

# 燃煤过程中亚微米颗粒生成及影响因素的研究

隋建才<sup>1</sup>, 徐明厚<sup>2</sup>, 杜云贵<sup>3</sup>, 刘 艺<sup>1</sup>

(1. 中电投远达环保工程有限公司, 重庆 400060; 2 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3 重庆大学 资源与环境学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 通过沉降炉燃煤实验, 讨论了燃煤过程中亚微米颗粒的形成机理, 研究了炉膛温度、煤粉粒径及氧浓度对亚微米颗粒生成的影响。实验选择平顶山烟煤、六盘水烟煤和合山烟煤, 每种煤的煤粉粒径范围分别是 100~200 μm、63~100 μm 和小于 63 μm。煤粉在不同条件下燃烧后, 用 13 级低压撞击器按不同粒径收集可吸入颗粒物进行研究。结果表明: 粒径小于 0.377 μm 的颗粒是通过气化-凝结机理形成, 而粒径大于 0.377 μm 的颗粒是通过矿物质的破碎、聚结机理形成; 随着炉膛温度的升高、煤粉粒径的降低及氧浓度的提高, 亚微米颗粒生成量会有不同程度的增加; 炉膛温度是最主要的影响因素, 煤粉粒径及气氧次之。

**关 键 词:** 煤燃烧; 亚微米颗粒; 形成机理; 影响因素

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

## 引 言

煤炭是国内目前及今后相当长一段时期内火电站的主要燃料, 其燃烧在为我们提供必需的热源和电力资源的同时, 也会带来严重的颗粒物污染。截至 2006 年底我国火电机组装机容量已经达到了 4.8 亿 kW, 电站年耗煤约 12 亿 t。而我国燃煤锅炉热效率偏低, 且煤质低劣, 燃煤过程中颗粒物排放量大约是电厂所用煤粉量的 1.2%~1.5%<sup>[1]</sup>, 这说明电站燃煤是大气颗粒物污染重要来源之一。因此, 研究燃煤过程中颗粒物的生成与控制已成了一项非常紧

迫的任务。

煤粉燃烧过程中, 煤中无机组分在锅炉内高温热动力条件下, 经过一系列复杂的物理化学变化通过几种不同途径形成煤灰颗粒, 这些颗粒进入大气后会对人类和动植物产生不同程度的危害<sup>[2~5]</sup>。20 世纪 80 年代初国外就开始了煤灰颗粒形成与控制方面的研究<sup>[6~8]</sup>, 国内这方面的研究起步较晚。目前研究机构仅限于清华大学、华中科技大学、北京大学、东南大学、浙江大学、中国科学院、环境科学研究院等单位, 并且研究主要集中在颗粒物形成机理、元素迁移和富集规律及大气中颗粒物的浓度分布等方面, 而对亚微米颗粒的形成及影响因素的研究较少<sup>[2,9~10]</sup>。为此, 通过沉降炉实验, 探讨了燃煤过程中亚微米颗粒的形成机理, 分析炉膛温度、煤粉细度及氧浓度对其生成的影响, 进而为实现燃烧过程中抑制其生成提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 实验煤种

实验选用平顶山、六盘水和合山 3 种烟煤, 先将其干燥、破碎和研磨, 然后筛分为 3 种粒径: 小于 63 μm、63~100 μm 和 100~200 μm。3 种煤不同的工业分析和元素分析分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 平顶山烟煤工业分析和元素分析

粒径	工业分析				元素分析			
	水份	灰份	挥发份	固定碳	C	H	N	S
< 63	1.05	18.75	35.98	44.22	67.03	5.34	1.09	3.85
63~100	1.16	17.30	37.91	43.63	68.88	5.45	0.13	3.94
100~200	0.77	18.51	41.49	39.23	68.95	5.14	1.11	3.83

收稿日期: 2007-05-21; 修订日期: 2007-07-23

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目(2002CB211602); 国家自然科学基金资助项目(50325621); 国家科技支撑计划(2007BAC24B00)

作者简介: 隋建才(1975-)男, 重庆人, 中电投远达环保工程有限公司博士后

表2 六盘水烟煤工业分析和元素分析

粒径	工业分析				元素分析			
	水份	灰份	挥发份	固定碳	C	H	N	S
< 63	1.81	27.64	21.10	49.45	57.66	4.95	0.69	3.38
63~100	2.01	25.54	21.03	51.42	55.73	5.23	0.75	4.22
100~200	2.09	26.35	21.56	50.00	59.64	3.34	1.08	2.86

表3 合山烟煤工业分析和元素分析

粒径	工业分析				元素分析			
	水份	灰份	挥发份	固定碳	C	H	N	S
< 63	2.70	50.02	15.25	32.03	35.43	1.35	0.48	6.22
63~100	2.56	48.56	13.64	35.24	28.8	4.84	0.41	6.51
100~200	2.54	48.63	12.73	36.10	37.42	0.85	0.41	5.62

1.2 实验系统

实验系统见文献[2],其主要由沉降炉、微量给粉器、旋风分离器及低压撞击器组成。沉降炉采用硅炭棒分3段电加热,加热区高约2m,炉膛采用刚玉管,内径为56mm,温度调节和监测通过自动温控装置实现。给粉采用MFEV210型微量给粉器,利用分别贮存有氮气和氧气的气罐对燃烧气氛进行调节。为防止高温产物进一步反应,在取样管顶部采用氮气淬灭,并且全程采用水冷。煤粉在沉降炉内完全燃烧以后,飞灰随着烟气流经取样枪进入切割粒径为10μm的旋风分离器,分离器的主要作用是除掉粒径大于10μm的颗粒,防止后面低压撞击器每一级膜片上的颗粒超重;然后,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:0~0.0281,0.0281~0.0565,0.0565~0.0944,0.0944~0.154,0.154~0.258,0.258~0.377,0.377~0.605,0.605~0.936,0.936~1.58,1.58~2.36,2.36~3.95,3.95~6.6,6.6~9.8μm。

1.3 样品处理

实验中撞击器内的膜片采用有机膜,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(Apiezon L vacuum grease)。取样前的有机膜及取样后载有颗粒的有机膜置于烘箱中105℃烘干1h,在干燥器中冷却至室温,在灵敏度为0.001mg的分析天平上称重。利用XRF对样品进行成分分析。

2 结果与讨论

2.1 亚微米颗粒形成

煤中矿物质在高温燃烧环境中经气化、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,但哪些粒径的颗粒是由气化—凝结机理形成的,目前还没有一致的结论<sup>[7~8]</sup>。为此本文对不易气化元素Si和Al在不同粒径灰颗粒上的含量变化进行了分析研究。

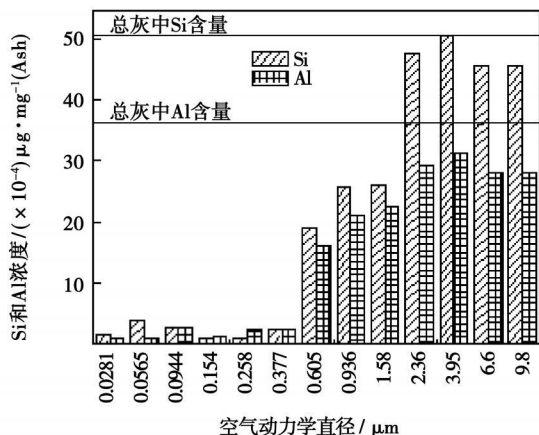


图1 粒径<63μm平顶山烟煤在1673K、20%氧气条件下生成PM<sub>10</sub>中Si和Al含量

图1分别给出了平顶山烟煤粒径小于63μm的煤粉颗粒在20%氧气、1673K条件下生成的PM<sub>10</sub>中元素Si和Al的质量百分含量,为便于参考和比较,图中同时也给出了总灰中元素Si和Al相应的值。由图1可见,总灰中元素Si和Al的浓度分别为53.78×10<sup>-4</sup>和35.86×10<sup>-4</sup>μg/g(Ash),粒径大于2.36μm颗粒中元素Si和Al的浓度与总灰中相应的值基本相当,粒径为0.605~2.36μm颗粒中元素Si和Al的浓度略低于总灰中相应的值,而粒径小于

0.377  $\mu\text{m}$  颗粒中元素 Si 和 Al 的浓度值远远小于总灰中相应的值,为总灰中相应值的 3%~20%。六盘水烟煤及合山烟煤也有类似的规律。

由于含元素 Si 和 Al 的化合物的熔沸点很高,不易气化,而这两个元素在 0.377  $\mu\text{m}$  以下的颗粒中含量很低,因此本文认为粒径小于 0.377  $\mu\text{m}$  的颗粒是通过气化-凝结机理形成的,而粒径大于 0.377  $\mu\text{m}$  的颗粒中这两个元素含量与总灰中含量基本相当,是通过矿物质的破碎、聚结机理形成。现将围绕着粒径小于 0.377  $\mu\text{m}$  的颗粒进行分析讨论,并定义这一粒径范围的颗粒为亚微米颗粒。

## 2.2 炉膛温度对亚微米颗粒形成的影响

图 2 给出了 20% 氧气、不同炉膛温度、煤粉粒径条件下六盘水烟煤燃烧过程中亚微米颗粒的生成量。由图 2 可见,不同粒径范围下,单位煤粉燃烧生成的亚微米颗粒量都是随着温度的升高而增加,温度从 1 423 K 升高到 1 673 K 时,燃烧粒径为小于 63  $\mu\text{m}$ 、63~100  $\mu\text{m}$  及 100~200  $\mu\text{m}$  煤粉的亚微米颗粒生成量分别提高了 52.6%、40.4% 和 29.4%。另外两个煤种也有类似的规律。这主要是因为煤中矿物质气化对温度相当敏感,炉膛温度升高,导致矿物质经历更高的温度,气化的矿物质蒸汽增加,于是形成的亚微米颗粒增加,热力学计算也可以得到同样的结论<sup>[1]</sup>。

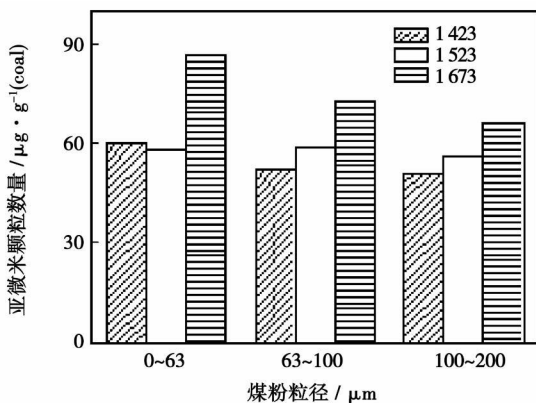


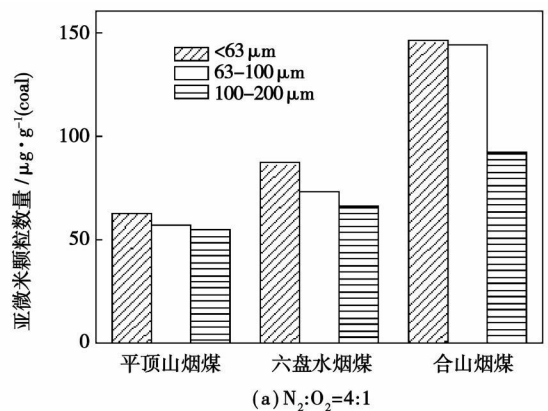
图 2 六盘水烟煤燃烧过程中温度对亚微米颗粒生成的影响

## 2.3 煤粉粒径对亚微米颗粒形成的影响

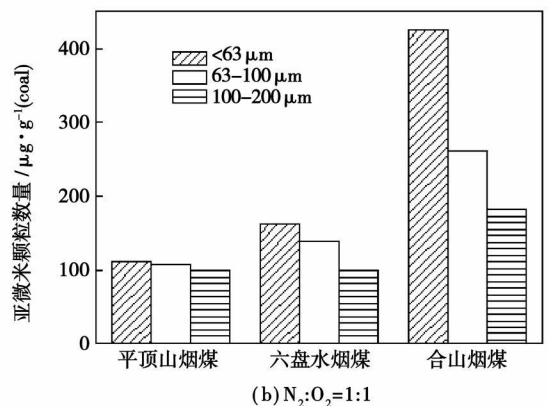
图 3 给出了 3 种煤在炉温为 1 673 K 条件下亚微米颗粒生成量,从图 3 中可以很直观地看出煤粉粒径对亚微米颗粒生成的影响,无论氮氧比是 4:1 还是 1:1,单位煤粉燃烧生成的亚微米颗粒量都是随着煤粉粒径的减小而增加,在氮氧比为 1:1 条件下六盘水烟煤和合山烟煤燃烧时尤为明显,此时的

生成量约提高一倍(小于 63  $\mu\text{m}$  煤粉与 100~200  $\mu\text{m}$  煤粉相比)。

煤粉粒径影响亚微米颗粒生成量的主要原因是:细煤粉颗粒可以加速挥发分释放,增加反应表面,缩短着火时间,导致其有很高的燃烧效率和火焰温度,使矿物质气化增加,进而增加亚微米颗粒生成量;另外,小的煤粉颗粒形成的焦炭膨胀率非常大,因此其孔隙率也随之增大,同时煤粒内部矿物质蒸汽向外扩散的路程也随着粒径的减小而缩短,导致蒸汽析出阻力减小,从而使生成的亚微米颗粒增加。



(a)  $\text{N}_2:\text{O}_2=4:1$



(b)  $\text{N}_2:\text{O}_2=1:1$

图 3 不同煤种在 1 673 K 下煤粉粒径对亚微米颗粒形成的影响

## 2.4 氧浓度对亚微米颗粒形成的影响

图 4 给出了燃烧六盘水烟煤过程中氧浓度对亚微米颗粒生成的影响。由图 4 可见,对于不同温度下燃烧不同粒径的煤粉,其亚微米颗粒生成量都是随着氧浓度的升高而增大。这是由于氧浓度的升高,燃烧处于动力扩散区,极大地提高了燃烧速率和焦炭颗粒温度,而煤中矿物质的气化与温度相当敏感<sup>[7]</sup>,所以氧浓度的提高增加了矿物质气化量,进而影响亚微米颗粒生成量。同时,氧浓度的提高,可能引起焦炭颗粒爆燃,使得颗粒内部还原气氛更强,加速矿物质气化。

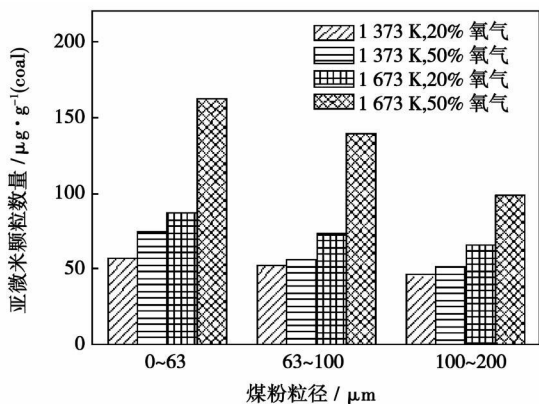


图 4 燃烧六盘水烟煤时氧浓度对亚微米颗粒生成的影响

### 2.5 亚微米颗粒形成影响因素的正交分析

为了考察燃烧给定煤种时炉膛温度、煤粉粒径和氧浓度对亚微米颗粒生成量的影响程度,进而为锅炉运行中抑制其生成提供一定的依据,下面通过正交试验法进行分析。采用  $L_9(3^4)$  正交表,根据试验条件采用拟水平正交试验,以亚微米颗粒生成量为考察指标,试验中选定的因素和水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平表

因素	水平 1	水平 2	水平 3
炉膛温度 A / K	1 423	< 63	20
煤粉粒径 B / $\mu\text{m}$	1 523	63 ~ 100	50
氧浓度 C / %	1 673	100 ~ 200	—

计算可知,对于燃烧六盘水烟煤来说,  $F_A = 100.7$ ,  $F_B = 55.5$ ,  $F_C = 33.62$ ,  $F_A > F_B > F_C = 32.14$ ,这说明燃烧六盘水烟煤时,炉膛温度、煤粉粒径和气氛对亚微米颗粒生成量都有显著性影响,影响最大的是炉膛温度,其次分别是煤粉粒径和气氛。同样,燃烧另外 2 种煤时也有类似的规律,对于平顶山烟煤来说,  $F_A = 74.21$ ,  $F_B = 56.15$ ,  $F_C = 29.34$ ; 对于合山烟煤来说,  $F_A = 77.23$ ,  $F_B = 76.55$ ,  $F_C = 38.56$  ( $F$  为方差分析中的观测值)。

### 3 结 论

通过沉降炉燃煤实验,探讨了亚微米颗粒的形

成机理,研究了炉膛温度、煤粉粒径及氧浓度对亚微米颗粒生成的影响,主要得到了以下一些结论:

(1) 粒径小于  $0.377 \mu\text{m}$  的颗粒很可能是通过气化—凝结机理形成的,而粒径大于  $0.377 \mu\text{m}$  的颗粒是通过矿物质的破碎、聚结机理形成。

(2) 随着炉膛温度的升高、煤粉粒径的降低及氧浓度的提高,亚微米颗粒生成量会有不同程度的增加。

(3) 通过正交试验发现,炉膛温度、煤粉粒径及炉内气氛都对亚微米颗粒的生成有显著性影响,而且炉膛温度是最主要的影响因素,煤粉粒径及气氛次之。

### 参考文献:

- [1] SOUD H N, WU Z. East Asia—air pollutant control and coal-fired power generation [R]. London: IEA Coal Research, 1998.
- [2] JIANCAI SUI, MINGHOU XU, YUNGUI DU, et al. Emission characteristics and elemental partitioning of submicron particulate matter during combustion of a pulverized bituminous coal [J]. Journal of the Energy Institute, 2007, 80(1): 22—28.
- [3] 刘小伟, 徐明厚, 于敦喜, 等. 燃煤过程中矿物质变化与颗粒物生成的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 104—108.
- [4] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 等. 煤粉燃烧过程中矿物质气化影响因素的模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 78—83.
- [5] 俞云, 徐明厚, 于敦喜, 等. 燃烧过程中焦炭的膨胀特性及其对颗粒物形成的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 112—116.
- [6] TAYLOR D D, FLAGAN R C. Aerosols from a laboratory pulverized coal combustor [R]. ACS symposium series, 1981.
- [7] QUANN R J, NEVILLE M, JANGHORBANL M, et al. Mineral matter and trace-element vaporization in a laboratory—pulverized coal combustion system [J]. Environmental Science Technology, 1982, 16: 776—781.
- [8] HELBLE J J. Mechanisms of ash particle formation and growth during pulverized coal combustion [D]. Massachusetts: MIT library in America, 1987.
- [9] 吕建姿, 李定凯. 不同条件对煤粉燃烧燃烧后  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_1$  排放影响的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 103—107.
- [10] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 煤粉炉  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  排放规律的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145—149.
- [11] 隋建才. 燃煤过程中亚微米颗粒形成与排放的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2006.

(编辑 韩 锋)

halable particulate matter, particle cluster equilibrium simulation, particle size spectrum

应用局部投影网络预测燃料分级燃烧锅炉的飞灰含碳量= **Forecast of Fly-ash Carbon Content in a Fuel-graded Combustion Boiler by Using a Local Projection Network**[刊, 汉] / ZHU Yu-dong, OU Zong-xian, YAN Wei-ping (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), WANG Yun-ze (Huadian (Beijing) Thermal Power Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100055) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 265 ~ 268

The pulverized coal combustion efficiency of a thermal power plant is reflected in the fuel burn-out degree and can be usually evaluated by way of the fly-ash carbon content of a boiler. A foreknowledge of this parameter is of the utmost importance for fuel-graded combustion optimization, i. e. for assuring a high combustion efficiency of pulverized coal simultaneously with the reduction of  $\text{NO}_x$  emissions, thus enhancing boiler efficiency. Analyzed were the influencing factors of the boiler fly-ash carbon content. By using the specific features of a local projection network (LPN), such as simple structure, quick convergence speed, strong generalization ability and suitability for a non-linear time-variation process, a model for undergoing training and the dynamic prediction of boiler fly-ash carbon content was established and tested by use of the data obtained from boiler hot-state tests. The results show that the model in question has forecast relatively accurately the carbon content of fly ash, thus providing a model basis for the fuel graded-combustion optimization. **Key words:** burn-out rate, carbon content of fly ash, local projection network, fuel gradation, boiler

燃煤过程中亚微米颗粒生成及影响因素的研究= **A Study of the Formation of Submicron Particles in the Process of Coal Combustion and Its Influencing Factors**[刊, 汉] / SUI Jian-cai, LIU Yi (China Power Investment Corporation Yuanda Environment Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 400060), XU Ming-hou (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), DU Yun-gui, YIN Guang-zhi (College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 269 ~ 272

Through a coal combustion experiment in a sedimentation furnace, the formation mechanism of submicron particles in the process of coal combustion has been discussed along with a study of the influence of furnace temperature, pulverized coal particle diameter and oxygen concentration on the formation of submicron particles. During the experiment, Pingdingshan, Liupanshui and Heshan-origin bituminous coal were chosen by the authors with the pulverized coal particle diameters of each kind ranging from 100 to 200  $\mu\text{m}$ , 63 to 100  $\mu\text{m}$  and less than 63  $\mu\text{m}$  respectively. After the pulverized coal has been burned under different conditions, a 13-stage low-pressure impactor was used to collect inhalable particles in different diameters to perform a study. The research results show that the particles with a diameter of less than 0.377  $\mu\text{m}$  are likely to be formed through a gasification-condensation mechanism while the particles with a diameter greater than 0.377  $\mu\text{m}$  are formed through a fragmentation and agglomeration mechanism of mineral substances. With an increase of the furnace temperature, a decrease of pulverized coal diameter and an enhancement of oxygen concentration, the amount of submicron particles produced will increase to various extents. The furnace temperature is the most important influencing factor with the pulverized coal diameter and atmosphere playing a secondary role. **Key words:** coal combustion, submicron particle, formation mechanism, influencing factor

变氧量工况下煤粉炉内辐射能检测特性= **Detection Characteristics of Radiant Energy in a Pulverized Coal-fired Boiler at Variable Oxygen-content Operating Conditions**[刊, 汉] / YANG Chao, LUO Zi-xue, ZHOU Huai-chun (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 273 ~ 277

In a 300 MW double-furnace coal-fired utility boiler, flame images were real-time photographed by making use of several CCD (charge-coupled device) flame probes installed on the boiler proper. Radiant energy detection values re-