

适用于焚烧飞灰卫生填埋场共处置的浸出毒性鉴别程序研究

王伟¹, 叶瞰旻^{1,2}, 王琪³, 高兴保¹, 万晓¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:选取 2 种代表性垃圾焚烧飞灰, 通过常规酸中和容量浸出实验和多级浸取实验, 研究了酸中和容量消耗和浸出液 pH 值的变化规律. 结果表明, 现有的单批次浸出毒性鉴别程序对飞灰的酸中和容量消耗程度低, 浸出液 pH 值高, 不利于评价飞灰中重金属的潜在危险性. 对比常规酸中和容量浸取实验和多级浸取实验结果, 得出在垃圾焚烧飞灰与生活垃圾共处置情景(过流系统)下, 中和过程与洗出过程同时发生, 飞灰中有 1/3 左右的碱性物质参与了中和反应. 在合理设定卫生填埋场参数的基础上, 通过模拟计算, 提出了适用于我国卫生填埋场飞灰共处置情景的浸出程序, 其主要参数为: 浸取液为乙酸溶液, 酸度(以 H^+ 计)为 $0.3 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ ($pH = 2.64$), 液固比(L/S)为 20. 该浸出毒性鉴别程序可为我国垃圾焚烧飞灰的安全处置提供有效管理和可靠保障.

关键词:垃圾焚烧飞灰; 共处置; 浸出毒性鉴别程序; 酸中和容量

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2867-06

Extraction Procedure for Leaching Toxicity of Fly Ash from Municipal Solid Waste Incinerators Under Co-disposal Scenario in Landfill

WANG Wei¹, YE Tun-min^{1,2}, WANG Qi³, GAO Xing-bao¹, WAN Xiao¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: The behavior of acidity neutralization capacity (ANC) depletion and change of pH values in leachate from two representative samples were investigated with test of general acidity neutralization capacity (GANC) and multistage extraction test (MET). The results indicated that low estimation of potential environmental risk would be conducted with low depletion of ANC and high pH values of leachate in such actual batch test. Comparing the results of GANC with that of MET, neutralization and wash-out process would take place at the same way under the flow-through scenarios of co-disposal, and there is one-third alkaline components reacting in the neutralization process. With simulative calculation basing on reasonable hypothesis of parameter in sanitary landfill, the extraction procedure for leaching toxicity of fly ash from MSWI under co-disposal scenario was proposed, using leachant of $0.3 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ HAc solution and $L/S = 20$. This procedure would definitely provide disposal of MSWI fly ash in China with reliable safeguard and effective management.

Key words: MSWI fly ash; co-disposal; toxicity leaching procedure; acidity neutralization capacity

2005 年我国生活垃圾焚烧处理能力已达 33 010 $t \cdot d^{-1}$ ^[1], 保守估计我国垃圾焚烧飞灰产量已达 1 000 $t \cdot d^{-1}$ (飞灰产率按重量比 3% 计). 根据现行法规的要求, 对垃圾焚烧飞灰必须按照危险废物进行特殊管理, 即稳定化/固化后进入安全填埋场处置. 然而, 已建设焚烧设施的城市, 大多未建安全填埋场. “十五”期间国家发改委和环保总局提出的《全国医疗废物和危险废物处理处置设施建设规划》中, 也仅在全国规划了 30 座安全填埋场. 实际上, 相当部分的飞灰处于无控排放的状态. 另一方面, 我国许多城市都建有高规格的卫生填埋场, 其防渗和渗滤液收集处理系统的安全性均达到较高的技术水平. 为了真正

实现对飞灰的有效控制, 通过强化预处理的手段减少飞灰中有害物质的浸出性, 达到相关标准后进入卫生填埋场与生活垃圾进行共处置的技术路线, 可成为解决目前飞灰处置尴尬局面的有效途径.

为评价飞灰预处理的效果和共处置情景的安全性, 必须制订适用于此情景的飞灰浸出毒性鉴别程序. 实践操作中多是通过单批次式浸出毒性鉴别程

收稿日期: 2006-12-31; 修订日期: 2007-01-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA644010); 国家自然科学基金项目(20277024)

作者简介: 王伟(1960~), 男, 教授, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化技术, E-mail: solid@tsinghua.edu.cn

序来评价和控制飞灰等危险废物的安全性^[2,3],而现行的国家标准浸出毒性鉴别程序(GB 5086.1-1997)是借鉴国外相关程序如毒性浸出程序(toxicity characteristic leaching procedure, TCLP, 美国国家环保局 U.S. EPA)和环告 13 号(日本环境省)制订的,对于飞灰这类高碱性废物,缺乏对实际情景下各种条件参数和工况的合理模拟.单批次式浸出毒性鉴别程序是以静态的平衡近似模拟实际情景的动态平衡,考虑到卫生填埋场内特殊的环境条件(高淋溶比、低 pH 值),除中和作用外,洗出作用对动态平衡有较大影响^[4],因此必须构建适用于飞灰这类特殊废物在卫生填埋场处置时的浸出毒性鉴别程序.

本研究选取了 2 种代表性飞灰样品,测定了其组分,针对其中重金属的浸出行为进行了分析.设置填埋场渗滤液 pH 值为共处置情景的最终平衡点,对比单批次浸出毒性鉴别程序获得的不同酸度条件的静态平衡和多级浸取实验模拟的动态平衡,取得飞灰中碱性物质的洗出/中和(W/N)比.以此为基础,对填埋场参数进行合理设定,通过模拟计算,提出适用于我国卫生填埋场飞灰与生活垃圾共处置情景下的浸出毒性鉴别程序.

1 材料与方法

1.1 飞灰样品

飞灰样品分别取自我国华东地区 2 座垃圾焚烧厂,处理规模分别为 $1\,000\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1\,050\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,均采用炉排炉焚烧系统,活性炭+石灰半干法尾气净化+布袋除尘器除尘的工艺.在焚烧炉正常工况稳定运行时,分时段采集了飞灰样品,混匀、均分后密封贮存,经 55°C 恒温干燥 24 h 后作为实验样品,记为 FA1 和 FA2.

1.2 实验方法

1.2.1 主要组成成分和微量重金属元素分析

焚烧飞灰是高温过程中形成的以 Ca、Si、Al、Fe 的化合物为主要成分的非均质材料,本研究中采用 X 射线荧光光谱仪(XRF, X-Ray Fluorescence)测定了焚烧飞灰的主要成分^[5].样品在 55°C 条件下烘干 24 h 后,用 XRF-1700 型 X 射线荧光光谱仪进行测定.

重金属含量的测定采用改进的 ASTM D6457-00a 消解方法消解飞灰样品^[6],采用 IRIS Intrepid II 型全谱直读等离子发射光谱仪(ICP-AES, inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, Thermo Electron Co.)测定 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等元素的含量.

1.2.2 浸出毒性鉴别程序和浸取实验

(1)TCLP(toxicity characteristic leaching procedure) 美国国家环保局(U.S. EPA)TCLP 程序是当前浸出实验中运用最广泛的标准方法,该方法是模拟危险废物(5%处置比)和城市生活垃圾共处置情景下,危险废物中的有害物质在填埋场有机酸环境中的浸出行为.飞灰为高碱性样品,采用 2 号浸取剂.

(2)固体废物毒性浸出方法(GB 5086.1-1997) 该方法为我国危险废物鉴别的现行国家标准,浸取液为去离子水,液固比(L/S)为 10,其余实验条件同 TCLP.

(3)常规酸中和容量浸取实验 GANC(general acid neutralization capacity) 这种方法是对 Isenburg 等^[7]的方法修改得到的.12 个单独的浸取过程平行进行,浸取系统中乙酸量根据样品碱性物质含量按不同梯度递增.在液固比为 20 的条件下经过 48 h 翻转振荡,过滤.

(4)多级浸取实验 MET(multistage extraction test) 采用多级反复浸取的操作来模拟共处置填埋场的最不利情况下废物被反复浸提的连续过流过程.本实验中采用 10 级浸取,浸取剂为酸度 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸溶液,1~6 级采用 $L/S=3.33$,每级浸提时间为 3 h,7~10 级采用 $L/S=5$,每级浸提时间为 4.5 h.

各浸取程序的浸出液中重金属元素 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等采用 ICP-AES 测定.

2 结果与分析

2.1 飞灰主要组分和微量重金属元素分析

如表 1 所示,飞灰构成的主要元素有 Si、Ca、Al、Fe、K、Na、Cl 等, Si、Ca、Al、Fe 是构成飞灰主体的主要元素.飞灰中 Ca 含量较高,主要来自焚烧烟气处理过程中喷入的过量石灰,从而表现为飞灰具有高碱性.表 1 中的 A_{ik} 表示碱性氧化物, A_{cid} 表示酸性氧化物,此处采用 XRF 结果对飞灰的酸碱性作定性分析, $A_{\text{ik}}/A_{\text{cid}}$ 可以看出, FA1 的碱性强于 FA2^[8].

从表 2 中可见,焚烧飞灰 FA1 和 FA2 的重金属含量约为飞灰重量的 1.0% 和 2.6%,其中 Zn、Pb、Cu、Cr 含量均较高.相对于土壤背景值,重金属在飞灰中被大量富集,这表明飞灰存在较大的潜在环境风险,因此应对飞灰进行特殊的管理控制^[9,10].

2.2 飞灰在单批次式浸出毒性鉴别程序下的浸出行为

飞灰在不同浸出程序(TCLP 和 GB 5086.1-1997)下的浸出结果列于表 3.可以看出不同程序的

表 1 飞灰的主要组分分析/%

Table 1 Main composition of MSWI fly ash by XRF/%		
种类	FA1	FA2
SiO ₂	10.77	23.64
Al ₂ O ₃	3.23	8.18
CaO	32.77	22.78
Fe ₂ O ₃	3.28	4.83
K ₂ O	8.58	5.6
Na ₂ O	3.81	5.28
MgO	0.72	2.64
SO ₃	10.74	13.99
P ₂ O ₅	1.53	2.49
Cl	20.59	6.4
A _{lk} /A _{cid} ¹⁾	3.17	1.2

1) A_{lk} = CaO + Fe₂O₃ + K₂O + Na₂O + MgO; A_{cid} = SiO₂ + Al₂O₃ + P₂O₅

表 2 飞灰的主要微量重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Main heavy metals of MSWI fly ash/mg·kg ⁻¹			
重金属	FA1	FA2	土壤
Cd	109	85	0.01 ~ 0.7
Cr	384	191	1 ~ 1 000
Cu	2 568	1 254	2 ~ 100
Ni	63	101	5 ~ 500
Pb	2 338	5 126	2 ~ 200
Zn	5 024	23 504	10 ~ 300

主要差异是来自采用的不同的浸取液(浸取液的酸度不同),飞灰中的碱性物质和酸反应后,导致浸取液的最终 pH 值不同,而重金属元素的浸出和浸取液最终的 pH 值存在极大的相关性,从而导致浸出浓度的差异.

表 3 飞灰的重金属浸出毒性、浸取剂酸度和浸出液 pH 值/mg·L⁻¹

Table 3 Heavy metals concentration, pH values of leachate & acidity of leachant by TCLP & GB 5086.1-1997/mg·L⁻¹

浸出程序	样品编号	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	浸取液酸度/ mol·L ⁻¹	浸出液 pH
TCLP	FA1	0.115	0.755	0.19	ND	1.765	3.275	0.1	9.67
	FA2	ND	0.042	ND	ND	0.674	1.115	0.1	9.44
鉴别限值(USEPA)		1.0	5.0	—	—	5.0	—	—	—
GB 5086.1-1997	FA1	0.071	1.73	0.01	0.02	108.0	8.4	0	12.33
	FA2	ND	ND	ND	ND	0.953	0.268	0	10.82
鉴别限值(GB 5085.3-1996)		0.3	10	50	10	3	50	—	—

通过 GANC 实验对代表性飞灰样品 FA1 和 FA2 中的碱性物质(以酸中和容量表示)进行了测定,如图 1 所示,FA1 和 FA2 在乙酸体系中的 ANC_{5.5} 分别为 5.7 mol·kg⁻¹和 2.5 mol·kg⁻¹.对于缓冲能力较大的卫生填埋场环境,取 pH=5.5 的填埋场渗滤液 pH 值为共处置情景的最终平衡点^[11]. TCLP 和 GB 5086.1-1997 分别对应于 ANC 的消耗为 2.0 mol·kg⁻¹和 0 mol·kg⁻¹,即使 TCLP 所刻划的“最不利条件”浸出也难以完全消耗飞灰这种高碱性水泥基废物的 ANC,而残留的 ANC 又控制了溶液体系的平衡 pH 值,从而影响了重金属元素的浸出.同时测定的浸出液平衡时的一系列 pH 值所对应的重金属浸出浓度,如图 2 所示.结果表明,在 ANC 被消耗的情况下,随着溶液体系平衡 pH 值的降低,大量重金属被浸出.由此可见,对于含有大量碱性物质的飞灰,具有一定的类水泥性质,飞灰中重金属的浸出特性主要取决于体系平衡时的 pH 值,而 pH 值主要取决于飞灰本身的碱性物质(以酸中和容量表示)与浸取液酸度二者间的相互作用.

2.3 飞灰在多级浸取实验中的浸出行为

采用 MET 实验,通过多级反复浸取的操作,模

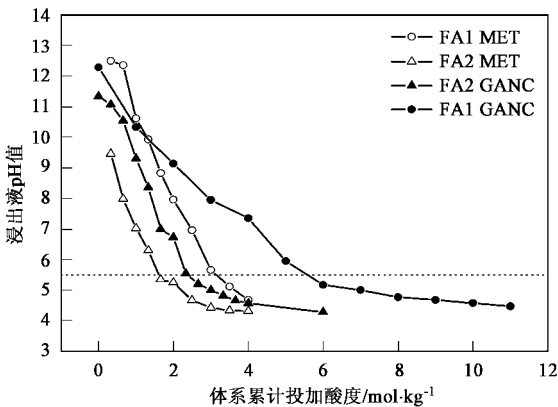


图 1 FA1 和 FA2 在 GANC、MET 实验中体系的 pH 值变化
Fig.1 Change of pH in leachate of FA1 and FA2 by GANC and MET

拟共处置情景最不利情况下废物被反复浸提的连续过流过程.由图 1 可见,在多级连续浸取过程中,体系的 pH 下降快于单批次浸出实验,实验得到的 FA1 和 FA2 的 ANC_{5.5} 分别为 3.1 mol·kg⁻¹和 1.5 mol·kg⁻¹,分别占单批次体系的 0.54 和 0.60,证明了连续过流系统中洗出作用的存在.这主要是由于提供飞灰酸中和容量的碱性物质如 Ca、Mg 的氧化物、氢氧化物、碳酸盐等未及时参与中和反应而随浸

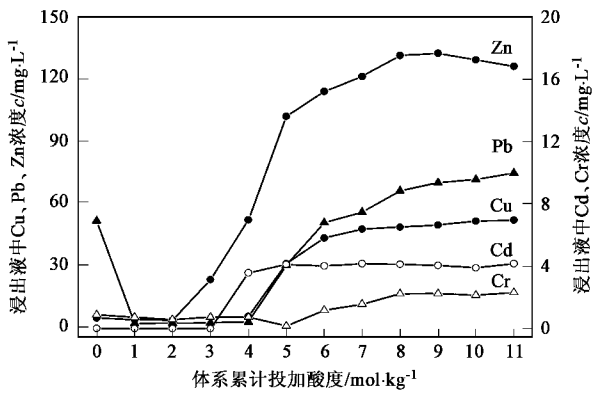


图2 在 GANC 实验中飞灰 FA1 的重金属浸出
Fig.2 Heavy metals concentration in leachate of FA1 in GANC

取液流出造成的. 实验可得, $W/N \approx 1$ (W 为洗出的碱性物质, N 为参与中和的碱性物质), 碱性物质含量更高的 FA1 的 W/N 要大于碱性物质含量低的 FA2. 由于多级连续浸取实验受操作条件的限制, 不能无限逼近连续过流系统的微元极限, 而实际的连续过流情景中由于更频繁的多次洗出作用, 会使得更多的碱性物质来不及参加中和反应而随水流被洗出; 同时, 对于碱性物质含量高过于 FA1 的飞灰样品, 该比值亦会是增大的趋势, 由此可估计实际情景下的 $W/N \geq 1$. 综合考虑填埋场的缓冲能力和飞灰中碱性物质的含量, 以及重金属在 pH 值为 4.5 ~ 6 时的浸出性质(无明显差异, 如图 3 所示), 取 $W/N = 2$ 设计单批次浸取实验, 既能充分避免高碱度飞灰的评价风险(保证其浸出体系处于弱酸环境), 也不会造成一般飞灰中重金属浸出的过高判断. 取 $W/N = 2$, 即相当于飞灰中仅 1/3 的碱性物质参与了实际情景的中和反应.

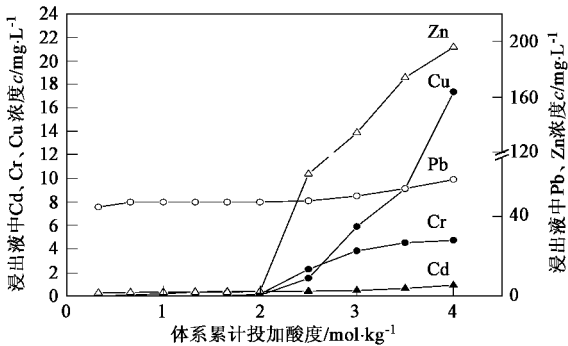


图3 FA1 在 MET 实验中重金属累积浸出浓度变化

Fig.3 Accumulative concentration of heavy metals in leachate with MET

3 适用于共处置情景的浸出毒性鉴别程序的制订

浸出毒性鉴别程序的目标情景是连续过流的卫

生填埋场, 在实验室直接模拟过流系统是困难的. 为了方便操作、易于标准化应用, 各国通常选择能够对实际环境进行简化模拟的单批次式浸出毒性鉴别程序作为标准方法. 以 TCLP 程序为例, 美国 EPA 最初提出该方法时, 希望它能够评估现场所能达到的最不利情况下的最大浸出液浓度.

以 TCLP 方法为代表的单批次浸出毒性鉴别程序虽被广泛用作危险废物鉴别的标准方法, 但对于水泥基废物等, TCLP 方法不一定达到最大浓度^[12]. 而前述实验结果也说明了 TCLP 对于飞灰这种废物的局限性. 同时, 浸取液-固体系的主要控制因素——pH 值又正是飞灰本身的碱性物质(以酸中和容量表示)和浸取液的酸度二者间相互作用的结果.

在卫生填埋场中, 渗滤液以过流方式通过飞灰, 飞灰与渗滤液接触过程中, 大部分碱性物质被洗出, 依据前述实验结果, 约有 2/3 的碱性物质(以酸中和容量计)没有参与中和反应. 基于上述结果, 通过合理假设符合我国卫生填埋场的参数, 并根据填埋场中中和与洗出的比例, 计算获得建立单批次浸出毒性鉴别程序的条件参数.

卫生填埋场最不利情况下的情景假设:

填埋深度为 50 m, 年均最大降雨量为 2 800 mm (95% 单侧置信上限)^[13], 填埋场渗透率 60%, 危险废物处置比 5%, 废物密度 $1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 安全保证周期 30 a.

(1) 液固比的确定 根据上述情景, 液固比计算结果为:

$$\begin{aligned} \text{液固比} &= \text{浸取剂质量} / \text{模拟填埋场废物质量} \\ &= (\text{年降雨量} \times \text{水的密度} \times \text{单位面积} \times \text{渗透率} \times \text{浸出时间}) / (\text{填埋深度} \times \text{废物密度} \times \text{单位面积} \times \text{飞灰共处置比例}) \\ &= [2.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \times 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1 \text{ m}^2 \times 60\% \times 30 \text{ a}] / (50 \text{ m} \times 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1 \text{ m}^2 \times 5\%) \\ &= 20.2 \end{aligned}$$

(2) 浸取液酸度(以 H^+ 计)的确定 参考我国的降水酸度以及卫生填埋场的实际情况, 对降水和垃圾渗滤液酸度做如下假定: 降水酸度 = $0.63 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 垃圾渗滤液酸度 = $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

则每年通过降雨和废物中有机物分解产生的酸度为:

$$\begin{aligned} &[\text{降水酸度} + \text{垃圾渗滤液酸度} \times (1 - \text{飞灰填埋比例})] \times \text{年降雨量} \times \text{面积} \times \text{渗透率} \\ &= [0.63 + 100 \times (1 - 5\%)] \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \times 2.8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \times 1 \text{ m}^2 \times 60 \% \\ & = 160.7 \text{ mmol} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \end{aligned}$$

因而每年与每 kg 飞灰反应的酸度为:
(年进入填埋场的总酸度 × 单位面积)/(填埋深度 × 单位面积 × 废物密度 × 飞灰填埋比例)

$$\begin{aligned} & = \frac{160.7 \text{ mmol} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \times 1 \text{ m}^2}{50 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2 \times 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 5 \%} \\ & = 64.3 \text{ mmol} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \end{aligned}$$

在 30 a 安全保证期内,与每 kg 飞灰反应的酸度为:

$$64.3 \text{ mmol} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1} \times 30 \text{ a} = 1\,928.4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

在卫生填埋场中,渗滤液以连续过流方式与飞灰发生固液接触反应,而洗出作用使得只有约 1/3 的碱性物质能够参与中和反应.因而,单批次程序中,飞灰被消耗的碱性物质(以 ANC 计)应为实际酸度的 3 倍,即批次实验应提供 3 倍的连续过流系统的酸度:

$$\begin{aligned} 1\,928.4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \times 3 & = 5\,785.2 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \\ & \approx 6 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

由于液固比取为 20:1,单批次浸出程序浸取液的酸度应为:6 mol/20 L=0.3 mol·L⁻¹.

由于该情景中酸度提供者主要是生活垃圾中有机成分发酵生成的有机酸,在浸出实验中选用乙酸溶液为浸取剂.乙酸的 p*K*_a 取 4.76(25℃),可计算出浸取剂的 pH 值为 2.64,溶液浓度为 0.3 mol·L⁻¹.

综上所述,基于焚烧飞灰卫生填埋共处置的浸出毒性鉴别程序条件参数确定为:采用 pH 值为 2.64 的乙酸溶液,以 20:1 的液固比对飞灰进行 18 h 的翻转振荡浸取.表 4 列出了该程序下 FA1 和 FA2 的重金属元素的浸出浓度,重金属的浸出率增加,浸出浓度超过标准限值几倍至几十倍,飞灰表现出很大的危险性.

表 4 共处置浸出程序下飞灰的重金属浸出毒性/mg·L⁻¹

Table 4 Heavy metals concentration of leachant by extraction procedure for co-disposal/mg·L⁻¹

浸出程序	样品 编号	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
共处置鉴别程序	FA1	4.05	1.20	42.91	0.20	50.32	113.90
	FA2	3.41	0.68	24.74	0.64	57.54	121.80
鉴别限值(GB 5085.3-1996)		0.3	10	50	10	3	50

浸出毒性鉴别程序的修订过程中,认为由单批次浸取实验测定的碱性物质(酸中和容量)中只有约 1/3 能参与连续过流系统的中和反应,这充分体现了

连续过流系统中焚烧飞灰浸出过程的特点.正是基于此,在制订的共处置鉴别程序的浸取剂中提供了合适的酸度以中和快速洗出的那部分碱性物质.这样,该程序可准确判别高碱性焚烧飞灰的重金属浸出毒性,避免由于飞灰具有较高的酸中和容量造成对其危险性的判别不足.另一方面,由于该程序设计充分依据卫生填埋情景,处理后的飞灰产物若可通过该程序检验,即可进入卫生填埋场共处置,为我国飞灰安全有效管理和处理处置提供了可靠保障.

4 结论

(1) 焚烧飞灰含有大量的重金属(质量分数为 1.0%~2.6%),具有潜在的环境风险.现行的浸出毒性鉴别程序 TCLP 和 GB 5086.1-1997 对其危险性的判别偏低,这是由于飞灰中重金属的浸出受浸取液-固体系平衡时的 pH 值控制所导致,而 pH 值主要取决于飞灰本身的碱性物质(以酸中和容量表示)与浸取液酸度二者之间的相互作用.

(2) 单批次式浸取实验和多级连续式浸取实验的结果表明,由于洗出作用,有一半以上的碱性物质(以酸中和容量表示)被连续过流的浸取剂带走,未能参与中和作用,从而降低了抵抗酸环境化学侵蚀的能力.根据情景分析,得出在实际情景中洗出的比例应更大.在保证安全的前提下,可认为飞灰中仅有 1/3 的碱性物质参与了实际情景的中和反应.

(3) 通过对我国卫生填埋场实际情景的模拟计算,提出了适用于飞灰共处置的单批次式浸出毒性鉴别程序:以 0.3 mol·L⁻¹ 的乙酸溶液为浸取剂,pH 值为 2.64,液固比(L/S)取为 20.

(4) 制订的浸出毒性鉴别程序可较准确地判别飞灰的危险性,为飞灰经强化预处理并达到相关标准后,进入卫生填埋场共处置提供了理论支持.

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2006[M]. 北京:中国统计出版社,2006.428~429.

[2] Kosson D S, Van der Sloot H A, Eighmy T T. An Approach for Estimating of Contaminant Release during Utilization and Disposal of Municipal Waste Combustion Residues [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 47: 43~75.

[3] Kosson D S, Van der Sloot H A, Sanchaez F, et al. An Integrated Framework for Evaluating Leaching in Waste Management and Utilization of Secondary Materials [J]. Environmental Engineering Science, 2002, 19(11): 159~177.

[4] Twardowska I, Szczepanska J. Solid Waste: Terminological and Long-term Environmental Risk Assessment Problems Exemplified in a Power Plant Fly Ash Study [J]. Science of the Total Environment, 2002, 285: 29~51.

[5]

Takaoka M, Nakatsuka D, Takeda N, *et al.* Application of X-ray Fluorescence Analysis to Determination of Elements in Fly Ash, Journal of the Japan[J]. Society of Waste Management, Experts, 2000, **11**(6): 333 ~ 342.

[6]

ASTM D 6357-00a, Standard Test Methods for Determination of Trace Elements in Coal, Coke, and Combustion Residues from Coal Utilization Processes by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, and Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry [S].

[7]

Isenburg J, Moore M. Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes [R]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1992. 361 ~ 377.

[8]

李润东, 池涌, 李水清, 等. 城市垃圾焚烧飞灰熔融 DSC-DTA 实验研究 [J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 113 ~ 117.

[9]

叶瞰旻, 王伟, 高兴保, 等. 我国垃圾焚烧飞灰性质及其重金属浸出特性分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2646 ~ 2650.

[10]

万晓, 王伟, 叶瞰旻, 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.

[11]

王宝贞, 王琳. 城市固体废物渗滤液处理与处置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 6 ~ 31.

[12]

Bishop P, Brown T, Shively W. Alkalinity Releases and The Leaching of Heavy Metals from Stabilized/Solidified Wastes [A]. In: Pawlowski L, Alaerts G, Lacy W, (eds.). Chemistry for Protection of the Environment 1985 [C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. 217 ~ 233.

[13]

国家气象中心. 中国降水年册(1991-2002) [R]. 北京: 国家气象中心, 2003.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明.

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为.自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

- 1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊.
- 2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊.
- 我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动.

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任.我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合.

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部