

# 混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响

周科, 徐明厚\*, 于敦喜, 温昶, 占中华, 姚洪

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074

\* 联系人, E-mail: mhxu@hust.edu.cn

2009-10-10 收稿, 2010-02-09 接受

国家自然科学基金资助项目(50720145604, 50721005, 50706013)

**摘要** 燃煤过程中产生的细微颗粒物, 因严重威胁到人类的健康, 其生成和控制受到越来越多的关注. 混煤燃烧被认为是一种可有效减少电厂燃煤过程中细微颗粒物生成的控制手段. 将具有不同矿物组成的褐煤和烟煤进行不同混合比例(9:1, 7:3, 5:5, 3:7, 1:9)和不同燃烧气氛下( $O_2/N_2$  和  $O_2/CO_2$ )的沉降炉燃烧实验, 通过对其燃烧生成的颗粒物进行质量粒径分布、生成浓度、元素组成和形貌成分等分析, 研究了不同燃烧气氛下混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响. 煤粉燃烧生成的颗粒物由具有 13 级粒径分级功能的低压撞击器(LPI)进行收集. 研究表明, 两种实验煤粉混合燃烧后,  $PM_{10}$  的生成相比于通过两种单一煤种加权平均得到的计算值有不同程度的减少, 说明来自不同煤种的矿物之间的交互作用抑制了燃煤过程中  $PM_{10}$  的生成. 煤粉混合比例对  $PM_{10}$  生成的抑制程度有重要影响, 在本实验研究中, 当褐煤与烟煤的混合质量比为 7:3 时,  $PM_{10}$  的生成所受抑制程度最大.  $O_2/CO_2$  气氛对混煤燃烧过程细微颗粒物的生成特性有影响, 相比于  $O_2/N_2$  燃烧气氛,  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下, 混煤燃烧后矿物交互作用减弱,  $PM_{10}$  的生成所受抑制程度下降. 与计算值相比, 混煤燃烧后  $PM_{10}$  中的 Ca, Fe 元素生成浓度和质量百分数均减少, 而  $PM_{10+}$  中 Ca, Fe, Si, Al 元素生成浓度增多, 烟煤中所含的大量硅铝酸盐与褐煤燃烧过程中生成的含 Ca, Fe 等细颗粒物的交互作用是混煤后  $PM_{10}$  生成减少的主要途径.

## 关键词

煤燃烧  
混煤  
颗粒物  
 $O_2/CO_2$  燃烧  
交互作用

电厂燃煤过程中, 可吸入颗粒物, 尤其是富含有毒痕量重金属元素的亚微米颗粒物( $PM_{10}$ )的排放, 不仅会造成锅炉的沾污和腐蚀, 影响锅炉的安全运行和换热效率, 还会给人体健康及生态环境带来严重的危害<sup>[1,2]</sup>, 因此越来越多的学者开始关注燃煤颗粒物生成和排放控制的研究. 多年的研究发现, 燃煤颗粒物的生成机理主要包括: (1) 矿物质气化凝结<sup>[3,4]</sup>; (2) 外在矿破碎<sup>[5]</sup>; (3) 内在矿聚合<sup>[6-8]</sup>; (4) 焦炭破碎<sup>[9,10]</sup>; 等. 矿物质的气化凝结是燃煤过程中  $PM_{10}$  的主要形成机理.  $PM_{10}$  的生成主要受煤种、燃烧温度、气氛等的影响<sup>[11,12]</sup>. Buhre 与 Hinkley 的研究发现, 与高阶煤相比, 低阶煤燃烧过程中生成的  $PM_{10}$  更多<sup>[11]</sup>. Quann 与 Sarofim 的实验结果则表明, 提高燃

烧温度和增强还原性气氛能促进煤粉燃烧过程中  $PM_{10}$  的生成<sup>[12]</sup>.

目前, 燃煤颗粒物排放的控制主要可分为炉前控制、炉内控制和炉后控制. 炉前控制主要指改善输入煤质的特性, 如采用浮选法去除煤中的部分矿物<sup>[13]</sup>、采取添加剂燃烧<sup>[14]</sup>等; 炉内控制主要指优化煤粉在炉内的燃烧条件, 如改变燃烧气氛<sup>[15]</sup>或燃烧温度<sup>[16]</sup>等; 炉后控制主要指燃煤颗粒物生成后, 通过颗粒团聚、吸附等方法<sup>[17-19]</sup>, 使小颗粒转化成大颗粒, 从而提高静电除尘器的除尘效率, 减少其向大气的排放. 但由于以上技术受到可行性和经济性的影响, 大多只在实验室规模上开展, 在工业上鲜有应用. 目前, 随着电厂煤炭资源的日益紧张, 大多数电厂使用

英文版见: Zhou K, Xu M H, Yu D X, et al. The effects of coal blending on the formation and properties of particulate matter during combustion. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3250-0

的煤种已偏离电厂锅炉的设计煤种,为稳定炉膛火焰燃烧,混配煤得到了广泛的应用.近来的研究表明<sup>[20-22]</sup>,通过适当的混煤手段,可以使煤粉燃烧过程中生成的小颗粒在炉内转化为粗颗粒,从而有效地减少细微颗粒物的生成.对于不同的混煤方式,其细微颗粒物生成减少的机理也不同. $O_2/CO_2$ 燃烧本用于燃煤电厂减少 $CO_2$ 排放的先进燃烧技术,Suriyawong等人<sup>[23]</sup>和Sheng等人<sup>[24]</sup>的研究表明,与传统的空气燃烧相比, $O_2/CO_2$ 燃烧也能有效减少颗粒物的生成.因此, $O_2/CO_2$ 燃烧也被认为是一项减小燃煤细微颗粒物排放的新途径.尽管如此,无论是关于配煤燃烧减少细微颗粒物的生成,还是 $O_2/CO_2$ 减少细微颗粒物的生成,对其控制机理的研究还比较缺乏,尤其是将混煤燃烧和 $O_2/CO_2$ 燃烧两种方式结合起来会对细微颗粒物的生成产生什么样的影响,更是无从得知,还有待更全面、深入的研究.

本文将具有不同矿物组成的褐煤和烟煤进行不同混合比例和不同燃烧气氛下的沉降炉燃烧实验,通过对其燃烧生成的颗粒物进行质量粒径分布、生成浓度、元素组成和形貌成分等分析,研究了 $O_2/N_2$ 和 $O_2/CO_2$ 气氛下混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响.

## 1 实验

(i) 实验煤种. 实验采用小龙潭褐煤(XLT)和大同烟煤(DT)混合燃烧,煤粉粒径小于 $200\ \mu\text{m}$ .工业、元素分析以及低温灰成分分析见表1.两种煤粉的灰成分有较大差异,小龙潭褐煤的低温灰主要以元素S, Ca和Fe为主,而大同褐煤则主要以元素Si, Al和S为主.混合比例分别是小龙潭与大同质量比9:1, 7:3, 1:1, 3:7和1:9.为确保煤粉混合均匀,对混合后煤粉进行了低温灰成分分析,分析结果表明,混煤的低温灰成分数据基本与其对应计算值相符,说明煤粉混合均匀.

(ii) 实验装置与实验工况. 燃烧实验在华中科技大学煤燃烧国家重点实验室高温沉降炉(DTF)系统中进行,实验系统详见文献<sup>[25]</sup>,煤粉和一次风通过微量给粉器进入炉膛,在炉膛内与二次风发生完全燃烧反应,煤粉颗粒在炉内的停留时间约为2 s.煤粉燃烧后产生的颗粒物随烟气进入水冷采样管, $N_2$ 淬冷口布置在靠近水冷采样管端部的位置,及时冷却从炉膛出来的颗粒物,防止颗粒物在取样管中发生二次反应.从取样管出来的颗粒物经过旋风分离器

表1 煤粉工业、元素分析和低温灰成分分析<sup>a)</sup>

煤种	XLT	DT
工业分析 (% , 空干基)		
水分	15.5	1.8
挥发分	45.8	27.8
灰分	15.6	26.6
固定碳	23.1	43.8
元素分析 (% , 空干基)		
C	44.2	55.0
H	5.7	3.3
S	1.2	0.9
N	3.2	1.6
O (计算值)	14.6	10.8
低温灰成分分析 (%)		
$Na_2O$	2.0	0.1
$MgO$	2.8	0.3
$Al_2O_3$	10.0	33.7
$SiO_2$	14.2	42.8
$P_2O_5$	0.8	0.3
$SO_3$	43.1	18.0
$K_2O$	0.4	0.1
$CaO$	20.5	0.9
$MnO$	0.0	0.1
$Fe_2O_3$	6.2	3.7

a) 表内%为质量分数,下同

去除空气动力学直径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,最后进入LPI进行13级粒径分级,其空气动力学直径分别是0.0281, 0.0565, 0.0944, 0.154, 0.258, 0.377, 0.605, 0.936, 1.58, 2.36, 3.95, 6.6和 $9.8\ \mu\text{m}$ .为确保实验的精确性,实验中颗粒物样品收集3次以上.为研究 $O_2/N_2$ 和 $O_2/CO_2$ 气氛对混煤燃烧颗粒物生成特性的影响,实验气氛分别采用 $O_2$ 浓度为20%的 $O_2/N_2$ 和 $O_2/CO_2$ 气氛,实验燃烧温度 $1300\ ^\circ\text{C}$ ,给粉速率 $0.3\ \text{g}/\text{min}$ .

(iii) 样品分析. 颗粒物质量粒径分布通过Sartorius M2P型百万分之一天平称量获得. DLPI各级颗粒物的元素组成采用X射线荧光能谱仪进行分析,分析的元素包括主要的成灰元素如Si, Al, Mg, Ca, Fe, Na, K, S, Mn, P等,收集颗粒物的膜片为Whatman公司生产的聚碳酸酯(PC)膜.颗粒物的形貌和成分采用配有能谱(EDS)的Fei Sirion 200场扫描电子显微镜(FESEM)进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 混烧前单一原煤燃烧颗粒物生成特性

图1(a)~(d)分别给出了小龙潭和大同煤粉在 $O_2/N_2$ 和 $O_2/CO_2$ 气氛下燃烧生成的颗粒物质量粒径分布(a),排放浓度(b), $PM_{10}$ (c)和 $PM_{1-10}$ (d)元素组成.

如图 1(a)所示,不同煤种不同燃烧气氛生成的颗粒物呈三模态分布,细模态峰值粒径在 0.1~0.3  $\mu\text{m}$  附近,主要由矿物质气化凝结形成;粗模态峰值粒径为 10  $\mu\text{m}$  或大于 10  $\mu\text{m}$  附近,主要由燃煤过程中外在矿破碎以及内在矿的聚合而成;中间模态峰值粒径在 2  $\mu\text{m}$  附近,已有的研究表明,易气化元素在已有细微颗粒物上的异相凝结以及煤焦的微破碎可能是中间模态的主要生成机理<sup>[3,10]</sup>. 通过图 1(a)还可以发现,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下细模态颗粒物的峰值粒径较  $\text{O}_2/\text{N}_2$  气氛下细模态颗粒物的峰值粒径小,这与 Suriyawong 等人<sup>[23]</sup>和 Sheng 等人<sup>[24]</sup>的研究结果相似,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧条件下,颗粒表面的燃烧温度降低,造成细模态颗粒物成核时间缩短,因而生成的颗粒物粒径减小<sup>[23]</sup>. 但也有研究表明<sup>[26]</sup>,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下细模态颗粒物的峰值粒径并非一定比  $\text{O}_2/\text{N}_2$  气氛下细模态颗粒物的峰值粒径小,这与煤中矿物组成,尤其是易气化元素的种类和存在形式有一定关系.

如图 1(b)所示,不同煤种生成的颗粒物浓度不同,小龙潭褐煤较大同烟煤更容易生成  $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_{1-10}$ ,这主要与煤中矿物组成相关,小龙潭褐煤是低阶煤,很多元素都是以有机态或碳酸盐结合态的形式存在,容易在燃烧过程中发生气化和破碎,因而生成的颗粒物多,而大同烟煤为高阶煤,大部分元素以硅铝酸盐结合态的形式存在,相对较难气化和发生破碎,所以颗粒物生成相对较少. 从图 1(b)中还可以看出,相比于  $\text{O}_2/\text{N}_2$  气氛,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下  $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_{1-10}$  的生成浓度减少,由于该实验在电加热沉降炉中进行,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2/\text{N}_2$  条件下燃烧气体的温度都相同,所以  $\text{N}_2$  与  $\text{CO}_2$  比热容的差别对矿物颗粒表面的燃烧温度几乎无影响,但由于  $\text{O}_2$  在  $\text{CO}_2$  中的扩散速率小于  $\text{O}_2$  在  $\text{N}_2$  中的扩散速率,而  $\text{O}_2$  向颗粒表面的扩散速率又直接影响着矿物颗粒表面的燃烧温度,因此  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  条件下颗粒表面的燃烧温度仍低于  $\text{O}_2/\text{N}_2$  条件下矿物颗粒表面的燃烧温度<sup>[23]</sup>. Bejarano 等人<sup>[27]</sup>曾用实验的

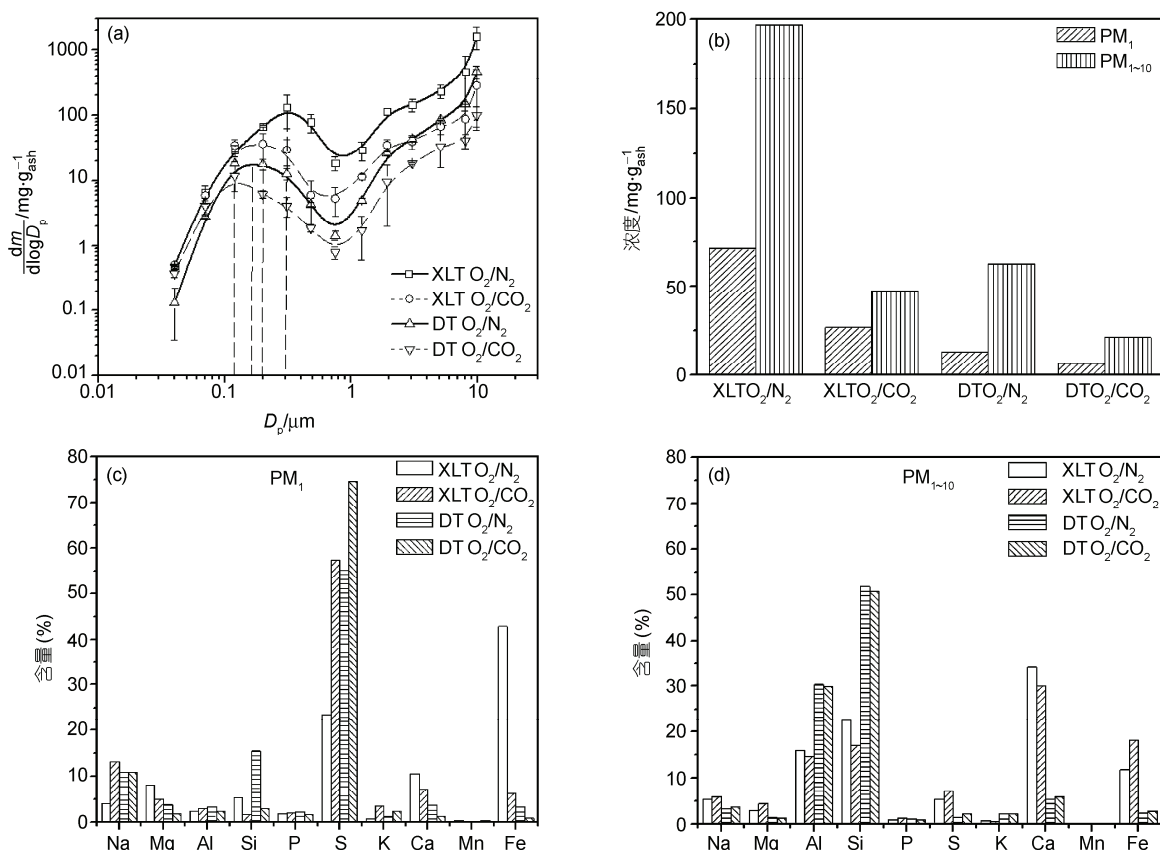


图 1 单一原煤燃烧颗粒物生成特性

(a) 质量粒径分布; (b) 生成浓度; (c)  $\text{PM}_1$  元素组成; (d)  $\text{PM}_{1-10}$  元素组成

方法测得在电加热沉降炉燃烧条件下,  $O_2/CO_2$  气氛下煤焦颗粒表面的燃烧温度比  $O_2/N_2$  气氛低 200 K 左右. 因此  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下, 矿物的气化和破碎减弱,  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  的生成浓度减少.

如图 1(c)~(d)所示, 不同煤种和不同燃烧气氛对生成颗粒物的元素组成不同. 在  $O_2/N_2$  气氛下, 小龙潭煤生成的  $PM_1$  主要以 Fe, Ca, S 为主, 这一方面与元素 Fe, Ca, S 在煤中的含量高有关, 同时也是由于小龙潭褐煤中元素 Fe, Ca 大量以有机态或碳酸盐形式的存在, 易发生气化和破碎. 虽然元素 Fe 在  $PM_1$  中大量存在并不常见, 且与煤种相关, 但类似的实验结果也在 Linak 等人<sup>[28]</sup>研究褐煤燃烧生成颗粒物的实验中出现过. 大同煤生成的  $PM_1$  则主要以 Na, Si, S 为主. 在  $O_2/CO_2$  气氛下, 小龙潭生成的  $PM_1$  中元素 Fe 的百分含量迅速减少, 说明颗粒表面温度降低对元素 Fe 的气化影响较大. 小龙潭煤生成的  $PM_{1-10}$  主要以元素 Fe, Ca, Si, Al 为主, 大同煤生成的  $PM_{1-10}$  则主要以元素 Si, Al 为主,  $O_2/CO_2$  对  $PM_{1-10}$  的元素组成影响较小.

## 2.2 混烧后颗粒物的生成特性

由前面的实验结果已知, 不同煤种由于矿物组成不同, 所生成的颗粒物的浓度和元素组成有较大的差异. 为研究混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响, 本文将混煤燃烧生成的颗粒物质量粒径分布、生成浓度、元素组成的实验值(Exp.)与通过混合比例进行加权平均得出的计算值(Cal.)进行比较. 混煤燃烧后各计算值的可由式(1)获得:

$$\text{计算值} = \text{小龙潭煤实验值} \times \text{小龙潭煤百分含量} + \text{大同煤实验值} \times \text{大同煤百分含量} \quad (1)$$

(i) 质量粒径分布. 不同混合比例燃烧后生成颗粒物的质量粒径分布如图 2 所示, 图中将实验得到的颗粒物的质量粒径分布曲线同加权平均计算得出的质量粒径分布曲线进行的比较. 可以看出, 混煤燃烧后实验得到的质量粒径分布曲线基本上都低于加权平均计算所得出的质量粒径分布曲线, 尤其在  $1 \mu m$  范围内, 说明相比于计算值, 混煤燃烧后颗粒物, 尤其是亚微米颗粒物的生成有所减少, 不同煤种之间矿物的相互作用影响了颗粒物的生成. 从图 2 还可以看出, 混煤燃烧后生成的颗粒物仍呈三模态分布,  $O_2/CO_2$  气氛下, 细模态的峰值粒径仍较  $O_2/N_2$  燃

烧气氛下小. 说明混煤燃烧对颗粒物生成的气化凝结、破碎等基本机理并无本质改变. 通过对比图 2 中不同混合比例和不同燃烧气氛下实验得出的质量粒径分布曲线和理论质量粒径分布曲线之间的差异, 还可以看出混煤比例和燃烧气氛对颗粒物的减小幅度有一定的影响, 将在下文作进一步研究.

(ii) 生成浓度. 不同混合比例下燃煤颗粒物的生成浓度如图 3 所示. 图 3(a)表示  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下不同混合比例的燃煤颗粒物浓度; 图 3(b)表示  $O_2/N_2$  燃烧气氛下不同混合比例的燃煤颗粒物浓度. 从图 3 中看出, 相比于计算值, 混煤后生成的 PM 都有一定程度的降低. 由前面单一煤种所生成的颗粒物的生成浓度和元素组成可以得知, 小龙潭褐煤较大同烟煤对  $PM_1$  和  $PM_{1-10}$  有更大的贡献, 小龙潭褐煤生成的  $PM_1$  中主要以 Fe, Ca, S 为主, 而大同烟煤生成的  $PM_{1-10}$  中主要以 Si, Al 为主. 因此本文推测, 小龙潭褐煤和大同烟煤混烧后, 小龙潭煤燃烧生成的易气化元素 Fe, Ca, S 等将与大同煤中的硅铝酸盐发生反应, 从而减少易气化元素 Fe, Ca, S 等向  $PM_1$  的转化, 使得  $PM_1$  生成减少. 为研究混合比例对颗粒物生成特性的影响, 图 4 给出了  $O_2/N_2$  和  $O_2/CO_2$  燃烧气氛不同混合比例下  $PM_1$  相对于计算值所减少的百分量. 从图中可以看出, 随着大同煤所占混煤质量百分比的升高,  $PM_1$  减少量呈一先增加后减少的趋势. 在本实验研究中, 当大同煤所占混煤质量百分比为 30% 时, 不论是  $O_2/N_2$  还是  $O_2/CO_2$  燃烧气氛,  $PM_1$  减少量都达到最大值. 随着大同煤所占混煤质量百分比的增加, 小龙潭褐煤生成的易气化元素 Fe, Ca, S 等逐渐减少, 而大同烟煤燃烧生成的硅铝酸盐则逐渐增多, 当混煤燃烧后生成的易气化元素和硅铝酸盐之间的比例刚好等于它们之间反应的化学当量比时, 混煤燃烧对  $PM_1$  减少效率达到最高, 在本研究中, 大同煤所占混煤质量百分比为 30% 时可能就是最接近反应化学当量比的这一点.

从图 4 还可以看出, 在相同混合比例燃烧条件下, 与  $O_2/N_2$  燃烧气氛相比,  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下混煤燃烧对  $PM_1$  减少量更小, 这主要是由于  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下矿物颗粒的燃烧温度更低, 一方面气化元素生成减少导致气化元素与硅铝酸盐的作用减弱, 另一方面由于温度降低导致易气化元素与硅铝酸盐的化学作用减弱, 因此有  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下混煤燃烧对  $PM_1$  减少量更小的结论.

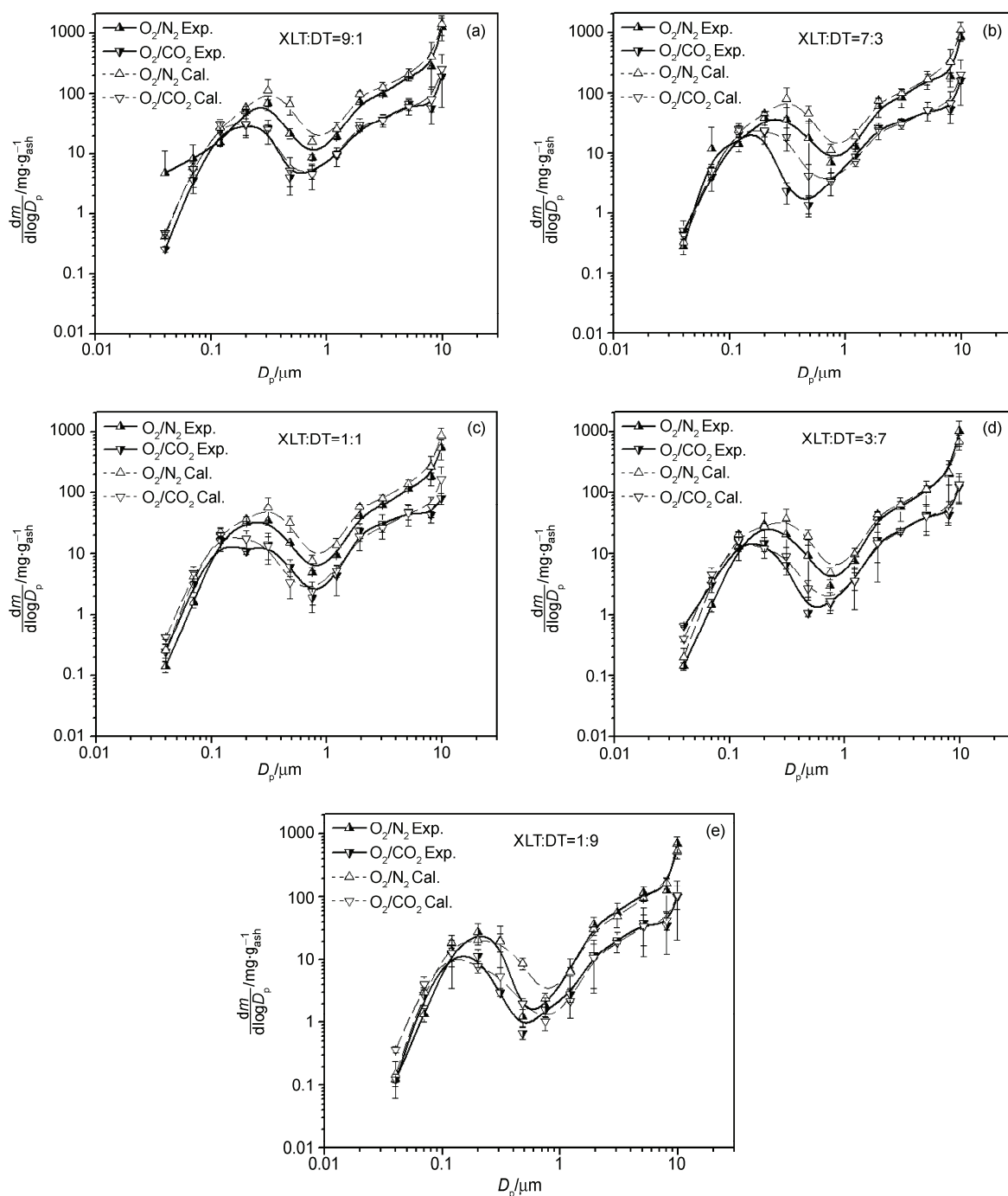


图2 不同混合比例燃烧后生成颗粒物的质量粒径分布  
(a) 混配比 9:1; (b) 混配比 7:3; (c) 混配比 1:1; (d) 混配比 3:7; (e) 混配比 1:9

(iii) 元素组成. 前文根据单一原煤颗粒物的生成特性推测出, 混煤后  $PM_{10}$  生成减少的原因是燃烧氧气过程中小龙潭褐煤易气化元素与大同烟煤硅铝酸盐之间相互作用的结果. 为对这一推测进行验证,

图5和6分别给出了  $O_2/N_2$  燃烧气氛下混煤比为 7:3 以及 3:7 时  $PM_{10}$  和  $PM_{1-10}$  的元素组成和部分典型元素 (Al, Si, Ca, Fe) 的生成浓度, 就实验值与根据混合比例进行加权平均得出的计算值进行比较分析.

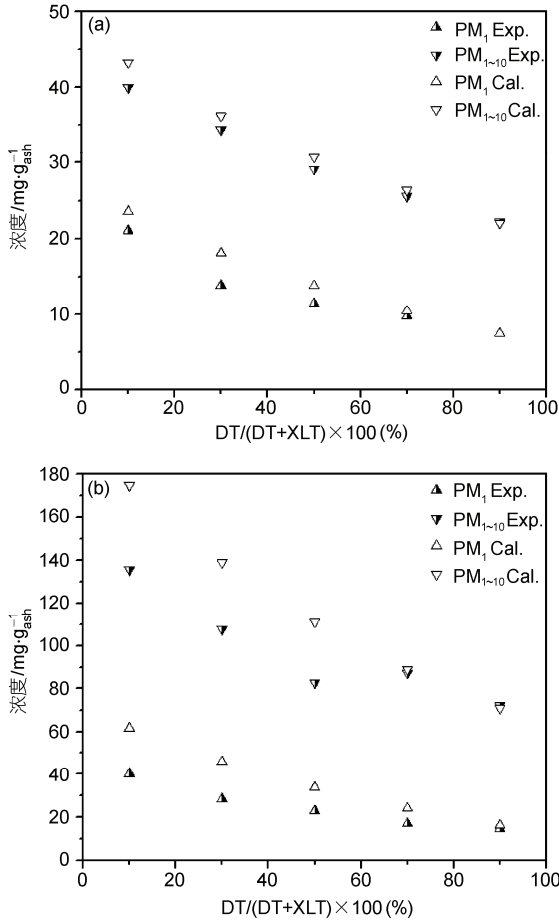


图3 不同混煤比例下燃烧生成的颗粒物浓度  
(a) O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃烧气氛; (b) O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 燃烧气氛

如图5所示,混煤燃烧后,PM<sub>1</sub>中Ca,Fe的百分含量减少,尤其是元素Fe的百分含量有较大程度的降低,

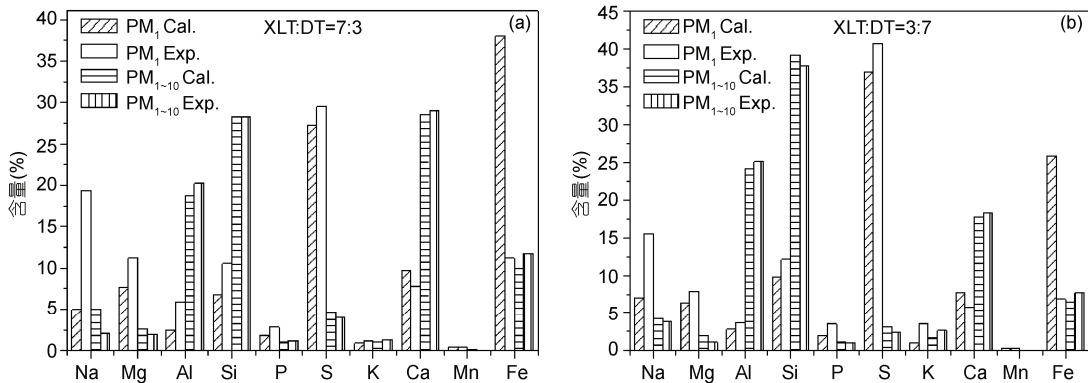


图5 混煤燃烧后PM<sub>1</sub>和PM<sub>1-10</sub>的元素组成  
(a) 混配比7:3; (b) 混配比3:7

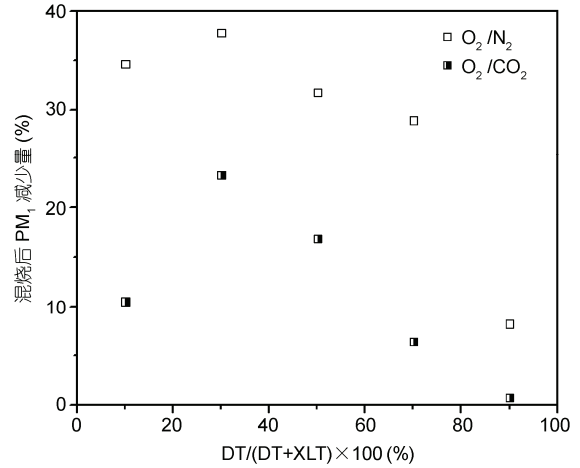


图4 不同混煤比例和燃烧气氛下PM<sub>1</sub>的减少比例

其他元素的百分含量均增加. 根据图6,混煤燃烧后PM<sub>1</sub>中Ca,Fe的生成浓度显著下降,而Al,Si则无明显变化.PM<sub>1-10</sub>中元素生成浓度的变化与混煤比有关,当混煤比为7:3时,元素Al,Si,Ca,Fe的生成浓度显著下降,但当混煤比为3:7时,变化并不明显.因此说明,混煤燃烧后特定元素在颗粒物中减小程度也与混煤比相关.对比图5(a)与(b),或图6(a)与(b)可以发现,当混煤比为7:3时,元素Ca,Fe在PM<sub>1</sub>和PM<sub>1-10</sub>中的减少程度都高于混煤比为3:7时的数值.结合图5(a)与6(a)分析得知,与计算值相比,混煤燃烧后元素Ca,Fe在PM<sub>1</sub>中的浓度和百分含量显著下降,在PM<sub>1-10</sub>中的浓度降低,且Al,Si在PM<sub>10</sub>中的总量也有降低,所以可知混煤燃烧后元素Al,Si,Ca,Fe在PM<sub>10+</sub>中的浓度增加,这说明部分元素Al,Si,Ca,Fe在

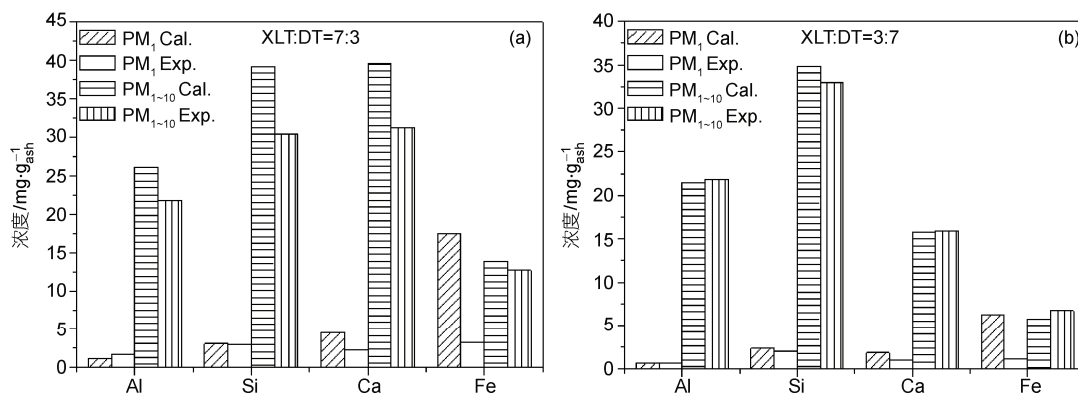


图6 PM<sub>1</sub>和PM<sub>1-10</sub>中典型元素(Al, Si, Ca, Fe)的生成浓度  
(a) 混配比 7:3; (b) 混配比 3:7

混煤燃烧后发生相互作用,从而生成了新的粗颗粒(PM<sub>10+</sub>),这同时也进一步验证了易气化元素Ca, Fe与硅铝酸盐的作用,使得细微颗粒物的生成减少。

为深入研究混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响,本文还对混煤燃烧后颗粒物的微观形貌及成分进行了分析.图7给出了O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>燃烧气氛下混煤比为7:3时LPI第11级所收集到颗粒物的微观形貌.如图所示,所收集到的颗粒物大多呈球状,通常是在表面张力的作用下矿物熔融在煤焦表面形成的<sup>[29]</sup>,除此之外还发现,大量不规则的细微颗粒物附着在球形粗颗粒物的表面,这大多是由于源自不同生成机理的颗粒在冷却过程中的相互作用造成的,其中,气态元素在冷却过程中向已生成颗粒的异相冷凝就是其中的主要作用形式之一.通过能谱(EDS)对这些附着有不规则细颗粒的颗粒物进行分析,分析结果显示,各元素所占该颗粒物的摩尔分数分别为Al 11.1%, Si 8.3%, Ca 7.5%, Fe 21.4%, Mg 3.0%和O 48.7%,为硅铝酸盐与

元素Ca, Fe的结合物,因此本文分析得出,在混煤燃烧过程中,正是存在这种易气化元素与硅铝酸盐之间的物理化学作用增强,使更多的易气化元素转化为了粗颗粒物,从而减少了细微颗粒物的生成。

### 3 结论

将具有不同矿物组成的褐煤和烟煤进行不同混合比例和不同燃烧气氛下的沉降炉燃烧实验,通过对其燃烧生成的颗粒物进行质量粒径分布、生成浓度、元素组成等分析,研究了不同燃烧气氛下混煤燃烧对颗粒物生成特性的影响.研究结果表明:

- (1) 小龙潭褐煤在燃烧过程中较大同烟煤更易生成PM<sub>1</sub>和PM<sub>1-10</sub>.
- (2) 混煤燃烧过程中,褐煤和烟煤中矿物的交互作用抑制了PM<sub>1</sub>的生成.
- (3) 煤粉混合比例对PM<sub>1</sub>生成的抑制程度有重要影响,在本实验研究中,当褐煤与烟煤的混合比为

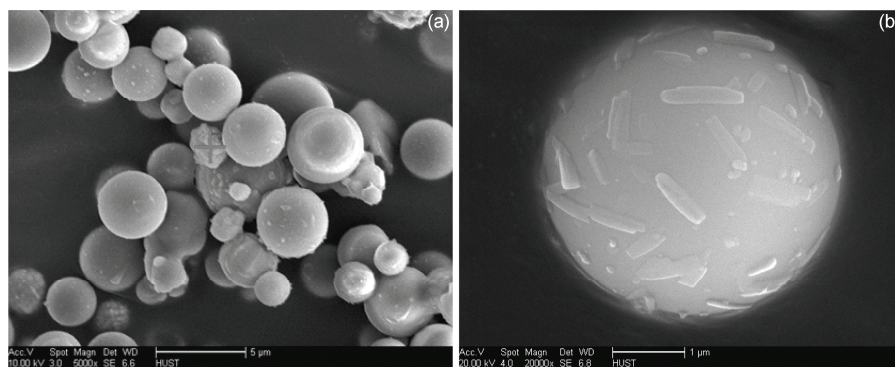


图7 混煤燃烧后颗粒物的微观形貌

7:3 时,  $PM_{10}$  的生成所受抑制程度最大。

(4)  $O_2/CO_2$  气氛对混煤燃烧过程中颗粒物的生成特性有影响, 相比于  $O_2/N_2$  燃烧气氛,  $O_2/CO_2$  燃烧气氛下, 混煤燃烧后矿物交互作用减弱,  $PM_{10}$  的生成所受抑制程度下降。

(5) 与计算值相比, 混煤后  $PM_{10}$  中的 Ca, Fe 元素的浓度和质量百分数减少, 而  $PM_{10+}$  中 Ca, Fe, Si, Al 元素生成浓度增多, 烟煤中所含的大量硅铝酸盐与褐煤燃烧过程中生成的含 Ca, Fe 等细颗粒物的交互作用是混煤后  $PM_{10}$  生成减少的主要途径。

## 参考文献

- 1 Flagan R C. Submicron particles from coal combustion. *P Combust Inst*, 1979, 17: 97—104
- 2 Ninomiya Y, Zhang L, Sato A, et al. Influence of coal particle size on particulate matter emission and its chemical species produced during coal combustion. *Fuel Process Tech*, 2004, 85: 1065—1088
- 3 Buhre B J P, Hinkley J T, Gupta R P, et al. Fine ash formation during combustion of pulverised coal-coal property impacts. *Fuel*, 2006, 85: 185—193
- 4 Senior C L, Panagiotou T, Sarofim A F, et al. Formation of ultra-fine particulate matter from pulverized coal combustion. Preprints of symposia, division of fuel chemistry vol. 45(1), American Chemical Society, Washington, DC, 2000
- 5 Yan L, Gupta R P, Wall T F. Fragmentation behavior of pyrite and calcite during high-temperature processing and mathematical simulation. *Energy Fuels*, 2001, 15: 389—394
- 6 Yan L, Gupta R P, Wall T F. The implication of mineral coalescence behavior on ash formation and ash deposition during pulverized coal combustion. *Fuel*, 2001, 80: 1333—1340
- 7 Zhang L, Ninomiya Y. Emission of suspended  $PM_{10}$  from laboratory scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties. *Fuel*, 2006, 85: 194—203
- 8 Zhang L, Ito M, Sato A, et al. Combustibility of dried sewage sludge and its mineral transformation at different oxygen content in drop tube furnace. *Fuel Process Tech*, 2004, 85: 983—1011
- 9 Monroe L S. An experimental and modeling study of residual fly ash formation in combustion of a bituminous coal. Doctoral Dissertation. Cambridge: Department of Chemical Engineering. MIT, 1989
- 10 Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion. *Fuel Process Technol*, 2003, 81: 109—125
- 11 Buhre B J P, Hinkley J T, Gupta R P, et al. Submicron ash formation from coal combustion. *Fuel*, 2005, 84: 206—214
- 12 Quann R J, Sarofim A F. Vaporization of refractory oxides during pulverized coal combustion. *P Combust Inst*, 1982, 19: 1429—1440
- 13 Kramlich J C, Newton G H. Influence of coal rank and pretreatment on residual ash particle size. *Fuel Process Tech*, 1994, 37: 143—161
- 14 Yao H, Mkilaha I S N, Naruse I. Screening of sorbents and capture of lead and cadmium compounds during sewage sludge combustion. *Fuel*, 2004, 83: 1001—1007
- 15 Zhang L, Ninomiya Y, Yamashita T. Formation of submicron particulate matter ( $PM_{10}$ ) during coal combustion and influence of reaction temperature. *Fuel*, 2006, 85: 1446—1457
- 16 Wee H L, Wu H, Zhang D, et al. The effect of combustion conditions on mineral matter transformation and ash deposition in a utility boiler fired with a sub-bituminous coal. *P Combust Inst*, 2005, 30: 2981—2989
- 17 Davis S B, Gale T K, Wendt J O L. Competition for sodium and toxic metals capture on sorbents. *Aerosol Sci Tech*, 2000, 32: 142—152
- 18 Gale T K, Wendt J O L. High-temperature interactions between multiple-metals and kaolinite. *Combust Flame*, 2002, 131: 299—307
- 19 Zheng Y, Jensen P A, Jensen A D. A kinetic study of gaseous potassium capture by coal minerals in a high temperature fixed-bed reactor. *Fuel*, 2008, 87: 3304—3312
- 20 Wang Q, Zhang L, Sato A. Effects of coal blending on the reduction of  $PM_{10}$  during high-temperature combustion 1. Mineral transformations. *Fuel*, 2008, 87: 2997—3005
- 21 Wang Q, Zhang L, Sato A, et al. Reduction of  $PM_{10}$  by combustion of coal blends. In: 6th Asia-Pacific conference on combustion program of ASPACC007, Nagoya, Japan, May 2007
- 22 Wang Q, Zhang L, Sato A, et al. Effects of coal blending on the reduction of  $PM_{10}$  during high-temperature combustion. 2. A coalescence fragmentation model. *Fuel*, 2009, 88: 150—157
- 23 Suriyawong A, Gamble M, Lee M H, et al. Submicrometer particle formation and mercury speciation under  $O_2-CO_2$  coal combustion. *Energy Fuels*, 2006, 20: 2357—2363



- 24 Sheng C D, Li Y, Liu X. Ash particle formation during O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion of pulverized coals. *Fuel Process Tech*, 2007, 88: 1021—1028
- 25 Liu X, Xu M H, Yao H, et al. Effect of combustion parameters on the emission and chemical composition of particulate matter during coal combustion. *Energy Fuels*, 2007, 21: 157—162
- 26 周科, 徐明厚, 于敦喜, 等. O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>与 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>条件下燃煤颗粒物的生成特性研究. *工程热物理学报*, 2009, 30: 1063—1066
- 27 Bejarano P A, Levendis Y A. Single-coal-particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments. *Combust Flame*, 2008, 153: 270—287
- 28 Linak W P, Miller C A, Seames W S, et al. Fine and ultrafine ash apticles from pulverized coal combustion. *Trace elemental workshop 2002, Yokohama, Japan, 2002*, 39—69
- 29 Ramsden A R. A microscopic investigation into the formation of fly-ash during the combustion of a pulverized bituminous coal. *Fuel*, 1969, 48: 121—137