

城市固体废弃物持水率的研究

涂帆¹, 钱学德², 崔广强¹, 吴忠良¹, 方玲¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 密歇根州环境保护厅, 美国 兰辛 48913)

摘要: 提出城市固体废弃物填埋场垃圾土持水率研究的室内试验方法, 并对根据我国南方某填埋场垃圾组成配置的垃圾混合物进行试验。试验表明, 垃圾土湿重持水率随干密度的增大而减小。垃圾土密实状态下的体积持水率也随上覆压力和干密度的增大而减小, 但在疏松状态下, 其体积持水率开始时随上覆压力和干密度的增大而增大, 达到最大值后, 随上覆压力和干密度的增大而减小。

关键词: 土力学; 城市固体废弃物; 持水率; 渗沥液; 填埋场

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3305 - 07

STUDY ON WATER HOLDUP OF MUNICIPAL SOLID WASTE

TU Fan¹, QIAN Xuede², CUI Guangqiang¹, WU Zhongliang¹, FANG Ling¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China;

2. Michigan Department of Environmental Quality, Lansing, Michigan 48913, USA)

Abstract: A laboratory testing method, which is used to measure water holdup of municipal solid waste(MSW) is introduced. A artificial solid waste is used in the study, which is made according to the composition of a municipal solid waste landfill located in Southern China. In general, the dry gravimetric water holdup of the waste decreases with increasing of its dry density, the waste density is another important factor affecting water holdup. The volumetric water holdup for the dense waste also decreases with increasing overburden pressure and dry density. However, the volumetric water holdup for the loose waste initially increases with the increase of overburden pressure and dry density. After the volumetric water holdup reaches a maximum value, the volumetric water holdup then decreases with the increase of overburden pressure and dry density.

Key words: soil mechanics; municipal solid waste(MSW); water holdup; leachate; landfill

1 引言

城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)的持水率指的是饱和垃圾土中的水在重力作用下排光后, 留在土中水的体积与总体积之比(体积持水率), 以百分数表示。持水率也可以表达为水重与垃

圾干重之比(干重持水率)或水重与总重之比(湿重持水率)。因此, 垃圾土持水率有体积持水率、干重持水率和湿重持水率 3 个表达式。持水率是排水条件良好情况下, 固体废弃物在重力作用下的最大含水率。MSW 的含水率若超过持水率, 超过的水将成为渗沥液排出, 留在土中的水因毛细作用停留下来。

收稿日期: 2007 - 08 - 11; **修回日期:** 2007 - 10 - 14

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(E0710019)

作者简介: 涂帆(1950 -), 女, 1977 年毕业于河海大学农田水利工程专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: ftu@hqu.edu.cn

垃圾土的持水率是现代卫生填埋场建设需要的重要参数,在填埋场渗沥液产出量的估算、渗沥液面的计算、渗沥液的收集和传输、气体的收集和最终覆盖的设计、填埋体的稳定分析、填埋场的扩容和封闭后填埋场的开发利用等方面都需要这个指标^[1, 2]。持水率是固体废弃物在最优降解情况下的含水率,因此,对于利用渗沥液回灌加速填埋场生物催化反应(bioreactor)这一新技术,持水率是关键参数^[1]。表1归纳了国外MSW的持水率资料。

表1 国外MSW的持水率的资料
Table 1 Previous reported water holdup of municipal solid waste abroad

资料来源	体积持水率/%
F. A. Rovers 和 G. J. Farquhar ^[3]	30.2
A. A. Fungaroli 和 R. L. Steiner ^[4]	34.2
J. J. Walsh 和 R. N. Kinman ^[5]	31.8
R. J. Wigh ^[6]	36.7~37.5
J. J. Walsh 和 R. N. Kinman ^[7]	31.0~40.4
J. G. Zornberg 等 ^[8]	47.4~53.0
Y. S. Jang 等 ^[9]	26.0~45.0
M. T. O. de Velasquez 等 ^[10]	13.0~27.0
A. P. Hudson 等 ^[11]	41.0~45.0

填埋垃圾的持水率取决于多种因素,如垃圾组成、颗粒级配、垃圾年份、上覆压力、压实度及密度等,通常随垃圾中有机成分(如纸张和纺织品)^[1]、纤维和挥发性固体物质^[12]含量的增加而增加。A. A. Fungaroli 和 R. L. Steiner^[4]指出持水率随着垃圾的粒径减小而减小。R. Holmes^[13]发现,填埋垃圾年份增加,垃圾中有机物减少,持水率降低,因此,稳定了的填埋场,即完成生物降解反应的填埋场中垃圾的持水率可能较低。持水率还随上覆压力、压实度及密度等因素变化^[14]。

我国正式发表的文献中,尚未见关于垃圾土持水率的研究,也很少有对持水率试验方法的介绍,这可能与我国现行“城市生活垃圾填埋技术规范(CJJ17-2004)”未对渗沥液面高度进行限制有关。美国的规范明确指出,填埋场内渗沥液面的高度不能超过30cm。

本文首先介绍运行状态下生物催化反应填埋场垃圾土持水率的估算公式、现场大型钻孔法和我国农业对土壤和植株持水率的试验方法,然后提出垃圾土持水率研究的室内试验方法,在此基础上,

对人工配置的垃圾土,通过改变含水率和击实功获得密度不等的垃圾土,并在不同的上覆压力作用下,研究持水率的影响因素和变化规律。

2 持水率的估算和试验方法

MSW是一种多孔介质,即在固体集合体之间贯穿着能够储存和允许液体流动的相互连通的孔隙。降雨和进入填埋场的液体(如地下水渗入和渗沥液回灌)是填埋垃圾的液体输入。渗沥液蒸发、排出和沿衬里裂缝渗出为填埋垃圾的液体输出。液体输入和输出之间的差异即留在垃圾体中的水量,因此,可以采用水量平衡法估算垃圾体的持水率。对于利用渗沥液回灌进行生物催化反应的填埋场(bioreactor landfill),可以认为渗沥液回灌循环稳定后垃圾土中的含水率达到持水率状态下的平衡。因此,运行状态下生物催化反应填埋场垃圾土持水率的估算公式为

$$F_w = \frac{L_0 M + (P - E) + LA - LCH}{M + (P - E) + LA - LCH} \quad (1)$$

式中: F_w 为垃圾土持水率估算值(湿重含水量), L_0 为垃圾土初始含水量(湿重含水量), M 为进入填埋场的垃圾体总重, P 为进入填埋场的雨量(以质量计), E 为填埋场由于蒸发减少的水量(以重量计), LA 为加入填埋场的水量(包含渗沥液回灌量)(以质量计), LCH 为填埋场排出的渗沥液总量(以质量计)。

采用式(1)估算生物催化反应填埋场垃圾土持水率的前提是填埋场运营期间填埋体的渗沥液面不超过渗沥液导流层顶面。对于渗沥液回灌循环稳定后的垃圾体,获得持水率的另一个方法是通过现场大型钻孔^[15]取得不同深度垃圾土样,测其含水率即为持水率。还可测其密度,并得到垃圾土持水率和密度之间的关系。

我国农业方面对于土壤持水率的室内试验方法为环刀法^[16],即用测土壤容重的环刀(体积一般为 100 cm^3)切取原状土样,上下刮平,放在透水石上,置于水中浸泡使之饱和,环刀外水面略低于环刀顶面以防土颗粒被冲出。将装有土的环刀取出,置于透水材料上大于8h,重力水排光后土样的含水率即为持水率。而林业方面对于植株样品,则采用网袋浸水法测定土壤持水率。

3 垃圾土持水率研究的室内试验方法

垃圾土的成分很不均匀, 颗粒直径变化幅度大, 平均直径也比一般土大得多, 采用体积分别为 60 和 100 cm³ 的土工和农业用的环刀切取垃圾试样不合适。垃圾土中含有不少细颗粒, 用网袋浸水法也不合适。

本研究采用土工试验 CBR 击实筒, 筒直径 15.2 cm, 高 17.0 cm。将垃圾土分层装入并击实, 刮平击实筒的上下面, 将其放在铺有滤纸的多孔底座上, 试样顶部也铺上滤纸, 盖上多孔铜板; 将底座及装有试样的击实筒置于水中浸泡超过 12 h, 饱和后提出水面, 搁在透水的金属垫圈上滴水若干小时, 确认重力水排光后, 称总重, 扣除底座、击实筒和多孔顶板的质量, 得到垃圾土的质量, 计算密度。为比较不同初始密度下的垃圾持水率, 需保证垃圾体积不因浸泡而膨胀, 在多孔顶板上放一轻质但有一定刚度的垫块, 垫块顶与击实筒顶平齐, 即垫块高度等于(5.0-1.2) cm = 3.8 cm(5.0 cm 为击实土与击实筒顶距离, 1.2 cm 为多孔板厚)。浸泡时, 在击实筒顶部压上底面积大于击实筒截面积的平底重块, 保证垃圾土样不因浸泡而膨胀。

采用 CBR 筒击实垃圾土样, 克服小体积环刀用于垃圾土试验的缺陷, 模拟垃圾填埋必须经过碾压达到一定压实度的情况, 而且, 通过改变垃圾的组成、级配和含水率, 施加不同的击实功, 还可以研究持水率的影响因素。

本文采用上述方法, 对于同一组成和级配的人造垃圾混合物, 采用不同的击实功和含水率配置不同密度的垃圾土, 将装有垃圾试样的击实筒放在压力机上进行压缩试验, 试样在各级压力下排光重力水, 量测其稳定沉降量及排水量。待最后一级荷载的试验完成后, 对土样进行烘干, 称干土重, 然后从后往前依次加上各级荷载下的排水量, 得到试样的重量, 根据相应的试样体积, 计算各级荷载下垃圾的密度、干密度和持水率。

4 试样的配制

为研究垃圾土持水率的影响因素和变化规律, 采用人工配制垃圾混合物。配制垃圾的优点是重复性好, 可比性强, 外界因素干扰少, 也有利于对试验研究结果进行参数分析。

垃圾组成具有很强的时域性, 与填埋场的地点、产生垃圾的时间、垃圾的年份等因素有关。表 2 为根据文献归纳的部分填埋场的垃圾组成^[15]。通过对表 2 的分析, 结合当地填埋场垃圾土组成, 本文采用的 MSW 组成及材料见表 3。

根据表 3 称取垃圾组成材料, 分别加入干重含水率为 30%, 45% 和 60% 所需水分, 放入桶中搅拌均匀, 密封静置 8 h 以上, 将试样分层放入击实筒, 通过改变层数和每层的击数, 得到密度不等的垃圾试样, 各试样的击实功、含水率与密度归纳于表 4。根据表 4, 在垃圾组成相同的前提下, 影响密度的首要因素是击实功, 本试验击实功最小的试样 2 和

表 2 垃圾填埋场的垃圾组成^[15]

Table 2 Composition of MSW in landfill^[15]

%

资料来源	厨余	草木	废纸	塑料	橡胶	纤维	灰土, 陶瓷	玻璃	金属	其他
天子岭	17.1	4.5	4.2	6.7	0.6	7.6	57.2	0.5	1.2	0.4
金口(陈垃圾)	0.0	1.9	0.7	16.1	0.5	0.9	76.6	1.7	0.6	1.0
北京某填埋场(1990 年)	24.9	4.1	4.6	5.1	-	1.8	56.3	3.1	0.1	-
北京某填埋场(1998 年)	36.2	9.2	17.9	11.4	-	4.2	7.0	10.7	3.4	-
中国南方某填埋场(2001 年)	20.9	1.3	1.7	1.5	-	0.4	73.0	1.0	0.2	-
美国某填埋场(1960 年)	13.8	26.1	34.0	0.4	2.1	2.0	1.5	7.6	12.3	0.2
美国某填埋场(1997 年)	10.1	18.1	38.6	9.9	3.0	3.8	1.5	5.5	7.7	1.8
美国某填埋场(2003 年)	16.4	15.2	26.3	15.4	3.5	5.4	2.2	6.2	7.2	2.2
美国某填埋场(2005 年)	11.9	18.7	34.2	11.8	2.7	4.5	1.5	5.2	7.6	1.9

表3 本研究试验选择的MSW组成
Table 3 Composition of MSW in this study

成分	试验材料	选择配比/%
厨余	米糠	30
纸类	纸箱纸	5
纤维	碎棉布	3
竹木制品	木屑	8
塑料及橡胶	橡胶粒	11
玻璃	玻璃	3
土	混和土	40

表4 各试样的击实功能、含水率和密度
Table 4 Compaction energy, water content and density for each sample

试样	层数×每	击实功能 /(kJ·m ⁻³)	干重含水 率/%	试样密度 /(g·cm ⁻³)
	层击数			
1	3×14	382.4	30	1.17
2	2×7	127.5	45	1.10
3	2×7	127.5	60	1.14
4	3×35	956.0	30	1.24
5	3×35	956.0	60	1.18

3 密度最小。

5 密度与上覆压力的关系

根据试验结果，绘制垃圾土密度与上覆压力关系曲线于图1，根据图1，垃圾密度随上覆压力的增加而增加并趋于稳定，上覆压力由0增至600 kPa，垃圾土的平均密度由1.17 g/cm³(范围值为1.10~1.24 g/cm³)增至1.31 g/cm³(范围值为1.27~1.35 g/cm³)。由图1已知，上覆压力增加到一定程度，垃圾密度趋于稳定，即储存水分的孔隙越来越少，故持水率不再随上覆压力的增加明显减小。为简单起见，假设600 kPa相当于60 m深垃圾产生的上覆压力，将图1垃圾平均密度与上覆压力的关系转化为平均重度与深度关系并绘于图2，由图2可知，本试验结果与涂帆和钱学德^[15]中的曲线相符，试样属中度压实垃圾土。

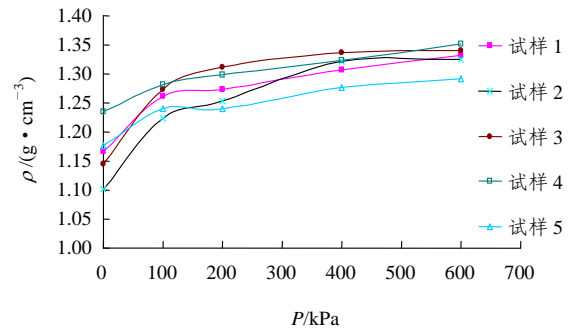


图1 垃圾土密度与压力的关系

Fig.1 Relationship between density and pressure

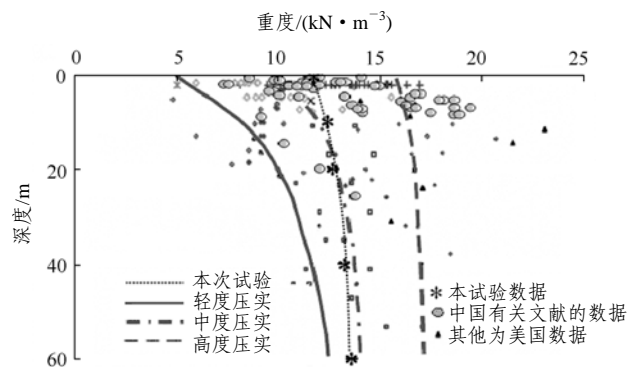


图2 垃圾土重度随填埋深度的变化以及推荐的3条重度分布曲线^[15]

Fig.2 Variation of unit weight with depth and three recommended curves^[15]

6 持水率与上覆压力的关系

按照干重持水率和体积持水率定义，整理试验数据并绘制二者与上覆压力关系曲线于图3，4。由图3可知，上覆压力从0增至600 kPa，干重持水率从(81±7)%减至(51±3)%，且干重持水率随上覆压力增大而减小的趋势变缓。由图4可知，压力从0增至600 kPa，体积持水率由(53.5±3.7)%减至(45.3±2.4)%，一般说来，体积持水率随上覆压力的增大而减小，但趋于定值的现象没有干重持水率的明显。对于初始密度最小的试样2，3，当上覆压力较小时，本试验为小于100 kPa，体积持水率随压力的增大而增大。究其原因，密度小的疏松垃圾土排光重力水后处于非饱和状态。施加上覆压力后，总体积的减少包含水和气体体积的减少，试验时间短，不考虑因生物降解导致的固体体积减少。体积持水率为水体积与总体积之比，当气体体积的减少大于水体积的减少，可能出现分子的减少小于分母减少

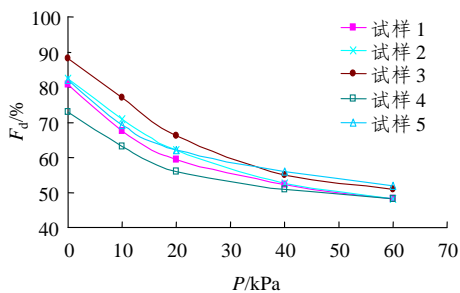


图 3 干重持水率与上覆压力的关系

Fig.3 Relationship between dry gravimetric water holdup and overburden pressure

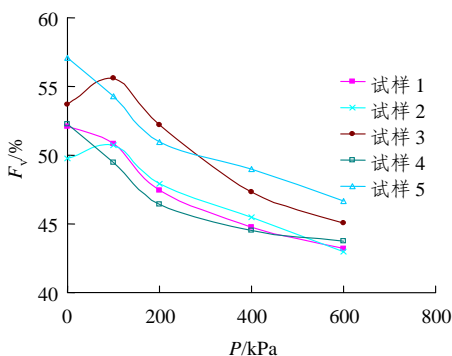


图 4 体积持水率与上覆压力的关系

Fig.4 Relationship between volumetric water holdup and overburden pressure

的情况, 因此体积持水率增大。在其后的较大压力下, 试样趋于或达到饱和, 总体积的减少就是排出水的体积, 因此, 随着压力增大, 体积持水率持续减小。由此还可以得出结论, 垃圾土在疏松状态下的持水率低于饱和含水率, 在较密实和密实状态下的持水率接近或等于垃圾土的饱和含水率。

表 1 所列的国外垃圾土的体积持水率, 除了 M. T. O. de Velasquez 等^[10]的资料外, 其余土的体积持水率为 26.0%~53.0%。根据图 4, 本试验的体积持水率为 43.0%~57.2%, 与表 1 基本相符。

7 持水率与干密度的关系

上覆压力从 0 增至 600 kPa, 试样体积持水率与干密度关系曲线绘于图 5。根据图 5 可知: (1) 初始密度最小的试样 2, 3, 体积持水率与干密度的变化曲线有一个拐点, 即横坐标干密度约为 0.72 g/cm³ 处; (2) 其他 3 个试样的体积持水率均随干密度的增加而减小; (3) 本试验配置的垃圾混合物, 由于不同的含水率和击实功, 初始干密度差异较大, 为

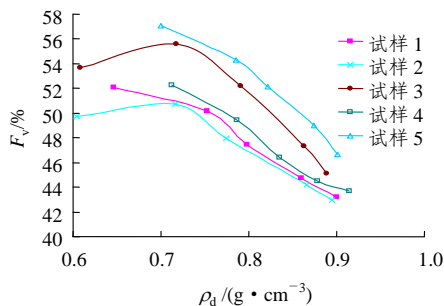


图 5 体积持水率与干密度的关系

Fig.5 Relationship between volumetric water holdup and dry density

0.60~0.72 g/cm³, 但在上覆压力 600 kPa 作用下, 干密度稳定在 0.9 g/cm³ 附近。

体积持水率为垃圾中重力水排光后, 由于毛细力作用留在土中的水体积与总体积之比。干密度增加, 意味着能够容纳水和让水流动的空间减小, 因此, 通常情况下, 持水率随干密度的增加而减小; 但是, 对于初始干密度小的试样, 单位体积垃圾的干质量少意味着能产生吸附水的材料少, 因此, 在一定范围内, 随着干密度增加, 能产生吸附力的材料增加, 持水率有可能增加。干密度大于一定值(本试样为 0.72 g/cm³), 孔隙的体积起了决定作用, 因此, 干密度增大, 持水率减小。由此可以认为, 垃圾的体积持水率受垃圾中孔隙体积和能吸附水的固体垃圾的质量的综合影响, 因此, 图 5 中呈现出二种类型的曲线。

干重和湿重持水率的表达式都是以水的质量为分子。对于同一个试样, 水在上覆压力作用下被挤出, 水减少意味着干密度增加, 因此, 干重和湿重持水率均随干密度的增加而单调递减, 图 6 为湿重持水率与干密度的关系曲线。

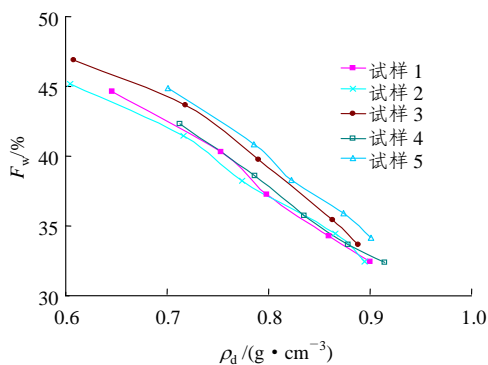


图 6 湿重持水率与干密度的关系

Fig.6 Relationship between wet gravimetric water holdup and dry density

图7为 T. G. Townsend 等^[14]概括的国外垃圾土湿重持水率与干密度关系曲线，其函数表达式^[14]为

$$F_w = 0.2667 + 0.5688 \exp(-0.002252\rho_d) \quad (2)$$

式中： ρ_d 为干密度(kg/m³)。

式(2)只反映干密度对持水率的影响，未考虑其他因素，如垃圾组成、粒径和级配等，具有局限性。

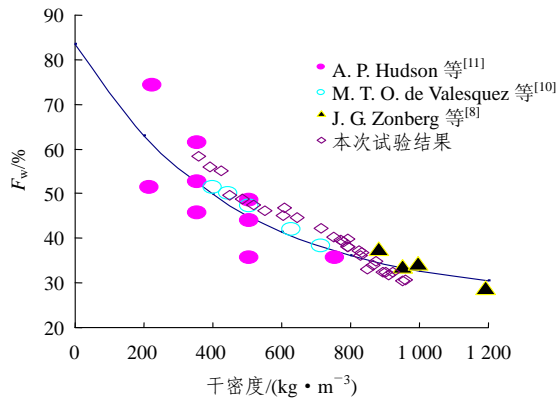


图7 湿重持水率的本次试验数据与相关研究^[8, 10, 11]中函数值的比较

Fig.7 Comparison of wet gravimetric water holdup data between this study and some research^[8, 10, 11] as a function of dry density

为比较，将垃圾湿重持水率与干密度的关系试验结果添加到图7，根据图7，垃圾湿重持水率与干密度的关系与相关研究^[8, 10, 11]中归纳的结果基本相符，对于干密度大于 0.85 g/cm³的情况，本试验的结果有偏小的趋势，这可能与垃圾的组成、试验方法和精度有关。可以认为，本文提出的垃圾土持水率研究室内试验方法可行，本试验配制的垃圾混合物具有一定代表性。

8 结 论

本文提出垃圾土持水率研究的室内试验方法，并对持水率的影响因素进行初步探讨，得到如下结论：

(1) 填埋垃圾的持水率取决于多种因素，如垃圾组成、颗粒级配、垃圾年份、上覆压力、压实度及密度等。

(2) 上覆压力由 0 增至 600 kPa，本试验垃圾土的平均密度由 1.17 增至 1.31 g/cm³，属中度压实垃

圾土。

(3) 垃圾土干重持水率随上覆压力的增大而减小，并趋于稳定值。

(4) 垃圾土体积持水率，一般说来，随上覆压力的增大而减小；疏松状态垃圾土，在上覆压力小于 100 kPa 情况下，体积持水率可能随上覆压力的增大而增大，达到最大值后，再随上覆压力的增大而减小。

(5) 垃圾土湿重持水率随干密度的增大而减小。

(6) 垃圾土体积持水率，一般说来，随干密度的增大而减小；初始干密度小的垃圾土，在一定范围内，体积持水率可能随干密度的增大而增大，达到最大值后，再随干密度的增大而减小。

(7) 垃圾持水率受垃圾中的孔隙体积和能吸附水的垃圾的质量的综合影响。

致谢 厦门市市容环境卫生管理处为本文的撰写提供了资助与部分资料，在此表示感谢！

参考文献(References):

- [1] QIAN X D, KOERNER R. M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2002: 180 - 210.
- [2] 钱学德, 郭志平. 城市固体废弃物(MSW)的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 1 - 6.(QIAN Xuede, GUO Zhiping. Engineering properties of municipal solid waste(MSW)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 1 - 6.(in Chinese))
- [3] ROVERS F A, FARQUHAR G J. Infiltration and landfill behavior[J]. Journal of Environmental Engineering, 1973, 99(5): 671 - 690.
- [4] FUNGAROLI A A, STEINER R L. Investigation of sanitary landfill behavior[R]. Cincinnati, Ohio, U. S.: Environmental Protection Agency, 1979.
- [5] WALSH J J, KINMAN R N. Leachate and gas production under controlled moisture conditions[C]// SHULTZ D W ed. Land Disposal: Municipal Solid Waste, 5th Annual Research Symposium. Cincinnati, Ohio, U. S.: Environmental Protection Agency, 1979: 41 - 57.
- [6] WIGH R J. Boone county field site interim report[R]. Cincinnati, Ohio, U. S.: Environmental Protection Agency, 1979.
- [7] WALSH J J, KINMAN R N. Leachate and gas from municipal solid

- waste landfill simulators[C]// SHULTZ D W ed. Land Disposal: Municipal Solid Waste, 7th Annual Research Symposium. Cincinnati, Ohio, U. S.: Environmental Protection Agency, 1981: 67 - 93.
- [8] ZORNBERG J G, JERNIGAN B L, SANGLERAT T R, et al. Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(7): 583 - 594.
- [9] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo Metropolitan Landfill, Korea[J]. Waste Management, 2002, 22(3): 261 - 267.
- [10] DE VELASQUEZ M T O, CRUZ-RIVERA R, ROJAS-VALENCIA N, et al. Determination of water holdup of municipal solid waste with surcharge simulation[J]. Waste Management and Research, 2003, 21(2): 137 - 144.
- [11] HUDSON A P, WHITE J K, BEAVEN R P, et al. Modeling the compression behavior of landfilled domestic waste[J]. Waste Management, 2004, 24(3): 259 - 269.
- [12] VAIDYA D R. Solid waste degradation, compaction and water holding capacity[M. S. Thesis][D]. Blacksburg, Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [13] HOLMES R. The absorptive capacity of domestic refuse from a full-scale, active landfill[J]. Waste Management, 1983, 73(11): 581 - 586.
- [14] TOWNSEND T G, HIAN P, TOLAYMAT T M. Liquid introduction design criteria for bioreactor landfills[R]. Cincinnati, Ohio: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2006.
- [15] 涂 帆, 钱学德. 中美垃圾填埋场垃圾土的重度、含水量和相对密度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 3 075 - 3 081.(TU Fan, QIAN Xuede. Unit weight, water content and specific gravity of municipal solid waste in China and the U.S.[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 3 075 - 3 081. (in Chinese))
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.(Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978.(in Chinese))
- [17] ZEKOS D, BRAY J D, KAVAZANJIAN E, et al. Unit weight of municipal solid waste[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(10): 1 250 - 1 261.