

燃煤锅炉可吸入颗粒物排放规律研究

郭欣, 陈丹, 郑楚光, 隋建才, 徐明厚

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要:应用基于空气动力学直径分级的低压撞击器(LPI)对 4 台燃煤锅炉除尘器前后飞灰颗粒进行 13 级采样,研究了不同除尘器入口和出口 PM_{10} 的颗粒粒径排放规律及元素分布特性.结果表明,除尘器前后 PM_{10} 质量粒径均呈双峰分布,其峰值分别在 $0.1\ \mu m$ 和 $2.36 \sim 3.95\ \mu m$ 附近.无论是文丘里水膜除尘器还是静电除尘器,粒径为 $0.1 \sim 1\ \mu m$ 左右的颗粒的除尘效率最低,最低效率值在 $50\% \sim 65\%$ 左右.除尘器对不同粒径颗粒的收集效率差别很大,对粒径为 $10\ \mu m$ 左右颗粒的收集效率为 96% 左右,而对亚微米颗粒的收集效率在 $62\% \sim 83\%$ 之间. PM_{10} 中各级氧化物组成表明较易气化元素,如 S 和 Na 等在小粒径颗粒上有明显富集趋势,而不易气化元素 Si 和 Al 等在大粒径颗粒上富集;这说明小粒径颗粒可能为气化-凝结机理形成,而比较粗的颗粒可能是通过煤焦和矿物质的破碎以及内部矿物质的聚合形成.

关键词:煤燃烧; 飞灰; PM_{10} ; 颗粒物; 排放特征

中图分类号: X513; TK16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0587-06

Experimental Study on Emission Characteristics of PM_{10} in Coal-Fired Boilers

GUO Xin, CHEN Dan, ZHENG Chu-guang, SUI Jian-cai, XU Ming-hou

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Fly ash was sampled at the inlet and outlet of ash collectors in four different coal-fired utility boilers using 13-stage low pressure impactor (LPI). The mass distribution, emission characteristics and the composition at different size particle of PM_{10} were studied. The results show that PM_{10} of the four boilers have a similar bimodal distribution, with two peaks formed around $0.1\ \mu m$ and $2.36 \sim 3.95\ \mu m$, respectively. The lowest efficiency of ash collectors was between $50\% \sim 65\%$ when the particle sizes were around $0.1 \sim 1\ \mu m$, no matter Venturi water membrane dust collector or ESP was used. Ash collectors show different removal efficiencies to various particle sizes PM. The removal efficiency of ash collectors was about 96% around $10\ \mu m$, while under $1\ \mu m$ it was between $62\% \sim 83\%$. The chemical composition of the size-segregated ash showed that the element S and Na were obvious enrichment in finer ash, which is possibly formed via vaporization and subsequent condensation of inorganic matter. While the refractory oxides were the major composition in bigger size ash, which may be formed via char fragmentation, excluded mineral fragmentation and included mineral coalescence.

Key words: coal combustion; fly ash; PM_{10} ; particulate matter; emission characteristic

燃煤电厂排放的飞灰引起的可吸入颗粒物污染引起了广泛重视^[1~3].可吸入颗粒物(inhalable particles)是大气中可以通过鼻和嘴进入人体下呼吸道的颗粒物的总称,通常也用 PM_{10} 表示(指空气动力学直径 $< 10\ \mu m$ 的颗粒).比 PM_{10} 更细的是亚微米颗粒(空气动力学直径 $< 1.0\ \mu m$ 的颗粒)和超微米颗粒($1.0\ \mu m <$ 空气动力学直径 $< 10\ \mu m$ 的颗粒).颗粒尺寸是表征可吸入颗粒物行为最重要的参数,国外学者很早就从不同角度对燃煤释放的可吸入颗粒物的特性进行了研究^[4~6].如 Tsuji 等^[7]提出了一种新的细颗粒物的取样方法——除尘器后取样,并且分析了这些细颗粒物有效收集的条件.Braga 等^[8]利用离子诱导 X-射线发射技术(PIXE)检测了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中的元素分布及其浓度.Zhang 等^[9]在实验室滴管炉上研究粒径 $< 10\ \mu m$ 的悬浮颗粒物 PM_{10} 的排放特征时,采用计算机控制扫描电子显微镜

(computer controlled scanning electron microscopy, CCSEM)对煤中矿物质在颗粒物释放时的相关行为进行分析.国内燃煤颗粒物的研究虽然开展的时间不长,但日益受到重视.黄亚继等^[10]从电除尘器 3 个电场分级的角度研究了飞灰颗粒物中痕量元素的分布特性.但迄今从空气动力学直径分级角度对于燃煤锅炉排放可吸入颗粒物的研究报道十分有限^[11,12].从空气动力学直径角度能更好地分析不同粒径颗粒物的特性,同时也更适合研究除尘设备的脱除机理.

本研究应用低压撞击器(LPI)对 4 台燃煤机组锅炉除尘器前后的飞灰进行取样,从空气动力学直径角度分析颗粒物粒径排放规律及元素分布特性,

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-07-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211600); 国家自然科学基金项目(50721005, 90410017)

作者简介: 郭欣(1970~),女,博士研究生,副教授,主要研究方向为能源与环境工程, E-mail: guoxin@mail.hust.edu.cn

进而结合形貌分析对燃煤过程中可吸入颗粒物的形成机理进行探讨。

1 材料与方法

1.1 燃煤特性及实验工况

实验分别在 300 MW、100 MW 和 2 台 50 MW 燃煤机组锅炉上进行。300 MW 锅炉为 1 025 t/h 超高压自然循环固态排渣锅炉,炉膛呈正方形,燃烧器采用 CE 公司的 WR 型燃烧器,正四角分布,除尘装置采用四电场静电除尘器。100 MW 锅炉系武汉锅炉厂设计制造的 WG410/9.8-6 型单汽包自然循环、固态排渣锅炉,呈 II 型布置,采用水平浓淡稳燃腔煤粉燃

烧器,四角切圆布置,除尘装置采用三电场静电除尘器。第 1 台 50 MW(I)锅炉系哈尔滨锅炉厂设计制造的 321-230-100 型单汽包自然循环、固态排渣锅炉,呈 II 型布置,采用轴向可调旋流燃烧器,II 型布置,即侧墙各布置 3 个及前墙布置 2 个,除尘装置采用麻石文丘里水膜式除尘器。第 2 台 50MW(II)锅炉是苏联生产的,型号为 II-230-2 的单汽包自然循环、固态排渣锅炉,采用轴向可调旋流燃烧器,除尘装置为文丘里水膜式除尘器。300 MW、100 MW 锅炉燃用四川无烟煤,2 台 50 MW 锅炉燃用河南烟煤,锅炉运行参数见表 1,煤的工业分析和元素分析见表 2,煤灰的化学成分分析见表 3。

表 1 锅炉运行参数

Table 1 Experiments boiler condition						
设计负荷/MW	运行负荷/MW	给煤量/t·h ⁻¹	排烟温度/℃	煤粉细度/%		出口烟温/℃
300	250	124	150	R ₁₀₀ = 12.78	R ₂₀₀ = 3.07	1 400
100	90	65	180	R ₁₀₀ = 11.18	R ₂₀₀ = 1.30	1 100
50(I)	40	28	158	R ₁₀₀ = 8.12	R ₂₀₀ = 1.28	1 095
50(II)	45	32	178	R ₁₀₀ = 14.34	R ₂₀₀ = 3.07	1 090

表 2 煤的工业分析和元素分析

Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis of coal							
锅炉	煤的工业分析(质量分数)/%				煤的元素分析(质量分数)/%		
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N
300 MW	1.096	50.99	11.03	37.98	40.12	2.15	0.71
100 MW	0.70	51.56	12.48	35.97	36.21	2.54	0.96
50 MW(I)	1.12	38.16	19.50	42.34	40.87	2.34	0.74
50 MW(II)	1.43	35.51	21.19	43.30	43.56	2.34	0.73

表 3 煤灰的化学成分(质量分数)/%

Table 3 Ash composition/%							
锅炉	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
300 MW	60.33	30.41	3.57	1.15	1.14	1.57	1.73
100 MW	57.68	27.14	2.37	3.96	2.25	1.21	2.54
50 MW(I)	56.06	32.89	2.22	2.05	1.25	1.15	2.06
50 MW(II)	56.68	33.82	3.90	3.91	0.54	1.11	0.99

1.2 样品采集

飞灰取样位置分别设在除尘器入口和出口烟道。取样系统主要由取样枪、旋风分离器、低压撞击器及真空泵组成,如图 1 所示。为防止烟气中的水蒸气在取样系统内凝结,沿取样管路缠上电加热带,并控制其温度在 150℃ 左右。飞灰随着烟气流经取样枪进入切割粒径为 10 μm 的旋风分离器,分离器的主要作用是除掉粒径 > 10 μm 的颗粒,防止后面低压撞击器每一级膜片上的颗粒超重。飞灰颗粒进入 LPI 并将飞灰颗粒按空气动力学直径大小分成 13 级,其切割粒径范围分别为(μm): 0 ~ 0.028 1,

0.028 1 ~ 0.056 5, 0.056 5 ~ 0.094 4, 0.094 4 ~ 0.154, 0.154 ~ 0.258, 0.258 ~ 0.377, 0.377 ~ 0.605, 0.605 ~ 0.936, 0.936 ~ 1.58, 1.58 ~ 2.36, 2.36 ~ 3.95, 3.95 ~ 6.6, 6.6 ~ 9.8。取样时末级膜片压力维持 10 kPa 左右,真空泵抽气流量为 10 L/min。取样之前,首先用皮托管测量烟道流速,根据真空泵流量及烟道流速选取取样枪喷嘴,以保证等速取样。

1.3 分析方法

试验中 LPI 内的膜片为有机膜,为了防止颗粒反弹,在有机膜上涂上用四氯化碳稀释后的阿匹松油。取样前的有机膜及取样后载有颗粒物有机膜置

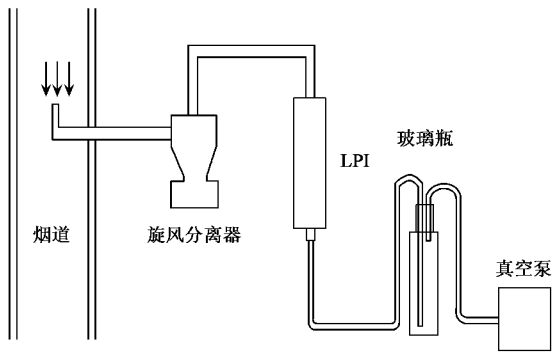


图 1 取样系统示意
Fig.1 Schematic diagram of sampling system

于烘箱中 110℃ 烘干 1 h 后,在干燥器中冷却至室温,然后在灵敏度为 0.001 mg 的分析天平上称重.称重后的样品采用 EAGLE III 聚焦型扫描 X-射线荧光能谱仪(XRF)对样品主元素氧化物 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、Na₂O、K₂O、SO₃ 进行测定,通过 Sirion 2000 型场发射扫描电镜(SEM)进行形貌分析.各取样点皆进行重复采样.

2 结果与讨论

2.1 除尘器前后颗粒的质量粒径分布

对各个实验工况下 LPI 每一级膜片上收集的灰颗粒进行称重,根据真空泵的抽气流量计算出不同粒径颗粒的质量浓度.煤燃烧过程中产生的飞灰颗粒的质量粒径分布一般遵循对数正态分布,所以本研究以粒径的对数 lg d 为横坐标,以烟气中飞灰颗粒质量浓度(mg/m³)为纵坐标来表示除尘器入口和出口颗粒物的质量粒径分布,该方法的优点是可以将粒径范围比较宽的颗粒放在一起分析.即在表示宽粒径分布的颗粒时,仍然能够比较好地在图中分析亚微米和超微米粒径范围的颗粒物分布特性.除尘器前的 PM₁₀(空气动力学当量直径 < 10 μm 的颗粒物)质量粒径分布结果见图 2.

300 MW、100 MW 机组静电除尘器入口处 PM₁₀ 颗粒质量总浓度分别为 1 375.5 mg/m³, 1 272.8 mg/m³. 50 MW(I)和 50 MW(II)机组文丘里水膜除尘器入口处 PM₁₀ 颗粒质量总浓度分别为 968.8 mg/m³、994.8 mg/m³.从图 2 中可以看出,4 台锅炉除尘器入口的质量粒径分布相似,都呈双峰分布,其峰值分别在 0.1 μm 和 4 μm,与国外的相关报道一致^[13,14].而且文献中认为燃煤过程形成 PM₁₀ 的这种分布是通过不同机理形成,即亚微米颗粒通过气化-

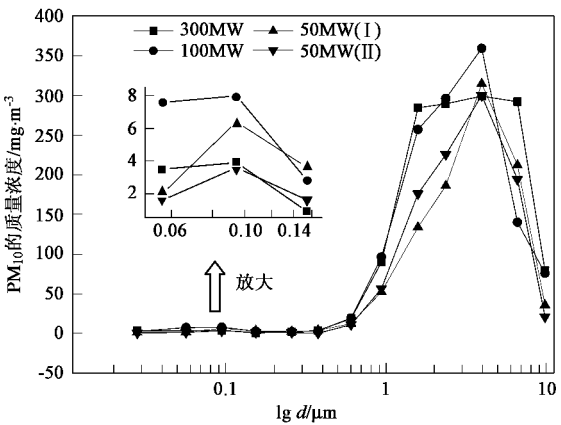


图 2 除尘器入口 PM₁₀ 的质量粒径分布
Fig.2 Mass size distributions of PM₁₀ in dust cleaning equipments inlet

凝结机理形成,超微米颗粒通过内在矿物质聚结、焦炭和外在矿物质破碎形成.从图 2 中可以看出,与超微米颗粒质量浓度相比,亚微米颗粒质量浓度要小很多,即:0.1 μm 左右的峰值并不明显,只有在局部放大的小图中才能发现明显的峰值.这说明煤粉在燃烧过程中主要是通过聚结、破碎机理形成超微米颗粒,而通过气化-凝结机理形成的亚微米颗粒的质量要少很多.

除尘器后的 PM₁₀ 质量粒径分布结果见图 3. 300 MW、100 MW 机组静电除尘器出口处 PM₁₀ 颗粒质量总浓度分别为 122.8 mg/m³、107.8 mg/m³. 50MW(I)和 50MW(II)机组文丘里水膜除尘器出口处 PM₁₀ 颗粒质量总浓度分别为 260.3 mg/m³、141.7 mg/m³,同除尘器前的 PM₁₀ 质量浓度相比,除尘器后的大幅下降,但分布特征相似,也呈双峰分布,100 MW 和 50 MW(I)2 台锅炉的质量峰值在 0.1 μm 和 4 μm,但 300 MW 与 50 MW(II)锅炉除尘器出口 PM₁₀ 的质量峰值有所变化,300 MW 锅炉出现在 0.0565 μm 和 2.36 μm 处,50 MW(II)锅炉在 0.1 μm 和 1.58 μm,峰值有所前移,这可能是由于不同除尘设备对不同粒径的颗粒物的脱除效率不同所致.

2.2 除尘器对不同粒径飞灰颗粒物的脱除效率

不同除尘器对不同粒径的颗粒物的脱除效率不同,颗粒尺寸是表征可吸入颗粒物行为最重要的参数,颗粒物的全部性质都与粒径有关,因此深入了解不同粒径的飞灰在通过不同除尘器时的除尘器效率是考核除尘器性能的重要指标之一,对于科学评价除尘器效率有重要意义.穿透率定义为:

$$\eta = \frac{c_1 V_1 - c_2 V_2}{c_1 V_1} \times 100\% \tag{1}$$

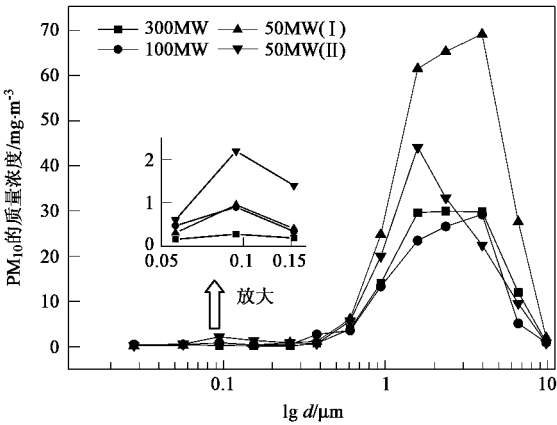


图3 除尘器出口 PM_{10} 的质量粒径分布

Fig.3 Mass size distributions of PM_{10} in dust cleaning equipments outlet

式中, η 为穿透率, %; c_1 、 c_2 分别为除尘器前后的颗粒质量浓度, mg/m^3 ; V_1 、 V_2 分别为除尘器前后烟尘量, m^3/h . 大型电厂煤粉锅炉电除尘器保温和密封性能都很好, 可忽略除尘器温降和漏风影响, 式(1)又可简化成式(2):

$$\eta = \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \times 100\% \tag{2}$$

如图4为4台锅炉机组除尘器对不同粒径 PM_{10} 的分级除尘效率曲线(2次平行采样平均值).

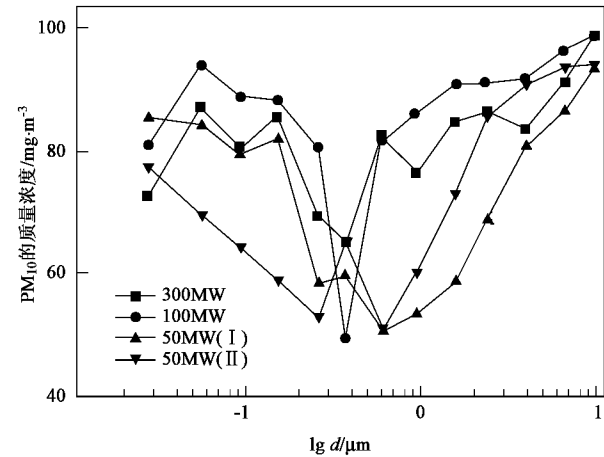


图4 不同粒径 PM_{10} 的除尘效率

Fig.4 Collection efficiency of PM_{10} after dust cleaning equipments

由图4可见, 文丘里水膜除尘器的除尘效果都要比静电除尘器的除尘效果差. 2种除尘器, 对粒径 $> 1 \mu\text{m}$ 的超微米颗粒的除尘效率随着粒径增加明显增加, 而对粒径 $< 0.1 \mu\text{m}$ 左右的亚微米颗粒的除尘效率随着粒径增加逐渐下降, 粒径为 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 左右的亚微米颗粒的除尘效率最低, 最低效率值在

50% ~ 65%左右. 这可能是除尘器对不同粒径范围颗粒的除尘机理不同而引起的, 对超微米颗粒 ($> 1 \mu\text{m}$) 文丘里水膜除尘的机理主要是惯性碰撞和拦截作用, 对亚微米颗粒 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 则是由扩散起决定性作用; 静电除尘器对超微米颗粒 ($> 1 \mu\text{m}$) 主要是通过电场荷电除尘, 而对亚微米颗粒 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 主要是通过扩散荷电.

2.3 颗粒物形成机理及化学组成

通过对不同粒径颗粒上煤中矿物质在燃烧环境中经气化、成核、凝结及凝聚等过程形成亚微米颗粒, 许多学者都得出了类似的研究结论^[15, 16]. 为定量知道哪些粒径的颗粒是由汽化-凝结机理形成的, 对不易汽化 SiO_2 和 Al_2O_3 在不同粒径颗粒上的含量变化进行了研究. 图5给出了300 MW锅炉元素 SiO_2 和 Al_2O_3 在不同粒径颗粒上的含量, 为便于参考和比较, 图5中同时给出了总灰中元素 SiO_2 和 Al_2O_3 相应的值.

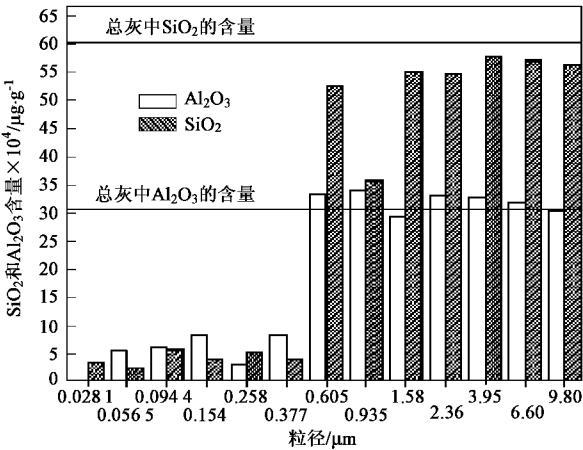


图5 300 MW 机组不同粒径 PM_{10} 中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量

Fig.5 Concentration of silicon and aluminum oxide in different size of particle of ash in 300 MW boiler

由图5可见, 总灰中元素 SiO_2 和 Al_2O_3 的浓度分别为 60.33% 和 30.41%, 第7级 ($0.377 \sim 0.605 \mu\text{m}$) 至第13级颗粒中元素 SiO_2 和 Al_2O_3 的浓度与总灰中相应的值基本相当, 而粒径小于第7级颗粒中元素 SiO_2 和 Al_2O_3 的浓度值远远小于总灰中相应的值. 这说明: 由于元素 Si 和 Al 的化合物的熔沸点很高, 不易气化, 而这2个元素在第7级 ($0.377 \sim 0.605 \mu\text{m}$) 以下的颗粒中含量很低, 因此粒径小于该粒径范围的颗粒很可能是通过气化-凝结机理形成的, 而粒径大于该粒径范围的颗粒中这2个元素含量与总灰中含量相当, 可能是通过矿物质的破碎形成.

4 台锅炉电除尘器出口不同粒径 PM_{10} 颗粒的氧化物组成分析结果见图 6~9. 从中可以看到虽然由于煤种、炉型以及除尘设备的不同而使氧化物的含量与粒径的关系有所变化,但还是能总结出一些相似的规律. PM_{10} 颗粒中根据组分的不同大致可分为 2 类,第 1 类是粒径较小的颗粒(300 MW 机组为第 1~6 级,100 MW 机组为第 1~6 级,50 MW(Ⅰ)机组为第 1~7 级,50 MW(Ⅱ)机组为第 1~5 级)它们主要由氧化钠,硫化物组成,占到了 60%~80%. 而难熔性氧化物,包括 SiO_2 、 Al_2O_3 等的含量很低. 第 2 类是粒径较大的颗粒(300 MW 机组为第 6~13 级,100 MW 机组为第 7~13 级,50 MW(Ⅰ)机组为第 8~13

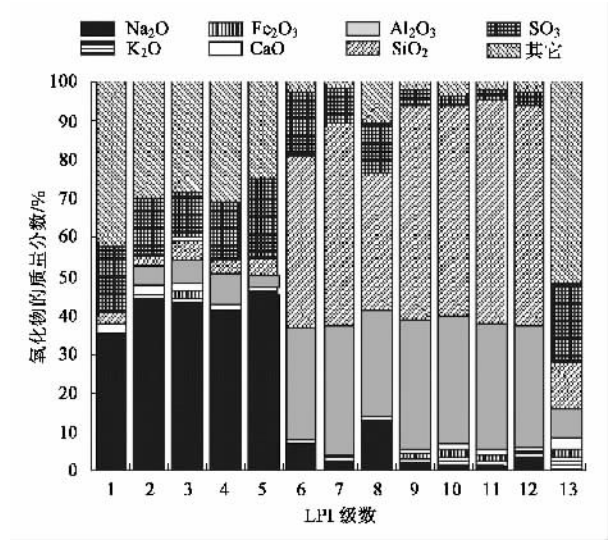


图 6 300 MW 电除尘器出口不同粒径 PM_{10} 颗粒的氧化物组成
Fig.6 Oxide composition of eachstage within PM_{10} from 300 MW

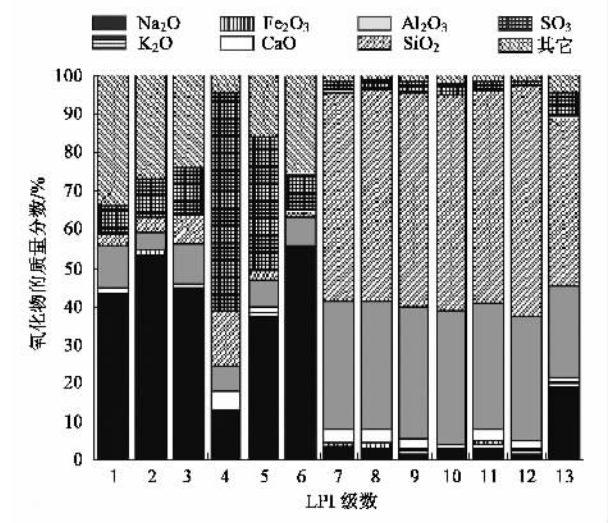


图 7 100 MW 电除尘器出口不同粒径 PM_{10} 颗粒的氧化物组成
Fig.7 Oxide composition of eachstage within PM_{10} from 100 MW

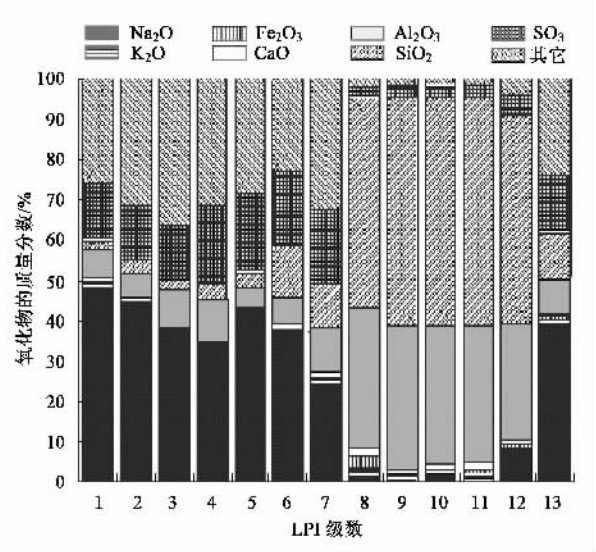


图 8 50 MW(Ⅰ)电除尘器出口不同粒径 PM_{10} 颗粒的氧化物组成
Fig.8 Oxide composition of eachstage within PM_{10} from 50 MW(Ⅰ)

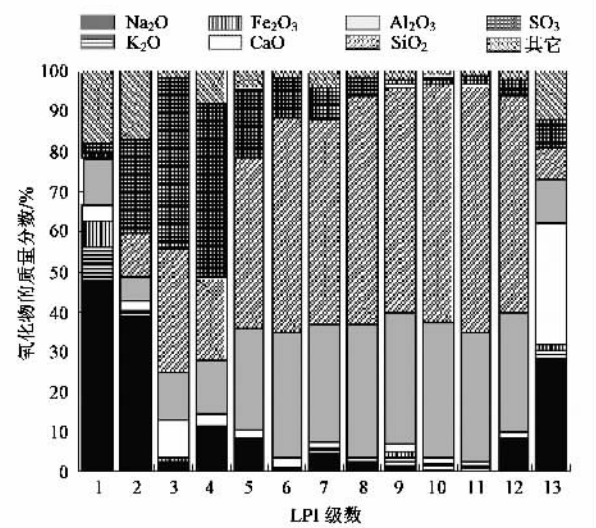


图 9 50 MW(Ⅱ)电除尘器出口不同粒径 PM_{10} 颗粒的氧化物组成
Fig.9 Oxide composition of eachstage within PM_{10} from 50 MW(Ⅱ)

级,50 MW(Ⅱ)机组为第 6~13 级)它们主要由难熔性氧化物组成,占到 80%~90%. 这说明第 1 类颗粒是相应成分气化、成核和凝结的结果;而第 2 类颗粒是煤中的石英和硅铝酸盐等矿物质在高温下破碎、聚结的产物.

2.4 PM_{10} 的形貌特征

利用场发射扫描电镜对 LPI 收集到的煤灰颗粒进行形貌分析,并对颗粒微区进行能谱分析,现以 100 MW 锅炉产生的 PM_{10} 为例进行讨论. 研究发现亚微米颗粒主要由比较规则的球形颗粒组成[图 10(a)],同时也有少量不规则含碳颗粒聚结在一起形

成链状颗粒[图 10(b)],而超微米颗粒主要由球形颗粒组成[图 10(c)],但也有部分不规则颗粒,如矿物质熔融形成块状玻璃体[图 10(d)]和片状颗粒

[图 10(d)].通过形貌分析,认为超微米颗粒有以下形成途径:亚微米颗粒凝聚成超微米颗粒;亚微米颗粒粘附在超微米颗粒上;超微米颗粒聚结成更大颗粒

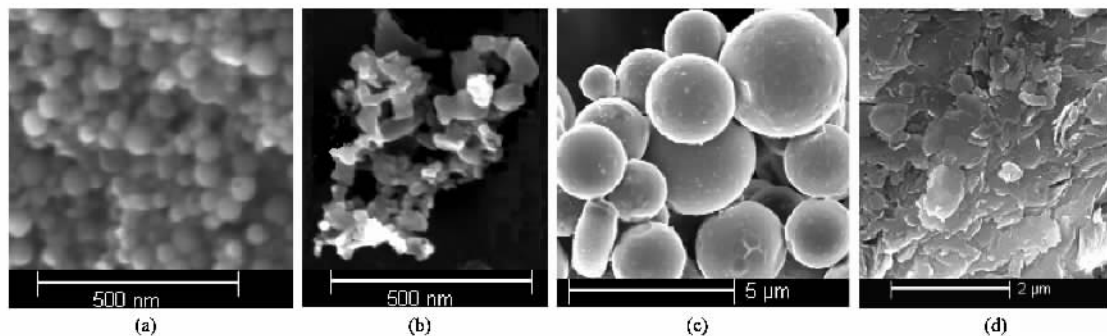


图 10 100 MW 锅炉产生的 PM_{10} 的典型形貌特征

Fig. 10 Typical morphology PM_{10} generated from 100 MW boiler

粒;矿物质破碎、熔融形成超微米颗粒.

3 结论

(1) 4 台锅炉除尘器入口的质量粒径分布相似,呈双峰分布.除尘器后的 PM_{10} 的质量大幅下降,但分布特征相似,也呈双峰分布,峰值有所前移,这可能是由于不同除尘设备对不同粒径的颗粒物的脱除效率不同所致.

(2) 无论是文丘里水膜除尘器还是静电除尘器,对粒径 $> 1 \mu m$ 超微米颗粒的除尘效率随着粒径增加明显增加,而对粒径 $< 0.1 \mu m$ 的颗粒的除尘效率随着粒径增加逐渐下降,粒径为 $0.1 \sim 1 \mu m$ 左右的颗粒的除尘效率最低.

(3) 通过对不同粒径 PM_{10} 颗粒组分分析发现其可以分为 2 类,第 1 类是粒径较小的颗粒-亚微米颗粒主要由氧化钠,硫化物组成.第 2 类是粒径较大的颗粒-超微米颗粒,其主要由难熔性氧化物组成.这说明 2 类颗粒物是通过不同机理形成.

致谢:本实验的现场采样工作由武汉市青山热电厂环境保护科工程师等协助完成,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Sloss L L, Irene M S. PM_{10} and $PM_{2.5}$: an international perspective [J]. Fuel processing Technology, 2000, (65-66): 127-141.
- [2] 王玮,汤大钢,刘红杰,等.中国 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J].环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.
- [3] 徐明厚,郑楚光,冯荣,等.煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状[J].中国电机工程学报, 2001, 21(10): 33-38.
- [4] Soud H N. Developments in Particulate Control for Coal Combustion

- [A]. London, UK: IEA Coal Research, 1995(April).
- [5] Sloss L L. Sampling and Analysis of $PM_{10}/PM_{2.5}$ [A]. London, UK: IEA Coal Research, 1998(October).
- [6] Anderson R R, Martello D V, Rohar P C, et al. Sources and composition of $PM_{2.5}$ at the National Energy Technology Laboratory in Pittsburgh during July and August 2000[J]. Energy & Fuels, 2002, 16: 261-269.
- [7] Tsuji H, Makino H, Yoshida H. Classification and collection of fine particles by means of backward sampling [J]. Powder Technology, 2001, 118: 45-52.
- [8] Braga C F, Teixeira E C, Meira L, et al. Elemental composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in urban environment in South Brazil [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 1801-1815.
- [9] Zhang L, Ninomiya Y. Emission of suspended PM_{10} from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties [J]. Fuel, 2006, 85: 194-203.
- [10] 黄亚继,金保升,仲兆平,等.痕量元素在煤粉炉中排放特性的研究[J].中国电机工程学报, 2003, 23(11): 205-210.
- [11] 刘建忠,范海燕,周俊虎,等.煤粉炉 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 排放规律的试验研究[J].中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145-149.
- [12] 岳勇,陈雷,姚强,等.燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J].中国电机工程学报, 2005, 25(18): 74-79.
- [13] McElroy M W, Carr R C, Ensor D S, et al. Size distribution of fine particles from coal combustion [J]. Science, 1982, 215: 13-19.
- [14] Kauppinen E I, Pakkanen T A. Coal combustion aerosols: a field study [J]. Environ Sci Technol, 1990, 24: 1811-1818.
- [15] Wayne S S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2003, (81): 109-125.
- [16] Yan L, Gupta R, Wall T F. Fragmentation behavior of pyrite and calcite during high-temperature processing and mathematical simulation [J]. Energy & Fuels, 2001, 15: 389-394.