

垃圾焚烧底渣协同固化 市政污泥的工程特性

梁冰¹ 胡学涛^{1,2} 陈亿军^{2,*}

(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)

摘要 开展了不同含量垃圾焚烧底渣与固化剂共同作用下, 固化市政污泥工程特性研究。测定了固化体的含水率、有机质含量、重度、pH值、无侧限抗压强度、增容比及28 d渗透系数等工程指标。结果表明: 固化体有机质含量及含水率随垃圾焚烧底渣含量的增多而降低; 重度随底渣添加量增加而增大, 在 $12 \sim 15 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间; 固化体pH值、无侧限抗压强度、增容比及渗透系数均随底渣含量增加而增大。底渣添加量为40%左右时, 固化体满足填埋要求。垃圾焚烧底渣作为骨料, 增强了污泥固化体工程特性, 减少了固化剂用量, 同时实现以废治废, 降低污泥和垃圾焚烧底渣处置成本。研究成果为污泥及垃圾焚烧底渣填埋处置提供了参数及指导作用。

关键词 市政污泥; 垃圾焚烧底渣; 固化; 不同添加量; 工程特性

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)11-6705-06 DOI 10.12030/j.cjee.201506002

Engineering characteristics of municipal sludge solidified by municipal solid waste incineration bottom ash as a additive

LIANG Bing¹ HU Xuetao^{1,2} CHEN Yijun^{2,*}

(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)

Abstract An inorganic curing agent was added to another waste, containing differing percentages of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash, in order to treat municipal sludge. Engineering indexes of the resulting solid matrix were tested, including: water and organic content, density, pH, unconfined compressive strength, expansion ratio, and coefficient permeability. The results show that the organic and water contents of the solid matrix decreased with increasing MSWI bottom ash content. The density (ranging from 12 to $15 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$), pH, unconfined compressive strength, expansion ratio, and coefficient permeability of the solid matrix all increased with greater content of bottom ash. The solid matrix containing 40% bottom ash satisfies the criteria for landfills. As a construction aggregate, MSWI bottom ash enhances the engineering characteristics of the solidified sludge, diminishes the dosage of curing agent, achieves the goal of using waste to treat waste, and reduces the cost of disposal of sludge and MSWI bottom ash. The study provides parameters and guidance for landfilling sludge and MSWI bottom ash.

Key words municipal sludge; waste incineration bottom ash; solidification; different contents; engineering characteristics

近年来,我国污水处理能力快速提高,污水处理突破6 000万t。目前,国内外污泥处置的方法主要有焚烧、投海、土地利用和填埋。污泥焚烧热值太低且产生空气污染等问题,海洋倾倒已被国际海洋法
厂污泥产量不断增加,市政污泥的处理处置问题日益严重。2015年,全国湿污泥(80%含水量)产量将

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279199);中国科学院学科交叉与合作创新团队项目(人字(2013)47号);中科院院地合作项目(武新管科创[2014]2号)

收稿日期:2015-06-01; 修订日期:2015-07-24

作者简介: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

* 通讯联系人 E-mail: cheniyjun2131@163.com

禁止,我国污泥土地利用时无法满足园林绿化和农用的准入条件^[1],而污泥卫生填埋由于投资少、容量大、处理快等优点^[2],目前仍是我国污泥处理最为常用的方法^[3]。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^[4]。

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^[5]。目前,常用的固化技术可分为水泥固化、石灰固化、熔融固化、沥青固化以及玻璃固化等^[6-8]。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、可溶性硅酸盐和当地粘土等^[9-10]。这些辅助材料起到了一定效果,但取料困难,成本较高,如何选择低成本辅料是降低固化成本的关键。因此崔广强等^[3]尝试了垃圾焚烧底灰对污泥进行固化,并建立了强度预测模型,但其所用污泥含水率很低(70%~75%),低于我国目前实际填埋的污泥含水率(80%左右),含水率对污泥特性影响很大,故其实际指导作用有限。

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^[11],属于危险废弃物;垃圾焚烧后残留在炉排床上的称为底渣,占灰渣总质量的80%^[12],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,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^[13]。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。本文通过实验探

讨垃圾焚烧底渣对固化市政污泥的工程特性,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,重金属含量如表1,其中限值标准依据城镇污水处理厂污泥泥质规范(CJ247-2007)及城镇污水处理厂污泥处置混合填埋泥质规范(CJ/T249-2007)。

实验中选择固化剂为自主配置的以普通硅酸盐水泥为基础的无机胶凝固化材料,主要成份有硫铝酸钙、硅酸二钙、硅酸三钙和氧化钙等,经过大量室内实验,确定该固化剂对污泥固化有较好效果。

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。实验中所用垃圾焚烧底渣为广州某垃圾焚烧厂垃圾底渣,初始含水率17.33%,烧失量为1.35%,pH为11.85,密度为 $1.33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。对其颗粒进行筛分实验后得出各粒度区间百分含量分别为:10 mm以上为8.27%,10~5 mm为12.51%,5~2 mm为29.89%,2~1 mm为12.15%,1~0.5 mm为13.19%,0.5~0.25 mm为13.58%,0.25~0.075 mm为8.80%,0.075 mm以下颗粒含量为1.61%。据文献[14-16]垃圾焚烧底渣粒径主要在50 mm以下,结合来自广州某垃圾焚烧厂垃圾焚烧底渣颗粒粒度成份分析结果,可以看出,10 mm以上颗粒含量仅为8.27%,且主要是陶瓷片砖块熔渣等,所以在实验中,将广州某垃圾焚烧底渣进行烘干后过10 mm筛处理。广州垃圾焚烧底渣中主要化学成分为 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 NaO 和 SO_3 ,含量分别为43.32%、27.13%、4.91%、3.13%、1.67%、1.39%、2.15%和8.62%。底渣重金属含量如表1所示,符合填埋标准。

表1 实验材料重金属含量

Table 1 Heavy metal contents in test material		/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)						
金属元素	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	As	Ni	Hg
污泥检测值	45	421	211	88	19.5	16	70.8	10
垃圾焚烧底渣检测值	960	1880	435	953	19.1	5	0	0
限值	<1 000	<4 000	<1 500	<1 000	<20	<75	<200	<25

1.2 实验方法与步骤

在实际工程中通常根据污泥特性的不同调节固化剂的添加量,但为了控制成本,固化剂通常控制在 20% 以内,结合实验污泥的检测结果,选择最大添加量。为考察不同添加量的垃圾焚烧底渣对固化污泥工程特性的影响,将底渣协同固化剂添加到污泥中,按照污泥:固化剂:垃圾焚烧底渣质量比为 100:20:(0、20、40、60、80 和 100) 进行固化,计算固化体的增容比和重度,测试固化体的含水率、有机质含量以及养护 3、7、14 和 28 d 后无侧限抗压强度、pH 值及固化体的渗透系数。

试样制备步骤: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)的模具中并置于温度(20 ± 2) °C,相对湿度 95% 养护箱中进行标准养护。1 d 后脱模,固化体用塑料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。

含水率和有机质的测定依据城市污水处理厂污泥检验方法(CJT 221-2005),含水率用鼓风烘箱 105 °C 烘干法,有机质用马弗炉在 600 °C 灼烧法;重度通过环刀称量法计算;无侧限抗压强度采用无侧限抗压实验机测得;pH 值用精度为 0.01 的 pH 计测定;增容比通过测量养护前后体积计算;渗透系数用 PN3230M 环境土柔性壁渗透测试系统测定。

2 结果与分析

2.1 底渣添加量对含水率和有机质的影响

有机质含量随垃圾焚烧底渣含量的增加而降低,主要是添加的垃圾焚烧底渣对污泥的稀释作用所致(见图 1)。图 2 显示,不同添加量底渣协同固化剂固化污泥后的固化体有机质含量随龄期略微降低,降低值为 1% 左右。可见短期内,有机质对固化体的影响有限,有机质分解对固化污泥的影响需要监测其长期特性。

图 3 中可以看出,含水率随垃圾焚烧底渣含量的增加而降低,除了固化剂水化反应结合部分水外,底渣的水硬活性物反应消耗部分水从而导致含水率的降低。图 4 显示,固化体含水率随龄期降低 3% ~ 5%。

2.2 底渣添加量对固化污泥重度的影响

重度是计算填埋场的稳定性和沉降量的重要参

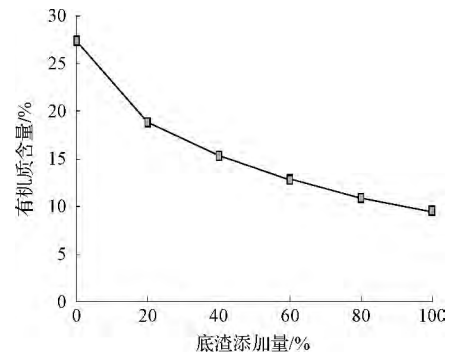


图 1 不同底渣添加量固化后有机质含量
Fig. 1 Organic content of solidified sludge with different contents of bottom ash

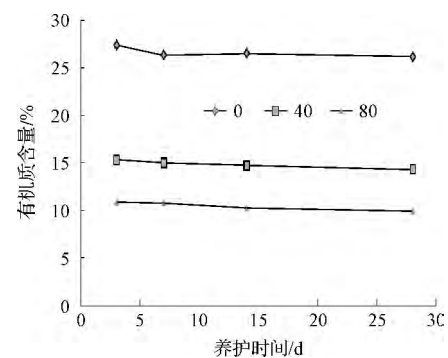


图 2 不同底渣添加量固化后有机质含量随时间变化曲线
Fig. 2 Organic content-time curves of solidified sludge with different contents of bottom ash

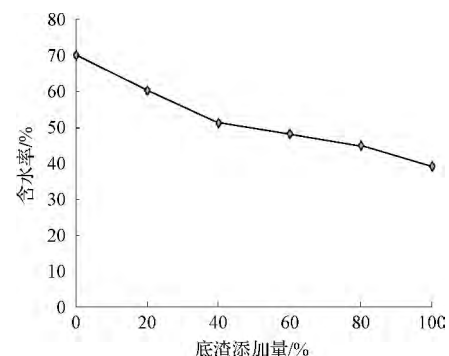


图 3 不同底渣添加量固化后含水率
Fig. 3 Water content of solidified sludge with different contents of bottom ash

数。如图 5 所示,固化体的重度随垃圾焚烧底渣含量的增加而增大,在底渣添加量为 0 ~ 100% 范围内,固化体重度处于 12 ~ 15 kN · m⁻³ 之间,该值与垃圾焚烧底渣固化污泥的重度基本吻合(11 ~ 13 kN/m³)^[3]。

2.3 固化体 pH 值的变化情况

污泥处置规范标准(CJ/T249-2007、CJ247-2007

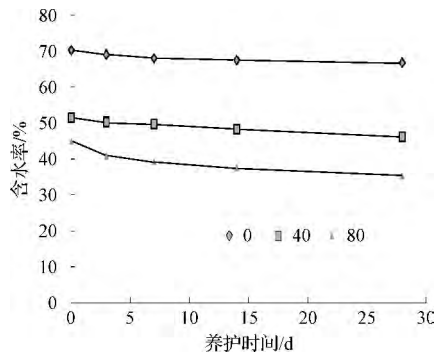


图 4 不同底渣添加量固化后含水率随时间变化曲线

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

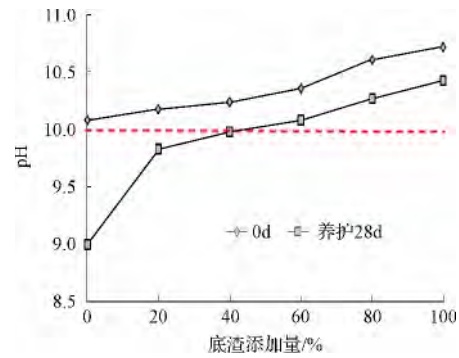


图 6 不同底渣添加量固化 0 d 和 28 d 后的 pH 值

Fig. 6 pH value of solidified sludge with different contents of bottom ash after curing 0 and 28

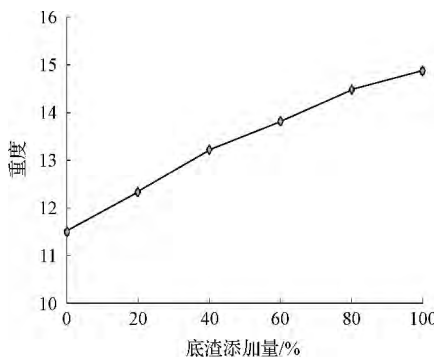


图 5 不同底渣添加量固化后的重度

Fig. 5 Density of solidified sludge with different contents of bottom ash

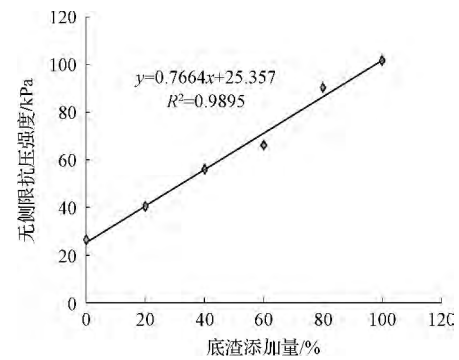


图 7 不同底渣添加量固化后的无侧限抗压强度

Fig. 7 Unconfined compressive strength of solidified sludge with different contents of bottom ash

及 CJ/T291-2008) 要求污泥经处置后 pH 范围: 5 ~ 10。

如图 6 所示,仅添加固化剂的固化污泥,pH 值在规范要求范围内,继续添加垃圾焚烧底渣后的固化污泥,pH 值都较仅添加固化剂的固化污泥升高,且底渣添加量越多,pH 值越大,这与垃圾焚烧底渣本身呈碱性,pH 值很高(底渣 pH 值在 11 ~ 12 之间)有关。28 d 后,60% 以内底渣添加量固化体的 pH 值在 9 ~ 10 之间,达到 pH 值为 5 ~ 10 的规范要求,但 60% 以上底渣添加量的固化体 pH 值则超出规范要求。

2.4 无侧限抗压强度变化规律

如图 7 所示,无侧限抗压强度随底渣含量的增多线性增大。当垃圾焚烧底渣添加量为 40% 时,无侧限抗压强度大于 50 kPa,满足填埋要求。图 8 所示,固化体无侧限抗压强度随龄期增大,强度主要在早期形成,后期增长缓慢,添加底渣固化体 3 d 强度达到 28 d 强度 85% ~ 90%。

结合 2.1 节发现,固化体抗压强度与固化体有机质含量及含水率呈负相关。随着底渣添加量的增多,对污泥稀释作用加强同时结合吸收的水分增多,使得固化体有机质含量和含水率降低,进而导致固化体颗粒间水膜变薄、颗粒间基质吸力增大,从而导致固化体强度随之逐渐增大。垃圾焚烧底渣添加量一定的情况下,有机质含量和含水率随龄期增长略微降低(如图 2 和 4),强度随龄期增长略微增大(如图 8),主要是试样在完全密封情况下养护,污泥固化体中过多的水分继续停留在试样内部,固化体颗粒间水膜随时间增长并未继续变薄,颗粒基质间吸力无法随时间增长,同时过多的水使 Ca(OH)₂ 处于非饱和状态,主要水化产物钙矾石发展缓慢^[17],从而导致 3 d 后强度随龄期增长缓慢。

2.5 底渣添加量对固化污泥增容比的影响

污泥的增容比计算^[5]:

$$\lambda = \frac{V_{\text{固化}}}{V_{\text{污泥}}} = \frac{m_{\text{污泥}} + m_{\text{固化剂}} + m_{\text{底渣}}}{m_{\text{污泥}}} \times \frac{\rho_{\text{污泥}}}{\rho_{\text{固化}}} \quad (1)$$

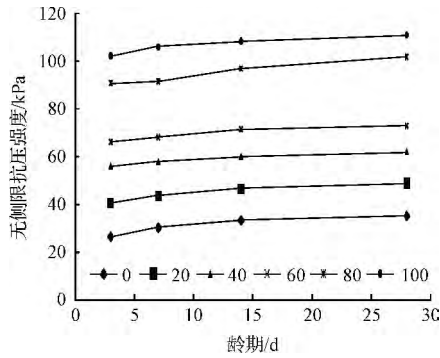


图 8 无侧限抗压强度随龄期变化曲线

Fig. 8 Curves of unconfined compressive strength and curing time

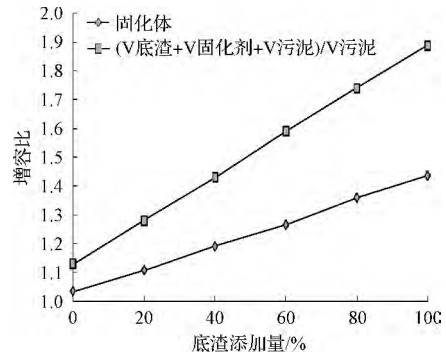


图 9 不同底渣添加量固化后的增容比

Fig. 9 Expansion ratio of solidified sludge with different contents of bottom ash

式中: V 表示体积 m 表示质量 ρ 表示密度。

从图 9 中可以看出, 固化体的增容比与垃圾焚烧底渣呈线性关系, 当底渣添加量为 100% 时, 增容比为 1.44, 相对于利用淤泥协同处理污泥的增容比^[5] (1.8) 要小 20%。

参照增容比公式计算固化前所用材料体积之和与污泥体积的比值得到的曲线如图 9。其中污泥密度为 $1.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、垃圾焚烧底渣密度为 $1.33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、固化剂密度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。从图中可以看出, 垃圾焚烧底渣协同固化污泥固化体体积小于垃圾焚烧底渣、固化剂和污泥体积之和, 且底渣添加量越多, 固化之后的体积较固化之前各组分体积之和差值越大。因此, 垃圾焚烧底渣协同污泥固化填埋可起到减容效果。

污泥颗粒细小, 结构疏松, 垃圾焚烧底渣堆积体同样结构松散, 孔隙率很大, 且经过高温焚烧后的垃圾焚烧底渣颗粒自身多孔, 底渣添加量越多, 孔隙越大, 两者混合后, 充填到底渣颗粒孔隙间的污泥越多, 从而起到减容作用。

2.6 渗透系数变化规律

如图 10 所示, 渗透系数随垃圾焚烧底渣含量的增加而增大, 呈线性关系。但底渣添加量 < 80% 时, 固化体渗透系数仍在 $10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 满足填埋场的防渗要求。

随着底渣含量的增加, 底渣颗粒自身形成空间骨架结构, 增大了固化体的空隙率, 形成脱水通道, 导致渗透系数增大。结合不同底渣含量固化体的无侧限抗压强度曲线可以发现, 底渣固化体强度和渗透系数均随底渣添加量的增大而增大, 说明当底渣含量达到一定量的时候可以起到骨架的作用, 同时也说明随着底渣添加量的增多, 底渣颗粒的骨架结

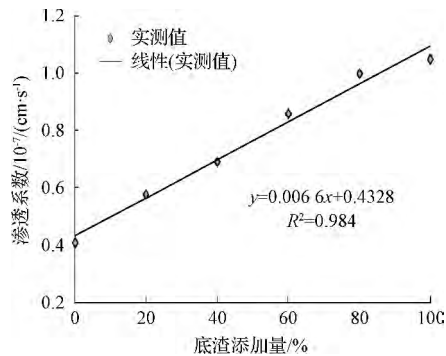


图 10 不同底渣添加量固化体渗透系数

Fig. 10 Coefficient permeability of solidified sludge with different contents of bottom ash

构功能逐渐增强。

3 结 论

不同含量垃圾焚烧底渣协同固化污泥后, 固化体有机质含量及含水率均随垃圾焚烧底渣含量的增多而降低, 比重、无侧限抗压强度、pH 值、增容比及渗透系数受底渣添加量影响, 均随底渣含量增加而增大。垃圾焚烧底渣协同固化污泥可以起到积极效果, 其骨料特性有助于固化体骨架结构形成, 从而有助于提升固化体强度, 同时能提供渗流通道, 利于渗滤液的排出。当垃圾焚烧底渣添加量为 40% ~ 60% 时, 满足填埋要求。

垃圾焚烧底渣协同固化污泥进行填埋具有可行性, 实际工程操作时要根据污泥泥性、固化剂类型及添加量、底渣特性共同决定添加量; 同时垃圾焚烧底渣协同固化污泥的长期稳定性及其环境适应性都有待进一步研究。

参考文献

- [1] 占鑫杰,詹良通,林伟岸,等. 污泥二次脱水减量化及固化处理途径探讨//第一届全国岩土多场相互作用及环境土工学术研讨会论文集. 杭州: 中国土木工程学会土力学, 2012: 173-180
ZHAN Xinjie, ZHAN Liangtong, LIN Wei'an, et al. Investigation of treatment method of sludge dewatering and its reduction, solidification//Proceeding of the 1st China National Symposium on Coupled Phenomena in Geomaterials and Environmental Geotechnics. Hangzhou: China Civil Engineering Society of Soil Mechanics, 2012: 173-180(in Chinese)
- [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实验研究. 给水排水, 2007, 33(10): 50-53
MA Jianli, ZHAO Youcai, ZHANG Hua, et al. Research on methods of sludge disposal by landfill for urban wastewater treatment plants. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(10): 50-53(in Chinese)
- [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. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2367-2370
CUI Guangqiang, CHANG Fangqiang. Test of geotechnical engineering parameters of sewage sludge solidified by municipal solid waste incineration bottom ash. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(6): 2367-2370(in Chinese)
- [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. 岩土力学, 2006, 27(5): 740-744
CAO Yonghua, YAN Shuwang, ZHAO Lejun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 740-744(in Chinese)
- [5] 李磊. 污泥固化处理技术及重金属污染控制研究. 南京: 河海大学博士学位论文, 2006
LI Lei. Study on sludge solidification technology and heavy metal pollution control. Nanjing: Doctor Dissertation of Hohai University, 2006(in Chinese)
- [6] 王宇峰. 城镇污水处理厂污水污泥固化处理实验研究. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2009
WANG Yufeng. Solidification treatment experimental study on the sewage sludge of urban sewage treatment plant. Xian: Master Dissertation of Chang'an University, 2009(in Chinese)
- [7] 王伟,袁光钰. 我国的固体废弃物处理处置现状与发展. 环境科学, 1997, 18(2): 87-90
WANG Wei, YUAN Guangyu. The status and development of solid waste treatment and disposal in China. Environmental Science, 1997, 18(2): 87-90(in Chinese)
- [8] KIM E. H., CHO J. K., YIM S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. 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. Waste Management, 1996, 16(4): 295-303
- [10] LIM S., JEONB W., LEE J., et al. Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess. Water Research, 2002, 36(17): 4177-4184
- [11] 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. 岩土力学, 2013, 34(3): 751-756
LI Jiangshan, XUE Qiang, HU Zhuyun, et al. Study of strength stability of municipal solid waste incinerator fly ash solidified by cement. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 751-756(in Chinese)
- [12] 章骅,何品晶. 城市生活垃圾焚烧灰渣的资源化利用. 环境卫生工程, 2002, 10(1): 6-10
ZHANG hua, HE Pinjing. Beneficial utilization of municipal waste combustion ash. Environmental Sanitation Engineering, 2002, 10(1): 6-10(in Chinese)
- [13] 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. 环境工程, 2004, 22(1): 47-50
SHI Aijuan, HE Pinjing, SHAO Liming, et al. Engineering characteristics of cinder from municipal domestic refuse incinerator. Environmental Engineering, 2004, 22(1): 47-50(in Chinese)
- [14] CHIMENOS J. M., SEGARRA M., FERNÁNDEZ M. A. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. Journal of Hazardous Materials, 1999, 64(3): 211-222
- [15] 李晓勇,朱建斌,胡雨燕. 焚烧灰渣物理化学性质的研究进展. 上海应用技术学院学报, 2008, 8(2): 116-120
LI Xiaoyong, ZHU Jianbin, HU Yuyan. A research on characteristic of incineration residues. Journal of Shanghai Institute of Technology, 2008, 8(2): 116-120(in Chinese)
- [16] 章骅,何品晶. 城市生活垃圾焚烧灰渣及其性质分析. 上海环境科学, 2002, 21(6): 356-360
ZHANG Hua, HE Pinjing. Municipal solid waste incineration ashes and their properties. Shanghai Environmental Sciences, 2002, 21(6): 356-360(in Chinese)
- [17] DENG Min, TANG Mingshu. Formation and expansion of ettringite crystals. Cement and Concrete Research, 1994, 24(1): 119-126