

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.04.021

南方地区城市生活垃圾导热系数的试验研究

何春木¹, 邱战洪¹, 陈合龙², 熊 浩¹, 朱兵见¹, 刘子振¹

(1. 台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 温度场对垃圾填埋场的衬垫系统、气体运移和垃圾土工程特性等存在显著影响, 导热系数是研究填埋场内温度场的重要参数。以台州卢岙里垃圾填埋场为研究对象, 采用 DRCD-3030 型智能化导热系数测定仪, 测定了不同孔隙率和含水率条件下的垃圾导热系数。试验中, 垃圾试样的含水率分别取 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45% 和 50%; 垃圾的孔隙率分别取 77.8%、75.0%、71.4% 和 66.7%。试验结果表明: 干垃圾导热系数较小, 仅为标准状态空气导热系数的 2.5~3.5 倍, 并随孔隙率的增大而减小; 非饱和垃圾的导热系数随含水率的增加而增大, 当含水率相等时, 孔隙率越小, 垃圾的导热系数越大。根据垃圾导热系数的实测数据, 利用修正几何加权平均模型和线性拟合技术, 建立了垃圾导热系数的计算公式, 可以为垃圾填埋场温度场的研究提供重要参考。

关 键 词: 城市垃圾; 导热系数; 孔隙率; 含水率

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 04 - 1057 - 06

Experimental determination of the thermal conductivity coefficients of municipal solid wastes in South China

HE Chun-mu¹, QIU Zhan-hong¹, CHEN He-long², XIONG Hao¹, ZHU Bing-jian¹, LIU Zi-zhen¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The temperature field can significantly influence the performance of the liner system, the gas migration process and the mechanical behavior of the municipal solid waste (MSW) in a landfill. The thermal conductivity coefficient is the important parameter for determining the temperature field in the landfill site. Using DRCD - 3030 type intelligent thermal conductivity tester, the thermal conductivity coefficients of the MSW sampled from Taizhou Luaoli landfill are determined at different water contents and porosities. In the experiment, the water contents of the samples are targeted to 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% and 50%, respectively, and the porosities are targeted to 77.8%, 75.0%, 71.4% and 66.7%, respectively. The experimental results show that the thermal conductivity coefficient of the dry MSW is generally small, about 2.5-3.5 times that of the air in standard state, and it decreases as the porosity increase. The thermal conductivity coefficient of the unsaturated MSW increases with the increase of water content. At the same water content, the smaller the porosity of MSW, the greater thermal conductivity coefficient. Based on the experimental data, a formulation is developed, using the weighted geometric mean method and the linear curve-fitting method, to calculate the thermal conductivity coefficient, which can provide an important tool for determining the temperature field in a landfill.

Keywords: municipal solid waste (MSW); thermal conductivity coefficient; porosity; water content.

1 引 言

由于垃圾的降解作用, 垃圾填埋体内会产生大量的热。垃圾填埋场温度监测数据表明, 填埋高度在 20~60 m 之间的填埋场, 填埋体内最高温度可达 40~65^[1]。浙江大学岩土工程研究所在苏州市

七子山垃圾填埋场扩建工程现场土工监测中发现, 填埋场内存在较高的温度场, 温度在 30~50 之间^[2]。谢焰等^[3]通过对淮南垃圾填埋场的现场监测也发现, 填埋体内最高温度大约发生在垃圾进场 40 d 后, 可高达到 56 。

现有研究表明: 温度场对垃圾填埋场的衬垫工

收稿日期: 2014-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51108293)。

第一作者简介: 何春木, 男, 1982 年生, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程测试及环境土工方面的研究工作。E-mail: spinglog@tzc.edu.cn

通讯作者: 邱战洪, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: qiuzhanhong@126.com

作性能、气体运移规律和垃圾土工程特性等存在显著影响。在衬垫系统的服役过程中,过高的温度会影响土工合成材料的使用寿命,也会造成衬垫黏土层的干燥、开裂,而引起渗滤液和填埋气体的渗漏^[4];垃圾填埋场的最佳产气温度在 34 到 45 之间,当温度低于 20 或高于 75 ,会明显降低垃圾体的产气率^[5-9];当温度从 20 提高到 35 时,垃圾的压缩系数提高将近两倍^[10]。因此,在研究垃圾填埋场运行中的渗流、沉降、稳定及气体运移等问题时,考虑温度场的影响具有非常重要的现实意义。

垃圾的导热系数是研究垃圾填埋场温度场的重要参数。目前尚未发现关于垃圾导热系数研究的文献,现有研究垃圾填埋场温度场的文献^[1, 11]大都是直接借鉴土的导热系数,缺乏相应的依据。同时,垃圾作为一种多组分、多相多孔介质材料,导热系数受到组分、含水率、孔隙率等多种因素的影响^[12-13]。因此,对垃圾的导热系数进行研究,具有非常重要的实际意义。

目前,岩土导热系数测定还没有统一的国家和行业标准。稳态热流测试法是岩土类介质常用的导热系数测定方法,该方法可以测定不同湿度天然土体的导热系数^[12, 14]。

本文以台州卢岙里垃圾填埋场填埋初期生活垃圾(MSW)为研究对象,现场开挖取样、手工分选确定垃圾组分,采用稳态平板法测定不同孔隙率、不同含水率的垃圾导热系数,给出了垃圾导热系数计算方法。

2 试验原理及方案

2.1 导热系数测定方法

本试验采用 DRCD-3030 型智能化导热系数测定仪测量垃圾导热系数,其工作原理是建立在一维稳态导热基础上,将被测试件垂直放置在两个相互平行具有恒定温度的平板中,在稳定状态下,试件中心测量部分具有恒定热流,通过测定稳定状态下流过计量单元的一维恒定热流量 Q 计算试件热阻 R ,根据试件厚度可准确计算试件材料的导热系数。

当稳态测试法用于测定含湿多孔介质导热系数时,在温度梯度下产生的水分迁移,会对测试结果造成一定的影响。为了减小测试误差,采取了两种措施:增大试样横向尺寸与厚度的比值。研究表明,当试样的横向尺寸为厚度的 6 倍以上时,试样的两侧散热对试样中心温度的影响已在工程允许的误差范围之内;同时试样越薄,低含水率多孔介质

在温度梯度下的水分迁移对测试结果的影响越小。

试样的上、下底采用单层 PE 塑料薄膜(厚度 0.1 mm)封装,可以防止温度梯度下的水分散失。

试验中设定热板温度为 35 ,冷板温度为 15 ,防护温度为 35 。为方便测量并确保测量精度,设计方形试模用以封装垃圾。试模尺寸为 30 cm×30 cm×3 cm,采用 0.3 cm 厚有机玻璃板制作,上、下底采用单层 PE 塑料薄膜(厚度 0.1 mm)封装,防止水分散失。根据传热学理论^[15],试样导热系数为垃圾与塑料薄膜导热系数的串联叠加,可按式(1)计算:

$$\lambda = \frac{t_{PE} \times \lambda_{PE} + t_{MSW} \times \lambda_{MSW}}{t_{PE} + t_{MSW}} \quad (1)$$

式中: λ 为试样导热系数; λ_{PE} 为 PE 塑料薄膜导热系数,取 0.04 W/(m·); λ_{MSW} 为垃圾导热系数; t_{PE} 和 t_{MSW} 为薄膜和垃圾层厚度,分别取 0.2 mm 和 30 mm。根据式(1)可知,垃圾导热系数越小,塑料薄膜的影响越大,本文实测垃圾试样导热系数 λ 最小值为 0.053 W/(m·),代入式(1)可计算出塑料薄膜对垃圾导热系数测试结果的影响为 0.16%,因此,可忽略塑料薄膜的影响,文中认为试样导热系数即是垃圾导热系数。

2.2 取样与分选

试样选自浙江省台州市黄岩区卢岙里垃圾填埋场,以填埋龄期为 1~2 a 的填埋单元为采样区域,随机选择 5 个开挖点,开挖深度为 1.0~3.0 m,每个开挖点取样 100 kg,共计选取 500 kg 垃圾试样,抽样实测垃圾含水率为 25%。

垃圾试样经室外摊铺晾晒后进行手工分选,混合填埋垃圾分类为土石、塑料、玻璃、布、陶瓷、木头、金属、泡沫、骨头等 9 大类^[16]。分选后取不同组分称重,烘干法测定风干垃圾含水率,以计算不同组分的干基含量,试验结果见表 1。

根据各组分体积分数和相对密度,可按式(2)计算出干垃圾的相对密度:

$$G_s = \sum \theta_i d_{si} \quad (2)$$

式中: d_{si} 为垃圾中各组分的相对密度, θ_i 为垃圾中各组分的体积分数,经计算得 $G_s=2.11$ 。

2.3 试样制作与试验方案

取足量垃圾各组分,采用四分法分堆,按质量分数称量相应组分干拌。按试验方案含水率洒水,机械搅拌均匀后装入塑料袋封装备用。

表 1 试样组分质量分数及相对密度
Table 1 Mass fraction and relative density of the sample components

组分	质量分数 /%	体积分数 /%	相对密度
土石	65.0	53.8	2.55
塑料	19.8	29.8	1.40
玻璃	6.9	5.8	2.50
布	3.6	5.1	1.50
陶瓷	1.4	1.1	2.80
木头	1.2	1.7	1.50
金属	1.1	0.3	7.80
泡沫	0.6	2.1	0.60
骨头	0.4	0.4	2.15

在温度变化不大的条件下，影响土壤导热系数的因素可以归结为土颗粒、水分和空气间的比例关系^[17]。鉴于试验条件和工程应用，本文取孔隙率和含水率表征垃圾导热系数的影响因素。我国城市生活垃圾填埋场的实测垃圾孔隙率多在 66.7%~80% 之间，实测垃圾含水率多在 25%~55% 之间^[18-21]。因此，本试验参数选取如下：孔隙率取 66.7%~77.8%，含水率取 0~50%，进行正交试验研究导热系数和影响因素之间的关系，每组 3 个试件、共 44 组 132 个试件。测试结果如表 2 所示。

表 2 垃圾导热系数的测试结果
Table 2 Test results of thermal conductivity coefficient of MSW

编号	孔隙率 n / %	天然密度 ρ /(kg/m ³)	含水率 ω / %	饱和度 S_r / %	导热系数 λ / (W/(m·°C))			
					试件 1	试件 2	试件 3	平均值
1-1	77.8	513.33	0	0.0	0.053	0.059	0.059	0.057
1-2	77.8	539.00	5	3.3	0.071	0.072	0.074	0.072
1-3	77.8	564.67	10	6.6	0.089	0.083	0.095	0.089
1-4	77.8	590.33	15	9.9	0.098	0.094	0.104	0.099
1-5	77.8	616.00	20	13.2	0.097	0.103	0.110	0.103
1-6	77.8	641.67	25	16.5	0.100	0.115	0.134	0.116
1-7	77.8	667.33	30	19.8	0.128	0.128	0.136	0.131
1-8	77.8	693.00	35	23.1	0.138	0.133	0.153	0.141
1-9	77.8	718.67	40	26.4	0.159	0.145	0.172	0.159
1-10	77.8	744.33	45	29.7	0.164	0.155	0.177	0.165
1-11	77.8	770.00	50	33.0	0.174	0.166	0.183	0.174
2-1	75.0	577.50	0	0.0	0.055	0.062	0.060	0.059
2-2	75.0	606.38	5	3.8	0.065	0.081	0.062	0.069
2-3	75.0	635.25	10	7.7	0.079	0.089	0.082	0.084
2-4	75.0	664.13	15	11.6	0.088	0.105	0.099	0.097
2-5	75.0	693.00	20	15.4	0.091	0.121	0.116	0.109
2-6	75.0	721.88	25	19.2	0.098	0.132	0.138	0.123
2-7	75.0	750.75	30	23.1	0.108	0.163	0.144	0.138
2-8	75.0	779.63	35	27.0	0.116	0.161	0.174	0.150
2-9	75.0	808.50	40	30.8	0.129	0.189	0.185	0.168
2-10	75.0	837.38	45	34.6	0.142	0.192	0.183	0.172
2-11	75.0	866.25	50	38.5	0.154	0.206	0.211	0.190
3-1	71.4	660.00	0	0.0	0.063	0.061	0.064	0.062
3-2	71.4	693.00	5	4.6	0.071	0.077	0.071	0.073
3-3	71.4	726.00	10	9.2	0.086	0.086	0.087	0.086
3-4	71.4	759.00	15	13.9	0.088	0.098	0.091	0.092
3-5	71.4	792.00	20	18.5	0.144	0.094	0.104	0.114
3-6	71.4	825.00	25	23.1	0.159	0.116	0.108	0.128
3-7	71.4	858.00	30	27.7	0.174	0.122	0.127	0.141
3-8	71.4	891.00	35	32.3	0.186	0.133	0.143	0.154
3-9	71.4	924.00	40	37.0	0.216	0.141	0.163	0.173
3-10	71.4	957.00	45	41.6	0.219	0.154	0.164	0.179
3-11	71.4	990.00	50	46.2	0.205	0.160	0.164	0.176
4-1	66.7	770.00	0	0.0	0.060	0.068	0.071	0.066
4-2	66.7	808.50	5	5.8	0.069	0.076	0.100	0.081
4-3	66.7	847.00	10	11.6	0.082	0.085	0.112	0.093
4-4	66.7	885.50	15	17.3	0.092	0.090	0.116	0.099
4-5	66.7	924.00	20	23.1	0.104	0.102	0.132	0.113
4-6	66.7	962.50	25	28.9	0.113	0.118	0.148	0.126
4-7	66.7	1 001.00	30	34.7	0.135	0.123	0.166	0.141
4-8	66.7	1 039.50	35	40.4	0.151	0.149	0.174	0.158
4-9	66.7	1 078.00	40	46.2	0.175	0.166	0.195	0.179
4-10	66.7	1 116.50	45	52.0	0.190	0.176	0.206	0.190
4-11	66.7	1 155.00	50	57.8	0.208	0.199	0.207	0.204

3 试验结果分析

3.1 孔隙率对干垃圾导热系数的影响

根据试验结果，绘制干垃圾导热与孔隙率关系图如图 1。图中，数据点对应不同孔隙率垃圾的 3 个试件测试结果平均值。试验中，孔隙率分别取 77.8%、75.0%、71.4%和 66.7%。

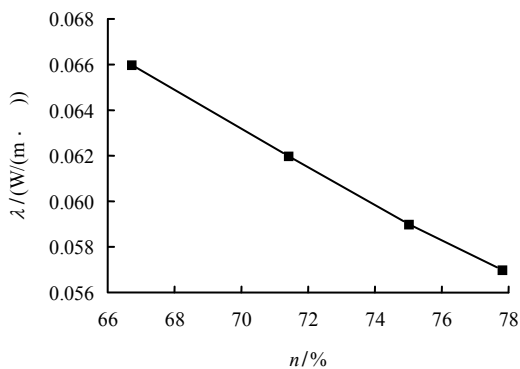


图 1 干垃圾(ω=0)导热系数与孔隙率关系曲线
Fig.1 Curve of thermal conductivity coefficient and porosity in dry MSW

由图 1 可知，干垃圾的导热系数随孔隙率的增大而逐渐减小。本试验的干垃圾体积主要由土石、塑料、空气 3 部分构成，根据现有文献^[12, 15, 17]，标准状态（0 °C，1 个大气压）下三者的导热系数分别取 2.00、0.20、0.02 W/(m·°C)，实测干垃圾导热系数在 0.053 ~ 0.071 W/(m·°C) 之间，孔隙率越大，空气体积含量越高，干垃圾的导热系数越小。

3.2 含水率对导热系数的影响

图 2 分别为 n=77.8%、75.0%、71.4%和 66.78% 4 种孔隙率下垃圾导热系数（取 3 个试件测试结果的平均值）与含水率的关系。

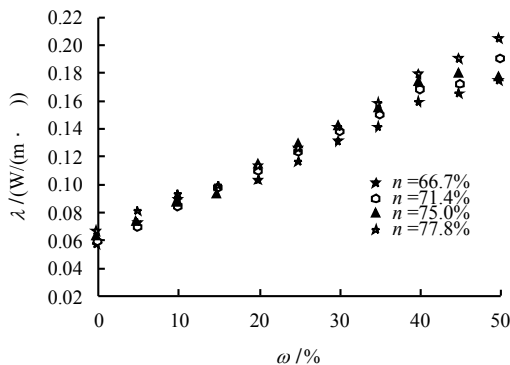


图 2 垃圾导热系数与含水率关系
Fig.2 Variations of thermal conductivity coefficient with water content of MSW

由图可知，垃圾导热系数随含水率的增大而增大。水的导热系数是标准状态下空气导热系数的 30

倍，加上水分在土体颗粒与气体的接触面上可形成水膜，减小接触热阻，导致当松散土体孔隙中的气体被水分代替后，整体的导热系数也随之增大。

4 垃圾导热系数计算方法

4.1 干垃圾导热系数的计算公式

混合物导热系数的基本计算原理：由不同组分组成的混合物，各组分在空间上可以同时占有同一个域，且各组分都在该区域内遵守统一的守恒方程，混合物的性质则由各组分按体积分数加权平均得到。根据各组分纯物质的导热系数贡献形式不同，主要有 3 种评价方法^[15]：

(1) 体积加权平均模型（串联模型）：

$$\lambda_e = \sum \theta_i \lambda_i \tag{3}$$

(2) 体积加权平均模型（并联模型）：

$$1/\lambda_e = \sum \theta_i / \lambda_i \tag{4}$$

(3) 几何加权平均模型：

$$\lambda_e = \prod \lambda_i^{\theta_i} \tag{5}$$

式中： λ_e 为混合物有效导热系数； θ_i 和 λ_i 为第 i 种物质的体积分数和导热系数。

考虑干垃圾 3 种主要组分（土石、塑料、空气）的影响，把式 (3)~(5) 模型的预测结果和实测结果绘制在一起，如图 3 所示。

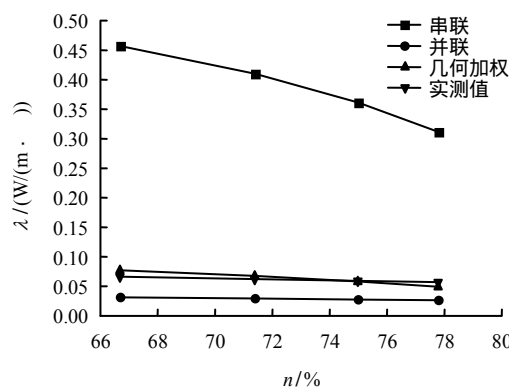


图 3 3 种模型预测结果的对比
Fig.3 Comparison of predicted results from three models in literature^[15]

由图可见，与实测结果相比，体积加权平均模型（串联模型）和体积加权平均模型（并联模型）的预测结果偏差极大；几何加权平均模型预测结果的精度较高，但在孔隙率较大或较小时，预测结果与实测结果偏差较大，分别为 13.7%和 17.0%。

为了进一步提高模拟精度，本文在几何加权平均模型的基础上引入 α 、 β 、 γ 经验参数，反映垃

圾结构和孔隙分布形式等复杂因素对导热系数的影响，给出修正的几何加权平均模型为

$$\lambda_{dry} = \lambda_s (\theta_s)^\alpha \lambda_p (\theta_p)^\beta \lambda_g n^\gamma \quad (6)$$

式中： λ_{dry} 为干垃圾导热系数 ($W/(m \cdot)$)； n 为孔隙率； λ_s 、 λ_p 、 λ_g 分别为土石、塑料、空气导热系数，标准状态下分别为 2.0、0.2、0.02； θ_s 、 θ_p 为垃圾中土石和塑料的体积分数； α 、 β 、 γ 为经验参数。

采用式 (6) 拟合本文的试验结果，拟合结果见图 4，经验参数取值 $\alpha=0.95$ ， $\beta=1.99$ ， $\gamma=0.81$ ，相关系数 $R^2=0.999$ 。

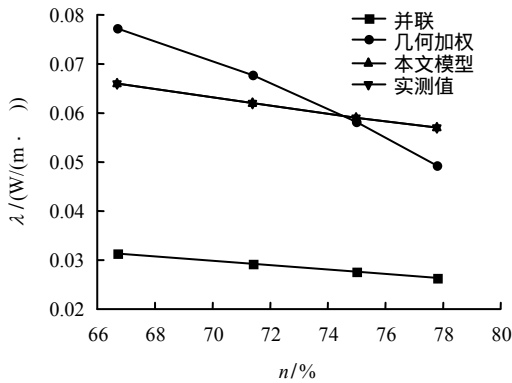


图 4 本文模型与其他模型预测结果对比
Fig.4 Comparison of the results between proposed and other models

由图可知，现有的体积加权平均模型（并联模型）和几何加权平均模型的预测结果与实测结果有较大偏差。

4.2 非饱和垃圾导热系数的计算公式

根据表 2，4 种不同孔隙率的垃圾导热系数实测值与含水率的关系如图 2 所示。由图可知：4 种不同孔隙率的垃圾导热系数都随含水率的增加而增大，且基本服从线性关系；当含水率相等时，孔隙率越小，垃圾的导热系数越大。

因此，为了计算方便，本文采用以下线性方程拟合非饱和垃圾导热系数和含水率的关系：

$$\lambda_\omega = (an + b)\omega + \lambda_{dry} \quad (7)$$

式中： λ_ω 为非饱和垃圾导热系数 ($W/(m \cdot)$)； a 、 b 为经验参数，考虑孔隙率对垃圾导热系数的影响； ω 为含水率 (%)。

根据回归分析结果， $a=3.5 \times 10^{-5}$ 、 $b=5.1 \times 10^{-3}$ ，相关系数 $R^2=0.997$ 。拟合曲线如图 5 所示，当含水率 $\omega=0$ 时，图中截距就是干垃圾的导热系数。

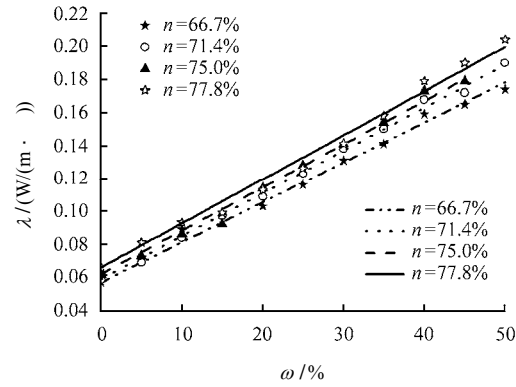


图 5 非饱和垃圾导热系数与含水率拟合曲线
Fig.5 Curves of thermal conductivity coefficient vs. water content of unsaturated MSW

5 结 论

(1) 卢杏里填埋场垃圾塑料类组分含量高，孔隙率大，实测干垃圾导热系数在 0.053 ~ 0.071 $W/(m \cdot)$ 之间，仅为标准状态空气导热系数的 2.5 ~ 3.5 倍；随着孔隙率的增大，干垃圾导热系数逐渐减小。

(2) 非饱和垃圾导热系数随含水率的增加而增大，基本呈线性关系；当含水率相等时，孔隙率越小，垃圾的导热系数越大；

(3) 实测结果相比，现有文献中的体积加权平均模型（串联模型）和体积加权平均模型（并联模型）的预测结果偏差极大；在孔隙率较大或较小时，几何加权平均模型的预测结果与实测结果偏差较大，分别为 13.7%和 17.0%；

(4) 根据修正几何加权模型建立的垃圾导热系数经验公式，可较好地模拟垃圾导热系数的试验结果；经拟合分析，模型参数可取 $\alpha=0.95$ ， $\beta=1.99$ ， $\gamma=0.81$ ， $a=3.5 \times 10^{-5}$ 、 $b=5.1 \times 10^{-3}$ 。

由于试验方法术的限制，本文未测定高含水率、低孔隙比条件下垃圾的导热系数，今后需继续开展高含水率、不同填埋龄期、不同组分垃圾导热系数试验研究，进一步科学确定模型参数，完善垃圾导热系数计算方法。

参 考 文 献

[1] HANSON JAMES L, YEILLER NAZL, OETTLE NICOLAS K. Spatial and temporal temperature distributions in municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(8): 804 - 814.

[2] 陈云敏, 詹良通. 苏州七子山填埋场二期工程特殊土工测试报告[R]. 杭州: 浙江大学岩土工程研究所,

- 2006.
- [3] 谢焰, 许光泉, 蔡劲松. 淮南垃圾填埋场固液气热特性[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(5): 34 - 37, 41.
XIE Yan, XU Guang-quan, CAI Jin-song. Characteristics of MSW on solid-liquid-gas-heat in Huainan landfill[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2010, 38(5): 34 - 37, 41.
- [4] ROWE R K. Long-term performance of containment barrier system[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(9): 631 - 678.
- [5] DEWALLE F B, CHIAN E S K, HAMMERBERG E. Gas production from solid waste in landfills[J]. **Journal of the Environment Engineering Divison-ASCE**, 1978, 104(3): 415-432.
- [6] REES J F. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter[J]. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 1980, 30(4): 161 - 175.
- [7] REES J F. Optimisation of methane production and refuse decomposition in landfills by temperature control[J]. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 1980b, 30(8): 458 - 465.
- [8] HARTZ K E, KLINK R E, HAM R K. Temperature effects: Methane generation from landfill samples[J]. **Journal of the Environment Engineering Divison-ASCE**, 1982, 108(4): 629 - 638.
- [9] MATA-ALVAREZ J, MARTINEZ-VITURRIA A. Laboratory simulation of municipal solid waste fermentation with leachate recycle[J]. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 1986, 36(12): 547 - 556.
- [10] LAMOTHE D, EDGERS L. The effects of environmental parameters on the laboratory compression of refuse [C]// Proceedings of 17th International Madison Waste Conference Department of Engineering Professional Development. Madison: University of Wisconsin, 1994: 592 - 604.
- [11] HANSON J L, LIU W L, YESILLER N. Analytical and numerical methodology for modeling temperatures in landfills[J]. **Geotechnics of Waste Management and Remediation**, 2008, (177): 24 - 31.
- [12] 俞亚南, 徐坚, 冯建江. 粉性土导热系数的室内实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(1): 180 - 183.
YU Ya-nan, XU Jian, FENG Jian-jiang. Laboratory experiment on thermal conductivity of silty clay[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2010, 44(1): 180 - 183.
- [13] 刘为民, 何平, 张钊. 土体导热系数的评价与计算[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 770 - 773.
LIU Wei-min, HE Ping, ZHANG Zhao. A Calculation Method of Thermal Conductivity of Soils[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2002, 24(6): 770 - 773.
- [14] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 655 - 658.
WANG Tie-hang, LIU Zi-cheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 655 - 658.
- [15] ZHU M. Modeling and simulation of frost heave in frost-susceptible soils[D]. Michigan: University of Michigan, 2006.
- [16] ZHU BING-JIAN, QIU ZHAN-HONG, XIONG HAO, et al. Effect of water content on the shear strength parameters of municipal solid waste[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 18: 1181 - 1188.
- [17] 原喜忠, 李宁, 赵秀云, 等. 非饱和(冻)土导热系数预估模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2689 - 2694.
YUAN Xi-zhong, LI Ning, ZHAO Xiu-yun, et al. Study of thermal conductivity model for unsaturated unfrozen and frozen soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2689 - 2694.
- [18] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35 - 39.
ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-ming. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 35 - 39.
- [19] 张文杰, 陈云敏, 邱战洪. 垃圾土渗透性和持水性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3313 - 3317, 3323.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, QIU Zhan-hong. Laboratory and field tests on hydraulic properties of landfilled waste[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3313 - 3317, 3323.
- [20] 邱战洪, 何春木, 朱兵见, 等. 不同降雨模式下山谷型垃圾填埋场水分运移及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3151 - 3155, 3170.
QIU Zhan-hong, HE Chun-mu, ZHU Bing-jian, et al. Investigations of water transport in valley-type landfills and their stabilities subject to various rainfall pattern[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 3151 - 3155, 3170.
- [21] 张文杰, 林午, 董林兵. 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶模型试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1263 - 1268.
ZHANG Wen-jie, LIN Wu, DONG Lin-bing. Model test of a capillary barrier evapotranspiration cover for landfills [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1263 - 1268.