

## 粉煤灰提取氧化铝方法研究

肖永丰

(北京低碳清洁能源研究院, 北京 102209)

**摘要:** 粉煤灰中氧化铝含量一般为 17%~35%, 高则可达 40%~60%, 高铝粉煤灰有潜力成为铝土矿的替代铝资源。粉煤灰提铝技术的开发, 对于改善环境、实现资源优化配置具有重要意义, 本文对循环流化床粉煤灰和煤粉炉粉煤灰的形成机理进行了探讨, 循环流化床粉煤灰的结晶性较差, 主要以非晶相为主, 存在少量莫来石和氧化铝等结晶相, 而煤粉炉粉煤灰结晶性较好, 主要结晶相为莫来石和刚玉, 以及少量的非晶相  $\text{SiO}_2$ 。针对不同种类的粉煤灰, 对目前酸法、碱法、硫酸铵法等不同方法提取粉煤灰的工艺进行了比较和探讨。

**关键词:** 粉煤灰; 物相组成; 氧化铝; 盐酸法; 硫酸法; 硫酸铵法

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.027

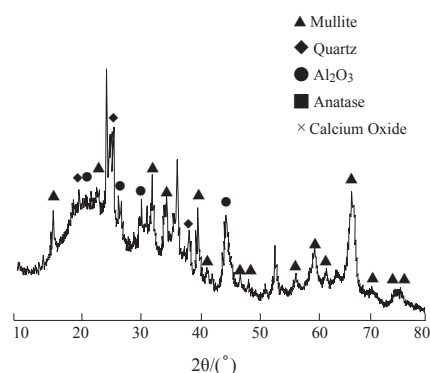
中图分类号: TF80; X773 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0156-07

粉煤灰是燃煤电厂的主要废弃物, 含有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Ga、Li 等多种有用物质, 内蒙地区由于地质因素, 煤炭伴生高岭石、勃姆石等含铝矿物, 经过锅炉燃烧之后产生的粉煤灰中氧化铝的含量可达到 50% 左右<sup>[1]</sup>, 是一种丰富的潜在铝资源<sup>[2-3]</sup>。大量的粉煤灰堆积, 已造成了严重的资源浪费和环境污染问题。因此, 加强粉煤灰综合利用的研究工作, 既可以解决环境污染问题, 又可以缓解我国目前铝土矿的供应危机。然而, 粉煤灰中的铝硅比较铝土矿低, 因此无法直接采用烧结法等生产氧化铝的工艺方法。近年来, 国内外专家学者对粉煤灰提取氧化铝进行了大量的研究工作<sup>[4-9]</sup>。

本文对循环流化床粉煤灰和煤粉炉粉煤灰的形成机理进行了研究和分析, 并针对其形成的粉煤灰的不同特性, 对其提取氧化铝的工艺进行探讨。

## 1 粉煤灰的形成

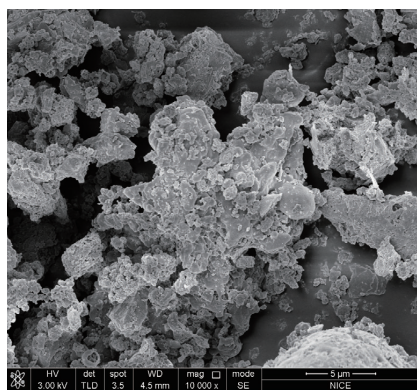
燃煤电厂的锅炉主要为煤粉炉和循环流化床锅炉。煤粉炉主要是将燃煤磨成细煤粉, 将煤粉喷入锅炉内, 然后在 1200℃ 左右的高温下燃烧; 而循环流化床锅炉的燃烧温度为 850℃ 左右<sup>[10-13]</sup>, 两种不同锅炉所形成的粉煤灰存在着明显的差别, SEM 照片见图 1。



(a) XRD 衍射结果

收稿日期: 2019-02-21; 改回日期: 2019-05-31

作者简介: 肖永丰 (1980-), 男, 高级工程师, 主要从事固体废弃物的综合利用。

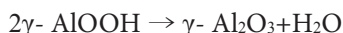
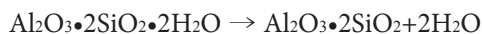


(b)SEM 照片

图1 循环流化床粉煤灰物相组成及微观形貌

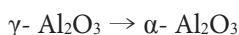
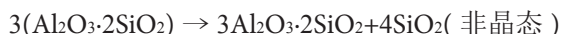
Fig.1 The phase composition and Microstructure of CFB fly ash

煤粉在循环流化床锅炉的燃烧过程中，高岭石、勃姆石等无机物在高温下发生脱水、分解以及反应生成新相等<sup>[14-17]</sup>，在 500℃ ~ 800℃ 之间，高岭石和勃姆石脱去结晶水，晶格被破坏，形成无定型的偏高岭石和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ：



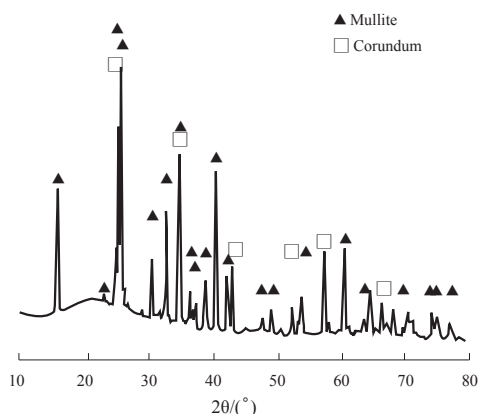
循环流化床在 850℃ 下燃烧，主要发生了高岭石和勃姆石脱去结晶水的反应，其物相组成见图 1(a)，从图中可以循环流化床粉煤灰的结晶性较差，结晶相中有少量的莫来石、氧化铝、石英等物相，在 20 ~ 30° 有明显的非晶峰存在，由于循环流化床燃烧温度低，其粉煤灰未能形成熔融态，因此形成的粉煤灰结构疏松，见图 1(b)，且活性很高。

煤粉炉的燃烧温度可达 1200℃ 以上，随着燃烧温度的提高，上述所形成的偏高岭石和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  继续反应生成稳定物相。在 900 ~ 1100℃ 之间，偏高岭石发生重结晶生成莫来石和非晶态  $\text{SiO}_2$ ， $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  发生相变生成  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ：

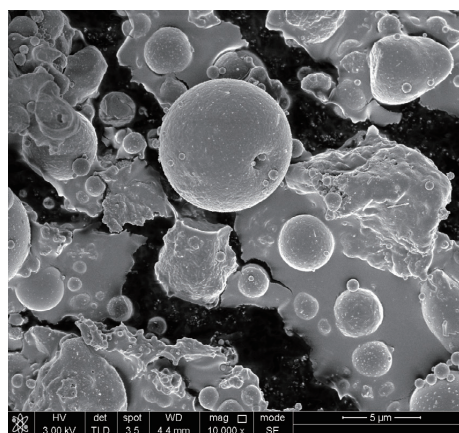


煤粉炉粉煤灰的物相组成见图 2(a)，其主要物相为莫来石和刚玉，在 20 ~ 30° 有非晶峰存在，主要是非晶态  $\text{SiO}_2$ ，粉煤灰经过高温燃烧时形成熔

融态，在骤冷的条件下，形成比较规则的球状颗粒，且结构比较致密<sup>[18]</sup>，并且活性很低，其微观形貌见图 2(b)。



(a)XRD 衍射结果



(b)SEM 照片

图2 煤粉炉粉煤灰物相组成及微观形貌

Fig.2 The phase composition and Microstructure of Of fly ash

由于循环流化床粉煤灰的活性高，可以与酸发生反应形成可溶性的铝盐，实现氧化铝的提取；而煤粉炉粉煤灰的活性很低，因此需要通过加入  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等活化剂高温焙烧将莫来石和  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为可溶性的  $\text{NaAlO}_2$ ，才能对粉煤灰中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  进行提取。下面对不同的氧化铝提取工艺进行分析比较。

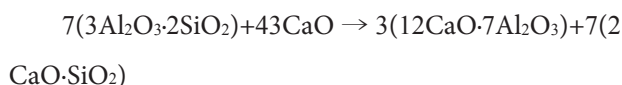
## 2 氧化铝提取工艺

### 2.1 碱法提取氧化铝

#### (1) 石灰石烧结法

石灰石烧结法主要采用粉煤灰和石灰石或生

石灰按一定比例混合后进行高温烧结，一般在 1320-1400℃，烧结过程中发生如下反应。



烧结熟料用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液溶出，12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 于 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液中分解为可溶的 NaAlO<sub>2</sub> 和不溶的 CaCO<sub>3</sub>。铝酸钠溶液经过深度脱硅、碳分、煅烧等工序得到氧化铝产品，CaCO<sub>3</sub> 与 2CaO·SiO<sub>2</sub> 进入渣相，从而实现铝硅分离。

该法为波兰科学院院士杰米克于 20 世纪 50 年代发明，于 1960 年在波兰获得两项专利，并进行了工业化试验<sup>[19]</sup>。赵喆等用石灰石烧结自粉化法处理含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 27.59%、SiO<sub>2</sub> 46.13% 的粉煤灰，烧结温度 1380℃，保温 60 min，出炉温度 800℃ 条件下，氧化铝浸出率可达 79% 以上<sup>[20]</sup>。

### (2) 碳酸钠焙烧法

碳酸钠焙烧法主要工艺为：将粉煤灰和碳酸钠的烧结产物自粉化冷却，加入适量盐酸溶液，形成大量硅胶；多次抽滤洗涤所得胶体在 650℃ 下干燥，得到高比表面积的黑炭，滤液先加入氨水至无沉淀生成，再加入适量的 NaOH 溶液，过滤，滤渣为 Fe(OH)<sub>3</sub> 等杂质，滤液为 NaAlO<sub>2</sub> 溶液，再次加入适量盐酸，可得到 Al(OH)<sub>3</sub> 沉淀，将沉淀低温烘干、煅烧后可得到纳米级 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

徐子芳等<sup>[21]</sup> 采用碳酸钠焙烧工艺从粉煤灰烧结料浸出液中制取高纯超细氢氧化铝，通过控制煅烧制度，得到氧化铝纳米粉体。虽使用该法的报道较少，但其可制备出粉煤灰高附加值产品白炭黑及纳米级 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，具有深入研究的价值。

### (3) 预脱硅 - 碱石灰烧结法

预脱硅 - 碱石灰烧结法是以氢氧化钠溶液浸出粉煤灰中非晶态的 SiO<sub>2</sub>，以 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 形式进入溶液，脱硅粉煤灰与碳酸钠和石灰石进行混合烧结，粉煤灰中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 结合转变为可溶性的 NaAlO<sub>2</sub>，SiO<sub>2</sub> 与石灰转变为不溶性的 Na<sub>2</sub>CaSiO<sub>4</sub>。熟料经破

碎、溶出、分离、一段脱硅、二段脱硅、碳酸化分解等工艺过程得到 Al(OH)<sub>3</sub>，最后焙烧为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 产品，Na<sub>2</sub>CaSiO<sub>4</sub> 经过脱碱后可得到偏硅酸钙 CaSiO<sub>3</sub>。预脱硅液进行碳分得到白炭黑产品 SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O，白炭黑产品可作为生产超白玻璃及合成分子筛的原料，试验过程中碱液可循环利用，工艺流程见图 3。

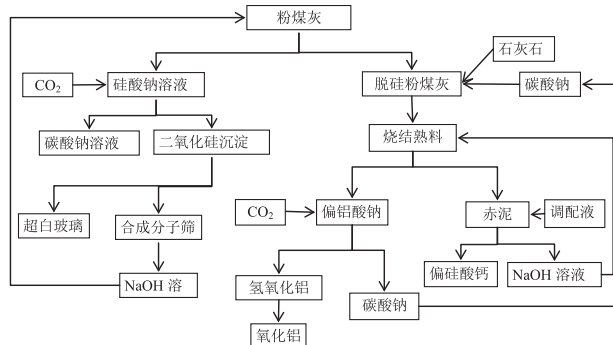


图 3 改进型预脱硅 - 碱石灰烧结法工艺

Fig. 3 Improved process of pre-desilication soda-lime sintering

孙琦等<sup>[22-23]</sup> 采用改良型预脱硅 - 碱石灰烧结法处理含 SiO<sub>2</sub> 37.8%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 48.5% 的高铝粉煤灰，在 NaOH 浓度 15%，预脱硅温度 95℃，预脱硅时间 4 h，灰碱质量比 1:0.5，烧结温度 1050℃ 条件下，氧化铝的溶出率可达 90% 以上，目前该工艺已经完成万吨级的中试运行。

## 2.2 酸法提铝技术

### (1) 盐酸法

盐酸法将循环流化床粉煤灰与浓盐酸混合后进行溶出，其工艺流程见图 4。

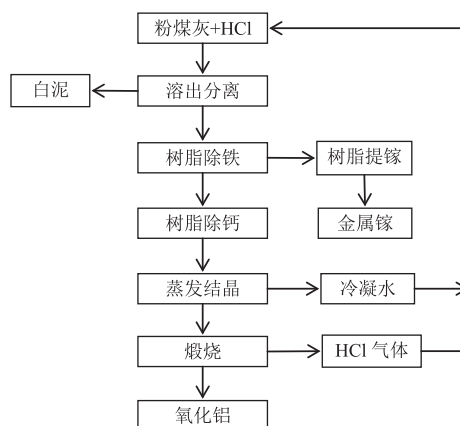


图 4 “一步酸溶法”工艺

Fig. 4 One-step acid solubility method process

粉煤灰中铝及其他金属元素以氯化盐的形式溶解在溶液中，通过固液分离后得到粗氯化铝溶液，然后通过树脂对 FeCl<sub>3</sub>、CaCl<sub>2</sub> 等主要杂质进行吸附处理，GaCl<sub>3</sub> 在树脂除铁的过程中得到了富集，通过提镓树脂进行吸附可得到纯 GaCl<sub>3</sub> 溶液，经过电解之后可以得到金属镓产品。经过树脂除杂后得到精制的氯化铝溶液，在结晶器中进行蒸发结晶得到结晶氯化铝 (AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)，氯化铝晶体经过焙烧后得到氧化铝产品，HCl 气体通过吸收后得到盐酸进行循环溶出。

目前，由神华集团开发的“一步酸溶法”工艺的 4000 t/y 的中试项目已完成试车运行，生产出合格的氧化铝产品以及 4N 级的金属镓产品。

### (2) 硫酸直接浸取法

硫酸直接浸取法是以硫酸和流化床粉煤灰为原料，将粉煤灰磨细焙烧活化，用硫酸浸出，浸出液经浓缩制得硫酸铝结晶。硫酸铝结晶经煅烧、碱溶、除铁、晶种分解、氢氧化铝煅烧等过程制备出冶金级氧化铝。该工艺采用细磨焙烧活化工艺，避免了用氟化物作为助溶剂对环境造成的污染；同时对浸出后产生的高硅渣进行除炭、表面处理，试制出一种新型填充料。酸法铝的溶出率低于氟铵助溶法铝的溶出率，且酸法使用过量浓硫酸对反应容器的材质要求较高。

李来时等<sup>[24]</sup>研究了硫酸浸取法从粉煤灰中提取氧化铝，回收率最高可达 93.2%。较佳试验条件为：浓硫酸在 85 ~ 90 °C 下溶出，浸出时间 40 ~ 90 min，硫酸铝溶液在 110 ~ 120 °C 浓缩，以 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O 形式析出，在 810 °C 左右煅烧该晶体 4 ~ 6 h，生成活性强的 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，碱溶制得氢氧化铝，1100 °C 下煅烧制备出冶金级氧化铝。

### (3) 氟铵助溶法

氟铵助溶法是利用粉煤灰与酸性氟化铵水溶液共热，直接破坏 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 键，使硅铝网络结构变为活性硅铝溶于水中。氟化铵与粉煤灰中的二

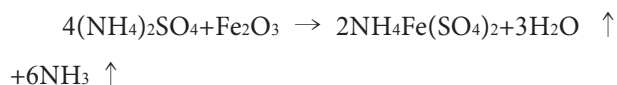
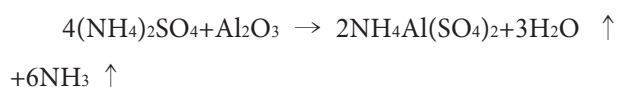
氧化硅反应生成了氟硅酸铵，氟硅酸铵在过量氨的作用下，可全部分解为二氧化硅和氟化铵，从而实现了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 从粉煤灰的内部溶出。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进一步与烧碱反应，溶液经过调整除杂，去除 Fe、Ca 等杂质，再经碳酸化和热解等步骤制得 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。采用氟铵助溶法提取氧化铝的反应基本上处于常温常压下操作，避免了高温烧结工艺，还可联产白炭黑、纯碱等副产品，既节约了能源，又降低了成本。但采用氟化物作为助溶剂来提高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活性，不但有可能对环境造成污染，而且对容器的材质要求提高，从而增加成本。

赵剑宇等<sup>[25-26]</sup>按照氟化铵与粉煤灰物料质量比为 2:1，反应温度 96 °C，反应时间为 1 h，pH 值控制在 9.0，通入 CO<sub>2</sub> 碳酸化，热解 Al(OH)<sub>3</sub> 沉淀，氧化铝的提取率可达到 97%。

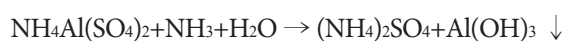
## 2.3 其他提铝方法

### (1) 硫酸铵烧结法

硫酸铵法提取氧化铝的主要原理是利用硫酸铵在 350 ~ 400 °C 的熔融状态下与粉煤灰中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生烧结反应，生成易溶于水的 NH<sub>4</sub>Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 和 NH<sub>4</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>，而粉煤灰中的 SiO<sub>2</sub> 不参与反应，将烧结熟料用热水或者浓度较低的硫酸铵溶液进行溶出，然后进行过滤，分离出未参加反应的硅渣。烧结过程中主要的反应有：



利用 NH<sub>4</sub>Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 和 NH<sub>4</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 在水中的溶解度差异，用重结晶法将 NH<sub>4</sub>Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 与 NH<sub>4</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 进行分离提纯，将提纯后的 NH<sub>4</sub>Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 重溶于热水中，通入氨气进行分解，生成 Al(OH)<sub>3</sub>，主要的反应有：



所得到的氢氧化铝与溶液进行过滤分离并洗

涂，分离出的氢氧化铝粒度较小，经过焙烧得到纳米级的氧化铝。硫酸铵溶液经过蒸发得到硫酸铵固体返回烧结工序进行配料，其工艺流程见图 5。

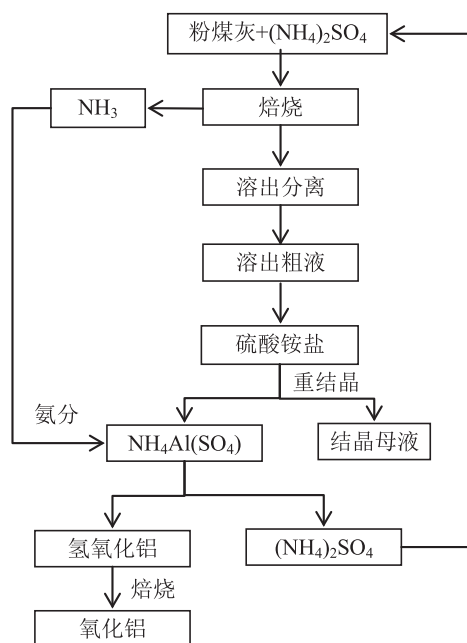


图 5 硫酸铵法提取氧化铝工艺流程

Fig. 5 Ammonium sulfate roasting process

在国外，H.C.Park 等<sup>[27]</sup>以硫酸铵为助剂，用低温烧结法从粉煤灰中制备了高纯度的氧化铝，最后的煅烧过程采用微波加热替代，跟传统的煅烧方式对比，制备的氧化铝比表面积更大粒度更小。

李来时等<sup>[28-29]</sup>研究了硫酸铵法提取氧化铝，在较佳条件下氧化铝的提取率可达到 95.6%，但是其研究方法是利用重结晶法对硫酸铝铵进行提纯，存在能耗大、提纯率不高等问题。

### 3 酸碱联合法

酸碱联合法就是先用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  以一定比例和粉煤灰混合焙烧，然后用稀盐酸（或者稀硫酸）进行溶解，生成硅胶和  $\text{AlCl}_3$  或者  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液，将硅胶过滤用于进一步制备白炭黑，对滤液进行除杂后加入  $\text{NaOH}$  进行中和，溶液达到一定 pH 值后沉淀出  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ，最后煅烧  $\text{Al}(\text{OH})_3$  得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

丁宏娅等<sup>[30]</sup>以高铝粉煤灰为原料， $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为助剂，经中温烧结、酸溶除硅、碱溶除铁、加入

铝酸钡除微量硅后，制得较纯净的铝酸钠溶液，向该溶液中加入  $\text{Al}(\text{OH})_3$  晶种，采用种分分解法制备得到  $\text{Al}(\text{OH})_3$  沉淀，于  $1200^\circ\text{C}$  煅烧 2 h 后，制得  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，性能达到国标 GB 8178-87 三级标准。

酸碱混合法在将粉煤灰中超过 90% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  提出的同时，也将其中的大部分  $\text{SiO}_2$  提取出来，提出的  $\text{SiO}_2$  既可以制作硅胶，也能进一步制备白炭黑。酸碱混合法的强酸、纯碱（或者苛性碱）消耗量过大，且  $\text{AlCl}_3$  溶液中 Fe、Ti 等杂质难以去除，这些都是限制该技术方案产业化的不利因素。

### 4 讨论

(1) 酸法优势在于粉煤灰的主要成分  $\text{SiO}_2$  不进入酸液；但缺点是粉煤灰中其他金属随铝一起进入浸取液，影响氧化铝产品纯度，且浓硫酸对设备材质要求高，生产成本低。

(2) 碱法的优势在于其他金属杂质的干扰小，但由于硅随铝一起溶解于碱液中，面临的困难是必须脱硅，并且有能耗高、渣量大的缺点。

(3) 酸碱联合法在提取出粉煤灰中大部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的同时，也将其中大部分  $\text{SiO}_2$  提取出来。然而强酸强碱消耗量较大，且溶液中的 Fe、Ti 等杂质较难去除，产生大量低附加值的副产品  $\text{NaCl}$ 。

因此，需积极探索氧化铝生产的新途经。用合理的方法从粉煤灰中提取氧化铝，既能拓宽氧化铝的来源渠道，从一定程度上缓解我国氧化铝的供求矛盾，又能节约铝资源，遏制我国铝土矿资源加速枯竭的趋势，且适应国家的经济发展新战略。

### 参考文献：

[1] 赵蕾, 代世峰, 张勇, 等. 内蒙古准格尔燃煤电厂高铝粉煤灰的矿物组成与特征 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1138-1172.  
 Zhao L, Dai S F, Zhang Y, et al. Mineral Composition and Characteristics of High-alumina Coal Ash in Zenger Coal-fired Power Plant in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Coal, 2008, 33 (10) : 1138-1172.  
 [2] 张战军. 利用高铝粉煤灰生产氧化铝技术经济分析 [C].

2009年清洁高效燃煤发电技术协作网年会。

Zhang Z J, Technical and Economic Analysis of Alumina Production from High Aluminum Fly Ash[C]. 2009 Annual Meeting of the Clean and Efficient Coal-fired Power Generation Technology Collaboration.

[3] 奚新国,许钟梓. 浅论粉煤灰资源化技术[J]. 粉煤灰, 2003(2): 46-47.

Xi X G, Xu Z Z. Status Quo and prospect of fly ash resourceization technology. [J]. Fly Ash, 2003(2): 46-47.

[4] YF Xiao, BD Wang, XT liu, XH Wang, LJ Zhao, GZ Yu, Q Sun. Mechanism and kinetics Study of Sintering Process for Alumina Recovery from Fly Ash. Advanced Materials Research Vols. 2014(955-959) 2824-2830.

[5] Canty, G., Everett, J.. Alkaline injection technology: Field demonstration. Fuel, Vol. 85, pp 2545-2554.

[6] R.H. Matjie, J.R. Bunt, et al. Extraction of alumina from coal fly ash generated from a selected low rank bituminous South African coal, Minerals Engineering, Vol. 18, pp 299-310.

[7] 杨权成,马淑花,谢华,等. 高铝粉煤灰提取氧化铝的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2012(3):3-7.

Yang Q C, Ma S H, Xie H, et al. Research Progress of Extracting Alumina from High-aluminum Fly Ash [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(3):3-7.

[8] Y.X. Guo, Y.Y. Li, F.Q. Cheng, M.Wang, X.M. Wang. Role of additives in improved thermal activation of coal fly ash for alumina extraction. Fuel Processing Technology. Volume 110, June 2013, Pages 114-121.

[9] J. Kumaoto, Recovery of metal oxides from fly ash, Kobelco Technology Review 7 (1990) 53-57.

[10] 李军旗,宫敏,金会心,等. 不同燃烧方式粉煤灰性质研究[J]. 粉煤灰, 2010(5): 12-14.

Li J Q, Gong M, Jin H X, et al. Research on Pulverized Coal Ash Character with Different Combustion Way [J]. Fly Ash, 2010(5): 12-14.

[11] 刘芳,顾国维,韩作振. 锅炉类型与粉煤灰的物相特征[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003(8): 990-994.

Liu F, Gu G W, Han Z Z. Type of Boilers and Characteristic of Crystalline Phases of Fly Ash [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003(8):990-994.

[12] 王恩. 煤粉炉粉煤灰与循环流化床粉煤灰矿物学性质比较[J]. 洁净煤技术, 2016(4):17-20.

Wang A. Mineralogy Properties Comparison of PC Fly Ash and CFB Fly Ash[J]. Clean Coal Technology, 2016(4):17-20.

[13] 杨勇. 循环流化床锅炉粉煤灰综合利用研究[J]. 露天采

矿技术, 2011(1):25-28.

Yang Y. Research on Integrated Utilization of CFB Fly Ash [J]. Opencast Mining Technology, 2011(1)25-28.

[14] 肖永丰,孙琦,张中华,等. 循环流化床粉煤灰及其提铝残渣的结构特征[J]. 轻金属, 2016(10):31-33.

Xiao Y F, Sun Q, Zhang Z Z, et al. Structure Characteristics of CFB Fly Ash and Alumina Recovery Residue [J]. Light Metal, 2011(1):1-33.

[15] 邵龙义,陈江峰,吕劲,等. 燃煤电厂粉煤灰的矿物学研究[J]. 煤炭学报, 2004,29(8):448-452.

Shao L Y, Chen J F, Lv J, et al. Mineralogy Study of Coal Ashes in the Coal-fired Power Plant [J]. Journal of China Coal Society, 2004,29(8):448-452.

[16] 邵靖邦,邵绪新,王祖讷. 煤中矿物成分对粉煤灰性质的影响[J]. 煤炭加工与综合利用, 1996(6):37-41.

Shao J B. Shao C X, Wang Z N. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1996(6):37-41.

[17] 邵龙义,陈江峰,石玉珍. 准格尔电厂炉前煤矿物组成及其对高铝粉煤灰形成的贡献[J]. 煤炭学报, 2007,32(4):411-415.

Shao L Y, Chen J F, Shi Y Z. Minerals in Feed Coal and Their Contribution to High-alumina Fly ash in the Jungar Power Plant [J]. Journal of China Coal Society, 2007,32(4):411-415.

[18] 孙俊民,韩德馨,姚强,等. 燃煤飞灰的显微颗粒类型与显微结构特征[J]. 电子显微学报, 2001,20(2):140-147.

Sun J M, Han D X, Yao Q, et al. Classification and characteristics of micro-particles in fly ash from coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2001,20(2):140-147.

[19] 刘克,孙鸿铮. 用粉煤灰生产高纯氧化铝和高标号水泥[J]. 能源工程, 1990, 10(4): 27-31.

Liu K, Sun H J. Production of high purity alumina and high grade cement from fly ash [J]. Energy Engineering, 1990, 10(4): 27-31.

[20] 赵喆,孙培梅,薛冰,等. 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, 2008, 36(2): 16-18.

Zhao Z, Sun P M, Xue B, et al. 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, 2008, 36(2): 16-18.

[21] 徐子芳,张明旭,李新运. 用低温煅烧法从粉煤灰中提取纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> [J]. 非金属矿, 2009, 32(1):27-30.

Xu Z F, Zhang M X, Li X Y. Extraction of Nano- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and

SiO<sub>2</sub> [J]. Non-Metallic Mines, 2009, 32 (1):27-30.

[22] 刘晓婷, 王宝冬, 肖永丰, 等. 高铝粉煤灰碱溶预脱硅过程研究 [J]. 中国粉体技术, 2013 (6).

Liu X T, Wang B D, Xiao Y F, et al. Pre-desilication Process of Alumina-rich Fly Ash in Alkali Solution [J]. China Powder Science and Technology, 2013 (6).

[23] 肖永丰, 张中华, 赵利军, 等. 煤灰提取氧化铝及中间产物的利用和产品开发 [C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2016:3480-3484.

Xiao Y F, Zhang Z Z, Zhao L J, et al. Utilization and Production Development of alumina and intermediate products from coal ash extraction [C]. Proceedings of the Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Science, 2016:3480-3484.

[24] 李来时, 翟玉春, 吴艳, 等. 硫酸浸取法提取粉煤灰中氧化铝 [J]. 轻金属, 2006 (12): 9-12.

Li L S, Zhai Y C, Wu Y, et al. Extracting Alumina from Fly Ash by Sulfuric Acid [J]. Light Metal, 2006 (12): 9-12.

[25] 赵剑宇, 田凯. 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, 2003, 35 (4): 40-41.

Zhao J Y, Tian K. Study on Extraction of Alumina Oxide from Fine Coal Ash by Solubilization of Ammonium Fluoride [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2003, 35 (4): 40-41.

[26] 赵剑宇, 田凯. 微铵助溶从粉煤灰提取氧化铝新工艺研究 [J]. 无机盐工业, 2005, 37 (2): 47-49

Zhao J Y, Tian K. Study on Extraction of Alumina Oxide from Fine Coal Ash by microwave solubility [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2005, 37 (2): 47-49

[27] Park H.C., Park Y.J., Stevens R. Synthesis of alumina from high purity alum derived from coal fly ash [J]. Materials Science and Engineering, 2004 367(1/2): 166-170

[28] 李来时, 刘瑛瑛. 硫酸铵粉煤灰混合焙烧制备氧化铝的热力学讨论 [J]. 轻金属, 2009 (9): 12-14.

Li L S, Liu Y Y. Thermodynamics of Extracting Alumina from Fly Ash by Ammonium Sulfate Calcination Process [J]. Light Metal, 2009 (9): 12-14.

[29] 李来时, 翟玉春. 以粉煤灰为原料制备高纯氧化铝 [J]. 化工学报, 2006 (9): 2 189-2 193.

Li L S, Zhai Y C. Extracting High-Purity Alumina from Fly Ash [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006 (9): 2 189-2 193.

[30] 丁宏娅, 马鸿文, 高飞, 等. 改良酸碱联合合法利用高铝粉煤灰制备氧化铝的试验研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25 (4): 348-352.

Ding H Y, Ma H W, Gao F et, al. Preparation of Alumina from High-aluminum Fly Ash by Improved Acid and Alkali Combination Method: An Experimental Study. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25 (4): 348-352.

## Study on the Methods of Leaching Alumina from Fly Ash

Xiao Yongfeng

( National Institute of Clean-and-Low Carbon Energy, Beijing, China)

**Abstract:** The alumina content in fly ash generally is 17% ~ 35%, even 40% ~ 60%, and high alumina fly ash is a potential alumina resource instead of bauxite. The development of technology in recovering alumina from fly ash is very important for environment improvement and resource distribution optimization. The formation of CFB and oF fly ash was studied, the main phase of CFB fly ash was amorphous phase with few crystalline phase of mullite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while the main phase of oF fly ash was mullite and corundum with few amorphous phase, the different methods of extracting alumina from fly ash were discussed, such as acid leaching method, alkali method, Ammonium sulfate roasting process.

**Keywords:** Fly ash; Phase composition; Alumina; Acid leaching method; Alkali method; Ammonium sulfate roasting process