

台州某填埋场覆盖层粉质黏土的土-水特征曲线研究

赵俭斌¹, 常新芳², 邱战洪^{1,3}, 朱赞成³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国航天建筑设计研究院有限公司, 北京 100071;

3. 台州学院建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要 目的 得到台州市某垃圾填埋场覆盖层粉质黏土的土-水特征曲线, 通过土-水特征曲线对该覆盖层的防渗性进行研究, 在此基础上对影响覆盖层防渗性的因素进行分析。方法 采用蒸汽平衡法研究相同干密度土样在 20 ℃、40 ℃、60 ℃条件下的吸力, 并分别对稳定后土样的含水率、饱和度以及孔隙比进行测定, 分别绘制 $S-\omega$ 曲线、 $S-S_r$ 曲线及 $S-e$ 曲线来表征土样的土-水特征曲线。结果 在 $S-\omega$ 曲线及 $S-S_r$ 曲线中, 脱湿曲线位于吸湿曲线上方, 在低温及低吸力环境下曲线中脱湿曲线与吸湿曲线间的滞回现象明显; 在 $S-e$ 曲线中, 吸湿曲线位于脱湿曲线上方, 且温度对于土样孔隙比的影响不大。结论 温度与吸力将会对覆盖层粉质黏土的持水能力产生影响, 吸力会对覆盖层内部的孔隙分布产生影响, 而土样的持水能力及孔隙分布将会影响到覆盖层材料的防渗性, 所得结论可以为填埋场生物覆盖屏障的设计提供参考。

关键词 土-水特征曲线; 蒸汽平衡法; 干密度; 温度; 粉质黏土

中图分类号 TU441

文献标志码 A

Study on Soil-Water Characteristic Curves of Silty Clay of a Landfill Cover in Taizhou

ZHAO Jianbin¹, CHANG Xinfang², QIU Zhanhong^{1,3}, ZHU Zancheng³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Aerospace Construction Group, Beijing, China, 100071; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou, China, 318000)

Abstract: The soil-water characteristic curve of silty clay in the cover of a landfill in Taizhou was obtained. The impermeability of the landfill cover was studied by the soil-water characteristic curve. On this basis, the factors affecting the impermeability of the landfill cover were analyzed. The vapor balance method was used to study the suction of soil samples with the same dry density

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578356)

作者简介: 赵俭斌(1960—), 男, 教授, 主要从事岩土工程方面研究。

at 20 °C, 40 °C and 60 °C. The moisture content, saturation and void ratio of stabilized soil samples were measured. The S- ω curve, S-Sr curve and S-e curve were drawn to characterize the soil-water characteristic curve of soil samples. In the S- ω curve and S-Sr curve, the drainage curve is above the imbibition curve, and hysteretic phenomena between the drainage curve and the imbibition curve is obvious in the low temperature and low suction environment. In the S-e curve, the imbibition curve is above the drainage curve, and temperature has little effect on the void ratio of soil samples. Temperature and suction will affect the water-holding capacity of silty clay in the landfill cover, suction will affect the pore distribution in the landfill cover, the water-holding capacity and pore distribution of soil sample will affect the impermeability of the cover material. The conclusions can provide reference for the design of landfill biological cover barrier.

Key words: soil-water characteristic curve; vapor balance method; dry density; temperatures; silty clay

目前,我国仍有上万座在役填埋场需要进行安全无害化处理,目前对于此类填埋场的处理主要着重于防止填埋气无规则排放引起爆炸以及阻止雨水入渗至垃圾堆体内部而形成渗滤液,其主要的处理手段是对填埋场上部的覆盖系统进行完善.现阶段,关于垃圾填埋场的覆盖屏障,国内的学者大多致力于腾发覆盖系统和黏土覆盖屏障防渗性能方面^[1-3]的研究,通过相关研究可知,采用腾发覆盖系统、多层材料覆盖系统以及毛细阻滞型覆盖系统将会有有效的减缓雨水的入渗作用,蔡武军等^[4]通过研究可知,覆盖层上部裂缝深度应当控制在0.1倍土层厚度以内,否则将会影响到覆盖层的防渗性能.贾官伟^[5]对水分在覆盖层内的运移规律进行分析,并在此基础上建立了液体在覆盖层内部运移的数学模型.而对于填埋气收集以及控制等方面的研究,张俊旭等^[6]利用土柱装置对覆盖层内的气体运移规律进行分析,研究得出,扩散作用是影响各组分气体分布的主要方式.Herrmann等^[7]研究发现将粉煤灰掺入到污泥中作为填埋场覆盖层的基质时有较好的甲烷氧化能力;Abichou等^[8]研究发现堆肥物作为填埋场覆盖层基质时,填埋废气的组成和释放速度会影响到甲烷的氧化能力;岳波等^[9]的研究表明25℃和25%的含水率是最佳氧化条件,王丹等^[10]利用粉煤灰+有机堆肥物的混合物进行甲烷氧化试验,研

究表明改性后的混合基质有很好的甲烷氧化能力.由此可以看出,对传统黏土覆盖层进行生物覆盖屏障改造,是减少甲烷排放,进行简易填埋场无害化治理的重要手段.

但对填埋场生物屏障的研究过程中,需要对覆盖层的防渗性进行考虑,以防止雨水入渗到填埋场内而形成渗滤液.而土水特性曲线是研究黏土覆盖层防渗性的重要依据.笔者对台州市某填埋场的覆盖层粉质黏土进行蒸汽平衡法试验,量测相同干密度土样在不同温度条件下的土-水特征曲线,通过分析吸力与土样孔隙比、饱和度和含水率的关系,得出这些参数之间的变化关系,为进一步探究粉质黏土的水力力学性质提供有用的试验数据.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及仪器

试验中所采用的土样取自浙江省台州市某填埋场,该地区地处亚热带季风气候,年平均气温为19.1℃.该填埋场主要采用黏土作为覆盖层,掺杂部分黄土.取土深度为0.2~0.3 m,土样呈灰褐色,稍湿,硬塑状态,裂隙不发育,黏性较差,夹杂少量的小石子、毛发等.将土样烘干,碾散,过2 mm筛,备用.

经X衍射分析法可知,其矿物主要成分为石英(Qtz)、斜长石(Pl)、绿泥石(Chl)、云母(Mica),黏土矿物含量较少,土样持水能

力较差^[11-12].

颗粒筛分实验时,由于小于 0.075 mm 的土样大于总质量的 10%,所以取处理过的土样烘干进行密度计法和筛析法联合分析^[13].

通过部分土工试验^[13]得出土样的物理性质指标见表 1.由表 1 可以看出,土样的液限、塑限和塑性指数均较低,属于低液限粉质黏土.

表 1 粉质黏土的物理性质指标						
Table 1 Physical property index of silty clay						
天然含 水率/%	土粒相 对密度	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	质量分数(粒径 <0.005 mm)/%	
23.2	2.737	31.35	18.64	12.71	4.7	

蒸汽平衡法所使用的仪器包括:密封容器、精度 0.001 g 的电子天平、压样器、抽滤装置、铝盒、环刀、精度 0.02 mm 的游标卡尺、油压千斤顶、盐溶液、恒温箱等,密封容器见图 1.



图 1 密封容器

Fig. 1 Sealed container

1.2 试验方法

为了更加准确、合理地选择饱和盐溶液来反映不同温度下的 SWCC,试验中采用的饱和盐溶液和对应吸力值,利用文献^[14]所得出的饱和盐溶液对应的不同温度下的吸力值,所选饱和盐水溶液的相对湿度值及其所对应的吸力如表 2 所示.

表 2 试验所用的饱和盐溶液在不同温度下的总吸力值

Table 2 Total suction of used saturated salt solutions at different temperatures

盐溶液名称	吸力/MPa		
	20 ℃	40 ℃	60 ℃
K ₂ SO ₄	3.30	4.70	6.28
KH ₂ PO ₄	5.24	8.63	—
Na ₂ SO ₄	—	—	16.20
KNO ₃	7.48	16.84	—
NH ₄ H ₂ PO ₄	14.25	—	—
KCl	20.40	28.15	33.92
NaCl	38.07	42.19	46.29
KI	—	58.31	71.04
NaNO ₂	54.58	—	—
NaBr	83.36	92.30	106.57
K ₂ CO ₃	—	132.42	—
MgCl ₂	146.75	164.67	185.11
LiCl	217.74	321.64	349.47

将试验所需粉质黏土过 0.25 mm 筛,并取适量过筛后的土样.为了研究不同温度对于土 - 水特征曲线的影响,试样的初始干密度 $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$,初始含水率 $w_0 = 12\%$,分别在 20 ℃、40 ℃和 60 ℃的温度下进行试验.

蒸汽平衡法试验的过程分为脱湿和吸湿过程,所以需要制作初始干密度和含水率相同的饱和样和烘干样.将试样抽气饱和,即为饱和样;将同等数量的试样放入 105 ℃烘箱烘干 8 h 后取出,即为烘干样.试样抽气饱和过程见图 2.

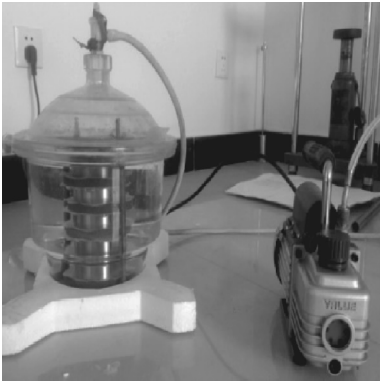


图 2 试样的抽气饱和过程

Fig. 2 Pumping saturation process

将饱和样和烘干样放在密封罐中的纱网上,盖好盖子,放入环境温度分别为 20 ℃、40 ℃、60 ℃ 的恒温箱内. 2 个月后试验达到平衡,取出土样,用烘干法测量土样的含水率,用游标卡尺测量体积,计算得到土样的孔隙比和饱和度.

2 试验结果与分析

2.1 土样含水率和吸力的关系

蒸汽平衡法中相同干密度,不同温度条件下,用吸力-含水率($S-\omega$)曲线所表示的土-水特征曲线见图 3. 由图可以看出脱湿曲线在吸湿曲线上方,且土-水特征曲线脱湿与吸湿之间存在明显的滞回现象,但是当达到某一吸力时,滞回现象基本消失,这一结论和文献[15]得到的结果一致. 而且,随着温度的升高,土样的滞回现象随着吸力的减小而减弱.

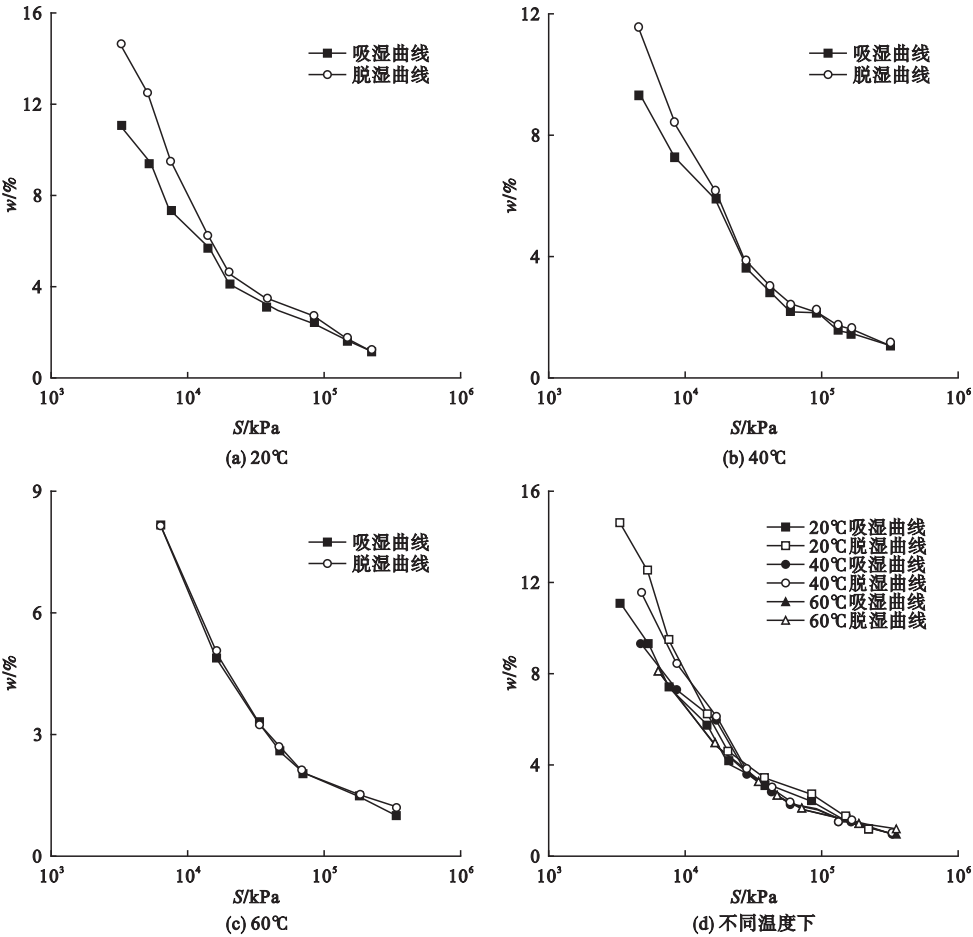


图3 不同温度下粉质黏土吸力和含水率关系

Fig. 3 Relationships between suction and water content of silty clay under different temperatures

在试验过程中,当吸力到达某一数值后,土样的滞回现象消失,分析原因可能是因为土样的宏观孔隙已经基本稳定,只有微观孔隙随着吸力的改变发生改变,而微观孔隙可以近似弹性,所以其滞回现象不明显;随着温

度升高滞回现象越来越不明显,可能是因为土样随着温度的升高,持水能力越来越低,滞回现象逐渐减弱.

2.2 土样饱和度和吸力的关系

蒸汽平衡法中相同干密度,不同温度条

件下,利用吸力-饱和度($S-S_r$)曲线表示的土-水特征曲线如图4所示.图中脱湿曲线在吸湿曲线上方,且用吸力及饱和度所表

示的土-水特征曲线较吸力与含水率所表示的土-水特征曲线相比,其滞回现象更加明显.但随着温度的升高,滞回现象逐渐消失.

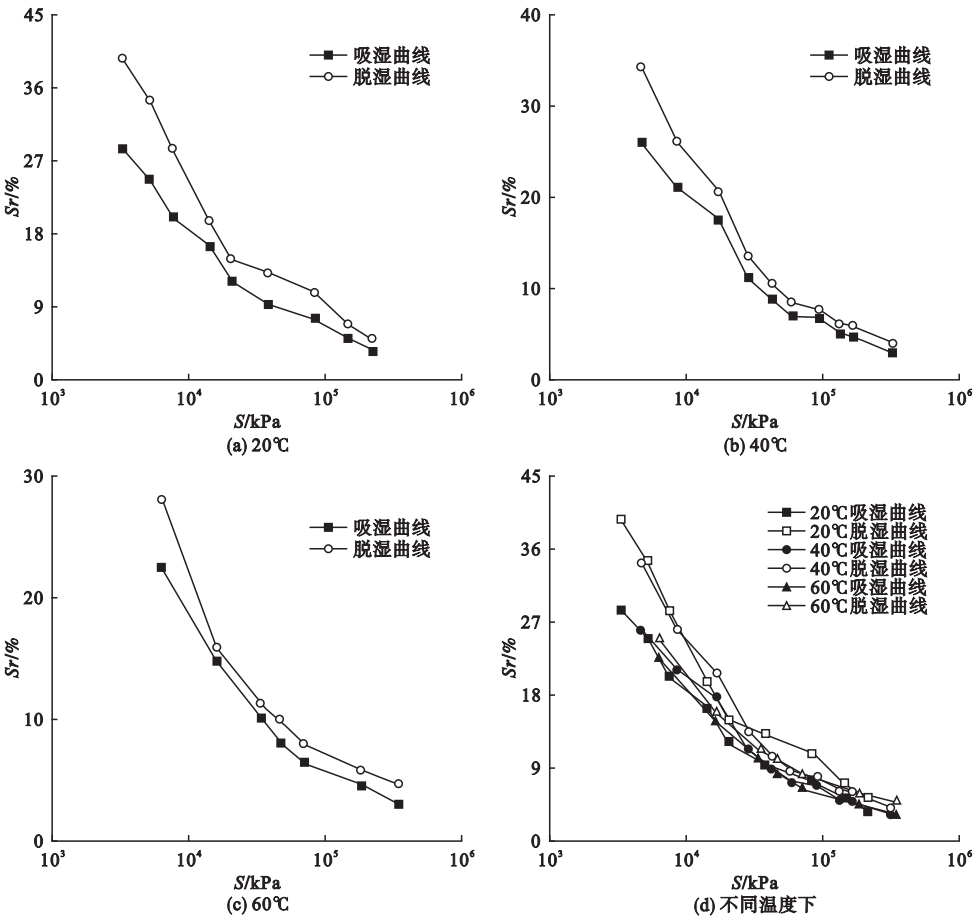


图4 不同温度下粉质黏土吸力和饱和度关系图

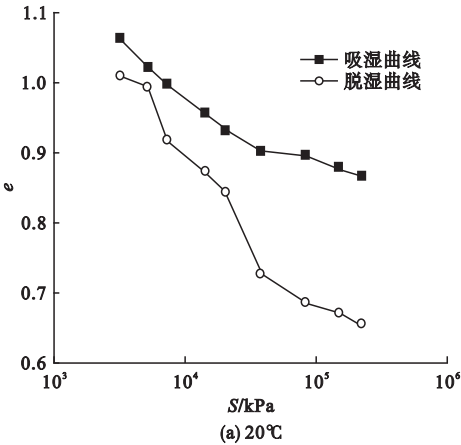
Fig. 4 Relationships between suction and saturation of silty clay under different temperatures

由图3和图4看出温度对非饱和粉质黏土的土-水特征曲线有较为明显的影响,在吸力一定的情况下,随着温度的升高,土样的含水率和饱和度均随着温度的升高而降低,但这种影响在达到某一吸力值时,基本消失,即随着温度的升高土样持水能力降低,而且在低吸力范围影响更为明显,这一结论与文献[14]相同.

2.3 土样孔隙比和吸力的关系

蒸汽平衡法中,在试样的干密度相同且试验温度不同的条件下所得出的吸力-孔隙比($S-e$)曲线如图5所示.由图可以看出吸湿曲线在脱湿曲线上方,正好与 $S-w$ 曲线

和 $S-S_r$ 曲线相反.孔隙比随着吸力的增加而减小,随着吸力的降低而增加.



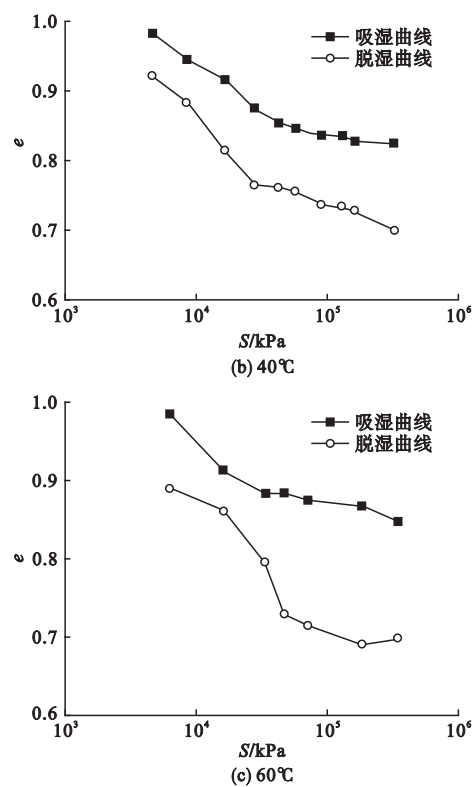


图5 不同温度下粉质黏土吸力和孔隙比关系

Fig. 5 Relationships between suction and void ratio of silty clay under different temperatures

2.4 土样孔隙比和饱和度关系

保持试样的干密度相同,测量出不同温度下土样孔隙比与饱和度,求出两者的关系曲线如图6所示.由图可以看出脱湿曲线也是在吸湿曲线上方,在吸力不变的情况下,饱和度随着孔隙比的增加而增大,且孔隙比与饱和度关系曲线近似直线,这一结论与文献[16]和及文献[17]所得到的土样饱和度和其孔隙比的变化关系相符合.

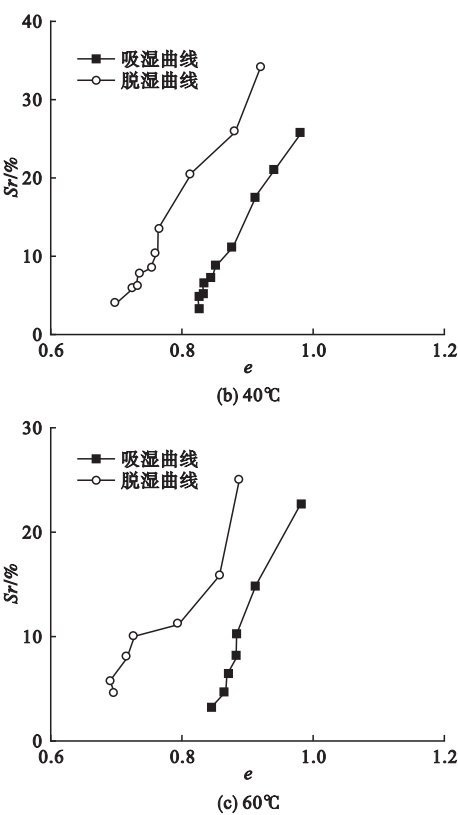
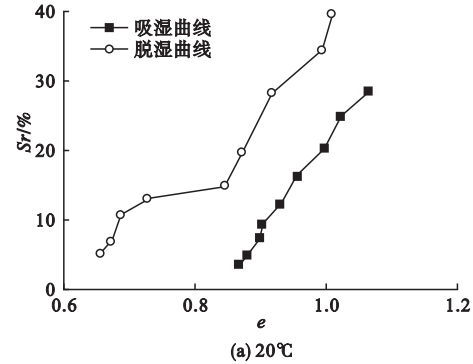


图6 不同温度下粉质黏土孔隙比和饱和度关系

Fig. 6 Relationships between void ratio and saturation of silty clay under different temperatures

3 结 论

(1)吸力与温度对土样的持水性能产生影响,随着吸力的增大,土样的持水能力降低,且当吸力增大到某一数值后,吸湿曲线与脱湿曲线之间的滞回现象将不再明显.随着温度的升高,土样的持水能力将会下降,且当温度升高至某一数值后,吸力对于土样滞回作用的影响不再明显.

(2)在 $S - S_r$ 曲线中,土样的滞回现象与 $S - w$ 曲线相比更为明显,且两者的脱湿曲线均在吸湿曲线上方,与 $S - e$ 曲线中脱湿曲线与吸湿曲线的位置相反.

(3)对于土样的孔隙比与饱和度关系曲线,在吸力不变的情况下,饱和度随着孔隙比的增加而增大,且孔隙比与饱和度的关系曲线近似于直线.

参考文献

- [1] 张文杰,邱战洪,朱成仁,等.长三角地区填埋场ET封顶系统的性能评价[J].岩土工程学报,2009,31(3):384-389.
(ZHANG Wenjie, QIU Zhanhong, ZHU Chengren, et al. Evaluation of evapotranspiration covers of landfills in Yangtze River delta region [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009, 31(3): 384-389.)
- [2] 杜磊.毛细阻滞式覆盖系统的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
(DU Lei. Numerical simulation on covers with capillary barrier effects [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [3] 詹良通,贾官伟,邓林恒,等.湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状[J].岩土工程学报,2012,34(10):1813-1818.
(ZHAN Liangtong, JIA Guanwei, DENG Linheng, et al. Performance of earthen final covers of landfills in humid areas [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(10): 1813-1818.)
- [4] 蔡武军,凌道盛,徐泽龙,等.单一裂隙优势渗流对黏土层防渗性能的影响分析[J].岩土力学,2014,35(10):2838-2844.
(CAI Wujun, LING Daosheng, XU Zelong, et al. Influence of preferential flow induced by a single crack on anti-seepage performance of clay barrier [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(10): 2838-2845.)
- [5] 贾官伟.固废堆场终场土质覆盖层中水分运移规律及调控方法研究[D].杭州:浙江大学,2010.
(JIA Guanwei. Study on the water transport in the landfill earthen final cover and its controlling method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.)
- [6] 张旭俊,陈云敏,徐晓兵,等.非饱和土质覆盖层多组分气体运移机理研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1917-1923.
(ZHANG Xujun, CHEN Yunmin, XU Xiaobing, et al. Mechanism of multi-component gas migration in unsaturated cover [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(10): 1917-1923.)
- [7] HERRMANN I, MALIN S, HOLGER E, et al. Hydraulic conductivity of fly ash - sewage sludge mixes for use in landfill cover liners [J]. Water research, 2009, 43: 3541-3547.
- [8] ABICHOU T, MAHIEU K, YUAN L, et al. Effect of compost bio-covers on gas flow and methane oxidation in landfill cover [J]. Waste management, 2009, 29(5): 1595-1601.
- [9] 岳波,林晔,王琪,等.填埋场覆盖材料的甲烷氧化能力及其影响因素研究[J].环境工程技术学报,2011,1(1):57-62.
(YUE Bo, LIN Ye, WANG Qi, et al. Research on methane oxidation capacity of landfills cover materials and its impact factors [J]. Journal of environmental engineering technology, 2011, 1(1): 57-62.)
- [10] 王丹,赵玲,尹平河,等.垃圾填埋场覆盖材料改性污泥的甲烷氧化动力学[J].暨南大学学报,2012,33(3):329-334.
(WANG Dan, ZHAO Ling, YIN Pinghe, et al. Methane oxidation kinetics of bio-cover sewage sludge modified by coal ash for landfill [J]. Journal of Ji'nan university, 2012, 33(3): 329-334.)
- [11] 苏杨,朱健,王平,等.土壤持水能力研究进展[J].中国农学通报,2013,29(14):140-145.
(SU Yang, ZHU Jian, WANG Ping, et al. Research progress on soil water holding capacity [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2013, 29(14): 140-145.)
- [12] 吴乾荣.粘土矿物的X射线衍射物相分析[J].岩矿测试,1994,13(1):15-19.
(WU Qianrong. X-ray diffraction phase analysis of clay minerals [J]. Rock and mineral analysis, 1994, 13(1): 15-19.)
- [13] 南京水利科学研究院.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999 [S].北京:中国计划出版社,1999.
(Nanjing Hydraulic Research Institute. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.)
- [14] 朱赞成,孙德安,田进.高吸力高温下2种滤纸率定曲线及其应用[J].岩土工程学报,2014,36(6):1020-1027.
(ZHU Zancheng, SUN Dean, TIAN Jin. Calibration curves of two filter papers at high suction and temperature and their application [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(6): 1020-1027.)
- [15] 孙德安,张俊然,吕海波.全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J].岩土力学,2013,34(7):1839-1846.
(SUN Dean, ZHANG Junran, Lü Haibo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range [J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(7): 1839-1846.)
- [16] 孙德安,孟德林,孙文静,等.两种膨润土的土-水特征曲线[J].岩土力学,2011,32(4):973-978.
(SUN Dean, MENG Delin, SUN Wenjing, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(4): 973-978.)
- [17] SUN D A, SHENG D C, SLOAN S W. Elastoplastic modeling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated compacted soils [J]. Mechanics of materials, 2007, 39(3): 212-221.