

# 不同级配垃圾焚烧底渣固化市政污泥工程特性分析

梁冰<sup>1</sup> 胡学涛<sup>1,2,\*</sup> 陈亿军<sup>2</sup> 陈德强<sup>2,3</sup> 林青瑜<sup>4</sup>

1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院 阜新 123000
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071
3. 西南石油大学 土木工程与建筑学院 成都 610500
4. 武汉轻工大学 化学与环境工程学院 武汉 430023

**摘要** 开展了(炉排炉和流化床炉)两种垃圾焚烧底渣与固化剂共同作用下固化市政污泥的工程特性研究。分析了两种底渣化学成份及物理级配上的差异,重点考察了在密封养护情况下,测定了不同底渣固化体的含水率、pH 值、无侧限抗压强度及 28d 渗透系数等工程特性指标。研究表明:相同含量的两种底渣固化体含水率及 pH 相同,且含水率随底渣含量增加而降低,而 pH 值随底渣含量增加而增加;随着底渣含量增加,级配良好的炉排炉底渣固化体强度比级配不良的流化床底渣固化体强度从高 8 kPa 增加到 30 kPa;受底渣级配的影响,炉排炉底渣固化体渗透系数随底渣含量增加而增大,而流化床底渣固化体渗透系数基本不变。级配良好的炉排炉底渣固化体工程特性优于级配不良的流化床底渣固化体,具有更强的骨架作用。研究成果为污泥及垃圾焚烧底渣填埋处置提供了科学借鉴。

**关键词** 市政污泥;固化;颗粒级配;垃圾焚烧底渣;工程特性

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)02-117-06 DOI 10.12030/j.cjee.201510061

## Engineering characteristics analysis of sewage sludge solidified by different gradations municipal solid waste incineration bottom ash

LIANG Bing<sup>1</sup>, HU Xuetao<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Yijun<sup>2</sup>, CHEN Deqiang<sup>2,3</sup>, LIN Qingyu<sup>4</sup>

1. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
3. Institute of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
4. School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

**Abstract** In this study, an inorganic curing agent was added to two different types of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash, grate type incinerator and fluidized bed incinerator bottom ash, in order to treat municipal sludge. The differences in the chemical compositions and particle size distribution between the two types of bottom ash were analyzed. In particular, engineering indices, such as water content, pH, unconfined compressive strength, and the coefficient permeability of the solidified body after 28 days of sealed curing, were tested. The results showed that the two types of solid matrix with the same content of bottom ash had the same water content and pH, and the water content of the solid matrix decreased and the pH increased with an increase in the content of MSWI bottom ash. The unconfined compressive strength of the solidified body with the grate furnace bottom ash, which had a good gradation, was greater than that of the solidified body with circulating fluid bed (CFB) bottom ash. It increased from 8 kPa to 30 kPa with increasing bottom ash content. The coefficient permeability of the solidified body with grate furnace bottom ash increased with an increase in the content of bot-

基金项目:国家自然科学基金自助项目(51279199);中科院院地合作项目;中国科学院学科交叉与合作创新团队项目(文件号:人字(2013)47号)

收稿日期:2015-10-10;录用日期:2016-01-28

第一作者:梁冰(1962—)女,教授,博士生导师,研究方向:工程流体力学。E-mail:lbwqx@163.com

\*通信作者,E-mail:huxuetao2011@163.com

tom ash. However, the coefficient permeability of the solidified body with CFB bottom ash was almost constant, which was caused by the particle size distribution of the bottom ash. Due to good gradation, the engineering characteristics of sewage sludge solidified by grate furnace bottom ash was better than that of CFB bottom ash, and sewage sludge solidified by grate furnace bottom ash had a stronger skeleton effect. This research provides an insight into landfill sludge and MSWI bottom ash.

**Key words** sewage sludge; solidification; particle size distribution; MSWI bottom ash; engineering characteristic

我国湿污泥产量以每年 10% 的速度增长, 市政污泥的处理处置问题日益严重, 根据《国家环境保护“十二五”规划》2015 年, 全国湿污泥(80% 含水量) 产量将突破 6 000 万 t<sup>[1]</sup>。污泥卫生填埋由于投资少、容量大、处理快等优点<sup>[2]</sup>, 目前仍是我国污泥处理最为常用的方法<sup>[3]</sup>。但是经过污水处理厂脱水处理后的污泥, 其含水率仍然高达 75% 以上, 无法达到直接填埋处置的强度要求, 须对污泥进行固化处理<sup>[4]</sup>。

污泥的固化处理, 就是通过经济有效的途径, 提高污泥的强度及工程性质使其变为不可流动或形成结构稳定的固体<sup>[5]</sup>。目前常用的固化技术可分有水泥固化、石灰固化、熔融固化、沥青固化以及玻璃固化等<sup>[6-8]</sup>。而水泥因为其较好的固化效果和低廉的价格而成为最广泛使用的固化剂。在用不同固化剂固化污泥的基础上, 为了进一步提高固化效果, 很多研究考虑了添加其他的辅助材料, 如粉煤灰、高炉矿渣、铜渣、可溶性硅酸盐、当地粘土等<sup>[9-10]</sup>。这些辅助材料确实起到了一定效果, 但是由于取料困难, 成本较高, 如何选择低成本辅料是降低固化成本的关键。

根据焚烧技术工艺的不同, 有流化床焚烧炉、炉排型焚烧炉、回转窑焚烧炉及垃圾热解气化焚烧炉<sup>[11]</sup>。我国目前广泛应用前三种, 而回转窑焚烧炉则主要处理有毒垃圾和工业垃圾, 一般生活垃圾主要用前两种处理。垃圾焚烧灰渣是在焚烧处理城市生活垃圾时产生的二次产物。根据收集部位的不同, 灰渣分为底渣和飞灰。其中飞灰占 20%, 含有很多重金属元素<sup>[12]</sup>, 属于危险废弃物; 垃圾焚烧后残留在炉床上的称为底渣, 占灰渣总质量的 80%<sup>[13]</sup>, 通常直接在垃圾填埋场中填埋处理。垃圾焚烧底渣相对垃圾焚烧飞灰而言, 重金属含量少, 污染性小<sup>[14]</sup>, 其工程性质与天然集料类似, 在欧美一些国家, 代替天然集料或部分代替天然集料, 用于公路路基中<sup>[15]</sup>。用垃圾焚烧底渣协同固化剂共同固化污泥, 可以以废治废, 同时解决污泥和垃圾焚烧底渣两种城市固体废弃物的处置问题, 为垃圾焚烧底渣作为污泥固化骨料, 减小固化剂用量, 降低固化成本, 加强污泥工程特性, 拓展污泥处理处置途径提供参考。由于焚烧技术工艺的不同, 流化床焚烧炉要求对垃圾进行破碎均匀化处理<sup>[16]</sup>, 产生的垃圾焚烧底渣颗粒物理化学性质上均有区别<sup>[17]</sup>, 而颗粒的大小及其分布以及成份等均会影响固化体材料的抗压能力、剪切能力、渗透能力及抗冻性等<sup>[18]</sup>, 但目前考察辅助材料对污泥固化效果的研究很少考虑垃圾焚烧底渣, 更多研究的是考察底灰和飞灰时特性, 没有考虑不同类型底渣成份及组成上的差别, 因此, 本文比较两种不同类型垃圾焚烧底渣化学成份及物理组成上的差异, 通过实验研究两种底渣对固化市政污泥的工程特性影响的差别, 为有效利用垃圾焚烧底渣提供技术参数, 为填埋处置提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验中进行固化处理的污泥, 为湖北省武汉市某污水处理厂经过脱水处理后的污泥, 含水率为 86.65%, 有机质含量为 51.07%, 密度为  $1.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , pH 值为 7.46。

固化剂为自主配置的固化剂, 主要成份有硅酸二钙、氧化钙等, 经过大量室内实验, 确定该固化剂对污泥固化有较好效果, 添加量为污泥湿重的 20%。

实验中用到的炉排型垃圾焚烧底渣取自广州某垃圾焚烧厂, 循环流化床底渣取自天津某垃圾焚烧厂。两种垃圾焚烧底渣的颗粒级配曲线如图 1。从粒度曲线中得出, 炉排炉底渣(LP)中, 有效粒径  $d_{10} = 0.2 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 0.8 \text{ mm}$ , 限制粒径  $d_{60} = 3 \text{ mm}$ ; 流化床底渣(LH)中, 有效粒径  $d_{10} = 0.16 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 0.4 \text{ mm}$ , 限制粒径  $d_{60} = 2.1 \text{ mm}$ 。根据公式(1)和(2)可以计算出两种底渣的不均匀系数和曲率系数, 对于炉排炉底渣,  $C_u = 15$ ,  $C_s = 1.07$ , 级配良好; 对于流化床底渣,  $C_u = 13.1$ ,  $C_s = 0.47$ , 级配不连续, 细粒含量过多。

不均匀系数:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

曲率系数:

$$C_s = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (2)$$

垃圾焚烧底渣主要由熔渣、陶瓷砖石碎块、玻璃、铁钉及其他金属和未燃尽的有机物及不可燃的无机物等组成。文献[19-21]指出垃圾焚烧底渣粒径主要在 50 mm 以下,结合两种垃圾焚烧底渣颗粒粒度成份分析结果,可以看出,10 mm 以上颗粒含量均小于 10%,且主要是陶瓷片砖块熔渣等,所以实验中,将垃圾焚烧底渣进行烘干后过 10 mm 筛处理。两种垃圾焚烧底渣主要化学组成见表 1,可以看出垃圾焚烧底渣中含有大量活性金属氧化物,对于提高固化污泥强度具有积极作用。

通过对两种实验材料污泥化学特性的检测,可以发现,两种垃圾焚烧底渣化学组成基本相同,且各成分含量相差不大,但是受处理工艺的不同<sup>[16]</sup>,流化床底渣颗粒细粒含量较多,而炉排床底渣级配优良,这与 ZHANG<sup>[22]</sup>的研究结果是一致的。

## 1.2 实验方法与步骤

为考察两种不同类型垃圾焚烧底渣对固化污泥工程特性的影响,将两种底渣分别与固化剂共同添加到污泥中,按照  $m(\text{污泥}) : m(\text{固化剂}) : m(\text{垃圾焚烧底渣})$  为 100:20:(0、20、40、60、80 和 100) 进行固化,测试养护 28 d 后固化体的含水率、pH 值、无侧限抗压强度及养护 28 d 后固化体的渗透系数。

试样制备步骤为:首先将按比例称量好的污泥和垃圾焚烧底渣搅拌均匀,然后向其中添加固化剂,手动搅拌均匀后,再用水泥胶砂搅拌机先慢搅 2 min 后快搅 2 min 至均匀,然后将试样填入(50 mm × 50 mm)的环刀并置于温度(20 ± 2) °C 相对湿度 95% 养护箱中进行标准养护,固化体用保鲜膜封闭保证固化体不会出现水份蒸发,与实际污泥固化情况相接近。含水率的测定依据城市污水处理厂污泥检验方法(CJT 221-2005),采用鼓风烘箱烘干法;无侧限抗压强度采用无侧限抗压实验机;pH 值用精度为 0.01 的 pH 计测得;渗透系数用 PN3230M 环境土柔性壁渗透测试系统测得。

## 2 结果与分析

### 2.1 固化体含水率和 pH 值

图 2 中可以看出,固化污泥含水率随垃圾焚烧底渣含量的增加而降低,添加相同含量两种垃圾焚烧底渣的污泥固化体含水率也相同。固化污泥含水率的降低首先是固化剂反应消耗部分水,其次垃圾焚烧底渣中的活性氧化物反应也会中和部分水。添

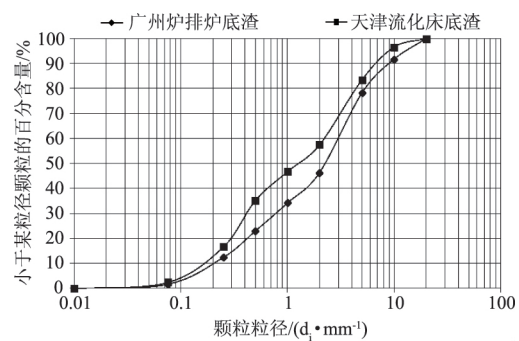


图 1 垃圾焚烧底渣颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of MSWI bottom ash

表 1 垃圾焚烧底渣的化学组成

Table 1 Chemical composition of MSWI bottom ash

氧化物	流化床型底渣	炉排炉底渣
Na <sub>2</sub> O	1.16	2.73
MgO	4.16	2.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.58	5.89
SiO <sub>2</sub>	23.2	17.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.29	2.7
SO <sub>3</sub>	2.25	5.43
K <sub>2</sub> O	3.23	1.97
CaO	40.21	45.64
TiO <sub>2</sub>	1.19	1.39
MnO	0.2	0.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.75	3.03
CuO	0.16	0.19
ZnO	0.62	0.77
CrO <sub>3</sub>	—	1.97
els	5	8.29

加相同含量两种垃圾焚烧底渣的污泥固化体含水率相同,说明两种垃圾焚烧底渣在活性氧化物含量及中和水能力上相当,没有太大区别,这与表 1 中的检测结果很吻合。

从图 3 可以发现,固化污泥 pH 值随着垃圾焚烧底渣添加量的增加而增大,且都较仅添加固化剂的固化污泥高,但是在底渣添加量相同的情况下,两种不同垃圾焚烧底渣固化的污泥固化体 pH 值基本是相同的。固化污泥 pH 值随着垃圾焚烧底渣添加量的增加而增大与垃圾焚烧底渣具有一定活性氧化物、同时本身呈碱性、pH 值很高有关<sup>[23]</sup>(底渣 pH 值在 11~12 之间)。

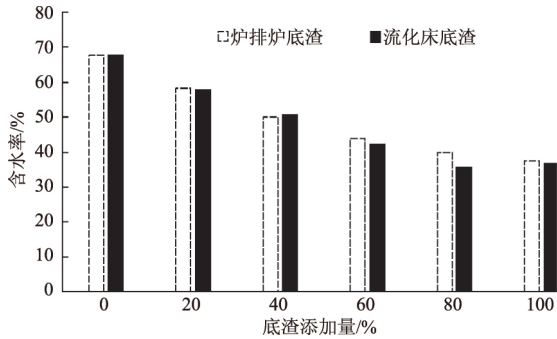


图 2 不同底渣添加量固化污泥含水率

Fig. 2 Water content of solidified sludge with different contents of bottom ash

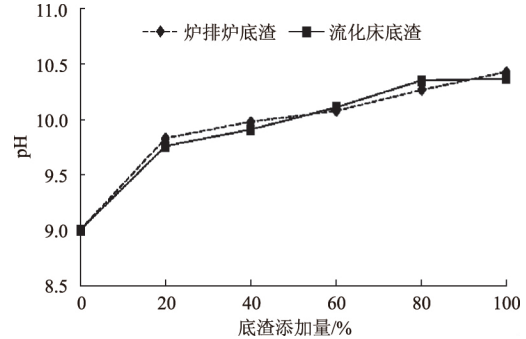


图 3 不同底渣添加量固化污泥的 pH 值

Fig. 3 pH value of solidified sludge with different contents of bottom ash

结合两种底渣添加量下的含水率情况,两种不同垃圾焚烧底渣固化污泥在相同添加量下 pH 值基本相同且不同粒径组垃圾焚烧底渣颗粒 pH 值基本相同<sup>[24]</sup>则进一步表明,虽然两种底渣活性氧化物含量有差别,但颗粒尺寸影响材料活性<sup>[25]</sup>带来的差别不大,两种底渣由于化学成分含量上的差别引起的差异较小,两种底渣对固化污泥的影响情况相当,能力相当。

### 2.2 抗压强度与底渣添加量的关系

由图 4 可知,养护 28 d 后,两种类型垃圾焚烧底渣协同固化污泥固化体无侧限抗压强度均随着底渣添加量的增加线性增大,且均高于未添加底渣的污泥固化体,但相同添加量炉排炉底渣协同固化污泥的强度均高于流化床底渣;且随着底渣添加量的增加,两种底渣协同固化污泥的强度差值逐渐增大,从 20% 添加量的 8 kPa 增大到 100% 添加量的 30 kPa。

随着底渣含量的增多,活性成份增加,结合吸收的水分增多,水化胶凝产物增多,同时使颗粒间水膜变薄、颗粒间基质吸力增大,从而导致固化体强度随之逐渐增大。但是在相同添加量下,两种类型底渣固化体强度却有差别,且随底渣添加量的增加而增大,结合前期的研究结果可知,底渣颗粒越大固化污泥强度越大<sup>[26]</sup>,且底渣颗粒尺寸决定其化学特性及

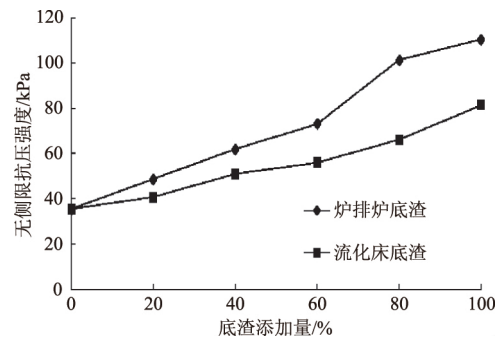


图 4 不同底渣添加量固化后有机质含量随时间变化曲线

Fig. 4 Organic content-time curves of solidified sludge with different contents of bottom ash

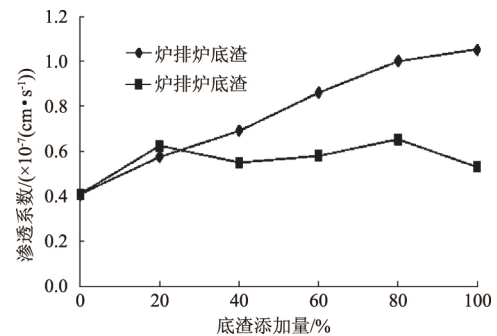


图 5 不同底渣添加量固化体渗透系数

Fig. 5 Coefficient permeability of solidified sludge with different contents of bottom ash

组成<sup>[27]</sup>,但是底渣化学成分引起的差别很小,推测主要是由于两种底渣级配上的差别引起的差异。流化床底渣级配不连续,细粒含量较多,比表面积更大,在产生相同数量水化胶凝产物下,颗粒之间的粘结更薄弱,强度更低。当添加量较少时,两种底渣细粒总量差别较小,但随着添加量的增加,流化床底渣与炉排炉底渣细粒总量差值增大,于是强度差别也越大。

### 2.3 渗透系数与底渣添加量的关系

由图 5 可知,经过 28 d 养护后,添加垃圾焚烧底渣污泥固化体与未添加底渣的固化体相比,渗透系数均增大;添加流化床垃圾焚烧底渣的污泥固化体渗透系数,随着底渣添加量的增加基本上不变,且仅比未添加底渣固化体渗透系数增加 40% 左右;添加炉排炉垃圾焚烧底渣的污泥固化体渗透系数,随着底渣添加量的增加线性增大,最大增大了 1 个数量级。

垃圾焚烧底渣内部有较多孔洞<sup>[24-28]</sup>,是多孔介质,底渣的添加,为固化污泥提供了渗透通道,因此添加底渣的固化体渗透性增强,渗透系数较只添加固化剂的污泥固化体增大。流化床底渣级配不均匀,颗粒整体较小,颗粒孔隙更小,细颗粒含量较多,有效渗透通道小,随着底渣含量增多,横断面有效渗透通道始终主要受细颗粒孔隙控制,故流化床底渣污泥固化体渗透系数没有随着底渣含量的变化而变化。炉排炉底渣级配均匀,小颗粒无法起到优势作用,随着底渣含量的增加,大颗粒增多并逐渐起到增大有效渗透通道的作用,从而出现随着底渣含量增多,渗透系数增大的现象。

结合两种底渣固化污泥抗压强度和渗透系数可以发现,级配良好的炉排炉底渣污泥固化体渗透性和抗压强度均高于细粒含量过多的流化床底渣污泥固化体,可见级配良好的底渣颗粒在固化体中不仅能更好的起到结构骨架作用,同时也有利于固化体中的水分排出,对固化污泥的填埋具有更好的工程特性。

## 3 结论

相同含量的两种底渣化学组成上的微小差异对污泥固化体含水率及 pH 等工程特性没有产生较大差异性影响,而底渣级配上的差异是导致炉排炉垃圾焚烧底渣固化污泥具有更高的抗压强度和更大的渗透系数的主要原因,级配良好的炉排炉底渣比细粒含量过多的流化床底渣协同固化后的固化污泥更有利于填埋处置。

## 参考文献

- [1] 李磊,徐菲,周灵君,等. 固化污泥压缩特性研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(1): 171-176
- [2] 马建立,赵由才,张华,等. 城市污水处理厂不同性状污泥填埋工艺的试验研究[J]. 给水排水,2007,33(10): 50-53
- [3] 崔广强,常方强. 垃圾焚烧底灰固化污水厂污泥的岩土工程性质实验[J]. 环境工程学报,2013,7(6): 2367-2370
- [4] 曹永华,闫澍旺,赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学,2006,27(5): 740-744
- [5] 李磊. 污泥固化处理技术及重金属污染控制研究[D]. 南京: 河海大学,2006
- [6] 王宇峰. 城镇污水处理厂污水污泥固化处理实验研究[D]. 西安: 长安大学,2009
- [7] 王伟,袁光钰. 我国的固体废物处理处置现状与发展[J]. 环境科学,1997,18(2): 87-90
- [8] KIM E H, CHO J K, YIM S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover[J]. Chemosphere, 2005, 59(3): 387-395
- [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[J]. Waste Management, 1996, 16(4): 295-303
- [10] LIM S, JEON W, LEE J, et al. Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess[J]. Water Research, 2002, 36(17): 4177-4184
- [11] 郭娟. 垃圾焚烧发电厂烟气系统优化研究[D]. 北京: 清华大学,2014
- [12] 李江山,薛强,胡竹云,等. 垃圾焚烧飞灰水泥固化体强度稳定性研究[J]. 岩土力学,2013,34(3): 751-756
- [13] 章骅,何品晶. 城市生活垃圾焚烧灰渣的资源化利用[J]. 环境卫生工程,2002,10(1): 6-10
- [14] YU Jie, SUN Lushi, XIANG Jun, et al. Physical and chemical characterization of ashes from a municipal solid waste incinerator in China[J]. Waste Management & Research, 2013, 31(7): 663-673
- [15] 石爱娟,何品晶,邵立明,等. 城市生活垃圾焚烧炉渣工程性质研究[J]. 环境工程,2004,22(1): 47-50

- [16] 孙燕. 几种垃圾焚烧炉及炉排的介绍[J]. 环境卫生工程, 2002, 10(2): 77-80
- [17] 张建铭. 垃圾焚烧灰渣特性及其在路基工程中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010
- [18] 李立寒, 张南鹭. 道路建筑材料[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999
- [19] CHIMENOS J M, SEGARRA M, FERNÁNDEZ M A, et al. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, 64(3): 211-222
- [20] 李晓勇, 朱建斌, 胡雨燕. 焚烧灰渣物理化学性质的研究进展[J]. 上海应用技术学院学报, 2008, 8(2): 116-120
- [21] 章骅, 何品晶. 城市生活垃圾焚烧灰渣及其性质分析[J]. 上海环境科学, 2002, 21(6): 356-360
- [22] ZHANG Jianming, HU Minyun, XU Sifa. Experimental study on the engineering properties of two incineration bottom ash of municipal solid wastes [C]//CHEN Yunmin, ZHAN Liangtong, TANG Xiaowu. *Advances in Environmental Geotechnics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 711-714
- [23] TAY J H, GOH A T C. Engineering properties of incinerator residue[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1991, 117(2): 224-235
- [24] SHIM Y S, KIM Y K, KONG S H, et al. The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash[J]. *Waste Management*, 2003, 23(9): 851-857
- [25] LIMBACHIYA V, GANJIAN E, CLAISSE P. The impact of variation in chemical and physical properties of PFA and BPD semi-dry cement paste on strength properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 248-255
- [26] 胡学涛, 梁冰, 陈亿军, 等. 不同粒径垃圾焚烧底渣对固化市政污泥工程特性的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5567-5572
- [27] CHIMENOS J M, FERNÁNDEZ A I, MIRALLES L, et al. Short-term natural weathering of MSWI bottom ash as a function of particle size[J]. *Waste Management*, 2003, 23(10): 887-895
- [28] CHANG F Y, WEY M Y. Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(3): 594-603