

DOI: 10.11779/CJGE201706001

# 黄土覆盖层水-气耦合运移土柱试验及数值模拟

詹良通<sup>1, 2</sup>, 邱清文<sup>1, 2</sup>, 杨益彪<sup>3</sup>, 徐文杰<sup>1, 2</sup>, 陈云敏<sup>1, 2</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

3. 贵州省交通规划勘测设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 基于水分储存与释放机理的土质覆盖层在干旱和半干旱地区垃圾填埋场具有较好的应用前景。前人研究土质覆盖层大多侧重于其雨水存储及防渗性能, 忽略了填埋气在覆盖层中的运移及其影响。通过在黄土土柱底部通入甲烷和二氧化碳等比例混合气体模拟填埋气在覆盖层运移, 在土柱顶部施加 3 cm 常水头模拟雨水入渗对黄土覆盖层中气压分布以及各气体组分分布的影响。基于试验结果, 利用商业软件 Geo-Studio 中的 Air/W 模块对黄土覆盖层水-气耦合运移进行了数值模拟与分析。研究结果表明: 模拟雨水入渗降低了上层黄土的导气系数, 导致土柱中气压显著增加, 呈现出先增加至“突破值”然后回落至“稳定值”; 气压“突破值”约等于上部土体进气值; 数值模拟能较好地模拟水分入渗过程并捕捉到气压变化趋势, 但由于其无法模拟多组分填埋气在土柱中的复杂物理过程, 导致气压的模拟结果与实测值存在差距。本文为更准确模拟分析土质覆盖层中水与填埋气耦合运移过程提供了一些建议。

**关键词:** 黄土覆盖层; 土柱试验; 水-气耦合运移; 气压; 雨水入渗

**中图分类号:** TU444

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2017)06-0969-09

**作者简介:** 詹良通(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程教学及科研工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

## Soil column tests and numerical simulations of moisture-gas coupled flow in a loess cover

ZHAN Liang-tong<sup>1, 2</sup>, QIU Qing-wen<sup>1, 2</sup>, YANG Yi-biao<sup>3</sup>, XU Wen-jie<sup>1, 2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and

Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Guizhou Transportation Planning Survey & Design

Academy Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The earthen final covers based on the water storage and release principle have a promising application in the landfills in arid and semi-arid areas. Most of the previous studies concentrate on the rainwater infiltration and ignore the landfill gas migration in the soil covers. In this paper, landfill gas migration is simulated by supplying the gas mixture of 50% methane and 50% carbon dioxide at the bottom of a loess soil column. A water ponding of 3 cm is applied at the top of the soil column to investigate the influence of rainwater infiltration on the distribution of gas pressure and composition in the loess cover. On the basis of the experimental study, the Air/W module of Geo-Studio commercial software is used to simulate the moisture-gas coupled flow in the loess soil cover. The research findings are as follows: the simulated rainwater infiltration results in a decrease in the gas permeability of the upper soil layer. The gas pressure firstly increases to a "breakthrough" value, and then decreases to a "stable" value. The gas breakthrough value is approximate to the air entry value of the upper soil. The numerical software is able to simulate the water infiltration process and capture the gas pressure change trend. However, there is difference in the magnitude of gas pressure between the simulated results and the measurements because the Air/W module cannot make a simulation for the complicated physical processes of multi-component landfill gas in the soil column. Some suggestions are proposed for more accurate simulations of moisture-gas coupled flow of landfills in earthen final covers.

**Key words:** loess cover; soil column test; moisture-gas coupled flow; gas pressure; rainwater infiltration

## 0 引言

填埋场覆盖层的主要功能有: ①减少降雨或其它水源进入填埋堆体形成渗滤液; ②阻止填埋气无组织

释放为填埋气的收集提供缓冲时间和抽气区域, 提高

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)课题  
(2012CB719805)

收稿日期: 2016-02-28

填埋气的收集效率<sup>[1]</sup>。土质覆盖层通过降雨时存储水分,随后天气晴朗时由植被蒸腾和地表蒸发排出水分,从而减少渗漏的产生<sup>[2-3]</sup>。相比较压实黏土和带土工复合材料的传统覆盖层,土质覆盖层具有构造简单、建造和后期维护费用低以及服役寿命长等优点,使得其受到广泛的关注<sup>[4]</sup>。McGuire 等<sup>[5]</sup>、Albright 等<sup>[6]</sup>、Scanlon 等<sup>[7]</sup>对土质覆盖层在美国不同气候地区的水量平衡和防渗性能进行了长期监测和研究,研究结果表明在一些干旱和半干旱气候区,土质覆盖层可有效替代欧美国标准推荐的复合覆盖层。Khire 等<sup>[8]</sup>、Benson 等<sup>[9]</sup>、Bohnhoff 等<sup>[10]</sup>、詹良通等<sup>[11]</sup>、张文杰等<sup>[12]</sup>通过数值模拟对土质覆盖层的水量平衡及防渗性能进行了研究。然而以上这些研究多数侧重于考虑防止雨水的入渗,忽略了填埋气在覆盖层中的运移。

土壤包气带中水与空气耦合运移的研究已有较多的成果见诸报道。Touma 等<sup>[13]</sup>、Wang 等<sup>[14]</sup>、彭胜等<sup>[15]</sup>通过土柱试验对非饱和土中两者的耦合运移进行了研究,研究结果表明,水分入渗会导致土中气压增加,气压增加反过来会降低水的入渗速率;当气压增加到一个“突破值”时,Touma 等<sup>[13]</sup>认为空气会突破上部饱和层,气体释放,气压便稳定在这一“突破值”上,即“稳定值”与“突破值”较为接近;而 Wang 等<sup>[14]</sup>认为空气释放后,气压减小,当气压减小到“气体闭合压力”时,气体释放通道重新被水占据,水继续入渗,气体又开始压缩,并不断重复上述过程,在整个入渗过程中,气压是不断上下波动的,直至气压达到一“稳定值”。Huang 等<sup>[16]</sup>和孙冬梅等<sup>[17]</sup>通过数值模拟对非饱和土中两者的耦合运移进行了研究。以上土壤包气带中水气耦合运移,其实质是外部水进入土体并挤出其内部本身存在空气的过程;而土质覆盖层中水-填埋气耦合运移,其填埋气的流动主要是由于覆盖层底部垃圾降解产生填埋气,提供了一个气压(浓度)梯度导致的,同时填埋气在覆盖层还存在许多复杂的物理过程,比如填埋气在水中的溶解、不同组分填埋气黏滞系数不同导致的流速差异以及不同组分填埋气在覆盖层不同深度处的体积分数差异导致的体相扩散等。

中国西北地区气候相对比较干旱,黄土分布广泛,黄土作为覆盖土料容易就地取材,因而采用黄土作为填埋场终场覆盖层或临时覆盖层在该地区具有广泛的应用前景。本文用等比例甲烷和二氧化碳的混合气体模拟填埋气,通过土柱试验研究了在水分入渗前后,下部通填埋气和上部连接大气条件下黄土覆盖层中气压和各气体组分分布的区别,并通过土柱试验和数值模拟研究了下部通填埋气和上部施加水头条件下黄土覆盖层水-填埋气耦合运移的规律。

1 土柱试验

1.1 试验材料

本文试验所用黄土为取自西安江村沟填埋场附近未做覆盖的新鲜黄土。新鲜黄土的取土深度约为 40 m(从已开挖形成的边坡上取土),其天然含水率和天然干密度分别为 16.5%和 1.51 g/cm<sup>3</sup>,液塑限分别为 36.7%和 22.0%,土粒相对密度为 2.71。颗粒组成的百分数如表 1 所示。

表 1 颗粒组成的百分数

Table 1 Percentage of article sizes

| 粒径    | >0.075 mm | 0.075~0.005 mm | <0.005 mm |
|-------|-----------|----------------|-----------|
| 百分数/% | 2.2       | 71.8           | 26.0      |

土柱由两层黄土构成(如图 3 所示),上下两层黄土厚度分别为 0.3, 0.5 m,干密度分别控制为 1.30, 1.45 g/cm<sup>3</sup>,上部黄土模拟植被层,下部黄土模拟储水层。该两种干密度黄土的土水特征曲线以及水-气相渗透系数曲线分别如图 1, 2 所示。

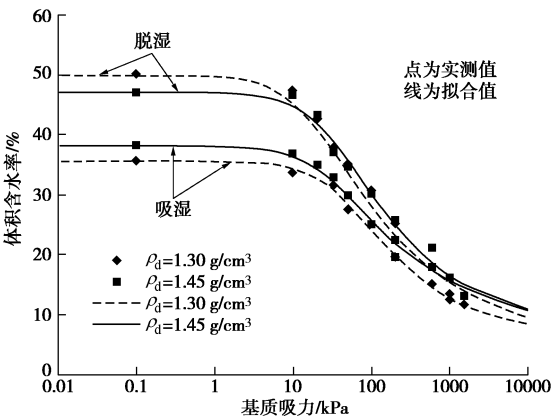


图 1 两种干密度黄土的土水特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curves of loess with two different dry densities

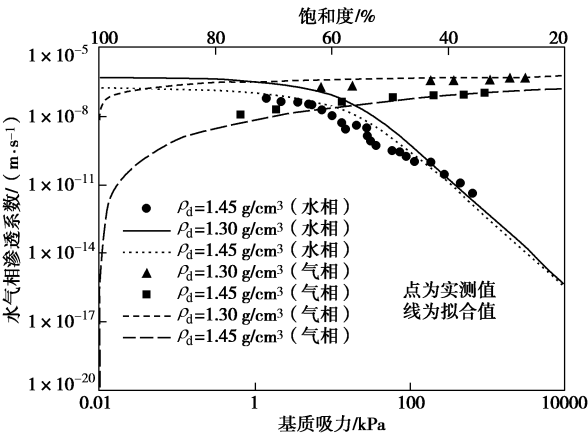


图 2 两种干密度黄土的水-气相渗透系数曲线

Fig. 2 Moisture-gas phase permeability curves of loess with two different dry densities

图 1 中数据点为脱湿和吸湿过程中的实测值,是

通过体积压力板仪测试得到。干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 的黄土, 在脱湿和吸湿过程中, 其饱和体积含水率分别为 47%, 38%; 而干密度为 1.30 g/cm<sup>3</sup> 的黄土, 在脱湿和吸湿过程中, 其饱和体积含水率则分别为 50%, 36%。图 1 中的曲线是通过 V-G 公式<sup>[18]</sup> (式 1) 对两种干密度黄土的脱湿和吸湿的实测点进行拟合得到。

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \psi)^h} \right]^m, \quad (1)$$

式中,  $\Theta$  为有效饱和度,  $\theta$  为体积含水率,  $\theta_r$  为残余体积含水率,  $\theta_s$  为饱和体积含水率,  $\psi$  为基质吸力 (kPa),  $\alpha$ ,  $h$  和  $m$  为拟合参数,  $1/\alpha$  是土水特征曲线上一个接近进气值的点, 但是要高于进气值, 所有参数见表 2。

表 2 两种干密度黄土水力特征曲线所用拟合参数

Table 2 Parameters used in fitted hydraulic characteristic curves of loess with two dry densities

| 干密度<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙率 $n$ | $\theta_s/\%$ | $\theta_r/\%$ | $\alpha$ /(kPa <sup>-1</sup> ) | $h$   | $m=1-1/h$ |
|------------------------------|---------|---------------|---------------|--------------------------------|-------|-----------|
| 1.30(脱湿)                     | 0.52    | 50            | 5.0           | 0.061                          | 1.361 | 0.265     |
| 1.30(吸湿)                     | 0.52    | 36            | 5.8           | 0.027                          | 1.437 | 0.304     |
| 1.45(脱湿)                     | 0.47    | 47            | 7.2           | 0.036                          | 1.407 | 0.289     |
| 1.45(吸湿)                     | 0.47    | 38            | 7.2           | 0.036                          | 1.370 | 0.270     |

气体进入饱和土体的大孔隙, 使得其脱离饱和状态对应的基质吸力为进气值。根据图 1 干密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup> 黄土的脱湿土水特征曲线, 采用文献[19]提出的作图法可确定其进气值约为 3 kPa。而  $1/\alpha$  对应的结果为 16.4 kPa, 大于前者。

通过室内变水头渗透试验得到干密度为 1.30, 1.45 g/cm<sup>3</sup> 黄土的实测饱和水相渗透系数分别为  $5.80 \times 10^{-7}$  m/s 和  $1.95 \times 10^{-7}$  m/s。图 2 中干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 黄土的水相渗透系数与基质吸力的关系实测点是通过瞬态剖面法测试得到。根据土水特征曲线和饱和渗透系数, 并采用 V-G 公式 (式 2)<sup>[18]</sup> 预测得到干密度为 1.45g/cm<sup>3</sup> 黄土的水相渗透系数曲线, 并与实测值进行对比, 结果显示 V-G 公式预测的水相渗透系数与实测结果吻合较好, 如图 2 所示。Rahimi 等<sup>[20]</sup> 采用 12 种模型组合预测了 20 种土壤 (包括粉土, 黏土和砂土) 的水相渗透系数曲线, 并与其实测值进行比较, 结果显示 V-G 模型预测的水相渗透系数与实测结果相差最小。因此本文根据实测的黄土饱和渗透系数和图 1 的脱湿土水特征曲线, 并采用 V-G 公式预测黄土的水相渗透系数 (根据吸湿土水特征曲线预测得到的水相渗透系数, 限于篇幅, 在图 2 中并没有给出)。

$$k_w = k_s \Theta^{0.5} \left[ 1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2, \quad (2)$$

式中,  $k_w$  为水相渗透系数 (m/s),  $k_s$  为饱和水相渗透

系数 (m/s),  $\Theta$  和  $m$  与式 (1) 中一致, 所用参数见表 2。

图 2 中气相渗透系数与饱和度关系的实测点是通过气体渗透试验得到, 曲线则是根据实测点并通过 V-G 公式<sup>[21]</sup> (式 3) 拟合得到。

$$k_g = k_d \left( 1 - \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^\eta \left( 1 - \left( \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^{1/l} \right)^{2l}, \quad (3)$$

式中,  $k_g$  为气相渗透系数 (m/s),  $k_d$  为黄土干燥状态时的气相渗透系数 (m/s),  $S$  为饱和度,  $S_r$  为残余饱和度, 由表 1 中残余体积含水率  $\theta_r$  和孔隙率  $n$  相除得到,  $k_d$ ,  $\eta$  和  $l$  通过拟合得到, 见表 3。

表 3 两种干密度黄土气相渗透系数曲线拟合所用参数

Table 3 Parameters used in fitted gas permeability curves of loess with two dry densities

| 干密度<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $k_s$ /(m·s <sup>-1</sup> ) | $k_d$ /(m·s <sup>-1</sup> ) | $S_r/\%$ | $\eta$ | $l$  |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|------|
| 1.30                         | $5.8 \times 10^{-7}$        | $6 \times 10^{-7}$          | 11       | 0.5    | 0.05 |
| 1.45                         | $1.95 \times 10^{-7}$       | $2 \times 10^{-7}$          | 15       | 1.5    | 0.80 |

从表 3 可知, 干密度为 1.30, 1.45 g/cm<sup>3</sup> 黄土在干燥状态下的气相渗透系数与其在饱和状态下的水相渗透系数接近。采用如下公式 (4) 将干燥状态下的气相渗透系数和饱和状态下的水相渗透系数转换为固有渗透率。

$$K_i = \frac{k_i \mu_i}{\gamma_i}, \quad (4)$$

式中,  $K_i$  为固有渗透率 (m<sup>2</sup>), 固有渗透率只与土体本身特性有关, 而与流体的性质无关,  $k_i$  为饱和状态下的水相渗透系数  $k_s$  (m/s) 或干燥状态下的气相渗透系数  $k_d$  (m/s),  $\mu_i$  为空气或者水的黏滞系数 (Pa·s),  $\gamma_i$  为空气或者水的重度 (N/m<sup>3</sup>)。

在室温 20℃ 条件下, 水的黏滞系数和重度分别为  $1 \times 10^{-3}$  Pa·s 和 9800 N/m<sup>3</sup>; 空气的黏滞系数和重度分别为  $1.81 \times 10^{-5}$  Pa·s 和 11.76 N/m<sup>3</sup>。根据公式 (4) 可算出干密度为 1.30, 1.45 g/cm<sup>3</sup> 黄土在饱和状态下使用水进行试验测试得到的固有渗透率分别为  $5.92 \times 10^{-14}$ ,  $1.99 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup>; 而在干燥状态下使用空气进行试验测试得到的固有渗透率分别为  $9.21 \times 10^{-13}$ ,  $3.07 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>。可见, 干密度为 1.30 g/cm<sup>3</sup> 黄土采用空气测试得到的固有渗透率是采用水进行测试的结果的 15.2 倍, 干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 黄土则为 15.4 倍。产生这种差别的主要原因是空气在土体中的努森扩散, 或称为“Klinkenberg 效应”<sup>[22]</sup>, 其实质是当孔隙通道直径与气体分子平均自由程相当时, 气体分子和管壁碰撞发生滑移, 使得孔壁处的气体流速不为零。随着土

体本身透气性的降低,“Klinkenberg 效应”会逐渐明显。土体采用水测试其在饱和状态下的固有渗透率低至  $10^{-16} \text{ m}^2$  时,采用空气测试其在干燥状态下的固有渗透率结果能高出前者近两个数量级<sup>[23]</sup>。

1.2 试验装置

土柱试验装置示意图和实物图如图 3 所示。该装置主要有三部分。第一部分为供气与气体流量控制部分,包括向土柱下部提供模拟填埋气的甲烷和二氧化碳气瓶、控制甲烷和二氧化碳流量的质量流量控制器(控制精度为  $0.1 \text{ mL/min}$ ),以及向土柱顶部提供空气的空压机、控制空气流量的调压阀和玻璃转子流量计。试验过程中,通过质量流量计控制器将甲烷和二氧化碳按预定比例混合模拟填埋气,然后通入土柱下部,质量流量控制器最显著的优点在于在一定工作气压范围内可以保持通入土柱下部的气体流量恒定,即形成

常流量边界,模拟垃圾降解产气速率恒定的工况;通过调压阀和玻璃转子流量计将预定流量的空气通入土柱顶部并通过土柱顶盖的孔道进入大气,从而使得土柱顶部充分接触空气;为保持土样的含水率不变,空气和甲烷在通入土柱前都先经过增湿瓶。

第二部分为模拟覆盖层土样部分,土柱由有机玻璃加工而成,包括底座、试样筒和顶盖,三者用法兰连接,连接处有 O 型圈以保证气密性。试样筒内径为  $0.2 \text{ m}$ ,每节高为  $0.2 \text{ m}$ ,共 4 节,其间填筑黄土土样,土柱下部有多孔板以防土样下落;试样筒右边壁每隔  $0.1 \text{ m}$  开孔设置气体取样口、左边壁每隔  $0.2 \text{ m}$  开孔连接测量气压的 U 型管;底座下部开孔连接模拟填埋气供气部分;顶盖左边壁开孔连接注水的马氏瓶,顶盖顶部中间开孔连通大气,使得土柱上部保持大气环境。

第三部分为气压测试部分和供水部分,由 5 个 U 型管组装在一个面板上,用于测试土柱各深度气压, U 型管的精度为  $0.01 \text{ kPa}$ ;进行水与填埋气耦合运移试验时,使用马氏瓶注入水分,并人工控制所需的水头。

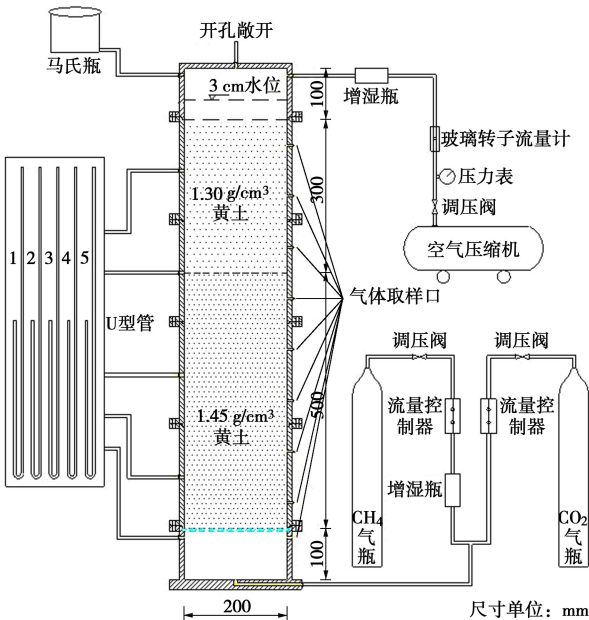
1.3 试验方法

将取回的新鲜黄土用橡皮锤破碎,过  $2 \text{ mm}$  筛,烘干,加水配成质量含水率为  $12.1\%$  的均匀土样。然后采用该均匀土样按下部和上部黄土厚度分别为  $0.5, 0.3 \text{ m}$ ,干密度分别为  $1.45, 1.30 \text{ g/cm}^3$  填筑,因此上部和下部黄土的初始体积含水率分别为  $15.7\%$  和  $17.5\%$ 。土柱填筑完毕后,连接试验装置各部分,通过对比进出口流量是否相等检查装置是否有漏气,出气流量使用皂膜流量计测试(精度  $1 \text{ mL/min}$ )。气密性检查后,正式进行试验,试验分为以下 4 个步骤:

(1) 在土柱底部控制甲烷和二氧化碳流量均为  $4 \text{ mL/min}$  的恒定速率通入混合气体(总注气速率为  $20.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),在土柱顶部左侧壁孔道控制  $120 \text{ mL/min}$  的流量通入空气,用 U 型管监测土柱各深度( $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8 \text{ m}$ )气压变化,当该试验达到稳态,记录气压和各气体组分的分布。

(2) 试验第(1)步结束后,底部通气不变,但顶部停止通入空气,改往土柱顶部注水,并维持土柱表层有平均  $3 \text{ cm}$  的水头,维持时间为  $720 \text{ min}$ 。该期间监测土柱各深度气压的变化,并观察湿润峰随时间的发展。本文湿润峰达到某深度是根据肉眼观察到该深度土体含水率增加时颜色会发生变化得到。

(3) 试验第(2)步结束后,底部通气不变,但顶部停止注水,使土柱顶部剩余的积水自由入渗,并监测土柱各深度气压变化以及湿润峰随时间的发展,监测时间至  $3000 \text{ min}$ 。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 3 黄土覆盖层土柱试验装置

Fig. 3 Soil column test devices for loess cover

(4) 试验第(3)步结束后, 底部停止通气, 静置 30 d, 使水分在土柱内重新分配, 随后重复进行试验的第(1)步。试验结束后, 拆卸土柱, 测试各深度土体的体积含水率。

## 2 试验结果

试验第(1)步, 通气试验中气压达到稳定后, 气压和各气体组分分布结果如图 4 所示。从图 4 可看出,  $N_2$  和  $O_2$  的体积分数随深度的增加而降低, 两者的体积分数之和在土柱表层和下部分别为 95% 和 9.5%,  $N_2$  和  $O_2$  能够在土柱底部通气条件下进入土柱, 这是因为不同气体分子之间的碰撞导致的, 即体相扩散;  $CH_4$  和  $CO_2$  的体积分数随深度的增加而增加, 两者的体积分数之和在土柱表层和下部分别为 5% 和 90.5%。从图 4 还可以看出, 在上部 0.3 m 厚土层和下部 0.5 m 厚土层中, 气压均随深度呈线性增加, 0.3, 0.8 m 深度处的气压分别为 0.06, 0.66 kPa, 0.8 m 深度处的气压偏离直线, 是由于下部 0.1 m 厚的土层在填筑过程中压实度偏低导致, 本文的气压为相对气压。

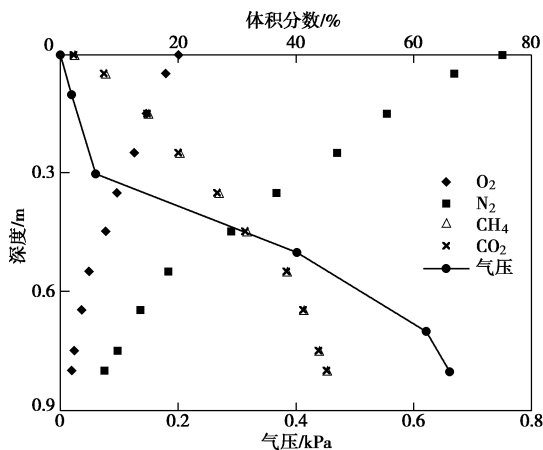


图 4 土柱内初始气压和各气体组分的分布

Fig. 4 Distribution of gas pressure and composition in soil column

试验第(2)步和第(3)步, 水-气耦合运移试验中湿润峰随时间的发展、土柱各深度气压随时间的变化以及土柱底部气体流进速率随时间变化分别如图 5~7 所示。在图 5~7 中, 1000~1300 min 和 2250~2750 min 之间缺乏实测数据, 这是因为这两个时间段均为夜间凌晨, 没有进行数据采集。图 5 中, 点为实测值, 线为下文数值模拟的结果。图 7 中的点是根据土柱 0.7, 0.8 m 两个深度的气压以及该段土层对应的初始导气系数计算得到, 线为下文数值模拟的结果。由图 5 可知, 湿润锋在该试验期间并没有达到 0.7 m 深度处, 因此可认为土柱 0.7~0.8 m 深度的土层导气系数一直为初始值。

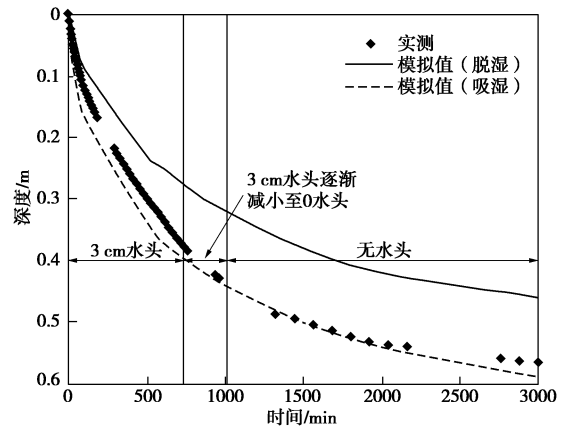


图 5 湿润峰随时间的发展

Fig. 5 Advancement of wetting front during water infiltration

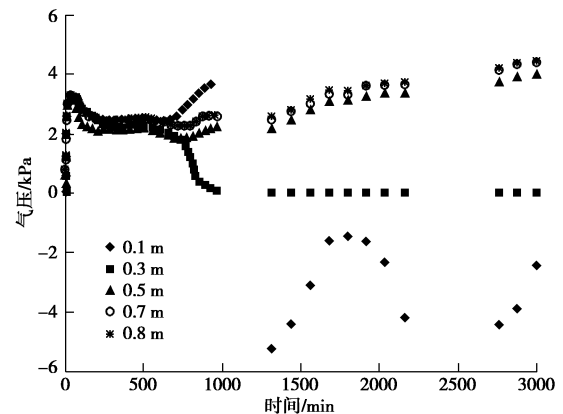


图 6 土柱内各深度气压随时间的变化

Fig. 6 Change of gas pressure with time at different depths in soil

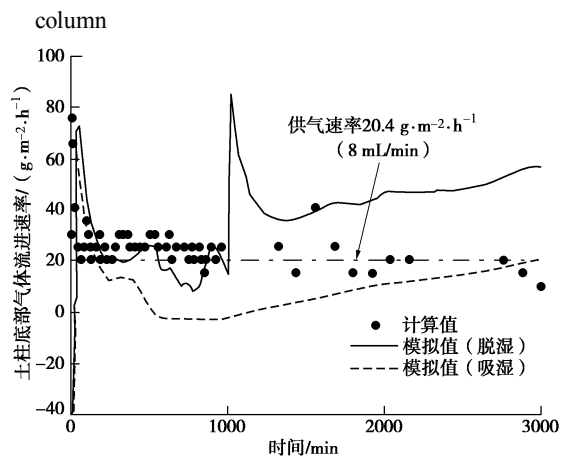


图 7 土柱底部气体流进速率随时间的变化

Fig. 7 Change of gas flow rate with time into soil column at bottom

从图 5 可知, 当土柱顶部存在水头时, 湿润峰下渗速度较快, 停止注水后, 湿润峰下渗速度逐渐变慢。从图 6 可知, 土柱各深度气压先迅速增加, 在第 40 min 达到“突破值”, 为 3 kPa, 后逐渐减小, 在第 100 min 达到“稳定值”, 为 2 kPa, 并在第 101~720 min 期间, 土柱各深度气压维持在这个“稳定值”上, 除了 0.7 m 深度处的气压略大于该“稳定值”。这是因为随着水分

的入渗，表层土体的气体渗透系数降低，减少了气体的释放，导致各深度气压逐渐增加，当表层气压增加至“突破值”时，填埋气突破表层饱和土，填埋气释放，并产生了气体优势流通道，土柱底部气体流进速率与顶部流出速率接近，使得土柱各深度气压逐渐降低至“稳定值”并较长时间维持接近该“稳定值”。从图 7 可知，在第 101~720 min 期间，土柱底部气体实际流进速率在这期间变化较小，且与供气速率（8 mL/min）接近，而该期间各深度气压与“稳定值”接近且变化较小，由此可推测气压达到“突破值”后，气体得以释放，并产生了气体优势流通道。

Touma 等<sup>[13]</sup>认为砂质土的“突破值”为表层水头与土壤进气值之和，而 Wang 等<sup>[14]</sup>认为壤质砂土的“突破值”为表层水头、土壤进气值以及最小相对饱和带深度之和，即假定最小相对饱和带完全饱和。根据 Touma 等的经验公式，可算出“突破值”为 3.3 kPa。由图 5 可知，在第 40 min，湿润峰到达深度（最小相对饱和带深度）为 7 cm，根据 Wang 等的经验公式，可算出“突破值”为 4 kPa。由此可知，Touma 等经验公式计算的“突破值”的更接近本试验的“突破值”3 kPa。

Touma 等<sup>[13]</sup>认为气压增加至“突破值”后，气体释放，且释放速率等于水的入渗速率，因此气压便逐渐稳定，且“稳定值”与“突破值”较为接近。Wang 等认为气压增加至“突破值”后，气压逐渐减小至一“气体闭合压力”，随后又增加至“突破值”，并不断重复这样增加和减少的过程，即气压不断上下波动，直至气压最后达到一“稳定值”，且“稳定值”小于“突破值”。由此可知，虽然本文试验的“稳定值”比“突破值”小接近 1 kPa，但水分入渗条件下气压的变化规律与 Touma 等的试验结果更为接近。

在第 721~3000 min 期间，注水停止，表层水头逐渐减小并消失，而上部土层中的水分会继续向下部土层下渗（如图 5 所示），0.5, 0.7, 0.8 m 深度处气压进一步升高，0.3 m 深度处气压则逐渐降低接近 0 值，而 0.1 m 深度处气压则变化更加复杂，先增加并超过“突破值”，后急剧下降甚至出现负压。随着水分继续下渗到下部土层，其干密度较大、气体渗透系数降低更为明显，减少了填埋气上移，由图 7 也可知在该期间底部气体的流进速率低于 0~720 min 期间，从而导致 0.5, 0.7, 0.8 m 深度处气压进一步积累升高，同时也导致 0.3 m 深度处气压逐渐降低；0.1 m 深度处的水分进一步往下运移，将该位置的气体进一步往下“驱赶”，同时由于表层含水率较高（如图 8 所示，试验结束且静置 30 d 后，表层土的体积含水率仍为 32%，由此可推测在第 721~3000 min 期间，表层体积含水率比较高），阻止空气扩散进土层中，导致 0.1 m 深度

处出现负压。随着试验结束，水分在土柱内静置 30 d 重新分配后，表层体积含水率降低，空气扩散到土柱表层，0.1 m 深度处负压消失，如图 8 所示。

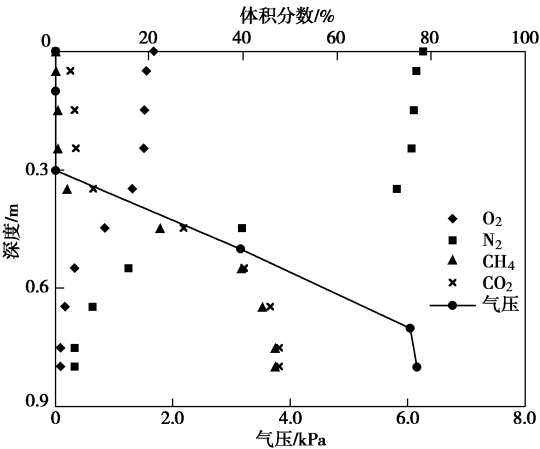


图 8 水分重新分配后土柱内气压和各气体组分的分布  
Fig. 8 Distribution of gas pressure and composition in soil column after moisture redistribution

试验第 4 步，水-填埋气耦合运移试验结束，使土柱静置 30 d，当水分重新分布后再进行通气试验，得到土柱内气压和各气体组分分布结果如图 8 所示。初始和水分重新分布后最终状态土柱体积含水率分布如图 9 所示，图 9 中点为实测值，线为下文数值模拟的结果。从图 9 可知，在初始和最终时，在上下黄土界面处（即 0.3 m 深度处）体积含水率均发生了突变，这是因为该深度处土体的干密度发生了突变，上下黄土干密度分别为 1.30, 1.45 g/cm<sup>3</sup>。从图 9, 8 和图 4 比较可知，水分在土柱内重新分配后，土柱各深度体积含水率增加且上部土层体积含水率大于下部土层，然而下部土层中气压显著增加，而上部土层的气压反而略微减小，这是因为下部土层随着体积含水率的增加，其气相渗透系数降低更为明显，减少了填埋气往上运移。从图 9, 8 和图 4 比较还可知，土柱各深度体积含水率增加，气相渗透系数降低，使得甲烷和二氧化碳在上部土层及氮气和氧气在下部土层的体积分数均大幅度下降。

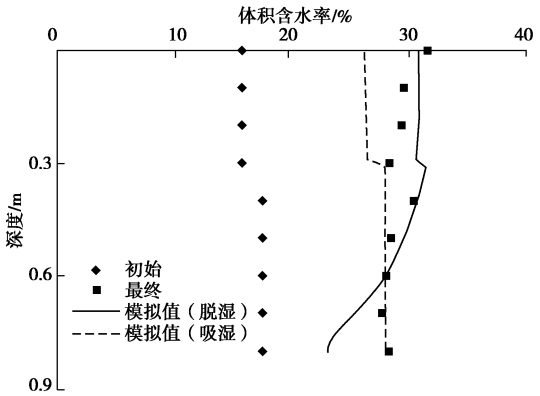


图 9 初始和最终状态体积含水率分布  
Fig. 9 Distribution of volumetric moisture content in initial and final states

### 3 数值模拟

使用商业软件 Geo-studio 中的 Air/W 模块建立一维土柱模型对上文水-气耦合运移土柱试验进行模拟分析。土柱模型中轴向网格间距为 1 cm, 考虑到土柱上部复杂的水气相边界条件, 顶部 10 cm 土层的轴向网格间距细化为 0.2 cm。时间步设置为 1 s。Air/W 模块是一个适用于分析多孔介质材料(土和岩石等)中水与空气相互作用的有限元软件, 其水气一维耦合运移的控制方程分别为<sup>[24]</sup>

$$m_w \gamma_w \frac{\partial H_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_w \frac{\partial H_w}{\partial z} \right] + m_w \frac{\partial p_g}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\frac{\theta_g}{RT} \frac{\partial p_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\rho_g k_g) \frac{\partial H_g}{\partial z} \right] - \rho_g m_w \frac{\partial (p_g - p_w)}{\partial t}。 \quad (6)$$

式中  $m_w$  为土水特征曲线上基质吸力对应的斜率;  $\gamma_w$  为水的重度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $H_w$  为水运移的总水头 (m), 即位置水头和吸力水头的总和;  $k_w$  为水的渗透系数 (m/s);  $p_g$  为气压 (kPa);  $\theta_g$  为气体所占的孔隙率;  $R$  为常数 287 J/(kg·K);  $T$  为温度 (K), 本文不考虑温度的影响;  $\rho_g$  为气体密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $k_g$  为气的渗透系数 (m/s);  $H_g$  为气运移的“总梯度” (m);  $p_w$  为孔隙水压力 (kPa);  $z$  为纵轴;  $t$  为时间 (s)。

在 Air/W 模块中, 多孔介质不再假定为与大气连通以及孔隙气压力为大气压常数 (0 kPa)。在该模块中, 基质吸力为孔隙水压力和孔隙气压力的差值, 饱和体积含水率为水所占体积和空气所占体积之和。Air/W 模块假定水与空气的运移均为达西流, 水为不可压缩流体以及气为可压缩流体。

在常温常压下, 比例各占 50% 的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  混合气体的黏滞系数和摩尔质量分别为  $1.36 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  和 30 g/mol, 空气的这两个值分别为  $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  和 29 g/mol, 两者比较接近, 因此本文将混合气体当成单一的空气进行处理。模拟分析使用的土水特征曲线和水气相渗透系数曲线分别如图 1, 2 所示。总共模拟分析两种工况, 分别采用脱湿和吸湿的土水特征曲线和水相渗透系数曲线, 两种工况采用的气相渗透系数曲线一样 (见图 2)。

土柱中上下两层黄土的初始体积含水率分别为 15.7%, 17.5%, 初始气压分布则根据下边界为 0.8 kPa 上边界为大气压 0 kPa, 进行一个稳态分析得到。

在瞬态分析中, 水相的上边界为: 0~720 min 为 3 cm 常水头边界; 721~1000 min 为 3 cm 水头线性减少至 0 cm 水头的边界; 1001~3000 min 为零流量边界 (不考虑蒸发的影响); 根据试验结果, 土柱并没有渗漏量产生, 因此水相的下边界为零流量边界。气相的上边界为: 0~40 min 为气压审查边界, 审查值为

上部黄土吸湿曲线的进气值 3 kPa, 即仅当表面气压超过 3 kPa 时, 气体才能从土柱表面释放, 否则表面无气体释放; 41~100 min 的气压审查值从 3 kPa 线性减少至试验观察达到“稳定值”2 kPa; 101~1000 min 的气压审查值为“稳定值”2 kPa; 1001~3000 min 为大气压边界即 0 kPa。气相的下边界为试验第二步和第三步测试到的 0.8 m 深度处的气压值。

模拟分析得到两种工况对应的土柱顶部水的入渗速率及入渗量随时间的变化如图 10 所示。从图 10 可知, 两种工况的入渗速率在初始较短时间从 0 值达到其最大值, 随后逐渐减小; 在前 400 min, 两种工况对应的入渗速率非常接近; 在 401~1000 min, 吸湿曲线对应的入渗速率下降更快, 在第 1000 min, 脱湿和吸湿曲线对应的入渗速率分别为  $7.78 \times 10^{-7}$ ,  $4.35 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 从而导致脱湿曲线对应的总入渗量高于吸湿曲线对应的结果, 两者分别为 2.81, 2.54 L, 前者比后者高 9.5%。

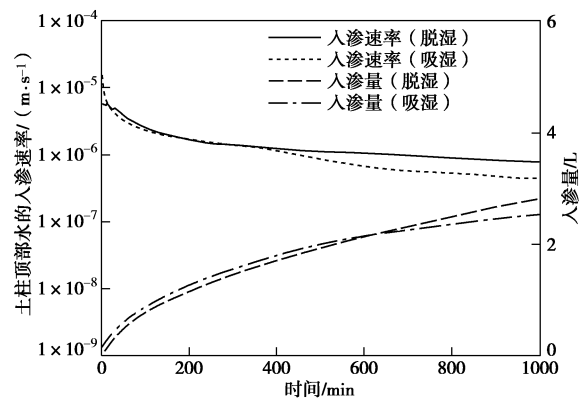


图 10 土柱顶部水的入渗速率及入渗量

Fig. 10 Water infiltration rate and accumulated infiltration into soil column at top

模拟分析得到两种工况的土柱内湿润峰发展与实测值的比较如图 5 所示。从图 5 可知, 比起脱湿曲线对应的数值解, 吸湿曲线对应的湿润峰下渗速度更快, 且与实测值更吻合。然而图 10 中提到脱湿曲线对应的入渗量更大, 按道理而言, 脱湿曲线对应的湿润峰应该下渗更快。追究其原因, 主要是因为脱湿曲线对应的上下两层黄土的饱和体积含水率 (50% 和 47%) 高于吸湿曲线对应的结果 (36% 和 38%), 且分别高 38.8% 和 23.7%。许多研究报道提到湿润峰上部土层可认为接近饱和状态, 因此脱湿曲线对应的湿润峰上部土层含有的水分高于吸湿曲线湿润峰上部土层含有的水分, 从而使得吸湿曲线对应的湿润峰下渗速度更快。

模拟分析得到两种工况的土柱各深度气压随时间的变化, 并与实测值进行比较如图 11 所示。从图 11 可知, 在 0~720 min 期间, 土柱各深度处气压的数值解与实测值较为接近; 在 721~1000 min 期间, 0.7,

0.5 m 深度处气压的数值解与实测值较为接近,但 0.3, 0.1 m 深度处气压的数值解与实测值差距较大;在 1001~3000 min 期间,0.7, 0.5, 0.3 m 深度处气压数值解与实测值比较一致,而 0.1 m 深度处气压的数值解与实测值相差非常大。在 721~3000 min 期间 0.1 m 和 0.3 m 深度处气压数值解与实测值吻合度不高的主要原因气相上边界条件非常复杂,单一的气压审查边界较难模拟出所有的实际物理过程。

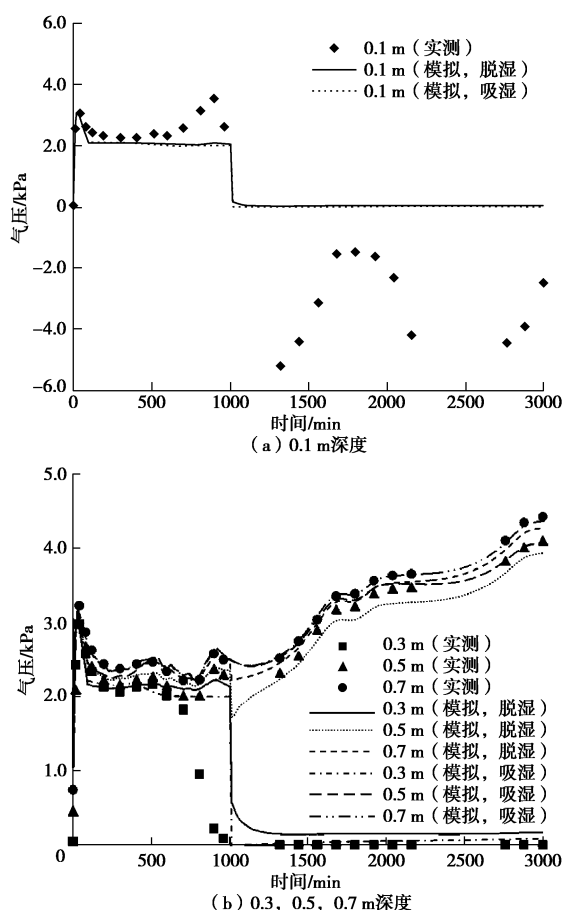


图 11 土柱内各深度气压数值解与实测值的比较

Fig. 11 Numerical solutions of gas pressure at different depths in soil column and their comparisons with measured results

模拟分析得到两种工况对应的试验第(2)步和第(3)步土柱底部气体流进速率随时间变化并与计算值比较如图 7 所示。从图 7 可知,0~1000 min,脱湿曲线对应的模拟结果与实测值更为接近;1001~3000 min,吸湿曲线对应的模拟结果则与实测值更为接近。然而两条曲线的模拟值变化规律与计算值仍有差距,这主要是因为 Air/W 模块无法捕捉到土柱中的气体优势流。同时  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  在土柱中与水发生耦合运移时还存在许多非常复杂的物理过程,比如  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的黏滞系数不同导致其在土柱中的流速存在差异、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  在水中的溶解,以及  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  在土柱不同深度处体积分数存在差异导致的体相扩散等,这些物理现象, Air/W 模块均无法捕捉到。

试验第(3)步,水-填埋气耦合运移试验结束后,为使水分重新分配,土柱底部停止通填埋气,并静置 30 d。使用 Air/W 模块,不考虑气运移,对该 30 d 的静置过程进行一个非饱和渗流模拟分析。该模拟分析的初始条件为水-填埋气耦合运移数值模拟中第 3000 min 的土柱体积含水率剖面,上下边界条件均为零流量边界(不考虑土柱表面蒸发失去的水分)。模拟分析得到土柱最终体积含水率剖面并与实测值的比较如图 9 所示。从图 9 可知,对于上部 0.3 m 厚的黄土,脱湿曲线对应的模拟值与实测值更为接近;而对于下部 0.5 m 厚的黄土,吸湿曲线对应的模拟值与实测值则更为接近。

## 4 结 论

本文通过土柱试验研究了底部通等比例甲烷和二氧化碳条件下黄土覆盖层中气压和各气体组分的分布,并研究了雨水入渗对该两者分布的影响;使用商业软件对黄土覆盖层的水-气耦合运移以及水分重分配过程进行了数值模拟。通过研究可得到以下 4 点结论。

(1) 土柱下部通填埋气和顶部施加水头条件下,湿润锋逐步向下推进,导致土柱各深度气压显著增加:当上边界保持 3 cm 常水头时,气压变化趋势呈现出先增加至“突破值”而后回落至“稳定值”;当湿润锋达到气相渗透系数随饱和度增加而降低更为明显的下部土层时,土柱下部气压进一步增加,而浅层气压发生明显下降,甚至出现负压现象。

(2) 土柱试验结果表明,当上边界保持 3 cm 常水头时土柱表层累积气压“突破值”约等于上部土体进气值。

(3) 基于商业软件 Geo-studio 中 Air/W 模块的水-气两相流数值模拟能较好地模拟水分下渗过程,并能捕捉到气压的变化趋势,但由于其无法模拟水气耦合运移过程中存在的复杂物理过程,比如气体优势流、填埋气在水中的溶解、不同组分填埋气的流速差异及其体相扩散等,从而导致气压的模拟结果与实测值存在差距。

(4) 为更准确地模拟土质覆盖层中水与填埋气的耦合运移,需考虑多组分填埋气在覆盖层中发生的复杂物理过程,包括气体优势流、填埋气在水中的溶解、不同组分填埋气的流速差异及其体相扩散等。

## 参考文献:

- [1] 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))
- [2] USEPA. Evapotranspiration landfill cover systems fact sheet[R]. Cincinnati OH: USEPA/National Service Center for Environmental Publications, 2003.
- [3] HAUSER V L, WEAND B L, GILL M D. Natural covers for landfills and buried waste[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, **127**(9): 768 - 775.
- [4] SCHNABEL W, LEE W, BARNES D L. A numerical simulation of evapotranspiration landfill cover performance at three cold-region locations[C]// *Impacts of Global Climate Change-Proceedings of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress*. 2005.
- [5] MCGUIRE P E, ANDRASKI B J, ARCHIBALD R E. Case study of a full-scale evapotranspiration cover[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(3): 316 - 332.
- [6] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(6): 2317 - 2332.
- [7] SCANLON B R, REEDY R C, KEESE K E, et al. Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern USA[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**(1): 55 - 71.
- [8] KHIRES M V, BENSON C H, BOSSCHER P J. Water balance modeling of earthen final covers[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(8): 744 - 754.
- [9] BENSON C H, BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, et al. Field data and model predictions for a monolithic alternative cover[M]. *Geotechnical Special Publication*, n 130-142, p 3569-3584, 2005, *Geo-Frontiers 2005*.
- [10] BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, BENSON C H, et al. Field data and water-balance predictions for a monolithic cover in a semiarid climate[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(3): 333 - 348.
- [11] 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研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1812 - 1818. (ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, DENG Lin-heng, et al. Performance of earthen final covers of landfills in humid areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1812 - 1818. (in Chinese))
- [12] 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 Wen-jie, QIU Zhan-hong, ZHOU Cheng-ren, et al. Evaluation of evapotranspiration covers of landfills in Yangtze River delta region[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(3): 384 - 389. (in Chinese))
- [13] TOUMA J, VAUCLINE M. Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil[J]. *Transport in Porous Media*, 1986, **1**(1): 27 - 55.
- [14] WANG Z, FEYEN J, VAN GENUCHTEN M T. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability[J]. *Water Resources Research*, 1998, **34**(2): 213 - 222.
- [15] 彭 胜, 陈家军, 王金生, 等. 包气带水气二相流实验研究[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(4): 505 - 511. (PENG Sheng, CHEN Jia-jun, WANG Jin-sheng, et al. Two-phase flow in soil vadose zone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(4): 505 - 511. (in Chinese))
- [16] HUANG X L, XIONG J, LIU J J. Two-phase seepage analysis in unsaturated rock and soil slope during rainfall[C]// *6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion*, 2010.
- [17] 孙冬梅, 朱岳明, 张明进. 非饱和带水-气二相流数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(4): 560 - 565. (SUN Dong-mei, ZHU Yue-ming, ZHANG Ming-jin. Study on numerical model for water-air two-phase flow in unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(4): 560 - 565. (in Chinese))
- [18] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil science society of America journal*, 1980, **44**: 892 - 898.
- [19] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [20] RAHIMI A. Parameters affecting estimation of unsaturated permeability of soils[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2015.
- [21] MONLOUIS B J P, PERRIN J V B. Prediction of the relative permeability to gas flow of cement-based materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, **34**(5): 737 - 744.
- [22] KLINKENBERGER L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. *Drilling and Production Practice, American Petroleum Inst*, 1941, **2**(2): 200 - 213.
- [23] MOON S, NAM K, KIM J Y, et al. Effectiveness of compacted soil liner as a gas barrier layer in the landfill final cover system[J]. *Waste Management*, 2008, **28**(10): 1909 - 1914.
- [24] GEOSLOPE International Ltd. Air/w user's manual[M]. Calgary, Alberta: Geo-Slope Ltd, 2008.