

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016060804

郑以梅, 郑刘根, 李立园, 等. 淮北低硫燃煤电厂粉煤灰的理化特征[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 309-315.
ZHENG Yimei, ZHENG Liugen, LI Liyuan, et al. Physicochemical characteristics of ash from low sulphur coal-fired plant in the Huaibei City[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 309-315.

淮北低硫燃煤电厂粉煤灰的理化特征*

郑以梅¹ 郑刘根^{1**} 李立园¹ 汤 泉²

(1. 安徽大学资源与环境工程学院矿山环境修复与湿地生态安全协同创新中心, 合肥, 230601;
2. 安徽大学生命科学院, 合肥, 230601)

摘 要 粉煤灰是我国堆放量最大的固体废弃物之一, 本文采集淮北低硫燃煤电厂粉煤灰样品, 测试分析了样品矿物组成和微量元素含量, 探讨了低硫煤燃煤电厂粉煤灰理化特征. 结果表明: (1) 燃煤电厂粉煤灰中飞灰粒径主要集中在 1—100 μm , 底渣粒径主要集中在 250 μm 以上, 除 Mn 元素之外, Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 易吸附于飞灰等细颗粒物中; (2) 飞灰和底渣的矿物组成含量不同, 风化过程中晶格能较低的矿物易分解; (3) Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 含量高于中国土壤背景值, 具有潜在污染能力; (4) Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 与 S 正相关, 随着粉煤灰的自然风化, 赋存在硫化物矿物中的这些微量元素将会分解进入环境, Hg 由于其易挥发以及粉煤灰的吸附作用等会在粉煤灰中进一步累积.
关键词 低硫煤, 燃煤电厂, 粉煤灰, 理化特征.

Physicochemical characteristics of ash from low sulphur coal-fired plant in the Huaibei City

ZHENG Yimei¹ ZHENG Liugen^{1**} LI Liyuan¹ TANG Quan²

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Collaborative Innovation Center for Mines Environmental Remediation and Wetland Ecological Security, Anhui University, Hefei, 230601, China;
2. School of Life Science, Anhui University, Hefei, 230601, China)

Abstract: Coal ash is one of the largest volume solid wastes in China. In this study, fly ash and bottom ash were collected from a low sulfur coal-fired power plant in Huaibei City, and their physicochemical characteristics including mineral compositions and concentrations of trace elements were measured. The results showed that: (1) The particle size of fly ash mainly distribute in the range of 1—100 μm , where as the particle size of bottom ash was mostly larger than 250 μm . Except Mn, heavy metals were easily adsorbed on the surface of fly ash. (2) The mineral compositions of fly ash and bottom ash were different, and the minerals of low lattice energy were readily decomposed. (3) The contents of Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, Zn in coal ash were higher than the soil

2016 年 6 月 8 日收稿 (Received: June 8, 2016).

* 国家自然科学基金 (41373108), 十二五国家科技支撑计划 (2012BAC10B02), 煤矿生态环境保护国家工程实验室科技攻关项目 (HNKY-JT-JS2013-41), 安徽省国土资源科技项目 (2013-K-07), 淮北矿业 (集团) 有限责任公司科技攻关项目 (HBKY-2014-01), 安徽省自然科学基金 (1608085QD79) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41373108), the National Science and Technology Support Program (2012BAC10B02), the Key Scientific and Technological Project of National Engineering Laboratory of Coal Mining Ecological Protection (HNKY-JT-JS2013-41), the Science and Technology Project of Land and Resources of Anhui Province (2013-K-07), the Key Scientific and Technological Project of Huaibei Mining Industry (Group) Co. Ltd. (HBKY-2014-01), the Natural Science Foundation of Anhui Provinces (1608085QD79).

* * 通讯联系人, E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn

Corresponding author, E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn

background values of China, being the potential contaminants. (4) Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, Zn in coal ash had positive correlations with S; these elements would be released into the environment upon natural weathering, while Hg might be further concentrated into the fly ash due to its properties and adsorption capacity of fly ash and other factors.

Keywords: low sulfur coal, coal-fired power plant, coal ash, physicochemical characteristics.

煤炭作为一次性能源,约占我国能源结构的 70%左右.煤炭在开采和利用过程中都会对环境产生影响,其中尤以火力发电燃烧过程对环境的影响最大^[1-2].粉煤灰是煤炭燃烧后的附属产物,包括飞灰和底渣两个部分^[3-5].燃煤电厂产生的大量粉煤灰不仅占用土地,同时赋存在粉煤灰无机矿物中的有害微量元素在淋溶作用下会发生迁移进入水体和土壤,污染水质,损耗土壤功能^[6-9].

淮北煤田是我国重要的煤炭工业基地,煤炭资源主要以低硫煤为主,燃煤电厂排放的粉煤灰大量堆积于矿区内^[10-12].为揭示低硫燃煤电厂粉煤灰理化特征,系统采集了研究区某燃煤电厂炉前煤(FC)、灰仓飞灰(FA1)、灰仓底渣(BA1)、灰场飞灰(FA2)、灰场底渣(BA2)等 5 种类型样品,结合 XRD 分析和硫形态测定,对样品中 Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、V、Zn 等 9 种微量元素的含量进行了测定,分析了各微量元素在不同类型粉煤灰中的分布、富集规律,探讨了粉煤灰中微量元素含量与全硫的相关性,以期为低硫燃煤电厂粉煤灰堆放管理和资源化利用提供理论依据.

1 样品采集与分析(Sample collection and analysis)

1.1 样品采集与预处理

本研究选用淮北某燃煤电厂静电除尘器下采集的飞灰(灰仓飞灰 FA1)、底渣(灰仓底渣 BA1),以及该电厂粉煤灰堆放场采集的飞灰(灰场飞灰 FA2)、底渣(灰场底渣 BA2).灰仓采样是在锅炉正常运行的情况下进行的,根据电厂飞灰和底渣的排放途径,采样点设于除尘器灰仓口,共采集 4 个灰仓飞灰样品和 8 个灰仓底渣样品.在堆放年限为 2 年的粉煤灰堆放场采样时进行网格布点,每段间隔 50 m,采样位置位于灰层表面 15 cm 左右,共采集 6 个灰场飞灰样品和 6 个灰场底渣样品.炉前煤取自电厂的储煤场,共采集 3 个炉前煤样品.为使灰样具有代表性,每个采样点均有多个子样混合而成.从灰仓和灰场取回的灰样和煤样用密封袋保存,混合均匀,室内风干后研磨过 100 目尼龙筛,保存于棕色试剂瓶中备用.

1.2 样品分析项目与测定方法

粉煤灰样品分析项目包括粒径分布、矿物组成、硫形态和 9 种微量元素(Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、V、Zn)含量.按煤炭测试标准 GB/T212—2008 进行工业分析,分析指标为水分(M_{ad})、灰分(A_{ad})、挥发分(V_{ad})和固定碳(FC_{ad});采用 BT-9300HT 激光粒度仪和筛析法测定粉煤灰粒度;全硫的测定选用 WS-S101 型自动测硫仪,全硫测试结果为 0.07%—1.33%,基本在低硫粉煤灰含量范围内;硫形态测试依据 GB/T215—2003;矿物组成采用 XD-3 型 X 射线衍射仪(XRD)测定;采用 DMA-80 直接测汞仪测 Hg 含量,其它微量元素经 HNO_3 - $HClO_4$ -HF 消解体系消解后,采用 ICP-AES 法测定.

各分析项目测试过程均由空白样、标准样(国际标准煤样物质 SRM1632b 和土壤成分分析标准物质 GBW07403)和平行样进行质量控制,分析结果显示,标准样测定值达到规定标准准确度,且平行样中微量元素的相对标准偏差(RSD)在 10%以下,测试结果准确可靠.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 低硫粉煤灰的基本理化特征

2.1.1 低硫粉煤灰的粒径分布

飞灰粒径分布结果见图 1.由图 1 可知,灰仓飞灰和灰场飞灰的粒度较接近,主要分布在 1—100 μm .

底渣和炉前煤粒径分布结果见表 1.由表 1 可知,底渣和炉前煤的粒度主要集中在 250 μm 以上,灰仓底渣和灰场底渣的粒度较接近.总的来说,炉前煤>灰场底渣>灰仓底渣>灰场飞灰>灰仓飞灰.

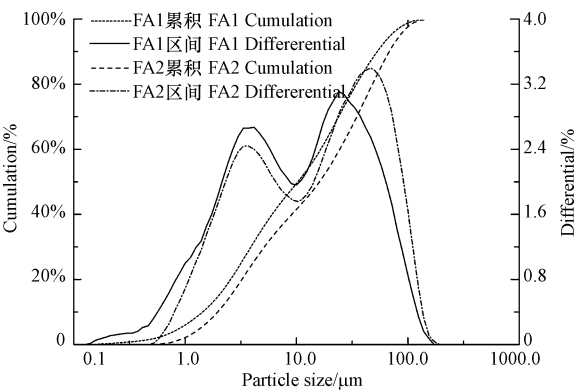


图 1 飞灰的粒径分布

Fig.1 Size distribution of fly ash

表 1 炉前煤与底渣的粒径分布 (%)

Table 1 Size distribution of coal and bottom ash (%)

样品 Sample	粒径 Particle size/μm					
	≤96	96—120	120—150	150—250	250—850	≥850
BA1	10.28	5.57	12.33	7.44	39.26	25.12
BA2	15.73	3.25	8.91	12.48	24.54	35.09
FC	3.41	1.09	2.40	5.95	37.19	49.96

2.1.2 低硫粉煤灰的工业分析

粉煤灰的元素组成和矿物成分由炉前煤的物质组成决定,因此首先对炉前煤进行工业分析,结果见表 2.由表 2 可知,炉前煤灰分为 42.74%,属高灰分煤,电厂用煤为洗煤厂洗选的中煤,而不是精煤.

硫在炉前煤与粉煤灰中的存在形式主要有硫化铁硫(S_p)、有机硫(S_o)、硫酸盐硫(S_x)和总硫(S).由表 2 可知,炉前煤中硫以硫化铁硫为主,其次是有机硫和硫酸盐硫.粉煤灰中硫大多以硫酸盐形式存在,其次是有机硫.

在煤炭燃烧过程中,煤中有害有毒物质部分以气体形式直接进入大气,部分在粉煤灰中聚集.由于淮北低硫燃煤电厂采用循环流化床锅炉,在煤燃烧过程中添加大量石灰石作为固硫剂,大部分硫以灰渣形式排出炉外.刘桂建等^[13]在研究煤灰基本特征及微量元素的分布规律时,表明我国煤炭燃烧后形成飞灰、底渣的产率分别为 45%—70%和 55%—30%.因此,与炉前煤(FC)中总硫百分含量相比,粉煤灰(FA1 和 FA2)中总硫的百分含量相对富集.Bartonova 等^[14]研究了循环流化床锅炉燃煤产物粉煤灰中未燃烧碳的特性,发现粉煤灰中总硫的百分含量高于炉前煤中总硫的百分含量.

表 2 粉煤灰的工业分析

Table 2 Proximate analysis of coal ash

样品 Sample	工业分析/(空气干燥基, wt.%)				硫形态/(空气干燥基, wt.%)			
	Proximate analysis/(Air-dried basis, wt.%)				Sulfur forms/(Air-dried basis, wt.%)			
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	S_p	S_x	S_o	S
FC	0.94	42.74	17.07	39.25	0.51	0.01	0.32	0.84
FA1	0.23	98.07	1.53	0.17	ND	1.18	0.15	1.33
BA1	0.44	91.98	7.19	0.39	ND	0.08	0.02	0.10
FA2	2.94	93.92	3.05	0.09	ND	0.79	0.05	0.84
BA2	3.16	88.70	7.91	0.23	ND	0.06	0.01	0.07

注:ND,未检出.ND, not detected.

2.2 低硫粉煤灰的矿物学特征

XRD 分析结果如图 2 所示,炉前煤的矿物组成主要包括石英、硅酸盐矿物(高岭石、地开石、绿泥石、珍珠石)、碳酸盐矿物(磷镁石)、锰矿物(黑锌锰矿)、硫酸盐矿物(碳锌铜矾)、硫化物(镍黄铁矿)

等.灰仓飞灰的主要矿物有石英、磷硼锰石、黑钙矾矿、硅锂钠石等,灰场飞灰的主要矿物有石英、钙柱石、水碳铜镁石、碳硼镁钙石、黑钙铁矿等,灰仓底渣的主要矿物有石英、镁绿泥石、磷铁铝矿、斜硅石、绿泥石等,灰场底渣的主要矿物有石英、针铁矿、磷硼锰石、黑钙矾矿、斜硅石等,其中黄铁矿含量较低,因此未在图中列出.燃煤进入锅炉后,在高温燃烧的情况下,各矿物质发生一系列的物理化学变化,粉煤灰中矿物种类复杂,不同类型粉煤灰中矿物组成基本相同,仅在矿物含量上有差别.赵蕾等^[15]和 Dai 等^[16]研究了内蒙古准格尔电厂粉煤灰的矿物组成特征,也发现飞灰和底渣中的矿物组成含量不同.

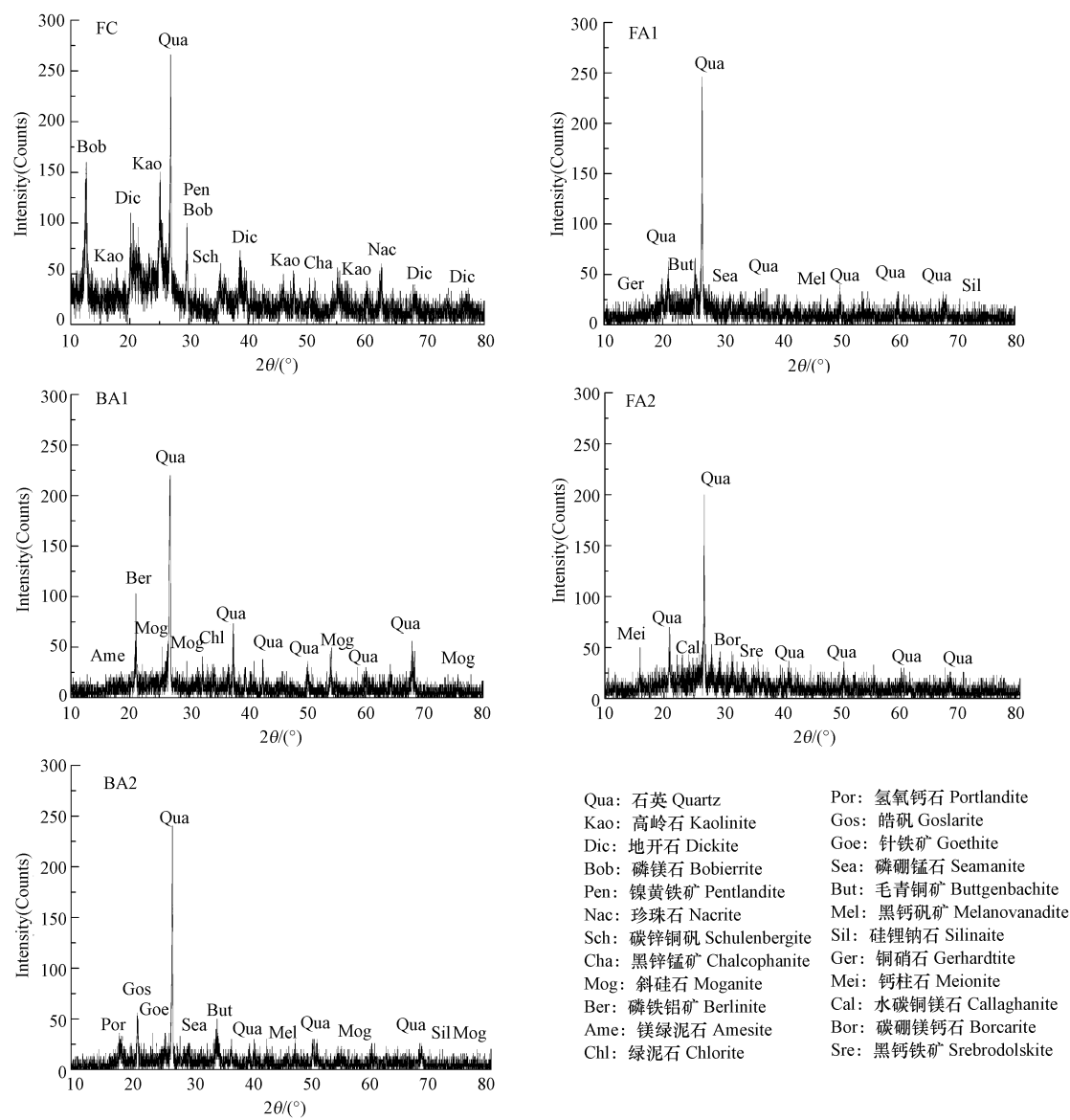


图 2 样品的 XRD 分析图谱

Fig.2 XRD patterns of coal and ash

粉煤灰矿物质是微量元素的赋载体,矿物质的晶格能越低,赋存于矿物质中的微量元素越易被释放.由表 3 可知,硅酸盐类矿物的晶格能为 $6280\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,硫化物类矿物的晶格能为 $3506\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,碳酸盐类矿物的晶格能为 $2711\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,在粉煤灰风化的过程中,晶格能较低的矿物如含硫矿物易分解. Nath 等^[17]在研究粉煤灰的微观结构和形态演变时 also 认为矿物相变的发生与矿物本身晶格能有关,晶格能较低的矿物易分解转化.

2.3 低硫粉煤灰中微量元素含量分布特征

2.3.1 低硫粉煤灰中微量元素含量分布

低硫粉煤灰中微量元素含量见表 4,由表 4 可知,粉煤灰中微量元素含量最高的是 Mn ($285.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

和 V (221.69 mg·kg⁻¹), 含量最低的是 Hg (0.01 mg·kg⁻¹). Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、V、Zn 在炉前煤中的含量是 7.67、39.86、38.96、0.37、123.38、16.37、23.17、97.05、75.62 mg·kg⁻¹, 在灰仓飞灰中的含量是 21.16、82.41、78.15、1.31、169.52、35.96、48.36、221.69、93.87 mg·kg⁻¹, 在灰仓底渣中的含量是 11.33、56.67、47.70、0.01、285.88、22.42、33.06、117.34、62.78 mg·kg⁻¹, 除灰仓底渣中 Hg、Zn, 其他样品中各元素含量均高于炉前煤中含量, 说明元素在飞灰和底渣中有富集现象. 除 Mn 元素外, 其它元素在灰仓飞灰中含量高于灰仓底渣中含量, 说明 Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 更易聚集于飞灰等细颗粒物中, Mn 更易聚集于底渣中. Johnson 等^[20]和 Sushil 等^[21]分别对阿蒂科肯热电厂和印度热电厂粉煤灰中的微量元素含量进行了研究, 也发现大多数微量元素在飞灰中的富集程度高于底渣.

表 3 部分矿物质晶格能(kJ·mol⁻¹)
Table 3 The lattice energy of some minerals(kJ·mol⁻¹)

矿物	SiO ₂	FeS ₂	CuFeS ₂	ZnS	CaCO ₃
晶格能	6280	3506	3498	3235	2711

Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、V、Zn 在灰场飞灰中含量是 19.40、77.00、67.66、1.38、136.35、31.22、39.51、216.56、80.54 mg·kg⁻¹, 在灰场底渣中含量是 9.67、54.11、38.81、0.01、260.36、20.36、26.62、109.15、56.89 mg·kg⁻¹, Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、V、Zn 在灰场飞灰中含量低于灰仓飞灰, 在灰场底渣中含量低于灰仓底渣, 这是由于长时间的露天堆放, 微量元素随雨水浸出而迁移释放^[22]. Hg 在灰场飞灰中含量高于灰仓飞灰, 说明 Hg 在风化过程中含量增加. 江贻满等^[23]研究了 ESP 飞灰对燃煤锅炉烟气汞的吸附特性, 发现颗粒粒径越小, 比表面积越大, 汞易吸附于飞灰表面. 张晶等^[19]在研究淮南平圩电厂粉煤灰微量元素迁移性时, 也发现老灰场粉煤灰中 Hg 元素平均含量略高于新灰场粉煤灰中 Hg 元素平均含量, 主要与元素本身的性质、粉煤灰浓度和浸取时间等因素有关.

灰仓飞灰中 Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 相对富集, 分别是中国土壤背景值的 1.67、1.35、3.46、18.71、1.34、1.86、2.69、1.27 倍, 灰场飞灰中 Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 相对富集, 分别是中国土壤背景值的 1.53、1.26、2.99、19.71、1.16、1.52、2.63、1.09 倍, 灰仓底渣中 Cu、Pb、V 相对富集, 分别是中国土壤背景值的 2.11、1.27、1.42 倍, 灰场底渣中 Cu、Pb、V 相对富集, 分别是中国土壤背景值的 1.72、1.02、1.32 倍, Mn 在灰仓飞灰、灰场飞灰、灰仓底渣、灰场底渣中含量是淮南电厂粉煤灰的 3.60、2.89、6.06、5.52 倍, Hg 在灰仓飞灰、灰场飞灰中含量是淮南电厂粉煤灰的 1.25、1.31 倍, 与淮南电厂粉煤灰相比, 淮北低硫燃煤电厂粉煤灰中的 Mn 和 Hg 元素相对富集.

表 4 样品中微量元素的含量(mg·kg⁻¹)
Table 4 The concentration of trace elements in coal and ash (mg·kg⁻¹)

样品 Sample	微量元素 Trace elements									文献 References
	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	V	Zn	
FA1	21.16	82.41	78.15	1.31	169.52	35.96	48.36	221.69	93.87	本研究
FA2	19.40	77.00	67.66	1.38	136.35	31.22	39.51	216.56	80.54	
BA1	11.33	56.67	47.70	0.01	285.88	22.42	33.06	117.34	62.78	
BA2	9.67	54.11	38.81	0.01	260.36	20.36	26.62	109.15	56.89	
FC	7.67	39.86	38.96	0.37	123.38	16.37	23.17	97.05	75.62	
中国土壤背景值	12.70	61.00	22.60	0.07	583.00	26.90	26.00	82.40	74.20	[18]
淮北煤田煤灰	6.40—113	108—7879	151—1090	NT	18.00—204	NT	NT	123—512	NT	[10]
淮北煤田煤	9.80	45.70	27.00	NT	24.00	NT	NT	105.00	NT	[10]
淮南电厂粉煤灰	54.44	85.88	102.00	1.05	47.15	NT	60.01	NT	81.07	[19]
兖州电厂飞灰	NT	NT	224.10	NT	NT	NT	124.60	214.80	109.80	[13]
兖州电厂底渣	NT	NT	125.90	NT	NT	NT	108.30	205.20	65.20	[13]

注:NT,未检测.NT, not tested.

2.3.2 低硫粉煤灰中微量元素与硫的相关性

灰仓粉煤灰、灰场粉煤灰中微量元素与硫的 Pearson 相关性分析见表 5,由表 5 可知,灰仓粉煤灰中

Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 与硫在 0.01 水平上显著正相关,相关系数为 0.973、0.958、0.970、0.997、0.986、0.967、0.988、0.879,灰场粉煤灰中 Co、Hg、Pb、V 与硫在 0.01 水平上显著正相关,相关系数为 0.826、0.793、0.746、0.747,Cr、Cu、Ni、Zn 与硫在 0.05 水平上显著正相关,相关系数为 0.592、0.644、0.649、0.648.与灰仓粉煤灰对比,灰场粉煤灰中微量元素与硫的相关性降低,说明 Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 在粉煤灰中主要以含硫矿物存在.由于含硫矿物的稳定性较差,在长期自然风化条件下很容易发生化学反应,当含硫矿物被氧化,整个晶体就分解,导致 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn 释放出来.魏林宏等^[24]在研究露天堆放粉煤灰对地下水的污染研究时,认为 Cr、Cu、Pb、Zn 元素会随着粉煤灰中矿物质的分解而释放.Hg 元素在风化过程中含量增加,这主要是由于粉煤灰的吸附作用,阻碍了其向周围环境中迁移^[25].陈彦广等^[26]对粉煤灰在环境材料中利用的研究进展进行了研究,认为粉煤灰对汞具有较好的吸附效果.Mn 在灰仓粉煤灰中与硫在 0.01 水平上显著负相关,相关系数为-0.943,在灰场粉煤灰中无相关性,这与 Mn 在飞灰中含量低于底渣有关.

表 5 不同风化程度粉煤灰中微量元素与硫之间的 Pearson 相关系数
Table 5 Correlation coefficients of trace elements with S in different weathering coal ash

样品 Samples	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	V	Zn
灰仓煤灰硫	0.973 **	0.958 **	0.970 **	0.997 **	-0.943 **	0.986 **	0.967 **	0.988 **	0.879 **
灰场煤灰硫	0.826 **	0.592 *	0.644 *	0.793 **	-0.435	0.649 *	0.746 **	0.747 **	0.648 *

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关.
Note: * * Significant correlation at 0.01 level (bilateral); * Significant correlation at 0.05 level (bilateral).

3 结论(Conclusion)

- (1) 飞灰的粒径主要分布在 1—100 μm,底渣的粒径主要分布在 250 μm 以上,Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 易聚集于飞灰中,Mn 易聚集于底渣中.
- (2) 炉前煤中硫主要以硫化铁硫形态存在,其次为有机硫和硫酸盐硫,粉煤灰中硫主要以硫酸盐硫形式存在,其次是有机硫.
- (3) 低硫粉煤灰的化学成分及矿物组成由炉前煤决定,飞灰和底渣的矿物组成含量不同,经过自然风化作用的飞灰和底渣的矿物组成也不同,晶格能较低的矿物易分解.
- (4) Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn 与 S 正相关,在粉煤灰自然风化的过程中,这些微量元素的含硫矿物将会分解释放,Hg 由于其易挥发以及粉煤灰的吸附作用等影响,容易在粉煤灰中进一步累积.

参考文献(References)

[1] SAHU S K, TIWARI M, BHANGARE R C, et al. Enrichment and particle size dependence of polonium and othernaturally occurring radionuclides in coal ash[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 138: 421-426.

[2] XIANG W, HAN B P, ZHOU D, et al. Physicochemical properties and heavy metals leachability of fly ash from coal-fired red power plant [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 405-409.

[3] 李志华, 詹松, 孙友宝, 等. 微波消解-原子吸收法测定固体废弃物粉煤灰中的铜、钼、镍和铍含量[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 372-373.

LI Z H, ZHAN S, SUN Y B, et al. Determination of Cu, Mo, Ni, Be in solid waste fly ash with microwave digestion by atomic absorption spectrometry[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(2): 372-373(in Chinese).

[4] KOUKOZAS N, KETIKIDIS C, ITSKOS G. Heavy metal characterization of CFB-derived coal fly ash[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92: 441-446.

[5] DAHL O, NURMESNIEMI H, POYLIO R, et al. Heavy metal concentrations in bottom ash and fly ash fractions from a large-sized (246 MW) fluidized bed boiler with respect to their Finnish forest fertilizer limit values[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 1634-1639.

[6] MEDINA A, GAMERO P, QUEROL X, et al. Fly ash from a mexican mineral coal I : Mineralogical and chemical characterization [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1): 82-90.

[7] MISHRA D P, DAS S K. A study of physico-chemical and mineralogical properties of talcher coal fly ash for stowing in underground coal mines[J]. Materials Characterization, 2010, 61(11): 1252-1259.

[8] ZHENG L G, LIU G J, CHOU C. Abundance and modes of occurrence of mercury in some low-sulfur coals from China[J]. International

- Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 19-26.
- [9] 晋晓彤, 鄢国平, 纪娜, 等. 粉煤灰合成分子筛的研究进展[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2025-2038.
JIN X T, YAN G P, JI N, et al. Synthesis of zeolite from coal fly ash[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(11): 2025-2038 (in Chinese).
- [10] 郑旺, 刘桂建, 郑刘根. 淮北煤中 12 种有害微量元素在煤及其灰中的分布特征[J]. 地球与环境, 2005, 33(1): 27-32.
ZHENG W, LIU G J, ZHENG L G. Characteristics of the distribution and concentration of twelve harmful trace elements in coals from Huaibei coalfield[J]. Earth and Environment, 2005, 33(1): 27-32 (in Chinese).
- [11] 高连芬, 刘桂建, CHOU C L, 等. 中国煤中硫的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(1): 79-87.
GAO L F, LIU G J, CHOU C L, et al. The study of sulfur geochemistry in Chinese coals[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2005, 24(1): 79-87 (in Chinese).
- [12] 丁帅帅, 郑刘根, 程桦. 电感耦合等离子体发射光谱-逐级化学提取法研究低硫煤矸石中微量元素的赋存状态及其环境效应[J]. 岩矿测试, 2015, 34(6): 629-635.
DING S S, ZHENG L G, CHENG H. Study on the occurrence of trace elements in low-sulfur coal gangue and their environmental effect by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry with sequential extraction procedure[J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(6): 629-635 (in Chinese).
- [13] 刘桂建, 杨萍月, 彭子成, 等. 煤灰基本特征及其微量元素的分布规律[J]. 煤炭转化, 2003, 26(2): 81-86.
LIU G J, YANG P Y, PENG Z C, et al. Characteristics of coal ash and distribution of trace elements in Yanzhou Mining District[J]. Coal Conversion, 2003, 26(2): 81-86 (in Chinese).
- [14] BARTONOVA L, KLIKA Z, SPEARS D A. Characterization of unburned carbon from ash after bituminous coal and lignite combustion in CFBs[J]. Fuel, 2007, 86: 455-463.
- [15] 赵蕾, 代世峰, 张勇, 等. 内蒙古准格尔燃煤电厂高铝粉煤灰的矿物组成与特征[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1168-1172.
ZHAO L, DAI S F, ZHANG Y, et al. Mineral abundances of high-alumina fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1168-1172 (in Chinese).
- [16] DAI S F, ZHAO L, PENG S P, et al. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81(4): 320-332.
- [17] NATH S K, MAITRA S, MUKHERJEE S, et al. Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 758-765.
- [18] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
WEI F S, CHEN J S, WU Y Y, et al. Study on the background value of soil environment in China[J]. Environment Science, 1991, 12(4): 12-19 (in Chinese).
- [19] 张晶, 崔龙鹏, 唐修义. 淮南平圩电厂粉煤灰微量元素迁移性评价[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 387-388.
ZHANG J, CUI L P, TANG X Y. The evaluation of the migration of trace elements in fly ash of Huainan Pingwei power plant[J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(3): 387-388 (in Chinese).
- [20] JOHNSON A, CATALAN L J, KINRADE S D. Characterization and evaluation of fly-ash from co-combustion of lignite and wood pellets for use as cement admixture[J]. Fuel, 2010, 89: 3042-3050.
- [21] SUSHIL S, VIDYA S B. Analysis of fly ash heavy metal content and disposal in three thermal power plants in India[J]. Fuel, 2006, 85: 2676-2679.
- [22] 龚勋. 典型西部粉煤灰中重金属元素淋滤特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
GONG X. Leaching characteristics of heavy metal in the coal ash from West China[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010 (in Chinese).
- [23] 江贻满, 段钰锋, 杨祥花, 等. ESP 飞灰对燃煤锅炉烟气汞的吸附特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(3): 436-440.
JIANG Y M, DUAN Y F, YANG X H, et al. Adsorption characterization of coal-fired flue gas mercury by ESP fly ashes[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(3): 436-440 (in Chinese).
- [24] 魏林宏, 叶念军, 朱春芳, 等. 露天堆放粉煤灰对地下水的污染研究[J]. 高校地质学报, 2013, 19(4): 683-691.
WEI L H, YE N J, ZHU C F, et al. Effects of air exposed coal fly ash on groundwater contamination[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(4): 683-691 (in Chinese).
- [25] 梁红姬. 燃煤飞灰中汞的赋存状态及其在热处理过程中释放特征的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
LIANG H J. Study on occurrence of mercury in coal fly ash and its release characteristics in the heat treatment process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [26] 陈彦广, 陆佳, 韩洪晶, 等. 粉煤灰在环境材料中利用的研究进展[J]. 化学通报, 2013, 76(9): 811-821.
CHEN Y G, LU J, HAN H J, et al. Advances in environmental material utilization of fly ash[J]. Chemistry Online, 2013, 76(9): 811-821 (in Chinese).