

螯合剂与水泥协同稳定垃圾焚烧 飞灰中的重金属

常威 蒋旭光* 邱琪丽 池涌 严建华
(浙江大学能源洁净利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 开展了水泥和螯合剂协同处置全烧垃圾循环流化床炉飞灰的研究,并对经济性进行了分析。实验结果表明,当水泥添加比例为30%时,重金属的浸出毒性均低于生活垃圾填埋污染物控制标准的规定。有机硫螯合剂TMT(三巯基均三嗪三钠盐类)对Cu、Pb、Cd的稳定效果最好,有机硫螯合剂DTCR(二硫代氨基甲酸盐衍生物)以Cu、Pb最佳,同等有效添加量时TMT的稳定效果优于DTCR,完全达标时二者所需的添加量分别为2%和3%。水泥和螯合剂协同处置时,满足生活垃圾填埋标准的水泥和螯合剂之间的用量关系并非为线性。螯合剂在实现减容化的同时,存在成本提高的问题,以DTCR为例,在兼顾经济性和增容性时水泥用量可以控制在20%,稳定剂为1.75%。

关键词 生活垃圾 飞灰 水泥 螯合剂 稳定化 重金属

中图分类号 X705 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2015)12-6019-08

Compound stabilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration using chelating agent and cement

Chang Wei Jiang Xuguang Qiu Qili Chi Yong Yan Jianhua
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract The study presents the treatment of fly ash generated from totally incinerated municipal solid waste by circulating fluidized bed incinerator combining cement solidification and chelating agent stabilization. And, the economic analysis was also discussed. The results showed that the solidification matrix with 30% cement could reduce the leaching toxicity far below the standard for pollution control on the landfill site of municipal solid waste. Trimercapto-s-triazine (TMT) and sodium dithiocarbamate (DTCR) exhibited an effective stabilization of Cu, Pb, Cd and Cu, Pb, respectively, and the immobilization effect of TMT was better than DTCR with the same dosage. The dosages of the two chelating agents to meet the standard of the landfilling standard were 2% and 3%. In the process of co-stabilization, the relationship between the cement addition and agent dosage was not linear when satisfying the landfilling requirement. The chelating agent could avoid the obvious compatibilization, but it posed a remarkable increase of treatment cost. Economic analysis for DTCR indicated that to strike a balance between economy and compatibilization, the cement addition and agent dosage could be controlled at 20% and 1.75%.

Key words municipal solid waste; fly ash; cement; chelating agent; stabilization; heavy metals

由于垃圾焚烧飞灰含有重金属和持久性机污染物(二恶英、呋喃等)等危险成分,已被列入危险废物名录^[1],因此在进行安全填埋和利用前,必须进行无害化处理。水泥稳定化/固化技术是目前最常用的预处理方法,因其具有材料易得、处理效果好、成本相对低廉等优势,已成为国际上较普遍采用的焚烧飞灰最终处置的预处理方法,但处理后增容较大,运输成本高并占用大量的填埋处置空间,固化体风化破坏后,重金属存在再次浸溶的危险^[2]。化

学药剂稳定则通过化学反应,使有毒有害物质转变

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201500);
国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063505);
环保公益性行业科研专项(201209023-4); 高等学校学科
创新引智计划资助(B08026)

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-10-08

作者简介: 常威(1989—),男,硕士研究生,研究方向为固体废物
处置技术。E-mail: changwei0901@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangxg@zju.edu.cn

为难溶性、低迁移性及低毒性物质的过程,常用的稳定剂分为无机类和有机螯合剂。无机药剂包括硫化物、硅酸盐、磷酸盐、石灰等,与固化技术相比,处理后的废弃物增容很小,但对环境酸度变化的适应能力较差,飞灰中的重金属会因淋洗发生溶浸现象,产生二次污染,而且添加量较大^[2-4]。与无机药剂相比,有机螯合剂则是通过配位基团与金属离子形成生成稳定的环状的重金属螯合物,金属离子取代配位原子上的氢(或钠)嵌入螯合环中,使金属离子捕集后钝化,生成的重金属络合物牢牢地嵌在稳定后的结构体中,具有高效和抗酸浸出能力强的优势^[5,6]。有机螯合剂包括巯基胺盐、EDTA 连接聚体、有机多聚磷酸及其盐类和壳聚糖衍生物等^[7]。开发和研究稳定效果好、环境污染小、经济效益高的飞灰重金属螯合剂一直是国内外飞灰处置领域的一个重要方向^[8-10]。其中最为普遍的是有机硫螯合剂,如 DTC 衍生物(DTCR)、TMT 等。DTCR 在电镀、电子废水治理、电厂烟气脱硫液除汞等方面已得到广泛应用^[11-14],但 DTCR 对生物的毒性较高,TMT 则是一种低污染,生物毒性小的新型重金属捕集剂^[5]。然而,与水泥相比,这些螯合剂均存在价格昂贵的问题。因此,采用化学稳定和水泥固化相融合的方式对飞灰无害化处置时,在对重金属双效稳固的同时,兼顾了经济性和增容性的问题,而且处理后的固化体兼备一定的机械强度,对后续的填埋和资源化利用也具有重要的意义。文献[5]探讨了水泥固化和药剂稳定化结合处理垃圾焚烧飞灰的可行性,结果表明单独采用普通硅酸盐水泥固化,水泥比例需要 35% 左右,药剂稳定化与水泥固化联合使用,则药剂添加量为 3.0% 及水泥掺量为 15% 时,即可达到垃圾填埋场入场控制标准,但未涉及用量关系和成本的分析。本文以全烧垃圾流化床炉飞灰为分析对象,开展了水泥和螯合剂协同稳定飞灰中重金属的相关研究,并对其经济性进行了分析,以期在全烧垃圾流化床炉飞灰的处置及其资源化利用提供理论依据。

1 实验材料及方法

1.1 原料

飞灰来自浙江省某垃圾焚烧厂的 4[#] 焚烧炉。该焚烧炉是国内单台容量最大的一台完全焚烧垃圾的循环流化床锅炉,处理能力 800 t/d。烟气净化系统采用 SNCR 脱硝、半干法除酸、活性炭吸附二恶英

和布袋除尘。在焚烧炉连续满负荷稳定运行期间,随机采集全天的飞灰。飞灰经自然风干数周后,放置到塑料袋中密闭保存备测。实验过程中采用浙江钱潮公司生产的普通硅酸盐水泥,标号为 P. O42. 5。螯合剂的选用分 2 种: TMT-45(三巯基均三嗪三钠盐),购自阿拉丁试剂公司,产品形式为 15% 水溶液,以下用 TMT 表示;上海康恒环境股份有限公司生产的“福来西”有机硫稳定剂,该类药剂属于二硫代胺基甲酸盐的衍生物(DTCR),有效成分为 50%,以下用 DTCR 表示。

1.2 飞灰中重金属及浸出毒性

重金属在测量前首先进行微波消解:称量约 0.05 g 飞灰样品于消解罐中,加入 6 mL HNO₃(69%)、2 mL HClO₄(72%)、2 mL HF(48%)后,将消解罐放置到美国 CEM 公司生产的微波消解仪(型号 MARS5)中,按照特定的升温程序进行加热,消解液中金属 Hg 采用日本日立公司的石墨炉原子吸收光谱仪(型号 180-50)测定,重金属 Se 采用美国 Thermo 公司的电感耦合等离子体质谱仪(型号 Xseries II)测定,重金属 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Ni、As、Be 及 Ba 采用美国 Thermo 公司的电感耦合等离子体发射光谱仪(型号 iCAP6300)进行测定。

1.3 样品处理过程

飞灰与水泥在搅拌机中预混 3 min 左右,将去离子水缓缓加入到混合物中,最终加水量控制在总灰质量的 30%。然后将灰浆放入无锡锡仪建材仪器厂的水泥胶砂搅拌机(型号 JJ-5)中,高速搅拌 2~3 min。最后装入郑州宜欣公司生产的小型免烧砖机(型号 YXQ4-40B)的标砖模具中,上模完毕后,以一定的压力挤压。打开震动电机,进行 60 s 左右时间的机械振动,最后将免烧砖压出。在制作完成后的免烧砖试块放置在 20~25℃ 的环境中进行养护,并定期喷水。在成型后的 3、7、14 和 28 d 后分别测量其抗压强度。

单一螯合剂实验中,螯合剂(有效成分)的投加量按与飞灰质量的百分比计算,配比取 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%,并使用微量注射器调控投加量。投加前需将螯合剂与去离子水混合成溶液,后与飞灰样品进行充分搅拌混合。然后养护 7 d 后,即得稳定后飞灰试样。在螯合剂投加过程中,水与灰的液固比(L/kg)均控制为 0.3。

在协同稳定的实验过程中,将螯合剂与去离子水混合成溶液,加入到飞灰与水泥的混合物中,按照上述

方法制模,测定试块养护 7 d 后重金属的浸出浓度。

1.4 抗压强度

测定前,按照 GB/T 21144-2007(混凝土实心砖)的规定对砖体进行预处理,制备待测试样。待测试样的抗压强度采用济南试金公司生产的液压式万能试验机(型号 WE-5B)进行测定。鉴于螯合剂的添加对水泥固化体的抗压强度几乎没有影响,为此,实验过程只测试单独水泥固化过程的免烧砖的抗压强度。实验结果以 3 组测量值的平均值作为各组配比的最终的抗压强度。对数据中存在明显偏差的,则将其舍弃后再取平均值。

1.5 浸出实验

浸出实验前,先将待测样品手工破碎、研磨至 1 mm 下,测定含水率,计算干基质量。浸出方法采用《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB 16889-2008)中规定的 HJ/T 300-2007 浸出程序(固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲液法),与国内文献中最常采用的 GB 5086.2-1997(危险废物鉴别标准—浸出毒性鉴别)相比,浸出条件苛刻^[6,17]。此外,生活垃圾填埋规定的重金属浸出限值较危险废物毒性鉴别标准要求更低。

2 结果及讨论

2.1 飞灰中重金属

全烧垃圾流化床焚烧飞灰中富集了大量的重金属(表 1),约为总量的 2%,其中以 Zn、Ba、Cu 和 Pb 居多。另外,飞灰中重金属并非为惰性物质,存在严重的溶出风险,一些重金属浸出浓度极高,其中 Cd、Cu、Pb、Ni 的浸出毒性分别是生活垃圾填埋标准值的 11.73 倍、1.51 倍、21.44 倍和 2.96 倍。因此,安全填埋和利用前需要进行稳定化处置。

2.2 水泥固化

2.2.1 抗压强度

不同配比的免烧砖的抗压强度不同。图 1 表明,随着飞灰添加量的增加,免烧砖的抗压强度呈现下降趋势,这与飞灰的强吸水性和不具黏结性的特性有关^[18,19]。另外,在水泥比例不小于 20% 时,随

着养护时间延长,免烧砖的抗压强度不断提高。当水泥比例达到 10% 时,7 d 后的抗压强度达到了 1.3 MPa,达到了国外卫生填埋场填埋标准所要求 0.2 MPa^[20]。水泥比例达到 40% 时,28 d 后固化体的抗压强度达到了混凝土用砖强度等级的 MU20 级。但在兼顾经济性时,在工程应用上水泥比例应控制在 20% 以内,因此在重金属不存在浸出风险时,可用作一些强度要求不高的场合,如修建危险废物填埋场的护坡堤等。

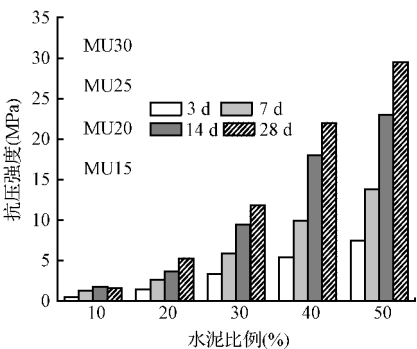


图 1 不同配比下免烧砖的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of non-burned bricks at different proportions of cement

2.2.2 浸出毒性

图 2 结果表明,水泥对于重金属的固化效果与其种类有关,这与水泥基材对不同的重金属的固化机理不同密切相关,随着水泥添加比例的提高,各种重金属的浸出浓度下降趋势明显不同,其中重金属 Cu、Zn 和 Pb 的浸出浓度呈现指数型,当水泥添加量达到 30% 后,浸出量处于极低的浓度水平或检测不到,变化极微。在添加比例小于 20% 时,Cd 和 Ni 的浸出浓度变化幅度较小,继续增加水泥添加量,其下降幅度迅速增大,当水泥添加比例达到 30% 后,浸出量浓度水平极低或检测不到,变化趋势极微。Cr 的浸出浓度在添加比例小于 30% 时变化缓慢,超过 30% 后下降幅度明显变大。因此,水泥对飞灰中的重金属具有良好固化效果,对 Cu、Zn、Pb 的效果最好,在添加量较小时(小于 20%)即可实现较高的稳定率。

表 1 飞灰中重金属的含量及浸出浓度

Table 1 Contents and leaching concentrations of heavy metals in fly ash

重金属	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Se	Be	Ba
含量(mg/kg)	71.8	767.8	4 084.4	299.7	1 603.8	9 782.0	7.6	<0.01	1.0	1.0	3 324.2
浸出浓度(mg/L)	1.76	1.96	60.29	1.48	5.36	97.34	0.05	ND	0.04	0.003	0.44
生活垃圾填埋限值(mg/L)	0.15	4.5	40	0.5	0.25	100	0.3	0.05	0.1	0.02	25

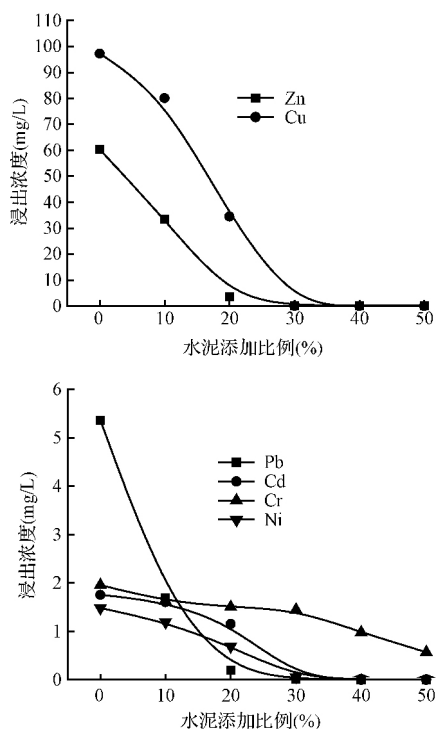


图2 水泥添加量对固化体重金属浸出的影响(养护7 d)

Fig. 2 Effect of cement addition on leaching concentration of heavy metals from MSWI fly ash-cement solidification body with curing time of 7 days

图3显示,当水泥添加比例达到30%时,固化体在各养护期内重金属的浸出值均远低于生活垃圾填埋场污染物控制标准的规定值,并且随养护时间的延长,整体呈现缓慢的下降趋势,这与养护时间对水泥水化程度的促进作用密切相关。

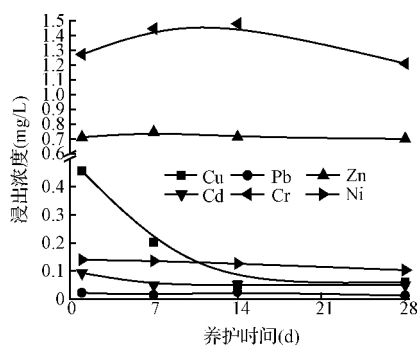


图3 养护期间对固化体重金属浸出浓度的影响(30%水泥)

Fig. 3 Effect of curing time on leaching concentration of heavy metals from MSWI fly ash-cement solidification body with cement addition of 30%

2.3 螯合剂稳定化

图4及图5为不同剂量下DTCR和TMT单独

处理后飞灰的浸出浓度,图中显示,螯合剂对重金属的稳定性能具有强烈的选择性,不同种类的螯合剂对飞灰中重金属的稳定效果也大有迥异。DTCR对Cu、Pb的稳定效果最好,而对Cd、Zn、Ni、Cr的稳定效果较差,对As和Se几乎无螯合作用。TMT则对Cu、Pb、Cd表现出优良的稳定效果,而对Zn、Ni、Cr稳定效果较差,As和Se的稳定效果最差,几乎无螯合作用。同等添加量时,TMT对飞灰中的Cu、Pb、Cd的稳定效果明显优于DTCR。上述结果与螯合剂中配位基团的种类及数量、螯合物的稳定常数、螯合容量有很大关系,而且受浸出液pH的影响^[6,14],DTCR和TMT的分子结构及络和机理分别如图6和图7所示。

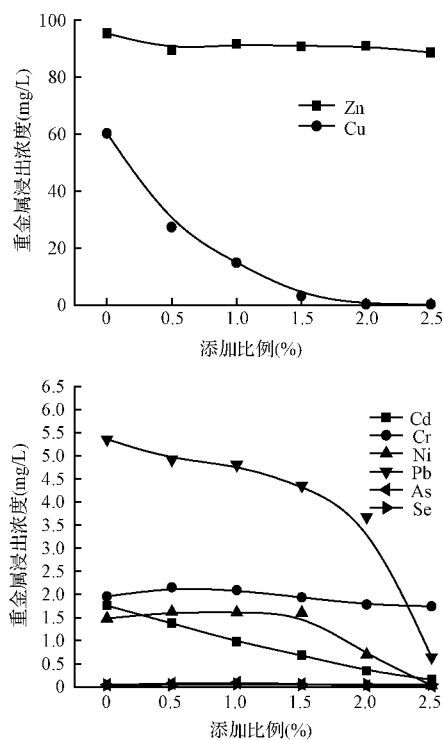


图4 DTCR添加剂量对飞灰的浸出浓度影响(养护7 d)

Fig. 4 Effect of DTCR dosage on leaching concentration of heavy metals from MSWI fly ash-cement solidification body with curing time of 7 days

以DTCR为例说明,DTCR分子的硫醇型的硫($-S^-$)极易与重金属离子形成配位键,生成难溶性的络合物。当与二价重金属离子结合时,通过结构中的2个硫与重金属形成多元环。而且,由于DTCR分子与重金属结合时多为多齿配体,因此,同一金属离子螯合的配位基团可来自不同的DTCR分子,易形成高交联的、立体结构的螯合分子,最终均形成稳定的交联网状螯合物沉淀,相对分子质量可能达到数百万^[21],能长期稳定存在于环境中。

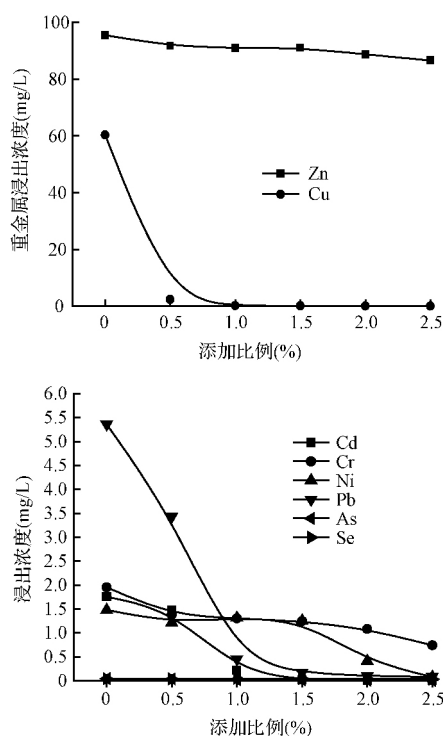


图 5 TMT 添加剂量对飞灰的浸出浓度影响(养护 7 d)

Fig. 5 Effect of TMT dosage on leaching concentration of heavy metals from MSWI fly ash-cement solidification body with curing time of 7 days

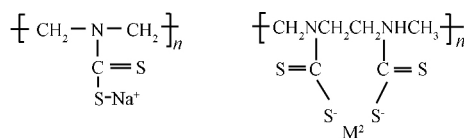
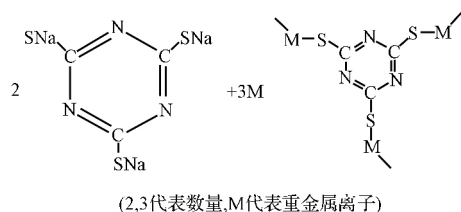
图 6 DTCCR 与重金属的络和机理图^[23]

Fig. 6 Reactive mechanism sketch of DTCCR with heavy metals



(2,3 代表数量,M 代表重金属离子)

图 7 TMT 与重金属的络和机理图

Fig. 7 Reactive mechanism sketch of TMT with heavy metals

另外,当 TMT 添加比例达到 2% 时,Cu、Cd、Pb、Ni 的浸出浓度分别降至 0.070、0.006、0.100 和 0.413 mg/L,已经远远低于生活垃圾填埋厂污染物控制标准中对重金属的限定值,而 DTCCR 在添加比例为 2.5% 时,Cu、Cd、Pb 和 Ni 的浸出浓度分别降到 0.225、0.156、0.643 和 0.035 mg/L,其中 Cd 和

Pb 仍略超出标准值,因此完全达标时 DTCCR 的添加比例应控制在 3% 左右。

2.4 水泥与螯合剂协同稳定

由于水泥增容性大,螯合剂的成本昂贵,为减少水泥用量,节约填埋空间,同时兼顾经济性,开展水泥与螯合剂协同处理飞灰的实验研究。结合上述单一水泥固化和螯合剂稳定的实验,选用 15% 和 20% 2 种水泥添加量作为考察对象,并预先确定螯合剂比例的大体范围。最后通过正交实验($L_4(2^3)$) 确定满足达标水平时二者的最佳的组合比例。2 种水泥添加量的最佳的组合为组合 1:水泥 15% 和 TMT 1.5%;组合 2:水泥 20% 和 TMT 0.75%;组合 3:水泥 15% 和 DTCCR 2.25%;组合 4:水泥 20% 和 DTCCR 1.75%。4 组最佳组合重金属的浸出浓度见表 2。

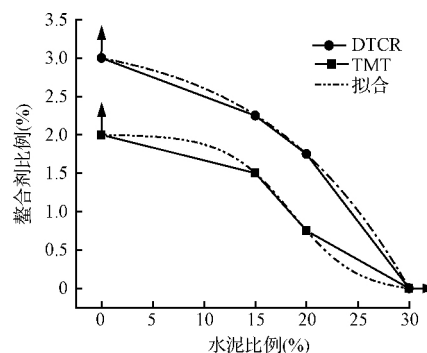


图 8 满足达标时水泥与螯合剂添加量的关系

Fig. 8 Relationship between cement addition and chelating agent dosage when meeting leaching standards

图 8 中箭头和虚线所围上方区域为满足填埋标准时水泥和药剂用量的安全区域。图中显示螯合剂用量和水泥二者用量的关系并非为线性,水泥掺量的不同,对应螯合剂用量的变化速率不同,二者存在交互作用。在协同使用的过程中,水泥的水化反应和重金属的螯合反应同时进行,机理更为复杂。水泥基材的固化与稳定化机理存在以下几种:由于水泥浆体 pH 值高,则重金属可能同 OH 或硅酸盐结合成含钙的盐;吸附在高比表面积的 C—S—H 粒子上;进入晶体结构中^[24]。而 2 种螯合剂则是与重金属发生螯合反应形成稳定的高交联网状的螯合物沉淀,实现对重金属的捕集与稳固。2 种作用既有竞争又为互补。一方面,螯合反应可能与重金属的复分解沉淀反应及 C—S—H 胶粒对重金属的吸附作用发竞争,水泥和飞灰中的部分 Ca、Mg 等也能发生螯合反应,从而损耗掉部分螯合剂;另一方面,水泥基材提供了碱性环境,有助于螯合产物的稳定存在^[2],

表2 最佳组合重金属的浸出浓度

Table 2 Leaching concentrations of heavy metals of the optimal combination (mg/L)										
组合	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Se	Be	Ba
1	0.090	0.522	0.186	0.119	0.084	47.23	ND	0.030	ND	0.589
2	ND	0.732	0.143	0.095	0.023	40.85	ND	0.019	ND	0.574
3	0.044	0.127	0.162	0.088	0.059	30.87	ND	0.032	ND	0.717
4	0.073	0.152	0.174	0.084	0.103	36.16	ND	0.050	ND	0.313

ND: 未检测出。

并能够稳固不能参与螯合反应的重金属,弥补螯合剂选择性稳定重金属的缺陷,螯合物还有可能进一步吸附到水化产物的颗粒上或进入晶体结构中,实现更为牢固的双重稳定。有关螯合剂和水泥协同稳定重金属的机理需要更为详细地实验研究。

2.5 经济分析

由于螯合剂的成本与其种类等有关,所以成本分析环节仅以焚烧发电厂实际采用的螯合剂即 DT-CR 为分析对象。飞灰稳定化处置过程的成本可以按照以下公式计算。

$$S = \sum_i^m b_i x_i + \sum_j^n c_j y_j + T \quad (1)$$

式中: S 为总费用(元/t); b_i 为消耗物料的单价(元/t),其中螯合剂 DT-CR、工艺水和水泥单价分别为 13 600.0 元、0.4 元、400.0 元; x_i 表示物料消耗量(t/t); c_j 为能源单价(如元/kWh), y_j 表示能耗,主要是电耗(kWh/t),由于不同时期的电价有所差异,将电费折算成 20 元/t(干料); m 、 n 为相关种类的总数; T 表示如运输、填埋、设备维修、人工操作等其他费用的总和(元/t),其中运输和填埋费分别为 40 元/t 和 50 元/t。

由于处置过程中的一些影响因素波动性较大,而有些因素影响甚小。在简化计算的基础上,表 3 中列出了主要的费用类型及相关开支。根据上述水泥和螯合剂的固化/稳定化实验结果,分别计算了单独使用 DT-CR(方式 1)、15% 水泥 + 2.25% DT-CR(方式 2)、20% 水泥 + 1.75% DT-CR(方式 3)、单独使用水泥(方式 4) 4 种情况时的成本,如表 3 所示。

从成本分析结果看出,由于螯合剂的价格昂贵,导致螯合剂稳定化处置飞灰的成本显著高于水泥固化。与单一的螯合剂稳定相比,水泥和螯合剂协同处理的成本随着水泥添加量增加而不断降低。因此完全采用螯合剂的方式因成本过高而不可取,完全采用水泥的方式虽成本低却增容性较大。若兼顾经济性和增容性,处置过程中水泥添加量可控制在 20%,

表3 不同配比方式的处置成本

Table 3 Disposal costs of different matching methods				
配比方式	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4
螯合剂用量(t/t)	0.03	0.0225	0.0175	0
水泥用量(t/t)	0.00	0.18	0.25	0.43
水量(t/t)	0.30	0.35	0.38	0.43
螯合剂费用(元/t)	816	612	476	0
水泥费用(元/t)	0	70.6	100	171.4
工艺水费(元/t)	0.1	0.1	0.2	0.2
电费(元/t)	20	23.3	28.8	40.2
处置费用(元/t)	51.5	77.6	82.1	92.9
运输费用(元/t)	53.2	62.1	65.7	74.3
费用(元/t)	940.8	845.7	752.8	379

螯合剂添加量 1.75%,而且处置后的固化体具有一定的抗压强度,可以适用一些强度要求不高的场合。另外,由于处置过程中螯合剂的费用占据主要,并与其稳定效果、价格有很大关系,因此,采用更为高效环保、经济的螯合剂如 TMT,进一步减少螯合剂用量,对于节约成本和填埋空间具有重要的意义。

3 结论

(1) 单一水泥固化时,水泥添加量达 30% 后才能满填埋重金属标准,而添加比例达到 10% 抗压强度就可达到国外的卫生填埋标准。

(2) 螯合剂 TMT 对 Cu、Pb、Cd 的稳定效果最好,DT-CR 以 Cu、Pb 最佳。同等有效添加量时 TMT 的稳定效果优于 DT-CR,完全达标时二者所需的添加量分别为 2% 和 3%。

(3) 水泥和螯合剂复合稳定时,水泥和螯合剂二者用量之间的关系并非线性,存在交互作用;螯合剂在实现减容化和稳定化的同时,带来成本提高的问题,以 DT-CR 为例,在兼顾经济性和增容性时,水泥用量可控制在 20%,稳定剂为 1.75%。

参考文献

- [1] 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. 环境化学, 2010, 29(4): 659-664

- Li Na, Hao Qingju, Jiang Changsheng, et al. Particle size distribution and speciation analysis of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash in Chongqing, China. *Environmental Chemistry*, **2010**, 29(4): 659-664 (in Chinese)
- [2] 徐颖, 陈玉, 冯岳阳. 重金属整合剂处理垃圾焚烧飞灰的稳定化技术. *化工学报*, **2013**, 64(5): 1833-1839
- Xu Ying, Chen Yu, Feng Yueyang. Stabilization technology in treating municipal solid waste incineration fly ash using heavy metal chelating agent. *CIESC Journal*, **2013**, 64(5): 1833-1839 (in Chinese)
- [3] 蒋建国, 张妍, 许鑫, 等. 可溶性磷酸盐处理焚烧飞灰的稳定化技术. *环境科学*, **2005**, 26(4): 191-194
- Jiang Jianguo, Zhang Yan, Xu Xin, et al. Heavy metal stabilization in municipal solid waste incineration fly ash using soluble phosphate. *Environmental Science*, **2005**, 26(4): 191-194 (in Chinese)
- [4] Jiang Jianguo, Wang Jun, Xu Xin, et al. Heavy metal stabilization in municipal solid waste incineration flyash using heavy metal chelating agents. *Journal of Hazardous Materials*, **2004**, 113(1-3): 141-146
- [5] 李华, 司马菁珂, 罗后仕, 等. 危险废物焚烧飞灰中重金属的稳定化处理. *环境工程学报*, **2012**, 6(10): 3740-3745
- Li Hua, Sima Jingke, Luo Qishi, et al. Stabilization of heavy metals in hazardous waste incineration fly ash. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(10): 3740-3745 (in Chinese)
- [6] 王金波, 秦瑞香. 有机整合剂稳定飞灰中的重金属. *环境科学与技术*, **2013**, 36(9): 139-143
- Wang Jinbo, Qin Ruixiang. Organic Chelator for the stabilization of heavy metals in fly ash. *Environmental Science & Technology*, **2013**, 36(9): 139-143 (in Chinese)
- [7] 张海军, 于颖, 倪余文, 等. 采用巯基捕收剂稳定化处理垃圾焚烧飞灰中的重金属. *环境科学*, **2007**, 28(8): 1899-1904
- Zhang Haijun, Yu Ying, Ni Yuwen, et al. Stabilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash with the thiol collectors. *Environmental Science*, **2007**, 28(8): 1899-1904 (in Chinese)
- [8] Xu Ying, Chen Yu, Feng Yueyang. Stabilization treatment of the heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration using diisopropyl dithiophosphate potassium. *Environmental Technology*, **2013**, 34(11): 1411-1419
- [9] Sukandar, Padmi T., Tanaka M., et al. Chemical stabilization of medical waste fly ash using chelating agent and phosphates: Heavy metals and ecotoxicity evaluation. *Waste Management*, **2009**, 29(7): 2065-2070
- [10] Sun Yifei, Watanabe N., Qiao Wei, et al. Polysulfide as a novel chemical agent to solidify/stabilize lead in fly ash from municipal solid waste incineration. *Chemosphere*, **2010**, 81(1): 120-126
- [11] Lu Rongjie, Hou Jiaai, Xu Jiang, et al. Effect of additives on Hg^{2+} reduction and precipitation inhibited by sodium dithiocarbamate in simulated flue gas desulfurization solutions. *Journal of Hazardous Material*, **2011**, 196: 160-165
- [12] Chai Liyuan, Wang Qingwei, Li Qingzhu, et al. Enhanced removal of Hg(II) from acidic aqueous solution using thiol-functionalized biomass. *Water Science and Technology*, **2010**, 62(9): 2157-2166
- [13] 王川, 杨朝晖, 曾光明, 等. DTCT 协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥的研究. *中国环境科学*, **2012**, 32(11): 2060-2066
- Wang Chuan, Yang Zhaohui, Zeng Guangming, et al. Stabilization/solidification of heavy metals contaminated sediment using cement and DTCT as binder materials. *China Environmental Science*, **2012**, 32(11): 2060-2066 (in Chinese)
- [14] 王本洋, 简丽. 电镀废水处理站 DTCT 辅助氢氧化物沉淀工艺改造. *给水排水*, **2011**, 37(6): 54-57
- Wang Benyang, Jian Li. Improvement of the DTCT-assistant hydroxide precipitation process in electroplating wastewater treatment station. *Water & Wastewater Engineering*, **2011**, 37(6): 54-57 (in Chinese)
- [15] 刘彦博, 商平, 刘汉桥, 等. 垃圾焚烧飞灰固化/稳定化实验研究. *环境卫生工程*, **2010**, 18(2): 15-18
- Liu Yanbo, Shang Ping, Liu Hanqiao, et al. Experimental study on solidification/stabilization for fly ash from waste incineration. *Environmental Sanitation Engineering*, **2010**, 18(2): 15-18 (in Chinese)
- [16] 邹庐泉, 吴长淋, 张晓星, 等. 满足《生活垃圾填埋污染控制标准》的生活垃圾焚烧飞灰重金属药剂稳定化研究. *环境污染与防治*, **2011**, 33(3): 61-64
- Zou Luquan, Wu Changlin, Zhang Xiaoxing, et al. Chemical stabilization of fly ash for satisfying landfill criteria of municipal solid waste landfill site. *Environmental Pollution and Control*, **2011**, 33(3): 61-64 (in Chinese)
- [17] 王金波, 秦瑞香, 袁茂林, 等. 复合化学整合剂稳定垃圾焚烧飞灰中的重金属. *化学研究与应用*, **2013**, 25(10): 1397-1402
- Wang Jinbo, Qin Ruixiang, Yuan Maolin, et al. Complex chelators for the stabilization of heavy metals in MSW incineration fly ash. *Chemical Research and Application*,

- 2013, 25(10): 1397-1402(in Chinese)
- [18] Mangialardi T., Paolini A. E., Poletti A., et al. Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, 70(1-2): 53-70
- [19] 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)
- [20] 刘汉桥, 张书庭, 张于峰, 等. 医疗垃圾焚烧飞灰的水泥固化效果实验. *天津大学学报*, 2010, 43(1): 32-35
Liu Hanqiao, Zhang Shuting, Zhang Yufeng, et al. Experiment on solidification of hospital waste incineration fly ash using cement. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(1): 32-35(in Chinese)
- [21] Hou Jiaai, Lu Rongjie, Sun Mingyang, et al. Effect of heavy metals on the stabilization of mercury(II) by DTGR in desulfurization solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 217-218: 224-230
- [22] 相波, 刘亚菲, 李义久, 等. DTC 类重金属捕集剂研究的进展. *电镀与环保*, 2003, 23(6): 1-4
Xiang Bo, Liu Yafei, Li Yijiu, et al. Development in the research on DTC derivatives for heavy metal treatment. *Electroplating & Pollution Control*, 2003, 23(6): 1-4(in Chinese)
- [23] Xue Qiang, Li Jiangshan, Hu Zhuyun. Compound stabilization/solidification of MSWI fly ash with trimercapto-s-triazine and cement. *Water Science and Technology*, 2012, 66(3): 689-694
- [24] 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 Lin, 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)