

# 粉煤灰焙烧活化过程中矿物质变化规律

胡永健,王志刚,付世辉,厉云龙,张鑫,李峻坤

(德州学院 化学化工学院,山东 德州 253023)

**摘要:**为探究不同活化剂对粉煤灰活化作用机理,选取燃烧和气化2种工艺的粉煤灰,分别与碳酸钠、碳酸钙、硫酸铵和浓硫酸混合后焙烧活化,采用XRD分析焙烧活化后的矿物质变化规律,结果表明:燃烧灰中铝元素主要以莫来石形式存在,气化灰主要以透辉石形式存在,碳酸钠焙烧活化后主要形成霞石,最佳活化温度为1 000℃;碳酸钙焙烧活化后主要生成钙长石,最佳活化温度为1 300℃;硫酸铵焙烧活化后主要形成硫酸铝铵,最佳活化温度为500℃,在550℃时硫酸铝铵分解生成硫酸铝,硫酸铵活化可生成含硫和含氮气体;硫酸焙烧活化后主要生成硫酸铝,最佳活化温度为400℃。活化过程中气化灰中的钙易形成硬石膏,提高活化剂硫酸铵和硫酸的用量。4种活化剂的活化温度依次为碳酸钙>碳酸钠>硫酸铵>浓硫酸,因此活化温度低的浓硫酸活化法更具有发展前景。

**关键词:**粉煤灰;矿物质;焙烧;活化;提铝

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)06-0055-05

## Mineral change law of coal fly ash in the process of roasting activation

HU Yongjian, WANG Zhigang, FU Shihui, LI Yunlong, ZHANG Xin, LI Junkun

(Department of Chemistry, Dezhou University, Dezhou 253023, China)

**Abstract:** In order to explore the activation mechanism of different activators on fly ash, fly ash from combustion and gasification industries was roasted and activated by mixing with sodium carbonate, calcium carbonate, ammonium sulfate and concentrated sulfuric acid, respectively. The changes of minerals after calcination and activation were analyzed by XRD. The results show that the aluminum in combustion ash is mainly in the form of mullite, while the gasification ash is mainly in diopside form. The sodium carbonate tends to form nepheline after calcination and activation, and its optimum activation temperature is 1 000℃. Calcium carbonate is calcined to form calcium feldspar, and the optimum activation temperature is 1 300℃. Ammonium sulfate tends to form aluminum ammonium sulfate, and its optimum activation temperature is 500℃. Aluminum ammonium sulfate could be decomposed into aluminum sulfate at 550℃; and ammonium sulfate activates to produce sulfuric acid and nitrogen containing gases. The aluminum sulfate is the predominant product after sulphuric acid calcination and activation, and the optimum activation temperature is 400℃. Calcium in gasification ash is easily to form anhydrite during activation, and this increases the amount of ammonium sulfate and sulfuric acid. The activation temperature of those four activators is in order of calcium carbonate>sodium carbonate>ammonium sulfate>concentrated sulfuric acid. Therefore, the concentrated sulfuric acid activation method with low activation temperature is more promising.

**Key words:** coal fly ash; mineral; roasting; activation; aluminum extraction

## 0 引言

粉煤灰的排放占用大量土地,同时对生态和环境造成严重破坏。粉煤灰综合利用一直是人们所关注的问题,粉煤灰主要成分为 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,其中 $\text{Al}_2\text{O}_3$

目前我国电厂每年排出粉煤灰达到6亿多 $\text{t}^{[1]}$ ,

收稿日期:2018-05-14;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18051401

基金项目:国家大学生创新创业训练计划资助项目(201710448024);国家自然科学基金资助项目(21706027);山东省自然科学基金资助项目(ZR2016BI23);德州学院科技计划资助项目(2016kjrc11)

作者简介:胡永健(1997—),男,山东潍坊人,主要从事固废利用研究。E-mail:look111look@163.com。通讯作者:王志刚(1983—),男,副教授,博士,从事气化技术与固废利用研究。E-mail:wangzhigang158@163.com

引用格式:胡永健,王志刚,付世辉,等.粉煤灰焙烧活化过程中矿物质变化规律[J].洁净煤技术,2018,24(6):55-59.

HU Yongjian, WANG Zhigang, FU Shihui, et al. Mineral change law of coal fly ash in the process of roasting activation[J].

Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 55-59.



移动阅读

含量可达 20% ~ 40%, 甚至更高, 我国是铝土矿资源短缺的国家, 严重制约了我国氧化铝工业的发展, 粉煤灰提铝可以变废为宝, 具有重要的现实意义和工业价值<sup>[2]</sup>。

粉煤灰中硅含量影响铝的浸出效果, 目前主要通过粉煤灰焙烧活化来提高铝的浸出效率。第 1 种方法是石灰石焙烧法, 薛淑红<sup>[3]</sup>将石灰与粉煤灰在 1 300 °C 焙烧后, 氧化铝的溶出率达到 90% 以上; 唐云等<sup>[4]</sup>考察了石灰烧结条件对粉煤灰烧结熟料中氧化铝溶出率的影响, 影响顺序为碱比 > 烧结温度 > 钙比 > 烧结时间; Zhang 等<sup>[5]</sup>考察了微波对石灰石焙烧活化粉煤灰的影响, 微波可降低 400 °C 烧结温度, 同时减少 20 倍的活化时间。第 2 种方法是碳酸钠焙烧法, 张凤霞等<sup>[6]</sup>研究表明, 碳酸钠与粉煤灰的活化反应温度高于 700 °C 时, 粉煤灰中大部分的石英和莫来石得到活化, 有利于下一步的提取; 王金磊等<sup>[7]</sup>考察了碳酸钠与粉煤灰 900 °C 烧结样中铝、铁、硅的酸浸规律; 代红等<sup>[8]</sup>研究了粉煤灰碳酸钠烧结工艺中影响锂浸出规律, 锂浸出率可以达到 65%; 刘能生等<sup>[9]</sup>研究了粉煤灰碳酸钠焙烧与酸浸提铝的动力学, 酸浸后铝浸出率超过 94.99%, 活化过程符合 Crank - Ginstling - Braunshtein 模型, 表观活化能为 117.06 kJ/mol, 活化反应受固膜扩散控制; 缪应菊等<sup>[10]</sup>以碳酸钠为活化剂活化粉煤灰, 考察碳酸钠和粉煤灰体系的含水量、粒度、质量配比、升温方式等对活化效果的影响, 活化温度和体系质量配比是主要因素。第 3 种方法是硫酸铵焙烧法, 李来时等<sup>[11]</sup>利用热力学的方法结合热重试验分析了硫酸铵焙烧活化及硫酸铝铵分解的反应过程, 粉煤灰中氧化铝提取率可达 96%; 晋新亮等<sup>[12]</sup>采用

硫酸铵 400 ~ 450 °C 焙烧活化粉煤灰, 形成活性物质硫酸铝铵, 并探讨了焙烧温度、混料比、酸浸反应时间、酸浸温度、硫酸质量分数及液固比等对硫酸铵焙烧活粉煤灰中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  提取率的影响; 隋丽丽等<sup>[13]</sup>采用正交试验, 考察了各因素对硫酸铵焙烧提氧化铝影响, 各因素的影响顺序为焙烧时间 > 焙烧温度 > 硫酸铵与粉煤灰质量比。张文等<sup>[14]</sup>采用硫酸铵 570 °C 焙烧活化粉煤灰, 形成活性物质硫酸铝。第 4 种方法是浓硫酸焙烧活化, 范艳青等<sup>[15]</sup>考察了焙烧温度、时间、酸矿比、粒度等对粉煤灰硫酸化焙烧提取氧化铝的影响, 最佳工艺条件下, 氧化铝浸出率可达 87%; 杨敬杰等<sup>[16]</sup>研究了硫酸/硫酸铵混合助剂焙烧粉煤灰提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 加入混合助剂 400 °C 焙烧后, 可将粉煤灰中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为  $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ 。目前的研究主要针对碳酸钙、碳酸钠、硫酸铵或浓硫酸分别焙烧活化粉煤灰时铝的浸出规律, 而不同活化剂对粉煤灰焙烧活化过程中矿物质变化的研究鲜见报道。

本文选择气化和燃烧 2 种工艺的典型粉煤灰, 系统考察碳酸钙、碳酸钠、硫酸铵和浓硫酸 4 种焙烧活化方法过程中的矿物质变化规律。

## 1 试 验

### 1.1 原料

燃烧粉煤灰(FA)取自山东某电厂煤粉炉灰, 煤气化灰(GA)取自山东某煤化工企业水煤浆气流床气化灰渣。将 2 种原料分别在马弗炉 850 °C 烧失 2 h 后进行元素分析, 其组成见表 1。FA 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高达 35.23%,  $\text{SiO}_2$  含量也较高; GA 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量也达到 29.99%,  $\text{CaO}$  含量高达 15.64%。所用试剂碳酸钠、碳酸钙、硫酸铵和浓硫酸均为分析纯。

表 1 原煤的灰成分分析

Table 1 Chemical composition of fly ash

| 原料 | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ |
|----|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| FA | 49.36          | 35.23                   | 3.70                    | 5.49         | 1.29         | 1.25           | 1.83          | 0.87                 | 0.98                  |
| GA | 45.18          | 29.99                   | 3.32                    | 15.64        | 1.16         | 1.12           | 1.64          | 0.78                 | 0.88                  |

### 1.2 试验方法

称取烧失后粉煤灰 1 g 于研钵中, 按化学反应的计量关系加入一定量的硫酸铵、碳酸钠或碳酸钙, 搅拌、研磨混合均匀, 得到配入活化剂的粉煤灰。浓硫酸活化时, 加入浓硫酸后加入一定量无水乙醇, 搅

拌混合均匀, 烘干后研磨, 得到配入活化剂浓硫酸的粉煤灰。配入活化剂的粉煤灰置于一定温度的马弗炉中, 焙烧 2 h, 取出冷却, 研磨, 采用德国 Bruker D8AA25 X-射线衍射仪对焙烧物料进行分析表征。图 1 为原粉煤灰的 XRD 谱图, FA 主要由莫来石

( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ )、石英( $\text{SiO}_2$ )、刚玉( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和无定型矿物质组成,GA中Ca含量比较高,其主要矿物质为Ca、Fe和Mg形成的硅铝酸盐透辉石晶体矿物质以及无定型矿物质。由于气流床气化温度明显高于煤粉炉燃烧温度,GA中无定型矿物含量较高,焙烧活化2 h后,活化反应趋于平衡,活化过程中形成的含Al晶体矿物质有利于Al的浸出<sup>[9]</sup>,因此本文主要研究活化后晶体矿物质的变化。

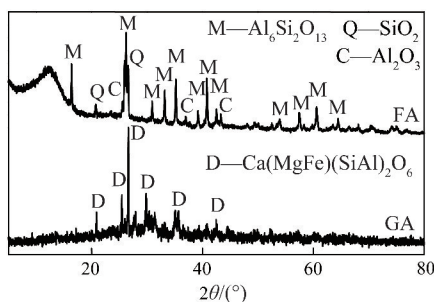


图1 粉煤灰FA和GA的XRD谱图

Fig. 1 XRD pattern of coal ash FA and GA raw material

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳酸钠活化矿物质的变化

图2为碳酸钠活化后FA、GA的XRD谱图。由图2(a)可知,800℃时,碳酸钠活化后的粉煤灰中莫来石( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ )衍射峰强度明显减弱,形成新物相——霞石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ),随温度继续升高,莫来石的衍射峰强度降低,霞石的衍射峰强度增加。1000℃时,莫来石的特征衍射峰基本消失,霞石的衍射峰强度最强,因此,碳酸钠活化粉煤灰最佳温度为1000℃。碳酸钠活化粉煤灰的过程是碳酸钠与莫来石和石英反应生成沸石,其主要反应方程式为

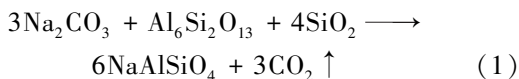


图2(b)为碳酸钠不同温度焙烧活化后GA灰的XRD谱图,可知,800℃时,透辉石衍射峰消失,形成新物相——霞石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )和钙黄长石( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ),随温度继续升高,霞石的衍射峰强度略有降低,在900℃形成方石( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4$ )。1000℃时,钙黄长石和方石的特征衍射峰最强,霞石的衍射峰略有降低,GA中钙含量高,对碳酸钠活化粉煤灰起一定的促进作用,800℃时霞石含量最高。

### 2.2 碳酸钙活化矿物质的变化

图3为碳酸钙活化后FA的XRD谱图,1000

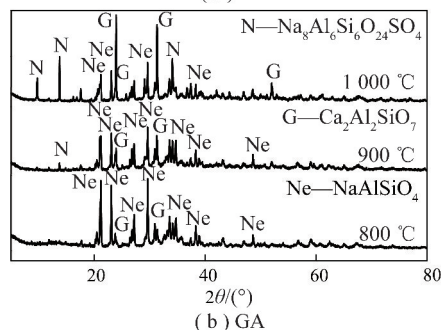
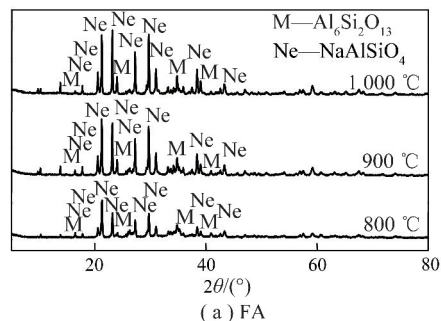
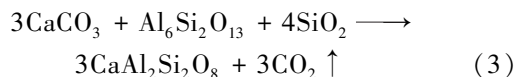
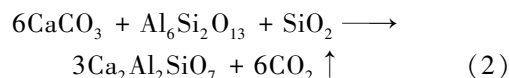


图2 碳酸钠活化后FA、GA的XRD谱图

Fig. 2 XRD pattern of FA and GA after roasting with sodium carbonate

℃时,碳酸钙活化后的FA形成新物相——钙长石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )和钙黄长石( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ )。随温度升高,莫来石和钙黄长石衍射峰强度降低,钙长石的衍射峰强度增加;1200℃时,灰中的钙黄长石转化为钙长石;1300℃时,晶相矿物质主要是钙长石,莫来石特征衍射峰消失。由于GA中钙含量较高, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 主要以含钙矿物质形式存在,因此本文并未考察碳酸钙活化GA的矿物质变化。碳酸钙活化粉煤灰的过程是碳酸钙与莫来石和石英反应生成钙黄长石和钙长石的过程。其主要反应方程式为



### 2.3 硫酸铵活化矿物质的变化

图4(a)为碳酸钙活化后FA的XRD谱图,400℃时,硫酸铵活化后FA形成新物相——硫酸铝铵和硬石膏,随温度升高,莫来石的衍射峰强度降低,硫酸铝铵衍射峰强度增加;500℃时,硫酸铝铵衍射峰的强度达到最大值,而莫来石的衍射峰的强度最低,但550℃时,硫酸铝铵的特征衍射峰消失,形成新的矿物质——硫酸铝。这是由于灰中的莫来石在400~500℃与硫酸铵反应生成硫酸铝铵,硫酸铝铵在550℃分解生成硫酸铝。其主要反应方程式为



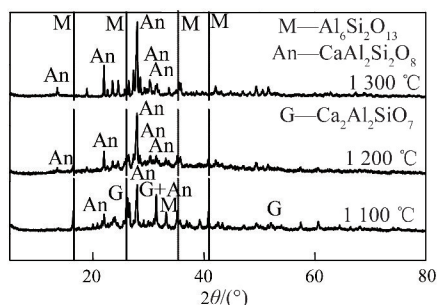
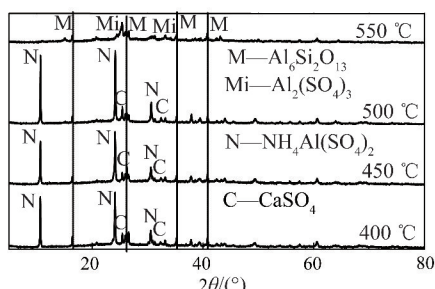
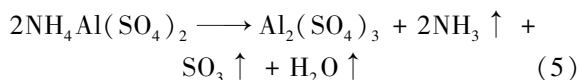
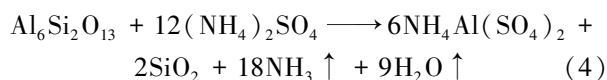


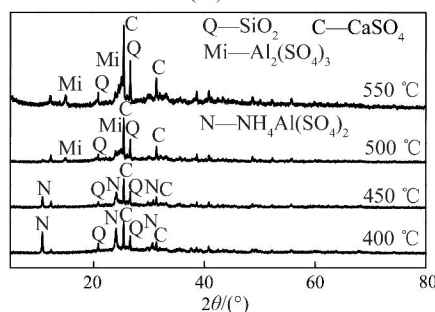
图3 碳酸钙活化后FA的XRD谱图

Fig. 3 XRD pattern of FA after roasting with calcium carbonate

(4)、(5)。虽然硫酸铵活化粉煤灰的温度相对较低,但其活化过程会产生大量氨气和氧化硫,增加了环保成本。



(a) FA



(b) GA

图4 硫酸铵活化后FA、GA的XRD谱图

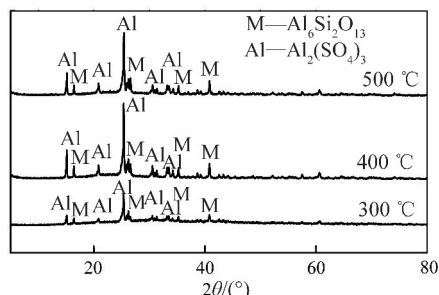
Fig. 4 XRD pattern of coal ash FA and GA after roasting with ammonium sulfate

图4(b)为硫酸铵活化后GA的XRD谱图,400℃时,硫酸铵活化后的GA中,形成新的物相——硫酸铝铵、硬石膏和石英,随温度升高,硫酸铝铵的衍射峰强度降低,硬石膏和石英的衍射峰强度增加;500℃时,硫酸铝铵的特征衍射峰消失,形成新的矿物质——硫酸铝;550℃时,GA中的矿物质为硫酸

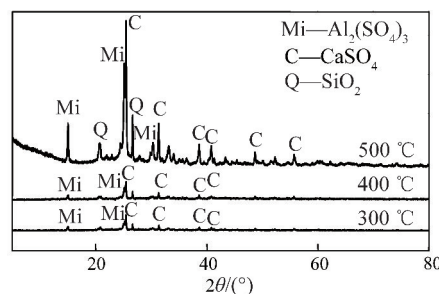
铝、硬石膏和石英,硫酸铵活化过程中,GA中的钙与活化剂反应生成硬石膏,消耗一定量的活化剂,进而增加了活化剂硫酸铵的用量。

## 2.4 浓硫酸活化矿物质的变化

图5(a)为浓硫酸活化后FA的XRD谱图,300℃时,硫酸活化后的FA中形成新的物相——硫酸铝,随温度的升高,硫酸铝的衍射峰强度增加,400℃时,硫酸铝衍射峰强度达最大值,而莫来石衍射峰强度未明显降低,但500℃时,硫酸铝的特征衍射峰强度略有降低。这是由于硫酸与莫来石反应生成硫酸铝和无定形二氧化硅,因此浓硫酸的最佳活化温度为400℃,若温度继续升高会引起硫酸铝的分解。



(a) FA



(b) GA

图5 浓硫酸不同温度焙烧活化后FA、GA的XRD谱图

Fig. 5 XRD pattern of coal ash FA and GA after roasting with sulfuric acid

图5(b)为浓硫酸活化后GA的XRD谱图,300℃时,硫酸活化后的粉GA成新物相——硫酸铝和硬石膏,随温度升高,硫酸铝和硬石膏的衍射峰强度增加,500℃时,硫酸铝和硬石膏的衍射峰强度达最大,且形成石英,硫酸活化过程中GA中的钙与活化剂反应生成硬石膏,会消耗一定量的活化剂,进而增加活化剂硫酸的用量。

## 3 结论

1) 粉煤灰中铝元素主要以莫来石形式存在,碳酸钠焙烧活化粉煤灰时,在800~1000℃粉煤灰中莫来石和石英与碳酸钠反应生成霞石,1000℃时

莫来石反应完全。

2) 碳酸钙焙烧活化粉煤灰, 1 100 ℃ 时, 粉煤灰中莫来石和石英与碳酸钙反应生成钙黄长石, 1 200 ℃ 钙黄长石分解生成钙长石, 13 00 ℃ 时莫来石反应完全。

3) 硫酸铵焙烧活化粉煤灰, 400 ~ 500 ℃ 时, 粉煤灰中莫来石与硫酸铵反应生成硫酸铝铵; 500 ℃ 时, 莫来石反应仍不完全; 550 ℃ 时, 硫酸铝铵分解生成硫酸铝。浓硫酸焙烧活化粉煤灰时, 与莫来石反应形成硫酸铝, 最佳活化温度为 400 ℃。硫酸铵和硫酸活化高钙气化灰时, 形成硬石膏, 会消耗一定量的活化剂, 进而增加活化剂用量。

4) 与碳酸钠和碳酸钙相比, 硫酸铵和硫酸可以在相对较低的温度下与粉煤灰反应, 实现粉煤灰的活化, 但硫酸铵活化粉煤灰过程中生成大量的氨气和三氧化硫气体。因而, 浓硫酸活化法更具有发展前景。

#### 参考文献 (References):

- [1] 饶兵, 戴惠新, 高利坤. 粉煤灰提取氧化铝技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 3003-3007.  
RAO Bing, DAI Huixin, GAO Likun. Research development on extracting alumina from fly ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 35(8): 3003-3007.
- [2] 任俊英, 董晔. 粉煤灰在煤化工行业的应用及资源化发展策略研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(11): 231-232.  
REN Junying, DONG Ye. Application of fly ash in coal chemical industry and resource development strategy study [J]. Coal Technology, 2013, 32(11): 231-232.
- [3] 薛淑红. 石灰石烧结法制备氧化铝技术[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [4] 唐云, 陈福林. 碱石灰烧结法提取粉煤灰中的氧化铝[J]. 矿冶工程, 2008, 28(6): 73-75.  
TANG Yun, CHEN Fuli. Extracting alumina from fly ash by soda lime sintering method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(6): 73-75.
- [5] ZHANG Ziyuan, QIAO Xiuchen, YU Jianguo. Aluminum release from microwave-assisted reaction of coal fly ash with calcium carbonate[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134: 303-309.
- [6] 张凤霞, 杨斌, 马明煜, 等. 粉煤灰加碱烧结过程的热力学分析[J]. 矿冶工程, 2013, 33(3): 87-89.  
ZHANG Fengxia, YANG Bin, MA Mingyu, et al. Thermodynamic analysis in sintering reaction of coal fly ash with alkali[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(3): 87-89.
- [7] 王金磊, 乔秀臣. 碳酸钠-粉煤灰烧结样中铝、铁、硅的酸浸规律[J]. 华东理工大学(自然科学版), 2013, 39(6): 685-688.  
WANG Jinlei, QIAO Xiuchen. Acid leaching of Al, Fe, Si from sintered mixture of sodium carbonate and fly ash[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 39(6): 685-688.
- [8] 代红, 李彦恒, 侯晓琪, 等. 粉煤灰碳酸钠烧结工艺中影响锂浸出率因素的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(4): 17-19.  
DAI Hong, LI Yanheng, HOU Xiaoqi, et al. Study of factors effecting lithium leaching rate from coal ash in sodium carbonate sintering process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(4): 17-19.
- [9] 刘能生, 彭金辉, 张利波, 等. 高铝粉煤灰碳酸钠焙烧与酸浸提铝的动力学[J]. 过程工程学报, 2016, 16(2): 216-221.  
LIU Nengsheng, PENG Jinhui, ZHANG Libo, et al. Kinetics of roasting of high aluminum content coal fly ash with sodium carbonate and acid leaching for extraction of aluminum[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(2): 216-221.
- [10] 缪应菊, 刘学院, 周钰, 等. 粉煤灰-碳酸钠活化工艺的实验研究[J]. 应用化工, 2016, 45(1): 97-100.  
MIAO Yingju, LIU Xueyuan, ZHOU Yu, et al. Study on the process of activating fly ash by sodium carbonate[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(1): 97-100.
- [11] 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 Laishi, LIU Yingying. Thermodynamics of extracting alumina from fly ash by ammonium sulfate calcination process [J]. Light Metals, 2009(9): 12-14.
- [12] 晋新亮, 彭同江, 孙红娟. 硫酸铵焙烧法提取粉煤灰中氧化铝的工艺技术研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(2): 59-63.  
JIN Xinliang, PENG Tongjiang, SUN Hongjuan. Techniques of alumina extraction from coal fly ash by ammonium sulfate activation[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(2): 59-63.
- [13] 隋丽丽, 翟玉春. 硫酸铵焙烧粉煤灰提氧化铝[J]. 矿冶, 2016, 25(4): 33-35, 52.  
SUI Lili, ZHAI Yuchun. Extracting aluminum oxide from roasting fly ash by ammonium sulfate[J]. Mining & Metallurgy, 2016, 25(4): 33-35, 52.
- [14] 张文, 李来时. 硫酸铵粉煤灰混合焙烧法提取氧化铝的实验研究[J]. 轻金属, 2017(11): 14-18.  
ZHANG Wen, LI Laishi. Study on the alumina extraction by mixed calcination of fly ash and ammonium sulfate [J]. Light Metals, 2017(11): 14-18.
- [15] 范艳青, 蒋训雄, 汪胜东, 等. 粉煤灰硫酸化焙烧提取氧化铝的研究[J]. 铜业工程, 2010, 104(2): 34-38.  
FAN Yanqing, JIANG Xunxiang, WANG Shengdong, et al. Study on recovering Al from fly ash by sulfation calcining [J]. Copper Engineering, 2010, 104(2): 34-38.
- [16] 杨敬杰, 孙红娟, 彭同江, 等. 硫酸/硫酸铵混合助剂焙烧粉煤灰提取  $Al_2O_3$  [J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(10): 1538-1542.  
YANG Jingjie, SUN Hongjuan, PENG Tongjiang, et al. Alumina extraction from coal fly ash with ammonium sulfate and sulfuric acid[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(10): 1538-1542.