

垃圾焚烧飞灰中 Pb 及特征药剂稳定化处理

朱子晗¹, 郭燕燕¹, 赵由才¹, 陈卫华², 吴健², 华银锋^{2*} (1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海黎明资源再利用有限公司, 上海 201209)

摘要: 筛选几种重金属药剂用于稳定垃圾焚烧飞灰, 以重金属 Pb 为处理目标, 通过单一或复配形式研究药剂的稳定效果并采用红外光谱(FT-IR)和 X 射线衍射(XRD)分析重金属稳定机理。结果表明, 有机药剂稳定后 Pb 的螯合率高于无机药剂, 投加质量分数为 2% 二乙基 DTC 能使 Pb 的浸出满足危险废物填埋污染控制标准(GB 18598-2019)要求, 然而 5% 的硫化钠和磷酸二氢钠稳定后 Pb 的浸出浓度仍不达标; 药剂处理后, Pb 的部分不稳定态被转化为稳定态, 且相比于无机药剂, 有机药剂稳定后 Pb 的残渣态占比更高, 抗酸碱能力更强; 无机药剂处理后 Pb 的浸出性与养护时间成负相关, 而有机药剂则由于特征官能团的氧化等因素而成正相关。成本核算结果表明, 0.9% 二乙基 DTC 和 3% 磷酸二氢钠复合药剂稳定飞灰在满足 GB 18598-2019 要求的基础上, 成本相比于单一二乙基 DTC 处理降低 26.72%。复合药剂处理后, 飞灰中出现了 N、S、P 的特征吸收峰, 重金属主要以螯合、沉淀作用稳定, 同时整个体系的矿物组成并未发生改变, 但结晶相的吸收峰强度明显减弱。

关键词: 垃圾焚烧飞灰; 重金属; 稳定化; 复配药剂

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)06-2737-07

Stabilization of Pb and characteristic agents in municipal solid waste incineration fly ash. ZHU Zi-han¹, GUO Yan-yan¹, ZHAO You-cai¹, CHEN Wei-hua², WU Jian², HUA Yin-feng^{2*} (1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Liming Resources Reuse Co., Ltd, Shanghai 201209, China). *China Environmental Science*, 2021, 41(6): 2737~2743

Abstract: Several agents were selected for the stabilization of Pb in municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash, wherein, the stabilization effects of single and compound agents were studied. Furthermore, the stabilization mechanism was investigated via infrared spectroscopy (FT-IR) and X-ray diffraction (XRD). The chelation rate of Pb with organic chelating agents (OCA) addition was higher than that of the inorganic agents (IA), and the Pb leaching concentration could meet the requirements of Hazardous Waste Landfill Pollution Control Standard (GB 18598-2019) with the addition of 2% sodium diethyldithiocarbamate (SDD). For IA, both 5% dosages of sodium sulfide and sodium dihydrogen phosphate could not reach the standard effect. After the stabilization treatment, the proportion of residual state increased, which was more prominent for OCA system, suggesting a better stability against acid and alkali; Leaching concentration of Pb with IA addition was negatively correlated over time, while the OCA addition was opposite due to the oxidation of characteristic functional groups. Cost analysis showed that a compound agent of 0.9% SDD and 3% sodium dihydrogen phosphate could reduce the cost by 26.72% compared with single SDD agent. The characteristic absorption peaks of N, S and P were visible after treatment of the compound agent, and the heavy metals were mainly stabilized via chelation and precipitation. Meanwhile, the mineral composition was no change, but the absorption peak intensity of the crystalline phase weakened.

Key words: municipal solid waste incineration fly ash; heavy metal; stabilization; compound agent

焚烧处理是目前各类垃圾快速减量化的主要方法,但也存在烟气污染严重的问题,并且垃圾焚烧过程中不可避免会产生大量的飞灰,若不及时处理,飞灰中含量高、毒性大的重金属物质则易浸出,从而造成环境的污染^[1]。

前期的研究表明飞灰的粒径小^[2]、孔隙度和比表面积大^[3],可富集大量的重金属元素,例如 As、Cd、Hg、Pb、Cu、Zn 等,其中 Zn 和 Pb 含量较高^[4]。此外,重金属会与飞灰中的其他物质以不同的赋存形态结合,在环境中浸出的可能性也不同。飞灰中 Pb 的碳

酸盐结合态占比较高,在自然条件下即有释放的可能,而在酸性条件下则会大量释放^[5]。因此焚烧飞灰在进入危废填埋场之前需要进行稳定化处理,目前应用最为广泛的工艺便是药剂稳定化。重金属稳定化药剂又可分为无机和有机两大类,包括硫化钠、碳酸氢二钠、磷酸、硫脲、DTC 物质等。无机药剂主

收稿日期: 2020-10-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1901401);中央高校专项项目(22120190232)

* 责任作者, 工程师, huayf2015@126.com

要通过与重金属发生沉淀反应或吸附包裹作用从而降低重金属的浸出可能性;而有机螯合剂利用自身的活性基团与重金属元素发生交联、络合反应,稳定效果更佳^[6-7],然而成本高昂的缺点也阻碍了其工业化应用。

最新的《危险废物填埋污染控制标准》^[8](GB 18598-2019)将 Pb 的进场要求由 5mg/L 提高至 1.2mg/L,本研究筛选了几种重金属药剂,研究其对飞灰中重金属 Pb 的稳定化效果,优选了特征性药剂进行复配研究,并分析了药剂作用机理,旨在为开展飞灰稳定化研究提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料与药剂

生活垃圾焚烧飞灰采自于上海黎明再生资源有限公司生活垃圾焚烧厂,焚烧处理对象为城市生活垃圾中的干垃圾组分,焚烧工艺采用二段机械式炉排炉焚烧技术,焚烧产生的烟气采用“SNCR+干法+活性炭喷射+袋式除尘器+烟气换热器+湿式洗涤塔+活性炭吸附装置+蒸汽加热器”组合工艺处理技术,该流程中多个工段均有飞灰产生,本研究飞灰主要采自于袋式除尘阶段,所收集的飞灰外观呈灰色颗粒,伴随少许灰白色与黑色颗粒,考虑到不同时段垃圾的成分和重金属元素含量的波动性,选择 6 个不同时间点的飞灰样品进行综合比选。

重金属稳定药剂包括硫化钠、磷酸二氢钠、硫脲、二甲基 DTC(二甲基二硫代氨基甲酸钠)和二乙基 DTC(二乙基二硫代氨基甲酸钠),所选药剂均为分析纯。

1.2 稳定化方法

使用电子天平称量 200g 飞灰置于 2L 的聚四氟乙烯采样罐中,分别按水灰质量比 30%和一定比例添加去离子水和药剂,充分搅拌均匀后,在室温下静置 30min,取样并置于 40℃真空环境下干燥 24h。

1.3 分析方法

1.3.1 重金属总量分析 采用微波消解法测定原灰中各重金属的总含量,所使用的消解剂体积比为浓硝酸(质量分数 68%):浓盐酸(质量分数 38%):氢氟酸(质量分数 40%)=6:2:1^[9]。

1.3.2 浸出毒性分析 飞灰稳定前后的浸出毒性

测定均严格按照标准《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007)^[10]的要求;浸出液均需与体积比为 3:1 的浓盐酸和浓硝酸混合消解处理,最后按照《固体废物 22 重金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 781-2016)^[11]中的标准方法,使用 ICP-AES 对浸出液中重金属元素浓度进行检测分析。

1.3.3 重金属赋存形态分析 本实验采用 Tessier 连续提取法^[12],分析飞灰稳定前后的重金属形态,包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机结合态和残渣态。

1.3.4 pH 值与重金属浸出分析 本实验以 0~1.5mg/L 的硝酸溶液作为浸提液,其余操作同 HJ/T 299-2007,测定并分析浸出液 pH 值与重金属浸出性的关系。

1.3.5 FT-IR 分析 本实验采用傅里叶红外光谱仪(TENSOR 37FT-IR,德国 Bruker 公司)分析飞灰稳定前后的官能团变化情况,以深入了解螯合剂作用机理。

1.3.6 XRD 分析 本实验采用 X-射线粉末衍射仪(D8Advance,德国 Bruker 公司)分析确定飞灰中晶相物质在稳定前后的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 飞灰中重金属的特性分析

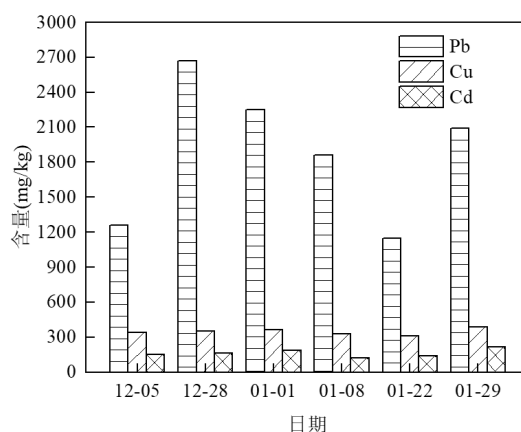


图1 原灰中重金属 Pb、Cu、Cd 的浓度

Fig.1 Concentrations of Pb, Cu, Cd in the raw fly ash

在 2019 年 12 月 5 日~2020 年 1 月 29 日之间选取 6 个不同的时间点(分别为 12 月 5 日、12 月 28

日、1 月 1 日、1 月 8 日、1 月 22 日和 1 月 29 日) 取样研究飞灰重金属的特性.由图 1 可知,原灰中 Pd、Cu、Cd 的含量随时间出现一定的波动,特别是 Pb. 三者的平均值分别为 1880,348,164mg/kg,其中 Pb 的最大含量为 2670mg/kg,这主要来源于垃圾中的颜

料、塑料(稳定剂)及一些合金物.原灰重金属的浸出毒性结果如表 1 所示.除 Pb 以外,其他重金属的浸出毒性均远低于规定限值.然而,Pb 的平均浸出浓度达到了 44mg/L,远高于规定的 1.2mg/L,因此需要研究筛选合适的 Pb 特征性稳定药剂.

表 1 飞灰中重金属的浸出毒性(mg/L)
Table 1 The leaching toxicity of heavy metals in fly ash (mg/L)

飞灰样品	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Be	Ba	Ni
原灰(2019-12-05)	29	<0.01	0.07	0.13	3.3	<0.01	4.6	<0.01
原灰(2019-12-28)	74	<0.01	0.08	0.17	3.0	<0.01	3.1	<0.01
原灰(2020-01-01)	63	<0.01	0.07	0.15	3.7	<0.01	3.2	<0.01
原灰(2020-01-08)	42	<0.01	0.10	0.12	1.7	<0.01	2.6	<0.01
原灰(2020-01-22)	14	<0.01	0.14	0.06	1.0	<0.01	1.8	<0.01
原灰(2020-01-29)	42	<0.01	0.10	0.14	2.0	<0.01	3.2	<0.01
平均值	44	<0.01	0.10	0.13	2.45	<0.01	3.1	<0.01
GB18598-2019 标准值	1.2	0.6	15	120	120	0.2	85	2

2.2 单一药剂稳定化研究

2.2.1 Pb 浸出毒性与赋存形态 如图 2a 所示,无机药剂对于 Pb 的稳定效果较差,浸出毒性随着药剂投加比例的增加下降不明显.5%硫化钠处理后 Pb 的浸出浓度高达 11.42mg/L,磷酸二氢钠稳定效果略高,浸出浓度为 5.36mg/L,但仍高于规定的 1.2mg/L.有机螯合剂的稳定效果要明显优于无机药剂,且稳定效果与药剂比例成正相关.2%二甲基 DTC 处理后的 Pb 浸出浓度已满足规定要求,螯合率达到了 99.99%;当药剂投加比例增至 3%,硫脲和二甲基 DTC 处理后飞灰也满足填埋进场要求,浸出浓度分别为 1.16 和 0.13mg/L.有机螯合剂稳定效果更好主要是因为自身具有 2 个及以上的配位原子,一般包括 S、N、O,能与重金属离子通过配位键和离子键结合形成环状络合物,稳定性高于无机药剂的沉淀、吸附作用^[13-14].

飞灰中的重金属以多种形态存在,且各形态占比差别较大,这也直接影响了重金属在环境中释放的可能性.研究表明各赋存形态的稳定性由高到低依次为残渣态>有机结合态>铁锰氧化态>碳酸盐结合态>可交换态^[15].由图 2b、c、d 可知,在原灰中 Pb 占比较大的 2 种形态为残渣态和碳酸盐结合态,分别占 50.22%和 32.29%.药剂处理后,Pb 的可交换态、碳酸盐结合态所占比例减少,残渣态、有机结合态等比例增大,这说明 Pb 的部分不稳定形态被转化为稳定的形态,浸出可能性减小.相比于无机药剂,有机螯

合剂处理后稳定态占比更大.当药剂投加比例为 3%时,硫化钠、磷酸二氢钠、硫脲、二甲基 DTC 和二乙基 DTC 作用下 Pb 的残渣态比例分别为 57.87%、57.14%、62.98%、70.12%和 68.88%.此外随着药剂添加比例的增大,稳定态占比也不断增大.当药剂比例由 1%增至 5%时,5 种药剂作用下 Pb 的残渣态比例分别增加了 8.33%、15.37%、12.98%、19.31%和 18.45%,从而表现出更强的抗酸碱能力^[16-17].

2.2.2 不同浸出 pH 值下 Pb 的浸出毒性 如图 3 所示,本实验的飞灰中含有足量的生石灰等碱性氧化物,具有强酸中和能力,浸出液的 pH 值为 4.37~12.38.原灰中的 Pb 在酸性条件下浸出现象较为明显,浸出浓度超过 20mg/L.随着 pH 值的提高,Pb 的浸出性逐渐减弱,当 pH 值在 9.03~9.66 之间波动时,浸出浓度处于最低值,为 3.58~4.39mg/L.这是因为飞灰中的 Pb²⁺在酸性减弱的过程中被优先转化为金属氧化物(如 PbO 和 PbO₂),稳定性增强.在碱性条件下,Pb 除了自身与 OH⁻形成 Pb(OH)₂ 以外,还能与飞灰中的 Ca²⁺、Al³⁺等形成复合共沉淀物,浸出性进一步降低^[18-19].但随着 pH 值进一步增大至 10.5 以上,Pb 的浸出性出现了回升,这是因为 Pb 沉淀物在强碱性条件下会以 HPbO₂⁻形式溶解^[20].由图 3a 可知,相比于无机药剂,有机螯合剂的抗酸碱能力更强.当药剂投加比例为 1%时,硫化钠作用下的飞灰仅在 pH 值为 9.35~9.69 时满足要求,磷酸二氢钠为 8.47~9.20,而二甲基 DTC 的达标范围则为 6.23~9.81.

并且随着药剂投加比例的增大,pH 值达标范围进一步扩大.当投加比例为 5%时,二甲基 DTC 和二乙基 DTC 稳定后飞灰分别仅在 pH 值为 5.05 和 5.12 时

高于规定限值,硫脲的达标范围由原先的 7.93~9.33 增大至 7.49~10.84,而硫化钠和磷酸二氢钠的达标范围分别扩大至 7.92~9.12 和 7.05~9.59.

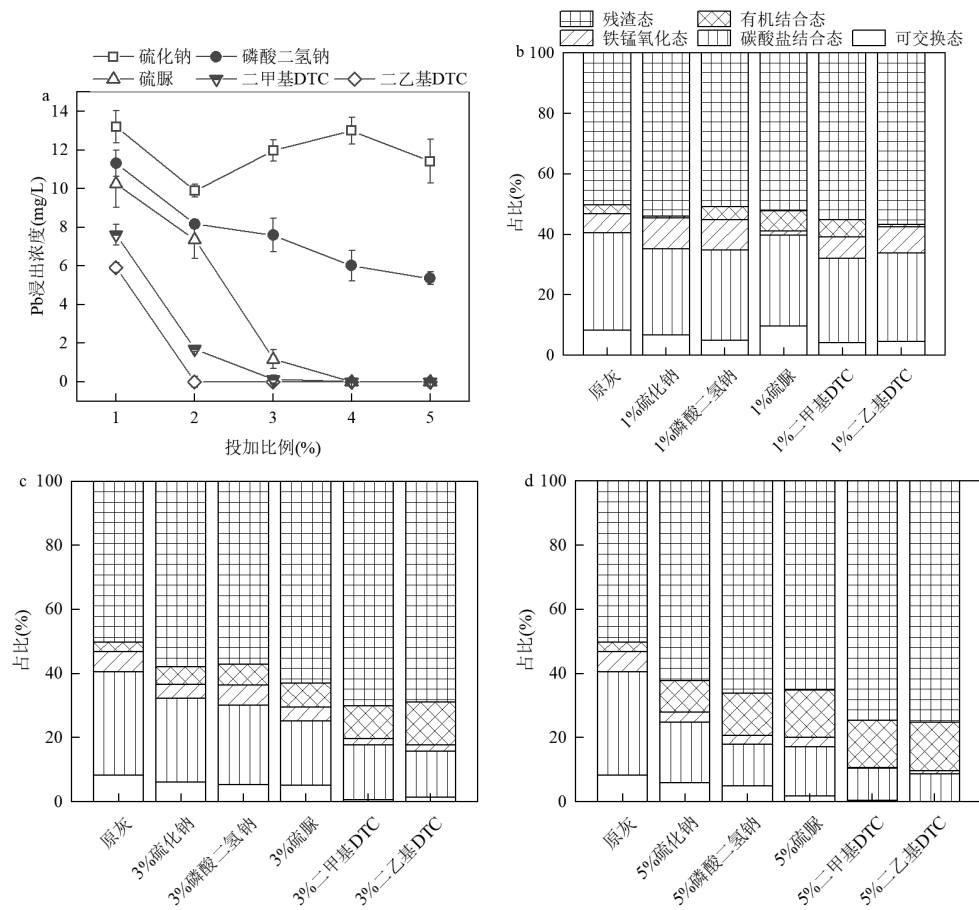


图 2 药剂处理后 Pb 的浸出浓度及赋存形态

Fig.2 The leaching behavior and specification distribution of Pb stabilized by different agents

a. 药剂添加量对 Pb 浸出浓度的影响; b. 1%添加量下 Pb 的赋存形态; c. 3%添加量下 Pb 的赋存形态; d. 5%添加量下 Pb 的赋存形态

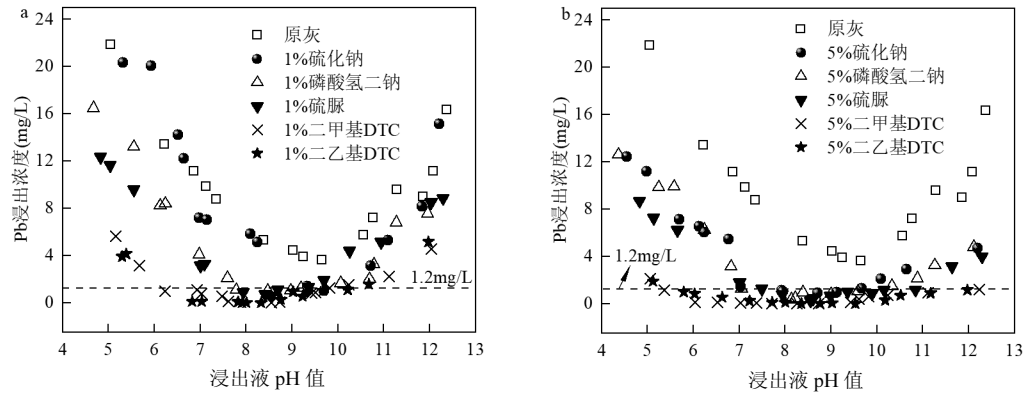


图 3 pH 值对不同药剂稳定效果的影响

Fig.3 Variations of Pb leaching concentration over pH

a. 1%药剂添加下; b. 5%药剂添加下

2.2.3 Pb 浸出毒性与养护时间的关系 将药剂处理后的飞灰置于室温下分别养护 1,5,10d,研究 Pb 浸出性随着养护时间的变化情况,结果如表 2 所示.无机药剂处理后 Pb 的浸出性与养护时间成负相关,在 10d 养护时间内,硫化钠和磷酸二氢钠稳定后的 Pb 浸出浓度呈下降趋势,但仍未达到规定要求.而有机螯合剂的重金属稳定效果则随养护时间的延长而逐渐减弱,特别是硫脲和二甲基 DTC,当养护时间为 5d 时,Pb 的浸出浓度均已超标,并且呈持续增大的趋势.这可能是因为有机硫官能团在稳定过程中被转化为 CS₂ 等气体释放^[21],此外有机活性基团暴露在空气中也容易发生氧化,使得自身的螯合稳定性降低.

表 2 不同养护时间下 Pb 的浸出情况
Table 2 Pb leaching behavior under different curing time

药剂种类与比例	养护时间(d)	Pb 浸出浓度(mg/L)
5%硫化钠	1	10.43
	5	8.86
	10	8.51
5%磷酸二氢钠	1	5.06
	5	4.17
	10	2.06
3%硫脲	1	<0.01
	5	3.70
	10	4.11
2%二甲基 DTC	1	0.51
	5	3.30
	10	6.21
2%二乙基 DTC	1	0.09
	5	0.02
	10	0.03

2.3 复合药剂稳定化研究

2.3.1 Pb 螯合效果与投加成本 垃圾焚烧飞灰稳定过程中,一方面需要考虑重金属的处理效果,此外还应进一步控制药剂投加比例和成本.有机或无机药剂复配处理飞灰,不仅能够以多种作用(沉淀、络合、配位等)降低重金属的浸出性,还被证明能够显著降低成本,目前已得到了广泛的研究^[22-23].各药剂的成本如表 3 所示,同时结合上述结论可知有机药剂中二乙基 DTC 和硫脲对于 Pb 的稳定效果优异,且成本相对较低;无机药剂中磷酸二氢钠成本最低同时有更好的 Pb 处理能力.

表 3 本实验所使用的药剂成本(元/kg)
Table 3 The costs of agents used in this experiment(yuan/kg)

硫化钠	磷酸二氢钠	硫脲	二甲基 DTC	二乙基 DTC
110~136	63~78	143~196	1678	374

综合考虑本实验优选二乙基 DTC+磷酸二氢钠和二乙基 DTC+硫脲两种组合进行研究,如图 4 所示,0.9%二乙基 DTC 和 3%磷酸二氢钠作用下,重金属 Pb 的浸出浓度降至 0.97mg/L,满足规定要求,此时药剂成本约为 5481 元/t 飞灰,相比于单一二乙基 DTC 稳定减少 26.72%.二乙基 DTC 与硫脲的复配药剂投加比例更低,但成本略高.0.6%二乙基 DTC 和 2%硫脲复配稳定后,Pb 的浸出浓度达标,此时药剂成本约为 5634 元/t 飞灰,相比于单一二乙基 DTC 稳定减少 24.68%.因此综合考虑 Pb 稳定化效果和药剂成本,0.9%二乙基 DTC 和 3%磷酸二氢钠为本研究的最佳复配方案.

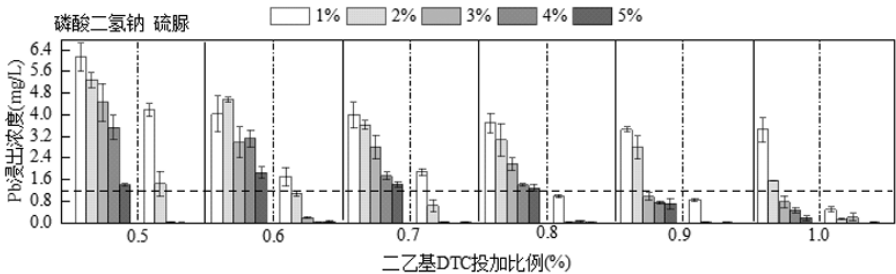


图 4 复合药剂稳定后 Pb 的浸出性变化
Fig.4 Pb leaching behavior variations after stabilization with different compound agents

2.3.2 稳定机理分析 以 0.9%二乙基 DTC 和 3%磷酸二氢钠复合药剂为例,研究飞灰重金属的稳定机理.复合药剂与处理后飞灰的红外光谱如图 5 所示.在复

合药剂中,在 2824.61cm⁻¹ 附近存在 C-H 的伸缩振动峰,1651.89 和 1055.45cm⁻¹ 分别归属于 P-O 的弯曲振动和 PO₄³⁻ 的对称伸缩振动峰,而在 532.86cm⁻¹ 附近出

现一个很强的 P-O-P 弯曲振动峰^[24].而在螯合后的飞灰中,上述 P 特征吸收峰的位置发生蓝移变化,强度明显减弱甚至出现峰消失的现象.在复合药剂中, 987.50, 934.78 cm⁻¹ 原先归属于 -CSS⁻ 中的 C=S 和 C-S 的伸缩振动峰,螯合反应后,吸收峰减弱,并且波数分别增大至 998.13, 958.67 cm⁻¹; 877.26 cm⁻¹ 可归属于 -CSS⁻ 的变形振动峰,稳定后强峰减弱同时出现了轻微的红移^[25].上述现象证明复合药剂中的 N、S、P 等官能团参与了与飞灰重金属的螯合反应,从而使得自身的内部结构发生改变.

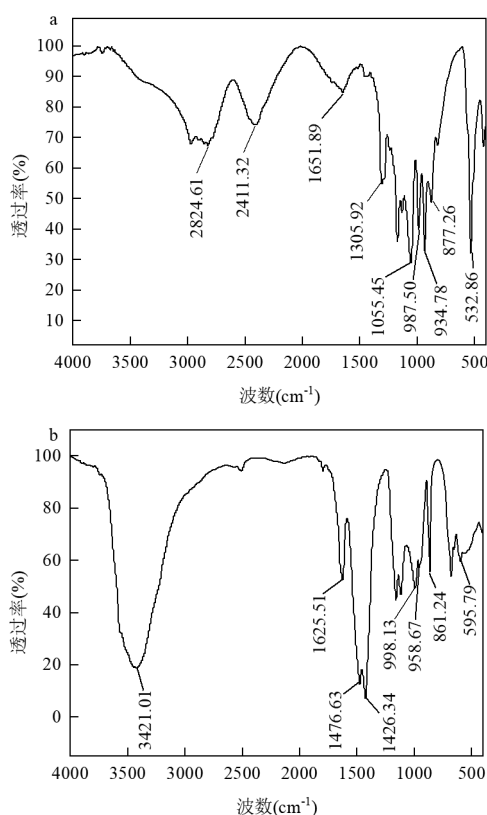


图5 复合药剂(a)与螯合后飞灰(b)的红外光谱图
Fig.5 FT-IR spectra of the compound agent (a) and chelated fly ash (b)

飞灰稳定前后的 XRD 谱图如图 6 所示.原飞灰(图 6a)中含有多种矿物,包括 KCl、NaCl、CaCO₃、CaClOH、CaSO₄、SiO₂ 等,但未检测到重金属的晶体结构,表明飞灰中的重金属物质主要赋存于无定形物中.稳定后飞灰中的结晶相物质与原灰基本保持一致,这也说明重金属螯合过程中并未产生具有晶体结构的物质.但稳定后体系中矿物盐的特征峰强度显著减弱,这是因为水解作用以及药剂中的特

征官能团的络合交联作用促进了化合物的溶解以及元素的迁移^[26-27].

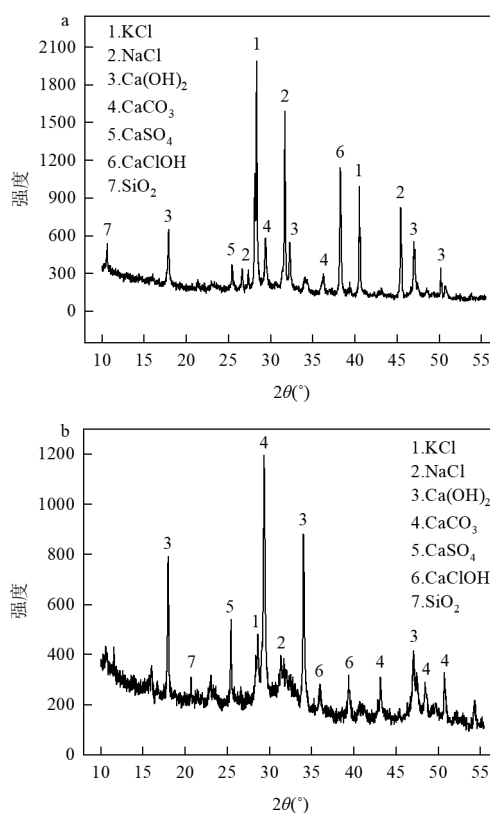


图6 飞灰在稳定前(a)、后(b)的 XRD 图
Fig.6 XRD patterns of fly ash before (a) and after (b) stabilization

3 结论

3.1 药剂处理后,飞灰重金属的不稳定态被转化为稳定的形态,特别是有机药剂;在相同投加比例下,有机药剂处理后的重金属浸出浓度更低.

3.2 药剂处理后,飞灰重金属的抗酸碱能力提升,特别是有机药剂;在相同投加比例下,有机药剂处理后重金属的 pH 达标范围更大.

3.3 无机药剂处理后 Pb 的浸出性随养护时间递减;有机药剂的特征官能团容易氧化或以气体形式释放,导致稳定效果随养护时间不断减弱.

3.4 0.9%二乙基 DTC 和 3%磷酸二氢钠是最佳的药剂复配比例.在此条件下, Pb 的浸出浓度满足规定要求,同时药剂成本相比于单一二乙基 DTC 处理减少 26.72%;复合药剂作用下,重金属主要通过螯合与沉淀的形式加以稳定;而处理前后飞灰矿物组成并未发生改变,但吸收峰强度明显减弱.

参考文献:

- [1] Han Z, Ma H, Shi G, et al. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,569:1255-1264.
- [2] 王 雷,金宜英,李润东,等.生活垃圾焚烧飞灰的污染特性 [J]. *环境科学与技术*, 2010,33(7):21-26,51.
Wang L, Jin Y Y, Li R D, et al. Characterization of MSWI fly ash [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,33(7):21-26,51.
- [3] 田志鹏,田海燕,张冰如.城市生活垃圾焚烧飞灰物化性质及重金属污染特性 [J]. *环境污染与防治*, 2016,38(9):80-85.
Tian Z P, Tian H Y, Zhang B R. The physiochemical properties and heavy metal pollution of fly ash from municipal solid waste incineration [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016,38(9):80-85.
- [4] 章 骅,于思源,邵立明,等.烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 [J]. *环境科学*, 2018,39(1):467-476.
Zhang H, Yu S Y, Shao L M, et al. Influence of air pollution control (APC) systems and furnace type on the characteristics of APC residues from municipal solid waste incinerators [J]. *Environmental Science*, 2018,39(1):467-476.
- [5] 李 娜,郝庆菊,江长胜,等.重庆市垃圾焚烧飞灰粒径分布及重金属形态分析 [J]. *环境化学*, 2010,29(4):659-664.
Li N, Hao Q J, Jiang C S, et al. Particle size distribution and speciation analysis of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash in Chongqing, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2010,29(4):659-664.
- [6] Wang F, Zhang F, Chen Y, et al. A comparative study on the heavy metal solidification/stabilization performance of four chemical solidifying agents in municipal solid waste incineration fly ash. [J]. *Journal of hazardous materials*, 2015,300:451-458.
- [7] Zhang B, Zhou W, Zhao H, et al. Stabilization/solidification of lead in MSWI fly ash with mercapto functionalized dendrimer Chelator [J]. *Waste Management*, 2016,50:105-112.
- [8] GB 18598-2019 危险废物填埋污染控制标准 [S].
GB 18598-2019 Standard for pollution control on the hazardous waste landfill [S].
- [9] Ma W, Chen D, Pan M, et al. Performance of chemical chelating agent stabilization and cement solidification on heavy metals in MSWI fly ash: A comparative study [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,247:169-177.
- [10] HJ/T 299-2007 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法 [S].
HJ/T 299-2007 Solid waste-Extraction procedure for leaching toxicity-Sulphuric acid & nitric acid method [S].
- [11] HJ 781-2016 固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法 [S].
HJ 781-2016 Solid waste-Determination of 22metal elements-Inductively coupled plasma optical emission spectrometry [S].
- [12] Tessier A, Campbell P, Bisson M, et al. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979,51(7):844-851.
- [13] 李建陶,曾 鸣,杜 兵,等.垃圾焚烧飞灰药剂稳定化矿物学特性 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(11):4188-4194.
Li J T, Zeng M, Du B, et al. Mineralogical characteristics of MSWI fly ash stabilized by chemical reagents [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(11):4188-4194.
- [14] Ma X, Tian H. Stimuli-Responsive Supramolecular Polymers in Aqueous Solution [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2014,47(7):1971-1981.
- [15] Li R, Zhang B, Wang Y, et al. Leaching potential of stabilized fly ash from the incineration of municipal solid waste with a new polymer [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,232:286-294.
- [16] Van Herck P, Vandecasteele C. Evaluation of the use of a sequential extraction procedure for the characterization and treatment of metal containing solid waste [J]. *Waste Management*, 2001,21(8):685-694.
- [17] Zhou S, Zhao H, Zhang B, et al. Stabilization of cadmium-and lead-contaminated sites using sodium tetraethylenepentamine-multi dithiocarbamate [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2017,228(1):1-12.
- [18] 籍晓洋,吴 新,孙 立,等.基于加速碳酸化法稳固化垃圾焚烧飞灰中重金属实验研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016,46(4):794-800.
Ji X Y, Wu X, Sun L, et al. Experimental study on stabilization and solidification of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash based on accelerated carbonation technology [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016,46(4):794-800.
- [19] Bogush A A, Stegemann J A, Roy A. Changes in composition and lead speciation due to water washing of air pollution control residue from municipal waste incineration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,361:187-199.
- [20] 童立志,韦黎华,王 峰,等.焚烧飞灰重金属含量及浸出长期变化规律研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(5):2132-2139.
Tong L H, Wei L H, Wang F, et al. Study on the long-term changes of heavy metal content and leaching behavior of municipal solid waste incineration fly ash [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(5):2132-2139.
- [21] 王加雷,蹇瑞欢,史朝霞,等.哌嗪类 DTC 稳定垃圾焚烧飞灰重金属的实验研究 [J]. *环境卫生工程*, 2018,26(6):12-14,18.
Wang J L, Jian R H, Shi Z X, et al. Stabilization of heavy metals in fly ash from waste incineration with the piperazine DTC [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2018,26(6):12-14,18.
- [22] 马 倩,陈玉放,靳 焘,等.城市生活垃圾焚烧发电灰中重金属的固定化研究 [J]. *生态环境学报*, 2018,27(9):1716-1723.
Ma Q, Chen Y F, Jin T, et al. Immobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration power generation [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018,27(9):1716-1723.
- [23] 朱节民,李梦雅,郑德聪,等.重庆市垃圾焚烧飞灰中重金属分布特征及药剂稳定化处理 [J]. *环境化学*, 2018,37(4):880-888.
Zhu J M, Li M Y, Zheng D C, et al. Distribution and chemical stabilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash of Chongqing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018,37(4):880-888.
- [24] Sun Y, Xu C, Yang W, et al. Evaluation of a mixed chelator as heavy metal stabilizer for municipal solid-waste incineration fly ash: Behaviors and mechanisms [J]. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2018,66(2):188-196.
- [25] 刘立华.一种 N-二硫代甲酰基-N,N-二乙酸钠螯合剂的制备方法: 中国, 201810119955.7 [P]. 2018-07-24.
Liu L H. A method for preparing N-dithioformic acid -N, N-diacetate sodium chelating agent: China, 201810119955.7 [P]. 2018-07-24.
- [26] 杨 光,包 兵,丁文川,等.有机螯合剂与磷酸盐联合稳定垃圾焚烧飞灰中重金属的作用机理 [J]. *环境工程学报*, 2019,13(8):1967-1976.
Yang G, Bao B, Ding W C, et al. Stabilization mechanism of heavy metals in MSW incineration fly ash using organic chelating-phosphate complex agent [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019,13(8):1967-1976.
- [27] Zhao Y, Song L, Li G. Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002,95(1/2):47-63.

作者简介: 朱子晗(1997-),男,浙江金华人,同济大学博士研究生,主要从事固体废物处理与资源化研究.发表论文 3 篇。