

阮仁晖,谭厚章,王学斌,等.高碱煤燃烧过程细颗粒物排放特性[J].煤炭学报,2017,42(4):1056-1062. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0738

Ruan Renhui, Tan Houzhang, Wang Xuebin, et al. Characteristics of fine particulate matter released from burning coal with high content of alkali and alkaline earth metal[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1056-1062. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0738

## 高碱煤燃烧过程细颗粒物排放特性

阮仁晖,谭厚章,王学斌,李艳,李帅帅,胡中发,魏博

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安 710049)

**摘要:**准东煤储量巨大,但由于其碱金属和碱土金属含量较高,准东煤燃烧时会生成更多的细颗粒物。在一维沉降炉上对新疆准东地区高碱煤、淮南低碱煤及混煤燃烧过程细颗粒物的排放特性进行了研究,对其燃烧生成的颗粒物粒径分布、生成浓度、元素组成进行了分析,获得了高碱煤中Na, K, Mg, Ca, Fe在细颗粒物中的分布及对细颗粒物生成特性的影响。结果显示:高碱煤燃烧生成的细颗粒物主要由Na, K, Mg, Ca的硫酸盐和氧化物组成;低碱煤燃烧产生的细颗粒物量明显减少;同时发现了低碱煤的掺烧有明显降低细颗粒物生成量的协同效应,Ca, Fe在混烧降低PM<sub>10</sub>过程中起到了重要作用。

**关键词:**高碱煤;碱金属;碱土金属;铁;细颗粒物;混烧

**中图分类号:**TQ534.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2017)04-1056-07

## Characteristics of fine particulate matter released from burning coal with high content of alkali and alkaline earth metal

RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, WANG Xue-bin, LI Yan, LI Shuai-shuai, HU Zhong-fa, WEI bo

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The amount of Zhundong coal is huge. The high content of alkali and alkaline earth metal (AAEM) in Zhundong coal results in more fine particulate matter during its combustion. In this paper, the emission of fine particulates from AAEM rich coal in Zhundong and AAEM poor coal in Zhunnan was investigated in a drop tube furnace. The size distribution, concentration and composition of the particulates were measured. The distribution of Na, K, Mg, Ca, Fe in fine particulates and their effects on the generation of fine particulates were obtained. The results show that the fine particulates from AAEM rich coal combustion mainly consist of sulfates and the oxides of AAEM. The amount of fine particulates from burning AAEM poor coal decreased significantly. Co-firing of AAEM rich coal with AAEM poor coal had an obviously synergistic effect of reducing the fine particulates emission. Ca and Fe played an important role in PM<sub>10</sub> reduction during blended coal combustion.

**Key words:** AAEM(alkali and alkaline earth metal) rich coal; alkali metal; alkaline metal; iron; fine particulates; co-firing

中国在未来很长一段时间内仍将以煤炭作为主要的能源消费对象。近年来在新疆准东地区发现了

特大的整装煤田,预测储量可达3 900亿t<sup>[1]</sup>,以目前中国每年煤炭的消耗速度还能够利用100 a以上,是

收稿日期:2016-06-07 修回日期:2016-08-07 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91544108, 51376147)

作者简介:阮仁晖(1993—),男,安徽合肥人,硕士研究生。E-mail: ruanrenhui@stu.xjtu.edu.cn。通讯作者:谭厚章(1965—),男,江西永新人,教授,博士生导师。Tel:029-82668703, E-mail: tanhz@mail.xjtu.edu.cn

中国未来主要的能源基地。准东煤挥发分高、灰分低、燃烧特性好,且开采成本低,被认为是良好的动力用煤。

然而大量利用煤炭会带来严重的大气污染,尤其是目前燃煤电厂对于细颗粒物的脱除效率较低,会引发雾霾等一系列环境污染问题<sup>[2]</sup>。准东煤由于碱金属含量高,燃烧时会生成更多的细颗粒物,针对准东煤燃烧过程中污染物生成与排放的控制研究对于准东煤的清洁利用具有重要意义。国内外学者对煤燃烧过程中细颗粒物的生成机理进行了大量的研究,认为亚微米颗粒物的形成与煤中无机元素的气化相关。碱金属元素在煤中主要以水溶态形式存在,在煤燃烧过程中容易气化<sup>[3]</sup>,随着烟气温度的降低,冷凝析出形成亚微米颗粒,而超微米颗粒则与煤中难熔矿物质的演变密切相关<sup>[4]</sup>。曾宪鹏<sup>[5]</sup>在空气气氛下对900,1 000,1 100,1 300 °C下准东煤燃烧颗粒物的生成特性做了研究,发现随着燃烧温度的升高,亚微米颗粒物中Ca, Mg含量增加,Na, S含量减少,Na被煤中灰分大量吸收是导致PM<sub>1</sub>减少的主要原因。Li<sup>[6]</sup>在25 kW沉降炉系统对准东煤燃烧生成的细颗粒物进行了分析,发现0.4 μm以下的颗粒物主要由Na的硫酸盐构成,随着颗粒粒径的增加,硅铝酸盐成为主要成分。Gao<sup>[7]</sup>在Hencken平面火焰燃烧器上利用热泳取样器收集准东煤燃烧生成的超细颗粒物,通过透射电镜发现Na, Si在超细颗粒物中的含量较高,认为Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>是形成细颗粒物的前驱体。目前针对准东煤燃烧细颗粒物的研究主要集中在碱金

属<sup>[8-9]</sup>,尤其是Na元素在亚微米颗粒物形成过程中的贡献。但Quaan<sup>[10]</sup>和Sarofim认为煤燃烧过程中难熔氧化物(MgO, CaO, Si<sub>2</sub>O, FeO)在还原性气氛下能够被还原为挥发性较强的次氧化物(SiO)和单质(Mg, Ca, Fe),这些次氧化物或单质挥发到气相中,也是亚微米颗粒物的前驱体之一。笔者前期研究发现<sup>[11]</sup>,准东煤灰中Ca的含量普遍偏高,在现场取样得到的锅炉受热面上分层结渣的焦体内发现了大量的CaSO<sub>4</sub>,认为SO<sub>2</sub>与气相CaO生成CaSO<sub>4</sub>的反应促使了初始结焦层的形成,然而Ca等碱土金属在准东煤燃烧细颗粒物生成过程中的作用还没有被充分研究<sup>[12]</sup>。

针对准东煤中碱金属、碱土金属含量高的特点,本文在一维沉降炉上对新疆准东地区高碱煤燃烧过程细颗粒物的排放特性进行了研究,以揭示高碱煤中Na, Mg, K, Ca, Fe在细颗粒物中的分布及对细颗粒物生成特性的影响,同时结合目前普遍采用的通过掺烧低碱煤减缓锅炉受热面沾污结焦的方法,探究少量掺烧低碱煤对高碱煤燃烧细颗粒物生成特性的影响。

## 1 实验方法

### 1.1 煤样分析

实验选取的2种原煤取自新疆某混烧准东煤和淮南煤的电厂。将2种原煤破碎并筛分到100 μm以下。煤质分析结果见表1。该准东煤的碱金属和碱土金属含量高,属高Na, Ca煤;淮南煤灰的Si, Al含量较高,分别为44.90%和17.33%,属于硅铝含量高的煤种。

表1 实验燃料和灰特性分析

Table 1 Typical properties of coal and ash used in this study

%

煤种	工业分析				元素分析					灰分组成								
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>daf</sub>	FC	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>1,ar</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
准东煤	14.36	6.28	30.86	48.5	53.83	2.38	10.61	0.47	0.33	8.02	7.68	40.69	6.6	0.65	17.38	11.32	0.55	6.07
淮南煤	8.88	15.24	36.79	39.09	56.52	3.21	10.60	0.69	0.44	9.01	17.33	13.36	5.04	0.71	44.90	6.47	1.26	1.34

### 1.2 实验过程

燃烧实验在一维沉降炉实验系统上进行,准东煤与淮南煤的混合比例分别选取10:0, 9:1, 7:3, 0:10(上述4种比例煤样在下文以ZD, 9:1, 7:3, ZN符号表示)。实验系统如图1所示,一维沉降炉高1.2 m,恒温区0.6 m,通过三段电加热维持炉膛温度,加热元件为硅碳棒。一次风、二次风均为空气,一次风通过气动微量给粉机携带煤粉从水冷给料管进入炉膛恒温区,停留时间约为3 s,过量空气系数约为2.5。煤粉燃烧后的颗粒物通过水冷取样管取样,为

防止颗粒物发生二次长大的现象,取样的同时通入一股N<sub>2</sub>淬冷并稀释烟气。从取样管出来的烟气通过PM<sub>10</sub>切割器分离空气动力学直径大于10 μm的飞灰,随后烟气进入13级DLPI进行颗粒物粒径分级。实验燃烧温度为1 300 °C,取样温度为600 °C,给粉量约为200 mg/min。为确保实验数据的可靠性,每组工况重复3次。

用涂抹阿匹松脂的铝箔片收集颗粒物。铝箔片上颗粒物的质量通过Sartorius M2P型百万分之一天平称量获得,各级膜片上颗粒物的总体元素分布通

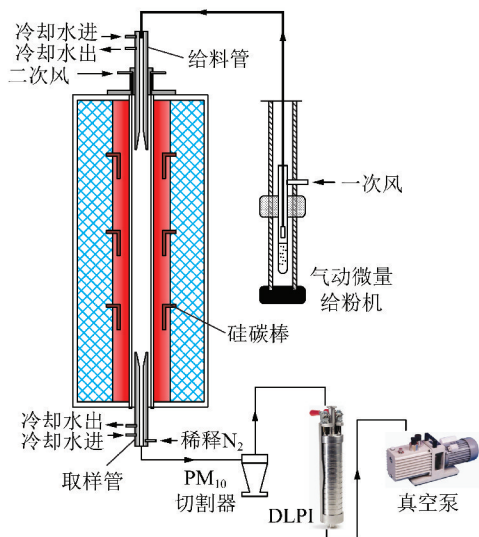


图1 一维沉降炉实验系统

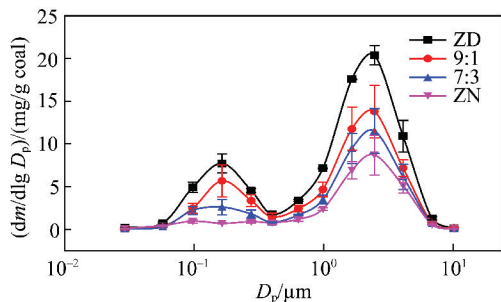
Fig. 1 System schematic diagram of the drop-tube furnace

过 SEM-EDS(日本电子株式会社 JSM-6390A) 获得, 主要分析元素包括: Na, Mg, K, Ca, Al, Si, S, Fe 等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $PM_{10}$ 粒径分布

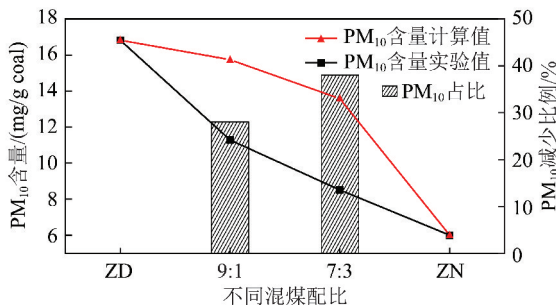
图2为两种纯煤与两种混煤燃烧生成颗粒物的粒径分布曲线。

图2 纯煤与混煤燃烧  $PM_{10}$  粒径分布曲线Fig. 2 Partial size distribution of  $PM_{10}$  from combustion of different blending coals

曲线总体上呈现双峰分布,ZD,9:1,7:3煤样的颗粒物细模态峰值位于空气动力学粒径  $0.16 \mu\text{m}$  左右,ZN的细模态峰值不明显。4条曲线粗模态峰值位于空气动力学粒径  $2.5 \mu\text{m}$  左右。单独燃烧ZD煤时生成的  $PM_{10}$  含量最高,亚微米颗粒物生成量明显高于单独燃烧ZN煤时亚微米颗粒物的生成量。亚微米颗粒物的形成主要与气化矿物质的成核凝结过程有关,前人大量的研究表明<sup>[6-7,9,13]</sup>煤中碱金属、碱土金属元素是亚微米颗粒的主要成分。推测准东煤燃烧时,煤颗粒中易气化的碱金属首先(Na,K)挥发到气相里,较难气化的碱土金属(Ca,Mg)在煤焦颗粒内部的还原性气氛下以单质或氧化物的形式释放

到煤焦表面<sup>[10-11]</sup>,同时,Fe,Si等难熔元素也会在还原性气氛下发生少量的气化。这些气相蒸气与向煤焦颗粒扩散的氧气发生反应,氧气含量降低的同时形成过饱和蒸汽,成核析出大量气溶胶<sup>[13]</sup>。这些气溶胶颗粒是亚微米颗粒物形成的主要前驱物。煤焦颗粒在挥发分释放、挥发分燃烧、焦炭颗粒燃烬过程中会发生不同程度的膨胀和破碎。单颗粒煤粉在燃烧过程中发生破碎形成数量不一的小颗粒,这些小颗粒主要形成超微米颗粒,组分与煤颗粒里矿物质成分接近。除此之外,高温下煤焦颗粒燃烬过程中矿物质熔融聚合形成的灰颗粒,也是超微米颗粒的主要来源之一<sup>[14]</sup>。有学者<sup>[6,14]</sup>认为燃煤超细颗粒物的主要成分是碱金属(尤其是Na)的氧化物和盐类(氯化物或硫酸盐),准东煤中高碱金属含量会导致微细颗粒物的含量增多。ZD煤中钠含量为  $3.3 \text{ mg/g coal}$ ,ZN煤钠含量为  $1.7 \text{ mg/g coal}$ 。ZD煤钠含量约为ZN煤钠含量的2倍,但由图2可以看出,ZD煤燃烧生成的亚微米颗粒含量比ZN煤的高许多。说明还有其他因素影响了亚微米颗粒物的形成,ZD煤中硅铝含量是ZN煤硅铝含量的6倍,硅铝组分在燃烧过程中主要形成  $PM_{10+}$ ,煤中高含量的硅铝酸盐对碱金属气溶胶有明显的吸附作用<sup>[15]</sup>,导致ZN煤亚微米颗粒物的含量明显低于ZD煤。

为了探讨混烧对  $PM_{10}$  生成的影响,本文将2种配比混烧生成的  $PM_{10}$  实验值与加权计算值(假定混烧时两种纯煤不发生相互作用的情况下颗粒物的生成浓度)作比较,结果如图3所示。

图3 不同配比混煤燃烧生成  $PM_{10}$  的实验值与加权计算值Fig. 3 Experimental and calculational amount of  $PM_{10}$ 

from combustion of different blending coals

混烧的加权计算值计算公式如下:

$$PM_{10 \text{ calculation}} = xPM_{10 \text{ ZD}} + yPM_{10 \text{ ZN}}$$

式中, $x,y$ 对应混烧时ZD煤与ZN煤质量比,文中所采用的 $x,y$ 取2组值:90%:10%,70%:30%; $PM_{10 \text{ calculation}}$ 代表  $PM_{10}$  的加权计算值; $PM_{10 \text{ ZD}}$ 和  $PM_{10 \text{ ZN}}$ 分别表示燃烧ZD和ZN煤生成的  $PM_{10}$  含量,结果如图3所示。



由图3中得到,准东煤燃烧生成的PM<sub>10</sub>含量约为17 mg/g coal,燃烧淮南煤生成的PM<sub>10</sub>含量近似是6 mg/g coal。结合表1的煤质分析可计算得到燃烧ZD煤生成的PM<sub>10</sub>占总灰分的25%,燃烧ZN煤生成的PM<sub>10</sub>占总灰分的4%,可以看出燃烧ZD煤时生成的PM<sub>10</sub>比例很高,燃烧ZN煤时生成的主要是PM<sub>10+</sub>。实验采用的两种配比混煤燃烧生成的PM<sub>10</sub>均低于计算值。配比为9:1时,混煤燃烧生成的PM<sub>10</sub>比计算值减少了28%。配比为7:3时,燃烧生成的PM<sub>10</sub>低于计算值37%。显然配比7:3时

混烧PM<sub>10</sub>排放量减少的效果比9:1明显。下文将通过电子显微镜分析颗粒物的成分,进一步探究高碱煤细颗粒物的组成和混烧减少细颗粒物排放的原因。

### 2.2 PM<sub>10</sub>组成元素的粒径分布

为了揭示高碱煤燃烧细颗粒物的生成机理,获得高碱低硅铝煤与高硅铝煤混烧减少细颗粒物含量的原因。对4种煤样燃烧得到的DLPI的13级颗粒物进行逐级成分分析,获得PM<sub>10</sub>组分的粒径分布曲线,结果如图4所示。

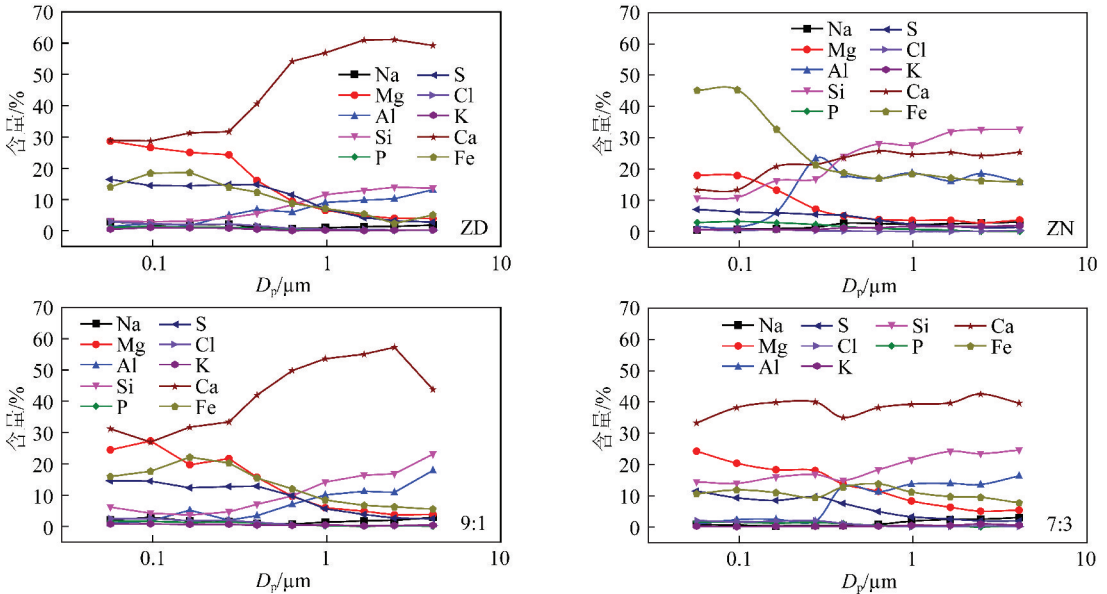


图4 不同混煤配比下DLPI各级颗粒物元素组成

Fig. 4 Element components of partial matter on DLPI stages during combustion of different blending coals

由图4可以看出,燃烧ZD煤生成的PM<sub>10</sub>以Ca, Mg, Fe, S, Si, Al为主,粒径小于0.3 μm的颗粒物中主要成分为Ca, Mg, Fe, S,且含量随粒径的变化较小,与国内学者的研究结果一致<sup>[5]</sup>。随着粒径的增加,Ca, Si, Al的含量明显增加, Mg, Fe, S的含量显著减少。表明0.3 μm为ZD煤颗粒物的组分发生变化的临界粒径。燃烧ZN煤生成的颗粒物在粒径小于0.1 μm范围内以Ca, Mg, Fe, Si为主,随着粒径的增加,Ca, Si, Al的含量明显增加, Mg, Fe含量明显降低,表明0.1 μm为ZN煤颗粒物组分发生变化的临界粒径。在ZN煤燃烧产生的微细颗粒物中,粒径小于0.1 μm的颗粒Fe含量接近50%,一般认为煤粉燃烧时Fe在还原性气氛下被还原为易气化形式或黄铁矿在高温分解作用下释放铁蒸汽,挥发到气相中成核凝结形成细颗粒物<sup>[6,10]</sup>。混煤配比为9:1时燃煤颗粒物主要元素的含量与变化趋势跟燃烧ZD煤时接近,表明9:1比例下ZN煤添加比例较少,交互作用不明显,对PM<sub>10</sub>组分的影响较小。配比为7:3时,颗

粒物的组分和随粒径的变化与两种纯煤有较大的区别,主要组成元素Ca, Mg, Fe, S, Si随粒径的变化幅度变小,不同粒径颗粒物的元素组成与含量比较接近。大量研究表明,混烧时不同煤种之间的燃烧产物发生相互反应,可以起到改变细颗粒物生成特性的效果<sup>[15-16]</sup>。图4中配比为7:3时颗粒物元素组成随粒径的变化关系相比于纯煤发生了较大的改变,这种现象表明ZD煤和ZN煤中矿物组分发生了明显的交互作用。

煤燃烧过程中,亚微米颗粒物主要通过元素的气化挥发再凝结析出而形成,煤中的碱金属、碱土金属属于挥发性、半挥发性元素<sup>[5,11,14]</sup>,这些元素在形成微细颗粒物的过程中容易与S, Cl发生反应生成相应的硫酸盐和氯化物<sup>[6]</sup>。图5给出了4种煤样DLPI第2~11级膜片上颗粒物中(2Ca+2Mg+Na+K)与(2S+Cl)的摩尔比随粒径的变化曲线,比较两者的差别,可以推测在微细颗粒物中碱金属、碱土金属以硫酸盐、氯化物存在的比例。4条曲线的变化趋势基

本一致,在  $0.4 \mu\text{m}$  以下摩尔比变化较小;在  $0.4 \mu\text{m}$  以上,摩尔比随着粒径的增加而上升。 $\text{Li}^{[6]}$  对一种准东褐煤燃烧生成的细颗粒物进行了分析,发现  $0.4 \mu\text{m}$  为  $(2\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Na}+\text{K})/(2\text{S}+\text{Cl})$  摩尔比的转折点。本文同样发现 4 种煤样的元素摩尔比均在  $0.4 \mu\text{m}$  左右发生转折,但在粒径小于  $0.4 \mu\text{m}$  的颗粒物中,该摩尔比介于 3 ~ 6,  $\text{Li}^{[6]}$  得到的结果位于 1 附近,这表明实验中颗粒物的成分中碱金属与碱土金属的硫酸盐和氯化物只占到总量的  $1/3 \sim 1/6$ 。由表 1 的灰成分分析中可以看到,ZD 煤和 ZN 煤的 S 含量相对于 Ca, Mg, Na, K 的含量低很多,不足以将所有碱金属和碱土金属硫化。ZD 煤灰中 S 含量约是 ZN 煤灰中 S 含量的 2 倍,图 5 中粒径小于  $0.4 \mu\text{m}$  时,ZD 煤中元素摩尔比接近 3,ZN 煤中元素摩尔比曲线接近 6,ZD 煤粒径低于  $0.4 \mu\text{m}$  的颗粒物中以硫酸盐形式存在的 Ca, Mg, Na, K 比例较高。

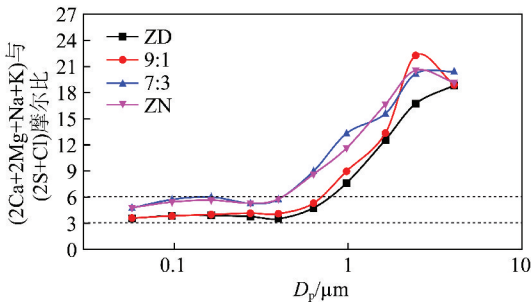


图 5  $(2\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Na}+\text{K})/(2\text{S}+\text{Cl})$  摩尔比的粒径分布曲线

Fig. 5 Size distribution of the  $(2\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Na}+\text{K})/(2\text{S}+\text{Cl})$  molar ratio

在实验的 EDS 面扫描结果中,阴离子中只有 O, S, Cl, 由图 5 可以看出,亚微米颗粒中碱金属、碱土金属只有  $1/3 \sim 1/6$  以硫酸盐与氯化物形式存在,剩下的金属元素 (Ca, Mg, Na, K, Fe, Si, Al) 主要以氧化物的形式存在。

图 6 给出了配比为 7 : 3 时  $\text{PM}_{10}$  中碱金属、碱土金属和 Fe 含量的实验值与加权计算值的粒径分布曲线。亚微米颗粒中,5 种主要组成元素的实验值明显低于加权计算值。结合表 2 配比 7 : 3 时燃煤细颗粒物 ( $\text{PM}_1, \text{PM}_{1-10}, \text{PM}_{10}$ ) 的各组成元素的绝对生成量 ( $\mu\text{g}/\text{g coal}$ ) 的实验值与加权计算值,发现 7 : 3 配比混烧时,亚微米中的 Na, Mg, K, Ca, Fe, S, Cl 含量相比计算值均降低 50% 以上, Si, Al 总量不变。混煤燃时 Na, Mg, K, Ca, Fe, S, Cl 向  $\text{PM}_{10+}$  发生转化。对混烧减少细颗粒物起到主要作用的是 ZN 煤燃烧产生的硅铝大颗粒和 ZD 煤产生的碱金属、碱土金属气溶胶。ZD 煤中丰富的碱金属、碱土金属气溶胶与 ZN 煤中丰富的硅铝大颗粒的相互作用降低了  $\text{PM}_{10}$ 。

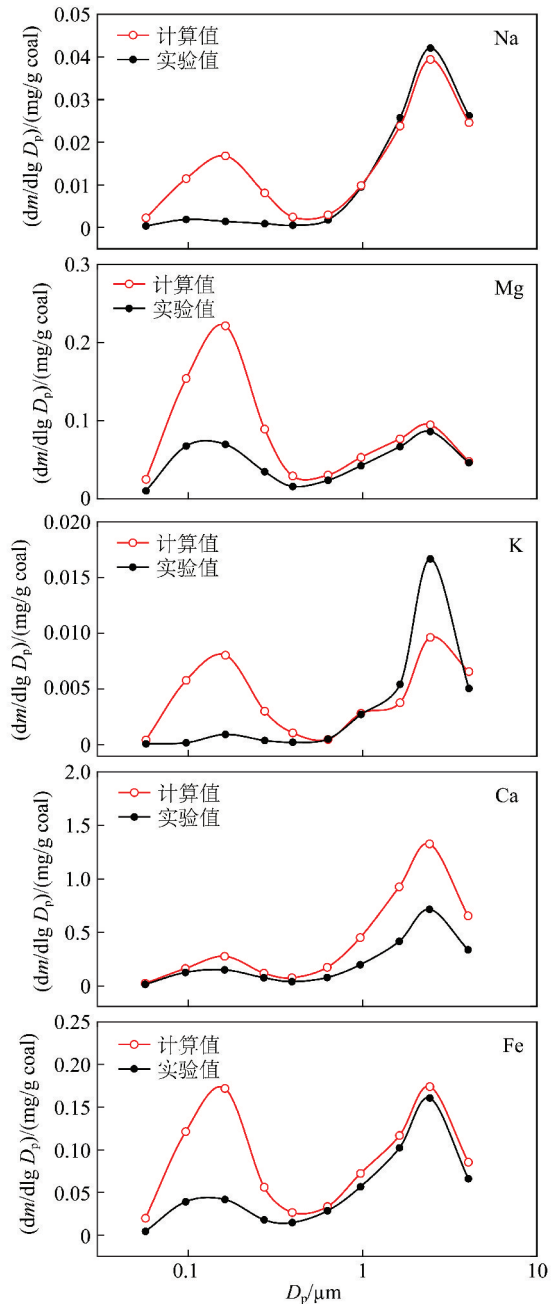


图 6 混煤配比 7 : 3 时  $\text{PM}_{10}$  主要元素的实验值与加权计算值的粒径分布

Fig. 6 Experimental and calculational amount of main elements in  $\text{PM}_{10}$  at 7 : 3 coal blend

Wang<sup>[15]</sup> 对两种不同煤种进行混烧,发现 Ca, Fe 在混烧减少  $\text{PM}_{1-10}$  的过程中起到了关键作用, Ca, Fe 能够与 Si, Al 组分形成液相物质,增加对细颗粒的捕捉和颗粒间的聚合。结合前人<sup>[15]</sup> 研究与以上元素生成量的变化,认为混烧过程中 ZD 煤产生的 Na, Mg, K 气溶胶在烟气温度降低时冷凝黏附在 ZN 产生的大量粗颗粒表面;同时 Ca, Fe 与硅铝大颗粒 ( $\text{PM}_{10+}$ ) 发生反应形成低温共融物,增加了对 ZD 煤亚微米气溶胶颗粒的捕捉,减少了细颗粒物的生成。

表2 燃烧配比7:3混煤生成的PM<sub>1</sub>和PM<sub>1-10</sub>组成元素的加权计算值和实验值Table 2 Calculational and experimental data of elemental composition in PM<sub>1</sub> and PM<sub>1-10</sub> from burning

元素	mixed coal under 7:3 blend						μg/g coal
	PM <sub>1</sub>		PM <sub>1-10</sub>		PM <sub>10</sub>		
	加权计算值	实验值	加权计算值	实验值	加权计算值	实验值	
Na	54	16	88	94	142	110	
Mg	601	263	219	199	820	462	
K	22	5	20	27	42	32	
Ca	1 291	686	2 923	1 476	4 213	2 161	
Al	185	129	623	516	808	645	
Si	245	308	874	862	1 119	1 170	
P	32	17	4	7	36	24	
S	395	122	165	77	560	200	
Cl	49	20	15	10	63	30	
Fe	502	203	377	330	879	533	

### 3 结 论

(1) 准东煤中碱金属、碱土金属含量高,单独燃烧时亚微米颗粒物中主要含有碱金属、碱土金属的硫酸盐、氧化物,其中含量最大的是Ca, Mg的氧化物和硫酸盐。随着颗粒物粒径增加, Mg, S在颗粒物中的含量显著降低, Si, Al, Ca明显增加。淮南煤中硅铝含量高,燃烧生成的亚微米颗粒少,与ZD煤不同的是亚微米颗粒中难熔元素Si, Fe含量明显增加,硅铝大颗粒对亚微米气溶胶的捕捉是淮南煤亚微米颗粒物较少的原因。

(2) 准东煤与淮南煤的混烧实验发现,准东煤中高含量的碱金属与碱土金属(Na, Mg, K)的气溶胶在烟气温度降低时被淮南煤产生的大量的PM<sub>10+</sub>吸附,准东煤中高含量的Ca在Fe的助熔作用下与淮南煤中的硅铝大颗粒形成低温共融物,促进了对细颗粒物的黏附捕捉,使PM<sub>10</sub>显著减少。

### 参考文献 (References):

- [1] 杨忠灿,刘家利,何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. 热力发电, 2010, 39(8): 38-40, 44.  
Yang Zhongcan, Liu Jiali, He Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-40, 44.
- [2] Wang A, Song Q, Tu G, et al. Influence of flue gas cleaning system on characteristics of PM<sub>2.5</sub> emission from coal-fired power plants[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(1): 4-12.
- [3] 姚宇翔,金晶,钟程鹏,等. 准东煤中钠的赋存形态及挥发特性[J]. 煤炭转化, 2016, 39(1): 1-5.

Yao Yuxiang, Jin Jing, Zhong Chengpeng, et al. Occurrence mode and volatilization characteristic of sodium in Zhundong coal[J]. Coal Conversion, 2016, 39(1): 1-5.

- [4] 张凯,龚本根,田冲,等. 燃煤细颗粒物排放实验及形成机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2696-2701.  
Zhang Kai, Gong Bengen, Tian Chong, et al. Formation mechanisms of fine particles generated from coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2696-2701.
- [5] 曾宪鹏,于敦喜,樊斌,等. 不同温度下准东煤燃烧颗粒物的生成特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2690-2695.  
Zeng Xianpeng, Yu Dunxi, Fan Bin, et al. Particulate matter formation characteristics during Zhundong coal combustion at different temperatures[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2690-2695.
- [6] Li Gengda, Li Shuiqing, Huang Qian, et al. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2015, 143(1): 430-437.
- [7] Gao Qi, Li Shuiqing, Yuan Ye, et al. Ultrafine particulate matter formation in the early stage of pulverized coal combustion of high-sodium lignite[J]. Fuel, 2015, 158(15): 224-231.
- [8] Si Junping, Liu Xiaowei, Xu Minghou, et al. Effect of kaolin additive on PM<sub>2.5</sub> reduction during pulverized coal combustion: Importance of sodium and its occurrence in coal[J]. Applied Energy, 2014, 114: 434-444.
- [9] Zhang Jun, Han Chunli, Yan Zheng, et al. The varying characterization of alkali metals (Na, K) from coal during the initial stage of coal combustion[J]. Energy & Fuels, 2001, 15(4): 786-793.
- [10] Quann R J, Sarofim A F. Vaporization of refractory oxides during pulverized coal combustion[A]. Nineteenth International Symposium on Combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1982: 1429-1440.
- [11] Wang Xuebin, Xu Zhaoxia, Wei Bo, et al. The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium: a study from ash evaporating to condensing[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80(5): 150-159.

- [12] Xiao Zhenghang, Shang Tiankun, Zhuo Jiankun, et al. Study on the mechanisms of ultrafine particle formation during high-sodium coal combustion in a flat-flame burner[J]. Fuel, 2016, 181(1):1257-1264.
- [13] Neville M, Sarofim A F. The stratified composition of inorganic sub-micron particles produced during coal combustion[A]. Nineteenth International Symposium on Combustion[C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1982;1441-1449.
- [14] 于敦喜, 徐明厚, 易帆, 等. 燃煤过程中颗粒物的形成机理研究进展[J]. 煤炭转化, 2004, 27(4):7-12.  
Yu Dunxi, Xu Minghou, Yi Fan, et al. A review on particle formation mechanisms during coal combustion[J]. Coal Conversion, 2004, 27(4):7-12.
- [15] Wang Qunying, Zhang Lian, Atsushi Sato, et al. Effects of coal blending on the reduction of PM10 during high-temperature combustion 1. Mineral transformations[J]. Fuel, 2008, 87(13):2997-3005.
- [16] 周科, 徐明厚, 于敦喜, 等. 混煤燃烧减少细微颗粒物生成的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(2):349-352.  
Zhou Ke, Xu Minghou, Yu Dunxi, et al. Experimental study of coal blend combustion for fine particulates reduction[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2):349-352.