

燃烧工况对燃煤电厂灰渣理化特性的影响

魏绍青¹, 田秀青², 杨凤玲^{2,3}, 程芳琴^{2,3}

(1. 晋能长治热电有限公司, 山西 长治 046011; 2. 山西大学 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;
3. 山西省煤炭清洁燃烧发电工程技术研究中心(筹), 山西 太原 030006)

摘要:为拓展目前电厂粉煤灰的利用途径,以低挥发分煤在不同燃烧工况下形成的飞灰和底渣为研究对象,采用化学分析、X 射线衍射、物理吸附仪、扫描电子显微镜、热重差热分析等测试手段,探讨各燃烧条件对灰渣理化性质的影响。结果表明,同一炉型锅炉负荷对粉煤灰比表面积、化学组成和物相组成等性质的影响较小,煤质种类和锅炉炉型对粉煤灰理化性质的影响较大;灰渣理化性质的区别,无论是化学组成、矿物种类以及微观形貌,均主要源于煤粉炉(PC)、循环流化床锅炉(CFB)与 W 火焰炉(WFB)燃烧温度的不同和煤质种类的影响。

关键词:燃煤电厂;飞灰;底渣;理化特性;锅炉炉型

中图分类号:TK6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)06-0083-07

Effects of combustion conditions on the characteristics of fly ash and slag in coal-fired power plants

WEI Shaoqing¹, TIAN Xiuqing², YANG Fengling^{2,3}, CHENG Fangqin^{2,3}

(1. Jinneng Changzhi Co-generation Co., Ltd., Changzhi 046011, China;

2. Shanxi Collaborative Innovation Center of High Value-added Utilization of Coal-related Wastes, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. Shanxi Province Engineering Research Center of Clean Coal Combustion for Power Generation (Under Preparation), Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to expand the comprehensive utilization of fly ash and slag from power plant, in this paper, fly ash and slag produced from combustion of low volatile coals in different types of boilers under different conditions were studied. To investigate the effect of combustion conditions on the characteristics of fly ash and slag, the physical and chemical characteristics were analyzed by inductively coupled plasma (ICP), X-ray diffraction (XRD), physical adsorption instrument (BET), thermogravimetric analysis (TG-DTG) and scanning electron microscopy (SEM), etc. The results show that the effects of coal variety and boiler type on physicochemical properties of fly ash and slag are obvious, while the effects of operating load of same type boiler on chemical composition, mineral matters and microscopic morphology of fly ash and slag are negligible. The characteristics of fly ash and slag are different, which is due to the difference of PC, CFB and WFB combustion temperature and the influence of coal quality.

Key words: coal-fire power plant; fly ash; slag; physical and chemical characteristic; boiler style

0 引 言

我国是产煤大国,70% 煤炭应用于发电^[1],粉煤灰作为电厂燃煤的副产品,每年的排放已超过 1 亿 t,即使电厂节能效率不断提高,到 2020 年,

我国灰渣的年总排放量预计是现在的 3 倍左右^[2]。粉煤灰的大量排放和堆积不仅侵占土地,而且对环境危害严重,构成了对生态和环境的双重破坏。而限于各种利用途径的消纳能力,目前灰渣的综合利用率不足 70%^[3-4],因此深入研究电厂粉煤灰理化

收稿日期:2017-08-28;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.06.016

基金项目:NSFC-山西省联合基金重点资助项目(U1610254);山西省科技重大专项资助项目(MD2014-03,MD2015-01)

作者简介:魏绍青(1964—),男,山西霍州人,高级工程师,从事贫煤燃烧发电技术及管理方面的研究工作。E-mail:czrdyang@126.com。通讯作者:程芳琴,教授,从事固体废弃物资源化利用工作。E-mail:cfangqin@163.com

引用格式:魏绍青,田秀青,杨凤玲,等.燃烧工况对燃煤电厂灰渣理化特性的影响[J].洁净煤技术,2017,23(6):83-89.

WEI Shaoqing, TIAN Xiuqing, YANG Fengling, et al. Effects of combustion conditions on the characteristics of fly ash and slag in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 83-89.

特性,为其资源化提供理论基础,对于开展粉煤灰的综合利用具有很重要的意义。

关于电厂粉煤灰理化性质已有诸多研究,薛兴华等^[5]对电厂燃煤飞灰粒度特征进行了研究,认为煤粒燃烧破裂使 75 μm 以上的颗粒减少,粒径分布主要集中在 75 μm 以下,且残焦破裂程度不同使得飞灰粒度分布变化加大;马志斌等^[6]对不同负荷下循环流化床锅炉粉煤灰的理化性质进行了研究,认为 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;目前大多学者对燃煤电厂灰渣理化特性的研究,仅针对单一电厂灰渣性质,较少对不同炉型、煤质及工况等因素对粉煤灰理化特性影响进行系统分析^[7-9]。

煤粉锅炉(PC)、循环流化床锅炉(CFB)和 W 火焰炉(WFB)是目前我国发电厂应用较多的锅炉类型,其中煤粉炉燃料多为优质煤,经过粉碎、研磨后,进入高温炉膛,炉内温度一般在 1 200 ~ 1 400 $^{\circ}\text{C}$,甚至更高;而 CFB 锅炉对煤种的适应性较强,可燃用劣质煤,燃煤入炉颗粒较大,炉排属于固定床半沸腾,不同于煤粉炉的全沸腾,其炉内燃烧温度比煤粉炉低,一般在 800 ~ 1 000 $^{\circ}\text{C}$;W 型火焰锅炉由下部燃烧室和上部冷却室所组成的,主要用于燃烧无烟煤和贫煤,炉内温度与煤粉炉相似,一般也在 1 200 ~ 1 400 $^{\circ}\text{C}$,甚至更高。

贫煤和无烟煤是目前燃煤电厂应用较多的动力煤,具有不同煤质特征:无烟煤固定碳含量高,挥发分含量低,密度大,硬度大,燃点高;贫煤是煤化度最高的一种烟煤,不黏结或微具黏结性,一般挥发分在 10% ~ 20%,含碳量高达 90%,含氢量一般在 4% ~ 4.5%,燃烧时火焰短,耐烧^[10]。

为了探究炉型、煤质、工况等因素对粉煤灰理化特性影响,本文选用来自晋能长治热电有限公司(煤粉炉/贫煤/250、300、330 MW)、山西河坡发电有限公司(循环流化床锅炉/无烟煤)和山西省电力公司阳泉第二发电厂(W 火焰锅炉/无烟煤)的 3 种不同来源的粉煤灰进行理化性质研究。

1 试 验

1.1 试验原料及采集

1.1.1 试验原料及燃烧工况

晋能长治热电有限公司电厂炉型为煤粉炉(PC),2台330 MW 亚临界参数燃煤发电机组,采用前四角切圆燃烧方式,燃用煤种为贫煤(PM);山西省电力公司阳泉第二发电厂炉型为 W 火焰锅炉(WFB),2台300 MW 亚临界参数燃煤发电机组,燃用煤种为无烟煤(WY);山西河坡发电有限公司电厂炉型为循环流化床锅炉(CFB),2台330 MW 超临界参数燃煤发电机组,燃用煤种为无烟煤(WY)。试验除料的煤质分析结果见表 1。

表 1 煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

%

煤样	炉型	工业分析				元素分析				
		M_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	S_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	O_{ad}
PM(长治)	PC	0.42	48.11	38.97	12.50	1.77	51.44	2.71	0.96	43.12
WY(阳泉)	WFB	1.05	65.24	23.05	10.66	1.66	68.68	3.12	1.14	25.40
WY(河坡)	CFB	1.19	50.40	34.22	11.19	1.83	52.47	2.51	6.69	36.51

1.1.2 样品采集

试验样品采用“粉煤灰来源地首字母缩写+灰渣”类型进行编号,如晋能长治热电有限公司的飞灰表示为“CZ-FA”,底渣表示为“CZ-S”,不同负荷下(250、300、330 MW)运行的飞灰和底渣,用“CZ-FA+相应负荷”表示,底渣用“CZ-S+相应负荷”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,各样品缩写见表 2。

1.2 试验方法

利用物理吸附仪(BET,美国麦克 Micro Active ASPS 2460),测定样品的比表面积。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 CAP 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。

表2 粉煤灰样品缩写
Table 2 Abbreviations of fly ash and slag samples

企业	飞灰	底渣	负荷/MW		
			250	300	330
晋能长治热电有限公司	CZ-FA	CZ-S	CZ-FA250	CZ-FA300	CZ-FA330
	—	—	CZ-S250	CZ-S300	CZ-S330
山西河坡发电有限公司	HP-FA	HP-S	—	—	—
山西省电力公司阳泉第二发电厂	YQ-FA	—	—	—	—

用X-射线衍射仪(XRD, Bruker D2型)测定样品的矿物质种类。仪器参数如下:采用Cu靶,扫描速度 $4(^{\circ})/\text{min}$,步长 0.02° ,扫描衍射角 $2\theta=10^{\circ}$ 。

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和无定形相的含量。

利用差热重分析仪(TG-DSC, SETARAM, setsys evolution),在 N_2 气氛下进行分析(N_2 流量为 $50\text{ mL}/\text{min}$,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试温度范围为室温至 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

依据GB/T 219—1996利用灰熔融性测定仪(5E-AFIII,长沙开元仪器股份有限公司)测定煤灰的熔融特性温度。利用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi TM3030)对样品进行微观形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 燃烧工况对粉煤灰化学及物相组成的影响

2.1.1 不同炉型对粉煤灰化学组成的影响

不同电厂飞灰和底渣的主要化学组成和烧失量见表3。各电厂灰渣主要化学组成同样均为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,其中HP和YQ的 SiO_2 要大于CZ,这与电厂燃煤煤质有关。

表3 不同电厂飞灰和底渣的主要化学组成和烧失量

Table 3 Main chemical composition and loss on ignition of fly ash and slag from different power plants %

样品	质量分数						烧失量
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	
CZ-FA	37.93	37.00	6.76	2.42	0.05	0.58	8.49
CZ-S	39.47	32.63	7.70	3.69	0.19	0.97	7.91
YQ-FA	40.63	34.75	6.84	3.17	0.06	0.41	5.06
HP-FA	45.30	29.58	5.84	5.49	0.70	3.01	4.85
HP-S	43.96	26.91	5.27	6.18	0.51	4.13	6.12

河坡电厂的CaO和 SO_3 含量均比其他两厂的含量高,由于底渣中的钙和硫含量比飞灰中高,说明炉内固硫产物 CaSO_4 更容易进入底渣。通过对比发现,CZ、YQ、HP烧失量有一定差异,这与PC、CFB、WFB三种炉型产生的粉煤灰中残碳量不同有关。底渣中 Al_2O_3 的含量比飞灰中低,说明煤矸石燃烧过程中产生的 Al_2O_3 更容易随飞灰排出。

2.1.2 同炉型不同负荷对粉煤灰化学组成的影响

晋能长治热电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4。飞灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量在70%以上,属于高硅铝煤灰, Al_2O_3 含量较高,平均含量在36.50%左右,不同负荷下产生粉煤

灰样品的化学组成基本一致,差异较小,说明负荷对粉煤灰样品的化学组成几乎没有影响;随着锅炉负荷的增大,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,但比较飞灰和底渣中 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量可以看出: SiO_2 相对富集于渣中, Al_2O_3 相对富集于灰中。

2.1.3 不同炉型对粉煤灰矿物组成的影响

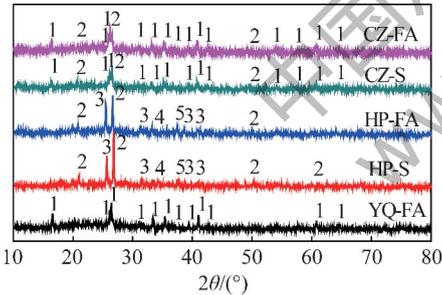
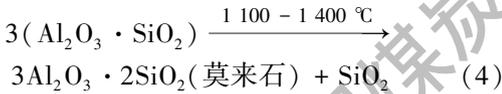
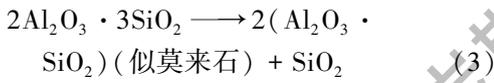
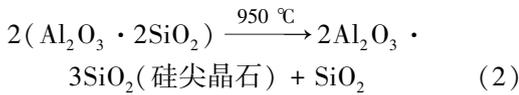
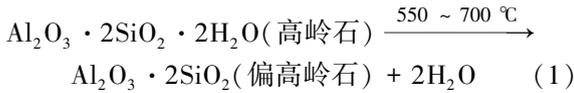
CZ-FA、CZ-S、HP-FA、HP-S、YQ-FA的XRD谱图如图1所示。CZ-FA和CZ-S中的晶体矿物质主要是石英(SiO_2)和莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)。YQ-FA晶体矿物质主要是莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$),石英和莫来石为高岭石在高温燃

表4 不同负荷下飞灰和底渣的主要化学组成和烧失量

Table 4 Main chemical composition and loss on ignition of fly ash and slag from the boiler with different operating loads

样品	质量分数/%						烧失量/%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
CZ-FA250	36.23	32.19	8.53	2.45	0.17	0.59	5.98
CZ-FA300	34.16	39.27	6.46	3.19	0.04	0.36	9.62
CZ-FA330	36.13	38.04	6.31	2.54	0.10	0.51	9.64
飞灰平均值	35.51	36.50	7.10	2.73	0.10	0.49	8.41
CZ-S250	41.90	32.46	7.60	2.55	0.19	0.53	7.91
CZ-S300	38.73	33.14	7.93	5.21	0.23	0.67	7.74
CZ-S330	39.89	32.80	7.43	1.03	0.08	0.32	6.60
底渣平均值	40.17	32.80	7.65	2.93	0.17	0.51	7.42

烧过程中的产物,可能发生的反应^[11-13]为式(1)~(4)。



1—莫来石; 2—石英; 3—硬石膏; 4—赤铁矿; 5—生石灰

图1 粉煤灰试样衍射曲线

Fig. 1 XRD patterns of fly ash samples

莫来石的形成温度在 1 100 ~ 1 400 °C,正是煤粉炉、W 火焰锅炉炉膛温度范围,因此产生的飞灰和底渣中莫来石含量较高。HP-FA 和 HP-S 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)。其中赤铁矿由原煤中的黄铁矿(FeS₂)燃烧转化而成,炉内固硫生成硫酸钙。循环流化床锅炉属中温燃烧,平均温度在 800 ~ 950 °C,达不到莫来石形成温度,因此飞灰和底渣中无莫来石生成。

2.1.4 不同炉型粉煤灰矿物组成定量分析

各电厂灰渣的 XRD 定量分析结果见表 5,主要矿物质与无定形相的含量分布如图 2 所示。表 3、4 显示粉煤灰中 SiO₂ 平均含量为 40% 左右,而 XRD 定量结果中的 SiO₂ 含量在 4% ~ 10%,说明其余的 SiO₂ 均以非结晶或结晶度差的氧化物形式存在,即无定形 SiO₂,约占粉煤灰中 SiO₂ 总量的 85%。飞灰和底渣中并未检测到含有 Al₂O₃ 的晶体矿物质,因此,Al₂O₃ 均是以非结晶氧化物的形式存在,即无定形 Al₂O₃。与 Al₂O₃ 相反,粉煤灰中的 Fe₂O₃ 均是以晶体矿物质赤铁矿的形式存在。灰渣中均含有无定形物质玻璃体和未燃尽碳等。

表5 不同温度下矿物质晶体组成及含量

Table 5 Compositions of mineral matter in ash at different temperature

矿物名称	分子式	CZ-FA	CZ-S	HP-FA	HP-S	YQ-FA	%
莫来石	3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	24	21	3	6	35	
石英	SiO ₂	8	9	12	13	4	
硬石膏	CaSO ₄	—	—	14	10	—	
赤铁矿	Fe ₂ O ₃	—	—	4	2	—	
生石灰	CaO	—	—	3	2	—	
非晶体	Amor	68	69	64	68	61	

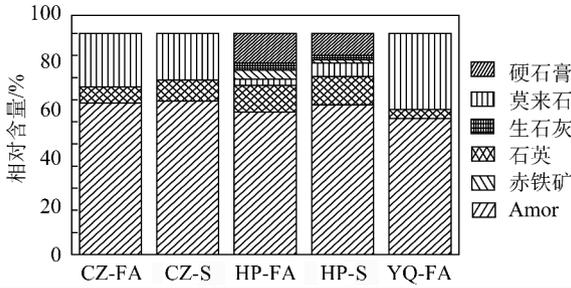


图2 飞灰和底渣中主要矿物质与无定形相的含量分布
Fig. 2 Content variations of the main mineral and amorphous matters in the fly ash and slag

通过对比可看出,CFB锅炉产生的粉煤灰中,具有较高含量的硬石膏(CaSO_4)和赤铁矿(Fe_2O_3),这与电厂脱硫工艺加入石灰石作为吸收剂有关。而PC锅炉、火焰锅炉(WFB)不采用炉内脱硫,因此硬石膏含量较少,CFB锅炉粉煤灰中赤铁矿(Fe_2O_3)含量较高,这也可能与燃煤本身矿物组成有关。

2.2 燃烧条件对粉煤灰热失重的影响

2.2.1 不同炉型对粉煤灰热失重的影响

灰渣的差热-热重曲线如图3所示。

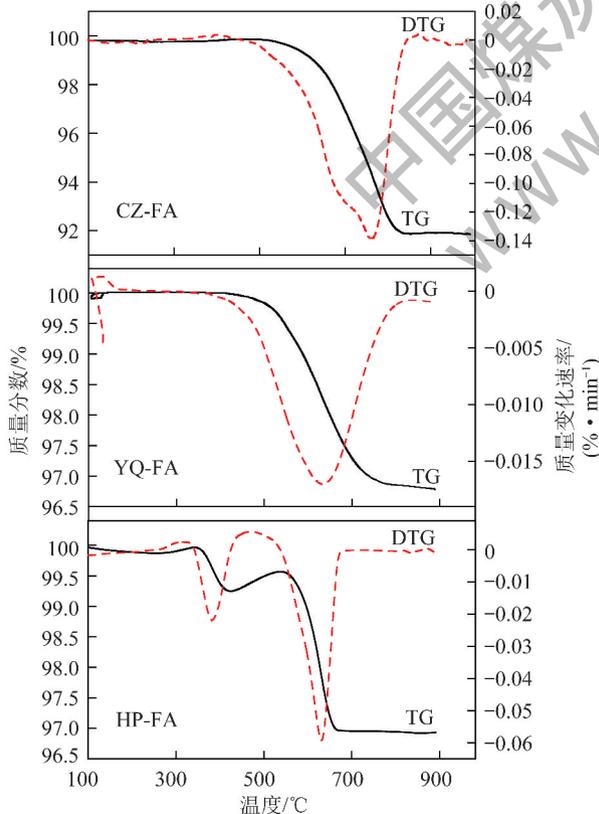


图3 不同电厂灰渣TG-DTG曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of fly ash and slag

图3可以看出,CZ和YQ飞灰的燃烧特性曲线基本一致,而HP飞灰在300~400℃出现一个失重峰,说明河坡煤样中还含有一定量的挥发分。这是由于锅炉进料粒度较大($\leq 10\text{ mm}$),未燃尽炭颗粒保持一定的粒度,密度较大,更容易随底渣排出。

2.2.2 同炉型不同负荷对粉煤灰热失重的影响

晋能长治热电不同负荷下灰渣的差热-热重曲线如图4所示,可以看出,长治不同负荷下热重曲线得出的烧失量与上述测得的烧失量基本一致,底渣的烧失量明显高于飞灰的烧失量,底渣中的残炭含量高,底渣的最大失重率峰较飞灰向右偏移,说明底渣燃烧速率最大时的温度要高于飞灰。

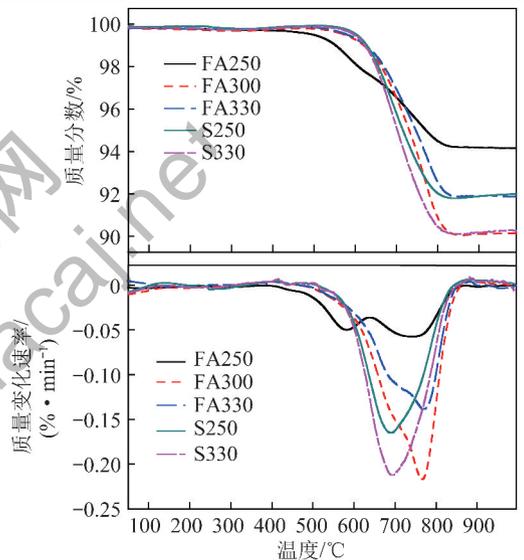


图4 长治不同负荷下灰渣TG-DTG曲线

Fig. 4 TG and DTG curves of fly ash and slag

2.3 燃烧条件对粉煤灰物理特性的影响

2.3.1 燃烧条件对粉煤灰比表面积和粒度特征参数的影响

比表面积是粉体材料的重要特征参数之一,粉体的颗粒粒径越小,其比表面积越大,其表面效应(如表面活性、表面吸附能力、催化能力等)越强3个电厂飞灰特征参数见表6。

表6 飞灰特征参数

Table 6 Characteristic parameters of fly ash

样品	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径/nm
CZ-FA	5.61	0.006 0	4.27
YQ-FA	3.90	0.011 0	11.27
HP-FA	3.21	0.010 3	5.70

由表6可以看出,CZ-FA 具有较大的比表面积,这使得其较 YQ-FA 及 HP-FA 具有更强的活性。这与 PC 锅炉中燃烧工况和燃料种类有关,使得产生的粉煤灰粒度较细,比表面积更大,具有更高的活性,YQ-FA 较 HP-FA 粉煤灰孔容积和孔径大,其原因为燃烧温度高。

2.3.2 燃烧条件对粉煤灰灰熔融特性的影响

粉煤灰熔融特性见表7。由表7可以看出,同一电厂底渣的熔融温度一般要高于飞灰的熔融温度,这也与其化学组成结果相吻合。因为酸性氧化物具有提高煤灰熔融温度的作用,其含量越多,熔融温度越高;相反,碱性氧化物有降低煤灰熔融温度的作用,其含量越多,熔融温度越低。灰渣的熔融温度除受酸性与碱性氧化物的相互影响外,还受熔融的还原或氧化气氛等因素的影响,多种因素均会引起熔融温度的变化和不同规律性^[14-15]。

表7 粉煤灰熔融特性

样品	灰熔融性温度/℃			
	DT	ST	HT	FT
CZ-FA	≥1 500	≥1 500	≥1 500	≥1 500
CZ-S	1 365	1 391	1 421	1 480
YQ-FA	≥1 500	≥1 500	≥1 500	≥1 500
HP-FA	1 393	1 409	1 423	1 430
HP-S	1 405	1 420	1 437	1 450

2.4 燃烧条件对粉煤灰微观形貌的影响

不同电厂粉煤灰形貌如图5所示,可以看出,CZ-FA 和 CZ-S 颗粒中,部分呈球形颗粒,表面较致密、光滑,孔隙较少;HP-FA 和 HP-S 颗粒呈无规则形态,表面多不光滑,孔隙较多;YQ-FA 颗粒几乎全部呈现球形颗粒状,表面光滑致密。

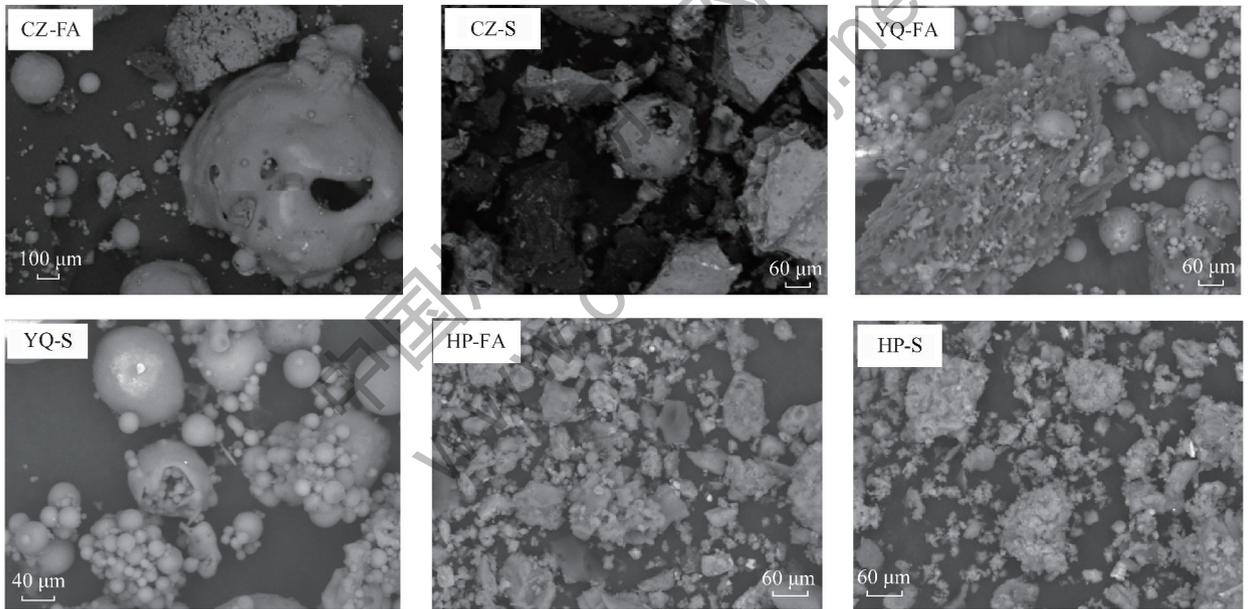


图5 不同电厂粉煤灰 SEM 图

Fig. 5 SEM analysis of fly ash samples

粉煤灰形貌上的变化和区别主要与燃烧炉型有关,PC 锅炉 W 火焰炉粉煤灰多呈规则的球形颗粒,表面光滑致密,由 CZ-FA 和 YQ-FA 图发现,PC 锅炉粉煤灰的部分球形颗粒表面也会出现孔隙和裂痕,且破裂的球形颗粒内包裹着更小的球形颗粒,说明球形颗粒为空心结构,W 火焰炉的粉煤灰更为明显,也表明 W 火焰炉的燃烧温度更高。这主要与煤粉炉的燃烧过程有关,炉内温度比较高,1 000 ℃ 以上高温使灰分熔融成液滴,冷却后形成微珠,而颗粒的表面有较多孔隙和裂痕,这与燃烧煤质以及颗粒

在锅炉内的碰撞、爆裂、流动情况有关,所以会造成颗粒形貌有一定差别;而 CFB 锅炉粉煤灰微观形貌,多呈不规则形状,颗粒表面的致密程度与孔隙数量对 Al_2O_3 的溶出有直接影响,孔隙越多,表面越疏松,更有利于酸浸溶液进入到颗粒内部与 Al_2O_3 接触,从而更有利于 Al_2O_3 的浸出。

3 结 论

1) 锅炉负荷对 PC 粉煤灰化学组成和物相组成等性质的影响较小,煤质种类和锅炉炉型对粉煤灰

的影响较大,无论是表面活性、矿物组成以及微观形貌,粉煤灰理化性质的区别,主要源于PC、WFB与CFB燃烧温度和煤质种类影响。

2)PC、WFB粉煤灰和CFB粉煤灰相比,在微观形貌与矿物组成上具有较大区别,前2类粉煤灰中主要矿物为莫来石,而CFB粉煤灰中矿物质为石英(SiO_2)、硬石膏(CaSO_4)、赤铁矿(Fe_2O_3)和生石灰(CaO)等。

3)PC、WFB锅炉粉煤灰多呈规则的球形颗粒,表面光滑致密,部分球形颗粒表面也会出现孔隙和裂痕,且破裂的球形颗粒内包裹着更小的球形颗粒,球形颗粒为空心结构,WFB的粉煤灰更为明显;而CFB锅炉粉煤灰微观形貌,多呈不规则形状。

参考文献(References):

[1] 雍永祜. 中国煤化工发展的思考[J]. 煤化工,2007(5):1-8.
YONG Yonghu. On the development of coal chemical industry in China[J]. Coal Chemical Industry,2007(5):1-8.

[2] 周栋,韩宝平. 燃煤电厂脱硫灰渣理化特性研究[J]. 洁净煤技术,2009,16(2):93-96.
ZHOU Dong, HAN Baoping. Study on the physicochemical properties of desulfurization ash from coal fired power plant[J]. Clean Coal Technology,2009,16(2):93-96.

[3] 姚强. 洁净煤技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:5-10.

[4] 茅沈栋,李镇,方莹. 粉煤灰资源化利用的研究现状[J]. 混凝土,2011(7):82-84.
MAO Shendong, LI Zhen, FANG Ying. Current status of research on the utilization of fly ash[J]. Concrete,2011(7):82-84.

[5] 薛兴华,王运泉,肖晨生,等. 电厂燃煤飞灰粒度特征研究[J]. 煤炭学报,2006,31(5):635-639.
XUE Xinghua, WANG Yunquan, XIAO Chensheng, et al. Study on the size character of fly ash in coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(5):635-639.

[6] 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.

[7] 许绿薇,薄以匀,李培省. 电厂粉煤灰理化性质的测定及利用途径[J]. 环境科学研究,2006,13(3):51-54.
XU Luwei, BO Yiyun, LI Peisheng. Measurement of the physicochemical characteristics and utilization ways of fly ash from power plants[J]. Research of Environmental Sciences,2006,13(3):51-54.

[8] 李彩霞,王金龙,任瑞晨,等. 循环流化床灰酸浸前后理化特性研究[J]. 非金属矿,2013,36(3):9-11.
LI Caixia, WANG Jinlong, REN Ruichen, et al. Study on before and after acid leaching characteristics of the circulating fluidized bed ash[J]. Non-Metallic Mines,2013,36(3):9-11.

[9] 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,2016,22(4):26-29.
WANG En. Mineralogy properties comparison of PC fly ash and CFB fly ash[J]. Clean Coal Technology,2016,22(4):26-29.

[10] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京:科学出版社,2002:1-21.

[11] WANG J, MORISHITA K, TAKARADA T. High-temperature interactions between coal char and mixtures of calcium oxide, quartz and kaolinite[J]. Energy Fuels,2001,15(5):1145-1152.

[12] VANDYK J C, MELZER S, SOBIECKI A. Mineral matter transformation during Sasol-Lurgi fixed bed dry bottom gasification-utilization of HT-XRD and Fact Sage modeling[J]. Minerals Engineering,2006,19(10):1126-1135.

[13] OHME H, SUZUKI T. Mechanism of CO_2 gasification of carbon catalyzed with group VIII metals: I. Iron-catalyzed CO_2 gasification[J]. Energy Fuels,1996,10(4):980-987.

[14] 陈凡敏,王嘉瑞,赵冰,等. 煤中矿物质对灰熔融和燃烧特性的影响[J]. 燃料化学学报,2015,43(1):27-33.
CHEN Fanmin, WANG Jiarui, ZHAO Bing, et al. Effect of mineral form in coal on combustion characteristics and fusibility of coal ash[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2015,43(1):27-33.

[15] 李宝霞,张济宇. 煤灰渣熔融特性的研究进展[J]. 现代煤化工,2016,22(4):26-29.
LI Baoxia, ZHANG Jiyu. Research progress of coal ash fusibility[J]. Modern Chemical Industry,2016,22(4):26-29.