

不同负荷下循环流化床锅炉粉煤灰的理化性质研究

马志斌¹,常可可¹,燕可洲¹,张培华²,程芳琴¹

(1. 山西大学 国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室 山西低附加值煤基资源高值利用协同创新中心, 山西 太原 030006; 2. 山西平朔煤矸石发电有限责任公司, 山西 平朔 036800)

摘要:为拓展循环流化床锅炉粉煤灰的利用途径,开发粉煤灰综合利用技术,研究了不同负荷下循环流化床(CFB)锅炉粉煤灰的粒径分布、化学组成、物相组成、 Al_2O_3 溶出特性和微观形貌等理化性质,考察了锅炉负荷对粉煤灰理化性质的影响。结果显示,CFB锅炉负荷对粉煤灰的粒径分布、化学组成和物相组成等性质影响较小,对粉煤灰中 Al_2O_3 溶出率影响较大, Al_2O_3 溶出率与样品颗粒的微观形貌有关,颗粒表面孔隙和裂缝越多, Al_2O_3 溶出率越高。CFB锅炉粉煤灰中的无定形相含量较高,在70%以上;CaO在粉煤灰中的主要存在形式有3种:硬石膏、生石灰和无定形CaO。 Al_2O_3 均是以无定形氧化物的形式存在,煤样中的 Al_2O_3 在燃烧过程中更容易以飞灰的形式排出;石英和硬石膏更容易以底渣的形式排出。

关键词:循环流化床;负荷;飞灰;底渣;理化性质

中图分类号:X773 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2016)04-0020-06

Characteristics of fly ash and slag in circulating fluidized bed under different conditions

MA Zhibin¹, CHANG Keke¹, YAN Kezhou¹, ZHANG Peihua², CHENG Fangqin¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Efficient Utilization Technology of Coal Waste Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Pingshuo Gangue Power Generation Co., Ltd., Shuozhou 036800, China)

Abstract: To expand comprehensive utilization of fly ash formed in circulating fluidized bed and develop its utilization technologies, the characteristics including particle size distribution, chemical composition, mineral matters and microscopic morphology of fly ash and slag formed in circulating fluidized bed under different conditions were investigated. The leaching ratio of aluminum oxide in fly ash was also studied. The results showed that the effects of load on particle size distribution, chemical composition and mineral matters of fly ash and slag were negligible. The leaching ratio of aluminum oxide in fly ash was high when there was much pore and crack on the surface of ash. The content of amorphous matters in fly ash was more than 70%. The calcium oxide existed in fly ash mainly in the forms of anhydrite, lime and amorphous matter. The aluminum oxide existed in fly ash only in the form of amorphous matter, and the content of aluminum oxide in fly ash was higher than in slag. The contents of quartz and anhydrite in the slag were more than those in the fly ash obviously.

Key words: circulating fluidized bed; loading; fly ash; slag; physical and chemical characteristic

0 引 言

煤矸石是煤炭开采和分选加工过程中产生的固体废弃物,具有灰分高和热值低的特点,其产生量

大,利用率低,大量堆存带来了严重的环境污染^[1]。循环流化床(CFB)作为一种新型的燃烧技术,具有燃料适应性广、燃烧效率高、燃烧强度大、负荷易调节等优点,是燃烧煤矸石等低热值燃料的理想炉

收稿日期:2016-04-19;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.04.005

基金项目:山西省煤基重点科技攻关项目(MD-2014-03,MC-2014-06)

作者简介:马志斌(1987—),男,山东聊城人,讲师,博士,硕士生导师,从事煤基固体废弃物资源化利用研究。通讯作者:程芳琴,教授,博士生导师,主要从事劣质资源综合利用研究。E-mail:cfangqin@163.com

引用格式:马志斌,常可可,燕可洲,等.不同负荷下循环流化床锅炉粉煤灰的理化性质研究[J].洁净煤技术,2016,22(4):20-25.

MA Zhibin, CHANG Keke, YAN Kezhou, et al. Characteristics of fly ash and slag in circulating fluidized bed under different conditions[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 20-25.

型^[2-3]。由于煤矸石中的灰分较高,而且 CFB 锅炉采用添加石灰石粉的方式进行炉内固硫,利用 CFB 锅炉燃烧煤矸石时会产生大量的粉煤灰(包括飞灰和底渣)。近几年来,随着我国大力推广低热值煤 CFB 燃烧发电技术,CFB 锅炉粉煤灰的产生量逐年增加。CFB 锅炉操作温度低、采用炉内固硫,产生粉煤灰的理化性质与煤粉炉产生的粉煤灰有较大的区别。全面掌握 CFB 锅炉粉煤灰的理化性质,对其利用技术的开发具有重要的意义。研究表明,CFB 锅炉粉煤灰烧失量大,其中的矿物质主要有硬石膏、石英和 CaO 等^[4-5],还有少量莫来石,玻璃相含量较少^[6]。与煤粉炉粉煤灰相比,CFB 锅炉粉煤灰化学组成中 CaO 和 SO₃ 的含量较高,这是由炉内固硫造成的^[7]。李鹏^[8]研究表明,CFB 锅炉粉煤灰的粒度水平与煤粉炉粉煤灰基本接近,颗粒大多低于 40 μm,约占总量的 77.43%;赵计辉等^[9]研究表明,CFB 灰的粒径分布在 0.1~16 μm(占 52.89%),以细颗粒(0.1~8.0 μm)为主,煤粉炉粉煤灰粗颗粒(16~65 μm)含量较多。CFB 灰没有固定的形状,多为不规则状颗粒^[10]。目前,尚没有针对不同 CFB 锅炉负荷所产生粉煤灰(飞灰和底渣)理化性质的研究,锅炉负荷对飞灰和底渣中矿物组成、化学成分分布的影响尚不明确。山西省北部地区所产煤矸石中富含黏土类矿物质,燃烧所产生粉煤灰中的 Al₂O₃ 含量较高,提取其中的铝制备铝系产品是高铝粉煤灰高值化利用的重要途径之一。粉煤灰中 Al₂O₃ 在盐酸溶液中的溶出率在在一定程度上可以反映出粉煤灰中 Al₂O₃ 的活性和存在状态。研究 CFB 锅炉负荷对粉煤灰中 Al₂O₃ 溶出率的影响,为 CFB 锅炉粉煤灰的高值利用提供基础数据。

本文利用激光粒度仪测定了不同负荷下 CFB 锅炉飞灰的粒径分布;利用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-MS)测定了样品的化学组成;利用 X 射线衍射仪(XRD)研究了飞灰和底渣的矿物质种类、含量及无定形相含量,并结合化学组成,获得了样品中无定形相的组成;利用盐酸酸浸法测定了不同样品中 Al₂O₃ 溶出率的变化规律,并利用扫描电子显微镜研究了不同 Al₂O₃ 溶出率样品的微观形貌,以深化对 CFB 锅炉粉煤灰理化性质的认识。

1 试 验

1.1 粉煤灰样品采集

在山西平朔煤矸石发电有限责任公司的 CFB 3

号机组(300 MW)上分别采集不同负荷(170、196、209、236、262 MW)运行下的飞灰和底渣,不同负荷所对应的密相区和稀相区温度见表 1。

表 1 锅炉负荷所对应的密相区和稀相区温度
Table 1 Dense zone and dilute-phase zone temperature in different loads

负荷/MW	密相区温度/℃	稀相区温度/℃
170	835	698
196	837	725
209	811	710
236	866	723
262	859	736

当机组调整至相应负荷并稳定一段时间后同时取飞灰和底渣,飞灰经旋风分离器分离、布袋除尘器收集后取自除尘器下部输灰管道出口处,底渣取自输渣机尾部。所采集的飞灰用“FA+相应负荷”表示,底渣用“S+相应负荷”表示,如 170 MW 负荷下采集的飞灰用“FA170”表示,该负荷下的底渣用“S170”表示。

利用“四分法”在采集的样品中取 200 g,置于干燥器中备用。

1.2 样品的表征

1.2.1 粒径分布

利用 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪测定未经研磨飞灰的粒径分布。

1.2.2 化学组成

按照 ASTM D 6349—2013《用感应耦合等离子体-原子发射光谱法测定由煤和焦炭燃烧产生的煤焦炭和固体残留物中主要和次要元素的标准试验方法》利用 Thermo iCAP 6300 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Thermo Fisher Scientific Inc.)测定飞灰和底渣的化学成分。

1.2.3 物相组成及定量计算

利用 Bruker D2 型 X-射线衍射仪(XRD)测定样品的矿物质种类。仪器参数如下:采用 Cu 靶,扫描速度 4(°)/min,步长 0.02°,扫描衍射角(2θ)为 10°~80°。

采用 ZnO 为标准物质,在灰中加入质量分数为 10%的 ZnO(AR,国药集团化学试剂有限公司),研磨均匀后测得混合样品的 XRD 谱图,然后利用衍射仪自带的 TOPAS 软件进行定量分析,得到样品中各晶体矿物质的含量和无定形相的含量。

1.2.4 Al₂O₃ 溶出率的测定

取研磨至≤0.074 mm 的飞灰和底渣,分别用体积分数为20%的盐酸进行酸浸2 h,固液比为1:3,酸浸温度为20%盐酸和水的共沸点(106 ℃)^[11],反应完成后进行固液分离,将酸浸液稀释后,用ICP-MS测定溶液中的铝离子浓度,用下式计算样品中 Al₂O₃ 的溶出率

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 的溶出率} = \frac{\text{溶于盐酸 Al}_2\text{O}_3 \text{ 的质量}}{\text{样品中 Al}_2\text{O}_3 \text{ 的质量}} \times 100\%$$

1.2.5 微观形貌

利用 Hitachi TM3030 型扫描电子显微镜(SEM)对样品进行微观形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 粒径分布

飞灰的粒径分布如图1所示。飞灰的粒径分布较广,在0.5~150 μm 各样品的粒径分布接近正态分布。FA170 和 FA209 的粒径分布基本一致,25 μm 以下的颗粒仅占20%左右,100 μm 以下的颗粒约占60%。FA196 和 FA236 的粒径分布基本一致,25 μm 以下的颗粒约占45%,100 μm 以下的颗粒约占88%,比 FA170 样品的平均粒径小。而 FA262 的粒径分布介于两者之间,100 μm 以下的颗粒占80%左右。不同锅炉负荷下所产生飞灰的粒径分布无明显规律。

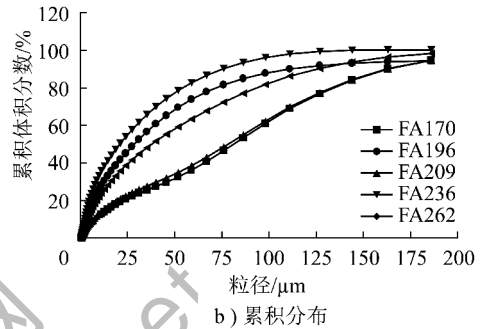
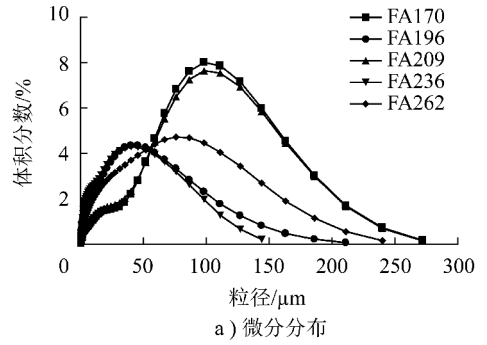


图1 不同负荷下飞灰的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of fly ash in different loads

2.2 化学组成

不同锅炉负荷下飞灰和底渣的主要化学组成和烧失量见表2。飞灰中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的含量之和在75%左右,属于高硅铝煤灰,Al₂O₃ 含量较高,平均含量在33%左右,这与电厂所采用的煤矸石原料中黏土类矿物质含量较高有关。底渣中的 CaO 和 SO₃

表2 飞灰和底渣的主要化学组成和烧失量

Table 2 Main chemical composition and loss of ignition of fly ash and slag

样品	质量分数/%							烧失量/%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	TiO ₂	
FA170	42.73	34.19	3.30	9.77	5.95	1.21	1.07	1.48
FA196	40.45	32.00	3.65	11.98	6.45	1.35	1.12	2.71
FA209	41.32	33.36	3.52	10.39	6.42	1.29	1.07	1.66
FA236	41.34	34.06	3.60	10.89	5.00	1.26	1.13	2.48
FA262	41.37	32.91	3.56	11.08	6.02	1.23	1.17	2.58
飞灰平均值	41.44	33.30	3.53	10.82	5.97	1.27	1.11	2.18
S170	41.07	26.52	3.17	14.84	6.85	1.13	0.65	3.98
S196	41.14	25.50	3.32	14.78	7.25	1.19	0.70	4.56
S209	39.98	25.58	3.09	15.71	9.78	1.23	0.70	2.73
S236	40.02	27.99	2.89	14.92	8.55	1.16	0.70	2.18
S262	39.64	25.92	2.95	16.21	8.55	1.33	0.63	3.48
底渣平均值	40.37	26.30	3.08	15.29	8.20	1.21	0.68	3.39

含量比飞灰中两者的含量高,说明固硫产物 CaSO₄ 更容易进入底渣,底渣的烧失量明显高于飞灰的烧失量,说明底渣中的残炭含量高,这是由于 CFB 锅

炉进料粒度较大(≤10 mm),未燃烬炭颗粒保持了一定的粒度,其密度较大,容易随底渣排出。由于底渣中的钙和硫含量比飞灰中高,降低了单位质量底

渣中其他氧化物的含量,然而,各氧化物含量的降低幅度并不一致,Al₂O₃含量的降低幅度最大,其他氧化物含量的降低幅度相对较小。与飞灰相比,底渣中Al₂O₃的含量显著降低,这说明煤矸石中矿物质在燃烧过程中产生的Al₂O₃更容易随飞灰排出。

不同CFB锅炉负荷下产生粉煤灰样品的化学组成基本一致,差异较小,说明CFB锅炉负荷对粉煤灰样品的化学组成几乎没有影响,随着CFB锅炉负荷的增大,飞灰的烧失量稍有增加,但底渣的烧失量并无明显的规律性变化,说明在此研究中,锅炉负荷对燃烧效率并没有太大的影响。

2.3 矿物组成

FA170、S170的XRD谱图如图2所示。FA170中的晶体矿物质主要有:石英(SiO₂)、硬石膏(CaSO₄)、赤铁矿(Fe₂O₃)和生石灰(CaO)。硬石膏是煤矸石燃烧过程中的固硫产物,未与SO₂反应的一部分CaO转化为生石灰。原料煤中含铁矿物质如黄铁矿(FeS₂)等在燃烧过程中转化为赤铁矿^[12]。

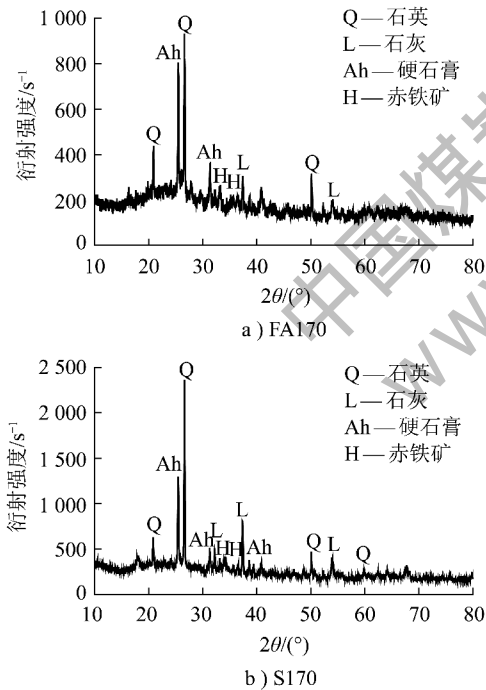


图2 FA170和S170的XRD谱图

Fig. 2 XRD patterns of FA170 and S170

S170中的矿物质种类与FA170一致。其他样品中的矿物质种类也是以上4种。锅炉负荷对飞灰和底渣中的矿物质种类没有影响。

飞灰和底渣中主要矿物质与无定形相的含量变化如图3所示。飞灰中的石英含量约6%,赤铁矿含量约3.5%,生石灰含量约2%,由于CFB锅炉采

用炉内固硫方式,使得晶体矿物质中硬石膏的含量最高,约为10%,飞灰中晶体矿物质的总含量较低,约为24%。除晶体矿物质外,粉煤灰中还含有一定量的无定形相,无定形相不能用XRD检出,但可以将XRD定量结果和化学分析法相结合通过差减法得到其含量和化学组成^[13-14]。根据无机氧化物形态的不同,无定形相包括非结晶态或结晶度较差的氧化物和玻璃态物质。当燃烧温度较高(通常大于1000℃)时,煤灰中的矿物质之间会发生低温共融,部分矿物质熔融后转化为玻璃态^[15-17],其在煤粉炉产生的粉煤灰中大量存在。CFB锅炉的燃烧温度通常为800~900℃,该温度范围内大部分矿物质不能熔融,因此所产生粉煤灰中的无定形相主要是非结晶氧化物。本研究所采集飞灰中的无定形含量较高,平均在77%以上。由飞灰的化学组成和XRD定量结果对比可知,无定形相的化学成分主要为SiO₂、Al₂O₃和CaO。原料煤矸石中的高岭石等黏土矿物质含量较高,其在燃烧过程中发生分解生成大量的SiO₂和Al₂O₃等无定形氧化物,在该温度范围内,无定形氧化物之间难以发生反应生成晶体矿物质。飞灰中的无定形CaO来自于部分固硫剂(石灰石)在燃烧过程中的分解。

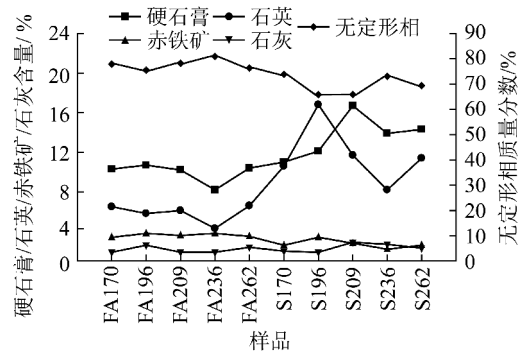


图3 飞灰和底渣中主要矿物质与无定形相的含量变化

Fig. 3 Content variations of the main mineral and amorphous matters in the fly ash and slag

由图3可知,底渣中石英的平均含量约为11%,硬石膏平均含量约为14%,赤铁矿平均含量约为3%,生石灰平均含量约为2.3%。与飞灰相比,底渣中的硬石膏和石英含量较高,这说明硬石膏和石英等矿物质更容易进入到底渣中,因此,单位质量底渣中的无定形含量比飞灰低,约为70%。赤铁矿在飞灰和底渣中的含量分布相差不大,底渣中的生石灰含量比飞灰中略高。

由表2可知,飞灰中SiO₂平均含量为41.44%,

而 XRD 计算结果显示,飞灰中的石英含量在 6% 左右,其余的 SiO_2 是以非结晶或结晶度差的氧化物形式存在,即无定形 SiO_2 ,约占飞灰中 SiO_2 总量的 85%。XRD 结果显示,飞灰和底渣中并未检测到含有 Al_2O_3 的晶体矿物质,因此, Al_2O_3 均是以非结晶氧化物的形式存在,即无定形 Al_2O_3 。与 Al_2O_3 相反,飞灰和底渣中的 Fe_2O_3 均是以晶体矿物质赤铁矿的形式存在。 CaO 的存在形式有 3 种:硬石膏、生石灰和无定形 CaO ,不同样品中 CaO 在三者中的含量分布如图 4 所示。

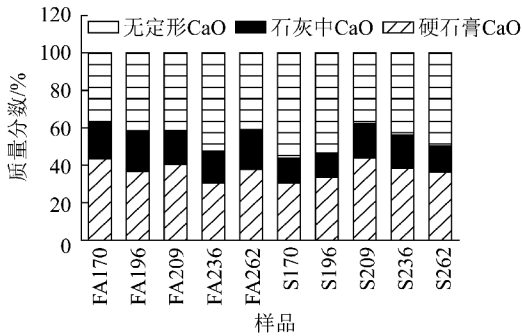


图 4 不同样品中 CaO 在硬石膏、生石灰和无定形相中的含量

Fig. 4 Contents and concentration of calcium oxide in the anhydrite, lime and amorphous phase

飞灰中约有 38% 的 CaO 以硬石膏形式存在, 20% 左右的 CaO 以生石灰形式存在, 42% 左右的 CaO 以无定形氧化物形式存在;而底渣中以硬石膏存在的 CaO 平均比例约为 37%, 以生石灰形式存在的 CaO 平均比例约为 15%, 以无定形 CaO 形式存在的平均比例约为 48%, 说明底渣中含有较多的无定形 CaO 。

2.4 Al_2O_3 的溶出率

飞灰和底渣在盐酸溶液中 Al_2O_3 的溶出率如图 5 所示。结果显示,底渣中 Al_2O_3 溶出率平均值(约 54%)比飞灰中 Al_2O_3 溶出率平均值(约 44%)高 10%, 说明底渣中的 Al_2O_3 更容易溶于盐酸溶液。在飞灰中,FA196 中 Al_2O_3 的溶出率最高,约 57%; FA170 中 Al_2O_3 的溶出率最低,约 35%。在底渣中,S196 中 Al_2O_3 的溶出率最高,可达 75%, S236 中 Al_2O_3 的溶出率最低,约 34%。由此可见,CFB 锅炉负荷对飞灰和底渣样品中 Al_2O_3 溶出率的影响很大,196 MW 负荷下所产生的飞灰和底渣中 Al_2O_3 的溶出率均最高。由 2.2 和 2.3 部分可知,飞灰和底渣中的 Al_2O_3 均是以无定形氧化物形式存在的,不同飞灰样品的化学组成、矿物质组成和 Al_2O_3 含量均相差不大,而且,所有样品均经过研磨,消除了粒

度对溶出率的影响。然而,样品颗粒的微观形貌对样品中 Al_2O_3 与 HCl 的接触程度有较大的影响,因此, Al_2O_3 溶出率的差异可能与样品颗粒的微观形貌有关。

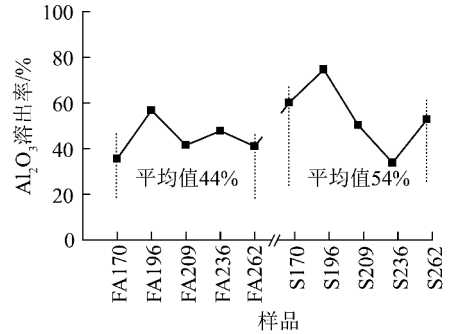


图 5 不同样品中 Al_2O_3 的溶出率

Fig. 5 Leaching ratio of aluminum oxide in the different samples

2.5 微观形貌

选择 Al_2O_3 溶出率差别较大的 FA170 和 FA196、S196 和 S236 等 4 个样品进行微观形貌分析,如图 6 所示,FA170 和 S236 颗粒的表面比较致密、光滑,孔隙较少,盐酸溶液与颗粒内部的 Al_2O_3 接触阻力较大,导致颗粒内部 Al_2O_3 难以溶出;而 FA196 和 S196 颗粒的表面有较多孔隙和裂痕,盐酸溶液容易通过这些孔隙和裂痕与颗粒内部的 Al_2O_3 接触,从而将 Al_2O_3 溶出。不同锅炉负荷下,进料和燃烧情况有较大差别,颗粒在锅炉内的碰撞、爆裂、流动等情况不一样,导致所产生飞灰和底渣的颗粒形貌有较大差别。

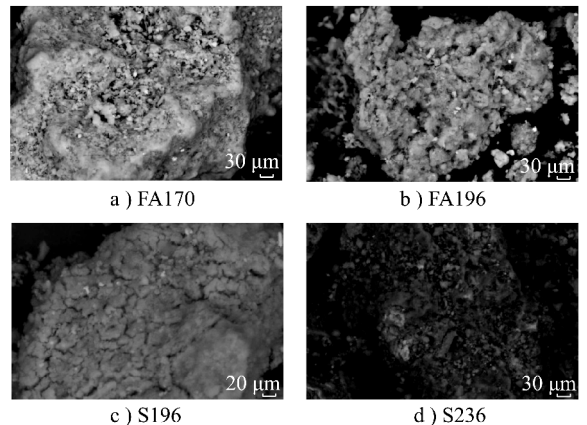


图 6 FA170、FA196、S196 和 S236 的 SEM 图

Fig. 6 SEM photos of FA170, FA196, S196 and S236

3 结 论

1) CFB 锅炉负荷对飞灰粒径分布、粉煤灰(飞

灰和底渣)化学组成和物相组成等性质的影响较小,对 Al_2O_3 的溶出率和颗粒微观形貌影响较大。底渣的 Al_2O_3 溶出率高于飞灰。196 MW 负荷下,所生成飞灰和底渣中 Al_2O_3 的溶出率最高。粉煤灰中 Al_2O_3 的溶出率与颗粒微观形貌有较大的关系,颗粒表面孔隙和裂痕越多, Al_2O_3 越容易溶出。

2) CFB 锅炉飞灰的粒径分布较广,在 $0.5 \sim 150 \mu\text{m}$ 内不同样品的粒径分布接近正态分布。

3) CFB 锅炉粉煤灰中的无定形相含量较高,在70%以上,无定形相主要是以非结晶氧化物的形式存在,其主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 。 Al_2O_3 不参与晶体矿物质的生成,均是以无定形氧化物的形式存在。粉煤灰中的 CaO 主要有3种存在形式:硬石膏、生石灰和无定形氧化物,其中生石灰所占比例较低,约为20%。 Al_2O_3 更容易进入飞灰中,石英和硬石膏更容易进入底渣中。

参考文献 (References):

[1] 沈炳耘,荀华,韩建春. 洗中煤和煤矸石的混合燃烧特性分析[J]. 热能动力工程,2011,26(5):571-575.
Shen Bingyun, Xun Hua, Han Jianchun. Combustion characteristics of middlings and coal gangue blends[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(5):571-575.

[2] 谭桂蓉,吴秀俊. CFB 脱硫灰渣的性能及应用研究[J]. 粉煤灰综合利用,2009(4):37-40.
Tan Guirong, Wu Xiujun. Properties and applying researches of CFB desulfurized slag[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2009(4):37-40.

[3] 骆仲洪,何宏舟,王勤辉,等. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 动力工程,2004,24(6):761-767.
Luo Zhongyang, He Hongzhou, Wang Qinghui, et al. Status Quo-Technology of circulating fluidized bed boiler and its prospects of development[J]. Power Engineering, 2004, 24(6):761-767.

[4] 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,2010,22(5):10-13.
Li Junqi, Gong Min, Jin Huixin, et al. Research on pulverized coal ash character with different combustion way[J]. Coal Ash, 2010, 22(5):10-13.

[5] Wu Y H, Wang Ch Bo, Tan Y W, et al. Characterization of ashes from a 100 kWth pilot-scale circulating fluidized bed with oxy-fuel combustion[J]. Applied Energy, 2011, 88(9):2940-2948.

[6] 姚志通,夏枚生,叶瑛,等. 循环流化床锅炉脱硫灰和普通粉煤灰的特性研究[J]. 粉煤灰综合利用,2010(1):6-8.
Yao Zhitong, Xia Meisheng, Ye Ying, et al. Study on characteristics of CFBB desulfurated fly ash and pulverized fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2010(1):6-8.

[7] 杨蔚,董发勤,何平. 燃煤固硫灰渣的特性及其资源化利用现状[J]. 粉煤灰综合利用,2013(4):50-56.
Yang Wei, Dong Faqin, He Ping. The characteristics and resource

utilization status of coal-fired desulphurization ash residue[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2013(4):50-56.

[8] 李鹏. 大型循环流化床粉煤灰性能研究[J]. 粉煤灰,2013,25(6):15-18.
Li Peng. Study of integrated utilization of fly ash from large-scale CFB boiler[J]. Fly Ash, 2013, 25(6):15-18.

[9] 赵计辉,王栋民,惠飞,等. 矸石电厂循环流化床灰渣特性分析及资源化利用途径[J]. 中国矿业,2014,23(7):133-138.
Zhao Jihui, Wang Dongmin, Hui Fei, et al. Characterization and resource utilization of circulating fluidized bed ash of gangue power plant[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(7):133-138.

[10] 裴亚利,魏存弟,杨殿范,等. 循环流化床灰的特征及综合利用研究[J]. 粉煤灰综合利用,2006(5):14-16.
Pei Yali, Wei Cundi, Yang Dianfan, et al. Study on characteristics and comprehensive utilization of circulating fluidized bed ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2006(5):14-16.

[11] 燕可洲,郭彦霞,张俊才,等. 潞安矿区煤矸石用于氧化铝提取的研究[J]. 煤炭转化,2014,37(4):85-89.
Yan Kezhou, Guo Yanxia, Zhang Juncai, et al. Study on alumina extraction from coal gangue in Lu'An mining area[J]. Coal Conversion, 2014, 37(4):85-89.

[12] 马志斌,白宗庆,白进,等. 高温弱还原气氛下高硅铝比煤灰变化行为的研究[J]. 燃料化学学报,2012,40(3):279-285.
Ma Zhibin, Bai Zongqing, Bai Jin, et al. Evolution of coal ash with high Si/Al ratio under reducing atmosphere at high temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(3):279-285.

[13] Ward C R, Taylor J C, Matulis C E, et al. Quantification of mineral matter in the argonne premium coals using interactive rietveld-based X-ray diffraction[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 46:67-82.

[14] Ward C R, French D. Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry[J]. Fuel, 2006, 85:2268-2277.

[15] 姚多喜,支霞臣,郑宝山. 煤中矿物质在燃烧过程中的演化特征[J]. 中国煤田地质,2003,15(2):10-11.
Yao Duoxi, Zhi Xiachen, Zheng Baoshan. Evolutionary features of minerals in coal during coal combustion[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(2):10-11.

[16] 孙俊民. 燃煤固体产物的矿物组成研究[J]. 矿物学报,2001,21(1):14-18.
Sun Junmin. A study of the mineral composition of coal combustion residues[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(1):14-18.

[17] 杨建国,邓芙蓉,赵虹,等. 煤灰熔融过程中的矿物演变及其对灰熔点的影响[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):122-126.
Yang Jianguo, Deng Furong, Zhao Hong, et al. Mineral conversion of coal-ash in fusing process and the influence to ash fusion point[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(17):122-126.