

城市生活垃圾焚烧飞灰水泥固化技术研究

靳美娟

(宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013)

摘要 用硫铝酸盐水泥对城市垃圾焚烧飞灰(简称飞灰)进行固化实验,研究了飞灰重金属浸出特性,分析了飞灰掺量、浸提剂 pH 值对重金属浸出特性以及飞灰掺量对不同龄期(3、7、28 d)飞灰固化体抗压强度的影响,并对飞灰及其固化体进行 XRD 分析。结果表明,在 HJ/T 299-2007 和 HJ/T 300-2007 两种不同浸出体系下,飞灰中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 和 Mn 等重金属浸出浓度差别较大,建议应根据评价目标合理选择重金属浸出测量方法。其中,飞灰中 Pb 的浸出浓度超过《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007)限值的 3.35 倍,因此被列为危险废物,应妥善处理。除飞灰掺量小于 40% 时的固化体 Cd 符合标准,其余飞灰固化体 Pb 和 Cd 的浸出浓度仍超过《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)限值,故达不到卫生填埋的要求。固化体抗压强度随飞灰掺量增大而降低,重金属浸出浓度与之相反。飞灰掺量为 40% 时,固化体中重金属浸出浓度随浸提剂 pH 值降低而增大,但 pH 值大于 5 时,未测出重金属浸出。XRD 结果表明:飞灰中可溶性盐参与水泥水化反应,重金属 Cr 以 CrO_4^{2-} 的形式固化于钙矾石中。

关键词 飞灰 垃圾处理 水泥固化 重金属浸出

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)06-3235-07 DOI 10.12030/j.cjee.201512169

Study on technoloy of solidification of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash by cement

Jin Meijuan

(Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract Incinerated municipal solid waste (MSWI), fly ash, was solidified by using sulfoaluminate cement in this study. The leaching of heavy metals from the MSWI fly ash was studied. Experiments were conducted to investigate the effect of the ratio of the MSWI fly ash to the solidified waste forms on the leaching properties and the compressive strength of solidified waste forms cured for 3, 7 and 28 d. The relationship between the pH of the leaching agent and the leaching of heavy metals was also evaluated. The phases of the fly ash and its solidified waste forms were analyzed by X-ray diffraction (XRD). The results showed that the selection of the methods for leaching heavy metals by purposeful evaluation was mandatory given that the concentrations of leached heavy metals such as Mn, Zn, Cr, Cd, Pb, and Cu in the fly ash differed based on HJ/T 299-2007 and HJ/T 300-2007. Fly ash is classified as hazardous waste and should be treated properly considering that the concentration of leached Cd was 3.35 times higher than that specified by the National Hazardous Waste Identification Standard (GB 5085.3-2007). The concentration of Cd leached from all solidified waste forms, except those in which the fly ash content was less than 40%, and the concentration of Pb leached from all solidified waste forms still exceeded the Control Standard for Pollution in Landfills (GB 16889-2008). Therefore, the leaching toxicity of fly ash did not meet the requirements of the landfill standard. The compressive strength of the solidified waste forms decreased with increasing fly ash content, and the concentration of leached heavy metals showed the opposite trend. The leachate concentration increased when the pH of the leaching agent was lower, but no leaching of heavy metals was observed when the pH of the leaching agent was higher than 5. The XRD analysis suggested that the soluble salts in the fly ash reacted with the hydration products of SAC. Chromium was incorporated into ettringite in the form of CrO_4^{2-} .

Key words fly ash; wastes disposal; cementation; leaching of heavy metals

随着我国城市现代化进程的不断推进,城市生活垃圾的产生量呈逐年剧增的趋势。如何安全有效地处理城市生活垃圾是我国环境保护面临的一个重要课题。目前,对该类垃圾的处理方法主要有堆肥、填埋和焚烧等^[1]。其中焚烧技术具有废物减量减

基金项目:陕西省教育厅重点实验室项目(15JS008);陕西省地理学重点学科资助项目

收稿日期:2015-12-23; 修订日期:2016-03-01

作者简介:靳美娟(1978—),女,硕士,讲师,研究方向:资源、环境管理与治理。E-mail:jmj61@163.com

容效果显著(减量 75%, 减容 90%)、高温灭菌实现垃圾无害化、燃烧能量可实现资源再利用(发电)等优点^[2], 成为国内外较先进的一种垃圾处理方法^[3]。但是, 城市生活垃圾成分复杂, 焚烧时会产生大量的危害环境的二次污染物, 如烟尘颗粒物、酸性气体、焚烧飞灰等^[3]。其中, 占焚烧垃圾总量 0.5%~3% 的焚烧飞灰(指在城市垃圾焚烧厂的烟气净化系统中收集的残余物), 含有焚烧中产生的大部分重金属(如铅、镉、锌等)和二恶英物质, 对环境危害较大, 属于危险废物, 应妥善处理。

近年来, 对于垃圾焚烧飞灰的处理方法主要有水泥固化^[4]、化学药剂固化^[5-6]、热处理(熔融和烧结)^[7-8]等。水泥固化技术的原理是利用水泥的水化反应产生的水化产物(具有一定强度)将废物固定在其中从而阻止废物与环境接触, 实现废物的无害化处理。水泥固化技术因原料易得、操作简便、处理成本低廉、无二次污染等特点, 被美国环保局列为有毒有害废物的最佳处理技术^[9], 但该技术最大缺点就是废物增容比大。用不同种类水泥如火山灰水泥^[10]、磷酸钾镁水泥^[11]、硅酸盐水泥^[12]等对垃圾焚烧飞灰的固化研究均有报道。但是, 以硅酸盐水泥为固化基材对垃圾焚烧飞灰进行固化研究较为广泛。其研究重点是固化体中的重金属浸出性能、固化机理及焚烧飞灰的无害化处理。例如, Bie 等^[13]研究表明, 用普通硅酸盐水泥固化焚烧飞灰时, 可大幅度降低飞灰中重金属(尤其是 Pb 和 Cd)浸出浓度, 且随着浸出剂的 pH 增大, 重金属浸出浓度降低。Remond 等^[12]研究表明, 焚烧飞灰的掺加会延缓水泥的凝结时间, 但对水泥水化形成的水化硅酸钙结构没有明显的影响。飞灰掺量 15% 以上, 由于飞灰和水泥结合性能的降低, 固化体的抗压强度随着飞灰掺加量的增大而减少。Aubert 等^[14]用以普通硅酸盐水泥和高炉矿渣为原料的两种特制水泥分别对预处理后的焚烧飞灰进行无害化处理, 结果显示, 根据传统的浸出实验, 水泥固化体对重金属元素锑和铬的固定效果较差, 因此, 飞灰的无害化处理必须解决锑和铬的有效固定问题。蒋建国等^[15]研究表明, 水洗预处理可基本去除焚烧飞灰中的可溶性物质, 又可有效降低飞灰中重金属在硅酸盐水泥固化体的浸出。宋珍霞等^[16]研究表明, 与原焚烧飞灰相比, 酸洗预处理过的飞灰与普通硅酸盐水泥形成的固化体抗压强度较高, 重金属不易浸出。贺杏华等^[17]研究表明, 矿渣硅酸盐水泥掺入量为 35% 时,

飞灰固化效果良好, 重金属浸出低。水泥通过物理包胶、替换、沉淀或吸附机制固化重金属。硫铝酸盐水泥是我国 70 年代自行研制的水泥品种, 具有强度高, 抗渗、抗冻性好、耐腐蚀性强的特点, 在固化焚烧飞灰方面的研究较少, Sun 等^[18]用硫铝酸盐水泥固化飞灰得到固化体抗压强度高, 重金属浸出浓度低。高亮等^[19]用硅酸盐、铝酸盐和硫铝酸盐 3 种不同水泥对飞灰进行固化, 取得较好效果。但在重金属浸出方法、浸提剂酸碱度影响以及重金属固化机理方面研究较少。

本研究以我国北方某垃圾焚烧厂飞灰为原料, 用 SAC(sulfoaluminate cement)水泥对焚烧飞灰固化进行深入研究。重点对焚烧飞灰的重金属含量、与水泥混合固化配方以及固化机理进行研究。以期为城市垃圾焚烧飞灰的无害化、资源化利用提供一定的实验基础。研究结果可为实现飞灰的卫生填埋无害化处理提供一定的参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

(1) 飞灰样品。取自我国北方某城市生活垃圾焚烧发电厂, 图 1 为城市垃圾焚烧飞灰的 XRD 图谱。由图 1 可知, 焚烧飞灰的主要矿物成分为 KCl、NaCl、CaSO₄、CaCO₃、CaClOH 等。

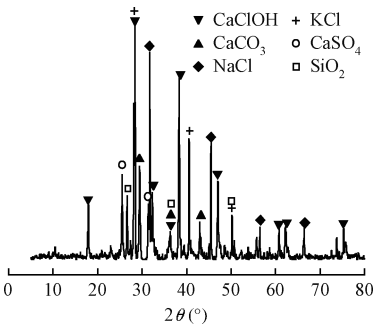


图 1 焚烧飞灰的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of fly ash

(2) 固化材料。42.5 MPa 快硬硫铝酸盐水泥(SAC), 唐山北极熊特种水泥有限公司生产, 执行标准 GB 20472-2006, 水泥组分如表 1 所示。

(3) 化学药品。浓硝酸(G. R)、浓硫酸(G. R)、

表 1 SAC 的化学组分

Table 1		Chemical composition of SAC							(%)
水泥	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O + K ₂ O	
SAC	12.63	19.59	2.93	2.93	2.73	16.82	0.95	0.65	

冰醋酸(G. R)、氢氧化钠(G. R)。

(4) 仪器设备。NRJ-411A 水泥胶砂搅拌机、YH-20B 型标准恒温恒湿养护箱、ZA3000 系列偏振塞曼原子吸收分光光度计、YKZ-04 翻转式振荡器、D8 Discover 高分辨率 X 射线衍射仪、 ϕ 50 mm $\times$ 50 mm 水泥试模。

1.2 实验方法

1.2.1 固化体制备方法

飞灰和水泥按照表 2 所示比例进行固化实验,水灰比为 0.425(根据文献[20]和实际浆料流动度而定),先将飞灰与水泥混合物放入搅拌机搅拌均匀后,再搅拌 3~5 min 后装入 ϕ 50 mm $\times$ 50 mm 水泥试模,标准养护(湿度 95%,温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$) 24 h 后脱模,将脱模后的固化体分别进行 3、7 和 28 d 标准养护后备用。

表 2 飞灰固化体配比方案

Table 2 Proportioning scheme of solidified waste forms of fly ash

实验编号	固化体代号	焚烧飞灰 质量分数(%)	SAC 水泥 质量分数(%)
1	FA20	20	80
2	FA40	40	60
3	FA50	50	50
4	FA60	60	40
5	FA80	80	20
6	FA90	90	10

1.2.2 重金属浸出浓度测量

用《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007)^[21]方法分析时,选择 1[#]浸提剂,将质量比为 2:1 的浓硫酸和浓硝酸混合液加入去离子水中,使得 pH 值为 3.20 ± 0.05 。由于飞灰及其固化体均有较强碱性,用《固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法》(HJ/T 300-2007)^[22]时,选择 2[#]浸提剂^[23],用去离子水稀释 17.25 mL 的冰醋酸至 1 L,所得溶液的 pH 值应为 2.64 ± 0.05 ,作为重金属的浸提剂。

破碎 1.2.1 中养护 28 d 的样品,经 9.5 mm 孔径的筛后,以醋酸缓冲溶液法为例,取其 80 g(硫酸硝酸法取 160 g)置于 2 L 聚乙烯塑料瓶内,以液固比 20:1(L/kg)(硫酸硝酸法为 10:1(L/kg))加入浸提剂(加水量要考虑飞灰含水量),盖好瓶盖固定在翻转式振荡装置,在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 温度下,以 (30 ± 2) r/min 转速振荡 (18 ± 2) h,振荡过程中产生气体及时排出。所得固液混合物经压力过滤器(微孔滤膜

为 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$)后,收集全部液体备用。

1.2.3 飞灰浸出毒性检测

根据 HJ/T 299-2007 方法测量飞灰重金属浸出浓度,依据《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007)^[24]鉴别飞灰是否是危险废物。

用 HJ/T 300-2007 方法测量飞灰重金属浸出浓度,依据《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)^[25]鉴别飞灰是否达到卫生填埋要求。

1.2.4 飞灰掺量对固化体抗压强度的影响

按表 2 所示的飞灰掺量(飞灰占飞灰和 SAC 水泥混合物的质量百分比)进行固化体制备,在不同龄期(3、7 和 28 d)对固化体进行无侧压抗压强度测量。

1.2.5 浸提剂 pH 值对固化体重金属浸出的影响

为模拟飞灰固化体存放时在不同酸、碱度环境下的重金属浸出情况,将浸提剂 pH 值分别设为 1、2.64、5、7、9 和 11 时,观察飞灰掺量为 40% 的固化体,养护 28 d 后按 HJ/T 300-2007 浸出条件对重金属浸出进行测量。

1.2.6 飞灰及其固化体 XRD 分析

为研究水泥固化飞灰中重金属机理,将飞灰,标准养护 28 d 后 SAC 水泥固化体和 FA40 固化体破碎,用无水乙醇终止水化,进行 XRD 分析。

2 结果与讨论

2.1 飞灰浸出毒性分析

由 1.2.3 所提的 2 种浸出方法测得飞灰浸提液中重金属浸出浓度及与相关标准对比如表 3 所示。由表 3 可知,对于焚烧飞灰,采用 HJ/T 299-2007 方法测得飞灰浸出液中重金属 Pb 浓度为 16.74 mg/L,超过 GB 5085.3-2007 规定限值(5 mg/L)的 3.35 倍,其余重金属 Cu、Zn、Cd 等均未超标,因此,焚烧飞灰属于危险废物,应该妥善处理。采用 HJ/T 300-2007 测得飞灰浸出液中重金属 Pb、Cd 浓度分别为 8.76 mg/L 和 2.7 mg/L,超过 GB 16889-2008 规定限值的 35.04 倍和 18 倍,不能达到废物卫生填埋标准。飞灰中重金属铅和镉含量较高,一方面是因为城市生活垃圾中有含铅废物(主要是电池和化妆品)和富含镉的废物如镍镉电池、彩色玻璃、着色剂、印刷墨水等^[23]。另一方面可能因为重金属铅和镉的蒸发点较低,容易在焚烧炉内被蒸发出来,随烟气凝结而进入飞灰^[1]。因此,开展水泥固化技术进行焚烧垃圾无害化处理。本研究后续实验围绕处理焚烧飞灰中的 Pb 和 Cd。

表 3 垃圾焚烧飞灰浸出毒性测量结果

Table 3 Results of leaching concentrations of fly ash (mg/L)

重金属浸出浓度标准和检测方法	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Mn
HJT 299-2007 测得飞灰浸出液中重金属浓度	0.12	1.56	16.74	—	—	—
GB 5085.3-2007《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》规定	100	100	5	1	15	—
用 HJT 300-2007 测得飞灰浸出液中重金属浓度	5.79	4.64	8.76	2.7	0.09	1.43
GB 16889-2008《生活垃圾填埋场污染控制标准》	40	100	0.25	0.15	4.5	—

注：“—”表示未能检测出结果或无限值。

2.2 飞灰掺量对固化体抗压强度的影响

采用水泥固化技术处理危险废物,其固化体应具有一定的抗压强度,抗压强度最低限值为 0.2 MPa^[19],以避免固化体受挤压后破碎而造成更大环境危害。不同飞灰掺量固化体在标准养护不同龄期进行无侧压抗压强度测量,结果如图 2 所示。从图 2 可知,固化体抗压强度随飞灰掺量增大而减小,其范围为 0.12~36.9 MPa。飞灰掺量在 90% 时,固化体抗压强度为 0.12 MPa,低于 0.2 MPa 限值。因此,飞灰掺量在 80% (抗压强度为 0.31 MPa) 以下时,其固化体抗压强度满足要求。对于 FA20、FA40、FA50、FA60 固化体,抗压强度随龄期(3、7、28 d)的延长而增大;而 FA80、FA90 固化体,由于水泥所占比例下降,固化体抗压强度变化不大。这是由于飞灰活性很低、不具有黏结性^[16,26],固化体中水泥比例较大时,作为水泥主要水化产物的钙矾石和 C—S—H 凝胶数量增大,固化体抗压强度增加。当飞灰掺量大于 80% 时,水泥在固化体中比例减小,由水泥水化产物数量降低引起的抗压强度变化相对减弱,因此,FA80、FA90 固化体抗压强度变化不大。

2.3 不同飞灰掺量固化体浸出毒性分析

不同飞灰掺量下固化体中重金属 Pb 和 Cd 浸出浓度如图 3 所示。由图 3 可知,随着飞灰掺量的增加,固化体中 Pb 和 Cd 浸出浓度随之增大,且浸出

范围分别为 0.8~2.19 mg/L、0.05~0.32 mg/L,这主要是因为:一方面固化体中飞灰掺量越大,重金属含量相对提高,固化体中重金属质量浓度增大,致使重金属浸出浓度增大;另一方面是随着飞灰掺量加大,水泥量减少,影响水泥水化产物生成量,致使含飞灰固化体强度降低、结构松散,重金属容易浸出。可见,硫铝酸盐水泥固化飞灰中重金属具有较好效果。其中,除 FA20、FA40 固化体 Cd 浸出浓度符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)限值外,其余固化体 Pb 和 Cd 浸出浓度均高于标准限值,尤其 FA20 固化体 Pb 浸出浓度为 0.8 mg/L,超过标准限值的 0.25 mg/L。该结果与文献[19, 23]基本一致。因此,从卫生填埋的角度来看,用硫铝酸盐水泥对城市垃圾焚烧飞灰固化处理中 Pb 和 Cd 浸出是值得考虑的问题^[16,18-19,23]。

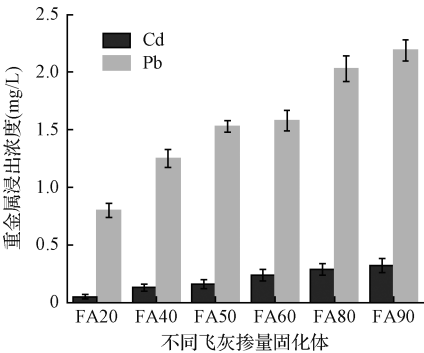


图 3 不同飞灰掺量对重金属浸出的影响

Fig. 3 Effect of different fly ash amounts on leaching toxicity of heavy metals

2.4 浸提剂 pH 值对重金属浸出浓度的影响

由于飞灰固化体最终处理是自然堆放或作为建筑路基材料,所以不可避免会被自然降雨所淋浸。近年来因工业污染,酸雨现象严重,南方地区常出现 pH<5 的降雨,有时甚至低于 3.0^[27],而金属离子在酸性介质中更容易浸出^[28-29]。为评价浸提剂 pH 值对固化体中重金属的浸出影响,又由于 FA40 固化体对飞灰的固化效果较好(主要是抗压强度及重金

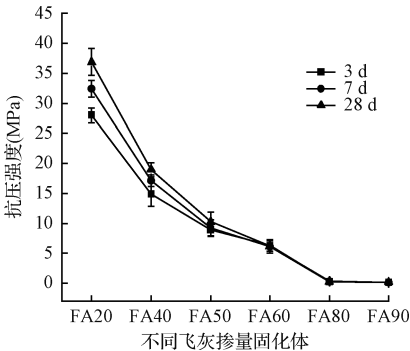


图 2 不同飞灰掺量固化体各龄期无侧压抗压强度

Fig. 2 Compressive strength without lateral compression of solidified waste forms of fly ash in each age

属浸出性能),因此,对 FA40 固化体(标准养护 28d)分别在 pH 值为 1、2.64、5、7、9、11 的浸提剂中进行重金属浸出实验,结果见表 4。pH 值范围的选择依据是为了考察固化体在自然界酸雨以及强酸、强碱环境下重金属浸出特性而设定的,以考察固化体的耐酸、碱腐蚀性能。由表 4 可知,对于飞灰掺量 40% 的固化体,当 pH 值为 5、7、9、11 时,固化体中重金属均未能检测出,说明 40% 飞灰掺量已经完全阻止碱性环境重金属的浸出,这可能与金属在碱性环境容易形成沉淀而被固定有关。当 pH 值为 1、2.64 时,重金属有明显浸出现象,且浸出浓度随 pH 值减小而增大,说明酸性环境有利于重金属的浸出,这是因为酸性条件下较大浓度的 H^+ 促进了以酸溶态存在的可溶性重金属的浸出^[30]。除 Cd、Pb 外,其余重金属浸出浓度均符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)限值。

表 4 浸提剂 pH 对重金属浸出浓度的影响

Table 4 Effect of pH on leaching concentration of heavy metals (mg/L)

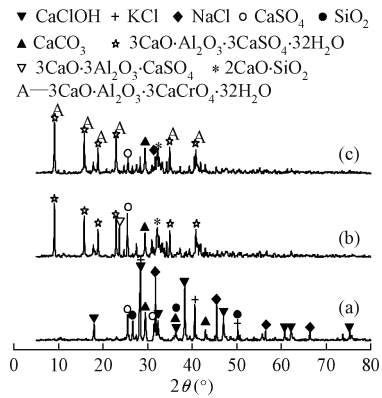
固化体 代号	浸提剂 pH	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Mn
FA40	1	0.29	2.16	0.61	3.89	0.26	0.85
	2.64	0.18	1.25	0.34	2.1	0.05	0.27
	5、7、9、11	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示未检出。

2.5 水泥固化重金属的机理

图 4 为飞灰、SAC 水泥固化体和 FA40 固化体 XRD 图谱。由图 4 可以看出,城市垃圾焚烧飞灰中含有大量以 KCl 、 $NaCl$ 、 $CaSO_4$ 、 $CaCO_3$ 、 $CaClOH$ 为主的可溶性盐,其水泥固化过程比较复杂。对比图 4 (a)和 4(c)可知,这些可溶性盐的衍射峰在飞灰掺量 40% 的固化体衍射图谱(图 4c)中减弱或消失,说明其参加了 SAC 水泥的水化反应过程。由图 4 (b)和 4(c)可知,SAC 水泥固化体和 FA40 固化体 X 衍射图谱比较相似,以水泥水化产物为主。SAC 水化产物主要成分是钙矾石($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$),水泥熟料无水硫铝酸钙($3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$)在 SAC 水泥固化体中有剩余,而在 FA40 固化体已全部反应。这是因为 FA40 固化体中水泥量较少。重金属 Cr 以 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCrO_4 \cdot 32H_2O$ 的形式固化于钙矾石中,且 CrO_4^{2-} 是钙矾石中 SO_4^{2-} 形成同晶替代物^[17,31-32]。其余重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 等会以物理吸附、离子交换、

复分解沉淀反应等形式被水泥固化^[1,17,32],但在图 4 中未能发现,有待进一步研究。



(a) 飞灰;(b) SAC 固化体;(c) FA40 固化体

图 4 飞灰、SAC 水泥及固化体的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD spectra of fly ash, SAC cement and solidified body

3 结 论

本研究采用 SAC 水泥固化城市生活垃圾焚烧飞灰,分析了飞灰掺量、浸提剂 pH 值对固化体性能的影响,探讨了重金属固化机理,得出以下主要结论。

(1) 飞灰中存在大量可溶性盐 (KCl 、 $NaCl$ 、 $CaSO_4$ 、 $CaCO_3$ 等),重金属浸出浓度与不同浸出体系有关,应根据评价目标合理选择重金属浸出测量方法。Pb、Cd 浸出浓度超过相关标准限值,因此,飞灰被认为是危险废物,且不能直接卫生填埋。

(2) 飞灰经 SAC 水泥固化后,重金属 Pb 和 Cd 浸出浓度有较大幅度的降低,且随飞灰掺量的增大而降低,浸出范围分别为 0.8 ~ 2.19 mg/L 和 0.05 ~ 0.32 mg/L。但固化体中 Pb 和飞灰掺量 40% 以上的固化体中 Cd 的浸出浓度不符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)要求,故不能作卫生填埋的处理。

(3) 固化体抗压强度随飞灰掺量增大而减小,随龄期延长而增大,其范围为 0.12 ~ 36.9 MPa。飞灰掺量大于 90% 时,固化体抗压强度低于 0.2 MPa 限值。对飞灰掺量 40% (FA40) 的固化体,酸性条件有利于重金属的浸出,且酸性越高浸出越大。当浸提液 pH 值大于 5 时,未检测出重金属浸出。

(4) XRD 结果表明,飞灰中可溶性盐参与了水泥水化反应过程,重金属 Cr 以 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCrO_4 \cdot 32H_2O$ 的形式固化于钙矾石。其余重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 等会以物理吸附、离子交换、复

分解沉淀反应等形式被水泥固化。

参考文献

- [1] 袁玲, 施惠生. 焚烧灰中重金属溶出行为及水泥固化机理. 建筑材料学报, **2004**, 7(1): 76-80
Yuan Ling, Shi Huisheng. Leaching behaviors of heavy metals in MSWI fly ash and the immobilization mechanism of cement. Journal of Building Materials, **2004**, 7(1): 76-80 (in Chinese)
- [2] 陆瑞良. 垃圾焚烧飞灰的固定化技术综述. 江苏建筑, **2012**(1): 104-106
Lu Ruiliang. Summarizing on solidification technology of solid waste incineration. Jiangsu Construction, **2012**(1): 104-106 (in Chinese)
- [3] 黄本生, 刘清才, 王里奥. 垃圾焚烧飞灰综合利用研究进展. 环境污染治理技术与设备, **2003**, 4(9): 12-15
Huang Bensheng, Liu Qingcai, Wang Li'ao. The research progress in comprehensive utilization of MSWI fly ash. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, **2003**, 4(9): 12-15 (in Chinese)
- [4] Lin K. L. The influence of municipal solid waste incinerator fly ash slag blended in cement pastes. Cement and Concrete Research, **2005**, 35(5): 979-986
- [5] Zhao Youcai, Song Lijie, Li Guojian. Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes. Journal of Hazardous Materials, **2002**, 95(1-2): 47-63
- [6] 张帆, 王凤贺, 郝昊天, 等. SGA 对垃圾焚烧飞灰中重金属的固化性能研究. 环境工程学报, **2014**, 8(2): 709-715
Zhang Fan, Wang Fenghe, Hao Haotian, et al. Research on solidification and stability of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash by using SGA. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2014**, 8(2): 709-715 (in Chinese)
- [7] 刘璇. 垃圾焚烧飞灰的资源化分析. 科技展望, **2015**(15): 256
- [8] Wang Qin, Yan Jianhua, Chi Yong, et al. Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators. Chemosphere, **2010**, 78(5): 626-630
- [9] Gougar M. L. D., Scheetz B. E., Roy D. M. Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. Waste Management, **1996**, 16(4): 295-303
- [10] Ubbriaco P., Calabrese D. Solidification and stabilization of cement paste containing fly ash from municipal solid waste. Thermochimica Acta, **1998**, 321(1-2): 143-150
- [11] Su Ying, Yang Jianming, Liu Debin, et al. Effects of municipal solid waste incineration fly ash on solidification/stabilization of Cd and Pb by magnesium potassium phosphate cement. Journal of Environmental Chemical Engineering, **2016**, 4(1): 259-265
- [12] Rémond S., Pimienta P., Bentz D. P. Effects of the incorporation of municipal solid waste incineration fly ash in cement pastes and mortars: I. Experimental study. Cement and Concrete Research, **2002**, 32(2): 303-311
- [13] Bie Rushan, Chen Pei, Song Xingfei, et al. Characteristics of municipal solid waste incineration fly ash with cement solidification treatment. Journal of the Energy Institute, **2015**, doi: 10.1016/j.joei.2015.04.006
- [14] Aubert J. E., Husson B., Sarramone N. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement: Part 2. Mechanical strength of mortars and environmental impact. Journal of Hazardous Materials, **2007**, 146(1-2): 12-19
- [15] 蒋建国, 赵振振, 王军, 等. 焚烧飞灰水泥固化技术研究. 环境科学学报, **2006**, 26(2): 230-235
Jiang Jianguo, Zhao Zhenzhen, Wang Jun, et al. Study on cement solidification technology in treating with fly ash. Acta Scientiae Circumstantiae, **2006**, 26(2): 230-235 (in Chinese)
- [16] 宋珍霞, 王里奥, 林祥, 等. 城市垃圾焚烧飞灰特性及水泥固化试验研究. 环境科学研究, **2008**, 21(4): 163-168
Song Zhenxia, Wang Li'ao, Lin Xiang, et al. Experimental study on properties and cement solidification of municipal solid waste incineration fly ash. Research of Environmental Sciences, **2008**, 21(4): 163-168 (in Chinese)
- [17] 贺杏华, 侯浩波, 张大捷. 水泥对垃圾焚烧飞灰的固化处理试验研究. 环境污染与防治, **2006**, 28(6): 425-428
He Xinghua, Hou Haobo, Zhang Dajie, et al. Study on cement solidification of municipal solid waste incineration fly ash. Environmental Pollution and Control, **2006**, 28(6): 425-428 (in Chinese)
- [18] Sun Qi'na, Li Jingmiao, Huo Baoquan, et al. Application of Sulfoaluminate cement for solidification/stabilization of fly ash from municipal solid waste incinerators. Applied Mechanics and Materials, **2012**, 178-181: 795-798
- [19] 高亮, 张曙光, 刘汉桥, 等. 水泥类型对生活垃圾焚烧飞灰固化效果的影响. 环境化学, **2010**, 29(6): 1183-1184
Gao Liang, Zhang Shuguang, Liu Hanqiao, et al. Effect of cement type on solidification of municipal solid waste incineration fly ash. Environmental Chemistry, **2010**, 29

- (6): 1183-1184(in Chinese)
- [20] 顾元威, 王桂敏. 硫铝酸盐水泥浆性能调节方案. 探矿工程, **1995**(6): 22-23
Gu Yuanwei, Wang Guimin. Adjustment for the performance of sulphoaluminate cement slurry. Exploration Engineering, **1995**(6): 22-23(in Chinese)
- [21] 国家环境保护总局. HJ/T 299-2007 固体废物 浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法. 北京: 中国环境科学出版社, **2007**
- [22] 国家环境保护总局. HJ/T 300-2007 固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法. 北京: 中国环境科学出版社, **2007**
- [23] 熊祖鸿, 鲁敏, 胡大为, 等. 广东省典型生活垃圾焚烧飞灰的物化及固化特性. 环境化学, **2014**, 33(7): 1173-1179
Xiong Zuhong, Lu Min, Hu Dawei, et al. Physicochemical and solidification characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash from Guangdong Province. Environmental Chemistry, **2014**, 33(7): 1173-1179(in Chinese)
- [24] 国家环境保护总局. GB 5085.3-2007 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别. 北京: 中国标准出版社, **2007**
- [25] 环境保护部. GB 16889-2008 生活垃圾填埋场污染控制标准. 北京: 中国环境科学出版社, **2008**
- [26] 施惠生, 袁玲. 垃圾焚烧飞灰胶凝活性和水泥对其固化效果的研究. 硅酸盐学报, **2003**, 31(11): 1021-1025
Shi Huisheng, Yuan Ling. Cementitious reactivity of municipal solid waste incineration fly ash and immobilization effect by cement. Journal of the Chinese Ceramic Society, **2003**, 31(11): 1021-1025(in Chinese)
- [27] 池冬华. 垃圾焚烧飞灰在水泥中的固化稳定化研究. 上海: 东华大学硕士学位论文, **2004**
Chi Donghua. The study on the solidification/stabilization of municipal solid waste incinerator fly ash incementmortars. Shanghai: Master Dissertation of Donghua University, **2004**(in Chinese)
- [28] Suzuki K., Ono Y. Leaching characteristics of stabilized/solidified fly ash generated from ash-melting plant. Chemosphere, **2008**, 71(5): 922-932
- [29] 朱伟, 郝庆菊, 江长胜, 等. 重庆市垃圾焚烧飞灰特性及重金属浸出行为的研究. 环境工程学报, **2011**, 5(6): 1391-1396
Zhu Wei, Hao Qingju, Jiang Changsheng, et al. Study on characteristics and leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration fly ash in Chongqing. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2011**, 5(6): 1391-1396(in Chinese)
- [30] 冯军会, 何晶晶, 曹群科, 等. 垃圾焚烧飞灰中重金属浸出的影响因素. 环境化学, **2005**, 24(4): 438-442
Feng Junhui, He Pinjing, Cao Qunke, et al. Influence factors of heavy metals leaching from air pollution control residues. Environmental Chemistry, **2005**, 24(4): 438-442(in Chinese)
- [31] Dermatas D., Meng Xiaoguang. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. Engineering Geology, **2003**, 70(3-4): 377-394
- [32] 周欢. 碱矿渣水泥固化城市生活垃圾焚烧飞灰效率研究. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, **2013**
Zhou Huan. Study on solidification efficiency of municipal solid waste incineration fly ash by alkali-activated slag cement. Chongqing: Master Dissertations of Chongqing University, **2013**(in Chinese)