

# 利用粉煤灰提取氧化物的研究进展

秦健波<sup>1</sup>, 范仁东<sup>2</sup>, 方莹<sup>1</sup>, 何富军<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210009; 2. 江苏省电力设计院, 江苏南京 211102)

**摘要:**为了减轻粉煤灰对环境的污染以及提高其综合利用率, 阐述了粉煤灰精细化利用的重要性, 介绍了粉煤灰的化学组成及矿物组成, 得出了粉煤灰中提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的潜在价值及存在的问题。介绍了粉煤灰提取氧化物的 3 种主要方法: 酸法、碱法、酸碱联合法, 并探讨了各种方法的优缺点。在此基础上指出了目前我国实现粉煤灰提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  联产  $\text{SiO}_2$  工业化生产的不足: 对设备要求较高、易造成二次污染以及成本过高。最后对粉煤灰的精细化利用进行了展望。

**关键词:**粉煤灰;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ; 精细化利用

**中图分类号:** X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2016)04-0015-05

## Progress of extracting oxide from fly ash

QIN Jianbo<sup>1</sup>, FAN Rendong<sup>2</sup>, FANG Ying<sup>1</sup>, HE Fujun<sup>1</sup>

(1. Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** In order to make full use of fly ash and reduce its pollution, the chemical composition, mineral composition of fly ash were introduced. The potential value and main problems of extracting  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  from fly ash were investigated. Three main extraction methods which were acid process, alkaline process and combination of acid and alkaline process as well as their advantages and disadvantages were presented in this paper. High cost, high equipment requirement and secondary pollution limited the industrial application of the technology.

**Key words:** fly ash;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ; fine application

## 0 引 言

近年来,随着燃煤电厂规模不断扩大,发电产能保持 7.3% 的增长率,大幅度增加了灰渣的产量,造成我国灰渣总量不断增加,目前,我国粉煤灰排放量每年超过 1 亿 t<sup>[1]</sup>,不仅占用了大量土地,而且也给我国的国民经济建设发展造成巨大的压力<sup>[2]</sup>。煤粉锅炉的灰渣主要以 2 种形态存在:一种是粉煤灰,占灰渣总质量的 70% ~ 85%;另一种是炉底灰,占灰渣总质量的 15% ~ 30%。粉煤灰可以说是一种“再生矿产粉状资源”<sup>[3]</sup>。粉煤灰作为燃煤电厂排放的可利用再生资源,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  含量很高,若能够在提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的同时实现对  $\text{SiO}_2$  的提取,将具有深远的意义。目前我国粉煤灰主要集中应用于农

业<sup>[4]</sup>、建材等方面<sup>[5-6]</sup>,其利用价值低、用量有限。利用粉煤灰提取有利用价值的氧化物,不仅能够减轻粉煤灰对环境带来的污染,而且对扩大粉煤灰资源化利用具有积极意义。与此同时,粉煤灰精细化利用符合国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020 年)重点领域的优先主题要求<sup>[7]</sup>,将会产生巨大的经济效益。因此有必要对粉煤灰的精细化利用的方法进行综合分析。

## 1 粉煤灰性能

### 1.1 化学组成

表 1 为我国粉煤灰的化学组成<sup>[8]</sup>。由表 1 得出我国粉煤灰化学组成主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ ,两者总量达约 77.8%,具有精细化利用价值。

收稿日期:2016-05-10;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.04.004

基金项目:江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:秦健波(1992—),男,江苏南通人,硕士,从事粉煤灰综合利用方面的工作。E-mail:17768694830@163.com。通信作者:方莹,教授,博士,从事粉末系统研究与改造工作。E-mail:powder8817@njtech.edu.cn

引用格式:秦健波,范仁东,方莹,等.利用粉煤灰提取氧化物的研究进展[J].洁净煤技术,2016,22(4):15-19.

QIN Jianbo, FAN Rendong, FANG Ying, et al. Progress of extracting oxide from fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 15-19.

## 1.2 矿物组成

表2为我国粉煤灰的矿物组成<sup>[9]</sup>。由表2可以看出我国粉煤灰主要由莫来石、低温型石英、高/低温玻璃体以及未完全燃烧的碳等组成。其中大

部分是莫来石和低温玻璃体,这些矿物成分经高温熔融后主要由硅酸盐、铝酸盐等复杂的化合物组成,由于其化学稳定性较高,导致粉煤灰提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的难度增加。

表1 我国粉煤灰化学组成  
Table 1 Chemical components of China's fly ash

成分	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	其他
质量分数	16.5~35.4	33.9~59.7	15.4~15.5	0.8~9.4	0.7~1.9	0.7~2.9	0.2~1.1	0~1.1	1.2~23.5
平均值	27.2	50.6	7.0	2.8	1.2	1.3	0.5	0.3	8.2

表2 我国粉煤灰的矿物组成

Table 2 Mineral components of China's fly ash

矿物	低温型石英	莫来石	高铁玻璃珠	低温玻璃珠	含碳量	玻璃态 $\text{SiO}_2$	玻璃态 $\text{Al}_2\text{O}_3$
质量分数	1.1~15.9	11.3~29.2	0~21.1	42.2~70.1	1.0~23.5	26.3~45.7	4.8~21.5
平均值	6.4	20.4	5.2	59.8	8.2	38.5	12.4

## 1.3 粉煤灰的 XRD 与 SEM 分析

### 1.3.1 粉煤灰原料 XRD 分析

图1是粉煤灰原料的XRD图。可见粉煤灰的矿物组成主要是莫来石和石英相组成,莫来石是锅炉底渣中的一种晶体,性质稳定,Al、Si活性低,不易分离;在  $20^\circ \sim 30^\circ$  区域内存在较宽大的衍射峰,证明有玻璃相的存在,玻璃相是锅炉底渣由高温状态经急冷形成的,在锅炉底渣中占有很高的比例,该玻璃相主要以铝硅玻璃相为主,Al和Si活性低,是粉煤灰中铝、硅分离困难的一个重要因素。

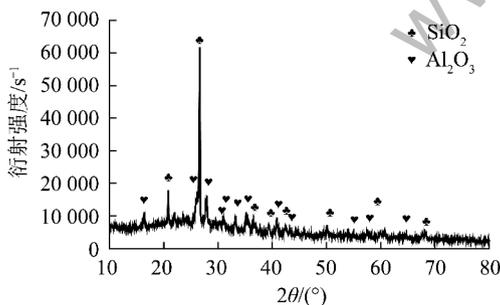


图1 粉煤灰原料 XRD 图

Fig. 1 XRD pattern of fly ash raw material

### 1.3.2 粉煤灰原料 SEM 分析

图2是粉煤灰原料 SEM 图。由图2可以看出粉煤灰颗粒由不同小颗粒黏结在一起,孔隙较多,颗粒表面不规则且部分形成拥有光滑表面的球面,分析认为这是由于粉煤灰中的多孔玻璃体熔融收缩形成的珠状玻璃体。由于多孔玻璃体熔融收缩,使得玻璃体的孔隙率不断降低,圆度持续升高,粒径不断

下降,最终转变为密度较高、粒径较小的密实球状玻璃体,使颗粒比表面积达到最小。形成的密实球形玻璃体导致锅炉底渣的活性降低,铝、硅分离困难。

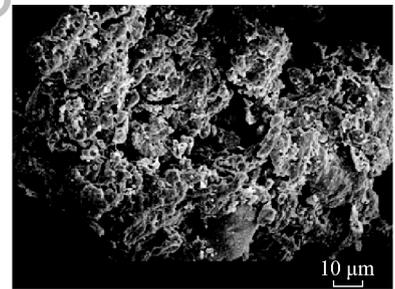


图2 粉煤灰原料 SEM 图

Fig. 2 SEM photo of fly ash raw material

## 2 粉煤灰的危害

在国家政策的大力支持下,经过数年的建设与发展,地方热电厂已代替原有的高污染、高耗能的小锅炉。但是,在创造巨大经济效益和环境效益的同时,这些地方小型热电厂排放出大量对环境造成污染的工业废渣,其中粉煤灰便是这些工业废渣之一。粉煤灰集中产生于火电厂和大型工矿企业的锅炉中,若每年每增加 10 MW 装机容量,将会多排放近万吨的粉煤灰废渣。若不进行有效处理,将会造成扬尘、大气污染、河流淤塞和水质污染<sup>[10]</sup>。

粉煤灰的大量排放将对人类的生态环境造成极大危害,主要表现在侵占土地、污染土壤、水污染、空气污染和威胁人类健康等方面<sup>[11]</sup>。

### 3 粉煤灰的综合利用

粉煤灰是燃煤经锅炉燃烧后从下部排出的固体废物<sup>[12]</sup>,经水淬急冷而形成的一种炉渣。综合利用粉煤灰,提铝提硅工艺的研究与开发,不仅可以制备高附加值产物,同时又降低生态环境污染,长期受到各国的高度重视<sup>[13]</sup>。而粉煤灰中铝、硅、钙、铁氧化物及某些稀有金属元素的合理提取,可满足我国目前对 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等产品的需求,同时带来了一定的经济效益<sup>[14-18]</sup>。因此寻求新的粉煤灰高附加值利用技术和途径,势必对固废资源化和环境保护具有重要意义。当前,粉煤灰中提取氧化物包含酸法、碱法和酸碱联合法3种方法,提取的主要产品为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ <sup>[19-21]</sup>。

#### 3.1 酸法

酸浸法主要将粉煤灰溶于盐酸或硫酸溶液中,实现硅铝分离,并经后续工艺得到 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 。朱建军等<sup>[22]</sup>以煤矸石为试验原料,在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧1 h后,将活化反应物通过盐酸、硫酸的混合酸进行溶出试验,溶出温度与溶出时间分别为 $118\text{ }^\circ\text{C}$ 与2 h,并进行过滤,其中滤液用于聚合硫酸氯化铝铁的制备;滤渣与氢氟酸反应生成的 $\text{SiF}_4$ 通入乙醇水溶液中进行水解,将得到的产物进行洗涤后烘干,最终得到纯白的纳米 $\text{SiO}_2$ 粉末。试验表明:水解剂40%乙醇水溶液、水解温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 为最佳条件。试验产物通过红外光谱、XRD、TEM等技术进行表征,结果表明制备的纳米 $\text{SiO}_2$ 粉体的粒径分布范围为 $15\sim 20\text{ nm}$ ,形状为球形,纯度高于99.98%。

酸浸法可以实现硅铝分离,同时制备硅微粉和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,然而其循环酸量较大,设备较易腐蚀,产生的氟化氢气体会污染环境,对人体危害大。

#### 3.2 碱法

##### 3.2.1 石灰石烧结法

石灰石烧结法是以粉煤灰为原料,加入石灰石混合煅烧,使粉煤灰中的莫来石转化为铝酸十二钙和石英转化为七硅酸二钙,将自粉化后熟料采用碳酸钠溶出,然后进行过滤,得到铝酸钙滤液,后经分解得偏铝酸钠;而不溶物滤渣中含有硅酸二钙和铝酸十二钙等最终实现硅铝分离。

赵喆等<sup>[23]</sup>利用石灰石熟料自粉化方法从粉煤灰中提取 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,并比较了烧成条件对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率的影响。研究表明:当生料比为1.8,烧结温度为 $1380\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间为60 min,出炉温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$

时为最佳工艺条件,通过一定溶出条件 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 溶出率达79%以上。此方法的优点是无需活化或添加助浸剂,同时烧结产物在冷却过程中,由于反应生成的硅酸二钙( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )晶型由 $\beta$ 型转变为 $\gamma$ 型时熟料体积膨胀,实现自粉化,节约了成本。与此同时也存在一定的缺点,由于工艺流程中产生的固体钙硅渣利用价值低,即使能应用于水泥的生产,但是水泥销售市场有限,因此容易产生二次堆积污染,并且也无法对 $\text{SiO}_2$ 进行提取。

##### 3.2.2 碱灰烧结法

碱灰烧结法是将粉煤灰和碳酸钠经高温煅烧活化后转化为易与酸反应的霞石,霞石与HCl反应后便制得 $\text{AlCl}_3$ 溶液和 $\text{SiO}_2$ ,从而实现硅铝分离,分离后的滤液制备 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,滤渣可用作硅酸盐水泥原料。

王丽华等<sup>[24]</sup>采用无水碳酸钠为化学活化剂,在高温下煅烧活化粉煤灰,再经过溶出试验,制得 $\text{AlCl}_3$ 溶液和 $\text{SiO}_2$ 。最佳工艺条件为:粉煤灰与 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 质量比1.2:1,活化温度为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ ,活化时间为1.5 h,粉煤灰可完全转化成易与酸反应的霞石,霞石与HCl反应后便制得 $\text{AlCl}_3$ 溶液和 $\text{SiO}_2$ 。同时霞石的反应程度也会随着HCl溶液浓度的提升相应增加,并且当HCl溶液浓度达到80%时,反应过后的滤渣已经没有霞石类盐,此时表明 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 得到了充分活化,从而实现硅铝分离,分离后的滤液制备 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。此方法较石灰石烧结法,降低了烧结过程的能耗,但是烧结时间会加长,同时后期需要加入高浓度的HCl,可能会造成环境污染问题。

##### 3.2.3 碱溶法

碱溶法是将粉煤灰溶于碱溶液中,得到含硅酸钠与偏铝酸钠滤液经碳分得到 $\text{SiO}_2$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,再经后续工艺实现硅铝分离。

陈颖敏等<sup>[25]</sup>进行了中温碱溶液浸出试验,从粉煤灰中回收 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,同时回收硅胶( $m\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ )及某些金属。结果显示:当溶出温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$ ,碱浓度为 $17\text{ mol/L}$ ,液固比为40,加少量CaO,溶出时间为1 h,经过3次溶出试验, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的平均溶出率88.70%,硅胶折合 $\text{SiO}_2$ 的回收率为75.10%。邬国栋等<sup>[26]</sup>在低温条件下采用碱溶法对粉煤灰提取硅铝进行了研究,分析了碱浓度、粉煤灰热处理温度、溶出温度、溶出时间等因素对Si、Al溶出量的影响。结果表明将粉煤灰通过 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 高温煅烧预处理,然后在浓度为 $2\sim 3\text{ mol/L}$ 碱溶液中溶出,液固比为50,溶出温度为 $120\sim 130\text{ }^\circ\text{C}$ ,溶出时间为 $4\sim 6\text{ h}$

时,  $\text{SiO}_2$  的溶出率为 29.23%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的溶出率为 11.26%, 溶出比为 23.63, 实现了硅、铝从粉煤灰中分步溶出。王佳东等<sup>[27]</sup> 采用碱溶法对粉煤灰提取  $\text{SiO}_2$  的最佳工艺进行优化, 分析了粉煤灰在常压下经过高浓度  $\text{NaOH}$  溶液溶出, 探讨了粉煤灰粒度、溶浸时间、 $\text{NaOH}$  浓度、液固比、反应温度等因素对  $\text{SiO}_2$  溶出率的影响。经过正交试验对比, 结果表明: 碱浓度为 17.5 mol/L、液固比为 1.5 及溶出温度为 130 °C 时, 溶出时间为 6 min, 可使  $\text{SiO}_2$  的溶出率达到 75.65%, 提硅后粉煤灰的铝硅比达到 3, 提硅渣可作为提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  原料进行综合回收利用。

碱溶的目的主要是提取粉煤灰中的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。通过后期的不断试验,  $\text{SiO}_2$  溶出率与  $\text{Al}/\text{Si}$  比都有所提高。如何提高  $\text{Al}/\text{Si}$  比将会成为重要的研究对象。

### 3.3 酸碱联合法

吴艳等<sup>[28]</sup> 采用酸碱联合法从粉煤灰中提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ 。由于粉煤灰中铝、硅含量都比较高, 因此将粉煤灰溶于浓硫酸溶液中, 并经过滤、重结晶, 煅烧分解制备浓度为 99.91% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。由于滤渣中硅含量高、其余杂质含量少, 因此采用浓碱作为溶出液, 浸出渣经碱溶、碳分、除铁、低温干燥、得到纯度为 99.52% 的  $\text{SiO}_2$ , 含很少的杂质, 并且制备出的  $\text{SiO}_2$  为均匀的小球, 其粒径约为 0.2  $\mu\text{m}$ 。此工艺中原料可循环使用, 酸碱溶液能耗低, 废气废渣排放量低, 环境污染小, 实现了粉煤灰的综合利用。

丁宏娅<sup>[29]</sup> 将酸碱联合法与拜耳法结合从粉煤灰中提取高纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ 。以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  助剂, 粉煤灰与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量比为 1 : 0.85, 在 880 °C 下烧结 1.5 h, 得到在酸性介质中易溶的霞石相, 然后以硫酸为介质酸溶粉煤灰的烧结产物使硅铝分离, 其最佳工艺条件为: 水与硫酸质量比为 1 : 1.44, 固液比为 1 : 11, 陈化温度为 70 °C, 陈化时间为 12 h。硅凝胶形成后, 过滤、洗涤, 得到富硅沉淀, 计算可得原粉煤灰中的  $\text{SiO}_2$  的提取率为 95.1%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的提取率为 98.1%。

## 4 结 语

目前, 酸法、碱法和酸碱联合法等工艺方法已成为国内外对粉煤灰中提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的重点研究方法。然而现阶段的研究只停留在理论方面, 没有与实际有效的结合, 使得工业化进程相对缓慢, 而造成试验研究进展缓慢的原因可能有: ① 酸法存在

着酸气泄露、酸腐蚀等问题, 对设备腐蚀大, 不利于试验工业化生产, 并且对环境有一定影响; ② 碱法中石灰石烧结法和碱灰烧结法产生较难处理的固体废物渣, 容易形成二次污染; ③ 酸碱联合法对操作精确性要求高, 工艺时间较长, 成本也相对较高; ④ 由于理论研究和实际应用存在一定差距, 因此难以为工业化生产提供合适的技术方案。

针对以上问题, 笔者对粉煤灰的精细化利用提出以下几点展望: ① 对粉煤灰精细化利用的理论知识进行更深层次研究; ② 在相关领域中对粉煤灰的精细化利用进行联合开发研究; ③ 国家相关部门应加大对粉煤灰精细化利用的资金与科技投入; ④ 合理引进其他国家粉煤灰精细化利用的先进方法与技术。

### 参考文献 (References) :

- [1] 周佳, 邵群, 马晓程, 等. 淮南电厂粉煤灰矿物组成及晶型结构研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 18(6): 84-87.  
Zhou Jia, Shao Qun, Ma Xiaocheng, et al. Mineral composition and crystal structure of fly ash in Huainan power plant [J]. Clean Coal Technology, 2013, 18(6): 84-87.
- [2] 庆承松, 任升莲, 宋传中. 电厂粉煤灰的特征及其综合利用[J]. 合肥工业大学学报, 2003, 26(4): 529-533.  
Qing Chengsong, Ren Shenglian, Song Chuanzhong. Features and utilization of fly ash in power station [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2003, 26(4): 529-533.
- [3] 边炳鑫, 解强, 赵由才, 等. 煤系固体废物资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 121-125.
- [4] 王兆锋, 冯永军, 张蕾娜. 粉煤灰农业利用对作物影响的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003, 34(1): 152-156.  
Wang Zhaofeng, Feng Yongjun, Zhang Leina. Advances in studies in effects of fine ash on agricultural crops [J]. Journal of Shandong University (Natural Science Edition), 2003, 34(1): 152-156.
- [5] 蒋蓉. 粉煤灰硅酸盐水泥的研制[J]. 国外建材科技, 2005, 26(4): 27-29.  
Jiang Rong. The development of the fly ash portland cement [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2005, 26(4): 27-29.
- [6] Seidel A, Slusznv A, Shelef G, et al. Variation in fly ash properties with milling and acid leaching [J]. Fuel, 2005, 84(1): 89-96.
- [7] 蒋家超, 赵由才. 粉煤灰提铝技术的研究现状[J]. 有色冶金设计与研究, 2008, 29(2): 40-43.  
Jiang Jiachao, Zhao Youcai. Current research situation of Al extraction from fly ash [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2008, 29(2): 40-43.
- [8] 吴元峰, 仪桂云, 刘全润, 等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 100-104.  
Wu Yuanfeng, Yi Guiyun, Liu Quanrun, et al. Current situation

- of comprehensive utilization of fly ash[J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(6):100-104.
- [9] 陈娜. 化学法处理燃煤炉渣制备化工原料[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [10] 张战军. 从高铝粉煤灰中提取氧化铝等有用资源的研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [11] 田娟. 从粉煤灰中提取多种微细氧化物的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [12] 蔡宪功. 燃煤炉渣在蒸压混凝土中的应用[J]. *中国科技信息*, 2012(15):58-59.
- Cai Xiangong. The application of fly ash in autoclaved concrete[J]. *China Science and Technology Information*, 2012(15):58-59.
- [13] 雷瑞, 付东升, 李国法, 等. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2013, 19(3):106-109.
- Lei Rui, Fu Dongsheng, Li Guofa, *et al.* Research progress of fly ash comprehensive utilization[J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(3):106-109.
- [14] Giere R, Carleton L, Lumpkin G. Micro-nanochemistry of fly ash from a coal-fired power plant[J]. *American Mineralogist*, 2003, 88:1853-1865.
- [15] Kikuchi R. Application of coal ash to environmental improvement; transformation into zeolite, potassium fertilizer, and FGD absorbent[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, 27(4):333-346.
- [16] Fernández Jiménez A, Palomo A. Characterisation of fly ashes - potential reactivity as alkaline cements[J]. *Fuel*, 2003, 82(18):2259-2265.
- [17] Ghollman G, Steenbruggen G, Janssen Junkovicova M. A two step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash[J]. *Fuel*, 1999, 78(10):1225-1230.
- [18] Peng F, Liang K M, Hu A M. Nano-crystal glass-ceramics obtained from high alumina in a coal fly ash[J]. *Fuel*, 2005, 84:341-346.
- [19] Seidel A, Slusny A, Shelef G, *et al.* Self inhibition of aluminum leaching from coal fly ash by sulfuric acid[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1999, 72(3):195-207.
- [20] Padilla R, Sohn H Y. Sodium aluminate leaching and desilication in line-soda sinter process for alumina from coal wastes[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1985, 16(4):707-713.
- [21] Halina M, Ramesh S, Yarmo M A, *et al.* Non-hydrothermal synthesis of mesoporous materials using sodium silicate from coal fly ash[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 101(2):344-351.
- [22] 朱建军, 谢吉民, 陈敏, 等. 高纯纳米 SiO<sub>2</sub> 的制备[J]. *涂料工业*, 2007(8):13-15.
- Zhu Jianjun, Xie Jimin, Chen Min, *et al.* Preparation of high purity nano-SiO<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2007(8):13-15.
- [23] 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 Zhe, Sun Peimei, Xue Bing, *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.
- [24] 王丽华, 王东升. 利用粉煤灰制备氯化铝溶液的实验研究[J]. *桂林工学院学报*, 2005, 25(2):202-204.
- Wang Lihua, Wang Dongsheng. Polymerization preparation using fly ash[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 2005, 25(2):202-204.
- [25] 陈颖敏, 赵毅, 张建民, 等. 中温法从粉煤灰中回收铝和硅的研究[J]. *电力情报*, 1995(3):35-38.
- Chen Yinmin, Zhao Yi, Zhang Jianmin, *et al.* Research of extracting silicon and aluminum from fly ash at medium temperature[J]. *Information on Electric Power*, 1995(3):35-38.
- [26] 邹国栋, 叶亚平, 钱维兰, 等. 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*, 2006, 19(1):53-56.
- Wu Guodong, Ye Yaping, Qian Weilan, *et al.* Research on the rules of leaching silicon and aluminum from fly ash in alkaline solution at low temperature[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(1):53-56.
- [27] 王佳东, 翟玉春, 申晓毅. 碱溶法提取粉煤灰中的氧化硅[J]. *轻金属*, 2008(12):23-25.
- Wang Jiadong, Zhai Yuchun, Shen Xiaoyi. Study on extracting silica from fly ash by alkali leaching[J]. *Light Metal*, 2008(12):23-25.
- [28] 吴艳, 翟玉春, 李来时, 等. 新酸碱联合法以粉煤灰制备高纯氧化铝和超细二氧化硅[J]. *轻金属*, 2007(9):24-27.
- Wu Yan, Zhai Yuchun, Li Laishi, *et al.* Preparation of high purity Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and superfine SiO<sub>2</sub> from fly ash[J]. *Light Metal*, 2007(9):24-27.
- [29] 丁宏娅. 采用改进酸碱联合法从高铝粉煤灰中提取氧化铝的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.

## (上接第14页)

- [11] Ansys Fluent. Ansys fluent theory guide[M]. Canonsburg: ANSYS, 2013:502-607.
- [12] Tu Jiyan, Guan Heng Yeoh, Liu Chaoqun. 计算流体力学——从实践中学习[M]. 王晓东, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 2009:46-64.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:347-352.
- [14] 刘强. 浓相气力输送关键装置的开发及应用[D]. 济南: 济南大学, 2013:54.
- [15] 罗玉萍, 王立久, 苏丽清, 等. 粉煤灰性质比较研究及综合利用途径探讨[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(3):448-452.
- Luo Yuping, Wang Lijiu, Su Liqing, *et al.* Comparison research on the performance of fly ash and comprehensive utilization discussion[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2007, 23(3):448-452.