

文章编号:1007-9629(2021)03-0663-08

## 循环流化床粉煤灰中钙的赋存状态

肖 域<sup>1,2,3</sup>, 王晓辉<sup>2,3</sup>, 马淑花<sup>2,3</sup>, 刘志红<sup>1</sup>

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院绿色过程与工程重点实验室 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院绿色过程制造创新研究院, 北京 100190)

**摘要:** 采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜-能谱(SEM-EDS)等确定了循环流化床(CFB)原煤和粉煤灰中钙的赋存物相,并依据不同含钙物相化学反应特性的差异,采用蔗糖和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液分步提取法,建立了CFB粉煤灰中含钙物相定量分析方法.结果表明:CFB原煤中钙以白云石形式存在,而CFB粉煤灰中钙的赋存物相为 $\text{CaO}$ 、 $\text{CaSO}_4$ 和钙长石;CFB粉煤灰中含钙物相 $\text{CaO}$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、钙长石的含量分别为5.03%、2.45%、5.44%; $\text{CaO}$ 和 $\text{CaSO}_4$ 大部分存在于CFB粉煤灰表面,钙长石黏附在莫来石及富铁物相表面,且与莫来石共生;钙主要集中在45  $\mu\text{m}$ 以下粒级的CFB粉煤灰中,其中 $\text{CaO}$ 物相含量达到6.15%,而58  $\mu\text{m}$ 以上及45~58  $\mu\text{m}$ 粒级CFB粉煤灰内 $\text{CaO}$ 物相含量均在1.00%左右.

**关键词:** 循环流化床; 粉煤灰; 氧化钙; 分步提取; 赋存状态

中图分类号:TD98

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.030

## Occurrence of Calcium in Fly Ash from Circulating Fluidized Bed

XIAO Yu<sup>1,2,3</sup>, WANG Xiaohui<sup>2,3</sup>, MA Shuhua<sup>2,3</sup>, LIU Zhihong<sup>1</sup>

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory for Green Processes and Engineering, Institute of Process Engineering, Beijing 100190, China; 3. Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The occurrence phases of calcium in raw coal and fly ash from circulating fluidized bed(CFB) were identified by X-ray diffractometer(XRD) and scanning electron microscope-energy spectrum(SEM-EDS). According to the difference of chemical reaction characteristics of different calcium containing phases, the quantitative analysis method of calcium containing phases in CFB fly ash was established by using the step by step extraction method of sucrose and sodium thiosulfate( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) solution. The calcium in the CFB raw coal exists in the form of dolomite, while in the CFB fly ash in the forms of  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  and calcium feldspar. The content of  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  and calcium feldspar in CFB fly ash is 5.03%, 2.45% and 5.44% respectively. It is further found that most of  $\text{CaO}$  and  $\text{CaSO}_4$  exist on the surface of fly ash. Calcium feldspar adheres to the surface of a mullite and iron rich phase, and symbiosis with mullite. Calcium is concentrated in the CFB fly ash of 45  $\mu\text{m}$ , of which  $\text{CaO}$  content reaches 6.15%, while  $\text{CO}$  content in CFB fly ash greater than 58  $\mu\text{m}$  and 45-58  $\mu\text{m}$  which is about 1.00%.

**Key words:** circulating fluidized bed; fly ash; calcium oxide; step by step extraction; occurrence

收稿日期:2019-11-29; 修订日期:2020-01-16

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(粉煤灰基土壤调理剂制备及应用示范);中国工程院咨询研究项目(2019NXZD4);企业合作项目(粉煤灰中典型重金属赋存规律及安全脱除与处置方法研究)

第一作者:肖 域(1995—),女,河南南阳人,贵州大学硕士生. E-mail:xiaoyupei@163.com

通讯作者:王晓辉(1980—),男,河北保定人,中国科学院过程工程研究所副研究员,硕士生导师,博士. E-mail:wangxh@ipe.ac.cn

粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中捕收下来的细灰,是煤燃烧后的主要产物之一<sup>[1]</sup>。粉煤灰为中国产生量最大的单一固体废弃物,年产生量在6亿吨左右<sup>[2]</sup>,目前有效利用率不足70%<sup>[3]</sup>。按不同的燃煤工艺,将粉煤灰分为煤粉炉(PC)粉煤灰和循环流化床(CFB)粉煤灰<sup>[4]</sup>。随着中国建筑材料行业的快速发展,粉煤灰作为储量巨大、成本低廉的原料,已广泛应用于水泥、混凝土、粉煤灰砖以及路面防滑材料等方面<sup>[5-6]</sup>。但是,由于CFB粉煤灰在化学成分和物相组成上的特殊性,特别是CFB粉煤灰钙含量较高,严重影响了其在建筑材料领域的应用。

袁志方等<sup>[7]</sup>研究表明:游离CaO的含量一般随颗粒粒径减小而增大,50 μm以下的细颗粒富集了大约70%的游离CaO。朱川<sup>[8]</sup>用逐级化学提取法证明了高碱煤中钙大多以CaCO<sub>3</sub>与有机钙的形式存在。上述研究虽然取得了一些成果,但仍无法为CFB粉煤灰资源的合理利用提供有效指导。本文拟通过X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜-能谱(SEM-EDS)、激光粒度分析仪及溶液分步提取法等,对CFB粉煤灰中钙的赋存状态进行深入系统地研究,明晰了CFB原煤和粉煤灰中含钙物相的定量组成和分布规律,为消除含钙物相对CFB粉煤灰在建筑材料中应用的影响,实现CFB粉煤灰资源的大宗利用提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 原材料

CFB原煤和粉煤灰均取自内蒙古某电厂,CFB粉煤灰样品在90℃下烘干24 h备用,其化学组成<sup>1)</sup>见表1。由表1可见,粉煤灰中CaO含量较高,达到12.91%。为对比分析,测得CFB原煤中CaO的含量为0.95%。

表1 CFB粉煤灰的化学组成  
Table 1 Chemical composition of CFB fly ash

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | IL   |
|------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-----------------|------------------|------|
| 35.56            | 40.08                          | 12.91 | 2.76                           | 3.22            | 1.51             | 2.34 |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 测试方法

用XRD对CFB原煤和粉煤灰的物相组成进行分析,扫描方式为θ~2θ联动,压片后进行测试,扫描结果使用X'Pert HighScore分析软件进行分析。

用SEM-EDS对CFB原煤和粉煤灰在XRD中

未显见的含钙物相进行分析。首先对样品表面进行喷金,接着将样品放置到样品台上,然后抽真空,达到高压线后采用背散射法(BSE)进行扫描。通过点、线、面扫描,得到物相元素含量及原子含量占比。

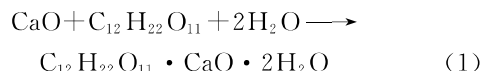
用激光粒度分析仪测试CFB粉煤灰的粒度分布,根据样品特性选择合适的折射率参数,测试时将适量样品分散到约800 mL水中,超声使其分散均匀,每个样品测试3次,结果取平均值。

用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)对CFB原煤和粉煤灰中主要矿物元素的组成进行分析。采用碱熔法进行熔样,制备成待测溶液,进样系统采用三通道蠕动泵,每个样品测试3次,结果取平均值。

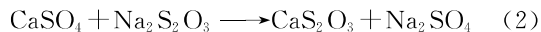
#### 1.2.2 含钙物相定量分析方法

为分析CFB粉煤灰中各含钙物相的含量,根据不同含钙物相化学反应特性的差异,采用蔗糖(C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>)溶液浸出CaO,Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶液浸出CaSO<sub>4</sub>的分步提取法。

CaO与蔗糖反应式如下<sup>[9]</sup>:



CaSO<sub>4</sub>与Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>反应式如下:



CFB粉煤灰中CaO和CaSO<sub>4</sub>的定量分析步骤为:(1)用电子天平分别称取CFB粉煤灰、蔗糖10.000 0、12.000 0 g,加入至50 mL高纯水中,配制成浆料;在40℃下振荡4 h,接着将其进行液固分离,然后用150 mL高纯水冲洗滤饼,并将其放入烘箱烘干备用。(2)分别称取Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、上一步烘干后的滤饼5.000 0、4.400 0 g,加入至25 mL高纯水中,配制成浆料;在40℃下振荡4 h,接着将其进行液固分离,用150 mL高纯水冲洗滤饼,并将其放入烘箱烘干备用;(3)用ICP-OES分析上述(1)、(2)步所得滤饼中的钙含量。

为验证CaO和CaSO<sub>4</sub>定量分析法的准确性,开展了相同条件下的对照试验。(1)用CaSO<sub>4</sub>在蔗糖溶液中的浸出试验,以分析其是否会溶出并对CaO的分析造成干扰。(2)用钙长石在蔗糖溶液及Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶液中的浸出试验,以分析其是否会溶出并对CaO及CaSO<sub>4</sub>的分析造成干扰。同时,为验证含钙物相定量结果是否准确,对粉煤灰进行水溶钙(CaO和CaSO<sub>4</sub>)测定:称取2.000 0 g CFB粉煤灰加入至高纯水中,液固比150:1,在40℃下振荡4 h后将其进行液固分离,用ICP-OES对CaO和CaSO<sub>4</sub>

1)文中涉及的组成、含量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比。

的总含量进行分析测试,该试验重复3次,结果取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相及赋存状态定性分析

采用XRD分析了CFB原煤和粉煤灰的物相组成,其XRD图谱分别见图1、2。由图1可见,CFB原煤的主要物相为石英( $\text{SiO}_2$ )、高岭石( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )及一水硬铝石( $\text{AlOOH}$ )。由于CaO含量仅为0.95%,因此在CFB原煤的XRD谱图中未发现含钙物相的衍射峰。由图2可见:CFB粉煤灰中的主要含钙物相为CaO和 $\text{CaSO}_4$ ,可能还含有少量的钙长石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ );主要含铝物相是莫来石(mullite);CFB粉煤灰中还含有少量 $\text{SiO}_2$ 。

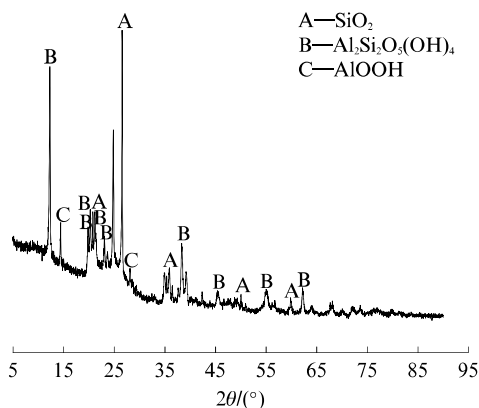


图1 CFB原煤的XRD图谱  
Fig. 1 XRD pattern of CFB raw coal

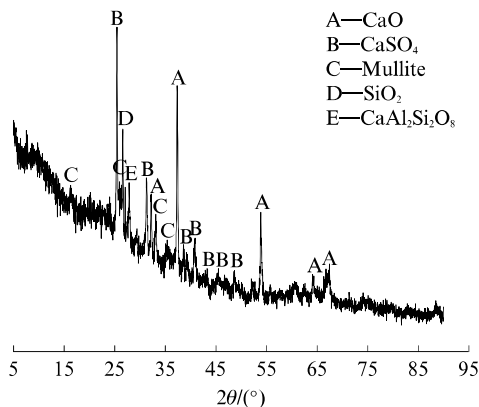


图2 CFB粉煤灰的XRD图谱  
Fig. 2 XRD pattern of CFB fly ash

对CFB原煤进行了SEM-EDS分析,结果见图3。由图3可见:Ca与Mg、C、O赋存在一起,且其中Ca和Mg的元素含量和原子含量与白云石( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )中较为接近,由此推断CFB原煤中钙可能

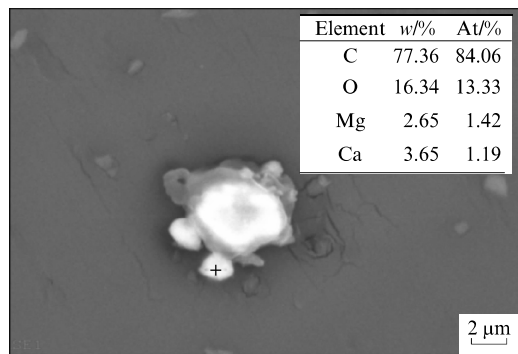
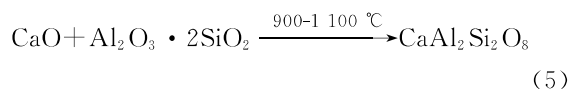
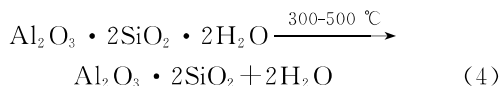


图3 CFB原煤的SEM-EDS图谱  
Fig. 3 SEM-EDS image of CFB raw coal

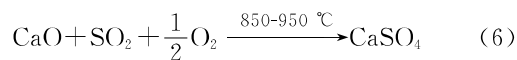
以白云石的形式存在。

白云石在高温下分解生成CaO,但CFB原煤中钙含量仅有0.95%,而CFB粉煤灰中钙含量高达13.00%,因此大部分CaO都来源于固硫剂石灰石( $\text{CaCO}_3$ )的高温分解。CFB原煤中的高岭石在高温下生成偏高岭石( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ),CaO与偏高岭石反应生成钙长石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )<sup>[10]</sup>。反应过程<sup>[11-15]</sup>如下:



循环流化床燃烧温度在850℃左右,偏高岭石在700~900℃左右会分解生成莫来石<sup>[15]</sup>,CaO与偏高岭石反应生成钙长石,由于反应温度较高,钙长石会少量熔融,与莫来石黏附在一起。图4为CFB粉煤灰的SEM-EDS面扫描图谱。由图4可见:钙长石主要分布在CFB粉煤灰表面。为进一步观察钙长石的赋存状态,对CFB粉煤灰进行磁选处理后进行点扫描,结果见图5。由图5可见:富铁物相表面也黏附有钙长石。用水溶法对CFB粉煤灰进行处理,脱除CaO及 $\text{CaSO}_4$ ,对水溶脱钙的CFB粉煤灰进行SEM-EDS面扫描并结合元素含量综合分析,结果见图6。由图6可见:钙长石黏附在莫来石表面。综上,CFB粉煤灰中钙长石主要黏附在富铁物相、莫来石颗粒表面。

循环流化床锅炉为了控制 $\text{SO}_2$ 的排放量,通常添加固硫剂石灰石。固硫剂在850~950℃下会分解生成CaO(见式(3)),CaO与原煤燃烧生成的 $\text{SO}_2$ 反应会生成 $\text{CaSO}_4$ <sup>[13]</sup>,反应方程式为:



为进一步探究CaO及 $\text{CaSO}_4$ 的赋存状态,对

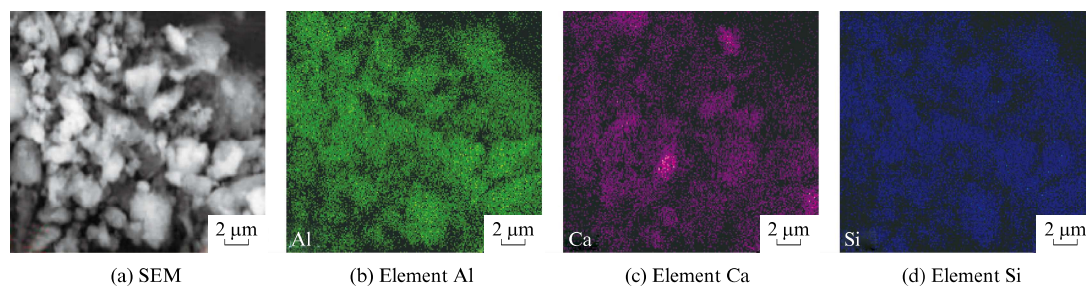


图4 CFB粉煤灰的SEM-EDS面扫描图谱

Fig. 4 Surface scanning SEM-EDS images of CFB fly ash

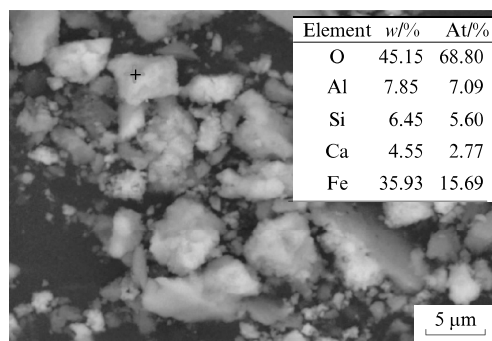


图5 磁选后CFB富铁粉煤灰的SEM-EDS点扫描图谱  
Fig. 5 Point scanning SEM-EDS image of CFB iron-rich fly ash by magnetic separation

CFB粉煤灰中 $\text{CaO}$ 及 $\text{CaSO}_4$ 进行SEM-EDS面扫描分析,结果见图7.由图7可见,大部分 $\text{CaSO}_4$ 颗粒独立成相.进一步通过点扫描(见图8)进行分析,发现这些 $\text{CaSO}_4$ 附着在 $\text{CaO}$ 表面.

## 2.2 不同含钙物相的定量分析

根据对照试验可知: $\text{CaSO}_4$ 在蔗糖溶液中几乎不溶出,表明其不会对 $\text{CaO}$ 的分析造成显著影响;钙长石在蔗糖溶液、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液中的溶出率接近于0,表明其不会对 $\text{CaO}$ 及 $\text{CaSO}_4$ 的分析造成影响.

CFB粉煤灰及分步提取后滤饼的XRD图谱见图9.由图9可见:第1步蔗糖溶液溶出后, $\text{CaO}$ 衍

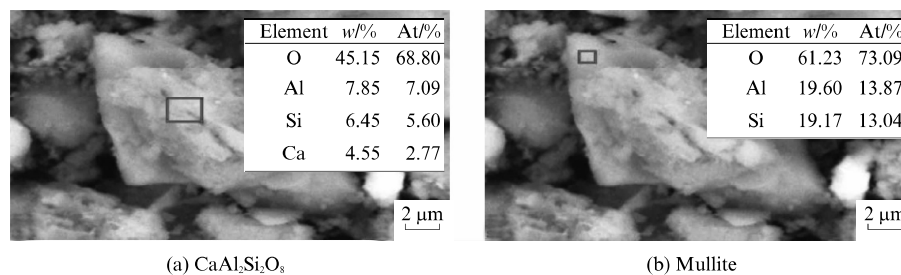
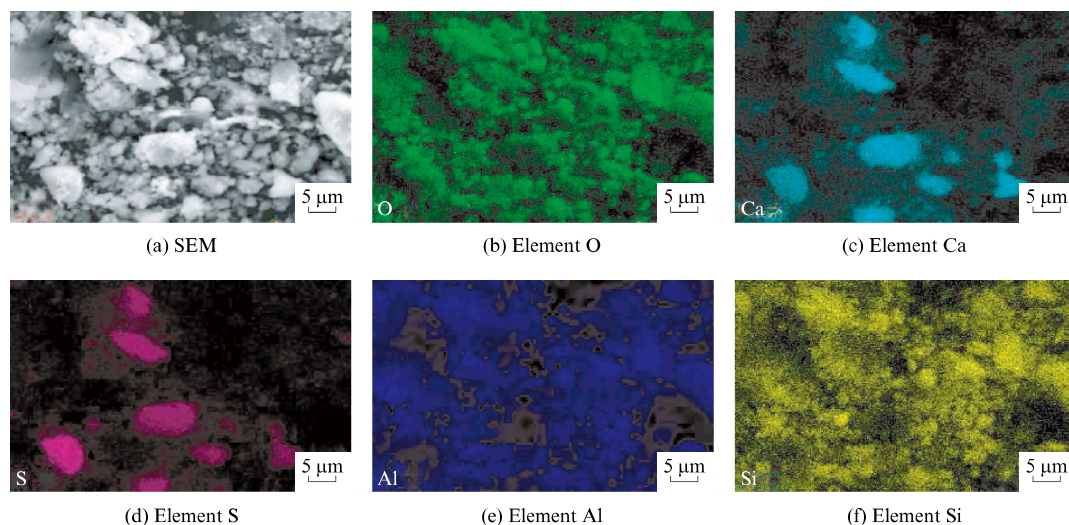


图6 水溶脱钙的CFB粉煤灰SEM-EDS面扫描图谱

Fig. 6 Surface scanning SEM-EDS images of decalcified CFB fly ash by washing with water

图7 CFB粉煤灰中 $\text{CaSO}_4$ 及 $\text{CaO}$ 的SEM-EDS面扫描图谱Fig. 7 Surface scanning SEM-EDS images of  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{CaO}$  in CFB fly ash

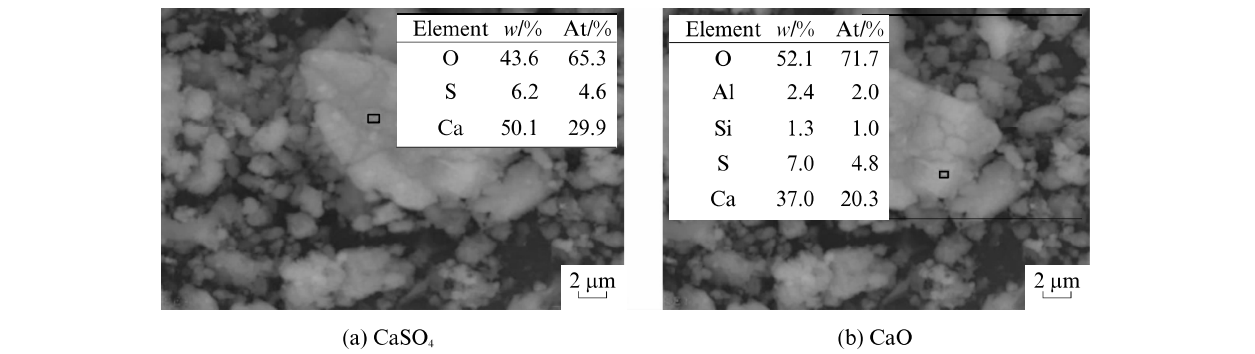


图 8 CFB 粉煤灰中 CaSO<sub>4</sub> 及 CaO 的 SEM-EDS 点扫描图谱  
Fig. 8 Point scanning SEM-EDS images of CaSO<sub>4</sub> and CaO

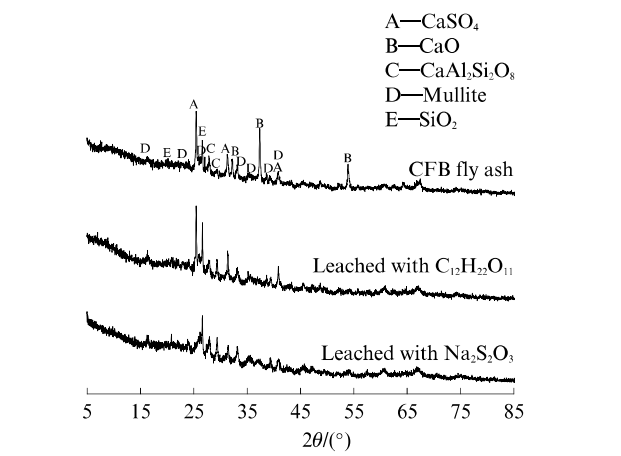


图 9 CFB 粉煤灰及分步提取后滤饼的 XRD 图谱  
Fig. 9 XRD patterns of original fly ash and residues after step by step extraction

射峰消失, CaSO<sub>4</sub> 与钙长石衍射峰无变化;第 2 步 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶液溶出后, CaSO<sub>4</sub> 衍射峰消失, 只留下钙长石衍射峰. 将各步溶出液进行定量分析, 得到 CFB 粉煤灰中的含钙物相组成为: CaO 含量为 5.03%, CaSO<sub>4</sub> 含量为 2.45%, 钙长石含量为 5.44%.

通过 ICP-OES 测得烘干后 CFB 粉煤灰中 CaO 和 CaSO<sub>4</sub> 的总含量为 12.92%, 该结果与上述分步溶出得到的 CaO 与 CaSO<sub>4</sub> 含量之和相吻合, 表明该定量分析方法可信.

2.3 不同粒度 CFB 粉煤灰中钙的定量分析

为进一步分析 CFB 粉煤灰中钙的赋存规律, 用

粒度仪对 CFB 粉煤灰进行粒度分析, 结果见图 10. 由图 10 经计算可知, CFB 粉煤灰中, 50% 体积分数的颗粒粒径(*d*)在 20.54 μm 以下, 90% 体积分数的颗粒粒径在 102.64 μm 以下.

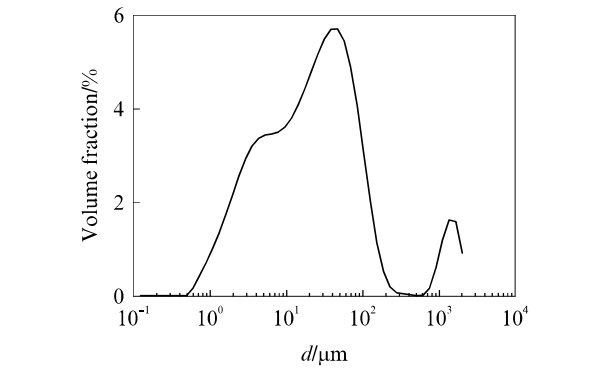


图 10 CFB 粉煤灰粒度分布  
Fig. 10 Particle size distribution of CFB fly ash

将 CFB 粉煤灰按 8 个粒级进行筛分, 对不同粒级的粉煤灰进行化学组成分析, 以表征 CFB 粉煤灰的化学组成随粒径的变化规律, 结果见表 2、3. 由表 2 可见, 58 μm 以上及 45~58 μm 粒级粉煤灰在总 CFB 粉煤灰的含量分别为 7.81% 和 10.76%. 由表 3 可见: 随着粒径的减小, CaO 含量逐渐增大, 铁含量变化趋势不明显, 而 SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量逐渐降低; 当粉煤灰粒级小于 38 μm 时, CaO 含量达到 14.33%, 高于 CFB 粉煤灰中 CaO 含量 (12.91%). 由此可见, 在 38 μm 以下粒级的小颗粒粉煤灰中钙得到富集.

表 2 不同粒级粉煤灰在 CFB 粉煤灰中的含量  
Table 2 Content of different size fly ash in CFB fly ash

|              |       |       |       |       |        |         |         |      |
|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|------|
| <i>d</i> /μm | <38   | 38-45 | 45-58 | 58-75 | 75-100 | 100-125 | 125-180 | >180 |
| w/%          | 76.18 | 5.25  | 10.76 | 4.84  | 1.51   | 0.76    | 0.52    | 0.18 |

对不同粒级的 CFB 粉煤灰进行物相分析, 结果如图 11 所示. 由图 11 可见: CaO 衍射峰只出现在

58 μm 粒级以下; CaSO<sub>4</sub> 衍射峰出现在 74 μm 粒级以下; 钙长石衍射峰出现在 100 μm 粒级以下; 在

表3 不同粒级 CFB 粉煤灰化学组成  
Table 3 Chemical composition of CFB fly ash with different sizes

| $d/\mu\text{m}$ | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$ | $w(\text{SiO}_2)/\%$ | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| $<38$           | 14.33              | 2.94                          | 27.23                | 32.38                         |
| 38–45           | 9.53               | 2.66                          | 36.23                | 34.43                         |
| 45–58           | 5.05               | 2.52                          | 38.79                | 35.79                         |
| 58–75           | 5.08               | 1.75                          | 40.38                | 35.62                         |
| 75–100          | 3.59               | 2.35                          | 48.19                | 41.29                         |
| 100–125         | 2.44               | 1.73                          | 46.28                | 39.74                         |
| 125–180         | 2.27               | 1.28                          | 45.86                | 40.43                         |
| $>180$          | 1.45               | 1.99                          | 48.28                | 40.47                         |

38  $\mu\text{m}$  粒级以下,  $\text{CaSO}_4$  峰及  $\text{CaO}$  峰都更为明显。

结合图 11 和表 2 分析可知: 100  $\mu\text{m}$  粒级以上钙含量低且增长缓慢; 100  $\mu\text{m}$  粒级以下的 CFB 粉煤灰中钙含量开始增大, 钙长石的衍射峰开始出现; 100  $\mu\text{m}$  粒级以上 CFB 粉煤灰质量较少, 且 CFB 粉煤灰在混凝土及水泥应用中, 其粒径一般在 45  $\mu\text{m}$  以下。

图 12 为不同粒级 CFB 粉煤灰经过分步提取后残渣的 XRD 图谱。由图 12 可见: 58  $\mu\text{m}$  以上粒级中,  $\text{CaSO}_4$  峰强度较低; 在 45~58  $\mu\text{m}$  粒级中, 有  $\text{CaO}$  峰出现,  $\text{CaSO}_4$  峰增强; 在 45  $\mu\text{m}$  以下粒级中,  $\text{CaO}$ 、 $\text{CaSO}_4$  及钙长石峰强度较高; 经过分步溶出后, 所有粒级残渣中均只有钙长石存在。

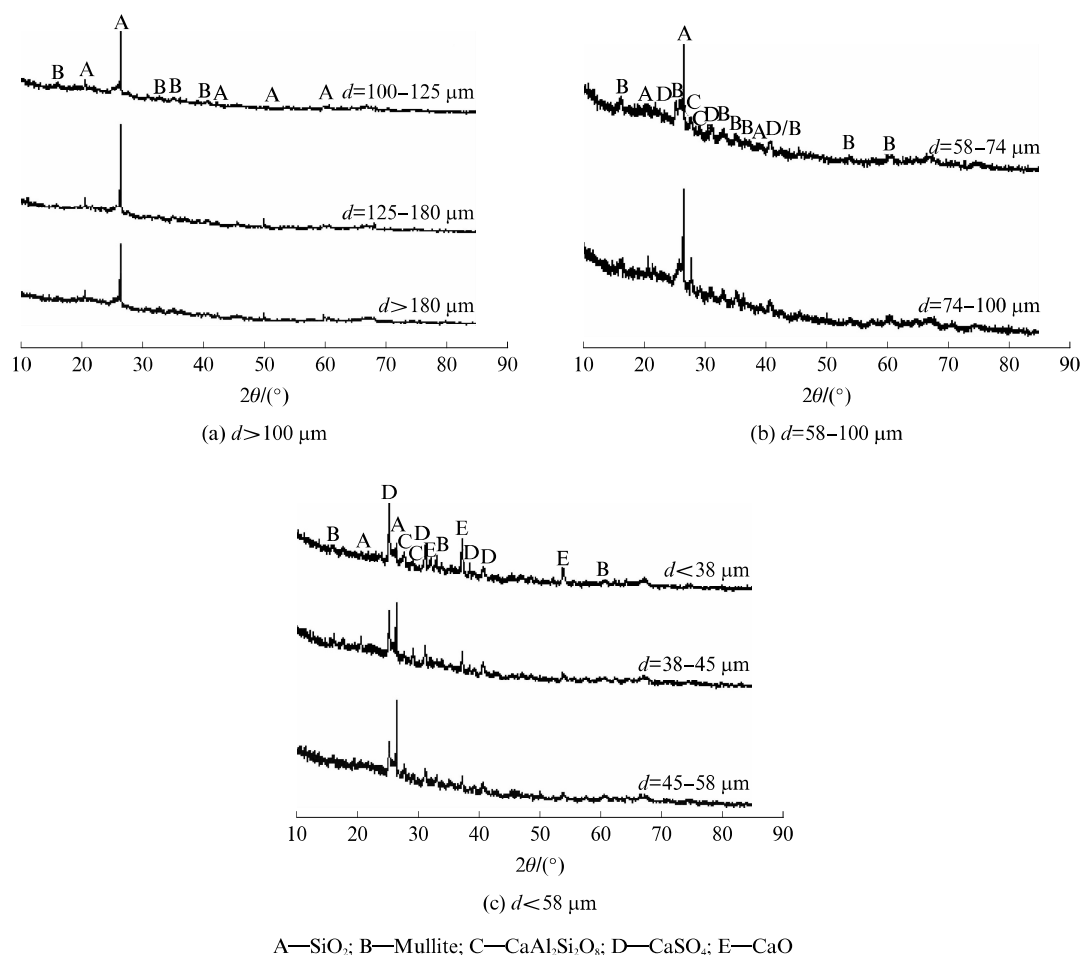


图 11 不同粒级 CFB 粉煤灰 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of CFB fly ash with different particle sizes

对 CFB 粉煤灰进行含钙物相定量分析, 结果见表 4。由表 4 可见, 在 58  $\mu\text{m}$  以上及 45~58  $\mu\text{m}$  的粒级内, CFB 粉煤灰中的钙大部分以钙长石的形式存在,  $\text{CaO}$  物相的含量均在 1.00% 左右。CFB 粉煤灰

应用于水泥及混凝土时,  $\text{CaO}$  物相含量要求在 1.00% 以下, 因此, CFB 粉煤灰中 58  $\mu\text{m}$  以上及 45~58  $\mu\text{m}$  粒级部分可在球磨达到 45  $\mu\text{m}$  以下后, 可直接应用于水泥及混凝土中。

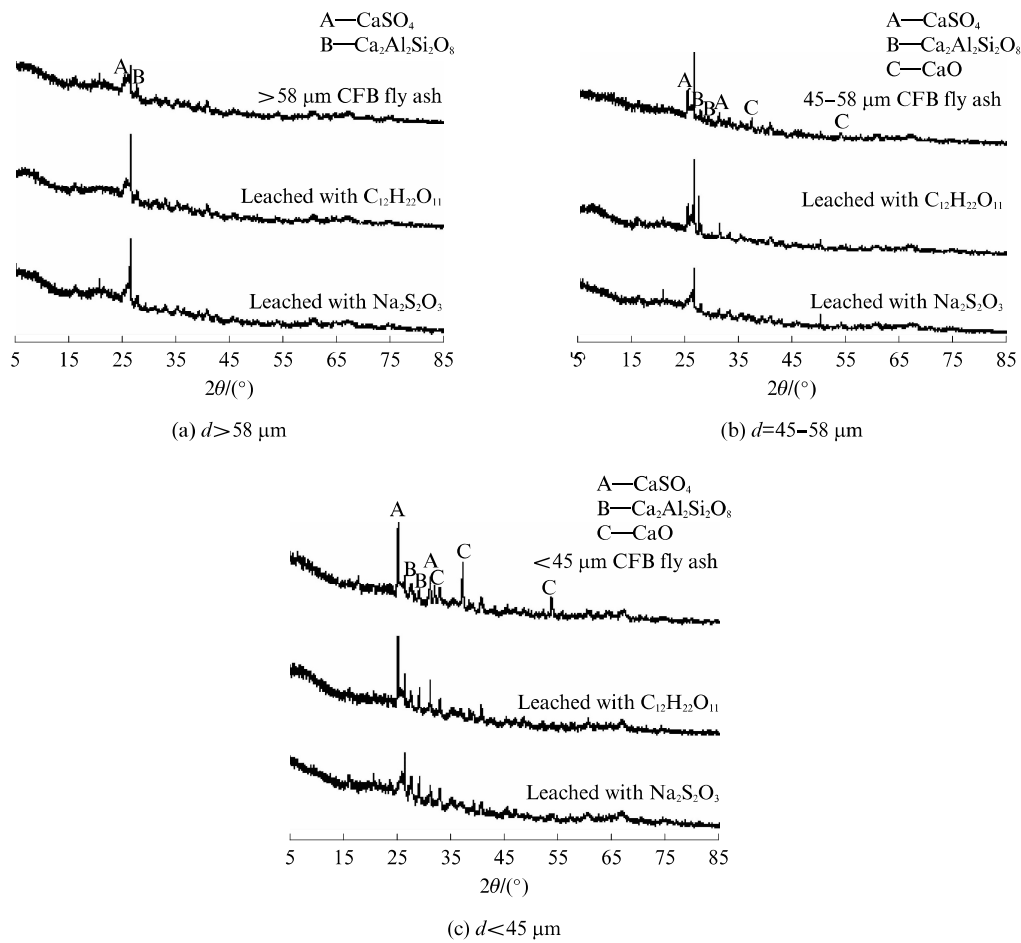


图 12 不同粒级 CFB 粉煤灰分步提取后残渣的 XRD 图谱

Fig. 12 XRD patterns of residues obtained from CFB fly ash with different particle sizes after step by step extraction

表 4 CFB 粉煤灰含钙物相定量分析  
Table 4 Quantitative analysis of calcium content in CFB fly ash

| Calcium-containing phase                   | $d/\mu\text{m}$ |         |       |
|--------------------------------------------|-----------------|---------|-------|
|                                            | $>58$           | $45-58$ | $<45$ |
| $w(\text{CaO})/\%$                         | 0.97            | 1.01    | 6.15  |
| $w(\text{CaSO}_4)/\%$                      | 0.95            | 1.05    | 2.67  |
| $w(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)/\%$ | 2.04            | 2.52    | 6.34  |

### 3 结论

(1)循环流化床(CFB)原煤中钙以白云石形式存在,而 CFB 粉煤灰中钙的赋存物相为  $\text{CaO}$ 、 $\text{CaSO}_4$  和钙长石。

(2)对 CFB 粉煤灰中钙的 3 种赋存形式进行了定量分析:CFB 粉煤灰中  $\text{CaO}$  含量为 5.03%, $\text{CaSO}_4$  含量为 2.45%,钙长石含量为 5.44%。

(3) $\text{CaO}$  和  $\text{CaSO}_4$  大部分存在于 CFB 粉煤灰颗粒表面,可用大量水洗脱除,钙长石黏附在莫来石及富铁物相表面,且与莫来石共生,无法通过水洗脱

除,其脱除方法还需进一步探索。

(4)CFB 粉煤灰中钙主要聚集在小颗粒中,58  $\mu\text{m}$  粒级以下出现  $\text{CaO}$  物相的衍射峰,75  $\mu\text{m}$  粒级以下出现  $\text{CaSO}_4$  物相的衍射峰,100  $\mu\text{m}$  粒级以下出现钙长石物相的衍射峰,且衍射峰随粒度减小而增强。对粒度分级的 CFB 粉煤灰进行钙定量分析,发现钙主要集中在 45  $\mu\text{m}$  粒级以下,其中  $\text{CaO}$  在 58  $\mu\text{m}$  以上及 45~58  $\mu\text{m}$  粒级中的含量均在 1.00% 左右,可用于水泥及混凝土中。

### 参考文献:

- [1] 黄谦.国内外粉煤灰综合利用现状及发展前景分析[J].中国井矿盐,2011,42(4):41-43.  
HUANG Qian. Analysis of development prospects and status quo of comprehensive utilization of fly ash at home and abroad [J]. China Well and Rock Salt, 2011, 42(4): 41-43. (in Chinese)
- [2] 杨星,呼文奎,贾飞云,等.粉煤灰的综合利用技术研究进展[J].能源与环境,2018(4):55-57.

- YANG Xing, HU Wenkui, JIA Feiyun, et al. Research progress of comprehensive utilization technology of fly ash[J]. Energy and Environment, 2018(4):55-57. (in Chinese)
- [3] 王建新, 李晶, 赵仕宝, 等. 中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12):3833-3841.
- WANG Jianxin, LI Jing, ZHAO Shibao, et al. Research progress and prospect of resource utilization of fly ash in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12):3833-3841. (in Chinese)
- [4] 张强, 梁杰, 石玉桥, 等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 广州化工, 2013, 41(14):6-8.
- ZHANG Qiang, LIANG Jie, SHI Yuqiao, et al. Comprehensive utilization of fly ash[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(14):6-8. (in Chinese)
- [5] 赵振清. 粉煤灰基自保温墙体材料制备工艺与性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.
- ZHAO Zhenqing. Synthesis and performance of insulating wall material based on coal fly ash[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 刘淑芳. 粉煤灰在新型建筑材料中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(增刊1):57-59.
- LIU Shufang. Application of fly ash in new style construction material[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(Suppl 1):57-59. (in Chinese)
- [7] 袁志方, 陈邵炎. 粉煤灰中游离氧化钙的分布特性[J]. 电力环境保护, 1991(4):1-7.
- YUAN Zhifang, CHEN Shaoyan. Distribution characteristics of free calcium oxide in fly ash[J]. Electric Power Environmental Protection, 1991(4):1-7. (in Chinese)
- [8] 朱川. 高碱煤中钠钙赋存、预脱除与热解迁移规律[D]. 北京:中国矿业大学, 2018.
- ZHU Chuan. Occurrence modes, removal and fate in pyrolysis of Na and Ca in high alkali coals[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 陈国恩, 吴祥. 顺蔗糖法联合测定有效氧化钙及伴生氧化镁[J]. 分析化学, 1978(5):408.
- CHEN Guoen, WU Xiang. Combined determination of effective calcium oxide and associated magnesium oxide by sucrose method[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 1978(5):408. (in Chinese)
- [10] 白进, 李文, 白宗庆, 等. 兖州煤中矿物质在高温下的变化[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3):369-372.
- BAI Jin, LI Wen, BAI Zongqing, et al. Transformation of mineral matters in Yanzhou coal ash at high temperature[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3):369-372. (in Chinese)
- [11] 陈彬, 吴有丽, 项双龙. 燃煤流化床锅炉炉内脱硫工业化技术研究[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2017(6):25-28.
- CHEN Bin, WU Youli, XIANG Shuanglong. Study on industrial desulfurization technology of coal-fired fluidized bed boiler[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2017(6):25-28. (in Chinese)
- [12] 王启民, 杨海瑞, 吕俊复, 等. 煤中矿物组分在流化床燃烧过程中的转化[J]. 煤炭转化, 2006, 29(1):85-88.
- WANG Qimin, YANG Hairui, LU Junfu, et al. Conversion of the minerals in fluidized bed combustion[J]. Coal Conversion, 2006, 29(1):85-88. (in Chinese)
- [13] 丁爱娟, 郑诗礼, 马淑花, 等. 循环流化床锅炉粉煤灰中硫的赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2013(2):58-62.
- DING Aijuan, ZHENG Shili, MA Shuhua, et al. Study on occurrence of sulfur in fly ash from circulating fluidized bed boiler[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(2):58-62. (in Chinese)
- [14] 张轶. 煤粉燃烧过程矿物转化的红外光谱研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2017.
- ZHANG Yi. Study on transformations of mineral matter during pulverized coal combustion by infrared spectroscopy[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 李文, 白进. 煤的灰化学[M]. 北京:科学出版社, 2013:35-39.
- LI Wen, BAI Jin. Chemistry of ash from coal[M]. Beijing: Science Press, 2013:35-39. (in Chinese)