

# 大型燃煤机组颗粒物与痕量元素的排放特性

盘思伟<sup>1</sup> 张凯<sup>1</sup> 张宇<sup>2</sup> 刘小伟<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司 电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 本文分别针对 1 000 MW 和 660 MW 燃煤机组在 WFGD(湿法石灰石-石膏脱硫塔)后进行了颗粒物现场采样,研究了同一机组在不同负荷以及不同机组在相同负荷比例条件下,颗粒物及痕量元素的排放特性。实验采用称重式 DGI(颗粒物采样器)系统对烟气中的颗粒物进行分级取样,计算颗粒物生成量以及痕量元素含量。试验结果显示:对比相同容量不同负荷工况下的结果,可以发现高负荷条件下颗粒物排放量增大,分析认为这是由于较大的负荷变化导致耗煤量增加,燃烧温度升高引起的;痕量元素在飞灰中的富集倍数随颗粒物粒径的变小而增大;颗粒物中痕量元素富集倍数  $As > Cr > Pb$ , 正比于其挥发特性  $As > Cr > Pb$ 。

**关键词:** 燃煤火电机组; 颗粒物; 痕量元素; 排放特性

中图分类号: X513 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.10.015

## 引言

煤炭是我国目前最重要的一次能源,每年所消耗的煤炭中大约有 55% 用作了燃煤发电,燃煤发电过程中会导致大量污染物的产生,其中颗粒物污染已经引起了广泛关注<sup>[1]</sup>。电厂排放的颗粒物是导致大气污染、引发雾霾的重要原因之一<sup>[2-3]</sup>。颗粒物粒径越小,越难以沉降,在空气中停留时间越长,对环境的污染也越严重。而且煤中含有的次量、痕量元素在燃烧过程中,会在飞灰颗粒上富集,导致颗粒物毒性增强,随烟气排入大气环境后,会对人体造成巨大的威胁<sup>[4-5]</sup>。

针对电厂颗粒物的排放特性以及次量、痕量元素的富集特性,相关学者进行了大量的研究。刘小伟等应用低压撞击器(LPI)取样系统在某电厂 2 台 200 MW 燃煤锅炉的除尘器入口和出口进行颗粒物采样后发现<sup>[6]</sup>,除尘器对粒径在 2.5 μm 以上颗粒物

具有良好的脱除效果,对 <2.5 μm 的颗粒物脱除效果相对较低,故燃煤电厂排放到大气中的小粒径颗粒物含量较高。隋建才等对某 300 MW 燃煤锅炉除尘器前后的飞灰颗粒进行采样和分析<sup>[7]</sup>,发现该电站除尘器入口和出口  $PM_{10}$  的质量粒径分布均呈现双峰分布,但是颗粒组成特性却大不相同,通过对颗粒物上痕量元素的分析发现,对于 Mg、S、Cu、Zn 和 Pb,在小粒径的飞灰上有明显的富集趋势,在  $PM_{2.5}$  中 50%~60%,特别是 Cu、Zn 和 Pb,其相对富集系数达 30~40。岳勇等先对煤粉锅炉颗粒物进行现场采样<sup>[8]</sup>,之后使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定了不同粒径颗粒物上 8 种痕量元素 As、Pb、Cr、Cd、Ni、Co、Cu、Zn 的含量,结果发现这些痕量元素不仅会在不同粒径的飞灰中随着粒径的减小而富集,而且在同一粒径上的富集程度正相关于它们的挥发性。随着粒径的减小,对于 Cu、Cr、Co、Ni 相对富集倍数递增 4~6 倍;对于 Cd、Zn、Pb,相对富集倍数递增 10~15 倍;而对于挥发性更强的 As 相对富集倍数递增接近 30 倍。李超等在 2 个燃煤电厂除尘器的出口和入口分别利用荷电低压撞击器(ELPI)和稀释采样系统<sup>[9]</sup>对烟气中的可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )进行现场采样,并对其中的痕量元素的粒径分布、富集机理和排放因子进行研究,发现电厂除尘器前后  $PM_{10}$  中痕量元素的质量粒径分布与  $PM_{10}$  质量浓度粒径分布相似,大多呈现双模态。初步推测所测痕量元素在亚微米颗粒上的富集过程由异相化学反应控制,而在粗颗粒上的富集则可能由异相凝结或化学反应两种机制控制。韩军等通过研究发现锅炉负荷、锅炉容量、除尘器效率以及痕量元素在煤中的赋存形态等都是影响痕量元素排放因子的重要因素<sup>[10]</sup>。锅炉负荷的降低,或者煤中痕量元

收稿日期: 2015-12-15; 修订日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476064); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228501)

作者简介: 盘思伟(1975-),男,广东台山人,广东电网有限责任公司高级工程师。

通讯作者: 刘小伟(1981-),男,甘肃庆阳人,华中科技大学副教授。

素的浓度变大,其存在形态从无机到有机时,都会导致痕量元素的排放因子变大;而锅炉容量的增大,或者除尘器效率的增高,则会导致其排放因子的减小。

目前,国内针对燃煤电厂颗粒物与痕量元素排放特性的研究大都集中在中小型机组上,而对大容量机组、高负荷变动下的研究相对很少,本文针对 1 000 和 660 MW 的大型发电机组,进行 90% 和 50% 大负荷变动工况的现场测试,研究分析了机组不同容量、不同负荷对颗粒物和痕量元素排放特性的影响。

## 1 试验部分

### 1.1 锅炉基本参数

试验在国内某 1 000 MW 机组与 660 MW 机组上开展,2 台机组结构相似,均安装了选择性 SCR (催化还原)法烟气脱硝装置和 ESP(静电除尘器),其中 1 000 MW 机组分别在 90% 和 50% 两种负荷工况下进行,660 MW 机组则在 90% 负荷下进行现场采样。两种型号锅炉参数对比如表 1 所示。

表 1 两台锅炉参数对比

Tab. 1 Parameter comparison between two boilers

参 数	数 值	
锅炉容量	1 000 MW	660 MW
锅炉型式	煤粉锅炉	煤粉锅炉
锅炉蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	3 033	2 100
主蒸汽温度/ $^{\circ}C$	603	540
主蒸汽压力/MPa	26.15	18.2
锅炉效率/%	93.2	92.1
除尘方式	静电除尘	静电除尘
有无 WFGD	有	有

### 1.2 煤质特性分析

两台机组燃煤种类不同,1 000 MW 和 660 MW 机组燃煤分别记为 C1 和 C2。以干燥基为基准对两种煤进行工业分析和元素分析,并对低温灰成分进行测试,如表 2、表 3 所示。煤中痕量元素含量如表 4 所示。

### 1.3 取样位置与取样方法

本次取样测试主要分为 3 个工况:1 000 MW 机组 90% 负荷下采样;1 000 MW 机组 50% 负荷下取样;660 MW 机组在 90% 负荷下取样。取样点均设置在 WFGD 后(烟囷入口),取样过程中负荷持续稳定,获得的数据即可认为是该机组颗粒物与痕量元

素的排放值。取样点如图 1 所示。

表 2 两种煤的工业元素分析/%

Tab. 2 Proximate and ultimate analysis of coal/%

元素	煤 C1	煤 C2
Ad	11.36	10.01
Vd	32.72	31.76
FCd	55.92	58.23
C	69.28	74.17
H	4.38	4.45
N	0.81	1.54
S	0.45	0.38
O	13.72	9.45

表 3 两种煤的低温灰成分分析/%

Tab. 3 Low temperature ash analysis/%

元素	煤 C1	煤 C2
$Na_2O$	2.34	0.77
MgO	1.32	1.07
$Al_2O_3$	21.90	34.68
$SiO_2$	46.05	57.04
$P_2O_5$	1.09	0.88
$SO_3$	9.58	1.84
$K_2O$	1.05	0.15
CaO	11.16	2.28
$Fe_2O_3$	5.51	1.29

表 4 两种煤的痕量元素分析( $\mu g/g$  coal)

Tab. 4 Trace elements contents ( $\mu g/g$  coal)

元素	煤 C1	煤 C2
As	9.54	7.46
Cr	17.71	11.54
Pb	10.95	8.88

测试取样采用 DGI 取样系统,主要包括:(1) 取样枪,取样枪深入烟道截面中心位置,抽取烟气,进入后续的收集装置中;(2) 旋风分离器,具有按粒径分离颗粒物的能力,可以将烟气中粒径大于 10  $\mu m$  的颗粒物阻拦下来,保证进入 DGI 取样器的颗粒物粒径 < 10  $\mu m$ ;(3) DGI 取样器,共有 4 级,通过切割粒径,分级收取粒径范围在空气动力学直径 0.2 ~ 10  $\mu m$  的颗粒物;(4) 真空泵,维持取样系统的负压稳定,将烟气从烟道中抽出;(5) 压缩机,连接质量流量计如图 2 所示。

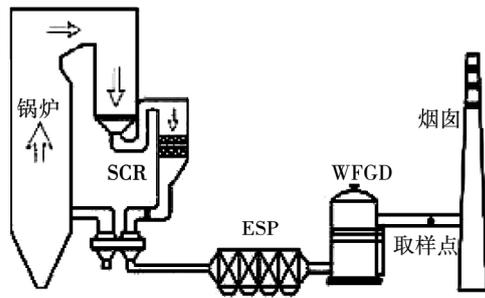


图 1 取样点分布图

Fig. 1 Sampling site distribution

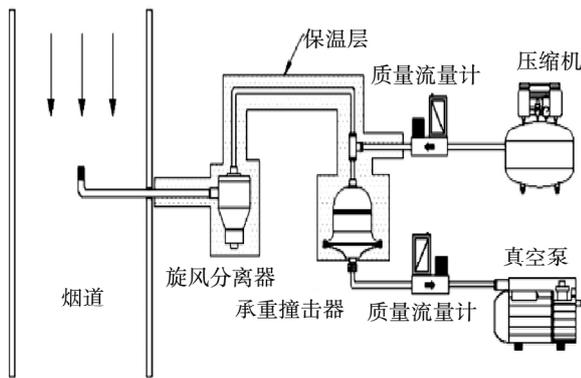


图 2 DGI 取样系统

Fig. 2 DGI sampling system

通常我们认为燃煤电厂排放的颗粒物分为两类:一次颗粒物与二次颗粒物。一次颗粒物是指通过燃煤烟气直接排放出的颗粒物;二次颗粒物是由于排放到大气中的烟气含有一些复杂成分,这些复杂成分会与空气中的某些物质相互作用再生成颗粒物。普通的保温取样法获得颗粒物只包含一次颗粒物,因此所测得的颗粒物排放浓度会低于实际产生的颗粒物浓度。稀释法可以通过导入空气,将烟气温度降低到大气温度,模拟大气环境中二次颗粒物的生成,所获得颗粒物排放浓度更加接近实际值,更具有说服力<sup>[11-12]</sup>。因此我们采用稀释法进行 WFGD 后颗粒物的现场取样,分为两级稀释,稀释比为 64。

取样分别采用铝膜和聚碳酸酯膜进行。铝膜,用来进行颗粒物收集,确定各粒径段颗粒物的生成量。试验开始前,将铝膜称重记录,分别装入 DGI 取样器的 4 级中;取样时间持续 120 min,取样过程中真空泵维持 10 L 流量;完成取样测试后,分别称

重每一级铝膜的重量,差减后获得各粒径段颗粒物的生成量,进而计算出各粒径段颗粒物的排放浓度。聚碳酸酯膜,用来收集烟气中的飞灰颗粒,取样条件与铝膜的取样条件一致,取样完成后,将带有颗粒物的聚碳酸酯膜进行消解后测试进行 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)测试,获得痕量元素的浓度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 机组负荷对颗粒物排放浓度的影响研究

采用加装铝膜的 DGI 取样系统,分别在同 1 台 1 000 MW 机组 90% 负荷和 50% 负荷下 WFGD 后(烟囱入口)进行测试取样,取样时间均为 120 min,保持燃煤煤种等条件一致,两种工况,分别记为 B1(90%)和 B1(50%)。取样获得各粒径段颗粒物的排放质量,计算获得颗粒物的排放浓度。分析比较不同负荷对颗粒物排放特性的影响。如图 3 所示。

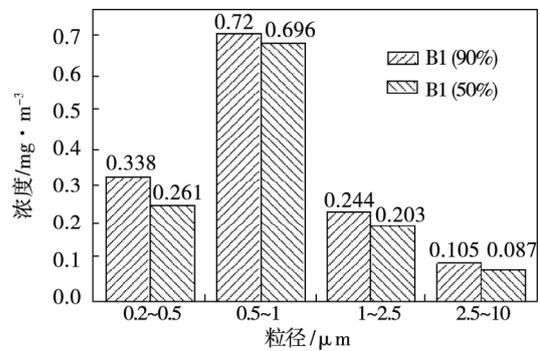


图 3 1 000 MW 机组两种负荷下颗粒物排放特性  
Fig. 3 PM emission characteristics of 1 000 MW unit under two different load conditions

由图 3 可以发现,在 50% 负荷下,无论是颗粒物的排放总量还是各粒径段颗粒物的排放量,都要低于 90% 负荷的工况。这与文献报道中的负荷降低,颗粒物浓度升高有所不同<sup>[13]</sup>。分析原因,我们认为 1 000 MW 机组 90% 负荷与 50% 负荷相差 400 MW,负荷绝对差值很高,随煤耗量增加,空气消耗量升高,炉膛温度升高导致燃烧过程中颗粒物的生成量增加。此外,我们可以发现 50% 负荷下,各粒径段颗粒物的浓度值相对 90% 负荷下减小的比例不同,对  $PM_{0.2} \sim PM_{0.5}$ 、 $PM_{0.5} \sim PM_1$ 、 $PM_1 \sim PM_{2.5}$  和  $PM_{2.5} \sim PM_{10}$  下降比例分别为: 22.87%、3.33%、4.04% 和 17.42%。

### 2.2 不同容量机组同等负荷比例下颗粒物的排放特性

采用加装铝膜的 DGI 取样系统, 分别对 1 000 和 660 MW 机组在相同的 90% 负荷下, 进行颗粒物现场采样, 取样时间为 120 min, 两种工况分别记为 B1(90%) 和 B2(90%), 采样结束后称量分粒径段颗粒物质量并计算浓度值, 结果如图 4 所示。

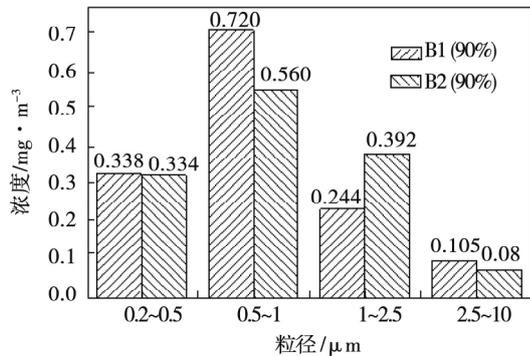


图 4 1 000 和 660 MW 在相同负荷比例 90% 下颗粒物排放特性

Fig. 4 PM emission characteristics of 1 000 and 660 MW units under 90% load

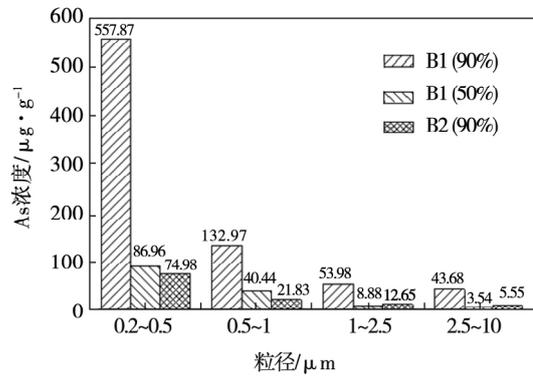
由图 4 可以发现, 在不考虑煤质特性的条件下, 相同的 90% 负荷比例, 除  $PM_{1 \sim 2.5}$  粒径段外, 1 000 MW 机组颗粒物的排放量要高于 660 MW 机组颗粒物排放量。分析原因, 在相同负荷比例下, 大容量机组燃煤消耗量大于小容量机组, 在较大的绝对负荷差异下, 机组颗粒物的排放量与其耗煤量有关。对于  $PM_{1 \sim 2.5}$  粒径段, 660 MW 的机组排放浓度值高于 1 000 MW 的机组, 这可能受除尘设备效率及燃烧工况等因素影响。

### 2.3 不同容量机组和不同负荷工况痕量元素排放特性

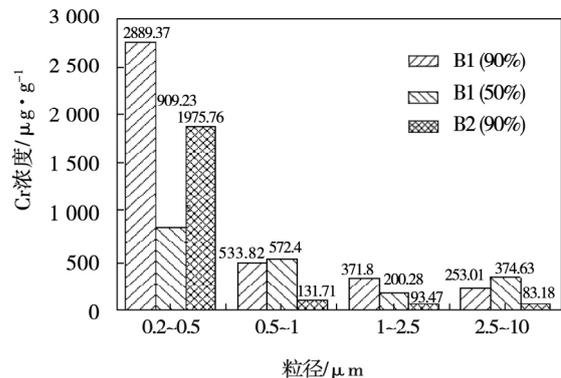
采用加装聚碳酸酯膜的 DGI 取样系统, 分别对 90% 和 50% 负荷下的 1 000 MW 机组与 90% 负荷下的 660 MW 机组 3 个工况进行现场取样测试, 分别记为 B1(90%) 和 B1(50%)、B2(90%), 取样时间均为 120 min, 取样结束后将收集有飞灰的聚碳酸酯膜进行消解。消解过程中采用浓  $HNO_3$ : 浓  $H_2SO_4$ : HF 体积比为 2:2:1 的混合酸液进行微波萃取, 消解后无固体残留物, 消解彻底。定容稀释后进行 ICP-MS 测试, 获得痕量元素含量, 如图 5 所示。

如图 5 (a) 所示, 对比 1000 MW 机组 B1(90%) 与 B1(50%) 负荷两个工况, 元素 As 具有相似的富

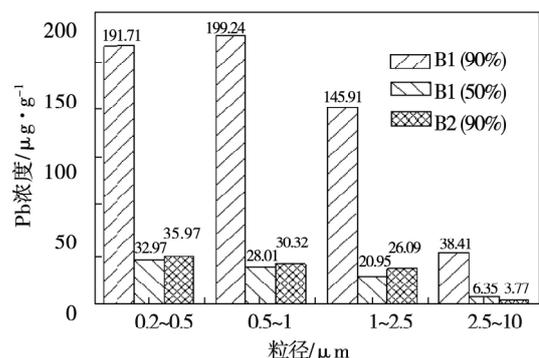
集规律: 颗粒物越小, 富集的 As 含量越高, 这与文献报道中的一致<sup>[14~15]</sup>, 且在相同的粒径段, 90% 负荷机组的 As 含量远高于 50% 负荷; 对比不同容量的锅炉 B2(90%), 元素 As 富集含量也随颗粒粒径减小而增大。



(a)



(b)



(c)

图 5 As、Cr、Pb 在颗粒物各粒径段的含量

Fig. 5 As、Cr、Pb concentration at different range of PM

如图 5 (b) 所示, 在 B1(90%) 工况下, 元素 Cr 的富集趋势与 As 相同, 在 B1(50%) 工况下, 元素 Cr 在  $PM_{1 \sim 2.5}$  粒径段相对于 B1(90%) 工况下富集含量要高。如图 5 (c) 所示, 对比不同容量的机组 B1(90%) 和 B2(90%), 元素 Pb 在  $PM_{0.5 \sim 1}$  粒

径段中的富集含量均为最高,在  $PM_{2.5} \sim PM_{10}$  粒径段的含量最低;分析 660 MW 机组 B2(90%) 工况,元素 Pb 的富集趋势与元素 As 相似,均是随着飞灰粒径减小,Pb 的富集含量升高。对比 3 种痕量元素的富集特性,可以发现:元素 As 与 Cr 主要富集在  $PM_{0.2} \sim PM_{0.5}$  粒径段,而 Pb 则在  $PM_{0.2} \sim PM_{0.5}$ 、 $PM_{0.5} \sim PM_1$ 、 $PM_1 \sim PM_{2.5}$  粒径段均有较高的富集程度,分析认为这是由于 Pb 的挥发性明显小于 As 和 Cr。

根据研究报道,煤中痕量元素主要分为易挥发、半挥发与难挥发元素,易挥发元素 Hg 等主要以气态存在,在飞灰中耗散;半挥发元素 As、Cr、Pb 等主要在飞灰中富集,在底灰中耗散;难挥发元素 Mn 等主要在底灰中富集,在飞灰中耗散。易在飞灰中富集的半挥发元素,其挥发性越强,向小粒径颗粒物上的富集能力也越强,因此挥发性较强的 As、Cr 主要富集在  $PM_{0.2} \sim PM_{0.5}$  粒径段,而挥发性明显弱于 As、Cr 的元素 Pb 向小粒径颗粒物上的富集能力较弱,故除了在  $PM_{0.2} \sim PM_{0.5}$  粒径段外,在  $PM_{0.5} \sim PM_1$  和  $PM_1 \sim PM_{2.5}$  粒径段也有较高的富集程度<sup>[12]</sup>。

基于 DGI 的四级采样系统,我们分别测试获得了每个粒径段的 3 种痕量含量,因为飞灰已经是一种颗粒源,一般来说,痕量元素在最大粒径段具有较小的小富集含量,因此为了直观地比较不同粒径段痕量元素富集的多少,我们以最大粒径段痕量元素的富集含量为基准,定义相对富集倍数为:

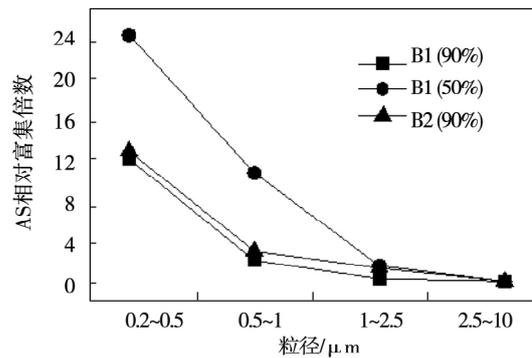
$$D_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{i1}} \quad (1)$$

式中:  $D_{ij}$ — $i$  元素在  $j$  粒径段的富集倍数;  $C_{ij}$ — $i$  元素在  $j$  粒径段富集含量,  $\mu\text{g/g}$ ;  $C_{i1}$ — $i$  元素在取样的最大粒径段的富集含量。

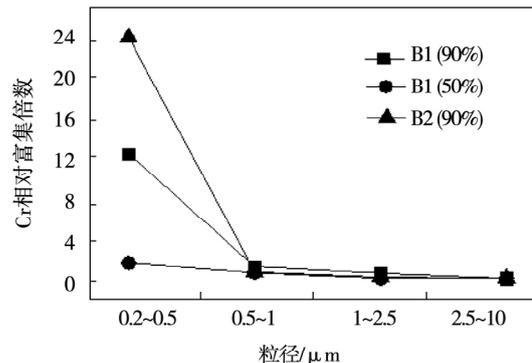
痕量元素在最大粒径段富集含量较少,相对富集倍数为 1,其余各粒径段相对富集倍数计算结果如图 6 所示。

图 6 为 3 种痕量元素 As、Cr 和 Pb 的相对富集倍数,均随着粒径段的减小而增大。对比相同容量的不同负荷工况,元素 As 的富集倍数随负荷降低而升高,这与文献报道中的一致<sup>[16]</sup>,但是对于 Cr 和 Pb 的富集规律则不同,推测原因为负荷大幅度变动导致燃烧工况变动引起的。3 种痕量元素富集倍数  $As > Cr > Pb$ ,同时 3 种元素挥发特性  $As > Cr > Pb$ ,可以发现痕量元素的富集特性正比于其挥发特性。对不同容量机组,在相同的负荷比例下,As、Cr 和 Pb 3 种痕量元素的富集倍数均随锅炉容量升高而降低。通常在大粒径段痕量元素的富集较小,但是由于锅

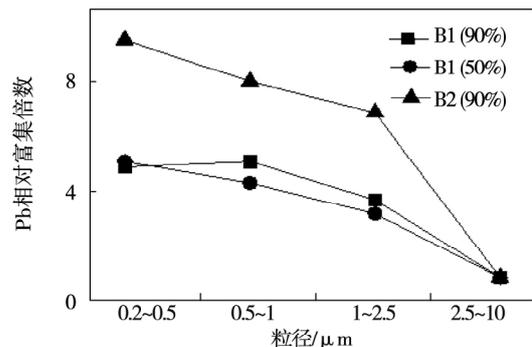
炉负荷变动、燃烧工况差异以及燃料特性变化等原因,痕量元素的富集特性也会发生变化<sup>[10]</sup>。



(a) 3种工况下As的富集倍数



(b) 3种工况下Cr的富集倍数



(c) 3种工况下Pb的富集倍数

图 6 As、Cr、Pb 3 种工况下的富集倍数

Fig. 6 As、Cr、Pb enrich factor at 3 conditions

### 3 结 论

本文采用 DGI 取样系统分别对 1 000 MW 机组的两个负荷工况和 660 MW 的一个负荷工况在 WF-GD 出口(烟窗入口)处进行了颗粒物的测试取样,分析研究了各自的颗粒物排放特性和痕量元素在不同粒径段飞灰中的富集特性,得到了以下结论:

(1) 相同容量机组的不同运行负荷以及不同容量机组之间颗粒物的排放特性有明显差异,当实际

运行负荷相差较大时,运行负荷较大的机组排放的各粒径段颗粒物浓度均高于低负荷运行的机组,分析认为这主要是因为负荷升高导致燃煤消耗量增加,进而燃烧温度升高,细颗粒生成量增加;

(2) 不同容量机组在相同负荷比例下,大容量机组痕量元素富集倍数较小,而小容量机组痕量元素富集倍数较大。对相同容量不同负荷的机组,痕量元素 As 的富集倍数随锅炉负荷下降而升高;而对 Cr 和 Pb 则呈相反的规律,推测认为这是由于在大负荷变动条件下,燃烧条件发生变化引起的;

(3) 分析 3 种工况下痕量元素的富集特性,可以发现痕量元素富集倍数随颗粒物粒径的减小而增大,3 种痕量元素富集倍数  $As > Cr > Pb$ ,而 3 种元素挥发特性  $As > Cr > Pb$ ,两者具有正相关性。

#### 参考文献:

- [1] 隋建才,徐明厚,杜云贵,等. 燃煤过程中亚微米颗粒物生成及影响因素的研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(3): 269-328.  
SUI Jian-cai, XU Ming-hou, DU Yun-gui, et al. A study of the formation of submicron particles in the process of coal combustion and its influencing factors [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(3): 269-328.
- [2] 屈成锐,赵长遂,段伦博,等. 燃煤超细颗粒物形成机理及其控制的研究进展[J]. 热能动力工程, 2008, 23(5): 447-552.  
QU Cheng-rui, ZHAO Chang-sui, DUAN Bo-lun, et al. Latest advances in research on the formation mechanism of superfine particles during coal combustion and its control [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(5): 447-552.
- [3] SI Jun-ping, LIU Xiao-wei, XU Ming-hou, et al. Effect of kaolin additive on  $PM_{2.5}$  reduction during pulverized coal combustion: Importance of sodium and its occurrence in coal [J]. Applied Energy, 2014, 114: 434-444.
- [4] 卢俊营,陈晓平,段伦博,等.  $O_2/CO_2$  气氛下痕量元素迁移特性实验[J]. 热能动力工程, 2009, 24(5): 648-651.  
LU Jun-ying, CHEN Xiao-ping, DUAN Lun-bo, et al. Experimental study of trace element migration characteristics in  $O_2/CO_2$  atmosphere [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(5): 648-651.
- [5] CORDOBA P, OCHOA-GONZALEZ R, FONT O, et al. Partitioning of trace inorganic elements in a coal-fired power plant equipped with a wet Flue Gas Desulphurisation system [J]. Fuel, 2012, 145: 157.
- [6] 刘小伟,姚洪,乔瑜,等. 燃煤电站锅炉颗粒物排放特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(6): 1055-1058.  
LIU Xiao-wei, YAO Hong, QIAO Yu, et al. Characteristics and composition of particulate matter from coal-fired power plants [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 1055-1058.
- [7] 隋建才,徐明厚,邱纪华,等. 燃煤锅炉  $PM_{10}$  排放及元素分布特性的研究实验[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(5): 432-437.  
SUI Jian-cai, XU Ming-hou, QIU Ji-hua, et al. Experimental study on emission characteristics and elemental composition of  $PM_{10}$  from a coal-fired boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(5): 432-437.
- [8] 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.  
YUE Yong, CHEN Lei, YAO Qiang, et al. Experimental study on characteristics of particulate matters size distribution and trace elements enrichment in emission from a pulverized coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 74-79.
- [9] 李超,李兴华,赵瑜,等. 燃煤电厂可吸入颗粒物中痕量元素的排放规律研究[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(5): 334-340.  
LI Chao, LI Xing-hua, ZHAO Yu, et al. Study on emission characteristics of trace elements in  $PM_{10}$  from coal-fired power plants [J]. Science Paper Online, 2008, 3(5): 334-340.
- [10] 韩军,徐明厚,程俊峰,等. 燃煤锅炉中痕量元素排放因子的研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(6): 770-772.  
HAN Jun, XU Ming-hou, CHENG Jun-feng, et al. Study of trace element emission factor in coal-fired boilers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(6): 770-772.
- [11] 史艳红,吴华成,周卫青,等. 燃煤电厂烟气  $PM_{2.5}$  常见采样方法的存在问题分析[J]. 华北电力技术, 2015, 43: 47.  
SHI Yan-hong, WU Hua-cheng, ZHOU Wei-qing, et al. Analysis on the common problems of  $PM_{2.5}$  emission sampling methods in coal-fired power plants [J]. North China Electric Power, 2015, 43: 47.
- [12] 王超,刘小伟,徐义书,等. 660 MW 燃煤锅炉细颗粒物中微量与痕量元素的分布特性[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2975-2981.  
WANG Chao, LIU Xiao-wei, XU Yi-shu, et al. Distribution characteristics of minor and trace elements in fine particulate matter from a 660 MW coal-fired boiler [J]. CIESC Journal, 2013, 64(8): 2975-2981.
- [13] 朱志飞,王礼鹏,祁慧,等. 660 MW 燃煤机组锅炉飞灰颗粒物排放特征研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(3): 323-328.  
ZHU Zhi-fei, WANG Li-peng, QI Hui, et al. Emission characteristics of fine particulate matters from a 660 MW coal-fired boiler [J]. Journal of Fuel and Technology, 2014, 42(3): 323-328.
- [14] 陆炳,孔少飞,韩斌,等. 燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1928-1933.  
LU Bing, KONG Shao-fei, HAN Bin, et al. Source profile of TSP and  $PM_{10}$  from coal-fired boilers [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1928-1933.
- [15] 赵柯,彭良梅,付健. 燃煤痕量元素重金属的排放与控制技术研究进展[J]. 绿色科技, 2012, 11: 98-100.  
ZHAO Ke, PENG Liang-mei, FU Jian. Latest advances in research on the emission and control technology of trace elements [J]. Journal of Green Science and Technology, 2012, 11: 98-100.
- [16] 王启超,邵庆春,周朝华. 不同粒度飞灰中 16 种微量元素的含量分布[J]. 环境污染与防治, 1998, 20(5): 37-41.  
WANG Qi-chao, SHAO Qing-chun, ZHOU Chao-hua. Grain size distribution of 16 trace elements in fly ash of burning coal [J]. Environmental Pollution and Control, 1998, 20(5): 37-41.

(单丽华 编辑)

Heating Technology of Liaoning, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning, China, Post Code: 110136) ,LENG Jie ( Northeast Electric Power Research Institute co. ,LTD, Shenyang, Liaoning, China, Post Code: 110006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31( 10) . -79 ~ 83

In this paper, the flow characteristics in structured pellet packed bed was numerically studied in order to quantitatively analyze the flow characteristics in the pore and the effects of the laminar flow in porous media with different particle Re numbers. Results show that when the particle Re is 12.17 and 28.88, the streamline is located on the pellets surface. With the particle Re of 105.57 and 204.74, streamline is no longer on the pellets surface because of the influence of the inertia force. Additionally, there is an obvious backflow in the pore for the case with particle Re of 204.74. **Key words:** porous media, numerical simulation, flow field, packed bed

大型燃煤机组颗粒物与痕量元素的排放特性 = **The Particulate Matter and Trace Elements Emission Characteristics of Large Coal-fired Units** [刊, 汉] PAN Si-wei, ZHANG Kai ( Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou, China, Post Code: 510080) ,ZHANG Yu, LIU Xiao-wei ( State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31( 10) . -84 ~ 89

Particulate matter sampling tests were performed after the WFGD on the 1 000 MW and 660 MW units to study the emission characteristics of particulate matter ( PM) and trace elements at different conditions. Dekati Gravimetric Impactor ( DGI) sample system was used to collect the PMs distinguished to four stages. It is concluded that: the PM emission rises with the boiler due to the increases in the coal consumption and the combustion temperature. The trace elements are evidently enriched in fine particle matter; the enrichment order of trace elements is As > Cr > Pb, proportion to the order of the volatileness. **Key words:** coal-fired unit, particle matter, traces elements, emission characteristic

制药污泥的热解特性及动力学研究 = **Study on Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Pharmacy Sludge** [刊, 汉] WANG Shan-hui, LIU Ren-ping, ZHAO Liang-xia ( School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei, China, Post Code: 050000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31( 10) . -90 ~ 95

The temperature difference-thermogravimetric method was employed to study the pyrolytic characteristics and dynamic law of sludge under different reaction conditions. Results showed that the pharmacy sludge pyrolysis process contains three weight loss stages: loss of moisture, organic matter decomposition and carbonization. The TG and DTG curves under different heating rate ( 5 °C/min, 10 °C/min, and 20 °C/min) trend are roughly the same. But with the increase of heating rate, TG and DTG curve has a tendency to move to the high temperature area. Flynn-Wall-Ozawa and Šatava-Šesták analysis method was used to explore pyrolysis kinetics of Pharmacy sludge main reaction stage. It was concluded that when the conversion rate is 0.9, the activation energy would be as highest as 150.75