

不同粒径垃圾焚烧底渣对固化市政污泥工程特性的影响

胡学涛^{1,2} 梁冰¹ 陈亿军^{2*} 易富³

- (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. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 阜新 123000)

摘要 在有膜标准养护和自然养护 7 d 和 28 d 的情况下, 测定了固化体的含水率、有机质含量、抗剪强度、无侧限抗压强度及增容比等工程指标。研究表明, 固化体含水率随垃圾焚烧底渣颗粒增大而增大; 有机质含量则与颗粒大小没有明显相关性; 粘聚力随垃圾焚烧底渣颗粒粒径增大而减小; 内摩擦角随垃圾焚烧底渣颗粒粒径增大而增大; 无侧限抗压强度随垃圾焚烧底渣粒径增大而增大; 实验配比为 100:20:20 情况下的增容比均小于 1.08。底渣中 2 mm 以上大颗粒对固化起到了更加积极的作用。垃圾焚烧底渣作为骨料, 增强工程特性、减小固化剂用量、降低成本。研究成果拓展了污泥处理处置途径。

关键词 市政污泥 垃圾焚烧底渣 固化 不同粒径 工程特性

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)11-5567-06

Influence of municipal solid waste incineration bottom ash with different grain sizes on engineering characteristics of sewage sludge solidification

Hu Xuetao^{1,2} Liang Bing¹ Chen Yijun² Yi Fu³

- (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 Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract Engineering index, such as water and organic content, shearing strength, unconfined compressive strength and expansion ratio of the solidified body were tested. Research results show that the water content of the solidified body increases with the grain size of the municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash; the organic content has little correlation with the grain size; cohesion decreases with the grain size; internal friction angle and the unconfined compressive strength both grow with the grain size; the expansion ratio is less than 1.08 in the experiment when the ratio is 100:20:20. The grain size larger than 2 mm of MSWI bottom ash is more positive to the strength. As the construction aggregate, the MSWI bottom ash enhances the engineering characteristic of the solidified sludge, it can minish the dosage of curing agent and reduce the cost. The research expands the way to dispose sludge.

Key words sewage sludge; waste incineration bottom ash; solidification; different grain sizes; engineering characteristics

随着城市污水处理率和处理量的不断提高, 市政污泥的处理处置问题日益严重。污泥卫生填埋由于投资少、容量大、处理快等优点^[1], 目前仍是我国污泥处理最为常用的方法^[2]。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^[3]。

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^[4]。目前常用的固化技术可分为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279199); 中国科学院
科交叉与合作创新团队项目; 中国科学院院地合作项目

收稿日期: 2014-07-24; 修订日期: 2014-08-15

作者简介: 胡学涛(1986—)男, 博士研究生, 主要从事污泥/淤泥固化填埋方面研究工作。E-mail: huxuetao2011@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenijun2131@163.com

水泥固化、石灰固化、熔融固化、沥青固化以及玻璃固化等^[5-7]。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^[8-9]。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。

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^[10],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%^[11],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^[12]。考虑用垃圾焚烧底渣固化污泥,崔广强等^[2]已经有过研究,但是有关底渣颗粒大小对固化效果影响却未见研究。因此,本文将通过实验研究垃圾焚烧底渣颗粒粒径的大小对固化污泥工程特性效果的影响,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。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验中所用的固化剂为自主配置的A型固化剂,主要成分为硅酸二钙、氧化钙等,经过大量室内试验,确定该固化剂对污泥固化有较好效果。

焚烧炉主要有炉排型、流化床型和回转窑型3种^[13],实验中用到的垃圾焚烧底渣,为广州某垃圾焚烧厂的炉排型底渣。含水率为17%左右,烧失量为1.35%。垃圾焚烧底渣主要由熔渣、陶瓷砖石块、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。对广州某垃圾焚烧厂垃圾底渣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%。通过前人^[14-16]研究报道,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分分析结果,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,0.075 mm以下颗粒含量仅为1.61%,所以在考察不同粒径颗粒的垃圾焚烧底渣在固化污泥过程中对污泥固化效果的影响时,结合土工实验方法标准(GB/T 50123-1999)中分析筛孔径的大小,将垃圾焚烧底渣分成了10~5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm和0.25~0.075 mm等6个粒组进行实验(同时以相同比例固化剂不加底渣固化作为对比)。垃圾焚烧底渣中,SiO₂含量为42.77%,CaCO₃含量为13.84%,CaSO₄含量为38.48%,K(AlSi₃O₈)含量为4.91%。

实验中所用的污泥来自于湖北省武汉市某污水处理厂,是经过脱水处理后的污泥,其含水率为82.5%,有机质含量为39%,pH为7.46~8.03,密度为1.04 g/cm³,其中重金属含量如表1,其中限值标准依据是城镇污水处理厂污泥泥质规范(CJ247-2007)。

1.2 实验方法与步骤

为更好地比较不同粒径垃圾焚烧底渣对固化市政污泥特性的影响,在实验前开展了一个准备实验,通过添加不同比例的垃圾焚烧底渣(过10 mm筛)考察底渣含量对固化污泥强度的影响,结果如图1所示。

由图1可知,添加底渣后的固化污泥强度随垃圾焚烧底渣含量呈线性增长的关系。当底渣含量低于20%时,固化体强度无法满足填埋要求,但当底渣含量超过40%后,固化体的强度就达到填埋要

表1 实验材料重金属含量

Table 1 Heavy metal contents in test material

(mg/kg)

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	1 880	435	953	19.1	5	0	0
限值	<1 000	<4 000	<1 500	<1 000	<20	<75	<200	<25

求。故将污泥、固化剂以及垃圾焚烧底渣各粒径颗粒按污泥: 固化剂: 垃圾焚烧底渣质量比为 100: 20: 20 进行固化, 然后测试养护 7 d 和 28 d 的固化体的含水率、有机质、抗剪强度、无侧限抗压强度和增容比。

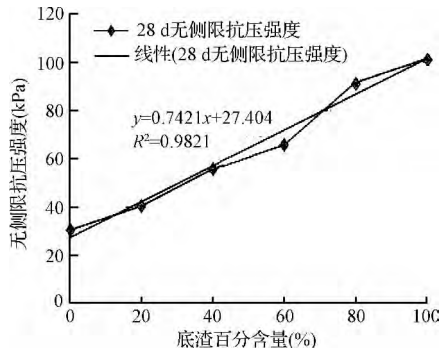


图 1 不同含量底渣固化后无侧限抗压强度

Fig. 1 Unconfined compressive strength after solidification of MSWI bottom ash with different contents

试样制备步骤为: 首先将按比例称量好的污泥和底渣搅拌均匀, 然后再倒入固化剂, 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, 然后将试样倒入试样模具中。试样为 70.7 × 70.7 × 70.7 cm³ 的立方块, 将不同粒径组的试样均分为 2 组, 其中一组用保鲜膜封闭, 并置于温度 (20 ± 2) °C 相对湿度 95% 养护箱中进行标准养护, 保证固化体不会出现水分蒸发, 与实际污泥固化情况相接近; 另一组直接置于空气中养护作为对照。

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), 含水率用鼓风烘箱烘干法, 有机质用马弗炉灼烧的方法; 抗剪强度采用四联应变式直剪仪; 无侧限抗压强度采用无侧限抗压试验机; 增容比通过测量养护前后体积计算得到。

2 实验结果与分析

2.1 含水率和有机质

固化 7 d 和 28 d 后固化体的含水率见图 1, 有机质如图 2 所示。从图 2 和图 3 中可以看出, 有膜养护 7 d 和 28 d 后, 不同粒径组垃圾焚烧底渣颗粒固化污泥的含水率和有机质均未添加底渣颗粒的固化污泥低, 且不同粒径组垃圾焚烧底渣颗粒固化污泥的含水率随着底渣颗粒粒径的增大而增大, 但有机质含量基本上相同; 无膜养护 7 d 和 28 d 后, 不同粒径组垃圾焚烧底渣颗粒固化污泥的含水率和有

机质基本相同。

有膜养护时, 固化体含水率的降低主要是固化剂水化反应消耗部分水, 其次是垃圾焚烧底渣的添加中和了部分水 (实验用的不同垃圾底渣颗粒是经过烘干后再筛分得到的)。固化体含水率随底渣颗粒粒径的增大而增大, 可能是因为垃圾底渣中的活性成分随底渣粒径减小而增大的缘故。这种养护方式更接近实际情况。无膜养护时, 含水率的降低主要是水分蒸发引起的, 故各粒径下的固化体含水率基本相同。

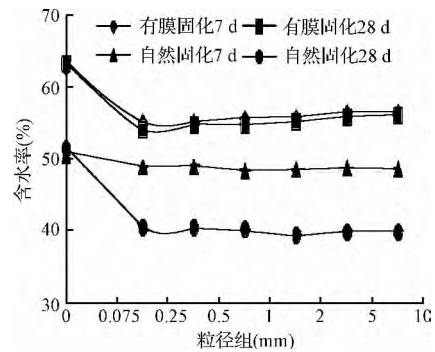


图 2 不同粒径垃圾焚烧底渣固化后含水率

Fig. 2 Water contents after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

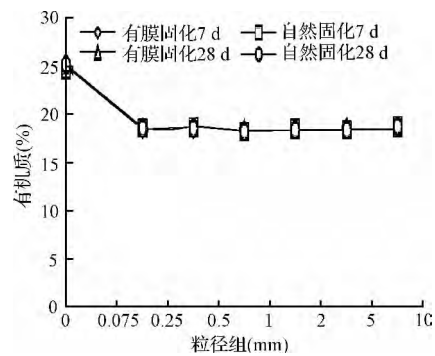


图 3 不同粒径垃圾焚烧底渣固化后有机质含量

Fig. 3 Organic contents after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

添加底渣固化体有机质含量基本不变, 说明固化剂和底渣颗粒对有机质均无影响。虽然底渣颗粒大小不同, 但是底渣添加量未变, 均为 20%, 对有机质的稀释作用相同, 故有机质含量不随底渣颗粒大小改变而改变。

2.2 抗剪强度

抗剪强度是研究土体工程特性的重要指标, 当抗剪强度不足时, 填埋体会沿某个滑动面滑动, 引起

失稳。有膜养护不同粒径颗粒垃圾焚烧底渣固化体的抗剪强度指标见图4和图5。从图中可以看出,不论是固化7d还是固化28d,固化体的粘聚力 c 都随颗粒粒径的增大而逐渐减小,内摩擦角 φ 则随颗粒粒径的增大而逐渐增大;而只添加固化剂固化体的 c 介于添加不同粒组底渣颗粒固化体 c 之间, φ 值则小于添加底渣颗粒的固化体。主要原因是,小颗粒底渣中含有一定的活性氧化物,与污泥中的水分结合,同时比表面更大,表面能越大,容易与水化胶凝产物及污泥形成整体,彼此的吸引力更大,粘聚力也就更大。相对于未添加垃圾底渣的固化体,大颗粒底渣没有活性且具有的表面能小,对由固化剂水化生成的水化产物存在稀释作用,故未添加底渣的固化体粘聚力小于添加小颗粒的固化体而大于添加大颗粒的固化体的粘聚力。而颗粒较小,彼此之间接触面积小,摩擦角就小;污泥自身的无机固体颗粒很少,只添加固化剂的情况下, φ 自然小于添加了底渣的固化体。

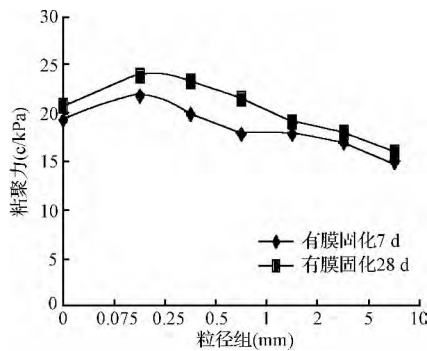


图4 不同粒径垃圾焚烧底渣固化后的粘聚力
Fig. 4 Cohesion after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

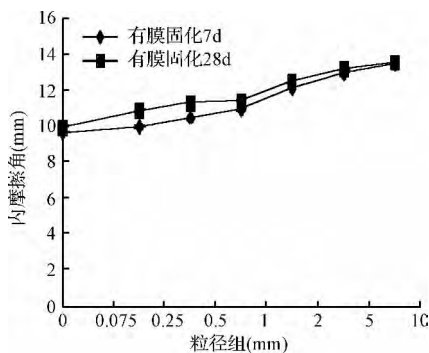


图5 不同粒径垃圾焚烧底渣固化后的内摩擦角
Fig. 5 Internal friction angle after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

2.3 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是污泥固化的重要指标之一,实验中做了自然养护试样作为对比。不同粒径颗粒垃圾焚烧底渣固化污泥分别在有膜标准养护和无膜自然养护7d和28d后的强度如图6所示。从图中可以看出,无论是有膜还是无膜养护,固化污泥的无侧限抗压强度都随着垃圾焚烧底渣颗粒粒径的增大而增大,且都比没有添加垃圾焚烧底渣的固化污泥强度要高;有膜标准养护后,添加粒组为2~5及5~10mm颗粒后,固化污泥的7d强度就已达到50kPa的填埋要求。随着龄期的增长,固化污泥强度的增大,相邻粒组间强度差也在增大,粒径越大的固化体强度增长越快。这一规律在无膜自然养护情况下是一样的。但其强度的增大主要是水分大量蒸发,使得固化体颗粒分子间的距离减小,分子间作用力增强造成的。

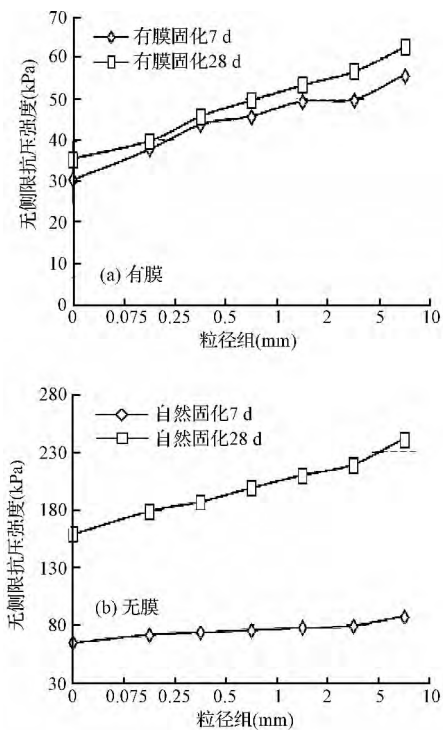


图6 不同粒径颗粒垃圾焚烧底渣固化后的无侧限抗压强度
Fig. 6 Unconfined compressive strength after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

由此可推断出垃圾焚烧底渣颗粒尺寸影响下的固化机理为:添加底渣的污泥固化体是一种非均匀、不连续体,其内部结构的不均匀性在很大程度上决定了其整体的力学特性。固化体中污泥的强度太小时,垃圾焚烧颗粒无法起到骨架作用,强度受污泥强

度控制。随着固化体中污泥强度的提高,污泥与垃圾焚烧底渣颗粒结合更加紧密,垃圾焚烧颗粒在固化体中骨架作用逐渐体现出来,而且颗粒越大,越容易形成稳固的空间骨架结构,对强度贡献越大。

2.4 增容比

通过添加垃圾焚烧底渣构建骨架的方法固化污泥,在满足填埋强度要求的同时,固化前后污泥体积的变化也是需要考虑的因素。固化处理后,如果体积增加太大,必然减少填埋污泥的量而影响库容,进而影响到处理费用,同时还会对边坡稳定性产生影响。通过下式计算污泥的增容比^[4]:

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

式中: V 表示体积, m 表示质量, ρ 表示密度。

从图 7 中可以看出,增容比随着垃圾焚烧底渣粒径组粒径的增大而增大,在实验配比下,各粒径组固化体的增容比均小于 1.08,不会对库容产生太大的影响。

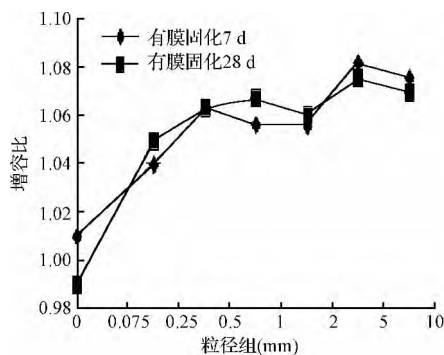


图 7 不同粒径颗粒垃圾焚烧底渣固化后的增容比

Fig. 7 Expansion ratio after solidification of MSWI bottom ash with different sizes

3 结 论

相对于未添加底渣的固化体,添加底渣的固化体对污泥含水率和有机质的影响,主要是物理稀释的作用。颗粒粒径对于固化体粘聚力的影响受底渣中的活性成分影响,但由于底渣颗粒中活性成分含量少,还无法对强度起到决定性作用,故粘聚力随粒径的变化趋势与无侧限抗压强度随粒径变化的趋势不同。但固化体内摩擦角随粒径的变化趋势与无侧限抗压强度随粒径变化的趋势相同,可见颗粒的粒径大小在固化体中起到了作用,大颗粒对于固化体强度的积极作用要优于小颗粒。

本文主要结论如下:

(1) 固化体含水率随垃圾焚烧底渣颗粒增大而增大,有机质含量则与颗粒大小没有明显相关性,粘聚力随垃圾焚烧底渣颗粒粒径增大而减小,内摩擦角随垃圾焚烧底渣颗粒粒径增大而增大,无侧限抗压强度随垃圾焚烧底渣粒径增大而增大,实验配比下增容比均小于 1.08。

(2) 垃圾焚烧底渣颗粒在固化污泥中的骨架作用随着污泥强度的提高而提高,且大颗粒更易形成稳固的空间骨架结构,对固化污泥强度的贡献值更大。用 2 mm 以上颗粒垃圾焚烧底渣结合固化剂 A 进行固化,7 d 就可达到规范要求。

(3) 研究可以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,同时对利用其他外掺剂进行固化污泥时颗粒大小的选择具有一定的借鉴意义。

(4) 本实验只研究了单一配比的情况,对于不同地区的不同污泥以及不同骨架材料的规律,还需更多的实验研究。

参 考 文 献

- [1] 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. 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)
- [2] 崔广强,常方强. 垃圾焚烧底渣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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 王宇峰. 城镇污水处理厂污水污泥固化处理试验研究. 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. Xi'an: Master Dissertation of Chang'an University, **2009** (in Chinese)
- [6] 王伟, 袁光任. 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 Guangren. The status and development of solid waste treatment and disposal in China. Environmental Science, **1997**, 18(2): 87-90 (in Chinese)
- [7] Kim E. H., Cho J. K., Yim S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. Chemosphere, **2005**, 59(3): 387-395
- [8] 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
- [9] Lim S., Jeonb W., Leec 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
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 张建铭. 垃圾焚烧灰渣特性及其在路基工程中的应用研究. 杭州: 浙江工业大学硕士学位论文, **2010**
Zhang Jianming. Characteristics and application research in roadbed engineering of municipal solid wastes incineration residues. Hangzhou: Master Dissertation of College of Civil Engineering and Architecture, **2010** (in Chinese)
- [14] Chimenos J. M., Segarra M., Fernández M. A., et al. 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)