

模拟中性和酸性降雨及垃圾渗滤液浸泡粉煤灰及渣重金属浸出特征

曹珊珊^{1,2}, 吴光红^{1*}, 苏睿先²

(1. 天津师范大学天津市水环境与水资源重点实验室, 天津 300387; 2. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要:采用 EPA Method 3051 和微波消解以及模拟中性和酸性降雨及垃圾渗滤液对燃煤电厂 F 类 3 个等级的粉煤灰和渣开展浸泡实验, 并使用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定了其重金属的含量, 分析粉煤灰和渣中重金属的分布特征及不同酸碱度下的浸出毒性. 结果表明, 3 个等级的灰中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的平均含量分别为 35.75、148.06、19.64、17.95、32.95 和 14.95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 都低于天津地区土壤环境背景值, 但 Cd 的含量 (0.182 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 远超过环境背景值. 重金属在 3 个级别灰中的分布没有明显差异, 但都比渣中的含量高, 而 Mn 则相反, 其含量呈现明显的分布特征 (I 级灰 < II 级灰 < III 级灰 < 渣), 随着粒径增大, Mn 的含量在增加. 模拟中性和酸性降雨对灰渣的浸泡实验表明, Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 浸出效率都比较低 (<0.11%), Cr 和 Cd 则有较高的浸出率, 在模拟垃圾渗滤液浸泡实验中重金属的浸出率明显上升, Cd 上升最为明显, 其在 I 级、II 级、III 级灰及渣中的浸出率分别达到 26.6%、17.7%、14.4% 和 8.3%. 若采用湿式除灰渣的处理方式将会对 Cd 产生淋溶作用, 存在一定的环境风险.

关键词:粉煤灰; 重金属; 分布特征; 模拟雨水; 浸出

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1831-06

Leaching Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash and Slag of Thermal Power Plant Under Simulated Landfill Leachate, Neutral and Acid Rain

CAO Shan-shan^{1,2}, WU Guang-hong¹, SU Rui-xian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Environment and Resources, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Three levels of class F fly ash and slag of thermal power plant were digested with EPA Method 3051 and microwave, and extracted with three solutions of different pH to simulate the landfill leachate, the neutral and acid rain. The contents of heavy metals (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb) were determined by the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) to analyze their distribution characteristics and leaching toxicity. The results showed that the mean contents of Cr, Mn, Ni, Cu, Zn and Pb in three levels of fly ash were 35.75, 148.06, 19.64, 17.95, 32.95 and 14.95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, which were lower than Tianjin soil environmental background value. However, Cd content (0.182 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) exceeded the background value. There were no significant difference in the distribution of three levels of fly ash, but the concentrations were higher than those of heavy metals in slag. On the contrary, the content of Mn showed the obvious distribution characteristics (fly ash I < fly ash II < fly ash III < slag), and it increased as the particle size increased. Simulation results of neutral and acid rain on the fly ash and slag extraction showed that extractability of Mn, Ni, Cu, Zn and Pb were quite low (<0.11%), but Cr and Cd showed higher extractability. In the simulation experiment of landfill leachate extraction, the extractability of Cd increased significantly, the leaching rate of Cd in fly ash I, II, III and slag were 26.6%, 17.7%, 14.4% and 8.3%, respectively. The wet ash and slag removal can induce the leaching of Cd, which had some environmental risks.

Key words: fly ash; heavy metals; distribution characteristics; simulated rain; leaching

煤在我国的一次能源结构中占重要地位, 目前电力工业 70% 的发电量由燃煤产生^[1]. 原煤均含有大量的痕量元素, 并在煤的燃烧过程中随着烟气或炉渣排出, 灰渣若经过雨水的淋滤作用, 可能会污染地表水、地下水和土壤等环境要素^[2~4]. Sushil 等^[5]的研究发现飞灰中金属元素的浓度要高于底灰中的浓度. Baba 等^[6]的研究发现煤中大量的易挥发金属 Hg 和 Se 随着燃烧过程排入空气中, 而较易挥发金

属 As 和 Pb 则较多富集在粉煤灰中. 王云鹤等^[7]对重金属在煤的气化过程中分布、迁移规律及控制进行了研究, 结果表明, 重金属元素主要富集在气化灰

收稿日期: 2010-07-09; 修订日期: 2010-11-08

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (10JCZDJC24500); 天津市高等学校科技发展基金计划项目 (20080514)

作者简介: 曹珊珊 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: caoshan_3@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wuguanghong@hotmail.com

中或是散发到大气中. 文献[8~10]对我国城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属污染物的分布和性质进行了研究,发现重金属污染物主要集中在小粒径飞灰中,飞灰中 Cd、Pb 和 Cu 等重金属在环境中具有较强的迁移性. 温彦锋等^[11]的研究表明灰渣中元素的浸出能力和浸出规律因化学元素种类的不同而具有不同的特点,不同灰渣的元素浸出特性也有所不同,其浸出浓度与浸出液的 pH 值、浸出后的吸附、沉淀反应等因素有关,且渣中元素的浸出浓度比灰小. 张军营等^[12]的研究发现微量重金属元素的迁移性主要由灰粒表面的富集量、与灰中主要物相结合的化学键性质、环境的 pH 值和 Eh 值决定. Kim 等^[13]在粉煤灰沥滤的实验中发现沥滤机制是在一定环境下重金属元素溶解过程,主要取决于 pH. Lau 等^[14]的研究发现重金属的沥滤行为与元素自身性质和溶液的 pH 及沥滤时间有关. Sivapullaiah 等^[15]的研究发现粉煤灰中痕量元素的浸出顺序不受沥滤液 pH 的影响,pH 会影响元素的浸出率. 国内外对燃煤电厂或生活垃圾焚烧中底灰和飞灰中重金属的分布特点及其污染防治方法的研究较多. 但目前,还鲜见有通过实验手段模拟不同酸碱度的降水及垃圾渗滤液对粉煤灰及渣中重金属溶出特点的相关报道. 因此,本研究通过模拟中性、酸性降雨及垃圾渗滤液对燃煤电厂的 F 类 3 级粉煤灰及渣进行动态浸泡实验,分析了粉煤灰及渣中重金属在不同酸碱介质下的溶出特点.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品粉煤灰和渣均取自某大型燃煤电厂,其中灰分别属于《用于水泥和混凝土中的粉煤灰(GB/T 1596-2005)》中 F 类 3 个等级(I级、Ⅱ级和Ⅲ级),I级灰:细度(45 μm 以上)≤12%;Ⅱ级灰:细度(45 μm 以上)≤25%;Ⅲ级灰:细度(45 μm 以上)≤45%. 所有样品用四分法反复弃取,直到留下 20 g 样品为止,然后用烘箱烘干(100℃,1 h),再用玛瑙研钵磨细后,全部通过 100 目的尼龙筛后作为待测样品.

1.2 样品处理与测定

消解方法:称取 0.25 g 待测样品,分别加入 10 mL HNO₃,采用 EPA Method 3051 方法和微波消解系统(Ethos Series,Milestone Inc.)进行消解 10 min,在 5.5 min 内到达 175℃,在 175℃保持 10 min,然后自然冷却,用 Whatman 4 号滤纸过滤到 100 mL 容量瓶,用 Mill-Q 超纯水洗涤残渣并定容至 100 mL,然

后用 ICP-MS(Perkin-Elmer/Sciex Elan 9000,USA)对样品分别进行测定.

浸提方法:准确称取 I 级灰、Ⅱ级灰、Ⅲ级灰和渣各 10 g 于 500 mL 锥形瓶中,分别加入 100 mL 自来水、HNO₃ 和 H₂SO₄ 溶液(pH 为 3.20±0.05,模拟酸性降雨)以及醋酸(HAc)缓冲溶液(pH 为 4.93±0.05,模拟城市生活垃圾渗滤液)3 种不同的浸提剂,盖紧瓶盖后置于多功能振荡器上,在室温 20~25℃下充分振荡 18 h(过夜),将悬浊液倒入 50 mL 离心管中,然后以 3 000 r/min 离心 30 min,取其上清液进行测试,详见固体废物浸出毒性浸出方法^[16-18].

粉煤灰和渣的其它相关指标检测参见《用于水泥和混凝土中的粉煤灰(GB/T 1596-2005)》,pH 值测定方法参考《森林土壤 pH 值的测定》(LY/T 1239-1999)和《土壤元素的近代分析方法》.

试剂 HNO₃ 为优级纯,其余均为分析纯. 采用 SPSS 10.0 版本对所得数据进行分析 and 处理.

1.3 质量控制

(1) 重金属测定的准确性将通过测定标准物质(GBW07310)得到验证,待测元素的含量与参考值均有很好的一致性,回收率在 77.4%~87.7%之间(表 1),满足要求,说明该方法用于测定重金属元素的含量是可行的.

(2) 所有样品均测试 3 个平行,相对标准偏差(RSD)在 0.2%~14.2% 范围内,均小于 15%,满足要求.

(3) 试剂空白制备:在聚四氟乙烯消解罐中,准确加入 10 mL HNO₃,加盖后置于微波消解仪中,同其它样品一样进行消解和定容,制备试剂空白. 每 8 个样品,平行 1 个实验空白.

表 1 标准物质中各元素含量及回收率

Table 1 Concentration and recovery of elements in Certified Reference material (CRM)

元素	标准值 /μg·g ⁻¹	测定值 /μg·g ⁻¹	相对标准偏差 RSD(n=3)/%	回收率 /%
Cr	65±2	57	3.1	87.7
Mn	580±12	449	25.4	77.4
Cd	0.13±0.01	0.11	0.02	81.6
Pb	20.6±1.2	18.7	0.7	86.4
Cu	21.6±0.8	16.9	0.6	78.3
Zn	65±3	55	6	84.6

2 结果与讨论

2.1 渣和粉煤灰的基本特征

由于煤的来源不同,其成分也复杂,在不同时期

燃烧所得的粉煤灰及渣的成分也会有较大的变化,因此对样品中的特征指标进行了测定,将渣和粉煤灰放在设定为 100℃ 的烘箱里烘 24 h,测定其含水量以及烘干后干基的 pH、细度和相关指标,见表 2. 粉煤灰的 pH 变化范围一般为 4.5 ~ 12.0,其主要取决于原煤中 S 的含量,同时与粉煤灰的风化程度有

关,未被风化的粉煤灰 $\text{pH} > 9$,而被风化的粉煤灰 $\text{pH} < 8.5$ ^[19]. 本次样品的 pH 较大,都呈现碱性,这与电厂在烟气脱硫过程中添加石灰粉或石灰石粉有关. I 级、II 级、III 级粉煤灰和渣经过 150 μm 方孔筛筛余量分别为 42.9%、48.5%、55.1% 和 59.1%,粒径分布差异不大.

表 2 燃煤电厂的渣和粉煤灰的基本理化属性/%
Table 2 Basic characteristics of fly ash and slag from thermal power plants/%

级别	pH ¹⁾	细度 ²⁾	烧失量	含水量	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O ³⁾
I 级	10.52	42.9	3.02	0.15	0.30	1.30	0.22	1.08
II 级	11.05	48.5	3.68	0.15	0.31	1.32	0.26	1.13
III 级	11.31	55.1	12.3	0.17	0.33	10.1	1.09	7.74
渣	9.07	59.1	— ⁴⁾	—	—	—	—	—

1) 无量纲; 2) 150 μm 方孔筛筛余; 3) 粉煤灰中的碱含量,以 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计; 4) 无数据

2.2 重金属分布特征

采用 EPA Method 3051 进行微波消解后,粉煤灰和渣中重金属含量的测定结果见表 3, F 类 3 个等级的灰中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 35.75、148.06、19.64、17.95、32.95、0.182 和 14.95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,渣中重金属的含量分别为 26.62、279.96、15.81、12.83、12.13、0.031 和 1.58 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,所有元素的含量均明显小于垃圾焚烧飞灰中重金属含量^[8]. 对比表 3 中不同级别的灰和渣中不同重金属的含量,可看出 I、II 和 III 级灰中挥发性元素 Cr、Cu、Zn、Ni、Cd 和 Pb 的含量接近,没有较大的差异,其中 Cr、Cu 和 Zn 变异系数分别为 4.4%、6.5% 和 13.5%,含量最为接近,但灰中除 Mn 以外的所有重金属元素的含量均明显要比渣中的含量要高,而 Mn 则相反,其含量呈现出明显的分布特征,即 I 级灰 < II 级灰 < III 级灰 < 渣,随着粒径增大, Mn 的含量也在增加,渣中 Mn 的含量最大,这与 Mn 较高的熔点(1 244℃)和沸点(2 097℃),不容易气化,而停留在渣中有关. Baba 等^[20]的研究表明,重金属元素容易被吸附在光滑球体状的细小飞灰颗粒物上,尤其是易挥发元素 Pb、Cd、Zn,它们在细粒径灰粒中的富集程度要大于非挥发性元素^[21]. Snigdha 等^[5]的研究发现飞灰中金属元素的浓度要高于底灰中的浓度,飞灰样品中 Cr 和 Zn 的含量最高,而底灰样品中 Mn 的含量最高. I、II 和 III 级灰中重金属的含量接近可能与其粒径分布相近有关.

从表 3 可发现,不同等级的粉煤灰中除元素 Cd 以外的含量均低于天津市土壤环境背景值,但 I、II 和 III 级灰中 Cd 的含量分别是环境背景值的 2.58、1.50 和 1.98 倍,因此从燃煤电厂和冬季采暖锅炉的除尘设施进入大气中烟尘 Cd 污染应予以重视,

天津地区的土壤和沉积物中重金属 Cd 均超过土壤环境背景值,东丽、西青、北辰和津南区的蔬菜地土壤中 Cd 的含量分别达到了 1.12、0.37、0.17 和 0.34 mg/kg ^[22],海河干流的沉积物中 Cd 的含量也达到了 0.89 mg/kg ^[23],其污染除了污水灌溉的来源外,是否与近年来天津地区大量燃煤产生的烟尘干沉降有关,2007 年天津全市降尘年均值达到了 11.86 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{月})$,是否也存在较严重的大气沉降输入还需进一步研究.

2.3 重金属浸出水平

为了模拟粉煤灰中重金属在不同酸碱度条件下的溶出情况和浸出毒性,分别采用自来水($\text{pH} = 7.06$)、 HNO_3 和 H_2SO_4 溶液($\text{pH} = 3.2$)以及 HAc 缓冲溶液($\text{pH} = 4.93$)按照文献[16 ~ 18]提供的方法进行浸提,浸出结果见表 4. 在模拟中性降雨($\text{pH} = 7.06$)和酸性降雨($\text{pH} = 3.20$)的环境下重金属 Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的浸出效率比较低,均小于 0.11%,其中 Pb 的浸出率为 0,可能是由于 Pb^{2+} 只有在酸性条件或碱性溶液中才可能存在^[25],而 H_2SO_4 一般较难将灰中的 Pb 浸出^[26],Mn 仅在渣有 0.02% 和 0.05% 浸出,而模拟垃圾渗滤液浸出实验中所有重金属元素浸出率均有明显上升,Cd 表现最为明显,这可能是由于 HAc 缓冲体系导致各种重金属的浸出浓度提高^[27]. 环境条件对粉煤灰组分的移动性和物理化学性质有很大的影响^[28],金属元素的释放受沥滤液 pH、自身的地球化学特性及其在粉煤灰中的分布等因素的影响^[29 ~ 32],同时还与沥滤持续时间有关^[33]. 由于粉煤灰的碱性性质,大多数金属阳离子如 Pb、Cu 和 Ni 的沥取很少^[34], Ugurlu^[35] 的研究表明沥滤液中 Pb 的浓度取决于实验条件, pH 较大的沥滤液限制粉煤灰中 Pb 的迁移, Pb 的浸出

率低于 Cu 和 Mn. 在本研究中,元素 Cr 和 Cd 在灰渣中均有较高的浸出率,在 3 种模拟条件下,粉煤灰中 Cr 的浸出率均高于其在渣中的浸出率,这可能与灰渣的粒度有关,龚勋等^[36]的研究表明粒度是影响 Cr 浸出率的主要因素. Seferinoglu 等^[37]提出在粉煤灰中,Cd 是典型的易淋出元素,薛军等^[38]在不同浸出条件下对垃圾焚烧飞灰中进行重金属浸出实验,浸

提剂 HCl 对 Cd 的浸出率也达到了 80. 17%. 天津市降水的 pH 值一般在 3. 99 ~ 8. 13 之间,因此降雨对灰渣 Cd 的浸出问题应予以重视. 沥滤实验通常可用来预测飞灰的处理对环境的影响,元素 Cd 具有较高的浸出率,应注意在采用湿式除灰渣过程中可能存在 Cd 的浸出问题,若灰渣的处理不当可能存在一定的环境风险.

表 3 燃煤电厂渣和粉煤灰重金属含量
Table 3 Contents of heavy metal of fly ash and slag from power plants

项目		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
灰	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	33. 98	104. 61	14. 51	17. 57	37. 76	0. 232	16. 99
	I 级 RSD/%	1. 6	3. 1	7. 1	6. 0	4. 3	0. 5	2. 2
	SD/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0. 5	3. 2	1. 0	1. 1	1. 6	0. 001	0. 4
	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	36. 98	128. 74	24. 05	17. 02	28. 99	0. 135	10. 30
	II 级 RSD/%	4. 7	5. 7	6. 0	6. 4	0. 2	1. 3	6. 0
	SD/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	1. 7	7. 3	1. 4	1. 1	6. 1	0. 002	0. 6
	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	36. 28	210. 83	20. 35	19. 25	32. 09	0. 178	17. 56
	III 级 RSD/%	1. 6	2. 3	6. 1	4. 7	5. 2	3. 1	2. 3
	SD/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0. 6	4. 9	1. 2	0. 9	1. 7	0. 005	0. 4
渣	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	26. 62	279. 96	15. 81	12. 83	12. 13	0. 031	1. 58
	RSD/%	5. 4	3. 3	3. 0	1. 9	5. 1	13. 7	14. 2
	SD/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	1. 4	9. 1	0. 5	0. 2	0. 6	0. 004	0. 2
垃圾焚烧飞灰 ^[8] / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		318. 43	2 034. 66	185. 67	976. 74	6 089. 93	72. 02	4 769. 96
天津土壤背景值 ^[24] / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		82. 65	665. 0	32. 39	28. 35	76. 27	0. 09	20. 32

表 4 粉煤灰和渣中重金属浸出率/%
Table 4 Leaching rate of heavy metals diffused from fly ash and slag/%

浸提剂类型		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
模拟中性降雨, pH = 7. 06	I 级	2. 45	0. 00	0. 09	0. 03	0. 02	2. 39	0. 00
	II 级	2. 38	0. 00	0. 04	0. 03	0. 01	2. 20	0. 00
	III 级	2. 94	0. 00	0. 07	0. 02	0. 00	1. 94	0. 00
	渣	0. 13	0. 02	0. 06	0. 03	0. 01	1. 14	0. 00
模拟酸性降雨, pH = 3. 20	I 级	3. 95	0. 00	0. 11	0. 02	0. 01	3. 56	0. 00
	II 级	3. 85	0. 00	0. 06	0. 01	0. 00	3. 20	0. 00
	III 级	3. 98	0. 00	0. 07	0. 01	0. 01	2. 34	0. 00
	渣	0. 14	0. 05	0. 10	0. 01	0. 01	0. 71	0. 00
模拟垃圾渗滤液, pH = 4. 93	I 级	1. 91	9. 01	5. 32	2. 30	4. 14	26. 63	0. 01
	II 级	2. 07	6. 36	4. 59	1. 76	3. 33	17. 67	0. 03
	III 级	3. 92	5. 54	3. 15	2. 15	3. 45	14. 42	0. 11
	渣	1. 13	2. 72	1. 56	1. 46	3. 02	8. 31	0. 12

3 结论

(1) 燃煤电厂 F 类 3 个等级的灰中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 35. 75、148. 06、19. 64、17. 95、32. 95、0. 182 和 14. 95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 渣中的含量分别为 26. 62、279. 96、15. 81、12. 83、12. 13、0. 031 和 1. 58 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 3 个级别的灰和渣中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的含量均低于天津地区土壤环境背景值,但灰中 Cd 的含量明显比背景值高.

不同级别的灰中重金属含量接近,但都远比渣的含量高,而 Mn 则相反,其含量呈现明显分布特征(I 级灰 < II 级灰 < III 级灰 < 渣),随着粒径增大, Mn 的含量在增加.

(2) 在模拟中性和酸性降雨对 3 个级别的灰和渣的浸泡实验中, Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的浸出率较低(均小于 0. 11%),总体上中性和酸性降雨对灰和渣中重金属的淋溶效果有限. 而用 HAc 模拟垃圾渗滤液浸泡粉煤灰及渣的实验中重金属浸出率相对较

高,其中 Cd 在 I 级、II 级、III 级灰及渣中的浸出率分别达到 26.6%、17.7%、14.4% 和 8.3%,因此应重视粉煤灰中 Cd 的浸出毒性和迁移特点及存在的环境风险。

参考文献:

- [1] 吕志敏,李仙粉,任福民,等.综合利用电厂粉煤灰的重金属问题[J].环境与可持续发展,2006,(4):57-59.
- [2] Mehnert E, Hensel B R. Coal combustion by-products and contaminant transport in groundwater [A]. In: Proceedings of Coal Combustion By-Products Associated with Coal Mining Interactive Forum [C]. Carbondale: Southern Illinois University, 1996. 161-171.
- [3] Kim A G. CCB Leaching summary: survey of methods and results [A]. In: Proceedings of Technical Interactive Forum, Coal Combustion By-Products and Western Coal Mines [C]. CO: Golden, 2002. 179-195.
- [4] Kim A G, Kazonich G. Release of trace metals from CCB: maximum extractable fraction [A]. In: American Coal Ash Association. Proceedings of the 14th International Symposium on Management and Use of Coal Combustion Products (CCPs) [C]. Texas: San Antonio, 2001. 1-15.
- [5] Sushil S, Batra V S. Analysis of fly ash heavy metal content and disposal in three thermal power plants in India [J]. Fuel, 2006, **85**(17-18): 2676-2679.
- [6] Baba A, Gurdal G, Sengunalp F, *et al.* Effects of leachant temperature and pH on leachability of metals from fly ash. A case study: Can thermal power plant, province of Canakkale, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **139**(1-3): 287-298.
- [7] 王云鹤,李海滨,黄海涛,等.重金属在煤气化过程的分布迁移规律及控制[J].中国环境科学,2002, **22**(6): 556-560.
- [8] 万晓,王伟,叶敬旻,等.垃圾焚烧飞灰中重金属的分布与性质[J].环境科学,2005, **26**(3): 172-175.
- [9] 严建华,李建新,池涌,等.垃圾焚烧飞灰重金属蒸发特性试验分析[J].环境科学,2004, **25**(2): 170-173.
- [10] 李润东,王建平,王雷,等.垃圾焚烧飞灰烧结过程重金属迁移特性研究[J].环境科学,2005, **26**(6): 186-189.
- [11] 温彦锋,蔡红,边京红.灰渣的化学性质及贮存对环境的影响[J].水利学报,2000,(4): 19-23.
- [12] 张军营,郑楚光,刘晶,等.煤灰中微量重金属元素的迁移性实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2002, **30**(12): 83-85.
- [13] Kim A G, Kazonich G, Dahlberg M. Solubility of cations in class F fly ash [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(19): 4507-4511.
- [14] Lau S S S, Wong J W C. Toxicity evaluation of weathered coal fly ash; amended manure compost [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2001, **128**(3-4): 243-254.
- [15] Sivapullaiah P V, Baig M A A. Leachability of trace elements from two stabilized low lime Indian fly ashes [J]. Environmental Earth Science, 2010, **61**(8): 1735-1744.
- [16] HJ/T 300-2007, 固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法[S].
- [17] HJ/T 299-2007, 固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法[S].
- [18] US EPA. Method 1311 Toxicity Characteristic Leaching Procedure [R]. Washington, DC: US EPA, 1992. 1-38.
- [19] Baba A, Usmen M A. Effects of fly ash from coal burning electrical utilities on ecosystem and utilization of fly ash [A]. In: Baba A, Howard K W F, Gunduz O, (Eds.). Groundwater and ecosystems [C]. Dordrecht: Springer, 2006. 15-31.
- [20] Baba A, Gurdal G. Concentrations of heavy metals in fly ash from CAN coal combustion thermal power plant (Canakkale-Turkey)-II [J]. Chinese Journal Geochemistry, 2006, **25**(S1): 53-58.
- [21] 徐应成,翟建平,涂俊,等.华能南京电厂不同粒径粉煤灰中微量元素分布及其富集规律[J].地球化学,1997, **26**(3): 73-78.
- [22] Wang X L, Sato T, Xing B S, *et al.* Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish [J]. Science of the Total Environment, 2005, **350**(1-3): 28-37.
- [23] Wu G H, Cao S S, Chen S R, *et al.* Accumulation and remobilization of metals in superficial sediments in Tianjin, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, doi: 10.1007/s10661-010-1434-3.
- [24] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990. 320-403.
- [25] 唐跃刚,张会勇,代世峰,等.煤中铅的地球化学特征[J].煤田地质与勘探,2001, **29**(2): 7-10.
- [26] 张瑞娜,赵由才,许实.生活垃圾焚烧飞灰的处理处置方法[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2003, **16**(1): 22-28.
- [27] 席北斗,王琪,张晓萱,等.不同浸出毒性鉴别方法对垃圾焚烧飞灰浸出毒性鉴别的适宜性[J].环境科学研究,2005, **18**(S): 17-22.
- [28] Zandi M, Russell N V. Design of a leaching test framework for coal fly ash accounting for Environmental Conditions [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **131**(1-3): 509-526.
- [29] Jankowski J, Ward C R, French D, *et al.* Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems [J]. Fuel, 2006, **85**(2): 243-256.
- [30] Soco E, Kalemekiewicz J. Investigations of chemical fraction of Co and Ni in industrial fly ash and mobility of metals in environmental conditions [J]. Chemosphere, 2007, **67**(2): 359-364.
- [31] Soco E, Kalemekiewicz J. Investigations of sequential leaching behaviour of Cu and Zn from coal fly ash and their mobility in environmental conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **145**(3): 482-487.
- [32] Kim A G, Kazonich G, Dahlberg M. Relative solubility of cations in Class F fly ash [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(19): 4507-4511.

- [33] Ram L C, Srivastava N K, Tripathi R C, *et al.* Leaching behavior of lignite fly ash with shake and column tests [J]. *Environmental Geology*, 2007, **51**(7): 1119-1132.
- [34] Kim A G. The effect of alkalinity of Class F PC fly ash on metal release [J]. *Fuel*, 2006, **85**(10-11): 1403-1410.
- [35] Ugurlu A. Leaching characteristics of fly ash [J]. *Environmental Geology*, 2004, **46**(6-7): 890-895.
- [36] 龚勋, 郝炜, 张丹, 等. 燃煤锅炉粉煤灰中典型痕量金属元素淋滤特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2009, **30**(1): 156-160.
- [37] Seferinoglu M, Paul M, Sandstrom A, *et al.* Acid leaching of coal and coal-ashes [J]. *Fuel*, 2003, **82**(14): 1721-1734.
- [38] 薛军, 王伟, 汪群慧. 传统酸浸和微波酸浸处理飞灰重金属的效果及重金属的形态变化特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 535-539.