

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.005

垃圾土热传导特性随含水率的变化规律

施建勇^{1,2}, 钱正亚^{1,2}, 艾英铎^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究垃圾土的热传导特性, 基于瞬态法, 采用室内试验方法研究含水率、孔隙比、有机物质质量分数对垃圾土导热系数的影响规律。结果表明: 随着饱和度增加, 导热系数增大; 相同有机物含水率时孔隙比增加, 导热系数减小; 相同孔隙比时有机物质质量分数增加, 导热系数减小; 饱和度从干燥状态开始增加到接近残余饱和度, 导热系数增加很快; 饱和度继续增加, 导热系数稳定增加。
关键词: 垃圾土; 导热系数; 瞬态法; 饱和度; 有机成分; 孔隙比; 室内试验; 预测公式
中图分类号: TU411; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)02-0119-06

Investigation on the change law of thermal conductivity with water content in municipal solid waste

SHI Jianyong^{1,2}, QIAN Zhengya^{1,2}, AI Yingbo^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The thermal conductivity of municipal solid waste (MSW) is the basis of heat accumulation and migration in landfill, but it is lack of researches on the MSW thermal conductivity at present. Therefore, the thermal conductivity under different influence factors, which are water content, void ratio and mass fraction of organic matter, was carried out by the transient method in this study. The research results show that the coefficient of MSW thermal conductivity increases with the increase of saturation degree, while it decreases with the increase of void ratio under a same content of organic component. What's more, the coefficient of thermal conductivity decreases with the increase of organic content when the void ratio is constant. When the degree of saturation increases from the dry state to the residual degree of saturation, the thermal conductivity coefficient increases quickly. Then, as the saturation continually increases, the conductivity coefficient increases steadily.
Key words: municipal solid waste (MSW); thermal conductivity coefficient; transient method; degree of saturation; organic component; void ratio; experiment; predicting equation

垃圾土中有机成分降解会产生热^[1-2], 热会在垃圾体内集聚和运移^[3-7]。Hanson 等^[8] 基于垃圾填埋场温度监测成果, 选取产热速率函数和垃圾土热传导系数, 进行填埋场温度分布规律计算分析, 为进行填埋体温度调节打下基础。垃圾土导热系数是反映垃圾土中热运移速度和影响范围的主要参数之一, 国内外开展垃圾土导热系数的研究还很少。垃圾土是与土类似的散粒材料, 两者最主要区别是垃圾土中含有大量的有机成分, 但导热系数变化规律研究方法可以借鉴。
目前针对土导热特性开展了大量的研究^[9-15]。庄迎春等^[9] 采用非稳态的平板探针法测量了砂土、膨润

基金项目: 国家自然科学基金(41530637)
作者简介: 施建勇(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn
引用本文: 施建勇, 钱正亚, 艾英铎. 垃圾土热传导特性随含水率的变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 119-124.
SHI Jianyong, QIAN Zhengya, AI Yingbo. Investigation on the change law of thermal conductivity with water content in municipal solid waste[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 119-124.

土及其水泥混合材料的热传导性能。王铎等^[10]用热脉冲法测量了黏土、粉土、砂土的导热系数,试验结果表明黏土的导热系数最低,砂土的导热系数最高。陈宝等^[11]对不同孔隙比粉质黏土导热系数进行了试验研究,认为孔隙比越大,导热系数越小。肖琳等^[12]对粉质土的导热系数随孔隙率、含水率的变化规律进行了试验研究;当含水率小于某一临界含水率时,导热系数随着含水率的变化较为剧烈;超过临界含水率时,导热系数的变化趋于稳定。Smits 等^[13]、Lu 等^[14]、Likos^[15]利用探针法进行砂土导热系数随含水率变化的试验研究,得到导热系数随含水率变化曲线,结合土水特征曲线分析了导热系数随含水率变化的内在机理。

综上,含水率是影响土体导热系数的主要因素之一,土体导热系数随含水率变化除试验研究外,数学模型研究也得到发展^[14-20]。Kersten^[16]在 1949 年利用热线法测量了 19 种土的导热系数,拟合出砂土和黏土的导热系数随含水率变化的经验模型。Johansen^[17]提出了与饱和度相关的归一化系数 K_e ,由干燥状态的导热系数 λ_{dry} 和饱和时的导热系数 λ_{sat} 加权平均计算不同含水率时的导热系数。Cote 等^[18]在 Johansen 模型基础上提出可以考虑土性的 K_e 和 λ_{dry} 的新公式。Lu 等^[14]通过室内试验测试了 12 种不同土的导热系数,根据试验结果建立了简化的干土导热系数和 K_e 的表达式。Wiener^[19]将组成土体的气相、液相、固相假设成串联、并联组合的热阻,得到导热系数的上、下限。Devries^[20]根据土体三相的体积分数和土颗粒形状,得到导热系数关于体积分数的加权平均计算方法。Likos^[15]将导热系数随含水率变化分为 3 个阶段,根据土水特征曲线的 BC 模型建立了土体导热系数随基质吸力变化的分段函数。

垃圾土导热系数受含水率、孔隙比、有机质含量等因素的影响,其导热系数变化规律与土质相关。国外的研究文献只有垃圾填埋场现场试验资料^[3, 21-23],在数值分析文献中可以查到垃圾土的导热系数^[24-25],还没有室内试验的相关报道,更没有含水率对垃圾土导热特性影响规律分析方法的研究。

本文通过垃圾土导热特性试验探索含水率、孔隙比、有机物质量分数对垃圾土导热系数的影响规律,揭示垃圾土导热系数变化的内在机理,并建立垃圾土导热系数随含水率变化的预测公式,定性分析影响垃圾土热传导特性的主要因素。

1 试验材料与方法

根据我国垃圾分拣的统计资料^[26],试验选择有机物质量分数分别为 60%、40%、30% 的垃圾土,试样组分配比见表 1。

根据填埋场不同深度孔隙比分布和垃圾土的压缩试验,取垃圾孔隙比为 2.8、2.0、1.5^[27],试样的初始条件见表 2。

表 1 垃圾土试样各组分干质量分数

Table 1 Waste components of the samples (dry weight) %						
有机物质量 分数	有机物			无机物		
	麦麸	木屑	废纸	塑料	土	玻璃
30	12.50	7.50	2.50	7.50	61.25	8.75
40	16.67	10.00	3.33	10.00	52.50	7.50
60	25.00	15.00	5.00	15.00	35.00	5.00

试验仪器采用 DRE-2C 型导热系数测试仪^[12],瞬态平面热源法的探头是由导电金属镍组成的双螺旋结构的圆形薄片,直径为 15 mm,厚度为 0.16 mm。探头同时作为温度传感器和热源,该技术测试方便且测试导热系数的范围较大。仪器经过标准试样的测试和配样的重复试验检测,性能稳定,测试结果准确可信。

2 试验结果与分析

由图 1 可见,从干燥状态开始随着饱和度增加,导热系数增幅先小后大,饱和度接近 1.0 时增大的幅度基本稳定。这是因为垃圾土是多组分散粒材料,按照孔隙直径由小到大,分为

表 2 试样初始控制条件

Table 2 Initial conditions of the samples		
试样 编号	有机物 质量分数/%	孔隙比 e
S1	30	1.5
S2	30	2.0
S3	40	2.0
S4	40	2.8
S5	60	2.8

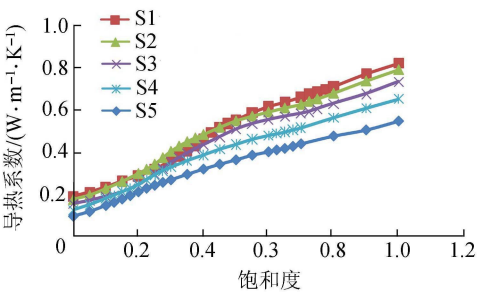


图 1 导热系数与饱和度关系曲线
Fig. 1 Variations of thermal conductivity with degree of saturation

胞粒内、团粒内、团粒间三类孔隙(图 2(a)),对孔隙水的吸力则由大到小排列。当含水率由零开始增加,孔隙水首先在胞粒内小孔隙中分布,孔隙水增加只是充填胞粒内孔隙,团粒内、团粒间孔隙仍处于空气填充状态,不能形成连续的传热路径,导热系数随饱和度增加较慢(图 2(b));饱和度继续增加,孔隙水开始充填团粒内中等直径孔隙,形成团粒内水的连续通道,加快团粒内传热路径的联通,导热系数随饱和度增加较快(图 2(c));饱和度再增加,孔隙水开始分布于团粒表面,团粒内的水连续通道仍是传热的主要路径,增加的团粒间的水连续通道对传热的改善作用有限,导热系数随饱和度增加减慢(图 2(d));当接近饱和状态时,水开始在团粒间分布,形成团粒间的水连续通道,导热系数随饱和度增加趋于稳定。垃圾土的导热系数变化范围为 0.1~0.8 W/(m·K)。

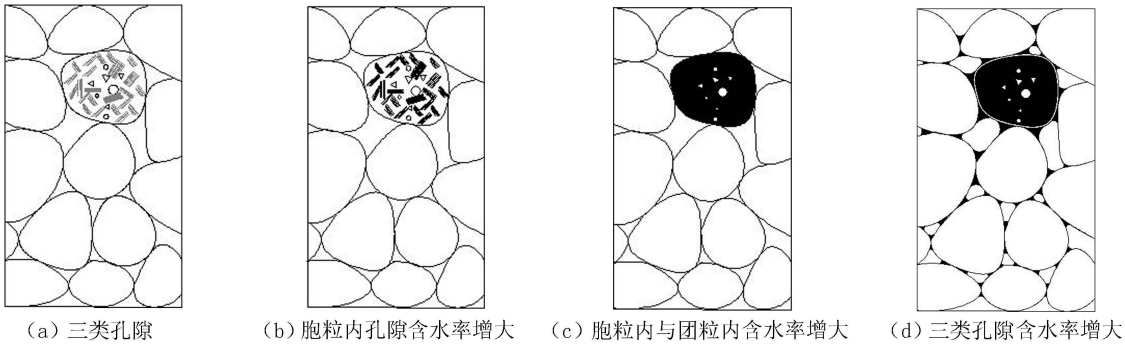


图 2 垃圾土孔隙结构和饱和度变化示意图

Fig. 2 Schematic drawing of variations of the pore structure and the saturation degree

Smits 等^[13]和 Lu 等^[14]分别用悬挂柱法测量了砂土和黏土的导热系数随含水率变化规律,得出导热系数随着含水量的增加而增加,与本试验得到的垃圾土导热系数的变化规律基本一致。

图 3 是导热系数增量随饱和度变化曲线,反映了导热系数变化与饱和度变化的规律,大致表现了导热系数变化随饱和度增加缓慢增大、快速增大、增大减慢到稳定变化的过程。

导热系数增量最大和变化趋稳的饱和度分界点见表 3,由表可知,导热系数变化最大点的饱和度接近残余饱和度,导热系数变化趋稳点饱和度接近反弯点饱和度^[27-28]。

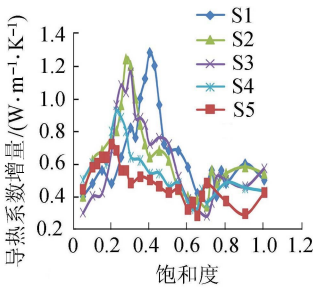


图 3 导热系数增量与饱和度关系曲线

Fig. 3 Variations of increment in thermal conductivity with degree of saturation

表 3 导热系数变化最大和变化趋稳分界点的饱和度

Table 3 Saturation degrees at points of maximum increment and stable change in coefficients of thermal conductivity

试样 编号	饱和度	
	变化最大	变化趋稳
S1	0.40	0.70
S2	0.30	0.70
S3	0.30	0.70
S4	0.25	0.65
S5	0.20	0.65

干燥状态下和饱和状态下的砂土导热系数分别为 0.299 W/(m·K)和 2.946 W/(m·K);黏土的导热系数在干燥状态下和饱和状态下分别为 0.432 W/(m·K)和 1.157 W/(m·K),均比垃圾土的导热系数要大^[16-17]。Hanson 等^[22]采用自制的大型热探针测量得出现场垃圾土的导热系数在 0.1~0.7 W/(m·K)之间。Lefebvre 等^[23]测量了 23 个现场垃圾土的导热系数,约为 0.1 W/(m·K)。Yoshida 等^[3]测得垃圾的导热系数约 0.35~0.96 W/(m·K)。Faitli 等^[21]测得垃圾的导热系数在 0.24~1.15 W/(m·K)之间。本次试验得到的垃圾土导热系数与已有研究文献资料成果基本相符。

相同有机物质量分数、不同孔隙比垃圾土试验得到的导热系数见图 4。由图 4 可见,孔隙比增加,导热系数减小。因为孔隙比增加,颗粒间的距离增大,热传导的途径减弱,导热系数变小。由图 4(a)、4(b)对比可见,孔隙比和孔隙比差越大,导热系数的差越大。而且有机物质量分数越高,热传导特性随孔隙比增加弱

化现象越明显。

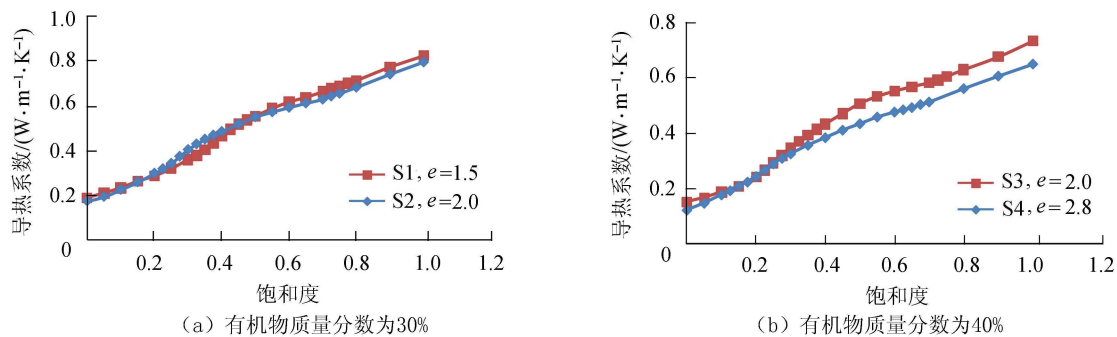


图4 孔隙比对垃圾土导热系数影响

Fig.4 Influence of void ratio on the thermal conductivity of MSW

相同孔隙比不同有机物质量分数垃圾土试验得到的导热系数见图5。由图5可见,有机物质量分数增加,导热系数减小。因为有机物对热传导弱敏感,其质量分数增加,垃圾土的热传导特性减弱,导热系数变小。孔隙比越大,热传导系数随有机物质量分数增加减小越明显。

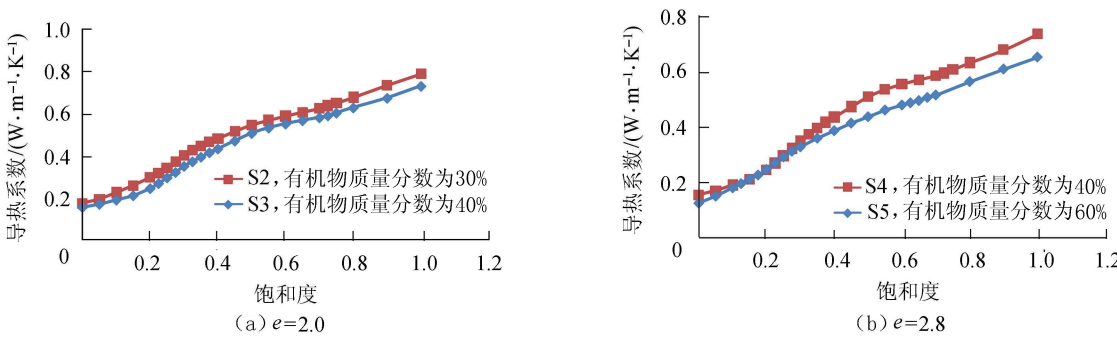


图5 有机物质量分数对垃圾土导热系数影响

Fig.5 Influence of organic component on the thermal conductivity of MSW

Lu 等^[14]在利用土体土水特征曲线(SWCC)计算导热系数:

$$\lambda = \lambda_{\text{dry}} + (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) \exp[\alpha(1 - S_r^{\alpha-1.33})] \tag{1}$$

式中: λ ——导热系数; λ_{dry} 、 λ_{sat} ——干燥状态、饱和状态的导热系数; S_r ——残余饱和度; α ——拟合参数,取值范围为0.55~0.60。

串联、并联的导热系数^[22]:

$$\lambda_c = \sum \varphi_\alpha \lambda_\alpha \qquad \frac{1}{\lambda_B} = \sum \frac{\varphi_\alpha}{\lambda_\alpha} \tag{2}$$

式中: λ_c 、 λ_B ——串联、并联情况下的导热系数; φ_α ——垃圾土中某一成分的体积分数; λ_α ——该成分的导热系数,其中,土、麦麸、木屑、废纸、塑料、玻璃、空气、水的导热系数分别为2.5 W/(m·K)、0.05 W/(m·K)、0.05 W/(m·K)、0.1 W/(m·K)、0.2 W/(m·K)、1 W/(m·K)、0.026 W/(m·K)、0.6 W/(m·K)。

由式(1)(2)可以计算得到垃圾土导热系数与饱和度规律,如图6所示。由图6可见,与试验结果相比,串联模型计算结果偏大,并联模型计算结果偏小。Lu模型计算结果较接近试验结果,但也有较大差距。

建立垃圾土导热系数预测公式:

$$\lambda_e = \eta \lambda_c + (1 - \eta) \lambda_B \tag{3}$$

其中

$$\eta = \frac{\eta_1 - \eta_2}{1 + (s/s_f)^p} + \eta_2$$

式中: η ——插值,依赖于土体的孔隙结构、含水率等,且 $0 < \eta < 1$;

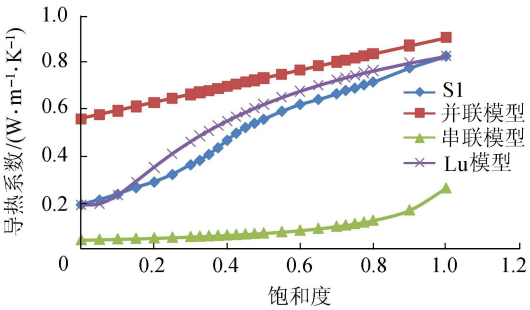


图6 现有模型计算结果对比曲线

Fig.6 Comparison of the test results with existing models

η_1 、 η_2 、 p ——拟合参数; s_f ——参考饱和度; s_r ——饱和度。

根据式(3)计算和 SWCC 试验结果^[27-28]拟合的相关参数见表 4。

表 4 构建预测公式拟合参数与实测值

Table 4 Fitted and measured values of parameters in the predicting equation							
试样编号	η_1	η_{dry}	η_2	η_{sat}	s_f	s_r	p
S1	0.32088	0.29109	0.89692	0.87715	0.37532	0.39250	2.92025
S2	0.34063	0.32082	0.88932	0.89771	0.26551	0.30330	2.69796
S3	0.35391	0.33396	0.90891	0.92115	0.28307	0.29130	3.54253
S4	0.35471	0.32707	0.84796	0.81198	0.20810	0.24035	2.48993
S5	0.37962	0.35635	0.85770	0.79703	0.15284	0.21877	2.50228

注: η_{dry} 为干燥状态下的系数; η_{sat} 为饱和状态下的系数 η_o 。

由表 4 可知, η_1 与干燥状态下的系数 η_{dry} 接近,拟合参数 η_2 与饱和状态下的系数 η_{sat} 接近, s_f 接近残余饱和度 S_r 。拟合参数 p 取值在 2.5 ~ 3.5 之间。实际计算时,拟合参数 η_1 取干燥状态下的系数 η_{dry} ,拟合参数 η_2 取饱和状态下的系数 η_{sat} ,参考饱和度取残余饱和度 S_r ,拟合参数 p 取 3.0。

结合式(2) ~ (4) 可以求得垃圾土的导热系数,如图 7 所示。

由图 7 可见,Lu 模型预测的热传导系数与试验结果的最大相差 10.1%,本文的预测公式与试验结果的最大相差 2.7%。由图 7 可见,预测公式比 Lu 模型能更好地计算垃圾土导热系数随饱和度变化的规律。

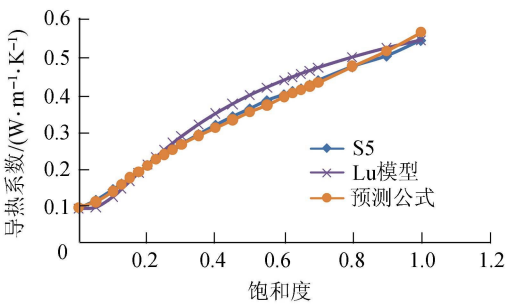


图 7 模型计算与试验结果对比曲线
Fig.7 Comparison of models and tests

3 结 论

- a. 随着饱和度增加,导热系数增大。垃圾土是多组分散粒材料,孔隙直径有胞粒内、团粒内、团粒间三类;随着含水率增加,孔隙水首先在胞粒内小孔隙中分布,导热系数随饱和度增加比较慢;饱和度继续增加,孔隙水充填团粒内中等直径孔隙,在团粒内形成传热路径的联通,导热系数随饱和度增加较快;饱和度再增加,孔隙水开始分布于团粒的表面,团粒间的水连续通道增加对传热的作用有限,导热系数随饱和度增加减慢,并趋于稳定。
- b. 相同有机物质量分数时孔隙比增加,导热系数减小;有机成分含量越高,热传导特性随孔隙比增加弱化现象越明显。相同孔隙比时有机成分增加,导热系数减小。
- c. 预测公式比 Lu 模型能更好地计算垃圾土导热系数随饱和度变化的规律。

参考文献:

[1] PIRTS J. Aerobic and anaerobic microbial digestion in waste reclamation[J]. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology, 1978, 28(2): 232-236.

[2] EL-FADEL M, FINDIKAKIS A N, LECKIE J O. Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in sanitary landfills. I: model formulation[J]. Waste Management & Research, 1996, 14(5): 483-504.

[3] YOSHIDA H, ROWE R K. Consideration of landfill liner temperature [C]//CHRISTENSEN T H. Proceedings of 9th International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari: CISA, 2003:1-9.

[4] HANSON J L, CHRYSOVERGIS T S, YESILLER N, et al. Temperature and moisture effects on GCL and textured geomembrane interface shear strength[J]. Geosynthetics International, 2015, 22(1): 110-124.

[5] JAFARI N H, STARK T D, ROWE K R. Service life of HDPE geomembrane subjected to elevated temperatures[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2014, 18(1): 16-26.

[6] HUBERT J, LIU X F, COLLIN F. Numerical modeling of the long term behavior of municipal solid waste in a bioreactor for landfill[J]. Computer Geotechnics, 2016, 72: 152-170.

[7] YESILLER N, HANSON J L, KOPP K B, et al. Heat management strategies for MSW landfills[J]. Waste Management, 2016, 56: 246-254.

[8] HANSON J L, LIU W L, YESILLER N. Analytical and numerical methodology for modeling temperatures in landfills [J]. Geotechnical Special Publication, 2008, 78(177): 2599-2604.

- [9] 庄迎春, 谢康和, 孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2):261-264. (ZHUANG Yingchun, XIE Kanghe, SUN Youhong. Experimental study on thermal conductivity of mixed materials of sand and bentonite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2):261-264. (in Chinese))
- [10] 王铎, 王全九, 樊军, 等. 土壤导热率测定及其计算模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):78-84. (WANG Shuo, WANG Quanjiu, FAN Jun, et al. Soil thermal properties determination and prediction model comparison [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 78-84. (in Chinese))
- [11] 陈宝, 许邹, 姚聪琳, 等. 上海⑤₁层粉质黏土的热传导特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6):843-848. (CHEN Bao, XU Zou, YAO Conglin, et al. Thermal conductivity of Shanghai ⑤₁ silty clay [J]. Journal of Tongji University (Natural science), 2012, 40(6):843-848. (in Chinese))
- [12] 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(3):241-247. (XIAO Lin, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2008, 9(3): 241-247. (in Chinese))
- [13] SMITS K M, SAKAKI T, LIMSUWAT A, et al. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(1):172-180.
- [14] LU Ning, YI Dong. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(6):04015016.
- [15] LIKOS W J. Modeling thermal conductivity dryout curves from soil-water characteristic curves[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5):04013056.
- [16] KERSTEN M S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soil[J]. Journal of Neurophysiology, 1949, 45(4):667-697.
- [17] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim: Trondheim University, 1977.
- [18] COTE J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(42):443-458.
- [19] WIENER O. Abhandlmath-phys[M]. Leipzig: Klasse Sachs Akad Wiss, 1912.
- [20] DEVRIES D A. Thermal properties of soils[C]//WIJK W R. Physics of Plant Environment. New York: John Wiley & Sons, 1963:210-235.
- [21] FAITLI J, MAGYAR T, ERDÉLYI A, et al. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills[J]. Waste Management, 2015, 36: 213-221.
- [22] HANSON J L, EDIL T B, YESILLER N. Thermal properties of high water content materials[M]. Philadelphi: ASTM, 2000.
- [23] LEFEBVRE X, LANINI S, HOU D. The role of aerobic activity on refuse temperature rise. I: Landfill experimental study[J]. Waste Management & Research, 2000, 18(5):444-452.
- [24] HANSON J L, YESILLER N, ONNEN M T, et al. Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills[J]. Waste Management, 2013, 33(4): 1993-2000.
- [25] ROWE R K, HOOR A, POLLARD A. Numerical examination of a method for reducing the temperature of municipal solid waste landfill liners[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(8): 794-803.
- [26] 沈东升, 何若, 刘远宏, 等. 生活垃圾填埋生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] SHI Jianyong, WU Xun, AI Yingbo, et al. Laboratory test investigations on soilwater characteristic curve and airpermeability of municipal solid waste[J]. Waste Management & Research, 2018, 36(5): 463-470.
- [28] 张震. 基于垃圾土土水特征曲线的气体渗透系数机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.

(收稿日期: 2018-05-23 编辑: 刘晓艳)