



推荐阅读:

[我国土地复垦与生态修复 30 年:回顾、反思与展望](#)

[我国采煤沉陷区治理实践与对策分析](#)

[中国煤炭资源高效清洁利用路径研究](#)

[水煤浆制备与应用技术及发展展望](#)

[我国煤基活性炭的应用现状及发展趋势](#)

[煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新](#)

[现代煤化工废水处理研究进展及展望](#)

[煤气化废水处理技术研究进展](#)

[低阶煤热解关键技术问题分析及研究进展](#)

[煤加氢热解及热解焦气化特性试验研究](#)

[煤炭地下气化理论与技术研究进展](#)



移动扫码阅读

倪琳,崔小峰,徐立家,等.燃料煤重金属元素在飞灰及炉渣中的分布与富集研究[J].煤炭科学技术,2020,48(5):203-208. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.05.028

NI Lin, CUI Xiaofeng, XU Lijia, et al. Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 203-208. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.05.028

燃料煤重金属元素在飞灰及炉渣中的分布与富集研究

倪琳^{1,2}, 崔小峰^{1,2}, 徐立家^{1,2}, 林茜¹, 郭坤^{1,2}

(1. 徐州市质量技术监督综合检验检测中心, 江苏 徐州 221018; 2. 江苏省煤炭及煤化工产品质量监督检验中心, 江苏 徐州 221018)

摘要:为研究燃料煤重金属元素在飞灰及炉渣中的分布与富集规律,采集了上海市火电厂、热电厂及化工企业燃煤锅炉的入炉煤、飞灰及炉渣样品,检测了样品中汞、砷、铬、镉、铅等重金属元素含量,研究了飞灰、炉渣中重金属含量与入炉煤中含量的关系,探讨了其分布机制。结果表明:飞灰中的汞含量比入炉煤中的提高了 2~5 倍,炉渣中汞含量较低,燃烧过程中煤中汞在飞灰中发生富集;飞灰中砷含量最高可达入炉煤中的 10 倍,燃烧过程中煤中砷在飞灰中具有明显的富集作用,炉渣与入炉煤中砷含量相当,说明入炉煤中的砷未在炉渣中富集;飞灰中铬含量最高可达入炉煤中的 8 倍,炉渣中铬含量高于飞灰中,燃烧过程中煤中铬元素在飞灰和炉渣中均有明显的富集作用;飞灰中镉含量最高可达入炉煤中的 8 倍,炉渣中镉含量可达入炉煤中的 10 倍以上;飞灰与炉渣中的铅含量显著高于入炉煤,铅在飞灰与炉渣中具有明显的富集作用。同时,测算了上海用煤企业入炉煤、飞灰及炉渣中重金属年产生量与比例,结果表明,汞、砷元素在煤燃烧后,分别有 50.0%、61.7% 富集到飞灰中,而在炉渣中的含量较低;铬、镉、铅元素在飞灰和炉渣中均有较大程度的富集,入炉煤中的铬、镉、铅元素主要随飞灰排出,随飞灰排出的铬、镉、铅元素分别占入炉煤中总量的 76.7%、74.4%、75.1%。飞灰、炉渣是入炉煤中重金属排放的主要途径。

关键词:燃煤锅炉;飞灰;炉渣;汞富集;重金属排放

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)05-0203-06

Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal

NI Lin^{1,2}, CUI Xiaofeng^{1,2}, XU Lijia^{1,2}, LIN Qian¹, GUO Kun^{1,2}

(1. Xuzhou Comprehensive Inspection and Testing Center for Quality and Technology Supervision, Xuzhou 221018, China;

2. Jiangsu Province Coal and Coal Chemical Product Quality Supervision and Inspection Center, Xuzhou 221018, China)

Abstract: In order to study the distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal, the coal, fly ash and slag samples from coal-fired boilers of thermal power plants, heat and power plants and chemical enterprises in Shanghai were collected. The mercury, arsenic, chromium, cadmium and lead content in the samples were tested. The study on the relationship between the content of heavy metals in the coal, fly ash and slag was carried out, and their distribution mechanism was discussed. The results show that mercury content in fly ash is 2~5 times higher than that in the coal. The mercury content in the slag is low. The mercury in coal is enriched in the fly ash during combustion. The arsenic content in the fly ash can reach about 10 times to that in the coal. Arsenic has a significant enrichment in fly ash during combustion. The arsenic content in slag is equivalent to that in coal, indicating that the arsenic has not been enriched in slag. The chromium content in fly ash can reach up to about 8 times of that in coal. The chromium content in the slag is higher than that in the fly ash. During the combustion process, the chromium element in the coal has a significant enrichment in both fly ash and slag. The cadmium content in fly ash can reach up to about 8 times to that in the coal, and the cadmium content in the slag can reach more than 10 times of that in the coal. The lead content in fly ash and slag is significantly higher than that in coal, indicating the ob-

收稿日期:2019-12-28;责任编辑:代艳玲

基金项目:上海市质量技术监督局指令资助项目(ZJ201610M001);中国煤炭地质总局科技资助项目(ZMKJ-2018-9)

作者简介:倪琳(1963—),男,江苏泰兴人,高级工程师。E-mail: nilin888@126.com

vious enrichment. In addition, the annual amount and proportion of heavy metals in coal, fly ash and slag from coal-fired enterprises in Shanghai were also calculated. The results show that there are 50.0% and 61.7% of the mercury and arsenic from the coal presented in the fly ash after combustion, respectively. There are obvious enrichments of mercury and arsenic in the fly ash, but rare distributions in the slag. The enrichments of chromium, cadmium and lead are observed in both fly ash and slag. The chromium, cadmium and lead in coal are mainly discharged with fly ash. There are 76.7%, 74.4% and 75.1% of the chromium, cadmium and lead in coal discharged with fly ash, respectively. Fly ash and slag are the major ways to discharge heavy metals in the coal.

Key words: coal-fired boiler; fly ash; slag; mercury enrichment; heavy metal elements discharge

0 引言

我国富煤、贫油、少气的能源资源特点决定了在较长时期内,煤炭仍是我国的主要能源。我国煤炭主要用于电力、冶金、化工等行业,消耗量约占全部煤炭消费总量的88%,其中电力行业的燃煤消耗量最大,50%以上煤炭用于燃烧发电^[1]。煤炭燃烧过程中排放的 SO_2 、 NO_x 、CO、可吸入颗粒物、HCl、HF、有机物及重金属等对环境造成严重污染^[1-3],其中重金属元素含量相对较少,但由于经济发达地区用煤量大,长期积累于环境中的重金属仍会影响生态系统和自然环境^[2-5]。

在燃烧过程中,煤中重金属元素经过复杂的物理化学变化后,在燃烧产物中进行重新分配。由于不同重金属的物理化学性质各异,燃烧过程中重金属元素可能富集于飞灰和底渣中,也可能以气体形式排入大气,大部分微量元素可被静电除尘系统和布袋除尘系统有效捕获,但挥发性强的元素及其化合物难以被捕获,随烟气直接排放到大气中,因此研究燃煤电站中不同重金属污染物的迁移规律具有重要意义^[6-7]。MEIJ等^[8]对燃煤电站的重金属排放情况进行了长期跟踪,发现大多数元素的排放因子与已有研究成果相一致;LINNIK等^[9]定量分析了燃煤电站周边环境中的重金属的富集情况,土壤中的重金属含量排序为: $\text{Mn} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Co}$;程俊峰等^[10]从煤中微量重金属元素的分布特征及元素的化学亲和性、飞灰颗粒的产生机理、气溶胶动力学模型等方面研究了燃烧过程中微量重金属元素的特性,并提出控制方法,包括选煤、燃烧调整、添加吸附剂及改善现有除尘设备等;吴晓龙^[11]分析了5个不同电厂飞灰中5种重金属元素的赋存形态,研究表明,汞、铅主要以残渣态形式存在,较稳定,砷、镉、铬的形态分布较均匀,比汞、铅的稳定性低。袁晓东^[12]对11家燃煤电站的入炉煤、粉煤灰、炉渣和石膏样品中砷赋存进行了测定,发现砷基本上均以残余态形式存在。以上研究主要针对煤中微量有害元素的含量、特性及环境中富集情况,而未对区域性燃

煤中重金属的迁移规律进行研究。目前国内外颁布的重金属排放标准给出了烟气中重金属的排放限值,对重金属排放的研究大多主要集中在降低烟气中重金属含量的方法^[13],而对飞灰、炉渣中重金属排放控制的研究较少。笔者针对上海市火电厂、热电厂及化工企业燃煤锅炉的入炉煤、飞灰、炉渣中的重金属含量进行分析,探讨入炉煤中重金属在飞灰、炉渣中的分布与富集规律,定量分析了上海市燃煤中重金属排放流向,以期为燃煤中重金属排放管控政策制定与治理提供依据。

1 试验

1.1 样品采制

煤、飞灰、炉渣样品来源于上海市具备脱硫脱硝能力的燃煤锅炉,以上海申能集团有限公司、上海电力股份有限公司、上海华能有限公司下属发电厂为主,还包括部分热电厂、化工企业,涵盖浦东新区、金山区、闵行区、宝山区、青浦区、奉贤区和崇明区等7个区,其中发电和热电企业19家236批次(包括入炉煤、飞灰、炉渣),非电力企业3家36批次(包括入炉煤、飞灰、炉渣),合计22家272批次。

根据GB 475—2008《商品煤人工采取方法》和GB/T 19494.1—2004《煤炭机械化采样第1部分:采样方法》进行采样;根据GB 474—2008《煤样的制备方法》、GB/T 19494.2—2004《煤炭机械化采样第2部分:煤样的制备》进行制样。

1.2 检验方法

入炉煤、飞灰及炉渣中汞、砷、铬、镉、铅含量分别按照GB/T 16659—2008《煤中汞的测定方法》、GB/T 3058—2007《煤中砷的测定方法》、GB/T 16658—2008《煤中铬、镉、铅的测定方法》进行测定。分别采用原子荧光光度计(AFS-933)、紫外分光光度计(Cary100)、火焰-石墨炉原子吸收光谱仪(PinAAcle 900T)进行汞含量、砷含量以及铬、镉、铅含量测定。

入炉煤中汞(Hg)、砷(As)限值依据《商品煤质量管理暂行办法》确定($w(\text{Hg})_d$) $\leq 0.60 \mu\text{g/g}$ 、

$w(\text{As})_{\text{d}} \leq 80 \text{ }\mu\text{g/g}$ 。入炉煤中铬(Cr)、镉(Cd)、铅(Pb)含量分级分别按照 MT/T 965—2005《煤中铬含量分级》、MT/T 1029—2006《煤中镉含量分级》、MT/T 964—2005《煤中铅含量分级》确定。

1.3 重金属元素总量测算方法

入炉煤、飞灰及炉渣中汞、砷、铬、镉、铅总量的计算式为

$$Q = \sum_{k=1}^m \bar{C}_k M_k \times 10^{-6} \tag{1}$$

式中: Q 为入炉煤、飞灰或炉渣中单种重金属总量, t ; \bar{C} 为单个企业入炉煤、飞灰或炉渣中单种重金属含量的平均值, $\mu\text{g/g}$; M 为单个企业入炉煤、飞灰、

炉渣产生量, t/a ; m 为企业数量, $k=1,2,\cdots,m$ 。

2 试验结果与分析

2.1 入炉煤中重金属元素在飞灰与炉渣中的分布

2.1.1 汞

样品来自 22 家企业的入炉煤 92 批次,燃料煤中汞含量见表 1。参照《商品煤质量管理暂行办法》中干燥基汞含量不高于 $0.6 \text{ }\mu\text{g/g}$,入炉煤样品全部达标。按 MT/T 963—2005《煤中汞含量分级》标准,65 批次的入炉煤属于特低汞煤,从源头上减少了汞的排放;3 批次的入炉煤属于高汞煤,煤燃烧产物中的汞对环境存在潜在危害。

表 1 入炉煤样品中的汞含量

Table 1 Mercury content of coal as fired samples

入炉煤汞含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	批次数量						
	浦东新区	金山区	闵行区	宝山区	青浦区	奉贤区	崇明区
>0.400(高汞煤)	0	1	0	0	0	2	0
0.251~0.400(中汞煤)	2	1	2	0	0	2	1
0.150~0.250(低汞煤)	2	2	5	1	1	2	3
≤ 0.150 (特低汞煤)	24	16	7	11	3	4	0

入炉煤中汞含量与飞灰、炉渣中汞含量的关系如图 1 所示。可以看出,飞灰中的汞含量比入炉煤中的提高了 2~5 倍,说明燃烧过程中煤中汞在飞灰中进行富集,主要是由于飞灰中残炭对烟气中汞的吸附^[16]。炉渣中汞含量较低,其中 12 家企业的炉渣中未检出汞。煤中汞元素属于最具挥发性的微量元素,FINKELMAN 等^[14]发现,煤中 Hg 可在 $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右低温下挥发,RIZEQ 等^[15]分析认为, $>800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Hg 基本全部挥发,因此炉渣中残留的汞极少。

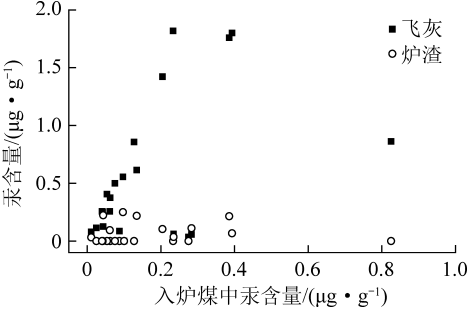


图 1 入炉煤汞含量与飞灰、炉渣中汞含量的关系
Fig.1 Relationship between mercury content of coal as fired and that of fly ash and slag

2.1.2 砷

样品来自 22 家企业的入炉煤 92 批次,燃料煤中砷含量见表 2。参照《商品煤质量管理暂行办法》中干燥基砷含量不高于 $80 \text{ }\mu\text{g/g}$,入炉煤样品中的砷含量全部达标,且均在 $7 \text{ }\mu\text{g/g}$ 以下。按 MT/T

803—1999 分级,除 4 批次入炉煤属于二级含砷煤外,其余批次均属于一级含砷煤。

入炉煤中砷含量与飞灰、炉渣中砷含量的关系如图 2 所示,可以看出,飞灰中砷含量最高可达入炉煤中的 10 倍左右,燃烧过程中煤中砷在飞灰中具有明显的富集作用;部分炉渣中砷含量与入炉煤中相比有明显差异,但总体上炉渣与入炉煤中砷含量相当,说明入炉煤中的砷未在炉渣中富集。文献[16-17]研究表明,砷在 $1\ 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 挥发率为 63.7%,为中等挥发性微量元素,燃烧过程中大部分煤中砷蒸发进入烟气,由于飞灰对砷化物的吸附作用,硅酸盐熔体对砷的溶解作用,飞灰中矿物成分与砷的氧化物化学反应生成稳定的化合物,气相砷化合物在飞灰表面的凝结作用等,造成入炉煤中砷在飞灰中富集。

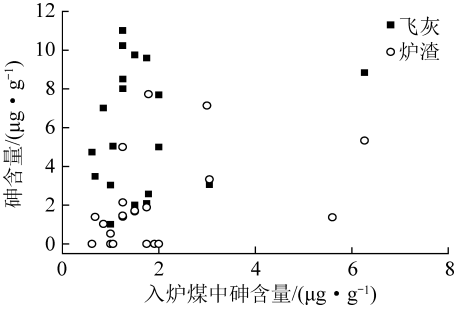


图 2 入炉煤砷含量与飞灰、炉渣中砷含量的关系
Fig.2 Relationship between arsenic content of coal as fired and that of fly ash and slag

表 2 入炉煤样品中砷含量
Table 2 Arsenic content of coal as fired samples

入炉煤 砷含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	批次数量						
	浦东新区	金山区	闵行区	宝山区	青浦区	奉贤区	崇明区
>25.0(四级含砷煤)	0	0	0	0	0	0	0
8.0~25.0(三级含砷煤)	0	0	0	0	0	0	0
4.0~8.0(二级含砷煤)	0	0	4	0	0	0	0
≤ 4.0 (一级含砷煤)	28	20	12	12	4	8	4

2.1.3 铬

样品来自 22 家企业的入炉煤 92 批次,燃料煤中铬含量见表 3。《商品煤质量管理暂行办法》未对铬含量限制做出规定,根据 MT/T 965—2005《煤中铬含量分级》,其中 72 批次属于低铬煤,11 批次属于中铬煤,9 批次属于高铬煤。入炉煤中铬含量与飞灰、炉渣中铬含量的关系如图 3 所示,飞灰中铬含

量最高可达入炉煤中的 8 倍,炉渣中铬含量高于飞灰中,燃烧过程中煤中铬元素在飞灰和炉渣中均有明显的富集作用。煤中铬具有难挥发性或挥发性较低,燃烧后易富集在灰渣中;由于烟气冷却时飞灰的凝聚和结核作用^[4],导致燃烧过程中挥发的铬富集在飞灰中。

表 3 入炉煤中铬含量
Table 3 Chromium content of coal as fired samples

入炉煤 铬含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	批次数量						
	浦东新区	金山区	闵行区	宝山区	青浦区	奉贤区	崇明区
>25(高铬煤)	0	4	0	0	4	0	1
15~25(中铬煤)	3	0	6	0	0	0	2
≤ 15 (低铬煤)	25	16	11	12	0	7	1

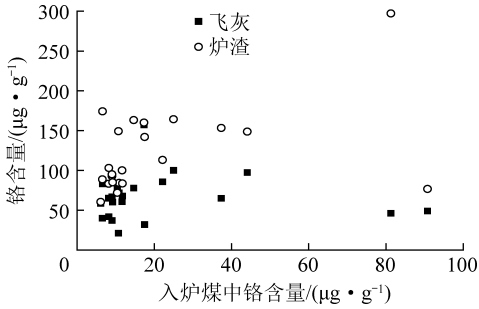


图 3 入炉煤铬含量与飞灰、炉渣中铬含量的关系
Fig.3 Relationship between chromium content of coal as fired and that of fly ash and slag

2.1.4 镉

样品来自 22 家企业的入炉煤 92 批次,燃料煤中镉含量见表 4。《商品煤质量管理暂行办法》未对镉含量限制做出规定,根据 MT/T 1029—2006《煤中镉含量分级》,其中 5 批次属于低镉煤,28 批次属于中镉煤,59 批次属于高镉煤,入炉煤中的镉含量普遍较高。

入炉煤中镉含量与飞灰、炉渣中镉含量关系如图 4 所示,可以看出,飞灰中镉含量最高可达入炉煤中的 8 倍,炉渣中镉含量可达入炉煤中的 10 倍以上。由于入炉煤中较高的镉含量,使飞灰和炉渣中的镉含量处于特高镉煤对应的镉含量范围。入炉煤

中镉在飞灰和灰渣中的富集机理与铬相似^[6]。

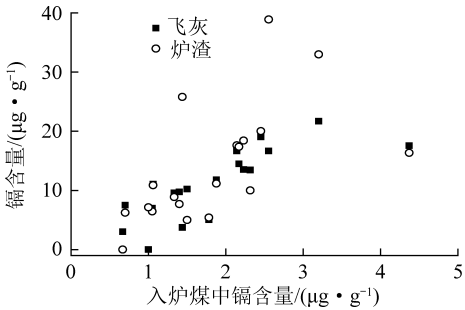


图 4 入炉煤镉含量与飞灰、炉渣中镉含量的关系
Fig.4 Relationship between cadmium content of coal as fired and that of fly ash and slag

2.1.5 铅

22 家企业的 92 批次入炉煤中的铅含量见表 5。《商品煤质量管理暂行办法》未对铅含量限制做出规定,根据 MT/T 964—2005《煤中铅含量分级》,其中 54 批次属于低铅煤,25 批次属于中铅煤,13 批次属于高铅煤,30%的入炉煤属于中铅煤、高铅煤。

入炉煤中铅含量与飞灰、炉渣中铅含量的关系如图 5 所示,可以看出,飞灰与炉渣中的铅含量显著高于入炉煤,铅在飞灰与炉渣中具有明显的富集作用。燃烧过程中,煤中的铅化合物在高温下处于热力不稳定状态,部分释放进入烟气,由于燃烧温度、

表 4 入炉煤中镉含量
Table 4 Cadmium content of coal as fired samples

入炉煤镉含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	批次数量						
	浦东新区	金山区	闵行区	宝山区	青浦区	奉贤区	崇明区
>10.00(特高镉煤)	0	0	0	0	0	0	0
1.00~10.00(高镉煤)	18	9	11	10	2	5	4
0.20~1.00(中镉煤)	10	9	3	2	1	3	0
≤ 0.20 (低镉煤)	0	2	2	0	1	0	0

表 5 入炉煤中铅含量
Table 5 Lead content of coal as fired samples

入炉煤铅含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	批次数量						
	浦东新区	金山区	闵行区	宝山区	青浦区	奉贤区	崇明区
>40(高铅煤)	4	0	4	0	0	1	4
20~40(中铅煤)	5	10	5	0	0	5	0
≤ 20 (低铅煤)	19	10	7	12	4	2	0

燃煤粒径不同,铅的释放率存在一定差异,在 85%~99%^[1];未释放进入烟气的铅留存在灰渣中,导致铅在灰渣中富集。煤中的铅经燃烧释放进入烟气后,在烟气降温过程中经历一系列物理和化学变化,大部分铅凝结或被吸附于飞灰颗粒表面,导致铅在飞灰中富集。

灰及炉渣中重金属年产生量与比例(表 6)。

由表 6 可知,每年产生的飞灰中,汞、砷、铬、镉、铅含量分别为 0.16、2.76、23.60、3.80、42.21 t;产生的炉渣中汞、砷、铬、镉、铅含量分别为 0.01、0.08、4.64、0.66、4.01 t。5 种重金属元素在飞灰中均有明显富集,飞灰中的汞、砷、铬、镉、铅总量分别占入炉煤中总量的 50.0%、61.7%、76.7%、74.4%、75.1%。炉渣中汞和砷,含量较低,分别占入炉煤中总量的 3.1%和 1.8%;炉渣中铬、镉、铅含量较高,分别占入炉煤中总量的 15.1%、12.9%、7.1%。重金属在飞灰、炉渣中的富集比例与其挥发性有关,汞的挥发性最强,燃烧过程中易生成气态物逸出,不会被除尘系统收集,46.9%的汞随烟气通过其他途径排出;砷为中等挥发性元素,进入烟气中的砷与汞相比更易与飞灰结合,通过其他途径排出的砷总量较低,为 36.5%;铬、镉、铅的挥发性较弱,大多残留在炉渣中,进入烟气中的铬、镉、铅在烟气冷却过程中由于吸附、凝聚、结合等作用与飞灰结合,大部分富集在飞灰中,较少通过其他方式排出,分别为 8.2%、12.7%、17.8%。

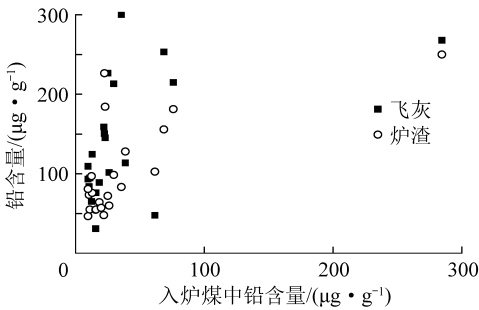


图 5 入炉煤铅含量与飞灰、炉渣中铅含量的关系
Fig.5 Relationship between lead content of coal as fired and that of fly ash and slag

2.2 重金属元素排放测算

根据各企业入炉煤年使用量、飞灰和炉渣的年产量、各批次样品中重金属含量,测算了入炉煤、飞

表 6 入炉煤、飞灰及炉渣中重金属年产生量与比例测算

类别	汞		砷		铬		镉		铅	
	质量/t	比例/%	质量/t	比例/%	质量/t	比例/%	质量/t	比例/%	质量/t	比例/%
入炉煤	0.32	100	4.47	100	30.75	100	5.11	100	56.21	100
飞灰	0.16	50.0	2.76	61.7	23.60	76.7	3.80	74.4	42.21	75.1
炉渣	0.01	3.1	0.08	1.8	4.64	15.1	0.66	12.9	4.01	7.1
其他*	0.15	46.9	1.63	36.5	2.51	8.2	0.65	12.7	9.99	17.8

注: * 表示差减法。

3 结 论

1) 煤中汞元素属于最具挥发性的重金属元素,在炉渣中残留较少,进入烟气中的汞部分吸附于飞灰表面,导致在飞灰中富集,50.0%汞随飞灰排出,46.9%的汞随烟气由其他途径排出。

2) 煤中砷元素属于具有中等挥发性的微量元素,在炉渣中残留较少,由于飞灰对砷化物的吸附作用,硅酸盐熔体对砷的溶解作用,飞灰中矿物成分与砷的氧化物化学反应生成稳定的化合物,气相砷化合物在飞灰表面的凝结作用等,使入炉煤中的砷在飞灰中富集,67.1%砷在燃烧后富集在飞灰中。

3) 煤中铬、镉、铅属于难挥发的重金属元素,经燃烧后较多富集于飞灰和炉渣中,主要随飞灰排出,分别占入炉煤中总量的76.7%、74.4%、75.1%。

参考文献(References):

- [1] 邓双,张凡,刘宇,等.燃煤电厂铅的迁移转化研究[J].中国环境科学,2013,33(7):1199-1206.
DENG Shuang, ZHANG Fan, LIU Yu, *et al.* Lead emission and speciation of coal-fired power plants in China [J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1199-1206.
- [2] 傅丛,连进京,姜英,等.高汞煤燃烧过程中汞的析出规律试验研究[J].洁净煤技术,2007,13(6):62-65.
FU Cong, LIAN Jinjing, JIANG Ying, *et al.* Experimental study on mercury emission during coal combustion [J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(6): 62-65.
- [3] 杜晓光,马筠,吴颖庆,等.火电厂燃煤及固体产物中危害元素的测定方法,迁移规律及对环境的影响研究[J].热力发电,2010,39(11):16-21.
DU Xiaoguang, MA Jun, WU Yingqing, *et al.* Study on degermination method of hazardous elements in fuel coal and other solid by-products in thermal power plants, their migration rules during combustion, and their influence upon environment [J]. Thermal Power, 2010, 39(11): 16-21.
- [4] 孔维辉,刘文中,陈萍.燃煤过程中铬迁移转化和排放控制的研究进展[J].洁净煤技术,2007,13(1):53-56.
KONG Weihui, LIU Wenzhong, CHEN Ping. Research progress on chromium migration, transformation and emission control during coal combustion [J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(1): 53-56.
- [5] 谌天兵,武建军,韩甲业.燃煤污染现状及其治理技术综述[J].煤,2006,15(2):1-4.
CHEN Tianbing, WU Jianjun, HAN Jiaye. Summary of the status of coal-fired pollution and its treatment technology [J]. Coal, 2006, 15(2): 1-4.
- [6] 孙喆.燃煤电站砷、铅、镉、铬的迁移规律[D].北京:华北电力大学,2015.
SUN Zhe. Transformation of arsenic, lead, cadmium and chromium

in coal-fired power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

- [7] 王家伟,刘钊,孙喆.研究燃煤过程中重金属污染物的迁移规律的重要性[J].科技创新导报,2015,12(11):93.
WANG Jiawei, LIU Zhao, SUN Zhe. Importance of studying the law of migration of heavy metal pollutants during coal combustion [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(11): 93.
- [8] MEIJ Ruud, HENK Te Winkel. The emissions of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 9262-9272.
- [9] LINNIK Vitaly G, MINKINA Tatiana M, BAUER Tatiana V, *et al.* Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals pollution around coal-fired power station [J/OL]. [2019-07-01]. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10653-019-00361-z>.
- [10] 程俊峰,曾汉才,韩军,等.燃煤电站锅炉痕量重金属的释放与控制[J].热力发电,2002,31(2):23-30,58.
CHENG Junfeng, ZENG Hancan, HAN Jun, *et al.* Release and control of trace heavy metals in coal-fired power station boilers [J]. Thermal Power, 2002, 31(2): 23-30, 58.
- [11] 吴晓龙.燃煤电站燃烧产物重金属元素赋存形态分析[D].北京:华北电力大学,2016.
WU Xiaolong. Research on existing status of heavy element in combustion products of coal-fired power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [12] 袁晓东.燃煤电站典型固废中有毒金属形态分析研究[D].北京:华北电力大学,2017.
YUAN Xiaodong. Research on species of heavy metals in typical by-products from coal-fired power plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [13] 段钰锋,朱纯,余敏,等.燃煤电厂汞排放与控制技术研究进展[J].洁净煤技术,2019,25(2):1-17.
DUAN Yufeng, ZHU Chun, SHE Min, *et al.* Research progress on mercury emission and control technologies in coal-fired power plants [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 1-17.
- [14] FINKELMAN R B, PALMER C A, KRASNOW M R, *et al.* Combustion and leaching behavior of elements in the Argonne premium coal samples [J]. Energy & Fuels, 1990, 4(6): 755-766.
- [15] RIZEQ R G, HANSELL D W, SEEKER W R. Predictions of metals emissions and partitioning in coal-fired combustion systems [J]. Fuel Processing Technology, 1994, 39(1/3): 219-236.
- [16] 郭欣.煤燃烧过程中汞、砷、硒的排放与控制研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
GUO Xin. Experimental and mechanism study on the mercury, arsenic and selenium transformation and emission control during coal combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [17] 樊金串,张振辉.煤中微量元素在燃烧过程中的动态[J].煤炭加工与综合利用,1995(4):12-15.
FAN Jinchuan, ZHANG Zhenfu. Dynamics of trace elements in coal during combustion [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1995(4): 12-15.