

# 适用于存量垃圾开采再利用工程的大直径旋挖取样和筛分试验方法

詹良通<sup>1</sup>, 章梓汀<sup>1</sup>, 李鹤<sup>2</sup>, 兰吉武<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**为实现土地再利用、彻底清除污染源、填补冗余焚烧处理能力,近年来我国大量生活垃圾填埋场开始进行开采治理,填埋垃圾各类物料的质量占比是开采治理工程的关键参数。本文结合深圳市某填埋场,采用小钻孔勘探填埋物分布、大直径旋挖钻原位测试密度与取样、筛分试验确定筛分物料质量占比,对比分析了大直径旋挖钻与传统小钻孔取得试样的外观形态、物理组分、含水率、颗粒级配和重度等特性,最终提出了一套适用于存量垃圾开采再利用工程、能准确评估填埋垃圾存量与生活垃圾各类筛分物料量的垃圾堆体调查方法。结果表明:大直径旋挖钻取得的试样更能代表填埋垃圾的特征,对比旋挖钻,小钻孔试样中的粗粒料偏小约 15%,细粒料和轻质料分别偏大 2.6%~13.7% 和 3.2%~21.9%;随着埋深增大,旋挖钻试样的特征粒径逐渐减小,降解后的小颗粒主要集中在 0.075~2mm 粒径组,质量占比增加了 7.6%;采用旋挖钻测试得到的垃圾原位重度随埋深从 6.09 增加至 12.53kN/m<sup>3</sup>,小钻孔的取样测试结果偏大 10.7%~37.6%,两种方法差值随埋深逐渐变小。基于试验结果对深圳某填埋场垃圾存量和各类筛分物料量进行了计算,对比旋挖钻,小钻孔计算误差约为 40.5%~128.6%。

**关键词:**填埋场;开采筛分再利用治理;旋挖钻;筛分

**中图分类号:** 文献标识码: 文章编号:

**作者简介:** 詹良通(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事城市固体废物安全处置、污染控制及资源化利用理论、方法与技术研究。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

## Large-Diameter Rotary Drilling Sampling and Screening Test Methods for Municipal Solid Waste Mining and Reutilization

ZHAN Liangtong<sup>1</sup>, ZHANG Ziting<sup>1</sup>, LI He<sup>2</sup>, LAN Jiwu<sup>1</sup>, CHEN Yunmin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2 The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** In recent years, many MSW landfills in China have adopted mining and screening for land reuse, pollution elimination, and incineration capacity optimization. Key parameters include the waste stock and the mass proportion of materials. This paper presents a method including small borehole exploration for waste distribution mapping, rotary drilling for in-situ density testing and sampling, and sieve analysis to quantify screened materials. Applied to a Shenzhen landfill, the method includes comparative analyses of appearance, physical composition, moisture content, particle size distribution, and density between samples from rotary drilling and small boreholes. Results demonstrate the superior representativeness of rotary drilling samples. Compared to rotary drilling, small borehole samples have 15% fewer coarse particles but 2.6%~13.7% more fine particles and 3.2%~21.9% more light materials. Depth analysis reveals decreasing characteristic particle sizes in rotary-drilled samples, and degraded particles mainly concentrate in 0.075~2 mm range, exhibiting a 7.6% increase in mass proportion. In-situ density of from rotary drilling increases from 6.09 to 12.53 kN/m<sup>3</sup> with depth, while small borehole results are 10.7%~37.6% higher. The difference between two methods decreases with depth. Based on the experimental results, the waste stock and quantities of screened materials were calculated. Compared to rotary drilling, the calculation error for small borehole samples ranges from 40.5% to 128.6%.

**Key words:** landfill; mining, screening and reutilization management; rotary drilling; screening

基金项目:浙江省科技计划项目(2022C03095)  
收稿日期:

## 0 引言

近几十年来，填埋一直是我国生活垃圾处置的主要途径<sup>[1]</sup>。截止至 2020 年，我国城市范围内约存在 2 万余座非正规填埋场，填埋垃圾存量约为 60 多亿吨<sup>[2]</sup>。非正规填埋场由于建设时间较早，缺少场底防渗设施和顶部覆盖系统，或防污设施的结构不满足现行相关标准的规定，在占用大量城市土地资源的同时，对周边环境的污染风险较大<sup>[3-5]</sup>。近年来随着我国城市化进程的快速发展，我国部分城市开始对非正规垃圾填埋场进行开采筛分再利用治理，彻底清除污染源，对腾空的土地做再利用，并将筛分得到的部分垃圾运至焚烧厂处理填补能力冗余。填埋垃圾存量、垃圾筛分后各类筛分物料的质量占比是填埋场开采筛分再利用治理工程设计的关键参数，如何通过填埋场现状调查准确获得这些参数具有非常重要的研究意义。

填埋场的垃圾堆体勘察通常采用钻孔取样的方法，钻孔取样常见有小钻孔和大直径旋挖钻两种方式<sup>[6, 7]</sup>。小钻孔一般采用冲击钻或回旋钻，具有直径小、施工便捷、成孔数量多、成本少等优势，直径一般在 0.082~0.2m<sup>[8-10]</sup>；旋挖钻具有直径大、钻进速度快、污染少等优势，直径一般在 0.8~0.91m<sup>[11-13]</sup>。钻孔取得的垃圾试样通过室内试验测试物理组分、颗粒级配、容重等参数。Chen<sup>[14]</sup>、Zhou<sup>[15]</sup> 和白秀佳<sup>[16]</sup> 采用小钻孔分别对苏州七子山填埋场、荆门迎春填埋场和北京填埋场进行取样，得到细粒料（灰土、腐殖土等）、粗粒料（砖瓦、砾石、金属、玻璃等）和轻质料（塑料、织物、竹木等）的质量占比分别为 45.3%~84.5%、4.0%~16.4% 和 10.0%~27.2%；Hull<sup>[11]</sup>、Feng<sup>[17]</sup> 和 Mönkäre<sup>[18]</sup> 采用大直径旋挖钻分别对 New Jersey 填埋场、老港填埋场和 Lohja 填埋场进行取样，得到三类物料的比例分别为 30.1%~73.6%、4.1%~24.3% 和 41%~64.7%，粗粒料和轻质料占比显著高于小钻孔，细粒料占比低于小钻孔。在粒径研究方面，尉明亮<sup>[19]</sup> 采用小钻孔对羊耳峪、江村沟填埋场取样后做颗粒分析试验，粒径小于 20mm 的物料质量占比约为 40.3%~61.8%；Kaartinen 等<sup>[13]</sup> 采用旋挖钻对 Kuopio 填埋场进行取样测试取样做颗粒分析试验，粒径小于 20mm 的物料质量占比约为 43.0%~47.0%，低于小钻孔。在重度研究方面，涂帆等<sup>[20]</sup> 调研了国内外一些代表性垃圾填埋场，发现我国填埋垃圾的重度一般为 7.7~13.8kN/m<sup>3</sup>，国外则为 10~14kN/m<sup>3</sup>。Machado 等<sup>[21]</sup> 采用小钻孔对巴西某填埋场取样进行重度测试，垃圾的重度随埋深增大，变化范围为 13~17.5kN/m<sup>3</sup>。朱水元等<sup>[22]</sup> 采用旋挖钻对七子山填埋场生活垃圾重度进

行测试，填埋垃圾重度从浅层的 5.1kN/m<sup>3</sup> 增大至深层的 17.3kN/m<sup>3</sup>。

根据前人的研究成果，大直径旋挖钻与小钻孔取样得到的填埋垃圾试样在物理组分、颗粒级配、重度等特性上存在较大差异，且大部分测试使用的垃圾试样来自于小钻孔取样。目前国内外还未有对大直径旋挖钻和小钻孔两种取样方式得到垃圾试样的物理组分、颗粒级配、重度等特性进行系统性的对比研究。

综上所述，本文提出了一种针对存量垃圾填埋场开采再利用工程的垃圾堆体调查方法，该方法包括小钻孔勘探填埋物分布、大直径旋挖钻原位测试密度与取样、筛分试验确定筛分物料质量占比。为验证该调查方法的适用性和准确性，本文以深圳市某生活垃圾填埋场为例，对小钻孔与大直径旋挖钻两种取样方式得到垃圾试样的外观形态、物理组分、含水率、颗粒级配、重度等特性进行了测试与对比，讨论分析了旋挖钻取样的代表性、垃圾特性随埋深变化规律、以及不同取样方式对填埋垃圾存量和各类筛分物料质量估算的影响。本文研究成果为实施开采筛分再利用治理的填埋场垃圾堆体调查工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 填埋场概况

该垃圾填埋场位于中国广东省深圳市，建于 1983 年，于 1997 年停止使用，并于 2005 年进行封场治理。场区占地总面积约 17 万 m<sup>2</sup>，填埋库区长度约 600m，宽 200m，分为 A、B、C、D 四个区域，填埋垃圾总计约 350 万吨，总容量达 470 万 m<sup>3</sup> 左右。其中，A、B 区总面积约 6.5 万 m<sup>2</sup>，填埋物主要为来自住宅、商业和工业来源的城市生活垃圾；C 区主要用于接纳建筑垃圾，建设时间较早；D 区为污泥填埋区。该填埋场修建时间较早，当时我国还没有颁布卫生填埋相关技术标准，场底未建设防渗层和渗滤液导排层。填埋场封场结构自上而下为约 30cm 厚压实粘土层/渣土层、HDPE 膜，减少降雨入渗产生的渗滤液，防止填埋气扩散。

### 1.2 勘察与取样方法

#### (1) 勘察布点情况

在填埋场 A、B、C、D 区域共布设 75 个调查点位（图 1），进行传统小钻孔勘察与取样。

#### (2) 小钻孔勘察与取样

小钻孔勘察与取样采用的是使用 GXY-1 型钻机（图 3），开孔直径为 150 毫米，终孔直径为 75 毫米。钻孔过程中对填埋垃圾进行全段取样，每 1 米段为一组，垃圾样取出后及时密封，贴好样签，送往实验室做测试。根据小钻孔的勘察结果得到填埋场垃圾堆体层序剖面图，如图 2 所示。

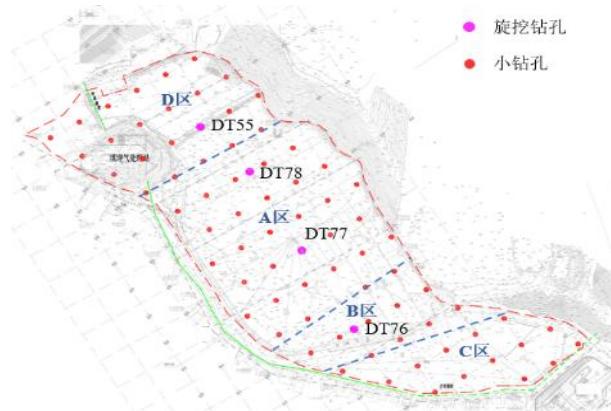


图 1 填埋场钻孔布置平面示意图

Fig. 1 Borehole layout in landfill

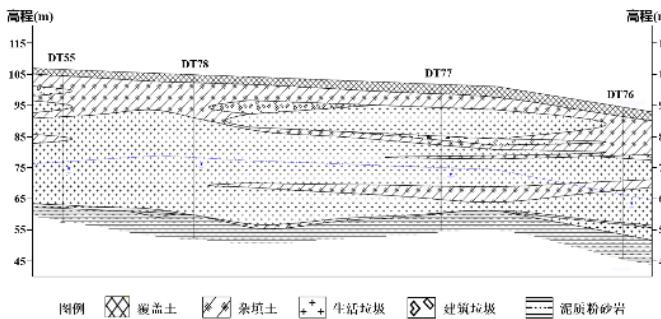


图 2 垃圾堆体层序剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of waste pile

### (3) 旋挖钻施工与取样

根据垃圾堆体层序分布, 在填埋厚度较大、包含层序较多的 4 个点位 (DT76、DT77、DT78、DT55) 采用大直径旋挖钻点位进行取样, 4 个点位的填埋垃圾层序如图 2 所示。大直径旋挖钻取样使用的是 XR220D 型旋挖钻机 (图 4), 钻头直径为 1 米, 单次钻进深度为 1 米。钻进过程中遇生活垃圾时开始采样, 每隔 5~10 米进尺取 1 组试样。4 个旋挖钻的钻孔深度、取样深度、取样量见表 1, 每个钻孔取了 4 组试样, 每组试样质量约 220kg。

在旋挖钻钻进过程中, 根据每次钻进深度与钻头取出的垃圾质量, 计算得到不同深度垃圾的原位重度。

### 1.3 室内筛分试验方法

图 5 和图 6 分别为小钻孔与旋挖钻取得垃圾试样的室内筛分试验流程, 将垃圾试样分为细粒料、粗粒料 (砖瓦、砾石、金属、玻璃) 和轻质料 (塑料、织物、竹木) 三类。其中旋挖钻垃圾试样的室内筛分试验流程如下: (1) 每组取垃圾试样约 200kg, 人工挑拣出块石、木板等大件垃圾归类为粗粒料; (2) 将垃圾试样投入孔径 20mm 的滚筒筛进行筛分, 筛上物采用风选设备或通过人工分拣分为轻质料和粗粒料; (3) 20mm 滚筒筛的筛下物在投入孔径 5mm 的滚筒筛进行筛分, 筛下物归类为细粒料, 筛上物采用风选设备

分离为轻质料和粗粒料; (4) 对粗粒料、轻质料、细粒料称重, 计算各类物料质量占比。



图 3 GXY-1 型钻机



图 4 XR220D 型旋挖钻机

Fig. 3 GXY-1 drilling rig

Fig. 4 XR220D large-diameter rotary drilling rig

表 1 垃圾取样深度与取样量

Table 1 Sampling depth and quantity of mined waste

钻孔号	取样深度 (m)
DT-55	12
	18
	29
	38
DT-76	14
	23
	31
	37
DT-77	11
	20
	26
	36
DT-78	15
	22
	31
	38

### 1.4 基本特性测试

针对细粒料、轻质料、粗粒料, 根据《生活垃圾土工试验技术规程》CJJ/T-2013<sup>[23]</sup>测试了颗粒级配、含水率等参数。

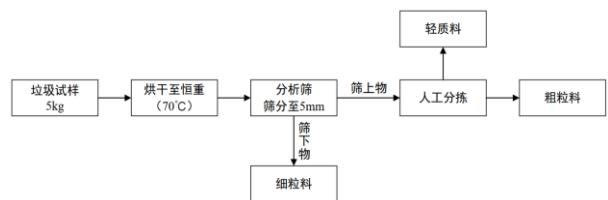


图 5 小钻孔垃圾试样实验室测试流程图

Fig. 5 Laboratory testing for small borehole waste samples

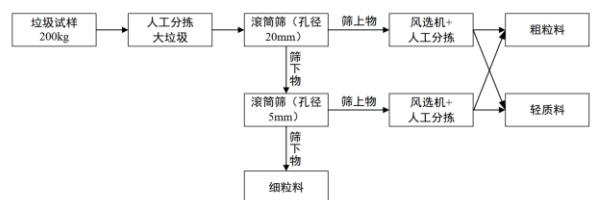


图 6 旋挖钻垃圾试样实验室测试流程图

Fig. 6 Laboratory testing for rotary drilling waste samples

## 2 结果与分析

### 2.1 垃圾试样外观形态



图 7 小钻孔垃圾样现场图

Fig. 7 Small borehole waste samples



图 8 旋挖钻垃圾样现场图

Fig. 8 Large-diameter rotary drilling waste samples

图 7 和图 8 分别为两种不同取样方式取样得到的垃圾试样现场图。可以观察到，小钻孔取样得到的垃圾试样以塑料和布料等轻质料为主。旋挖钻取样得到的垃圾试样轻质料和细粒料比例较为均匀，并可见砖瓦、碎石等粗粒料。

### 2.2 物理组分

图 9 为通过筛分试验得到的细粒料、粗粒料和轻质料照片。图 10 为旋挖钻与小钻孔垃圾试样三类筛分物料质量占比（干基）的测试结果。从图中可以看到，相比于大直径旋挖钻，小钻孔的细粒料质量占比偏大，且随着填埋深度的增加，偏大量从 2.6% 增加到 13.7%；小钻孔的粗粒料在不同填埋深度处的质量占比显著低于旋挖钻，低约 15% 以上；在轻质料质量占比方面，小钻孔显著高于旋挖钻，随着填埋深度增加，二者差值逐渐变小，从 21.9% 变至 3.2%。从上述试验结果可以发现取样方式对各类筛分物料质量占比有较大的影响，大直径的旋挖钻可以取到粒径较大的物理组分，这部分物理组分以砖瓦、碎石等建筑垃圾为主，颗粒比重大，导致各类筛分物料质量占比相比小钻孔有了较大变化，粗粒料的质量占比显著增大，也直接导致细粒料、轻质料的质量占比相应减小。在该填埋场运行期间深圳市正在高速城市化，填埋的生活垃圾中不可避免的会混杂部分建筑垃圾，因此根据筛分试验结果，可以判断大直径旋挖钻取得的垃圾试样更具有代表性，更好地代表了整个垃圾层的特征。



(a) 细粒料（粒径 $<5\text{mm}$ ）



(b) 粗粒料

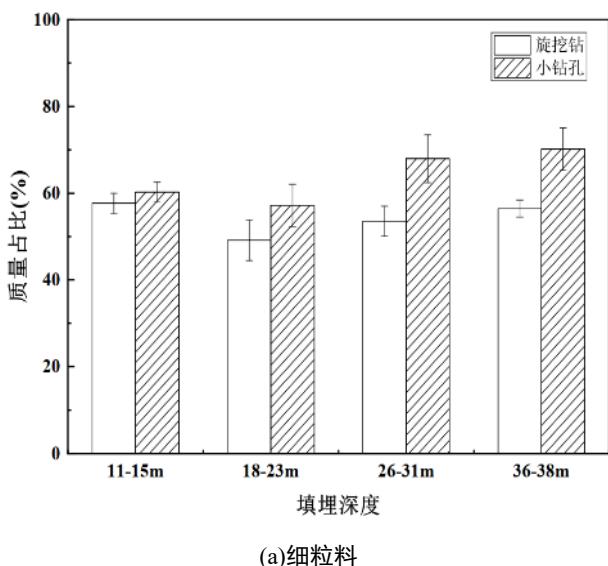


(c) 轻质料

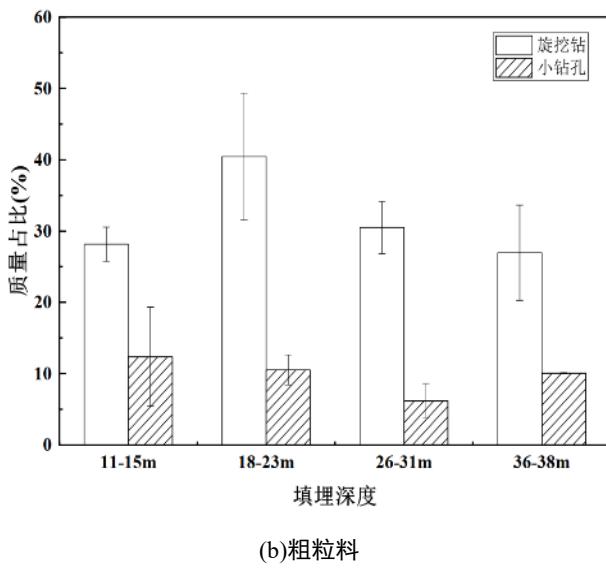
图 9 物理组分三类物料图

Fig. 9 Three types of physical components

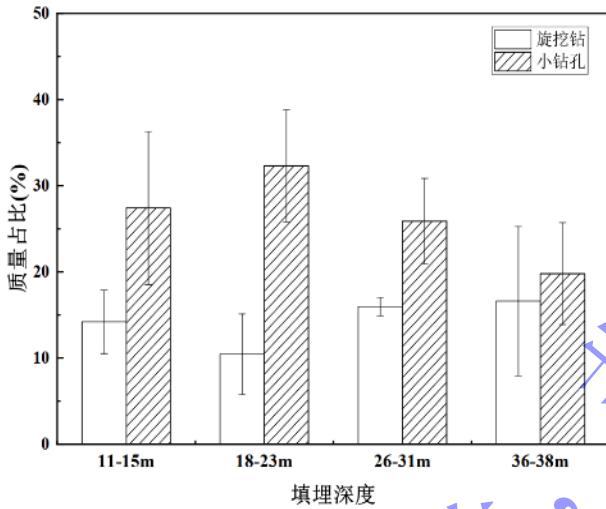
根据图 10 中旋挖钻垃圾试样的测试结果，三类物料干重质量占比从高到低依次为细粒料、粗粒料和轻质料。除表层外，细粒料质量占比呈现随着填埋深度增加而增大的趋势，从 49.1% 增大至 56.5%。这主要由于在生物降解作用下，可降解物质被分解，颗粒尺寸逐渐减小，细颗粒增加；同时，在重力和渗滤液运移冲刷作用下，细颗粒会向下迁移，因此在深层可以发现更多的细颗粒。表层垃圾细粒料含量为 57.7%，这主要是由于该填埋场在覆盖层下还填有一层厚度约为 5~10 米的杂填土（图 2），在旋挖钻取样过程中可能会混杂在试样中。粗粒料质量占比随填埋深度有明显的递减趋势，从 18~23m 的 40.5% 降至 36~38m 的 27.0%，规律与 Francois 等<sup>[24]</sup>对四个垃圾填埋场的测试结果一致。轻质料的质量占比随填埋深度缓慢增大，从 10.4%~14.3% 增加至 16.6%。这主要是由于轻质物以塑料、竹木为主，其中的可降解物质占比小，在降解过程中轻质物的总质量（干基）变化较小，而垃圾总质量由于降解作用减小的较多，因此轻质物在垃圾试样中的质量占比呈现逐渐上升的趋势。



(a) 细粒料



(b) 粗粒料



(c) 轻质料

图 10 旋挖钻与小钻孔垃圾试样物料干重质量占比对比

Fig. 10 Comparison of dry weight proportion of waste samples from rotary drilling and small boreholes

综上所述，在开采筛分再利用工程的垃圾堆体调查中，采用先小钻孔勘察填埋物分布、后旋挖钻取样的方法，充分发挥小钻孔成本低、施工便捷，以及旋挖钻取样具有代表性，能够更加高效准确地得到生活垃圾填埋堆存方量以及各类开挖物料比例。

## 2.3 含水率

图 11 显示了旋挖钻垃圾试样、细粒料、粗粒料和轻质料的质量含水率沿填埋深度变化情况。可以看到，随着填埋深度的增加，垃圾试样及三类筛分物料的含水率均呈增加趋势。其中，垃圾试样含水率由浅层的 18.9% 增加至深层的 35.3%，细粒料由 19.6% 增加至 30.2%，粗粒料由 11.8% 增加至 21.9%，轻质料由 22.4% 增加至 42.4%。填埋场的渗滤液液位埋深为 25~30 m，因此最深层的垃圾试样及各类物料的含水率对比上一

层明显增大。在同一深度处，轻质料的含水率最大，比细粒料和粗粒料分别高约 3.0%~12.0%、11.0%~20.0%，彼此之间的差值随深度逐渐变大。这说明轻质料中的塑料、织物等组分具有较强的吸水和持水能力，在筛分试验中常常由于该部分物料含水率高，其表面会粘附有大量的细粒料，难以进行分离。

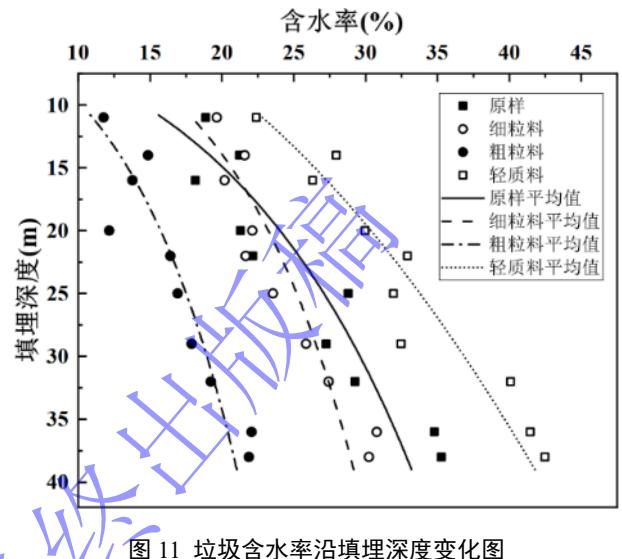


图 11 垃圾含水率沿填埋深度变化图

Fig. 11 Variation of waste moisture content with landfill depth

## 2.4 颗粒级配

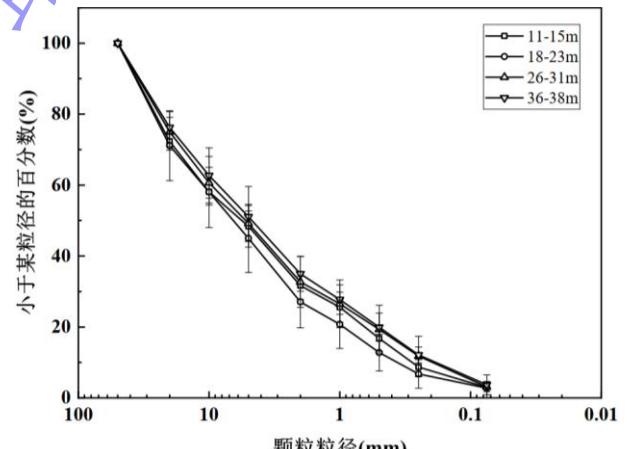


图 12 不同深度填埋垃圾颗粒级配曲线图

Fig. 12 Particle size distribution curves of landfill waste at different depths

图 12 为旋挖钻取样得到的不同填埋深度填埋垃圾的颗粒级配曲线。可以看到，随着埋深的增加，颗粒级配曲线在图中向上移动，整体粒径呈现逐渐减小的趋势，这与物理组分分析得到的规律基本一致。除了填埋表层，随着埋深增加，5~20mm 粒径组的占比由 26.1% 减小至 25.2%，2~5mm 粒径组的占比由 18.0% 减小至 16.1%，0.075~2mm 粒径组的占比由 24.2% 增加到 31.3%，小于 0.075mm 粒径组的占比由 2.8% 增加到 3.7%。由上述可见在生化降解作用下，粒径较大的

可降解组分被分解为小颗粒, 这些小颗粒主要分布于 2mm 以下的粒径组。垃圾试样的特征粒径也随着填埋深度增加逐渐减小,  $d_{60}$  从 11.41mm 降至 8.44mm,  $d_{30}$  从 2.32mm 降至 1.24mm,  $d_{10}$  从 0.37mm 降至 0.19mm。根据特征粒径, 可以计算得到垃圾的不均匀系数  $C_u$  随着埋深增加从 31 增大至 44, 曲率系数  $C_c$  从 1.27 减小至 0.96, 浅层垃圾属于级配良好土, 深层垃圾属于级配不良土。与本文旋挖钻试样颗粒级配曲线对比, 陈云敏等人<sup>[3]</sup>采用小钻孔得到的某填埋场垃圾试样小于 20mm、5mm、2mm 和 0.075mm 粒径的百分数分别偏大约 38.9%、17.6%、14.9% 和 5.3%,  $d_{60}$ 、 $d_{30}$  和  $d_{10}$  分别偏小 5.25~6.82mm、0.77~1.61mm 和 0.10~0.25mm。

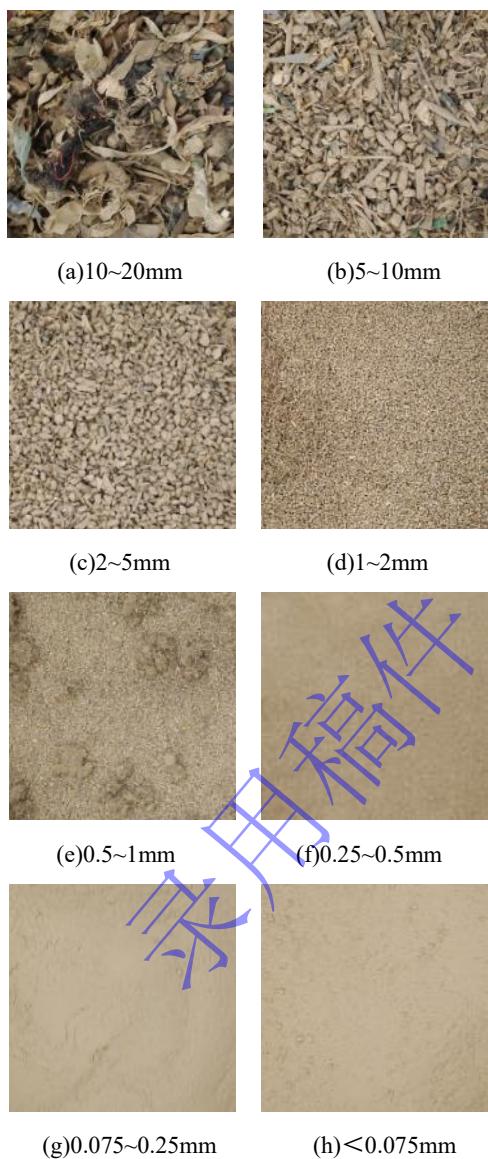


图 13 填埋垃圾不同粒径样品图

Fig. 13 Samples of landfill waste with different particle size

图 13 为不同粒径组的外观照片, 从图中可以看到, 当粒径为 5~20mm 时, 除大颗粒无机骨料以外, 还含有大量竹木和塑料, 杂质占比较高; 当粒径为

0.5~5mm 时, 主要由细颗粒无机骨料构成, 杂质主要为少量的竹木碎屑和絮状物构成, 占比较小; 当粒径小于 0.5mm 时, 试样在外观上与传统土样基本相同, 其中夹杂着极少量竹木碎屑, 杂质含量极少。

综合颗粒级配曲线与各粒径组外观形态分析, 可以看到当粒径小于 5mm 时, 杂质含量低, 同时由于降解后形成的细颗粒在 5mm 以下粒径组中集聚, 重金属等污染物会沉淀积聚于这部分细颗粒中<sup>[3, 25]</sup>, 污染性显著高于 5mm 以上的粒径组。因此, 在本填埋场的开采筛分工程中可以考虑将粒径 5mm 作为细粒料与粗粒料分离的界限, 分别进行处理。

在筛分试验方法中, 应充分考虑颗粒级配曲线和不同粒径组外观形态, 确定和控制腐殖土最大粒径选取和控制, 从而实现腐殖土的合理处置和资源化利用。

## 2.5 重度

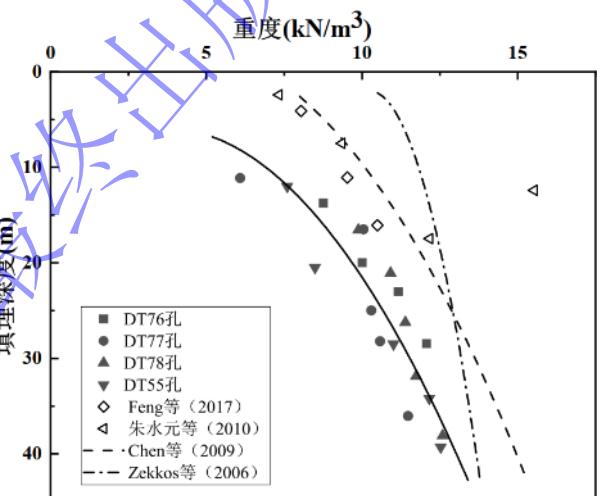


图 14 垃圾重度沿填埋深度变化图

Fig. 14 Variation of waste density with landfill depth

图 14 为旋挖钻测试得到的填埋垃圾原位重度沿深度变化情况。从图中可以看到, 填埋垃圾重度随埋深增加而变大, 在埋深 10~25 米范围内, 重度沿埋深呈线性增加趋势, 从 6.09 增至 11.10kN/m<sup>3</sup>, 埋深超过 25 米后, 重度逐渐趋于稳定, 变化范围为 11.10~12.53 kN/m<sup>3</sup>。根据图 14, 通过旋挖钻原位测试得到的生活垃圾重度  $w$  与填埋深度  $h$  之间符合如下函数关系曲线:

$$w = \frac{2.844 + \sqrt{1.554h - 9.171}}{0.778} \quad (10 < h < 40) \quad (1)$$

与旋挖钻<sup>[17, 22]</sup>相比, Chen、Zekkos 等<sup>[14, 26]</sup>通过小钻孔取样得到的垃圾重度总体偏大, 对比本文旋挖钻测试结果, Chen 等人<sup>[14]</sup>采用小钻孔在 10~20m、20~30m 和 30 米以下埋深处重度分别偏大 37.6%、20.3% 和 10.7%, 随着埋深增加, 二者差值逐渐变小。出现上述现象主要是由于: (1) 本文填埋场的渗滤液液位较低, 同时旋挖钻取得垃圾中持水能力强的轻质料含

量显著低于小钻孔试样, 因此浅层填埋垃圾含水率也显著低于小钻孔, 虽然旋挖钻粗粒料含量较高, 但是总体上垃圾的重度小于小钻孔; (2) 随着埋深增加, 旋挖钻与小钻孔试样中各类物料质量占比和含水率均逐渐接近, 因此二者之间的重度差距也越来越小。

填埋垃圾的重度是开采筛分再利用工程中堆存量计算的关键参数。对比大直径旋挖钻, 采用小钻孔取样得到垃圾试样的重度会整体偏大, 因此在测试重度时, 应采用合适的勘察手段充分还原原位垃圾的物理组分与含水率。

### 3 讨论

#### 3.1 钻进深度控制精度分析

在钻进深度控制方面, 大直径旋挖钻机采用深度监测系统, 配备电子深度计和传感器, 实时监测钻杆的位移与深度。系统配备了自动调平装置, 用来校准钻进深度。旋挖钻钻进深度误差可以控制在 0.5% 至 2%。小钻孔则通常采用刻度标记来控制钻进深度。这些刻度标记直接标记在钻杆或钻管上, 操作人员根据刻度测算钻进深度, 误差范围大约为 2% 至 5%。

钻孔钻进深度误差会对重度精度产生影响。当钻进深度为 15m 和 35m 时, 旋挖钻和小钻孔钻进深度误差分别为 0.075~0.7m 和 0.3~1.75m, 根据式 1 计算得到的重度误差分别为  $0.02\sim0.07\text{kN/m}^3$  和  $0.08\sim0.26\text{kN/m}^3$ , 对应的误差范围为 0.24%~0.57% 和 0.94%~2.12%。由此可见, 两种钻孔方式测试得到的重度误差随深度均逐渐增大, 小钻孔误差约为旋挖钻的 3~4 倍。

#### 3.2 填埋垃圾堆存量估算

(1) 以深圳市某生活垃圾填埋场为例, 根据勘察得到的垃圾堆体层序剖面图, 对整个填埋区域进行划分, 采用填埋区域×填埋物厚度的方法对生活垃圾堆存方量进行计算, 约为 135.55 万  $\text{m}^3$ , 如表 2 所示。

(2) 根据旋挖钻原位测试得到的不同填埋深度生活垃圾的重度、以及各层生活垃圾堆存方量, 计算得到不同埋深生活垃圾堆存量, 如表 3 所示。结果表明, 旋挖钻得到的生活垃圾堆存量约为 116.92~148.14 万吨。其中, 填埋深度 0~10m 的堆存量约为 9.94~10.72 万吨; 10~20m 的堆存量约为 31.14~44.83 万吨; 20~30m 的堆存量约为 36.37~45.45 万吨; 30m 以下的堆存量约为 39.47~47.14 万吨。

(3) 小钻孔生活垃圾容重参考《生活垃圾卫生填埋场岩土技术规范》(CJJ 176-2012)<sup>[27]</sup> 进行确定, 用于计算不同埋深垃圾堆存量, 计算结果如表 2 所示。结果表明, 基于小钻孔试验结果得到生活垃圾总存量约为 149.59~171.67 万吨。其中, 填埋深度 0~10m 的堆存量约为 13.06~16.04 万吨; 10~20m 的堆存量约为

46.58~55.30 万吨; 20~30m 的堆存量约为 44.87~51.91 万吨; 30m 以下存量约为 45.08~48.42 万吨。

(4) 根据上述结果, 按平均重度计算, 旋挖钻和小钻孔得到的生活垃圾堆存量分别为 132.53 和 160.63 万吨。小钻孔相比旋挖钻计算结果偏大 21.2%, 且在不同填埋深度均表现出相同的规律, 在 0~10m、10~20m、20~30m 和 30m 以上埋深处小钻孔偏大比例分别为 40.9%、34.1%、18.3% 和 8.0%。可以看出, 旋挖钻在垃圾堆存量计算上更具有代表性, 且对于液面以上的填埋垃圾旋挖钻代表性优势更加明显。

表 2 不同埋深生活垃圾堆存量计算结果

Table 2 Calculation results of MSW stockpile at different depths

填埋深度 (m)	垃圾堆存方量 (万 $\text{m}^3$ )	旋挖钻 (万 t)	小钻孔 (万 t)
0~10	16.32	9.94~10.72	13.06~16.04
10~20	47.39	31.14~44.83	46.58~55.30
20~30	38.45	36.37~45.45	44.87~51.91
>30	33.39	39.47~47.14	45.08~48.42
总计	135.55	116.92~148.14	149.59~171.67

#### 3.3 各类筛分物料量估算

根据各类筛分物料干基质量占比及含水率, 首先计算得到各类物料湿基质量占比, 然后再基于填埋垃圾堆存量计算结果, 得到细粒料、粗粒料、轻质料三类筛分物料的质量, 如表 3 所示。旋挖钻开挖计算得到的各类筛分物料质量中, 细粒料约为 65.62~77.61 万吨, 粗粒料约为 33.49~51.70 万吨, 轻质料约为 14.96~24.09 万吨。小钻孔开挖计算得到的各类物料质量中, 细粒料约为 89.60~111.64 万吨, 粗粒料约为 9.12~18.68 万吨, 轻质料约为 34.04~55.26 万吨。

表 3 旋挖钻各类物料质量计算结果

Table 3 Various material masses from rotary drilling

填埋 物料	质量占比(湿基) (%)		物料质量 (万 t)	
	旋挖钻	小钻孔	旋挖钻	小钻孔
细粒料	49.51~ 58.56	55.78~ 69.50	65.62~ 77.61	89.60~ 111.64
	25.27~ 39.01	5.68~ 11.63	33.49~ 51.70	9.12~ 18.68
粗粒料	11.29~ 18.18	21.19~ 34.40	14.96~ 24.09	34.04~ 55.26
轻质料				

按各物料平均质量占比计算, 旋挖钻和小钻孔开挖得到的细粒料质量分别为 71.62 和 100.62 万吨; 粗粒料质量分别为 42.60 和 13.90 万吨; 轻质料质量分别为 19.53 和 44.65 万吨。相比旋挖钻, 小钻孔细粒

料、粗粒料、轻质料计算结果分别偏大 40.5%、偏小 90.9%、偏大 128.6%。

## 4 结论

本文对深圳市某生活垃圾填埋场进行了大直径旋挖钻和小钻孔现场取样，对比分析了垃圾试样外观形态、物理组分、含水率、颗粒级配和重度等特性，得到了以下主要结论：

(1) 本文提出了一套包括小钻孔勘探填埋物分布、大直径旋挖钻原位测试密度与取样、筛分试验确定筛分物料质量占比的垃圾堆体调查方法。该方法在总结传统采样方式基础上，提出了先采用小钻孔查明垃圾层分布、后利用旋挖钻取样测试的勘察方式，充分发挥小钻孔成本低、施工便捷，以及旋挖钻取样代表性的优势，对我国实施开采筛分再利用治理填埋场的垃圾堆体调查有重要参考意义。

(2) 通过室内筛分试验测试了旋挖钻试样各类筛分物料的质量占比。随着埋深增加，细粒料从 49.1% 增大至 56.5%，粗粒料从 40.5% 降至 27.0%，轻质料从 10.4%~14.3% 增至 16.6%。对比旋挖钻，小钻孔试样中的细粒料高 2.6%~13.7%、粗粒料偏小超过 15%、轻质料高 3.2%~21.9%。

(3) 旋挖钻试样的特征粒径随着填埋深度增加逐渐减小，浅层垃圾属级配良好土，深层垃圾属级配不良土。粒径较大的可降解组分在生化降解作用下被分解为小颗粒，这些小颗粒主要分布于  $\leq 2\text{mm}$  的粒径组。

(4) 通过旋挖钻原位测试得到的垃圾重度随埋深逐渐增大，从  $6.09\text{ kN/m}^3$  增加至  $12.53\text{ kN/m}^3$ ，小钻孔取样测试的重度在  $10\sim 20\text{m}$ 、 $20\sim 30\text{m}$  和  $>30\text{m}$  埋深处分别偏大 37.6%、20.3% 和 10.7%。随着埋深的增加，旋挖钻与小钻孔试样中各类物料质量占比和含水率均逐渐接近，二者之间的重度差值也越来越小。

(5) 分别根据旋挖钻与小钻孔取样测试结果对深圳市某填埋场的填埋垃圾堆存量与各类筛分物料质量进行了估算。根据旋挖钻和小钻孔测试结果计算得到的生活垃圾堆存量分别为 132.53 万吨和 160.63 万吨，小钻孔相比旋挖钻计算结果偏大 21.2%。根据旋挖钻测试结果计算得到的细粒料、粗粒料、轻质料分别为 71.62 万吨、42.60 万吨、19.53 万吨，小钻孔分别偏大 40.5%、偏小 90.9%、偏大 128.6%。

## 参考文献：

- [1] Krook J. Urban and landfill mining: emerging global perspectives and approaches[J]. Journal of Cleaner Production. 2010, 18(16-17): 1772-1773.
- [2] 郑康琪, 陈萍, 邱钰峰, 郭淇萌, 陈延博, 元妙新, 詹良通. 生活垃圾腐殖土物化性质及资源化利用途径——以浙江省某高龄期填埋场为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3254-3264. (Zheng Kang-qi, CHEN Ping, QIU Yu-feng, GUO Qi-meng, CHEN Yan-bo, YUAN Miao-xin, ZHAN Liang-tong. Physicochemical properties and reuse of municipal solid waste fine fraction: Case of an aged landfill site in Zhejiang Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3254-3264. (in Chinese))
- [3] 陈云敏, 刘晓成, 徐文杰, 等. 填埋生活垃圾稳定化特征与可开采性分析: 以我国第一代卫生填埋场为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(02): 199-211. (Chen Yun-min, Liu Xiao-cheng, Xu Wen-jie, et al. Analysis on stabilization characteristics and exploitability of landfilled municipal solid waste: Case of a typical landfill in China[J]. Sci Sin Tech, 2019, 49(02): 199-211. (in Chinese))
- [4] 詹良通, 刘伟, 曾兴, 陈云敏. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1988-1996. (ZHAN Liang-tong, LIU Wei, ZENG Xing, CHEN Yun-min. Parametric study on breakthrough time of vertical cutoff wall for MSW landfills and simplified design formula for wall thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 1988-1996. (in Chinese))
- [5] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46. (CHEN Yun-min. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1-46. (in Chinese))
- [6] 周红军. 我国旋挖钻进技术及设备的应用与发展[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程). 2003(2): 11-14, 17. (Zhou Hong-jun. The development and application of rotary digging technology and equipment in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling And Tunneling). 2003(2): 11-14, 17. (in Chinese))
- [7] 冉恒谦, 张金昌, 谢文卫, 等. 地质钻探技术与应用研究[J]. 地质学报. 2011, 85(11): 1806-1822. (Ran Heng-qian, Zhang Jin-chang, Xie Wen-wei, et al. Applications Study of Geo-drilling Technology[J]. Acta Geologica Sinica. 2011, 85(11): 1806-1822. (in Chinese))
- [8] 陈宏信, 吕东江, 冯世进, 张晓磊, 吴少杰. 某低厨余填埋场垃圾物理力学特性演化规律[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1850-1858. (CHEN Hong-xin, LÜ Dong-jinag, FENG Shi-jin, ZHANG Xiao-lei, WU Shao-jie. Evolution of physical and mechanical properties of municipal solid waste in a landfill with low kitchen waste content[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1850-1858. (in Chinese))
- [9] ZHANG W, YUAN S. Characterizing preferential flow in landfilled municipal solid waste[J]. Waste Management, 2019, 84: 20-28.
- [10] 张炜, 黄兴, 殷建钢, 等. 低厨余城市生活垃圾物理力学特性随龄期变化[J]. 工程勘察. 2023, 51(11): 24-29. (Zhang Wei, Huang Xing, Yin Jian-hang, et al. Changes in basic physical and mechanical characteristics of low-kitchen-waste municipal solid waste with age[J]. Geotechnical Investigation Surveying 2023, 51(11): 24-29. (in Chinese))
- [11] Hull R M, Krogmann U, Strom P F. Composition and characteristics of excavated materials from a New Jersey landfill[J]. Journal of Environmental Engineering (New York, N.Y.). 2005, 131(3): 478-490.
- [12] Wolfsberger T, Aldrian A, Sarc R, et al. Landfill mining : Resource potential of Austrian landfills - Evaluation and quality assessment of recovered municipal solid waste by chemical analyses[J]. Waste Management & Research. 2015, 33(11): 962-974.
- [13] Kaartinen T, Sormunen K, Rintala J. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining[J]. Journal of Cleaner Production. 2013, 55: 56-66.
- [14] CHEN Y M, ZHAN T L T, WEI H Y, et al. Aging and compressibility of municipal solid wastes[J]. Waste Management, 2009, 29(1): 86-95
- [15] Zhou C, Gong Z, Hu J, et al. A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China[J]. Waste Management. 2015, 35: 191-198.
- [16] 白秀佳, 张红玉, 王桂琴, 顾军, 王继红. 填埋场陈腐垃圾综合利用研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 43-47. (Bai Xiu-jia, Zhang Hong-yu, Wang Gui-qin, Gu Jun, Wang Ji-hong. Research progress on comprehensive utilization of stale refuse in landfill[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 43-47. (in Chinese))
- [17] FENG S J, GAO K W, CHEN Y X, et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China[J]. Waste Management, 2017, 63: 354-365.
- [18] Mönkäre T J, Palmroth M R T, Rintala J A. Characterization of fine fraction mined from two Finnish landfills[J]. Waste Management. 2016, 47: 34-39.
- [19] 尉明亮. 填埋垃圾的土工特性及其应力和龄期效应[D]. 浙江理工大学, 2021. (Wei Ming-liang. Geotechnical characteristics of municipal solid waste and their stress and age effects [D]. Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese))
- [20] 涂帆, 钱学德. 中美垃圾填埋场垃圾土的重度、含水率和相对密度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1):3075-3081. (TU Fan, QIAN Xue-de. Unit weight, water content and specific gravity of municipal solid waste in China and United States[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3075-3081. (in Chinese))
- [21] Machado S L, Karimpour-Fard M, Shariatmadari N, et al. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills[J]. Waste Management. 2010, 30(12): 2579-2591.
- [22] 朱水元, 刘钊, 詹良通. 城市生活垃圾填埋密度及其随深度分布规律[J]. 环境卫生工程. 2010, 18(05): 53-56.(Zhu Shui-yuan, Liu Zhao, Zhan Liang-tong. Landfill density of municipal domestic waste and its distribution along depth[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2010, 18(05): 53-56. (in Chinese))
- [23] 生活垃圾土工试验技术规程:CJJ/T 204-2013[S]. 2013. (Technical specification for soil test of landfilled municipal solid waste: CJJ/T 204-2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [24] Francois V, Feuillade G, Skhiri N, et al. Indicating the parameters of the state of degradation of municipal solid waste[J]. Journal of Hazardous Materials. 2006, 137(2): 1008-1015.
- [25] Kjeldsen P, Barlaz M A, Rooker A P, et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate : A review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2002, 32(4): 297-336.
- [26] Zekkos D, Bray J D, Kavazanjian E, et al. Unit weight of municipal solid waste[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2006, 132(10): 1250-1261.
- [27] 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范: CJJ176—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.(Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill: CJJ 176—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))