

文章编号: 0253-2409(2013)09-1050-06

## 煤中痕量元素在循环流化床锅炉中的迁移行为与富集特性

陈冠益<sup>1</sup>, 王 钦<sup>1</sup>, 颜蓓蓓<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学机械工程学院 中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 对天津市某电厂循环流化床(CFB)锅炉燃用的原煤及燃烧产物底灰、飞灰、细飞灰( $\leq 50 \mu\text{m}$ )进行痕量元素含量的测定,分析了 Be、Zn、Hg、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、As、Se、Cd、Pb 13种痕量元素在燃烧过程中的迁移行为,揭示了痕量元素在CFB锅炉中的分配、富集特性。结果表明,CFB锅炉中,较低的炉温对于痕量元素的迁移富集产生了较大的影响。由相对富集系数得知,Be、V、Co、Se在底灰中耗散,在飞灰中富集,Zn、Mn倾向于在底灰中富集,元素Cd、Pb、Ni、Cu挥发性较强,在底灰和飞灰中均是耗散。As受钙氧化物影响,挥发性表现并不明显。Hg在底灰和飞灰中相对富集系数均很低,表明Hg在整个燃烧过程中以气态形式排放;Hg、As、Se、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Pb均有向小颗粒物中富集的趋势。根据相对富集系数以及研究的13种元素在低温CFB锅炉中的迁移行为,将这些元素分为三类:A类( $E_R < 0.1$ ),主要是以气态形式排放元素Hg;B类( $0.1 < E_R \leq 0.85$ ),较易挥发元素As、Be、Ni、Cu、Se、Cd、Pb、Co、V;C类( $E_R > 0.85$ ),主要残留在固体产物中元素Zn、Mn、Cr。

**关键词:** 燃煤电厂; 循环流化床锅炉; 痕量元素; 富集特性

**中图分类号:** TQ533, TQ534 **文献标识码:** A

## Mobility and enrichment of trace elements in a coal-fired circulating fluidized bed boiler

CHEN Guan-yi<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>, YAN Bei-bei<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Some hazardous trace elements in coal, bottom ash, fly ash and fine fly ash from a circulating fluidized bed (CFB) boiler in a power plant were examined. The distribution, enrichment and partitioning behavior of Be, Zn, Hg, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Se, Cd and Pb were analyzed. The results show that the distribution and enrichment characteristics of trace elements are greatly affected by the temperature of CFB. According to the relative enrichment factor ( $E_R$ ), Be, V, Co and Se trend toward fly ash; Zn and Mn show a tendency into bottom ash. Some volatile trace elements like Cd, Pb, Ni and Cu show low enrichment in both bottom ash and fly ash. The element of As is affected by calcium oxide, and its volatility is not obvious. Hg is more likely discharged with flue gas. Hg, As, Se, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn and Pb all have an enrichment tendency toward fine particles. On the basis of  $E_R$  and behaviors of the 13 trace elements in CFB boiler, these elements are divided into 3 categories: A ( $E_R < 0.1$ ), Hg mainly volatilizes into the atmosphere; B ( $0.1 < E_R \leq 0.85$ ), As, Be, Ni, Cu, Se, Cd, Pb, Co and V are more easily volatilization; C ( $E_R > 0.85$ ), Zn, Mn and Cr mostly stay in solid residues.

**Key words:** coal-fired power plants; circulating fluidized bed; trace elements; enrichment characteristics

在中国一次能源消费结构中,煤炭约占70%。其中,近乎一半以上的煤炭用来发电。燃煤过程中不仅会产生 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等污染性气体,同时也是环境中如Hg、As、Pb等痕量元素的主要来源。大量的痕量元素在煤的燃烧过程中释放出来,对环境和人体会产生潜在的巨大威胁。在美国,燃煤电厂释放的Hg被普遍认为是大气中Hg的最主要来源<sup>[1]</sup>。

煤燃烧过程中大部分痕量元素具有向飞灰富集的趋势,在细小颗粒中该现象更加明显<sup>[2,3]</sup>。现有

除尘设施的除尘效率可达到99%,但对于粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒除尘效率极低<sup>[4]</sup>。燃煤电厂对大气的污染最直接和最严重的正是这些烟气和超细粉尘。实验表明,烟囱排放的烟气可促使方圆1~3 km的Hg含量明显增加<sup>[5]</sup>。底灰、飞灰中痕量元素的再释放,又会对环境和人体造成二次危害<sup>[6]</sup>。

循环流化床(CFB)是一种新型的高效低污染清洁燃烧技术<sup>[7]</sup>,但现有研究多数聚焦的是粉煤炉中痕量元素的分布富集规律,对于CFB这种新型燃

收稿日期: 2013-01-11; 修回日期: 2013-04-01。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划, 2012CB214906); 国家科技支撑计划(2012BAA09B02)。

联系作者: 颜蓓蓓, 女, 讲师, 从事生物质燃气/煤的燃烧与气化研究, Tel: 022-87401929。

煤锅炉中痕量元素的分布富集规律研究较少。实验表明,CFB的相对低温运行环境对痕量元素释放有较好的抑制作用<sup>[8]</sup>。本实验针对CFB中的煤燃烧产物进行实验分析,与粉煤炉已有规律进行对比,总结痕量元素在CFB中的分布、富集规律。这对于痕量元素的控制具有重要意义。

## 1 实验部分

研究对象为天津市某电厂的2号锅炉,炉型为循环流化床,容量为350 MW,炉内温度900 ℃。煤样采自进煤口,飞灰采自静电除尘器出口,底灰采自炉灰排放口。为使取样具有代表性和相关性,在进煤口、炉灰排放口、除尘器口定时采样,分五个时间段,共采样五次,每次1 kg,灰样取样时间稍延后于进煤口取样时间。将采集到的原煤、底灰、飞灰用缩分法分别收集100 g,对其进行工业分析、元素分析、矿物分析,同时将飞灰过300目筛,筛选细飞灰,对四种样品进行电感耦合等离子质谱(ICP-MS)定量分析。

工业分析测量的是水分、灰分、挥发分、固定碳。使用带鼓风的恒温干燥箱以及专用灰分挥发分测定仪,使用德国元素分析系统公司元素分析仪(Vario Micro cube)进行煤中的C、H、N、S元素分析。与工业分析结果结合,计算出干燥无灰基(daf)中C、H、N、S比例。

矿物分析采用X射线衍射方法(XRD)进行分析,使用的是日本理光公司D/MAX-2500粉末衍射仪。分析前将材料研磨至75 μm以下,保证分析的准确性。

从电厂采集细小颗粒存在一定难度,对采集的飞灰进行激光粒径分析,结果表明,灰分颗粒全部低于100 μm。现在电厂静电除尘器和布袋除尘器效率极高,达到99%以上,只有不到1%颗粒物进入大气。对实验所需的飞灰过300目筛,过筛的飞灰粒径小于50 μm(细飞灰),尽管粒径大小不能满足超

细颗粒的范畴,但对研究痕量元素在小粒径粉尘中的含量仍具有一定代表性。

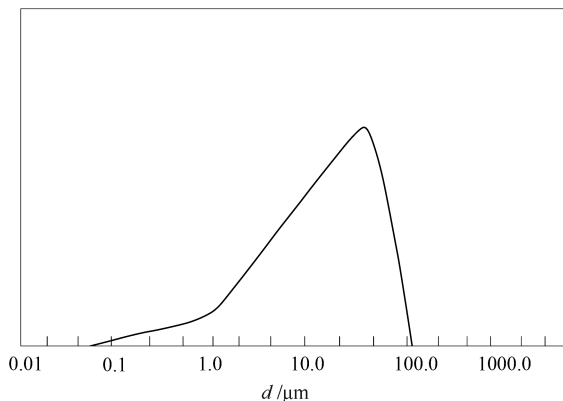


图1 激光粒径分析

Figure 1 Result of laser particle dimension analysis

本研究使用的ICP-MS为安捷伦(Agilent) 7700x,为了使测定结果准确,采用微波消解进行灰样的前处理。Das等<sup>[9]</sup>、王琿等<sup>[10]</sup>以及Wang等<sup>[11]</sup>都通过实验探讨过各种微波消解方法(MD)对处理灰样准确性的影响,其中,HNO<sub>3</sub>/HF + H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub>被认为是最准确的方法。HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>与HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HF的效果基本吻合,而HNO<sub>3</sub>效果要好于HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。对于无机物的检测条件下,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对实验影响不大,且为了检测Hg的含量,不适宜添加HF。因此,结合实验简便性、可行性及准确性综合考虑,选取HNO<sub>3</sub>进行微波消解工作。精确称量原煤、底灰、飞灰,称取量见表1,用HNO<sub>3</sub> 230 ℃进行消解,做一个空白样,将消解液转移至100 mL样品瓶中,用超纯水定容至100 mL,作为待测液。

## 2 结果与讨论

### 2.1 元素分析及工业分析

表1为原煤的工业分析和元素分析。煤中的S含量高,因此,对于燃烧过程中会有固硫剂加入,以减少S的排放。灰分较高,属于中灰分煤。

表1 煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Characteristics of the coal sample

Proximate analysis w/%				Ultimate analysis w <sub>daf</sub> /%				
M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>daf</sub>	FC <sub>daf</sub>	C	H	S	N	O
1.61	24.00	37.63	62.37	83.42	5.45	5.19	1.29	4.65

FC<sub>daf</sub> = 100 - V<sub>daf</sub>; O<sub>daf</sub> by difference.

### 2.2 矿物分析

图2为原煤、飞灰及底灰的XRD谱图,由图2可知,原煤中矿物质主要为石英、高岭土、勃姆石、钛

氧化物,而飞灰和底灰中主要的矿物质包括石英、硬石膏、方解石、赤铁矿等。与其他煤样的矿物分析<sup>[12]</sup>相比,矿物组分不同是煤样和燃烧方式不同引

起的,该 CFB 最高温度 900 °C,会直接影响石英等的结晶程度,同时此温度会导致含铁物质大多是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,而不是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。灰中富含钙元素原因,一是煤中含钙物质,如方解石等的分解;二是由于原煤含硫较高,向炉内喷入石灰石固硫,与表 1 中 S 含量高

密切相关。同时,根据 Querol 等<sup>[13]</sup>的研究,CaO 对于微量元素具有吸收作用,这就可能使灰样中微量元素定量检测结果产生差异,从而在富集规律上表现出不同。

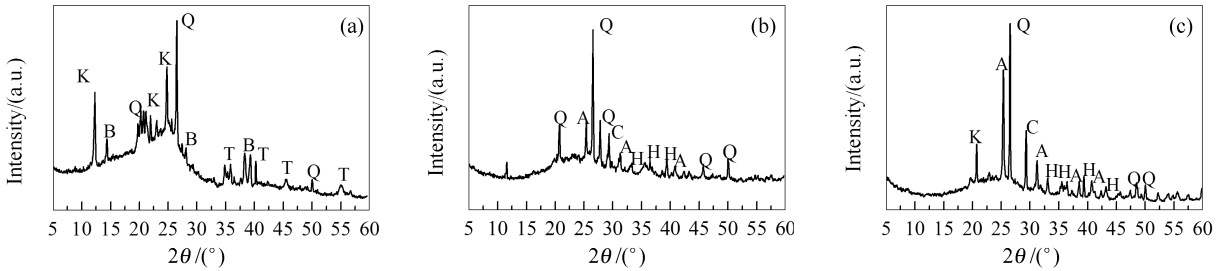


图 2 原煤、飞灰及底灰的 XRD 谱图

Figure 2 XRD patterns of coal, fly ash and bottom ash

- (a): raw coal; Q: quartz— $\text{SiO}_2$ ; K: kaoline— $\text{Al}_2(\text{SiO}_5)(\text{OH})_4$ ; B: boehmite— $\text{AlO}(\text{OH})$ ; T: titanium oxide— $\text{Ti}_2\text{O}_3$   
 (b): fly ash; Q: quartz— $\text{SiO}_2$ ; A: anhydrite— $\text{CaSO}_4$ ; H: hematite— $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; C: calcite— $\text{CaCO}_3$   
 (c): bottom ash; Q: quartz— $\text{SiO}_2$ ; A: anhydrite— $\text{CaSO}_4$ ; H: hematite— $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; C: calcite— $\text{CaCO}_3$

### 2.3 原煤及燃烧产物中微量元素的含量

表 2 为中国煤中相应元素含量均值以及样品中原煤、底灰、飞灰、细飞灰中的元素含量,由表 2 可

知,不同元素在煤与燃烧产物中表现出不同的分布与富集的特性。

表 2 原煤、底灰、飞灰、细飞灰中微量元素含量

Table 2 Content of trace elements in coal, bottom ash, fly ash and fine fly ash

Element	Content $w/10^{-6}$												
	Be	Zn	Hg	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Se	Cd	Pb
Mean value <sup>a, [14]</sup>	2.13	42.18	0.19	35.05	15.35	125.00	7.05	13.71	18.35	3.80	2.47	0.24	15.55
RC <sup>b</sup>	1.64	21.01	0.64	13.99	7.58	59.47	2.68	6.24	8.61	1.24	6.84	0.18	21.08
BA <sup>c</sup>	4.36	96.80	0.00	46.65	30.67	310.46	9.33	19.60	18.42	6.02	11.65	0.44	42.30
FA <sup>d</sup>	9.23	50.09	0.24	61.47	27.32	212.54	11.74	19.02	31.73	6.49	32.96	0.57	70.90
FFA <sup>e</sup>	8.05	59.13	0.63	67.89	31.16	240.57	13.99	22.12	39.25	8.01	42.07	0.30	83.02

<sup>a</sup>: mean value of trace elements in China's coal; <sup>b</sup>: raw coal; <sup>c</sup>: bottom ash; <sup>d</sup>: fly ash; <sup>e</sup>: fine fly ash

电厂煤样与中国煤均值相比, Hg、Se、Pb 含量高,其中, Hg 的含量是中国煤平均值的 3 倍以上, Se 接近中国煤平均值的 2 倍,这表明该煤样属于高汞、高硒煤。其他微量元素均低于中国煤的平均值,其中, Be、Zn、Cr、Cd、Mn、Ni 基本都是中国煤平均值的一半, Co 的含量更低,近乎平均值的 1/3。

除 Hg 外,其余元素在底灰和飞灰中的含量均明显高于原煤中含量,说明 Hg 在整个过程中是耗散的,而其他元素在过程中有从气相形式向灰分中富集的趋势。此外,由于不同元素在燃烧过程中表现出不同的化学和物性特点,从而在灰中也表现出不同的富集特性。例如 Se、Pb 等在飞灰中的含量分别为  $32.96 \times 10^{-6}$  和  $70.90 \times 10^{-6}$ ,但在底灰中仅有  $11.65 \times 10^{-6}$  以及  $42.30 \times 10^{-6}$ ;而 Zn 在底灰中 ( $96.80$

$\times 10^{-6}$ ) 的含量近乎是飞灰中 ( $50.09 \times 10^{-6}$ ) 的 2 倍。

图 3 为微量元素在底灰和飞灰中的富集,由图 3 可知, Zn 在底灰中富集最多,从左向右,微量元素开始向飞灰中富集。

过筛后的细飞灰与原飞灰相比,微量元素表现出向细小飞灰中富集的趋势,除了 Be、Cd 在细飞灰中的含量低于原飞灰, Zn、Hg、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、As、Se、Pb 在细飞灰中的含量均明显高于原飞灰。

微量元素在原煤、灰分中的含量对比,仅仅是定性分析微量元素在燃煤产物的富集程度,为了对微量元素进行定量分析,这里引入相对富集系数  $E_R$ 。根据 Meij 提出的相对富集系数  $E_R$ <sup>[15]</sup>,计算出微量元素在底灰和飞灰中的相对富集系数。 $E_R > 1$  表明在底灰或者飞灰中有富集的趋势;  $E_R = 1$  表示分布

不明显,不富集也不耗散; $E_R < 1$  表明该元素在底灰或者飞灰中是减少的,有耗尽的趋势。

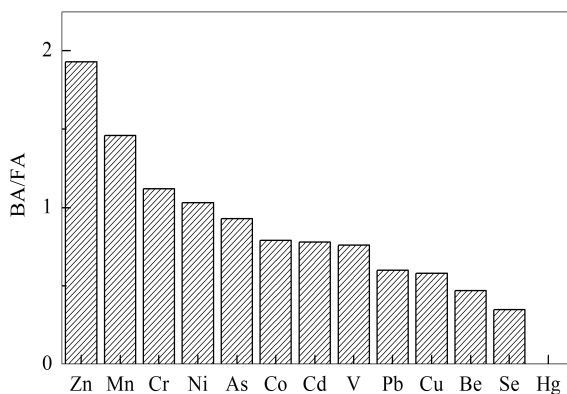


图3 痕量元素在底灰和飞灰中含量的比值

Figure 3 Ratio of trace elements in bottom ash and fly ash

表3 底灰、飞灰及细飞灰中痕量元素的相对富集系数

Table 3 Relative enrichment factor of trace elements in bottom ash, fly ash and fine fly ash

Element	Be	Zn	Hg	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Se	Cd	Pb
BA $E_R$	0.64	1.11	0.00	0.80	0.97	1.25	0.84	0.75	0.51	1.17	0.41	0.61	0.48
FA $E_R$	1.35	0.57	0.09	1.05	0.87	0.86	1.05	0.73	0.88	1.26	1.16	0.79	0.81
FFA $E_R$	1.18	0.68	0.24	1.16	0.99	0.97	1.25	0.85	1.09	1.55	1.48	0.41	0.95

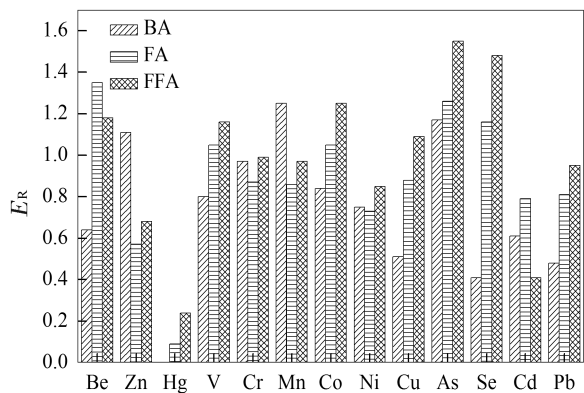


图4 底灰、飞灰及细飞灰中痕量元素的相对富集系数

Figure 4  $E_R$  of bottom ash, fly ash and fine fly ash

除 Be、Cd,其余痕量元素均在细飞灰中表现出更高的富集度,这表明这些元素有向细飞灰富集的趋势。痕量元素在飞灰中表现出富集是因为挥发性元素在燃烧过程中先挥发释放,随着烟气温度的降低,向飞灰颗粒表面冷凝<sup>[16]</sup>,飞灰粒径越小,比表面积越大,富集越明显。Hg 在底灰和飞灰中相对富集系数均很低,表明 Hg 在整个燃烧过程中全部挥发成气态形式。细飞灰中 Hg 的富集程度较飞灰明显增加,说明气态 Hg 有向细小飞灰富集的趋势。由图3还可以看出,除 Be、Cd,其他痕量元素均有向小

$$E_R = \frac{w_{in}}{w_{ic}} \times A \quad (1)$$

式中, $w_{in}$ 为底灰或飞灰中某元素的含量, $w_{ic}$ 煤中某元素的含量, $A$ 为煤灰分。

表3为底灰、飞灰及细飞灰中痕量元素的相对富集系数。由表3可知,Be、V、Co、Se在底灰中相对富集系数小于1,在飞灰中的相对富集系数大于1,说明在底灰中这些元素是耗散减少的,在飞灰中是富集的。Zn、Mn与上述的元素迁移规律相反,在底灰中的相对富集系数大于1,而在飞灰中的相对富集系数小于1,说明这些元素在迁移过程中倾向于向底灰中富集。元素Hg、Cd、Pb、Ni、Cu在底灰和飞灰中的相对富集系数均小于1,说明这些痕量元素挥发性较强,在底灰和飞灰中均是耗散的。As则表现出在底灰和飞灰中均富集的特性。

颗粒物中富集的趋势。

## 2.4 痕量元素在CFB锅炉中的迁移分布

表4为痕量元素在CFB锅炉中的富集规律。由图4分析结果表明,痕量元素中Be、V、Co、Se在飞灰中富集,而Zn、Mn等元素富集在底灰中,对于Hg、Cd、Pb、Ni、Cu开始在灰中亏损,后又在细飞灰中富集。

表4 痕量元素的富集特性

Table 4 Trace elements enrichment characteristics

Element	
Enrichment in fly ash	Be, V, Co, Se, Hg, Cd, Pb, Ni, Cu
Enrichment in bottom ash	Zn, Mn
No fractionation	Cr, As

Bhangare等<sup>[17]</sup>对印度五个热电厂做了痕量元素迁移的研究,实验表明As、Hg、Zn属于易挥发元素,在燃烧过程中以气态形式挥发进入到烟气中,Co、Ni、Cr、Fe、Pb和Cu倾向于在飞灰中富集。其中, $E_R$ (Mn)在底灰中的富集系数可以达到8以上,相比本次实验中 $E_R$ (Mn)只有1.25。而Co、Pb等元素在飞灰中的相对富集系数为2.0~3.0,而本次实验结果也只有1.00左右。Querol等<sup>[13]</sup>对西班牙

某1 000 MW燃煤锅炉进行了实验,结果表明,As、Cd、Hg、Mo、Pb、Se、Sb在飞灰中表现出富集性,Cu、Mn在底灰中表现出富集性,Be、V、Cr、Co、Ni、Zn等则在飞灰或底灰中不表现出富集性。文献[13]与本实验结果相比,绝大部分痕量元素的分布、富集规律相似,但是对于元素As、Zn则表现出不同的富集特性,本次实验结果中As在底灰和飞灰中的富集均很高,考虑是钙氧化物的影响;而Zn在底灰中表现出较高的富集性,在飞灰中表现出亏损。整体而言,相对于粉煤炉来说,痕量元素在CFB锅炉中表现出了不同的富集特性。锅炉的工况对于元素的分布、富集有较大影响。岳勇等<sup>[18]</sup>进行了不同煤燃烧源痕量元素分布的对比实验,发现痕量元素在CFB中没有明显的富集作用,在飞灰中的分布与煤灰分特性更加相关,相同的元素在粉煤炉和CFB中的富集性可以相差5倍左右。如As在CFB锅炉中富集系数为6,在粉煤炉中可以达到30,同时一些在粉煤炉中表现较弱富集性的Ni、Co、Cu、Cr( $E_R=4\sim 7$ ),在CFB锅炉中 $E_R$ 约为1。CFB炉内温度为900℃左右,而粉煤炉的炉内温度一般为1500℃左右,这使得CFB燃煤锅炉不同于煤粉炉中元素在燃烧过程中的挥发、凝结、重新分配的过程;且矿物分析表明,飞灰、底灰中具有较多的钙氧化物,这可能是煤中的物质,也有可能是喷入炉中的固硫剂,而As对生石灰具有较大的亲和性,可能是这些较易挥发元素在底灰中富集系数接近1的原因之一。张娟等<sup>[19]</sup>认为,Hg即使在低温情况下,也会以气态形式排放,本次实验中Hg的低富集性证明了这一点,即Hg基本都是以气态形式排放。而Pb在低温下有部分挥发,Cr元素在整个过程中含量变化不明显,也与本次实验结果基本吻合。

由图3还可知,根据痕量元素在底灰和飞灰的相对富集系数以及所研究的13种元素在低温CFB锅炉中的迁移行为,将这些元素分为三类:A类( $E_R<0.1$ ),主要是以气态形式排放元素Hg;B类( $0.1<E_R\leq 0.85$ ),较易挥发元素As、Be、Ni、Cu、Se、Cd、

Pb、Co、V;C类( $E_R>0.85$ ),主要残留在固体产物中元素Zn、Mn、Cr。

### 3 结论

在CFB燃煤锅炉较低的炉温条件下,痕量元素的迁移、富集与粉煤炉等产生较大差异。如Zn并没有在飞灰中富集,As在底灰中无耗散,表明CFB燃煤锅炉的工况会对元素的迁移产生影响。温度对于痕量元素在燃烧过程中的迁移与富集起决定性作用,即使在粉煤炉中呈现高富集态的元素,在CFB中也会表现得不明显。CFB是一种清洁的燃烧方式,对燃煤过程中痕量元素的挥发、释放有较为明显抑制的作用。

Meij提出的相对富集系数能够更直观地表现元素在燃煤产物中的富集情况。Be、V、Co、Se在底灰中耗散,在飞灰中富集;Zn、Mn更倾向于在底灰中富集;元素Cd、Pb、Ni、Cu挥发性较强,在底灰和飞灰中均是耗散的。As受钙氧化物的影响,表现的挥发性并不明显。Hg在底灰和飞灰中相对富集系数均很低,表明Hg在整个燃烧过程中以气态形式排放

Zn、Hg、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、As、Se、Pb均有向细小颗粒富集的趋势,说明这些元素具有先挥发,后凝结在细小颗粒上的特性。元素的含量随飞灰粒径减小而增加,这与其他电厂实验结论相似。痕量元素富集在细小飞灰颗粒中,而电厂除尘器对这些颗粒的除尘效果有限,这对于环境和人体健康都是潜在的威胁。Hg、As、Se等易挥发元素在细小颗粒中富集明显,因此,细小飞灰的除尘对Hg、As、Se等有害痕量元素的控制具有重要意义。

根据痕量元素在底灰和飞灰的相对富集系数以及所研究的13种元素在低温CFB锅炉中的迁移行为,将这些元素分为三类:A类( $E_R<0.1$ ),主要是以气态形式排放元素Hg;B类( $0.1<E_R\leq 0.85$ ),较易挥发元素As、Be、Ni、Cu、Se、Cd、Pb、Co、V;C类( $E_R>0.85$ ),主要残留在固体产物中元素Zn、Mn、Cr。

### 参考文献

- [1] A study of hazardous air pollutant emission from electric utility steam generating units[J]. U. S. Government Printing Office: Washington, DC, 1998.
- [2] SPEARS D A, MARTINEZ-TARRAZONA M R. Trace elements in combustion residues from a UK power station[J]. Fuel, 2004, **83**(17/18): 2265-2270.
- [3] HUANG W H, JIN B S, ZHONG Z P, XIAO R, TANG Z Y. Trace elements (Mn, Cr, Pb, Se, Zn, Cd and Hg) in emission from a pulverized coal boiler[J]. Fuel Process Technol, 2004, **86**(1): 23-32.
- [4] VEJAHATI F, XU Z, GUPTA R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization-a review[J]. Fuel, 2010, **89**(4): 904-911.
- [5] 郑剑铭,周劲松,何胜,骆仲泮.燃煤电厂汞排放对周边环境的影响[J].化工学报,2009, **12**(60): 3104-3111.

- (ZHENG Jian-ming, ZHOU Jin-song, HE Sheng, LUO Zhong-yang. Environmental impact of mercury emission from a coal-fired power plant [J]. *CIESC Journal*, 2009, **12**(60): 3104-3111.)
- [6] IZQUIERDO M, QUEROL X. Leaching behavior of elements from coal combustion fly ash; An overview[J]. *Int J Coal Geol*, 2012, **94**: 54-66.
- [7] ROY B, CHOO W L, BHATTACHARYA S. Prediction of distribution of trace elements under oxy-fuel combustion condition using Victorian brown coals[J]. *Fuel*, 2012, in press.
- [8] CLEMENS A H, DAMIANO L F, GONG D, MATHESON T W. Partitioning behavior of some toxic volatile elements during stoker and fluidized bed combustion of alkaline subbituminous coal[J]. *Fuel*, 1999, **78**(12): 1379-1385.
- [9] DAS A K, CHAKRABORTY R, GUARDIA M, CERVERA M L, GOSWAMI D. ICP-MS multielement determination in fly ash after microwave-assisted digestion of samples[J]. *Talanta*, 2001, **54**(5): 975-981.
- [10] 王琿, 宋蕾, 姚强, 陈昌和, 俞非滢. 微波消解与 ICP-OES/ICP-MS 测定飞灰中的多种元素[J]. *光谱实验室*, 2012, **29**(1): 525-528. (WANG Hui, SONG Qiang, YAO Qiang, CHEN Chang-he, YU Fei-lu. The determination of multiple elements in fly ash with Microwave digestion and ICP-OES/ICP-MS[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, **29**(1): 525-528.)
- [11] WANG J, NAKAZATO T, SAKANISHI K. Microwave digestion with HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mixture at high temperatures for determination of trace elements in coal by ICP-OES and ICP-MS[J]. *Anal Chim Acta*, 2004, **514**(1): 115-124.
- [12] 徐文东, 曾荣树, 叶大年, QUEROL X. 电厂煤燃烧后元素硒的分布及对环境的贡献[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 64-68. (XU Wen-dong, ZEN Rong-shu, YE Da-nian, QUEROL X. Distributions and environmental impacts of Selenium in wastes of coal from a power plant[J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(2): 64-68.)
- [13] QUEROL X, FERNHNDEZ-TURIEL J L, LOPEZ-SOLER A. Trace elements in coal and their behavior during combustion in a large power station[J]. *Fuel*, 1995, **74**(3): 331-343.
- [14] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 张军营, 雒昆利. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 82-83. (REN De-yi, ZHAO Feng-hua, DAI Shi-feng, ZHANG Jun-ying, LUO Kun-li. Trace elements geochemistry in coal[M]. Beijing: Science Press, 2002: 82-83.)
- [15] MEIJ R. Trace element behavior in coal-fired power plants[J]. *Fuel Process Technol*, 1994, **39**(1): 199-217.
- [16] PEDERSEN J A, OTTOSEN L M, VILLUMSEN A. Electrolytic removal of heavy metals from different fly ashes influence of heavy metal speciation in the ashes[J]. *J Hazard Mater*, 2003, **100**(1): 65-78.
- [17] BHANGARE R C, AJMAL P Y, SAHU S K, PANDIT G G, PURANIK V D. Distribution of trace elements in coal and combustion residues from five thermal power plants in India[J]. *Int J Coal Geol*, 2011, **86**(4): 349-356.
- [18] 岳勇, 姚强, 宋蕾, 李水清, 王琿. 不同煤燃烧源排放的 PM10 形态及重金属分布的对比研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, **27**(35): 33-38. (YUE Yong, YAO Qiang, SONG Qiang, LI Shui-qing, Wang Hui. Comparative study on PM10 microstructure and heavy metals distribution in emissions of coal combustion sources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, **27**(35): 33-38.)
- [19] 张娟, 陆继东, 余亮英, 王世杰, 张步庭. 煤中痕量元素在低温燃烧下的分布规律[J]. *工程热物理学报*, 2003, **24**(3): 531-533. (ZHANG Juan, LU Ji-dong, YU Liang-ying, WANG Shi-jie, ZHANG Bu-ting. Distribution of trace elements in coal combustion with low temperature[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, **24**(3): 531-533.)