

# MBT 垃圾基本土工特性室内试验研究

张振营, 张宇翔, 郭文强, 吴大志, 徐 辉, 王樱峰

(浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 由于 MBT(mechanical-biological treatment)垃圾具有减量化的优点, 可以有效减少垃圾的填埋量, 因此, MBT 垃圾的研究已成为国内外环境岩土工程领域研究的热点课题之一。为了全面地掌握 MBT 垃圾的基本土工特性, 采集杭州天子岭垃圾填埋场的 MBT 垃圾, 并对其进行成分分析、筛分试验、含水率试验、相对密度试验、天然密度试验、压缩试验、直接剪切试验及渗透试验等。结果表明: (1) MBT 垃圾的成分以塑料、玻璃和灰土为主, 湿质量约占总质量的 57%; (2) MBT 垃圾的不均匀系数为 21.4, 曲率系数为 1.93; (3) MBT 垃圾的孔隙比与压力的对数呈直线关系, 压缩指数为 0.726, 属于高压缩性材料; (4) MBT 垃圾的剪切强度符合库仑定律, 得到其抗剪强度参数, 黏聚力为 10.8 kPa, 内摩擦角为 44.5°; (5) MBT 垃圾的渗透系数随竖向压力的增加而减小, 渗透系数的对数与压力的关系可拟合为线性关系, 建立了线性关系表达式; (6) MBT 垃圾渗透系数的量级范围在  $10^{-2} \sim 10^{-6}$  cm/s。研究结论可为 MBT 垃圾填埋场的库容预测、稳定性分析及渗流导排系统设计提供参考。

**关键词:** 土力学; MBT 垃圾; 不均匀系数; 压缩指数; 抗剪强度; 渗透系数

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)09 - 2170 - 10

## Laboratory study on the geotechnical properties of MBT waste

ZHANG Zhenying, ZHANG Yuxiang, GUO Wenqiang, WU Dazhi, XU Hui, WANG Yingfeng

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou, Zhejiang 300018, China)

**Abstract:** Mechanical-biological treatment(MBT) has the advantage of significantly reducing the amount of municipal solid waste. Therefore, MBT waste has become a hot global research topic in geo-environmental engineering. In order to understand the basic geotechnical characteristics of waste more comprehensively, MBT waste samples were collected from Tianziling landfill in Hangzhou, and tests were conducted, including a composition analysis, sieve analysis, water content test, specific gravity test, natural density test, compression test, direct shear test, and permeability test. The main components of the MBT waste from this site were plastic, glass, and dust soils, which accounted for 57% of the total wet mass. The uniformity coefficient of the MBT waste was 21.4, and the curvature coefficient was 1.93. The relationship between the void ratio and the logarithmic pressure was fitted linearly, and the compression index was calculated to be 0.726, indicating the high compressibility of the MBT waste. The shear strength of the MBT waste conformed to Coulomb's law. The cohesion was 10.8 kPa, and the internal friction angle was 44.5°. The permeability coefficient decreased with increasing vertical pressure. The relationship between the logarithmic permeability coefficient and vertical

**收稿日期:** 2018 - 01 - 25; **修回日期:** 2018 - 05 - 24

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51478436, 51678532, 51708508)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51478436, 51678532 and 51708508)

**作者简介:** 张振营(1963 - ), 男, 1984 年毕业于西安建筑科技大学工民建专业, 现任教授, 主要从事环境岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhangzhenyinga@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0101

pressure was fitted linearly. The permeability coefficients of the MBT wastes were in the range of  $10^{-2} - 10^{-6}$  cm/s. These conclusions can provide reference for prediction of reservoir capacity, stability analysis and design of seepage drainage system in an MBT landfill.

**Key words:** soil mechanics; MBT waste; uniformity coefficient; compression index; shear strength; permeability coefficient

## 1 引言

随着人口的逐渐增加和经济的快速发展,城市生活垃圾的产量以一定的速度逐步上升。我国 2001~2015 年城市生活垃圾的清运量<sup>[1-2]</sup>如图 1 所示,图 1 表明,“十五”期间我国城市生活垃圾的年均增长率为 3.7%，“十一五”期间降低为 0.3%，而“十二五”期间跃至 3.9%，增长速率总体呈扩大趋势。预测数据表明<sup>[3]</sup>,到 2030 年,我国城市生活垃圾的产量将达到 4.09 亿 t,大量生活垃圾的处理与处置已成为困扰政府和社会的一大难题,城市生活垃圾的减量化措施势在必行。

机械生物处理技术(mechanical-biological treatment 简称 MBT),是对城市新鲜生活垃圾进行机械生物处理的技术。MBT 垃圾处理技术在城市生活垃圾的减量化、资源化、无害化方面具有显著的效果,不仅可以有效降低填埋量,还可产出固体回收燃料,目前已成为欧洲部分国家处理生活垃圾的主要手

段<sup>[4]</sup>。该技术的核心步骤是通过机械(如滚筒筛、振动筛)结合人工筛选分离出不易降解、大体积、以及可回收的物质,再在一定的环境条件下,通过如厌氧消化、淋滤水解等生物技术,对筛选后垃圾中的有机质进行人工加速降解,最后通过生物干化及机械破碎得到最终的产物,即 MBT 垃圾<sup>[5-7]</sup>。由于产生的渗滤液包含了一定浓度的金属,且产生的气体带有刺鼻性气味,故整个处理流程中还包含了臭气和渗滤液的收集、净化以及利用等过程<sup>[8]</sup>。MBT 垃圾相比于新鲜城市生活垃圾,经过上述一系列处理后,其颗粒大小、成分比例、含水率、密度、压缩性、抗剪强度及渗透特性等均发生了一定程度的改变<sup>[9-10]</sup>,因此,对 MBT 垃圾的基本土工特性开展研究十分必要。

虽然对 MBT 垃圾土工特性的研究一直在深入,但现有研究数据仍十分有限,特别是我国。国外学者 A. A. Siddiqui 等<sup>[11-14]</sup>对 MBT 垃圾的沉降、渗滤液和沼气排放等进行了长期观测,得出对垃圾进行 MBT 处理能降低气体排放量和渗滤液产量的结论:

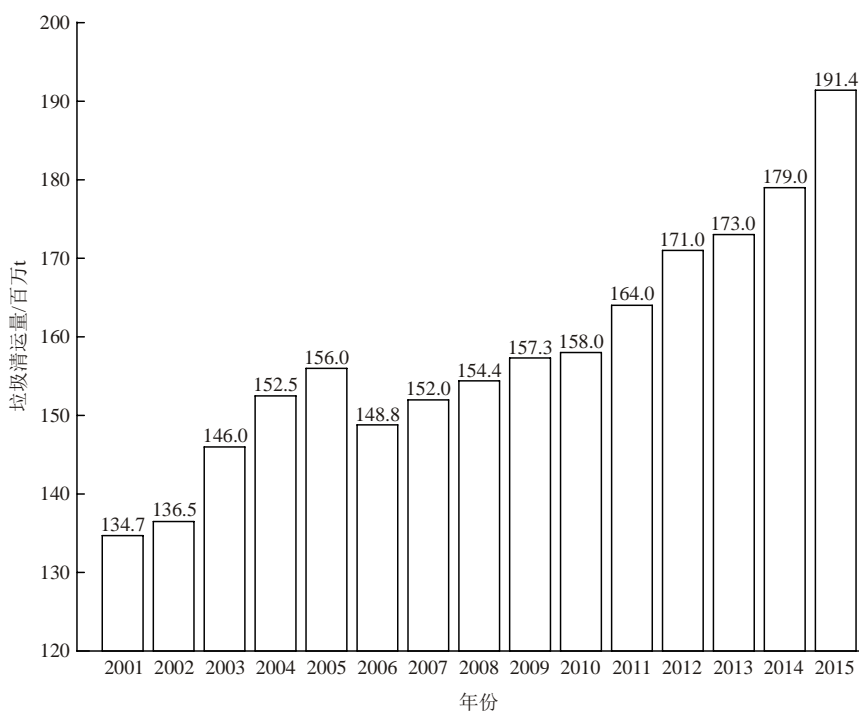


图 1 我国 2001~2015 年城市生活垃圾清运量

Fig.1 The weight of MSW generation in China(in 2001 - 2015)

S. Fucale 等<sup>[15-16]</sup>分别对未经处理的生活垃圾和 MBT 垃圾进行剪切试验,通过对比研究,得出了加强型组分(如塑料、纺织、纤维等)对堆体强度有较大影响的结论; V. I. Fernando 和 C. K. Sudarshana<sup>[17]</sup>通过直剪试验和三轴试验研究了 MBT 垃圾组分、压缩、颗粒维度、颗粒直径、颗粒刚度、正应力等参数对剪切特性的影响; G. L. Sivkumar Babu 等<sup>[18]</sup>通过对印度 Bangalore 地区 MBT 垃圾进行直剪和三轴试验,着重研究了粒径和相对密度与剪切的关系; A. R. Bhandari 和 W. Powrie<sup>[19]</sup>为探究初始密度对应力-应变关系的影响,以及堆体滑移面的产生和发展,对英国 New Earth Solutions 填埋场的 MBT 垃圾进行了多组三轴试验,得出不同粒度和轴向应力下的抗剪强度值。相比于国外 MBT 垃圾已有的大量研究,我国在 MBT 垃圾研究方面仍处于引进和探索阶段。2016年,杭州市环境集团和江苏维尔利公司首次引进德国 MBT 垃圾处理技术,并在杭州天子岭静脉小镇试运行。由于我国人民的生活习惯、饮食偏好以及环保政策的不同,导致新鲜生活垃圾的成分复杂,且密度、含水率、有机物含量等与欧美发达国家有较大差别,因此研究我国 MBT 垃圾的土工特性很有价值,也具有环境保护意义。

本文对 MBT 技术处理后的垃圾进行了成分分析、筛分试验、含水率试验、相对密度试验、天然密度试验、压缩试验、直剪试验、渗透试验等基本物理力学试验,得到了我国 MBT 垃圾的基本土工参数,试验结果可为 MBT 垃圾填埋场的库容设计、稳定性分析及渗流导排系统设计提供参考。

## 2 试验材料、试验仪器及方法

### 2.1 试验材料

试验材料取自杭州天子岭经过 MBT 处理的生活垃圾,其处理工艺见图 2。新鲜生活垃圾进入卸料斗中,由传送带运送进入孔径为 120 mm 的滚筒筛,在滚筒筛的作用下实现垃圾的破袋和筛分。其中,筛上物多为大块纸板、塑料和纺织物,经人工挑选进行回收;对筛下物采用磁吸的方式,挑选出其中质量较大的金属,其余的筛下物进入淋滤反应器,经过机械作用和有机组分的水解、酸化过程,最后挤压脱水,成为均值化、含水率固定的松散物料,即为 MBT 垃圾试验材料。

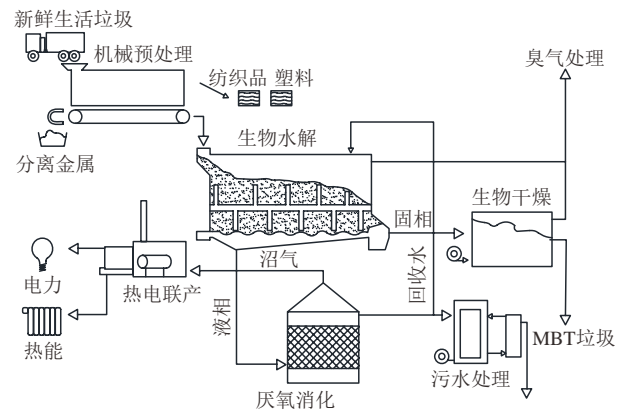


图 2 杭州天子岭 MBT 垃圾生产工艺

Fig.2 The MBT process of waste in Tianziling, Hangzhou

将杭州天子岭经过 MBT 处理的垃圾材料运输到浙江理工大学环境土工材料实验室,试验材料见图 3。虽然 MBT 垃圾中大部分生物有机质被消化殆尽,但其成分仍十分复杂。为了避免过大颗粒尺寸导致的不均匀性对试验产生干扰,每组试验材料均由四分法选取。物理试验的样本材料均为全尺寸 MBT 垃圾,没有经过破碎处理;力学试验(压缩、剪切和渗透试验)的样本材料经过破碎处理,控制颗粒最大粒径小于试验容器直径的 1/10,以减小尺寸效应对力学试验结果的影响。具体的试验操作依据试验规程<sup>[20-21]</sup>进行。



图 3 MBT 垃圾试验材料

Fig.3 MBT waste materials

### 2.2 试验仪器及方法

#### (1) 物理试验

① 成分分析。采用机械振筛与手工分拣相结合的方法,称取 MBT 垃圾土 15 kg,从中分选出各种

不同的成分, 并称各种成分的质量作为湿质量  $m_i$ 。将各成分放入烘箱烘干, 得到各成分的干质量  $m_{si}$ 。为防止 MBT 垃圾中未完全被降解的有机质因温度过高而造成质量损失, 影响干质量测定值的准确性, 烘箱的烘干温度设置为 70 °C, 烘干时间不小于 24 h, 并烘干至恒重。各成分的湿质量百分含量  $Wet(i)$ 、干质量百分含量  $Dry(i)$  及含水率  $\omega_i$  分别如下:

$$Wet(i) = \frac{m_i}{\sum m_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$Dry(i) = \frac{m_{si}}{\sum m_{si}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{m_i - m_{si}}{m_{si}} \times 100\% \quad (3)$$

② 颗粒分析。颗粒分析采用筛分法, 取原尺寸、没有经过破碎处理的代表性 MBT 垃圾 6 kg, 经过 48 h 风干后, 放置于孔径分别为 60, 40, 20, 10, 5, 2, 1 mm, 依次叠好的圆孔筛上, 振筛 15~20 min, 取筛上物称其质量, 计算小于某颗粒粒径的质量与总质量的比值, 绘制颗粒粒径累计曲线。

③ 含水率试验。取代表性 MBT 垃圾 5 kg, 称其湿质量( $m$ ), 然后放入 70 °C 的烘箱内烘干至恒重, 称其干质量( $m_s$ ), 含水率  $\omega$  按下式计算:

$$\omega = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (4)$$

④ 天然密度试验。采用异位密度试验方法, 将 MBT 垃圾放入容量为  $V(120 \text{ L})$ 、质量为  $m_b$  的盛样桶中, 用钢丝锯削去多余的垃圾土并与桶口齐平, 称其总质量  $m_t$ , 天然密度  $\rho$  按下式计算:

$$\rho = \frac{m_t - m_b}{V} \quad (5)$$

⑤ 相对密度试验: 采用比重瓶法测定, 试验仪器见图 4。



图 4 比重瓶与真空干燥器  
Fig.4 Pycnometer and vacuum dryer

为防止 MBT 垃圾土中残留的有机质与填充试剂发生反应, 填充试剂选择煤油。向比重瓶内注入 500 mL 经过抽气的煤油, 称质量为  $m_{bo}$ 。取具有代表性 MBT 垃圾 200 g, 风干并缩分至 50 g( $m_s$ ), 置于另一个 500 mL 比重瓶中, 向比重瓶中加入煤油并浸没试样, 置于真空干燥器中抽气, 使垃圾中的气体排空, 用移液管注入经过抽气的煤油并达到 500 mL 刻度线, 质量为  $m_{bos}$ 。利用下式计算 MBT 垃圾的相对密度:

$$G_s = \frac{G_{OT} m_s}{m_{bo} + m_s - m_{bos}} \quad (6)$$

式中:  $G_{OT}$  为温度  $T$ (单位为 °C) 时煤油的相对密度。

(2) 力学试验

① 压缩试验。压缩试验采用大型高压固废仪, 见图 5。压缩容器为圆柱形, 直径 200 mm、高度 500 mm、横截面积 0.031 4 m<sup>2</sup>。通过杠杆原理传递荷载, 最大竖向荷载为 50 kN, 分辨率为 0.1 kN; 垃圾试样的压缩量由位移传感器获得, 最大位移 300 mm, 分辨率 0.1 mm。将试样装入压缩容器并分层轻微捣实至预设密度(0.388 g/cm<sup>3</sup>), 在试样上依次放上薄型滤纸、透水板。加预压荷载使仪器上、下各部件间有效接触, 调平杠杆并归零传感器。荷载等级分别为 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 kPa, 由位于加压盖板底端的传感器提供并显示, 分辨率为 0.1 kPa, 每级压力持续 24 h。试验过程记录每级压力不同压缩时刻的压缩量, 第 1 h 每 10 min 依次记录试验数据、第 2~6 h 每 30 min 记录试验数据、第 7~24 h 每 1 h 记录试验数据。



图 5 大型高压固废仪  
Fig.5 Large-scale high-pressure solid waste compression apparatus



② 直接剪切试验。直接剪切试验采用的仪器为双向液压伺服位移剪切联合测定仪(见图 6)。其桶径为 200 mm、桶高 280 mm。试验设置竖向压力等级分别为 12.5, 25, 50, 100 和 200 kPa, 试样初始密度  $0.388 \text{ g/cm}^3$ , 压力由计算机自动控制并输出剪应力与剪切位移的关系曲线。



图 6 SYTL - 2000 型双向液压伺服位移剪切联合测定仪  
Fig.6 SYTL - 2000 Bidirectional hydraulic servo displacement and shear combined apparatus

③ 渗透试验。渗透试验采用常水头试验法, 试验仪器为压缩渗透联合测定仪(见图 7)。该仪器由竖向杠杆加压系统和渗透系统组成, 改变加压系统配重大小, 可以使压盖对垃圾试样产生不同等级的竖向压力, 最大压力可达 1 600 kPa。蓄水箱为圆柱形,



图 7 压缩渗透联合测定仪  
Fig.7 Compression and permeability apparatus

固定在可调节板上, 通过改变可调节板的高度来调节水力梯度, 最大高度为 1 200 mm。渗透柱内径为 150 mm、外径为 170 mm、高度为 330 mm。试样的初密度设为  $0.5 \text{ g/cm}^3$ , 分别在 50, 100, 200, 300, 400 和 600 kPa 的竖向压力下进行常水头渗透试验。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 MBT 垃圾成分分析

成分分析的结果见表 1。由表 1 可知, 纸的质量为 0, 其原因是垃圾在机械和生物处理中, 纸被破碎、降解后不具有纸张原本的形态, 其残余物归入未定义混合物中。未定义混合物一项指的是一些无法识别界定其原物质或是无法再细分的组分。从成分含量来看, 在可识别的物质中, 橡胶塑料、玻璃、灰土成分的湿质量依次占据了前三的位置, 其含量超过总湿质量的 57%。从组分的含水率来看, 纺织品和木竹具有较好的保水性, 因此含水率较高; 未定义混合物中的成分复杂, 大部分以纤维和黏连的膏状物体为主, 其含水率也较高。A. A. Siddiqui 等<sup>[11]</sup>分析了英国和德国 MBT 垃圾组分的异同, 来研究 MBT 垃圾的填埋性质。将英、德两国 MBT 垃圾成份含量与我国垃圾成分的含量进行比较, 其结果见图 8。由图 8 可知, 我国 MBT 垃圾的玻璃、灰土和未定义成分较国外垃圾少, 而橡塑、纺织品、木竹则较多, 与国外相应成分比值均超过 2 倍以上。木竹中大多为筷子、冰棍, 这与我国的饮食习惯有关; 橡塑、纺织品材料的主要成分是塑料袋和衣物, 这反映了我国可再生利用材料的回收能力还有待提高, 在源头上的垃圾分类还有待完善。

表 1 MBT 垃圾各成分的质量、百分含量及含水率  
Table 1 The mass, distribution and moisture content of each component of the MBT waste

成分	湿质量/g	湿质量百分含量/%	干质量/g	干质量百分含量/%	含水率/%
纸	0	0	0	0	-
橡胶塑料	4 549.2	30.3	3 889.8	31.5	17.0
纺织品	1 604.4	10.7	1 022.4	8.3	56.9
木竹	957.6	6.4	580.8	4.7	64.9
砖瓦陶瓷	1 064.4	7.1	1 016.4	8.2	4.7
玻璃	2 122.5	14.2	2 112.9	17.1	0.5
金属	337.2	2.2	336.9	2.7	0.1
灰土( $\phi < 5 \text{ mm}$ )	1 916.7	12.8	1 342.2	10.9	42.8
未定义混合物	2 448.0	16.3	2 044.5	16.6	19.7
总计	15 000.0	100.0	12 345.9	100.0	21.5

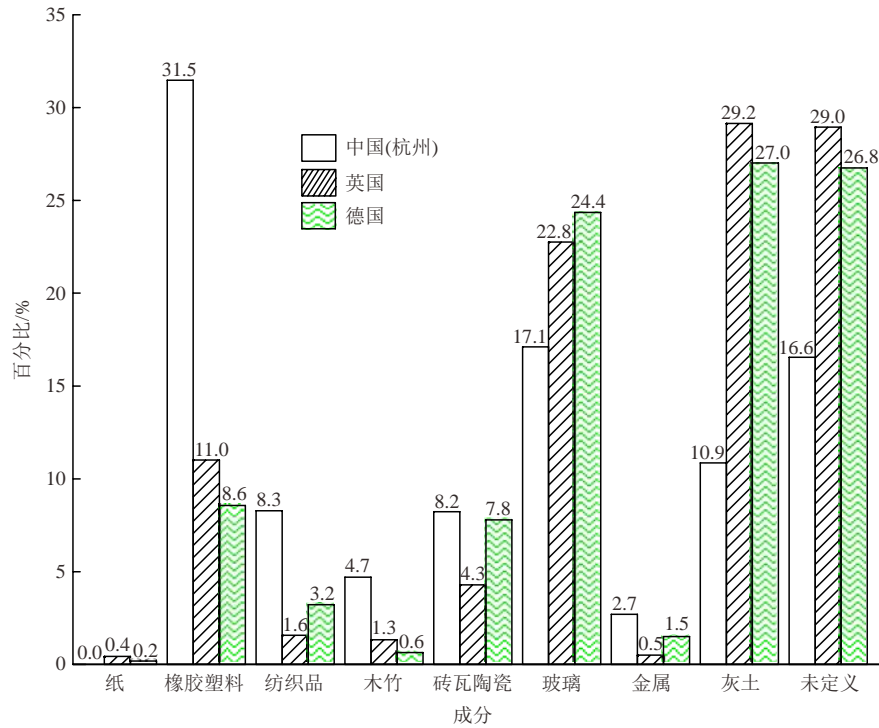


图 8 我国与英、德 MBT 垃圾组分的比较(干质量)

Fig.8 The MBT waste compositions compared with British and German waste in dry mass

### 3.2 颗粒分析

MBT 垃圾的颗粒粒径累计曲线见图 9。由图 9 可知,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  分别为 1.07, 6.87 和 22.89, 由这些数据可得到垃圾的不均匀系数和曲率系数分别为 21.4 和 1.93。M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>对德国 Schaumburg(SHG)等地 MBT 垃圾进行了颗粒筛分试验, 其试验数据与图 9 试验数据的对比见表 2。

由表 2 可知, 我国杭州 MBT 垃圾的颗粒粒径范围与德国 H Lahe, SHG 垃圾颗粒粒径范围不同, 与德国 LG 的范围相同; 杭州 MBT 垃圾的特征粒径均比德国垃圾的特征粒径大, 这说明杭州 MBT 垃圾

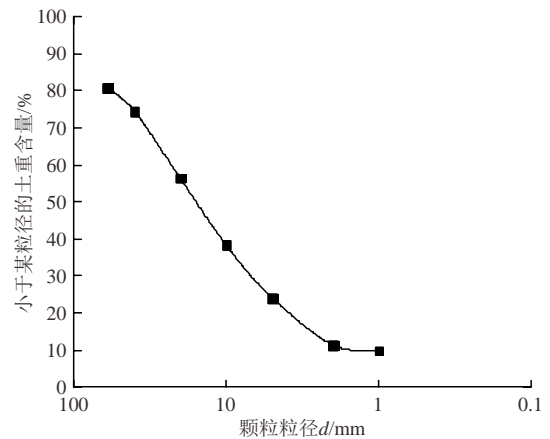


图 9 MBT 垃圾的粒径累计曲线

Fig.9 Grain size distribution curve of the MBT waste

表 2 我国与德国 MBT 垃圾颗粒分析试验数据对比

Table 2 The grain size distribution data compared with German MBT waste

地点	粒径范围/mm	特征粒径/mm					$C_u$
		$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{85}$	
H Lahe	0~30	0.400	0.700	2.70	4.00	10.0	10.0
SHG	0~20	0.030	0.053	0.73	1.50	7.3	50.0
SHG	0~40	0.043	0.082	2.10	5.30	24.0	123.0
SHG	0~60	0.052	0.100	4.10	10.00	35.0	192.0
SHG	0~150	0.061	0.120	7.00	20.00	44.0	328.0
LG	0~100	0.450	0.800	11.00	12.00	31.0	27.0
杭州	0~100	1.070	2.740	15.70	22.89	-	21.6

圾小于 60% 含量垃圾的颗粒粒径均大; 在不均匀系数  $C_u$  值上, 杭州 MBT 垃圾与德国垃圾相差均较大, 这表明我国垃圾的成分与德国垃圾的成分相差较大, 我国 MBT 垃圾中橡胶塑料组分占比高、灰土成分占比低。

### 3.3 含水率试验

经过 4 组平行试验, 得到 MBT 垃圾的平均含水率为 22.66% (见表 3)。由表 3 可知, 垃圾的含水率与表 1 中垃圾的含水率(21.5%)相比基本吻合, 但有一定的偏差, 造成该偏差的主要原因是在成分分析试验过程中, 垃圾试样暴露在空气中以及振筛过程中部分水分散失。

表 3 MBT 垃圾含水率

Table 3 The moisture content of MBT waste

平行试验编号	含水率/%	平均值/%
S-1	22.74	22.66
S-2	22.57	
S-3	22.62	
S-4	22.68	

我国杭州 MBT 垃圾与欧洲国家垃圾的含水率有较大差别。M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>对德国 Schaumburg 全尺寸( $d_{max} < 150$  mm)MBT 垃圾进行了含水率试验, 得到其含水率为 35.5%。对全尺寸( $d_{max} < 150$  mm)MBT 垃圾进行了筛分试验和含水率试验, 得到尺寸范围为 0~20, 0~40, 0~60 和 >60 mm 垃圾的含水率分别为 40.9%, 37.5%, 37.5%, 35.8%。S. Fucale<sup>[15]</sup>对德国经过长期填埋的 MBT 垃圾进行了含水率试验, 其试验的 3 个试样含水率分别为 36.5%, 35.0%, 34.92%。我国 MBT 垃圾的含水率明显偏低, 差值约为 12%, 这是由于我国 MBT 垃圾的塑料含量高、颗粒尺寸较大、持水能力较差, 其次在干化阶段的工艺如翻堆方式、通风方式、堆高等也是导致含水率差异的原因<sup>[7]</sup>。

### 3.4 天然密度试验

在环境土工实验室, 进行了垃圾的天然密度试验, 实验室温度为 36 °C, 测得垃圾的天然密度为 0.227 g/cm<sup>3</sup>, 该数值远低于 M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>测得 SHG 垃圾的干密度(0.6~0.9 g/cm<sup>3</sup>)。导致天然密度远低于 SHG 样本的原因主要有以下两点: 高塑料含量且低含水率导致材料本身密度较低; 大颗粒导致多孔隙结构, 小颗粒含量较少且无法有效填满孔隙, 从而无法形成较为密实的堆体结构。

### 3.5 相对密度试验

相对密度试验采用比重瓶法, 在环境土工实验室测得 MBT 垃圾的相对密度为 1.575。G. L. Sivakumar Babu 等<sup>[18]</sup>利用密度测定瓶和比重瓶测得印度 Bangalore 的 MBT 垃圾的相对密度为 1.26。

### 3.6 压缩试验

采用 6 级压力(12.5, 25, 50, 100, 200, 400 kPa), 每级压力持续 24 h, 对 MBT 垃圾试样(初始密度 0.388 g/cm<sup>3</sup>)进行了大型压缩试验, 压缩应变(每级沉降)与竖向压力(时间)的关系见图 10。

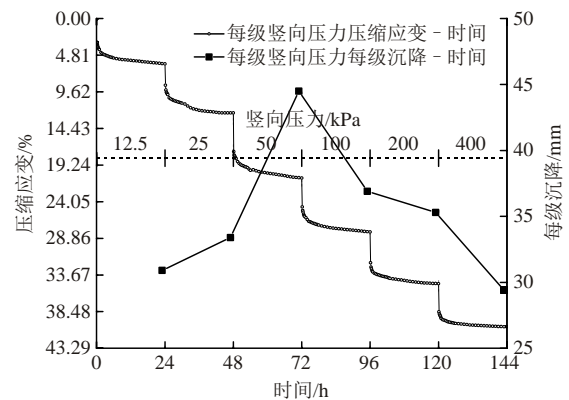


图 10 压缩应变(每级沉降)与竖向压力(时间)的关系  
Fig.10 Relationships between strain(settlement per level) and vertical pressure(time)

由图 10 可知, 压缩应变随着压力和压缩时间的增大而增大。对于每级压力而言, 在加压的瞬间, 压缩应变很大, 随着压缩时间的逐渐增加, 压缩应变也在持续增加, 但增加的速率逐渐变缓。400 kPa 压力作用下持续 24 h, 最大压缩应变超过 40%, 这说明 MBT 垃圾具有很高的压缩性。从每级(压力)沉降与压缩时间的关系来看, 前 72 h, 在 12.5, 25, 50 kPa 小压力作用下, 每级压力沉降曲线逐渐上升; 后 72 h, 在 100, 200, 400 kPa 大压力作用下, 每级压缩沉降又逐级递减, 压缩沉降在 50 kPa 出现峰值, 这是由于 MBT 垃圾的骨架成分在小压力下能够抵抗部分压缩变形, 在 50 kPa 附近达到极限值, 从而失去抵抗能力并完全变形, 在时间推移下重塑, 孔隙比快速变小, 导致随后在大压力作用下沉降相对较小, 144 h 累计压缩沉降为 210.3 mm。由于垃圾的含水率较低, 到 400 kPa 压力、压缩 24 h 后仍无渗滤液流出。

MBT 垃圾的初始孔隙比  $e_0$  计算公式为

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 \omega_0)}{\rho_0} - 1 \quad (7)$$

式中:  $\omega_0$  为试样的初始含水率(%),  $G_s$  为试样的相对密度,  $\rho_w$  为 4 °C 时纯水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_0$  为试样的初始密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

由式(7)可得  $e_0$  值为 3.97; 每级压力压缩 24 h 的孔隙比  $e_i$  按下式计算:

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta h_i}{h_0} \quad (8)$$

式中:  $\Delta h_i$  为某级压力下试样高度的变化量(mm),  $h_0$  为试样的初始高度(mm)。垃圾的孔隙比与压力的关系见图 11。

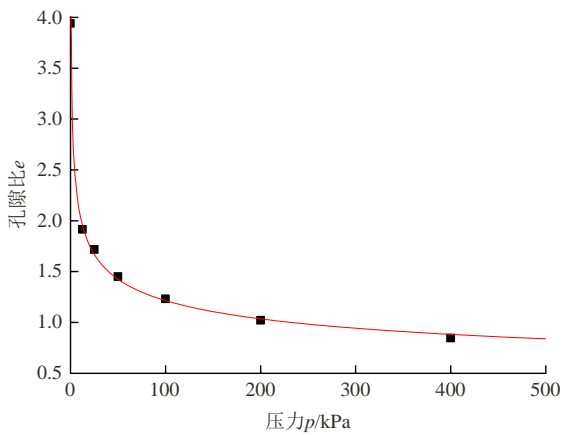


图 11 e-p 曲线  
Fig.11 The e-p curve

由图 11 可知, e-p 曲线相邻两点割线的斜率即为对应压力范围内的压缩系数 a。各压力范围内压缩模量可按下式计算:

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a} \quad (9)$$

本文压缩模量试验结果与 M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup> 对德国 SHG 的 0~20, 0~40 及 0~60 mm 粒径范围压缩模量试验结果的对比见表 4。由表 4 可知, 压力小于 200 kPa 时, 我国杭州 MBT 垃圾的压缩模量  $E_s$  比德国垃圾的压缩模量小, 压缩模量越小, 表明垃圾的压缩性越高; 当压力大于 200 kPa 时, 我国杭州 MBT 垃圾的压缩模量  $E_s$  比德国垃圾的压缩模量大, 表明压力大于 200 kPa 后, 我国杭州垃圾的压缩性变小。引起该结果的主要原因是粒径大小, 较大的粒径包含的纤维长度更长, 不规则的颗粒形状所支撑形成的空隙较大, 同时主要成分(塑料)本身的低抗压性、高延性, 导致较小的压力就能引发较大的变形。

MBT 垃圾的孔隙比与压力对数的关系可以拟合为一条直线, 见图 12, 拟合方程为

$$e = 2.5 - 0.726 \lg p \quad (10)$$

表 4 我国杭州垃圾与德国 SHG 垃圾  $E_s$  值的比较  
Table 4 The compression modules ( $E_s$ ) of Hangzhou MBT waste compared with German(SHG) waste

p/kPa	$E_s/\text{MPa}$			
	杭州	德国 SHG		
	0~100 mm	0~20 mm	0~40 mm	0~60 mm
12.5~25	0.19	-	-	-
25~50	0.29	0.80	0.50	0.60
50~100	0.71	1.00	1.10	2.30
100~200	1.47	1.80	1.60	2.00
200~400	3.54	-	2.80	2.80

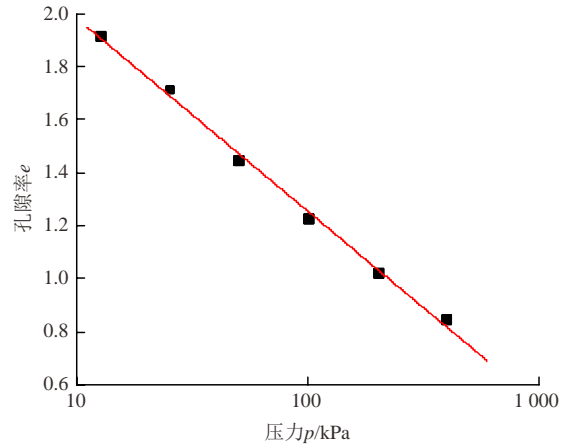


图 12 e-lgp 曲线  
Fig.12 The e-lgp curve

直线的斜率即为垃圾的压缩指数, 压缩指数  $C_c = 0.726$ , 该数值远大于高压缩性土的压缩指数(0.4), 这说明 MBT 垃圾有较高的压缩性。

### 3.7 直接剪切试验

MBT 垃圾的剪应力与剪切位移的关系见图 13。图 13 表明, 在各个竖向压力作用下, 随着剪切位移的增大, 剪应力快速增大, 达到一定位移后, 剪应力的增长速度逐渐变缓, 剪应力 - 剪切位移的关系与一般垃圾土的剪应力 - 剪切位移关系相似。

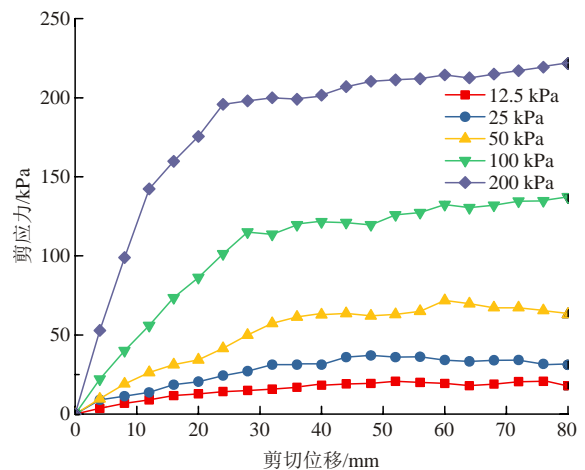


图 13 剪应力与剪切位移的关系

Fig.13 Shear stress versus shear displacement



取各个竖向压力下剪切位移达到 40 mm(相当于剪切应变 20%)对应的剪应力作为该压力下的抗剪强度, 绘制抗剪强度与竖向压力的关系曲线, 见图 14。由图 14 可知, 抗剪强度和竖向压力的关系可拟合为线性关系, 这说明 MBT 垃圾的抗剪强度特性符合库仑定律:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (11)$$

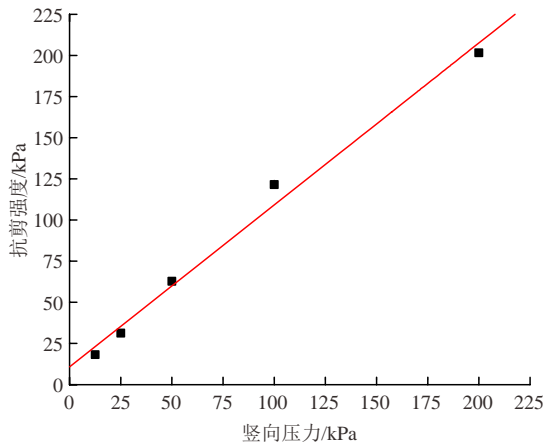


图 14 抗剪强度与竖向压力的关系

Fig.14 Shear strength versus vertical pressure

由直线的截距和斜率分别得出垃圾的黏聚力  $c = 10.8 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 44.5^\circ$ 。

对比国外 MBT 垃圾直剪试验已有文献数据可知, S. Fucale<sup>[15]</sup>经过筛分并控制纤维含量, 对  $d_{\max} \leq 40 \text{ mm}$  的 MBT 垃圾进行了直接剪切试验, 得到其黏聚力  $c = 16 \sim 63.1 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 40.1^\circ \sim 48.1^\circ$ 。A. De Lamare Neto<sup>[23]</sup>进行了直接剪切试验, 得到  $d_{\max} \leq 60 \text{ mm}$  MBT 垃圾的黏聚力  $c = 29.34 \sim 54.18 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 39.04^\circ \sim 43.35^\circ$ ;  $d_{\max} \leq 100 \text{ mm}$  MBT 垃圾的黏聚力  $c = 32.86 \sim 45.04 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 38.55^\circ \sim 40.33^\circ$ 。M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>对长期填埋的 MBT 垃圾进行了直接剪切试验, 得到  $d_{\max} \leq 8 \text{ mm}$  MBT 垃圾的黏聚力  $c = 16.0 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 40.1^\circ$ ;  $d_{\max} \leq 40 \text{ mm}$  MBT 垃圾的黏聚力  $c = 34.7 \sim 63.1 \text{ kPa}$ 、内摩擦角  $\varphi = 45.4^\circ \sim 48.1^\circ$ 。我国杭州 MBT 垃圾的内摩擦角与国外数值比较接近, 但黏聚力数值偏小。

### 3.8 渗透试验

采用压缩与渗透联合测定仪, 对 MBT 垃圾进行了渗透试验, 试验过程考虑 6 级压力, 每级压力压缩 24 h, 试验采用常水头试验方法, 渗透系数  $k$  与竖向压力  $p$  的关系见图 15。由图 15 可知, 渗透系数的对数随着竖向压力的增大而减小, 渗透系数的对数与竖向压力的关系可以拟合为一条直线, 其方程式为

$$\lg k = -0.00683p - 1.927 \quad (12)$$

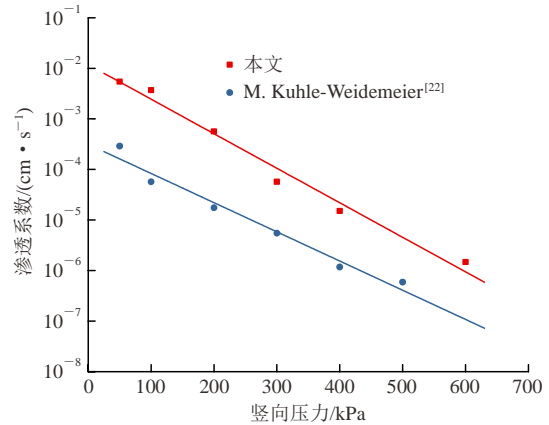


图 15 渗透系数与竖向压力的关系

Fig.15 Permeability coefficient versus vertical pressure

从图 15 还可看出, 在 600 kPa 压力范围内, 杭州 MBT 垃圾渗透系数的量级变化范围在  $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>对经过 MBT 技术处理的法国垃圾( $d_{\max} \leq 30 \text{ mm}$ )进行了渗透试验, 垃圾初始密度为  $0.619 \text{ g/cm}^3$ 、初始含水率为 63.1%, 试验结果见图 15 的蓝线。本文试验数据与 M. Kuhle-Weidemeier<sup>[22]</sup>试验数据进行对比可知, 杭州 MBT 垃圾的渗透系数比法国 MBT 垃圾的渗透系数大一个多数量级。竖向压力为 100 kPa 时, 渗透系数大 1.5 个数量级左右, 随着压力的增大, 两者之间的差距逐渐缩小, 至 600 kPa 时, 两者之间的差距缩小到 1 个数量级。杭州 MBT 垃圾的渗透系数在  $10^{-6} \text{ cm/s}$  量级, 法国 MBT 垃圾的渗透系数在  $10^{-7} \text{ cm/s}$  量级。造成该差异的主要原因是, 我国杭州 MBT 垃圾的初始密度、初始含水率比法国 MBT 垃圾的初始密度、初始含水率小, 当然 MBT 垃圾的尺度及成分差异也是重要的原因。这也表明了国情不同, 垃圾的渗透系数差别较大, 不能照搬照套国外的研究成果, 必须研究我国 MBT 垃圾的基本土工特性。

## 4 结 论

采集杭州天子岭的 MBT 垃圾, 在环境土工实验室, 采用相关试验仪器设备, 进行了 MBT 垃圾土工特性的室内试验研究, 得到如下结论:

(1) MBT 垃圾的成分以塑料、玻璃和灰土为主, 湿质量约占总质量的 57%。天然密度为  $0.227 \text{ g/cm}^3$ , 天然含水率为 22.66%, 相对密度为 1.575。

(2) MBT 垃圾的不均匀系数为 21.4, 曲率系数为 1.93, 粒径分布不均匀, 级配良好。

(3) MBT 垃圾的孔隙比和竖向压力的对数呈直

线关系,建立了直线关系表达式。压缩指数为 0.726,压缩性很高。

(4) MBT 垃圾的强度符合库仑定律,抗剪强度参数  $c = 10.8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 44.5^\circ$ 。我国杭州 MBT 垃圾的内摩擦角与英国、德国 MBT 垃圾的内摩擦角相近,但黏聚力相比偏小。

(5) MBT 垃圾渗透系数的对数与压力呈线性关系,建立了线性关系表达式,渗透系数的量级范围在  $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,总体比法国 MBT 垃圾的渗透系数大一个多数量级。

(6) 对我国杭州 MBT 垃圾与英国、德国等国家 MBT 垃圾的基本土工特性进行了对比,表明我国的 MBT 垃圾与欧洲发达国家的差异较大。

研究结果可为 MBT 垃圾填埋场的库容设计、稳定性分析及渗滤液导排系统的设计提供参考数据。

**致谢** 感谢杭州市环境集团有限公司给予的大力支持及建议!

#### 参考文献(References):

- [1] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理专业委员会. 城市生活垃圾处理行业 2017 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2017, (4): 9 - 15.(Professional Committee of Urban Domestic Refuse Treatment of CAEPI. Development report on treatment industry of urban domestic refuse in 2017[J]. China Environmental Protection Industry, 2017, (4): 9 - 15.(in Chinese))
- [2] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理委员会. 我国城市生活垃圾处理行业 2010 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2011, (4): 32 - 37.(Professional Committee of Urban Domestic Refuse Disposal of CAEPI. China development report on urban domestic refuse disposal industry in 2010[J]. China Environmental Protection Industry, 2011, (4): 32 - 37.(in Chinese))
- [3] 焦玉稳, 孙绍荣. 中国垃圾围城问题与发展策略探析[J]. 生态经济, 2015, 31(10): 103 - 106.(JIAO Yuwen, SUN Shaorong. The problems of Chinese garbage siege and development strategies[J]. Ecological Economy, 2015, 31(10): 103 - 106.(in Chinese))
- [4] NATALIA E A, ANTONIO G, FRANCISCO J, et al. Characterization of SRF from MBT plants: Influence of the input waste and of the processing technologies[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 153: 19 - 27.
- [5] 黄嘉晋, 张启扬, 沈耿哲, 等. 国内外厨余垃圾处理现状及 MBT 处理技术[J]. 山东化工, 2017, 46(7): 217 - 219.(HUANG Jiajin, ZHANG Qiyang, SHEN Gengzhe, et al. Current situation of kitchen waste treatment at home and abroad and MBT treatment technology[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(7): 217 - 219.(in Chinese))
- [6] 陈必鸣. 餐厨垃圾预处理技术综述[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(5): 10 - 12.(CHEN Biming. Food waste pretreatment technologies[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2015, 23(5): 10 - 12.(in Chinese))
- [7] 赵卫兵, 汪家权, 胡淑恒, 等. 城市垃圾生物干化最佳工艺参数的优化研究[J]. 环境工程, 2015, 33(8): 97 - 100.(ZHAO Weibing, WANG Jiaquan, HU Shuheng, et al. Optimization of processing parameters of organic MSW bio-drying by orthogonal tests[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(8): 97 - 100.(in Chinese))
- [8] PANTINI S, VERGINELLI I, LOMBARDI F, et al. Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests[J]. Waste Management, 2015, 38(1): 22 - 32.
- [9] 鞠茂伟. 混合垃圾机械生物预处理燃烧和填埋特性研究[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2012.(JU Maowei. Study on combustion properties and landfill behavior of mixed MSW based on mechanical-biological pretreatment[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.(in Chinese))
- [10] IGOR P. Mini-review of the geotechnical parameters of municipal solid waste: Mechanical and biological pre-treated versus raw untreated waste[J]. Waste Management and Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2016, 34(9): 840 - 850.
- [11] SIDDIQUI A A, RICHARDS D J, POWRIE W. Investigations into the landfill behaviour of pre-treated wastes[J]. Waste Management, 2016, 32(7): 1 420 - 1 426.
- [12] DE GIOANNIS G, MUNTONI A, CAPPAI G, et al. Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. Estimation of gas generation constants[J]. Waste Management, 2009, 29(3): 1 026 - 1 034.
- [13] BAYARD R, DE ARAUJO M J, ROUEZ M, et al. Effect of biological pretreatment of coarse MSW on landfill behaviour: laboratory study[J]. Water Science and Technology, 2008, 58(7): 1 361 - 1 369.
- [14] VAN PRAAGH M, HEERENKLAGE J, SMIDT E, et al. Potential emissions from two mechanically biologically pretreated(MBT) wastes[J]. Waste Management, 2009, 29(2): 859 - 868.
- [15] FUCALE S. The mechanical behavior of MBT waste[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering(EJGE), 2015, 20(13): 5 927 - 5 931.
- [16] FUCALE S P. Influência dos Componentes de Reforço na Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos[Ph. D. Thesis][D]. [S. l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2005.
- [17] FERNANDO V I, SUDARSHANA C K. Shear strength characteristics of mechanically-biologically-treated(MBT) waste[Ph. D. Thesis][D]. Southampton: University of Southampton, 2012.
- [18] SIVAKUMAR BABU G L, LAKSHMIKANTHAN P, SANTHOSH L G. Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste(MBT-MSW) from Bangalore[J]. Waste Management, 2015, 39: 63 - 70.
- [19] BHANDARI A R, POWRIE W. Behavior of an MBT waste in monotonic triaxial shear tests[J]. Waste Management, 2013, 33(4): 881 - 891.
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. CJJ/T 204—2013 生活垃圾土工试验技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. CJJ/T 204—2013 Technical specification for soil test of landfilled municipal solid waste[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [22] KUHLE-WEIDEMEIER M. Landfilling of mechanically-biologically pre-treated municipal solid waste[C]// VIII. International Symposium Waste Management Zagreb.[S. l.]: [s. n.], 2004.
- [23] DE LAMARE NETO A. Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras[Ph. D. Thesis][D]. [S. l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UF RJ, 2004.