

温度对煤粉燃烧生成的一次颗粒物特性的影响

吕建焱¹, 李定凯²

- (1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 河北省 保定市 071003;
2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

Study on Primary PM Features Influenced by Pulverized Coal Combustion at Different Burning Temperature

LÜ Jian-yi¹, LI Ding-kai²

(1.School of Environmental Science and Technology, North China Electrical Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China; 2.Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A cascade experimental system of laboratory-scale drop tube furnace and an 8-stage Andersen particle impactor were employed for studying the primary particulate matter (PM) features influenced by pulverized coal combustion at different burning temperature. According to the PM mass-size distribution, the peak value of PM₁₀ appeared between 2.8 μ m and 4.3 μ m at three different burning temperatures. PM_i emission amount augmented with increasing of burning temperature. It has been shown by scanning electron microscope (SEM) images that on the condition of at higher burning temperature, PM appearance were rough, PM distorted and fragmented violently, sub-microns were adhered to the melted PM surface. The constituents of ultra-micron PM determined by energy dispersive X-ray(EDX) were mainly ferric, calcic and alumino-silicate particles, the constituents of sub-micron PM were not same as ultra-micron PM. The results of inductively coupled plasma-atomic spectroscopy(ICP-AES) showed that trace elements such as Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were enriched in finer PM. The higher the burning temperature was, the greater the concentration of trace elements in PM was. The element concentration was presented the positive correlativity to the burning temperature.

KEY WORDS: pulverized coal combustion; primary particulate matter; emission features; trace element; enrichment

摘要: 实验室条件下, 以沉降炉与8级 Andersen 粒子撞击

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2002CB211600)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China(2002CB211600).

器级联使用, 研究燃烧温度对煤粉燃烧生成的一次颗粒物特性的影响。从一次颗粒物的粒度分布来看, 3种燃烧温度下的PM₁₀均在2.8~4.3 μ m内出现峰值。随燃烧温度升高, PM_i的排放量增大。SEM图像显示, 较高温下生成的颗粒物表面粗糙, 变形和破碎强烈, 熔融表面粘附细微粒子。EDX结果表明超微米颗粒物的主要成分为Fe和Ca以及铝硅酸盐, 亚微米颗粒物的成分与超微米颗粒物成分不同。ICP-AES分析结果表明, Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 5种痕量元素在细颗粒物中富集。燃烧温度越高, 颗粒物中痕量元素的含量越大, 颗粒物中元素的含量与燃烧温度呈正相关关系。

关键词: 煤粉燃烧; 一次颗粒物; 排放特性; 痕量元素; 富集

0 引言

化石燃料燃烧排放出的一次颗粒物和二次颗粒物是空气中可吸入颗粒物(PM₁₀)的主要来源之一^[1]。PM₁₀对人类生存环境和身体健康都有着极为不利的影 响。而燃烧温度是影响颗粒物特性的主要因素之一。研究表明^[2], 锅炉炉膛内燃烧温度升高能够加快部分痕量元素的蒸发。痕量元素在细微粒子中的富集程度随元素的沸点升高而减小, 具有明显的负相关关系。Ruixia Guo^[3]等在沉降炉中研究了300~1000 $^{\circ}$ C温度下As、Pb、Cr、Cd、Mn几种元素在煤粉热解过程中的释放性能, 结果表明, 随着温度升高, 这几种元素的释放率均提高。另有文献报道, 煤粉燃烧时火焰温度对Se、As等某些元素在亚微米颗粒上的富集有很大影响^[4]。还有研究表明^[5], 燃烧温度增高, 亚微米颗粒物的量增大, 这是由于

较高温度增大了挥发性元素的蒸发，凝结形成的核态粒子增多。本文针对燃烧温度对颗粒物粒度分布和排放特性以及转化过程等影响方面进行研究。

1 实验

1.1 实验煤粉的特性

实验煤粉取自保定电厂。在实验室中利用磨煤机将煤粉磨制为 $R_{90}=11.87\%$ ，煤粉样品的粒径分析结果由激光粒度分析仪给出。煤粉工业分析的结果是：水分 1.2%，灰分 36.12%，挥发分 12.34%，固定碳 50.34%；元素分析(空干基)的结果是C为 47.7%，H为 2.37%，N为 0.79%，O+S为 11.82%。将实验煤粉分为 3 份，分别在燃烧温度为 1 100、1 000 和 900℃时做煤粉的燃烧实验，以研究不同燃烧温度下煤粉生成的一次颗粒物的特性。为方便，3 个温度下煤粉燃烧的实验条件分别记为A、H、I。

1.2 实验系统

本研究中采用的实验系统在文献[6-7]中有详细介绍。套管式层流沉降炉作为煤粉燃烧的设备。煤粉在一次风作用下经微量给粉装置送入沉降炉燃烧。一、二次风供给燃烧所需的空气，炉温由温控装置进行调节，炉内采用氧化性气氛。燃烧后的飞灰颗粒经套管式取样枪冷却，并经空气再冷却和稀释后，用 8 级 Andersen 粒子撞击器采集并分离。Andersen 装有预分离器，在本实验条件下预分离器可以分离出粒径大于 13.6 μm 的颗粒物。

1.3 样品处理

煤粉燃烧后的灰颗粒物经预分离器后，最终将较细的颗粒分级并收集在 8 级滤膜上(共 9 级，第 1 级不装滤膜，用于分布气流)。实验前，将滤膜烘干称重。另外准备 8 个称重瓶刷洗干净，烘干称重。采样后，将 8 级滤膜及金属底盘上的样品分别装入不同的称重瓶中，再烘干称重，得到每一级上颗粒物的重量。根据燃烧工况和采样条件，分级后从第 2 级至第 9 级的颗粒物粒径为 a: >9.4 μm ； b: 6.4~9.4 μm ； c: 4.3~6.4 μm ； d: 2.8~4.3 μm ； e: 1.4~2.8 μm ； f: 0.87~1.4 μm ； g: 0.59~0.87 μm ； h: 0~0.59 μm 。由粒径分级看出，Andersen 粒子撞击器采集到的一次颗粒物的粒径大约都在 10 μm 以下，属于可吸入颗粒物。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物质量—粒径分布关系

将 8 级滤膜上收集的颗粒物样品称重，总重量

为 M_i 。将每一级滤膜上样品的重量 M_i 与 M_t 相比后，对应滤膜分级的粒径范围，得到一次颗粒物粒径与质量的分布关系，如图 1 所示。由图看出，A、H、I 三条粒度分布曲线呈现几乎相同的分布趋势。均在 2.8~4.3 μm 内出现峰值，说明在 3 种燃烧温度下，产生的 2.8~4.3 μm 粒径范围内的颗粒物最多。并且在 4.3~6.4 μm 和 6.4~9.4 μm 均有较高的质量份额，且成相同的分布趋势。经典研究表明^[8]，煤粉燃烧后一次颗粒物的粒度分布呈双峰模式，大峰在超微米区，这部分颗粒物的产生是由破碎—聚合的机理产生的；小峰在亚微米区，这部分颗粒是由蒸发—凝结的机理产生。但有最新研究表明^[9]，煤粉燃烧后一次颗粒物的粒度分布为三峰模式，包括峰值在 0.08 μm 的亚微米区、峰值在 2.0 μm 的破碎区和峰值在超微米区(有文献表明，超微米区的峰值出现在 10~100 μm 的区域，本文主要基于对可吸入颗粒物的研究，没有考察这部分颗粒的粒度分布情况)。而对于峰值在 2.0 μm 的破碎区的颗粒，是由燃烧中焦炭和无机矿物质的破碎产生而来的。

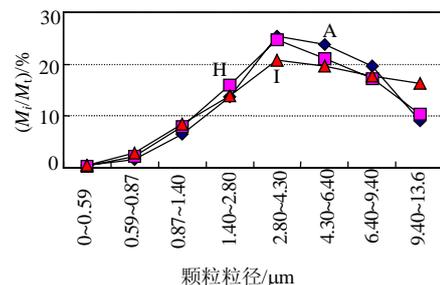


图 1 3 种燃烧温度下一次颗粒物质量—粒径分布图
Fig.1 Relationship of PM mass and size at three different burning temperature

图 1 中出现的 2.8~4.3 μm 粒径段的峰值，正处于经典研究的破碎区范围，实验结果也表明了这部分颗粒物主要是由煤粉燃烧过程中焦炭和无机矿物质的破碎产生的。而 3 者中，A 的峰值最高，H 的次之，I 的峰值最小，表明燃烧温度越高，焦炭和矿物质的破碎效应越强，破碎后形成的颗粒物的量也越多。这个结果与黄建辉等人用模型计算的结果一致^[10]。文献[10]也认为，当煤粉进入温度较高的燃烧区域后，较高的燃烧温度会增加颗粒内部的温度梯度，导致较大的热应力，颗粒较易发生破碎现象。温度越高，颗粒内部产生的温度梯度越大，颗粒越易破碎。另外，滤膜上粒径在 9.4 μm 以上颗粒物的量，I 的最高，H 的次之，A 的最少，表明 I 的大颗粒物较其它两者为多，说明在燃烧过程中其破碎程度没有其它两种煤粉强烈。

在后4级的e、f、g和h粒径范围内,3条分布曲线几乎重合,均随着粒径减小而减小。说明在这3种燃烧温度下,产生出的细颗粒物的质量份额差别不大。

2.2 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的排放特性

为符合常用的描述颗粒物的PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的概念,本文将实验所得的9.4μm以下的颗粒物近似表示为PM₁₀,2.8μm以下的颗粒物表示为PM_{2.5},1.4μm以下的颗粒物表示为PM₁。将Andersen粒子撞击器预分离器中以及所有滤膜上收集的样品汇总,得到燃烧后的总灰量M,将每次燃烧后的PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的重量与总灰量相比,即 $w(\text{PM}_i)/M$,即可得到相应的PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的排放量。3种温度下PM_i的排放量如图2所示。由图看出,燃烧温度在1100℃时,PM_i的排放量都是最大的,随着温度降低,PM_i的排放量均下降。排放量与燃烧温度呈正相关性。表明燃烧温度高,会增加颗粒内部的温度梯度,导致较大的热应力,颗粒较易发生破碎现象。所以,1100℃下产生的PM₁₀、PM_{2.5}最大、1000℃下次之、900℃时产生的最少。

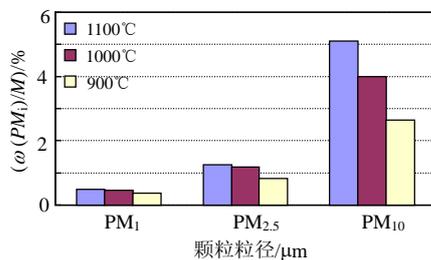


图2 燃烧温度对颗粒物排放的影响

Fig. 2 Effect of burning temperature on PM emission features

由图2显示,3种温度条件下PM₁的量相当。分析认为,当温度达到900℃时,煤中Hg、As、Se以及卤族元素以及其它易挥发物质等都已蒸发进入气相^[11-12]。而在900~1100℃的温区内,蒸气量没有明显的差别。因为1100℃尚没有达到一些无机矿物质的熔点,没有造成较大的量的差别^[13]。

2.3 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5})$ 、 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{10})$ 、 $w(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$ 的特性

Rosin-Rammler分布函数,简称R-R分布,是国内外用以描述粉尘粒径分布最广泛的分布函数。其表达式为

$$R = 100 \exp(-\alpha \delta^\beta) (\%) \quad (1)$$

式中: R 为粉尘重量筛上累计分布,%; δ 为粉尘颗粒粒径, μm ; α 、 β 为待定系数。通过数学变换将式(1)变为线性方程,结合PM的粒径—质量分布关

系,归一化处理后,得到待定参数 α 、 β ,然后用R-R分布函数对实验数据进行拟合,得到两者的相关性系数 γ^2 。所得结果列于表1中。由表1看出,3种温度下的实验值和计算值均有很好的拟合性质, γ^2 均在0.982以上。通过拟合的R-R分布函数计算PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的质量筛下累计分布值,得到3种温度条件下PM₁₀中PM_{2.5}、PM₁的占有率 $w(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$ 、 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{10})$ 以及PM_{2.5}中PM₁的占有率 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5})$ 。结果列于表1中。

表1 R-R参数及相关计算结果

Tab. 1 R-R parameter and relative results

样品	α	β	γ^2	$w(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$	$w(\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5})$	$w(\text{PM}_1/\text{PM}_{10})$
A	0.0809	1.9102	0.9850	0.373	0.209	0.078
H	0.1014	1.7909	0.9823	0.408	0.237	0.097
I	0.1121	1.6425	0.9835	0.399	0.293	0.117

由表中结果来看,随着燃烧温度的降低, $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5})$ 、 $w(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$ 、 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{10})$ 的值呈升高的趋势。这个情况以及3种温度下PM₁排放量相当的结果均与文献[5]的结论相矛盾。初步分析是由于燃烧温度对破碎程度的影响造成的,温度越低,PM₁₀、PM_{2.5}的值越低。另外,燃烧温度在900~1100℃的温区内,没有明显的蒸气量的差别,PM₁的值相差不大,而相应的PM₁₀的值随温度变化差别较大,造成 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5})$ 、 $w(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$ 、 $w(\text{PM}_1/\text{PM}_{10})$ 的值随温度降低呈现升高趋势。

2.4 分级颗粒物的形貌及成分分析

用扫描电镜(SEM)和能谱(EDX)对不同滤膜上分级颗粒物的形貌和组成进行分析,见图3、4。将燃烧温度分别为1100℃和900℃下分级颗粒物的SEM图像放在一起进行比较,如图3所示。由A4和I4(第4级滤膜,颗粒粒径4.3~6.4μm)SEM图像比较来看,A4比I4变形要明显。A4中的颗粒物表面粗糙,有凸起和皱褶,另外也有由小颗粒聚合在一起的颗粒聚团;I4颗粒较A4颗粒规则、平滑,变形没有A4强烈。说明在燃烧温度较高时,煤粉颗粒所受的温度梯度大,内部热应力也大,导致颗粒变形和破碎的程度剧烈,两种条件下形成的颗粒物产物的外形也有差异。A6和I6(颗粒粒径1.4~2.8μm)的情况跟A4和I4相比较情况类似。A6中颗粒团聚、结合的程度更加强烈,说明除了颗粒变形明显、破碎程度剧烈外,在1100℃下,颗粒物的表面呈熔融状态,碰撞后易于粘结在一起,形成颗粒聚团;I6中的颗粒只是简单堆积在一起,熔合聚结的情况较少。说明在900℃下,大部分的颗粒没有达到熔化状态,颗粒之间粘结较少。这就解释了上述的3种

温度下PM₁的排放量相当以及w(PM₁/PM_{2.5})、w(PM_{2.5}/PM₁₀)、w(PM₁/PM₁₀)的值随温度降低呈现升高趋势的问题。一方面，燃烧温度高，颗粒变形程度较大、破碎剧烈，并且元素蒸发速率较大，形成的细颗粒物较多；另一方面，燃烧温度高，颗粒呈熔融状态，小颗粒与大颗粒碰撞后，易于粘结、沉积在大颗粒表面，形成颗粒聚团，减小了细颗粒物的量。在这两种情况的共同作用下，造成了不同温度下颗粒物所呈现出来的排放特性。

从EDX分析结果来看，A6、I6所示的颗粒物其主要成分都包括Si、Al、Fe、Ca且含量相当(由于样品喷金及系统误差，检测出的Au、Fe含量较高)，颗粒物应该是由Fe和Ca以及铝硅酸盐组成。已有的研究也表明，超微米颗粒物的组分，主要是铝硅酸盐和粘土矿物质^[14]。A8和I8(颗粒粒径0.59~0.87μm)是亚微米粒子的图像。两者的颗粒物均呈细颗粒聚团和絮凝状颗粒，沉积或粘结在玻璃纤维的表面。从观察到的颗粒物的形态来判断，是由蒸气凝结和亚微米颗粒聚合共同形成的。并且在I8图像中也观察到絮凝状颗粒，说明900℃燃烧温度下就可以使挥发性物质或难熔氧化物蒸发，产生蒸气，冷却后凝结为絮凝状颗粒物。2.2中研究结果也表明900℃下PM₁的生成量较大，而其中包含大量的元素蒸发后凝结形成的亚微米颗粒。另外，EDX分析的结果显示两者成分和含量也比较相近，有Fe和少量的Si、Al和Ca，但与A6、C6的EDX

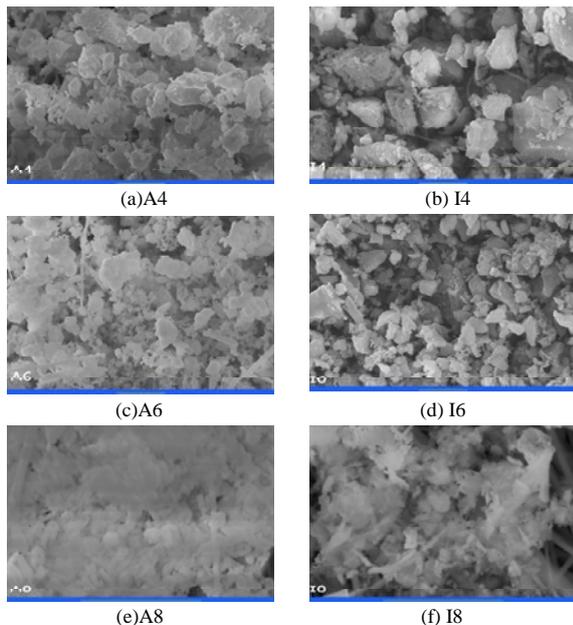


图 3 分级颗粒物的 SEM 图
Fig. 3 SEM images of grading PM

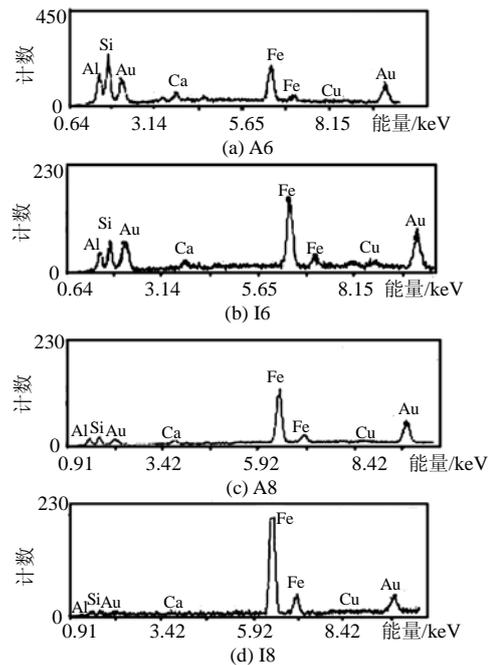


图 4 分级颗粒物的 EDX 分析结果
Fig. 4 EDX analysis result of grading PM

结果相比，Si、Al、Ca的含量大大减少，表明其成分和超微米颗粒的成分不同。但受检测仪器性能所限，未能检测和报告出其它元素。

2.5 痕量元素含量的分布规律及富集特性

美国在1990年的CAAA中制定了11种有毒污染物(HAPs)，其中包括Cr、Ni、Pb，而Cu、Zn是与我们生活息息相关的痕量元素。本文即借助于ICP-AES检测分级颗粒物中这5种痕量元素的含量。为了能够达到仪器检测限，实现对痕量元素含量的测量，将8级分级颗粒物合并为5级，分别为a、b、c、d、e+f 5级进行研究。

图5示出了A、H、I 3种燃烧温度下Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 5种痕量元素在颗粒物中的含量随温度和粒径变化的情况。由图看出，随着颗粒粒径减小，Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 5种金属元素的含量有增高的趋势，亦即这5种痕量元素都有富集于细颗粒表面的特性。另外，随着燃烧温度降低，H、I与A条件下的颗粒物中Cr、Cu、Ni、Zn元素的含量相比，均有逐渐减小的趋势；但Pb的含量分布与燃烧温度的关系并没有呈现明显的规律，说明Pb在900℃以上的温度下就有很强的挥发性。文献表明，尽管Pb的沸点很高，约1750℃，但Pb对煤中微量元素活性原子Cl的亲合力较强^[15]，当烟温低于800K时，Pb的主要形态就是PbCl₂^[16]，而PbCl₂的熔点仅为950℃。所以Pb在这3种温度下都有较好的挥发性能。由此，

燃烧温度越高,煤粉燃烧后颗粒物中元素浓度的含量越高。燃烧温度与颗粒物中元素的含量大体上呈正相关关系。分析认为由于燃烧温度升高,元素的蒸发速率增大,元素蒸气的蒸发量增大,使得蒸气冷却后均相凝结形成的细粒子和异相凝结在颗粒物表面上的元素蒸气较多,在温度较高时的颗粒物产物中呈现较大的元素含量。

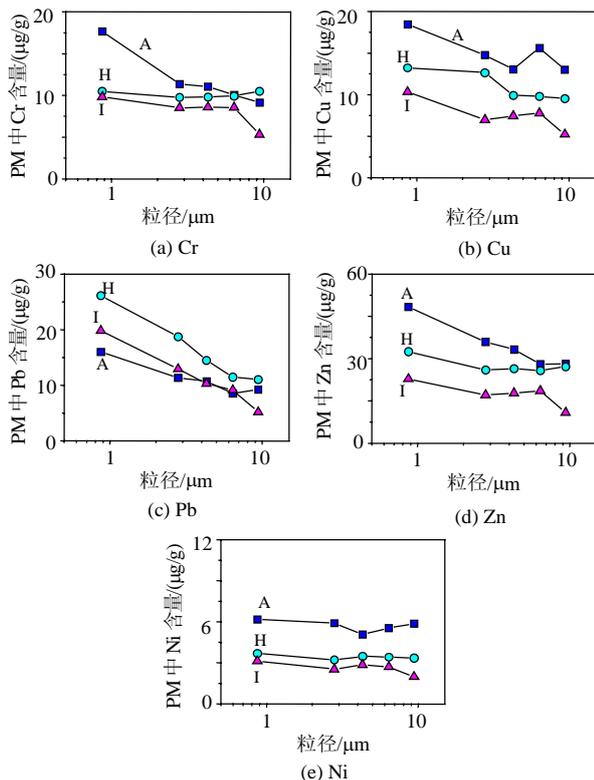


图5 分级颗粒物中痕量元素的含量

Fig. 5 Trace elements concentration in grading PM

3 结论

(1) 燃烧温度对颗粒物排放特性的影响具有两面性。一方面,燃烧温度高,颗粒变形程度较大、破碎剧烈,并且元素蒸发速率较大,形成的细颗粒物较多;但另一方面,燃烧温度高,颗粒呈熔融状态,小颗粒与大颗粒碰撞后,易于粘结、沉积在大颗粒表面,形成颗粒聚团,减小了细颗粒物的量。因此造成本研究中设定的3种燃烧温度下 PM_{10} 的排放量相当以及 $w(PM_{10}/PM_{2.5})$ 、 $w(PM_{2.5}/PM_{10})$ 、 $w(PM_{10}/PM_{10})$ 的值随温度降低呈现升高趋势的情况。总体来说, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的排放量与燃烧温度呈正相关性。

(2) 燃烧温度降低,元素的蒸发减缓,蒸气量减小,均相凝结和异相凝结的元素蒸气较少,颗粒物中Cr、Cu、Ni、Zn元素的含量减小。但Pb由于以

$PbCl_2$ 的形式存在,在 $900^{\circ}C$ 以上就有很强的挥发性。所以Pb的含量分布与燃烧温度的关系并没有呈现明显的规律。大体来说,燃烧温度越高,煤粉燃烧后颗粒物中元素浓度的含量越高。

(3) 较高的燃烧温度会排放更多的细颗粒物,并且生成的颗粒物中金属元素的含量也较高,造成较大的环境危害。但煤粉的燃尽率高,热损失小。

参考文献

- [1] Tucker W G. An overview of $PM_{2.5}$ sources and control strategies [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66: 379-392.
- [2] Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Trace elements(Mn, Cr, Pb, Se, Zn, Cd and Hg) in emissions from a pulverized coal boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 86(1): 23-32.
- [3] Guo Ruixia, Yang Jianli, Liu Zhenyu. Behavior of trace elements during pyrolysis of coal in a simulated drop-tube reactor[J]. Fuel, 2004, 83(6): 639-643.
- [4] Senior C L, Lawrence E B III, Srinivasachar S, et al. Pilot scale study of trace element vaporization and condensation during combustion of a pulverized sub-bituminous coal[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 63: 149-165.
- [5] Quann, R J, Neville M, Janghorbani M, et al. Mineral matter and trace element vaporization in laboratory pulverized coal combustion system [J]. Environ. Sci. Technol. 1982, 16(7): 776-781.
- [6] 吕建斌, 李定凯. 不同粒径煤粉燃烧后一次颗粒物的特性研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 513-516.
Lü Jianyi, Li Dingkai. A study of the characteristics of primary particulate matter after the combustion of pulverized coal of different particulate diameters[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2005, 20(5): 513-516(in Chinese).
- [7] Lü Jianyi, Li Dingkai. Characteristics of primary particulate matter during different size coal combustion[C]. Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion, Adelaide, Australia, 2005.
- [8] Sarofim A F, Howard J B, Padia A S. The physical transformation of the mineral matter in pulverized coal under simulated combustion conditions[J]. Combustion Science and Technology, 1977, 16: 187-204.
- [9] Seames W S. An initial study on the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(2): 109-125.
- [10] 黄建辉, 徐明厚, 于敦喜, 等. 煤燃烧过程中的热应力破碎的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(5): 78-80.
Huang Jianhui, Xu Minghou, Yu Dunxi, et al. Fragmentation of coal particles by thermal stresses during combustion[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition), 2004, 32(5): 78-80 (in Chinese).
- [11] 郭欣, 郑楚光, 贾小红, 等. 300MW 煤粉锅炉烟气中汞形态分析的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 185-188.
Guo Xin, Zheng Chuguang, Jia Xiaohong, et al. Study on mercury speciation in pulverized coal fired flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 185-188(in Chinese).
- [12] 刘迎晖, 郑楚光, 游小清, 等. 燃煤过程中易挥发有毒痕量元素的相互作用[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(4): 243-247.
Liu Yinghui, Zheng Chuguang, You Xiaoqing, et al. Interaction

- between most volatile toxic trace elements during coal combustion [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(4): 243-247(in Chinese).
- [13] 吕建焱, 李定凯. 不同条件对煤粉燃烧后PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁排放影响的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(20): 103-107.
Lü Jianyi, Li Dingkai. Experimental study on PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ emission features influenced by different conditions in pulverized coal combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(20): 103-107(in Chinese).
- [14] Chen Yuanzhi, Shah N, Huggins F E, et al. Investigation of primary fine particulate matter from coal combustion by computer- controlled scanning electron microscopy[J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85(6/7): 743-761.
- [15] Cenni R, Frandsen F, Gerhardt T, et al. Study on trace metal partitioning in pulverized combustion of bituminous coal and dry sewage sludge[J]. *Waste Management*, 1998, 18: 433-444.
- [16] Vassileva S V, Eskenazy G M, Vassileva C G. Behavior of elements and minerals during preparation and combustion of the Pernik coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 72(2): 103-129.

收稿日期: 2007-01-11。

作者简介:

吕建焱(1972—), 男, 博士, 讲师, 从事煤的清洁燃烧及大气污染控制方向的研究, lujianyi@tsinghua.org.cn;

李定凯(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 从事煤的清洁燃烧和生物质利用的研究。

(编辑 王庆霞)