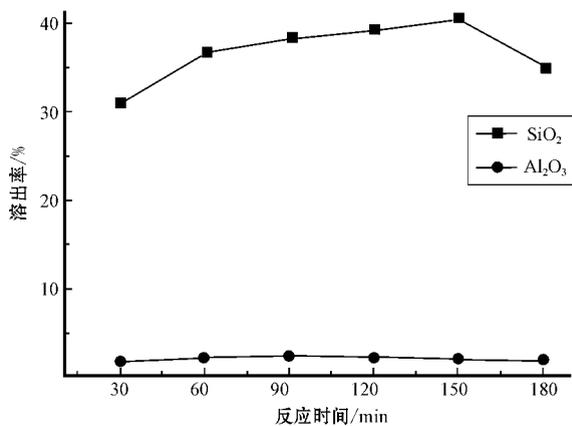


图 3 反应时间对 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶出率的影响

Fig. 3 Effect of leaching time on the leaching rate of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

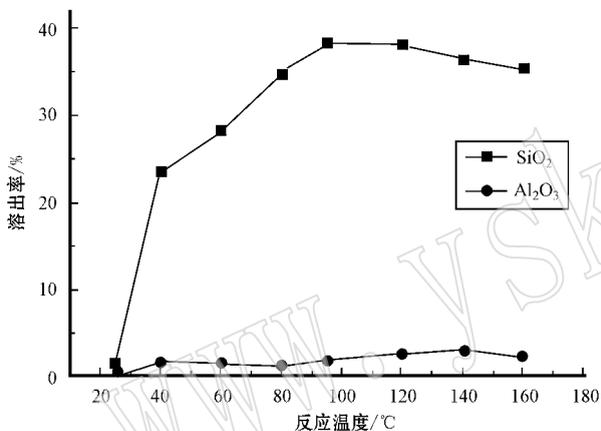


图 2 反应温度对 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶出率的影响

Fig. 2 Effect of leaching temperature on the leaching rate of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

应时间达到 150 min 时 SiO<sub>2</sub> 的溶出率为 40.0% 继续延长反应时间,由于羟基方钠石的生成, SiO<sub>2</sub> 的溶出率反而下降,在此过程中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率较低,且随时间的变化不明显。然而,从 90 min 延长至 150 min, SiO<sub>2</sub> 溶出率增加幅度不大,考虑到延长时间会增加能耗,降低效率。

基于以上实验结果,在 95°C 的条件下,以浓度为 8 mol/L 的 NaOH 溶液与高铝粉煤灰反应 90 min, SiO<sub>2</sub> 溶出率为 38%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率为 2.2%。所得脱硅粉煤灰(TG-01)的化学成分分析结果见表 2。对比表 1 可以看出,由于非晶态 SiO<sub>2</sub> 的溶出,碱溶后脱硅粉煤灰中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量由 30.37% 上升至 33.16%, SiO<sub>2</sub> 含量则由 57.44% 下降为 34.29%。脱

表 2 脱硅粉煤灰的化学成分分析结果

Table 2 Chemical analyses of the desilicized fly ash

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
TG-01	34.29	1.05	33.16	4.55	0.92	0.02	2.73	4.61	9.65	0.21	0.03	8.63	99.85

硅粉煤灰中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 质量比由 0.53 提高到 0.97。

## 2.2 第二步碱溶

图 4 是 280°C 下 Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 体系固相结晶区域的相图(毕诗文, 2006),由图中可见,当所得溶液的苛性比(MR)大于 10,即在 AE 线以下区域内,理论上原料中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可全部进入溶液相,溶液中含 SiO<sub>2</sub> 的平衡固相在高碱浓度时为水合硅酸钠,低碱浓度时为水合偏硅酸钙。然而在

IV 区溶液的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的浓度太低,不利于后续氢氧化铝的制备。因此,实验设计按图中 I 区的结晶相即原料中的 SiO<sub>2</sub> 转变为水合硅酸钠钙进入固相,原料中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进入液相,实现铝硅组分的分离。

按照反应物料中 SiO<sub>2</sub> 与 CaO 的摩尔比为 1 称取适量的生石灰,与脱硅粉煤灰(TG-01)混合均匀,在 260~280°C 下用浓度为 18~20 mol/L 的碱液浸取,考察反应时间对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶出率的影响。实验结果表明,随反应时间的延长, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率增加不明

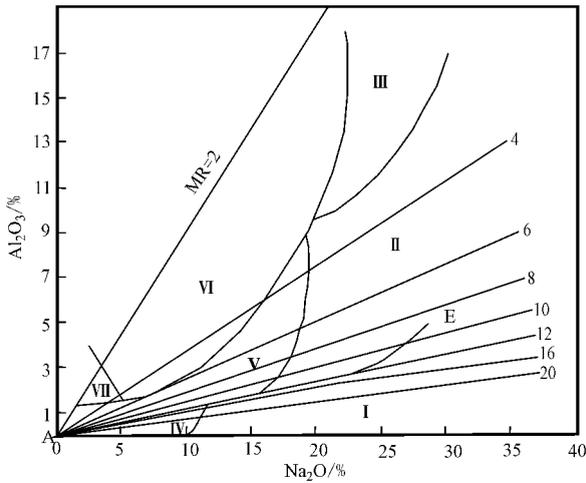


图 4 280℃下 Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 体系固相结晶区域

Fig. 4 Crystallization zone of solid in the system of Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at 280℃

I—NaCa(HSiO<sub>4</sub>), Ca(OH)<sub>2</sub>; II—4Na<sub>2</sub>O·2CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6SiO<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O; III—Ca(OH)<sub>2</sub>, 3Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·4NaAl(OH)<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O; IV—CaO·SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O; V—4Na<sub>2</sub>O·2CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6SiO<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O; 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·xSiO<sub>2</sub>·(6-2x)H<sub>2</sub>O; VI—3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·xSiO<sub>2</sub>·(6-2x)H<sub>2</sub>O, 3Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·NaOH·3H<sub>2</sub>O

显 取 30~45 min 为较佳的反应时间,此时 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率约 85%(表 3)。第二步碱溶得到的铝酸钠溶液(JRY-01)的化学成分分析结果见表 4。

表 3 碱溶反应时间对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶出率的影响

Table 3 Effect of reaction time on the leaching rate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

时间/min	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 溶出率/%
15	83.2
30	84.0
45	86.7
60	88.2

表 4 铝酸钠溶液的化学成分分析结果 g/L

Table 4 Chemical analyses of the sodium aluminate solution

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
JRY-01	3.55	36.6	304.9

### 2.3 氢氧化铝制备实验

第二步碱溶得到的铝酸钠溶液苛性比为 13.7 (表 4),不适合采用碳分或种分法制备氢氧化铝。实验采用生成水合铝酸钙的方法,将高苛性比溶液转化为低苛性比溶液。

按照 CaO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 摩尔比为 3,向前述所得的高苛性比铝酸钠溶液中加入 Ca(OH)<sub>2</sub>,生成水合铝酸钙沉淀,过滤分离得到 NaOH 溶液,循环用于第二步碱溶。化学反应为: 2 NaAl(OH)<sub>4</sub> + 3 Ca(OH)<sub>2</sub> + 3 H<sub>2</sub>O → Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>12</sub> ↓ + 2 NaOH。

用 NaHCO<sub>3</sub> 溶液溶解水合铝酸钙,即得到低苛性比的铝酸钠溶液,化学反应为(谭丹君等,2008): Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>12</sub> + 3 NaHCO<sub>3</sub> → 3 CaCO<sub>3</sub> ↓ + 2 NaAl(OH)<sub>4</sub> + NaOH + 3 H<sub>2</sub>O。

由此得到的铝酸钠溶液的苛性比为 1.5~1.6,经过深度脱硅和碳酸化分解,制备出氢氧化铝制品(AOH-01)。该制品结晶良好(图 5),大量细粒的氢氧化铝附聚为规则的球形颗粒,粒径为 70~80 μm (图 6)。表 5 是制品(AOH-01)的化学成分分析结果,表明该制品达到了氢氧化铝工业产品国标 GB/T 4294-1997 规定的一级标准。

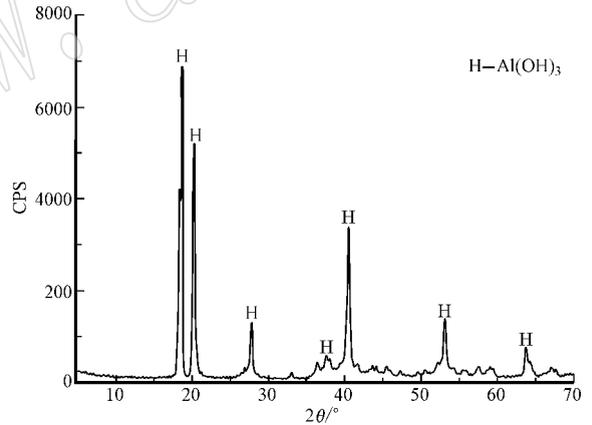


图 5 氢氧化铝制品(AOH-01)的 X 射线粉晶衍射图

Fig. 5 XRD pattern of the aluminum hydroxide product (AOH-01)

### 3 结论

以高铝粉煤灰为原料,第一步碱溶采用浓度为 8 mol/L 的 NaOH 溶液,碱溶温度 95℃,碱溶时间 90 min, SiO<sub>2</sub> 的溶出率可达 38%。碱溶后脱硅粉煤灰中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 质量比由 0.53 提高到了 0.97。第二步碱溶采用浓度为 18~20 mol/L 的 NaOH 溶液,在 260~280℃ 下,脱硅粉煤灰中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率可达 85%。

采用两步碱溶法制备的氢氧化铝制品颗粒直径为 70~80 μm,其性能符合国标 GB/T 4294-1997 规

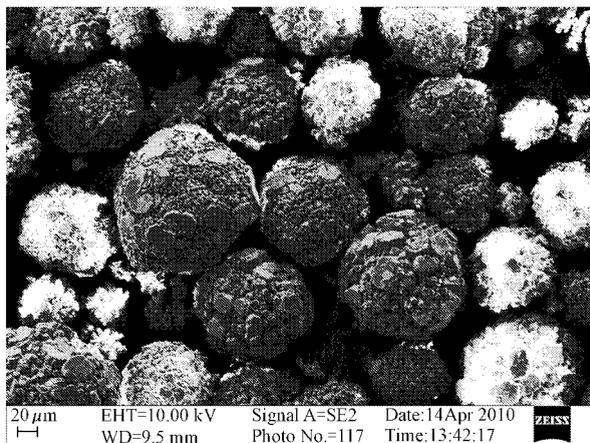


图 6 氢氧化铝制品(AOH-01)的扫描电镜图

Fig. 6 SEM photograph of the aluminum hydroxide product (AOH-01)

表 5 氢氧化铝制品的化学成分分析结果  $w_B/\%$ 

Table 5 Chemical analyses of the aluminum hydroxide product

样品号	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	灼减
AOH-01	64.76	0.019	0.004	0.18	35

定的一级标准。该工艺过程避免了高铝粉煤灰提铝过程中的高温烧结过程,显著降低了能耗;为高铝粉煤灰制备氧化铝提供了一条经济有效的技术途径。

## References

- Bai Guanghui, Teng Wei, Wang Xianggang, *et al.* 2010. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 20: 169~175.
- Bi Shiwen. 2006. The Technology of Alumina[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 128~134(in Chinese).
- Ding Hongya, Ma Hongwen, Gao Fei, *et al.* 2006a. Preparation of alumina from high-aluminum fly ash by improved acid and alkali combination method: an experiment study[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 25(4): 348~352(in Chinese).
- Ding Hongya, Ma Hongwen, Wang Lei, *et al.* 2006b. Preparation of aluminum hydroxide from high-alumina fly ash: an experimental study[J]. Geoscience, 20(3): 405~408(in Chinese).
- Fang Rongli, Lu Sheng and Xie Xiaobin. 2005. Preparation of high purity and ultrafine aluminum hydroxide by using fly-ash in ecology[J]. Chemical Engineering, 33(3): 29~32(in Chinese).
- Fernandez A M, Ibanez J L, Llavona M A, *et al.* 1998. Leaching of aluminum in Spanish clays, coal mining wastes and coal fly ashes by sulphuric

acid[C]. Light Metals: proceeding of Sessions, TMS Annual Meeting, 121~130.

- Ji H M, Lu H X, Hao X G, *et al.* 2007. High purity alumina powders extracted from fly ash by the calcining-leaching process[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, (12): 1657~1660.
- Li Laishi, Zhai Yuchun, Wu Yan, *et al.* 2006. Extracting alumina from fly ash by sulfuric acid[J]. Light Metals, (12): 9~12(in Chinese).
- Matjie R H, Bunt J R and Van Heerden J H P. 2005. Extraction alumina from coal fly ash generated from a selected low rank bituminous South Africa coal[J]. Minerals Engineering, 18(3): 299~310.
- Tan Danjun, Ma Hongwen, Zou Dan, *et al.* 2008. An experimental study of extracting aluminum hydroxide from high caustic sodium alminate solution[J]. Applied Chemical Industry, 37(11): 1320~1324(in Chinese).
- Tang Yun and Chen Fulin. 2008. Extracting alumina from fly ash by soda lime sintering method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 28(6): 73~75(in Chinese).
- Wang Jiadong, Zhai Yuchun and Shen Xiaoyi. 2009. Extracting Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from desilicized fly ash with alkali lime sintering process[J]. Light Metals, (6): 14~16(in Chinese).
- Wang Wenjing, Han Zuozen, Chen Jianguang, *et al.* 2003. The withdrawing of oxidize the aluminum from the fly ash[J]. Energy Environmental Protection, 17(4): 17~19(in Chinese).
- Wu Guodong, Ye Yaping, Qian Weilan, *et al.* 2006. Research on the rules of leaching silicon and aluminum from fly ash in alkaline solution at low temperature[J]. Research of Environmental Sciences, 19(1): 53~56(in Chinese).
- Wu Yan, Zhai Yuchun, Yin Zhen, *et al.* 2009. Study on Mechanical grinding activation fly ash and acid leaching of aluminum oxide[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 29(1): 71~74(in Chinese).
- Yu Chao and Fang Rongli. 2005. The preparation of ultrafine alumina from fly ash[J]. Inorganic Chemicals Industry, 37(12): 47~49(in Chinese).
- Zhang Xiaoyun, Ma Hongwen and Wang Junling. 2005. Preparation of alumina from high-alumina fly ash: an experimental study[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, (4): 27~30(in Chinese).
- Zhao Jianyu and Tian Kai. 2003. Study on extraction of aluminum oxide from fine coal ash by solubilization of ammonium fluoride[J]. Inorganic Chemicals Industry, 35(4): 40~41(in Chinese).
- Zhao Zhe, Sun Peimei, Xue Bing, *et al.* 2008. Study on the influence of sintering condition in alumina leaching process in extracting alumina from fly ash by the way of limestone sinter[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 36(2): 16~18(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 毕诗文. 2006. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 128~134.

- 丁宏娅,马鸿文,高飞,等. 2006a. 改良酸碱联合法利用高铝粉煤灰制备氧化铝的实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 25(4): 348~352.
- 丁宏娅,马鸿文,王蕾,等. 2006b. 利用高铝粉煤灰制备氢氧化铝的研究[J]. 现代地质, 20(3): 405~408.
- 方荣利,陆胜,解晓斌. 2003. 利用粉煤灰制备高纯超细氧化铝粉体的研究[J]. 环境工程, (5): 40~42.
- 李来时,翟玉春,吴艳,等. 2006. 硫酸浸取法提取粉煤灰中氧化铝[J]. 轻金属, (12): 9~12.
- 谭丹君,马鸿文,邹丹,等. 2008. 从高苛性比铝酸钠溶液中制取氢氧化铝的实验研究[J]. 应用化工, 37(11): 1320~1324.
- 唐云,陈福林. 2008. 碱石灰烧结法提取粉煤灰中的氧化铝[J]. 矿冶工程, 28(6): 73~75.
- 王佳东,翟玉春,申晓毅. 2009. 碱石灰烧结法从脱硅粉煤灰中提取氧化铝[J]. 轻金属, (6): 14~16.
- 王文静,韩作振,程建光,等. 2003. 酸法提取粉煤灰中氧化铝的工艺研究[J]. 能源环境保护, 17(4): 17~19.
- 邬国栋,叶亚平,钱维兰,等. 2006. 低温碱溶粉煤灰中硅和铝的溶出规律研究[J]. 环境科学研究, 19(1): 53~56.
- 吴艳,翟玉春,尹振,等. 2009. 粉煤灰酸法提取氧化铝过程的机械研磨活化研究[J]. 矿冶工程, 29(1): 71~74.
- 余超,方荣利. 2005. 精细化利用粉煤灰制备超细氧化铝[J]. 无机盐工业, 37(12): 47~49.
- 张晓云,马鸿文,王军玲. 2005. 利用高铝粉煤灰制备氧化铝的实验研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 27~30.
- 赵剑宇,田凯. 2003. 氟铵助溶法从粉煤灰提取氧化铝新工艺的研究[J]. 无机盐工业, 35(4): 40~41.
- 赵喆,孙培梅,薛冰. 2008. 石灰石烧结法从粉煤灰提取氧化铝的研究[J]. 金属材料与冶金工程, 36(2): 16~18.

www.yskw.ac.cn