

不同煤燃烧源排放的PM₁₀形态及 重金属分布的对比研究

岳勇, 姚强, 宋蔷, 李水清, 王琿

(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)

Comparative Study on PM₁₀ Microstructure and Heavy Metals Distribution in Emissions of Coal Combustion Sources

YUE Yong, YAO Qiang, SONG Qiang, LI Shui-qing, WANG Hui

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Three different sources of fly-ash particles were directly sampled from a pulverized coal-fired (PC) boiler, a coal-water mixture fired (CWM) boiler and a circulating fluidized bed (CFB) boiler in flue by 8-stage Andersen impactor with aerodynamic diameter separation. Characteristics of samples in different stages were analyzed by means of a scanning electron microscopy (SEM) and an inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The microstructures of PM₁₀ and enrichment quantities of 8 elements (As, Pb, Cr, Cd, Ni, Co, Cu, Zn) in different size particles were studied. The results show that over 90% of PM₁₀ particulates from PC and CWM boilers are in regular spherical. However, the particulates from CFB boiler are mainly irregular, flake-like and floccus-like in shape. The result of eight elements enrichments in fly-ash particles is As>Pb>Cd, Zn>Ni>Co>Cu, Cr. Enrichment quantities of elements fold increase with decreasing of particle size in PC and CWM boilers. The relative enrichment factor of As is 30 and 23 in PC and CWM at the last stage, it of Pb is 16 and 13, and Ni, Co, Cu, Cr have enrichment times of 4-8. While in CFB boiler, there is nearly no enrichment of elements due to low operating temperature.

KEY WORDS: PM₁₀; scanning electron microscopy; heavy metals; coal combustion

摘要: 对3种煤燃烧源(煤粉炉、水煤浆炉和CFB炉)形成的飞灰颗粒直接进行了烟道源环境采样,使用8级Andersen撞击器按空气动力学粒径分级采集样品。分级的样品进行

SEM(扫描电镜)和ICP-AES(电感耦合等离子原子发射光谱仪)分析,获得颗粒物的微观形态和8种元素(As、Pb、Cr、Cd、Ni、Co、Cu、Zn)在不同粒径飞灰上的分布富集数据。结果显示,煤粉炉和水煤浆炉的PM₁₀微观形态以球形颗粒为主,数量超过90%,但CFB炉中则以不规则、片状和絮状颗粒为主。煤燃烧中元素富集特性的强弱结果为:As>Pb>Cd、Zn>Ni>Co>Cu、Cr。煤粉炉和水煤浆炉中,元素随粒径减小以成倍速度富集,最末级(粒径最小)上As的相对富集因子分别为30、23,Pb的相对富集因子为16和13,Ni、Co、Cu、Cr也有4-8倍的富集;CFB炉中元素无明显富集现象,燃烧温度是主要影响因素。

关键词: PM₁₀; 扫描电镜; 重金属; 煤燃烧

0 引言

我国绝大多数城市空气中的首要污染物都是可吸入颗粒物(PM₁₀),其中PM_{2.5}的污染问题十分严重^[1]。据研究,包括煤等在内的各种燃烧源是大气环境中可吸入颗粒物的最主要来源^[2-3]。微观显微形态和重金属元素富集是国内外研究者对煤燃烧形成细颗粒物特性的两个研究热点^[4-8]。在高温煤粉燃烧情况下,无论是在亚微米还是超微米范围内,燃烧后的飞灰颗粒物超过95%都是具有相对光滑表面的球形颗粒,另有一些是表面熔结在一起的细小颗粒的团聚体,其中光滑的球颗粒主要成分是硅铝酸盐,或者是黄铁矿晶体^[9]。煤燃烧过程中痕量重金属元素的排放与飞灰颗粒具有很大的关联性,燃烧后的降温冷却过程中,金属蒸气的浓缩凝结行为极大地影响金属元素在飞灰颗

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2002CB211606)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2002CB211606).

粒上的分配和富集的情况,具有高比表面积的亚微米颗粒上浓缩了更高比例的金属蒸气^[10-12]。

国内也有研究者对煤粉炉排放颗粒物开展了研究工作^[13-16],其中刘建忠等研究了煤粉细度、锅炉负荷等因素对煤粉炉排放颗粒特性的影响。但迄今对CFB(循环流化床)炉和水煤浆炉产生的颗粒物特性的研究尚未较好开展,特别是对不同煤燃烧源排放颗粒物特性的对比研究工作,国内外还鲜有文献报导,而且对不同煤燃烧源产生颗粒物的特性目前仍没有完全认识清楚。鉴于此,本文以颗粒物的分粒径采样为手段,对3不同燃煤可吸入颗粒物源(煤粉炉、CFB炉和水煤浆炉)形成的颗粒物进行了对比研究,特别是颗粒物的微观显微形态和痕量重金属元素的浓缩富集规律,从而为可吸入颗粒物的污染控制提供参考。

1 实验

1.1 采样

固定燃烧源PM₁₀的采样方法有两种:源环境采样和稀释后的大气环境采样,本文使用Andersen公司的8级烟道撞击器,直接进行源环境采样,这样得到的分级颗粒物更可靠,更接近于烟道中颗粒物的真实情况。具体采用EPA Method 17(美国),将撞击器置于烟道中,在烟气环境中直接分级收集颗粒物,然后固定于滤膜上,这样避免了稀释过程对颗粒物采样所带来的任何影响。其中8级颗粒物的分级粒径范围,由第1级到第8级分别是:17.54~10.97、10.97~7.48、7.48~5.08、5.08~3.29、3.29~1.65、1.65~1.05、1.05~0.71、0.71~0.1μm,级数越高颗粒粒径越小。实验采样的煤燃烧源为某煤粉炉、CFB炉和水煤浆炉,装机容量分别为12、135和50MW,本文对上述3燃烧源的锅炉出口颗粒物进行了对比研究,采样时的锅炉运行工况皆为满负荷。

1.2 燃料特性和样品分析

实验采样的煤粉炉和水煤浆炉所用燃料皆为烟煤,CFB炉燃烧的是灰分较高的低品质烟煤,煤的工业分析如表1所示,煤的元素分析结果见表2。

实验采样前的称量瓶和滤膜的预处理,采样步骤和方法均严格按照国标及EPA(美国环保署)的方法执行。采样后的分级颗粒物样品、玻璃纤维滤膜和称量瓶都在105℃的烘箱中烘干1h,然后在干燥器中冷却至室温,用十万分之一天平称重得到质量

粒径分布,这样可避免因水分和静电力带来的误差。对各级颗粒物做SEM-EDX(场发射扫描电镜-X射线能谱)分析,来观察分析颗粒物的微观显微形态。对颗粒物做ICP-AES(电感耦合等离子原子发射光谱仪)和ICP-MS(电感耦合等离子质谱仪)测试,分析其中的元素含量等化学成分信息,在化学成分的ICP测试中,剔除多次重复测量中的相对标准差大于2%的数据。

表1 燃料煤的工业分析

| 燃烧源类型 | w(M _{ar})/% | w(V _{ar})/% | w(A _{ar})/% | w(C _{ar})/% | Q _{net} /(kJ/kg) |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 煤粉炉 | 7.18 | 27.22 | 13.02 | 52.58 | 25373 |
| CFB炉 | 7.24 | 17.75 | 32.58 | 42.43 | 19334 |
| 水煤浆炉 | 5.50 | 31.51 | 12.36 | 50.63 | 23867 |

表2 燃料煤的元素分析

| 燃烧源类型 | w(C _{ar})/% | w(H _{ar})/% | w(N _{ar})/% | w(O _{ar})+w(S _{ar})/% |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| 煤粉炉 | 63.77 | 3.66 | 1.03 | 7.86 |
| CFB炉 | 48.89 | 1.95 | 0.89 | 9.17 |
| 水煤浆炉 | 59.38 | 3.98 | 1.10 | 10.16 |

2 结果与讨论

2.1 PM₁₀微观形态对比分析

对每级颗粒物进行扫描电镜分析,得到反映颗粒物微观形貌的SEM图像,煤粉炉颗粒物的微观形态图见图1,选取具有代表性的第5、6、7和8级来说明。从图1(a)~(d)发现,随着级数的增加,颗粒物的粒径越来越小,第6级的平均粒径只略大于1μm,而从第7级开始都为小于1μm的细颗粒物,另外每级的颗粒物粒径较均一,满足分级的粒径范围,说明按空气动力学粒径的分级效果明显。图2是煤粉炉第5级颗粒物的能谱图。

从图1和图2可发现,煤粉炉形成的PM₁₀以硅铝质和铁质的球形颗粒为主,特别是实心微珠,数量超过95%。这些规则的球形颗粒大部分是在煤燃烧中经过熔融过程形成的,即煤粉炉中的1400℃高温大于灰熔点,燃烧过程中灰颗粒会变成熔融状态,燃烧后随着温度的降低,由于表面张力的作用颗粒会凝结成规则的球形。另外,灰分中的半挥发性金属元素在1400℃高温燃烧过程下还会发生蒸发-成核-凝结/凝聚过程,即通过蒸发、成核、凝聚直接形成亚微米颗粒;或者经过异相凝结、表面反应被大比表面积颗粒吸附,形成超微米颗粒(PM₁₋₁₀),这一过程形成的颗粒一般也为球形^[17]。从图1(d)可看出,第8级基本都是200~300nm颗粒,具有均一规

则球体的微观形貌，这些超细颗粒则大部分是经过蒸发-成核-凝聚过程形成的。

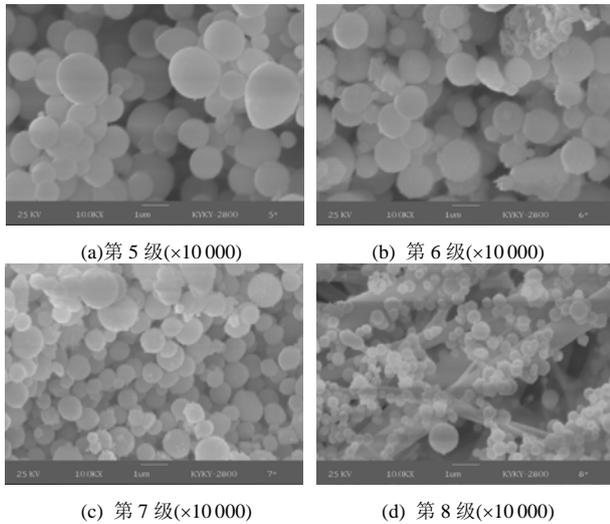


图 1 煤粉炉的颗粒物微观形态
Fig. 1 Microstructure of PM from PC boiler

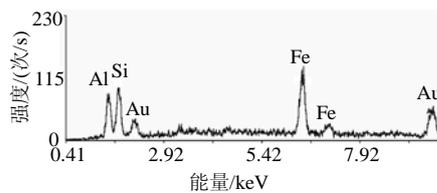


图 2 煤粉炉的颗粒物能谱图(第 5 级)
Fig. 2 Energy dispersive spectrum of PM (stage 5) from PC boiler

CFB炉的颗粒物微观形态见图 3，列举了典型的第 4、5、7 和 8 级来讨论分析。对比图 1 和图 3，发现CFB炉形成的PM₁₀的微观形态与煤粉炉有较大差异，以不规则形状、片状、絮状和颗粒物团聚体为主，只第 8 级存在少量球形颗粒。从图 3(a)至 3(d)，颗粒物的平均粒径在减小，但颗粒的形态无明显变化，上述各种形状颗粒都不同程度存在。CFB炉和煤粉炉PM₁₀形态的巨大差异，说明细颗粒在CFB中的形成过程和煤粉炉不同，由于燃烧温度只有 850℃，灰中无机组分不会熔融，金属元素更绝大部分不会蒸发，熔融过程和蒸发-成核-凝聚机制在CFB炉中都受到极大的抑制。在CFB中，图 3(a)~ (b)中的超微米颗粒物(3.29~5.08, 1.65~3.29 μm)大部分是经过破碎和磨损机制形成的，即煤颗粒经过一次、二次破裂形成焦炭颗粒，随着焦炭燃烧，会崩裂破碎形成更小的灰颗粒，灰颗粒经过CFB中剧烈碰撞运动下的磨损过程形成不同形状的颗粒。图 3(d)中的亚微米颗粒物中有极少量的球形颗粒，从文献中发现CFB中有两条平行的亚微米颗粒生成途径，其一是破碎的颗粒及床料的超细磨损，其二是蒸发-

成核-凝结机制，Valmari发现生物质在CFB中燃烧第 2 条途径占优，生物质中含有较多高挥发性成分，其SEM图中存在较多球形颗粒^[18-19]，而本研究中由于CFB的低温，使第 2 条途径受到抑制，第 1 条途径是亚微米颗粒的主要形成途径。

水煤浆炉的颗粒物微观形态如图 4 所示，选取第 5、6、7 和 8 级来说明。从图 1、图 3 和图 4 的比较中可以发现，水煤浆炉PM₁₀的微观形态和煤粉炉较为相近，而与CFB炉则差别较大。水煤浆炉形成的颗粒物中，球形颗粒也占较大比重，接近 90%，另外一些为块状、絮状等颗粒，图 4(c)~(d)中的小于 1 μm 细颗粒物中，光滑球形颗粒比例相对超微米略有增加。总之，水煤浆炉的颗粒物微观形态和煤粉炉相似，只是光滑球形颗粒的比例略有减少，这主要由于煤颗粒在水煤浆炉中的燃烧过程与

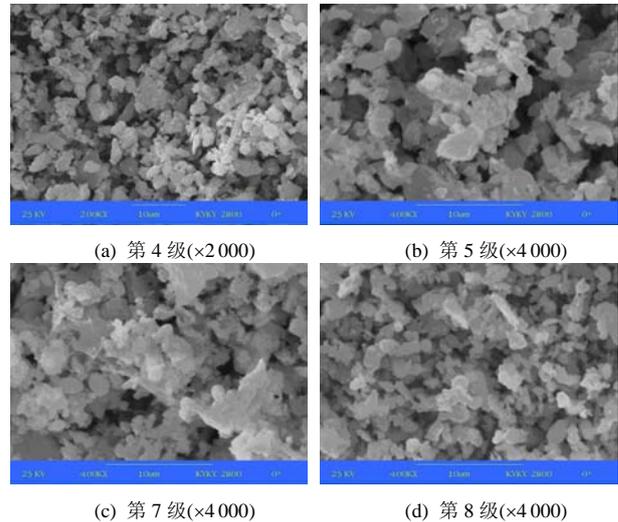


图 3 CFB 炉的颗粒物微观形态
Fig. 3 Microstructure of PM from CFB boiler

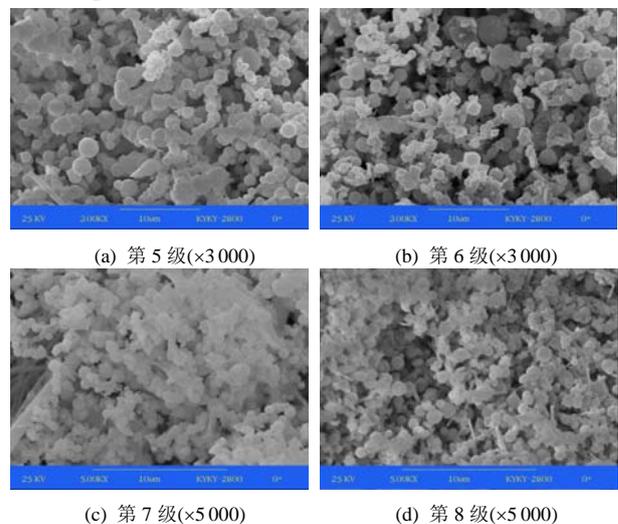


图 4 水煤浆炉的颗粒物微观形态
Fig. 4 Microstructure of PM from CWM boiler

煤粉炉接近,只是燃烧温度略低一些,同时浆液中含有添加剂产生的影响。

2.2 痕量重金属元素的粒径频度分布

煤燃烧过程中痕量重金属元素会发生蒸发过程,继而随着温度降低会在细颗粒上浓缩富集;这同时还要依赖于元素的单质或其氧化物的挥发性行为强弱,元素的挥发性越强,在小颗粒上的富集越明显^[10]。相对富集因子为^[20]

$$R_{ij} = C_{ij} / C_{i1} \quad (1)$$

其中, C_{ij} 为某种痕量元素 i 在第 j 级飞灰颗粒上的质量含量, $\mu\text{g/g}$, $j=1,2,\dots,8$ 。

相对富集因子 R 反映了在各级颗粒物上的元素浓缩富集程度,相对富集因子越大,说明富集程度越强。同一级上某种元素的相对富集因子越大,说明该元素的挥发性越强,在燃烧过程中的挥发富集过程越显著。

煤粉炉和水煤浆炉中随粒径频度变化的元素相对富集因子如图5所示。可以发现,在煤粉炉和水煤浆炉中,本实验研究的痕量元素都随粒径的减小发生了明显的富集现象,而且大致可以把元素分为3组,这充分反映了元素在煤燃烧过程中发生的挥发富集过程的强弱。对于煤粉炉,强挥发组(图6(a)): As,从第一级(粒径最大)到最后一级(粒径最

小)相对富集因子 R 增加到近30;中挥发组(图6(b)): Pb、Cd、Zn,到最后一级 R 递增至约10~15;弱挥发组(图6(c)): Cu、Cr、Co、Ni,到最后一级 R 只增加到4~7。对于水煤浆炉,强挥发组(图6(d)): As,相对富集因子 R 增加到22.8,比煤粉炉中小;中挥发组(图6(e)): Pb, R 递增至12.8,小于煤粉炉中的15.9;弱挥发组(图6(f)): Cd、Zn、Cu、Cr、Co和Ni, R 增加到4~8,其中,Cd、Zn的7.8、7.7略小于煤粉炉中的8.4、8.3,Cu、Cr和煤粉炉中接近 R 在4左右,只有Co、Ni比煤粉炉中略大。

从图5的煤粉炉和水煤浆炉元素富集对比分析中发现,共同的规律是:元素在飞灰颗粒中随着粒径的减小而富集;由本文的定量实验结果和文献[10]中元素本身挥发性强弱的定性数据发现,元素的富集程度正相关于它们的挥发性。煤粉炉和水煤浆炉元素富集的差异是:元素在水煤浆炉中的富集程度略小于煤粉炉,即相同元素在水煤浆炉中的相对富集因子小于煤粉炉,在图5中基本得到体现。这主要是由于水煤浆炉的燃烧温度比煤粉炉略低约200℃,只有1200℃多,相应的元素蒸发情况小于煤粉炉,这也影响到最终的元素浓缩富集。

图6是CFB炉中的元素在不同粒径飞灰颗粒上的质量浓度,和图5对比发现,元素的富集现象并不如煤粉和水煤浆炉中那么明显,元素大多是一种相对均衡或波动的形式在不同粒径颗粒上分布。图6(a)中的Cr、Ni浓度随粒径减小先增后降再增,基本在100~250 $\mu\text{g/g}$ 之间波动;Cd、Cu在0.1~17 μm 之间浓度基本均一。针对Cd、Cu、Cr和Ni的特性,结合CFB炉中的燃烧温度较低(850℃),可看出其在CFB中基本没有经历蒸发过程,元素的大致迁移途径如下:CFB中经过破碎和崩裂过程,以及焦炭的燃烧,会产生许多小的灰颗粒,煤中的痕量元素也包含在这些灰颗粒中,然后这些灰颗粒再经过剧烈的机械碰撞、磨损磨耗等物理过程形成现在的元素分布情况。即元素在飞灰颗粒中的分布更相关于它在初始状态煤灰分中的分布,绝大部分还停留在原来的化学状态下,而不像在煤粉炉中,由于蒸发作用在飞灰颗粒上有一个重新分配的过程。

从图6(b)发现,在煤粉炉中已证明的高挥发性元素As、Pb等从17 μm 到小于1 μm 浓度略增加2~5倍,有较弱的富集,将其转换成相对富集因子 R 如图7所示。从图7中看出,As在最末级的 R 约为6,是煤粉炉的1/5;Pb、Zn相应的 R 只是煤粉炉的1/3;

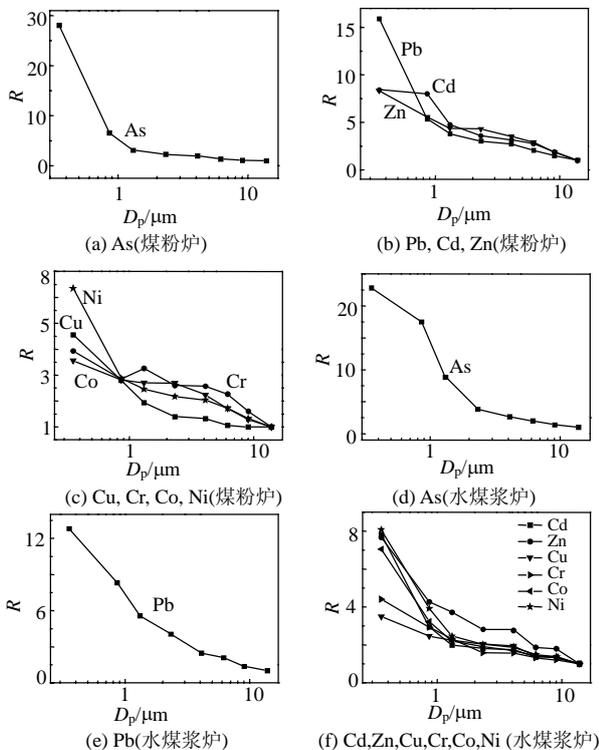


图5 煤粉炉和水煤浆炉的元素相对富集因子 R
Fig. 5 Relative enrichment factors of elements from PC boiler and CWM boiler

Co 相应的 R 也远小于煤粉炉中。本结果也说明了本文 2.1 中提到的在 CFB 炉中蒸发-成核-凝结机制受到抑制的结论，从元素的分布数据看出，Cd、Cu、Cr、Ni 在燃烧中基本没有发生蒸发过程，而 As、Pb、Zn 也只发生了极少部分的蒸发。总之，在 CFB 炉中没有形成明显的元素富集规律，只有极少数高挥发性的元素有轻度的富集特性，这是和煤粉炉、水煤浆炉元素粒径频度分布的典型差异。

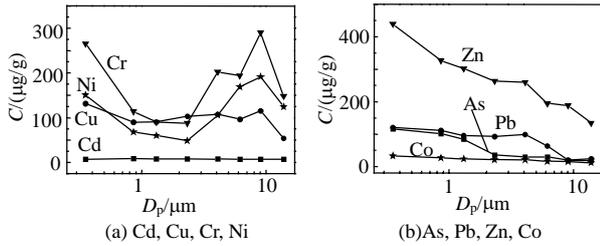


图 6 痕量元素在颗粒物中的质量浓度(CFB 炉)
Fig. 6 Mass concentrations of trace elements in PM from CFB boiler

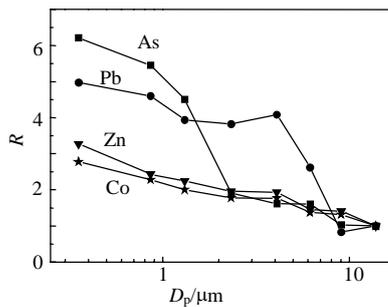


图 7 CFB 炉的元素相对富集因子 R
Fig. 7 Relative enrichment factors of elements from CFB boiler

2.3 燃烧温度、挥发性对元素分布富集的影响

煤粉炉、水煤浆炉和 CFB 炉这 3 种不同类型的煤燃烧源自身有一定的区别，包括燃烧温度的不同、燃烧器类型和燃烧系统结构的不同、以及煤成分的差异等，但对于形成的 PM₁₀ 颗粒中痕量元素分布和富集的影响，燃烧温度应该是其中最主要的一个参数。同时，元素自身挥发性也直接影响到燃烧过程中元素的挥发、蒸发行为，继而对后续的浓缩凝结产生影响，造成元素分布富集的差异，可见自身挥发性的强弱也是影响元素分布富集行为的一个重要参数。本文由实验结果归纳了上述 3 种燃烧源中痕量重金属元素的富集规律，见图 8。从图 8 看出，随着燃烧温度的升高(CFB—水煤浆—煤粉炉)，元素的富集程度增强，高挥发性 As、Pb 的 R 增加 4~5 倍；Cd、Ni、Cu、Cr 从不富集到富集 4~7，发生质的变化，说明从 CFB 到水煤浆炉的燃烧温度提高起了重要作用。随着挥发性的增强，元素的富集以正

相关发生变化，在 CFB 中从不富集到弱富集；在水煤浆和煤粉炉中相对富集因子 R 以成倍的速度递增。综合上述 3 种燃烧源的实验结果，本文发现煤燃烧过程中 8 种元素的富集特性强弱为：As>Pb>Cd、Zn>Ni>Co>Cu、Cr。

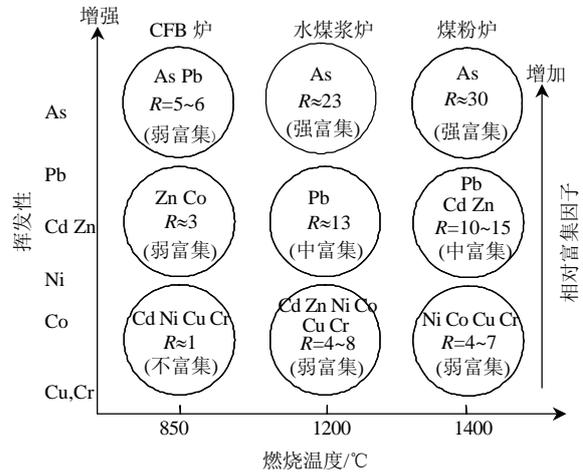


图 8 煤粉炉、水煤浆炉和 CFB 炉中的元素富集规律
Fig. 8 Enrichment of eight elements in PM from PC boiler, CWM boiler and CFB boiler

3 结论

(1) 煤燃烧形成的 PM₁₀ 颗粒物的微观形态：煤粉炉中细颗粒物多以硅铝质和铁质的球形颗粒为主，特别是实心微珠，数量超过 95%；水煤浆炉的颗粒物微观形态和煤粉炉相似，只是光滑球形颗粒的比例略有减少，数量接近 90%；CFB 炉的 PM₁₀ 微观形态与煤粉炉、水煤浆炉差别较大，以不规则形状、片状、絮状和颗粒物团聚体为主。

(2) 从 3 种燃烧源 PM₁₀ 微观形态的差异可发现：煤粉和水煤浆炉中存在熔融过程和蒸发-成核-凝结机制，形成的颗粒中球形也较多；而在 CFB 炉中上述过程受到抑制，剧烈的破碎和磨损等过程形成了各种形状的颗粒，特别是对于小于 1µm 的超细颗粒，破碎后的颗粒及床料的超细磨耗在其形成过程中占优。

(3) 8 种元素在煤粉和水煤浆炉中随着粒径的减小以成倍的速度发生富集，元素在同一粒径上的富集程度正相关于它们的挥发性，相同元素在水煤浆炉中的富集量略小于煤粉炉中，主要是燃烧温度的影响(低 200℃)。其中 As、Pb 在煤粉炉中 R 约为 30、16，水煤浆炉中只有 23、13；Cd、Zn 也从近 10 降到 7.8 左右。

(4) 在 CFB 炉中元素没有明显的富集现象，

在飞灰颗粒中的分布更相关于在煤灰分中的初始状态, 主要是 CFB 炉燃烧温度较低(850℃), 不同于煤粉炉中由于蒸发作用元素在颗粒中有一个重新分配的过程。但高挥发性的 As、Pb 由于挥发温度较低, 在 CFB 中也有弱的富集, R 为 5~6。

(5) 燃烧温度对痕量元素分布富集的影响是决定性的, 随着温度的升高, Cd、Ni、Cu、Cr 在 CFB 中不富集, 而到水煤浆和煤粉炉中 R 变成 4~8; As、Pb 的 R 也变成原来的数倍。煤燃烧过程中元素的富集特性强弱为: $As>Pb>Cd$ 、 $Zn>Ni>Co>Cu$ 、Cr。

参考文献

- [1] 魏复盛, 滕恩江, 吴国平, 等. 我国 4 个大城市空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染及其化学组成[J]. 中国环境监测, 2001, 17(7): 1-6.
Wei Fusheng, Teng Enjiang, Wu Guoping, et al. Concentrations and elemental components of PM_{2.5}, PM₁₀ in ambient air in four large Chinese cities[J]. Environmental Monitoring in China, 2001, 17(7): 1-6(in Chinese).
- [2] England G C, Zielinska B, Loos K, et al. Characterizing PM_{2.5} emission profiles for stationary sources: comparison of traditional and dilution sampling techniques[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66: 177-188.
- [3] Ohlstrom M O, Lehtinen K E J, Mikko M, et al. Fine-particle emissions of energy production in Finland[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(22): 3701-3711.
- [4] Sandelin K, Backman R. Trace elements in two pulverized coal-fired power stations[J]. Environ. Sci. Technol., 2001, 35(5): 826-834.
- [5] Zhang Chengfeng, Yao Qiang, Sun Junming. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(7): 757-768.
- [6] Buhre B J P, Hinkley J T, Gupta R P, et al. Submicron ash formation from coal combustion[J]. Fuel, 2005, 84(10): 1206-1214.
- [7] Lighty J S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health[J]. J. Air & Waste Manage. Assoc., 2000, 50(9): 1565-1681.
- [8] 刘小伟, 徐明厚, 于敦喜, 等. 燃煤过程中矿物质变化与颗粒物生成的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 104-108.
Liu Xiaowei, Xu Minghou, Yu Dunxi, et al. Coal mineral transformation on emission of particulate matters during coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 104-108(in Chinese).
- [9] Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(2): 109-125.
- [10] Xu Minghou, Yan Rong, Zheng Chuguang, et al. Status of trace element emission in a coal combustion process: a review[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 85(2-3): 215-237.
- [11] Senior C L, Bool L E, 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(2-3): 149-165.
- [12] Reddy M S, Basha S, Joshi H V, et al. Evaluation of the emission characteristics of trace metals from coal and fuel oil fired power plants and their fate during combustion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 123(1-3): 242-249.
- [13] 刘建忠, 范海燕, 周俊虎, 等. 煤粉炉 PM₁₀/PM_{2.5} 排放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 145-149.
Liu Jianzhong, Fan Haiyan, Zhou Junhu, et al. Experimental studies on the emission of PM₁₀ and PM_{2.5} from coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 145-149(in Chinese).
- [14] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设备对 PM₁₀ 排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1921-1927.
Yi Honghong, Hao Jiming, Duan Lei, et al. Influence of dust catchers on PM₁₀ emission characteristics of power plants[J]. Environmental Science, 2006, 27(10): 1921-1927(in Chinese).
- [15] 黄亚继, 金保升, 仲兆平, 等. 痕量元素在煤粉炉中排放特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 205-210.
Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Emission features of trace elements in a pulverized coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 205-210(in Chinese).
- [16] 吕建姝, 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.
Lu 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).
- [17] Linak W P, Wendt J O L. Toxic metal emissions from incineration: mechanisms and control[J]. Prog. Energy Combust. Sci., 1993, 19(2): 145-185.
- [18] Valmari T, Lind T M, Kauppinen E I. Field study on ash behavior during circulating fluidized-bed combustion of biomass. 1. ash formation[J]. Energy & Fuels, 1999, 13(2): 379-389.
- [19] Valmari T, Lind T M, Kauppinen E I. Field study on ash behavior during circulating fluidized-bed combustion of biomass. 2. ash deposition and alkali vapor condensation[J]. Energy & Fuels, 1999, 13(2): 390-395.
- [20] 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 matter size distribution and trace elements enrichment in emissions from a pulverized coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 74-79(in Chinese).

收稿日期: 2007-05-10.

作者简介:

岳勇(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术的研究, yueyong00@mails.thu.edu.cn;

姚强(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 973项目首席科学家, 主要从事燃煤污染控制和燃烧学的研究;

宋蕾(1971—), 女, 博士, 副教授, 主要从事燃烧及污染控制方面的研究。

(编辑 王庆霞)