

DOI: 10.11779/CJGE20230280

# 热渗透作用下有机污染物在双人工复合衬层中的一维 运移模型

张春华<sup>1,2</sup>, 黄江东<sup>2</sup>, 邓正定<sup>2</sup>, 谢海建<sup>\*3</sup>, 邓通发<sup>1,2</sup>

(1. 江西理工大学江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000; 2.江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;  
3. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 建立了热渗透作用下有机污染物在双人工复合衬层中的一维运移模型, 利用 COMSOL Multiphysics 数值软件对模型进行模拟计算并对相关参数进行参数分析。结果表明, 即使渗滤液水头  $h_w$  增大到 10 m, 双人工复合衬层底部浓度仅增加了 4.9%, 这表明渗滤液水头对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响较小。当热渗透系数达到  $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时衬垫系统底部浓度增加了 31.5%; 热渗透系数  $k_T > 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 在双人工复合衬层的设计中需要考虑热渗透作用的影响。次衬层中土工膜上连接的褶皱长度和漏洞频率对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响则十分显著, 褶皱长度由 10 m 增加到 100 m 时底部浓度增加了 87%。在双人工复合衬层施工中, 严格控制次衬层土工膜施工质量, 减少褶皱和漏洞的产生, 能有效提高衬垫系统的服役性能。

**关键词:** 热渗透; 双人工复合衬层; 有机污染物; 褶皱

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)06-1254-09

作者简介: 张春华(1990—), 男, 博士, 主要从事环境岩土的研究工作。E-mail: zhangchunhua@jxust.edu.cn。

## One-dimension model for transport of organic contaminants in double-artificial composite liner under thermal osmosis

ZHANG Chunhua<sup>1,2</sup>, HUANG Jiangdong<sup>2</sup>, DENG Zhengding<sup>2</sup>, XIE Haijian<sup>3</sup>, DENG Tongfa<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Environmental Geotechnical Engineering and Hazards Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2 School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3 Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A one-dimensional model for transport of organic contaminants in a double-artificial composite liner under thermal osmosis is proposed. The model is simulated by using the COMSOL Multiphysics. The results show that the bottom concentration only increases by 4.9% even when the leachate head increases to 10 m. It means that the effects of leachate head on transport of organic contaminants in the double-artificial composite liner are negligible. The bottom concentration of the double-artificial composite liner system will increase by 31.5% when the coefficient of thermal osmosis increases to  $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . The effects of thermal osmosis should be considered in the double-artificial composite liner design when the coefficient of thermal osmosis reaches  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . The length of wrinkle and the frequency of holes on the secondary liner geomembrane have significant effects on contaminant transport in the double-artificial composite liner. The bottom concentration increases by 87% when the length of wrinkle increases from 10 to 100 m. In the construction of the double-artificial composite liner, the construction quality of the secondary liner geomembrane should be strictly controlled to reduce the generation of wrinkles and holes, which can effectively improve the service performance of the liner system.

**Key words:** thermal osmosis; double-artificial composite liner; organic contaminant; wrinkle

## 0 引言

近年来, 随着国家经济的高速发展及人民生活的富裕, 城市现代化背后的城市生活和工业垃圾的处理问题日益严峻。目前中国垃圾填埋场、危险废物处置场、尾矿库等达 5 万多个, 多年来填埋和堆存量高达 270 多亿吨, 年产含有毒有害渗滤液 5000 多万吨, 对

周边水土环境构成重大威胁, 致使中国土壤污染问题

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1806005); 国家自然科学基金项目(4197223, 41931289, 52278375); 江西省自然科学基金项目(20202BAB214025, 20224BAB213045); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ190503)

收稿日期: 2023-04-03

\*通信作者(E-mail: xiehaijian@zju.edu.cn)

极为严重<sup>[1]</sup>。

针对渗滤液可能引起的环境污染问题, 周正兵等<sup>[2]</sup>认为传统的压实黏土层(CCL)或者土工膜(GMB)单层防渗系统已不能满足现代环保要求, 目前几乎所有的垃圾填埋场均采用复合防渗系统, 有的甚至做了双层或多层防渗系统。根据《危险废物填埋污染控制标准》(GB18598—2019)中的规定, 双人工复合衬层系统从上往下依次为渗滤液导排层、保护层、主人工衬层(土工膜)、压实黏土衬层、渗滤液检测层、次人工衬层(土工膜)、压实黏土层和基础层。

如果填埋场底部及周边衬垫系统存在缺陷, 污染物容易渗漏到填埋场周边的水体和土体中。然而在实际的填埋场中, 土工膜的缺陷往往无法完全避免, 一旦土工膜出现缺陷, 渗滤液中的污染物会以渗漏方式在复合衬层中运移, 进而对填埋场周围土壤和地下水产生污染风险<sup>[3]</sup>。谢海建等<sup>[4]</sup>建立了污染物通过复合衬垫中的一维渗漏扩散模型, 发现渗滤液水头对复合衬垫的防污性能具有很大的影响, 水头从0.3 m增大到10 m时, 击穿时间从50 a减少到19 a。冯世进等<sup>[5]</sup>建立了污染物通过GMB/GCL/SL复合衬垫的扩散-对流运移解析模型, 考察了对流区域对污染物运移计算结果的影响。此外, 张春华等<sup>[6-7]</sup>研究表明, 渗滤液水头对填埋场衬垫系统的设计厚度也具有重要影响, 当热扩散作用较弱时, 渗滤液水头由0 m增加到6 m时, 所需衬垫厚度增加3.09 m。

填埋场内部与含水层之间的温差会导致填埋场底部衬垫层存在一个温度梯度<sup>[8]</sup>。温度梯度会对污染物在衬垫层中的运移产生驱动力, 形成热扩散作用的同时, 也会改变水分子与黏土矿物之间的氢键网络, 从而产生了从高温部位到低温部位的额外流体通量, 这一效应被称之为热渗透作用<sup>[9-13]</sup>。土体热渗透性能强弱一般用热渗透系数 $k_T$ 来表示, 其数值为 $10^{-14} \sim 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且当热渗透系数大于 $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 热渗透效应才会显著影响污染物在多孔介质中的运移过程<sup>[14-15]</sup>。张志红等<sup>[16]</sup>建立了单一溶质在饱和土体中运移的热-水-力-化全耦合分析模型, 得出热扩散作用会加速溶质运移进程, 而热渗透与热固结机制对溶质运移具有阻滞作用。田改垒等<sup>[17]</sup>建立了考虑热效应的污染物在土中扩散、渗透和固结耦合模型, 发现热扩散、热渗透能够显著加快污染物运移, 且随着索雷特系数和热渗透系数的增大, 热扩散和热渗透效应对污染物运移的促进作用增强。目前对热渗透效应的研究主要集中在核废料地质处置等领域, 而对填埋场衬垫系统中存在的热渗透作用缺乏研究。

对此, 以危废填埋场双人工复合衬层为研究对象, 建立对流、热扩散和热渗透等耦合作用下污染物在双人工复合衬层中的一维运移模型, 并得到相应的控制

方程, 利用COMSOL Multiphysics数值软件对该模型进行模拟计算, 分析了渗滤液水头、热渗透系数及主、次衬层中土工膜的漏洞频率和连接的褶皱长度等对污染物在双人工复合衬层中运移的影响规律, 为填埋场双人工复合衬层的设计提供了参考依据。

## 1 数学模型和控制方程

### 1.1 数学模型

有机污染物在危废填埋场双人工复合衬层中的一维运移模型如图1所示。由于土工膜的厚度较薄(小于10 mm), 有机污染物通过GMB的运移速度很快, 可以假设有有机污染物通过GMB的运移为一维稳态的过程<sup>[18]</sup>。假设危废填埋场产生的渗滤液的浓度保持不变为 $C_0$ ; 图1中假设竖直向下为 $z$ 的正方向, 且 $z$ 轴的原点在主衬层土工膜的表面; GMB1和GMB2分别为主衬层和次衬层中土工膜, 厚度分别为 $L_{g1}$ 和 $L_{g2}$ ; CCL1和CCL2分别为主衬层和次衬层中的压实黏土层, 厚度分别为 $L_{s1}$ 和 $L_{s2}$ ;  $L_d$ 为渗滤液检测层的厚度。

《危险废物填埋污染控制标准》(GB18598—2019)规定危废填埋场场址的天然基础层厚度不应小于2 m, 模型中以衰减层(AL)来模拟天然基础层,  $L_{al}$ 为AL层的厚度;  $L$ 为双人工复合衬层的总厚度; 双人工复合衬垫顶部温度为 $T_u$ , 底部温度为 $T_b$ ;  $v_a$ 为衬层中的达西流速;  $R_d$ 为阻滞因子;  $n_s$ 为CCL的孔隙率;  $S_T$ 和 $k_T$ 分别为索雷特系数和热渗透系数;  $C_b$ 为有机污染物在含水层中的浓度。

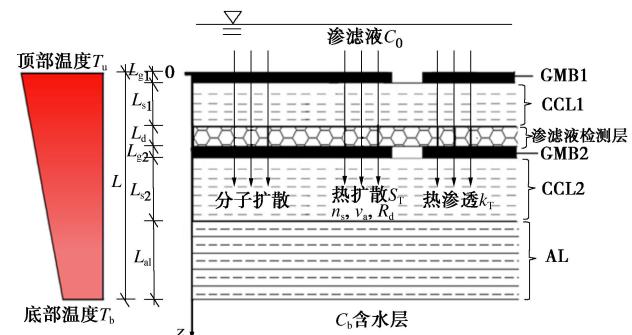


图1 热渗透作用下有机污染物在双人工复合衬层中运移的数学模型

Fig. 1 Mathematical model for transport of organic contaminants in double-artificial composite liner under thermal osmosis

本文模型主要的假设有: ①有机污染物通过双人工复合衬层的运移是一维的; ②GMB、CCL和AL为均质介质; ③CCL和AL是饱和的; ④热传导过程被假设为一个稳态过程。

### 1.2 控制方程

#### (1) 对于主衬层

有机污染物通过主衬层中GMB1的稳态运移控制方程为

$$D_{\text{g1}} \frac{d^2 C_{\text{g1}}}{dz^2} - v_{\text{a1}} \frac{dC_{\text{g1}}}{dz} + AS_{\text{T}} D_{\text{g1}} \frac{\partial C_{\text{g1}}}{\partial z} + \frac{\partial C_{\text{g1}}}{\partial z} \left( k_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{g1}}$  为有机污染物在 GMB1 中的有效扩散系数;  $C_{\text{g1}}$  为 GMB1 中的有机污染物浓度;  $A$  为双人工复合衬层的温度梯度;  $S_{\text{T}}$  为索雷特系数;  $v_{\text{a1}}$  为主衬层的达西流速;  $k_{\text{T}}$  为热渗透系数;  $T$  为温度。

假设热传导过程是一个一维稳态的过程, 其控制方程为

$$T = Az + B. \quad (2)$$

式中:  $A$ ,  $B$  为常数, 可根据双人工复合衬层的边界温度条件来确定。

根据 Rowe<sup>[19]</sup>提出的预测通过 GMB 漏洞的渗漏率计算方法, 图 1 中的主衬层的渗漏率的计算公式为

$$Q_1 = 2 \frac{(h_{\text{w1}} + L_{\text{s1}} + L_{\text{g1}}) L_{\text{w1}}}{L_{\text{s1}}} \left( k_{\text{ccl}} b + \sqrt{k_{\text{ccl}} L_{\text{s1}} \theta} \right). \quad (3)$$

式中:  $Q_1$  为通过主复合衬垫的渗漏率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $L_{\text{w1}}$  为 GMB1 上连接的褶皱长度 ( $\text{m}$ );  $2b$  为褶皱的宽度 ( $\text{m}$ );  $L_{\text{s1}}$  为 CCL1 的厚度 ( $\text{m}$ );  $\theta$  为 GMB 和 CCL 之间的界面导水系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $k_{\text{ccl}}$  为 CCL 的渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $h_{\text{w1}}$  为主复合衬层的水头损失 ( $\text{m}$ )。

达西速度可以通过下式获得<sup>[18]</sup>:

$$v_{\text{a1}} = \frac{m_1 Q_1}{A_0}. \quad (4)$$

式中:  $m_1$  为在 GMB1 的漏洞频率 (个/ $\text{hm}^2$ );  $A_0$  为流速的横截面面积 ( $\text{m}^2$ )。

有机污染物通过 CCL1 的一维运移控制方程为

$$\frac{\partial C_{\text{rl}}(z, t)}{\partial t} = \frac{D^*}{R_{\text{d}}} \frac{\partial^2 C_{\text{rl}}(z, t)}{\partial z^2} - \frac{v_{\text{s1}}}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{rl}}(z, t)}{\partial z} + \frac{AS_{\text{T}} D^*}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{rl}}(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{rl}}}{\partial z} \left( k_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{rl}}(z, t)$  为任意时间  $t$  及任意坐标  $z$  处 CCL1 的有机污染物浓度;  $D^*$  为有机污染物在 CCL 中的有效扩散系数;  $R_{\text{d}}$  为 CCL 的阻滞因子;  $v_{\text{s1}}$  为 CCL1 中的渗流速度,

$$v_{\text{a1}} = n_{\text{s}} v_{\text{s1}}. \quad (6)$$

式中:  $n_{\text{s}}$  为 CCL 的孔隙率。

(2) 对于次衬层

有机污染物通过次衬层中 GMB2 的稳态运移控制方程为

$$D_{\text{g2}} \frac{d^2 C_{\text{g2}}}{dz^2} - v_{\text{a2}} \frac{dC_{\text{g2}}}{dz} + AS_{\text{T}} D_{\text{g2}} \frac{\partial C_{\text{g2}}}{\partial z} + \frac{\partial C_{\text{g2}}}{\partial z} \left( k_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \quad (7)$$

式中:  $D_{\text{g2}}$  为有机污染物在 GMB2 中的有效扩散系数;  $C_{\text{g2}}$  为 GMB2 中有机污染物浓度;  $v_{\text{a2}}$  为次衬层中的达

西流速, 可以通过渗漏率计算得到。次衬层渗漏率为

$$Q_2 = 2 \frac{(h_{\text{w2}} + L_{\text{s2}} + L_{\text{g2}} + L_{\text{al}}) L_{\text{w2}}}{L_{\text{s2}} + L_{\text{al}}} \left( k_{\text{ccl}} b + \sqrt{k_{\text{ccl}} (L_{\text{s2}} + L_{\text{al}}) \theta} \right). \quad (8)$$

式中:  $Q_2$  为通过次复合衬层的渗漏率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $L_{\text{w2}}$  为 GMB2 上连接的褶皱长度 ( $\text{m}$ );  $L_{\text{s2}}$  为 CCL2 的厚度 ( $\text{m}$ );  $L_{\text{al}}$  为 AL 的厚度 ( $\text{m}$ );  $h_{\text{w2}}$  为次复合衬垫的水头损失 ( $\text{m}$ ), 本文模型中为渗滤液检测层厚度。次衬层中达西速度为

$$v_{\text{a2}} = \frac{m_2 Q_2}{A_0}. \quad (9)$$

式中:  $m_2$  为在 GMB2 中的漏洞频率 (个/ $\text{hm}^2$ )。

有机污染物通过 CCL2 的一维运移控制方程为

$$\frac{\partial C_{\text{r2}}(z, t)}{\partial t} = \frac{D^*}{R_{\text{d}}} \frac{\partial^2 C_{\text{r2}}(z, t)}{\partial z^2} - \frac{v_{\text{s2}}}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{r2}}(z, t)}{\partial z} + \frac{AS_{\text{T}} D^*}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{r2}}(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{R_{\text{d}}} \frac{\partial C_{\text{r2}}}{\partial z} \left( k_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (10)$$

式中:  $C_{\text{r2}}(z, t)$  为任意时间  $t$  及任意坐标  $z$  处 CCL2 的有机污染物浓度;  $v_{\text{s2}}$  为 CCL2 中的渗流速度,

$$v_{\text{a2}} = n_{\text{s}} v_{\text{s2}}. \quad (11)$$

有机污染物通过 AL 的一维运移控制方程为

$$\frac{\partial C_{\text{al}}(z, t)}{\partial t} = \frac{D_{\text{al}}}{R_{\text{d,al}}} \frac{\partial^2 C_{\text{al}}(z, t)}{\partial z^2} - \frac{v_{\text{s3}}}{R_{\text{d,al}}} \frac{\partial C_{\text{al}}(z, t)}{\partial z} + \frac{AS_{\text{T}} D^*}{R_{\text{d,al}}} \frac{\partial C_{\text{al}}(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{R_{\text{d,al}}} \frac{\partial C_{\text{al}}}{\partial z} \left( k_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (12)$$

式中:  $C_{\text{al}}(z, t)$  为任意时间  $t$  及任意坐标  $z$  处 AL 的有机污染物浓度;  $v_{\text{s3}}$  为 AL 中的渗流速度,

$$v_{\text{a2}} = n_{\text{al}} v_{\text{s3}}. \quad (13)$$

式中:  $n_{\text{al}}$  为 AL 的孔隙率。

(3) 初始及边界条件

假设有机污染物在主衬层、次衬层和 AL 中的初始浓度为 0, 即

$$C_i(z, 0) = 0. \quad (14)$$

在主衬层 GMB1 和渗滤液的界面处需要满足以下条件:

$$C_{\text{g1}}(0) = C_0 S_{\text{gf}}. \quad (15)$$

式中:  $S_{\text{gf}}$  为有机污染物在 GMB 中的分配系数。

在主衬层 GMB1 和 CCL1 界面处, 应满足浓度连续和通量连续条件, 当不考虑接触面阻碍时, 它们之间的连续条件可以表示为<sup>[20]</sup>

$$\frac{C_{\text{g1}}(L_{\text{g1}})}{S'_{\text{gf}}} = C_{\text{rl}}(L_{\text{g1}}, t), \quad \left( -(AS_{\text{T}} D_{\text{g}} + Ak_{\text{T}}) \frac{C_{\text{g1}}(L_{\text{g1}})}{S'_{\text{gf}}} - D_{\text{g}} \frac{\partial C_{\text{g1}}(L_{\text{g1}})}{\partial z} \right) \quad (16)$$

$$= \left( -n_s (AS_T D^* + Ak_T) C_{rl}(L_{g1}, t) - n_s D^* \frac{\partial C_{rl}(L_{g1}, t)}{\partial z} \right) \quad (17)$$

式中:  $S'_{gf}$  为有机污染物在 GMB 和 CCL 之间的分配系数, 通常与  $S_{gf}$  取值相同。

在对模型进行模拟计算时, 建立一维数学模型时可忽略渗滤液检测层的影响, 视为主衬层底部与次衬层顶部的浓度和通量连续, 因此可以假定渗滤液经过检测层的浓度不变, 即主衬层的底部浓度和次衬层土工膜的顶部浓度相同。则在主衬层 CCL1、GMB2、CCL2 和 AL 界面处, 应满足浓度连续和通量连续条件, 当不考虑接触面阻碍时, 它们之间的连续条件可以表示为<sup>[20]</sup>

$$C_{rl}(L_{g1} + L_{s1}) S'_{gf} = C_{g2}(L_{g1} + L_{s1}, t) \quad , \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \left( -n_s (AS_T D^* + Ak_T) C_{rl}(L_{g1} + L_{s1}, t) - n_s D^* \frac{\partial C_{rl}(L_{g1} + L_{s1}, t)}{\partial z} \right) \\ & = \left( -(AS_T D_{g2} + Ak_T) C_{g2}(L_{g1} + L_{s1}, t) - D_{g2} \frac{\partial C_{g2}(L_{g1} + L_{s1}, t)}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{C_{g2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2})}{S'_{gf}} = C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2}, t) \quad , \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \left[ -(AS_T D_{g2} + Ak_T) C_{g2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2}, t) - \right. \\ & \left. D_{g2} \frac{\partial C_{g2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2}, t)}{\partial z} \right] \\ & = (-n_s (AS_T D^* + Ak_T) C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2}, t) \cdot \\ & \quad n_s D^* \frac{\partial C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2}, t)}{\partial z}) \quad , \quad (21) \end{aligned}$$

$$C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}) = C_{al}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}, t) \quad , \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & (-n_s (AS_T D^* + Ak_T) C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}, t) \cdot \\ & n_s D^* \frac{\partial C_{r2}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}, t)}{\partial z}) \\ & = (-n_{al} (AS_T D_{al} + Ak_T) C_{al}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}, t) \cdot \\ & n_{al} D_{al} \frac{\partial C_{al}(L_{g1} + L_{s1} + L_{g2} + L_{s2}, t)}{\partial z}) \quad . \quad (23) \end{aligned}$$

底部边界条件考虑无穷底部边界, 即

$$C_{al}(\infty, t) = 0 \quad . \quad (24)$$

## 2 模型求解与分析

本文所建立的数学模型符合《危险废弃物填埋标准》(GB18598—2019)中规定的双人工复合衬层的组成, 运用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立有机污染物在分子扩散、对流、热扩散和热渗透作用下的一维运移模型并进行计算分析。利用其中的 PDE 模块对模型进行了有限元模拟。通过对模型进行网格细化, 直到得到网格独立的结果, 验证了模型的收敛性。最后对模型的网格进行优化, 得到了预定义的基于物理的极细网格单元, 最大网格为 1.1 cm, 最大单元增长率为 1.1。

作为填埋场渗滤液中最常见的有机污染物组分, 本文选取甲苯作为代表性有机污染物, 假设渗滤液中的有机污染物浓度为定值 100 mg/L, 不考虑各垫层内部的背景浓度<sup>[21-22]</sup>。此外, 考虑双人工复合衬层顶部温度为 333 K, 底部温度可为 293 K。有机污染物在 GMB 中的分配系数为 100。考虑 GMB 和 CCL 之间的接触条件差, 即 GMB 和 CCL 之间的界面导水系数  $\theta$  取  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[21]</sup>。其他相关参数取值见表 1<sup>[22-26]</sup>。

### 2.1 渗滤液水头的影响

在许多发展中国家, 由于填埋场施工质量未能很好地受到控制以及施工条件的限制等因素, 垃圾填埋场的渗滤液水头往往非常高, 有些甚至超过 10 m<sup>[27-30]</sup>。为了研究了水头作用对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响。选取 0.3, 1, 3, 10 m 等 4 种渗滤液水头的情况下进行分析。其它参数见表 1, 计算结果如图 2 所示。

图 2 给出考虑不同渗滤液水头下双人工复合衬层有机污染物浓度击穿曲线和浓度剖面。从图 2 (a) 可以看出有机污染物在对流作用下在双人工复合衬层中运移的影响较小, 渗滤液水头为 10 m 情况下, 1000 a 时的底部质量浓度为 94.29 mg/L。若以 0.1 作为击穿标准( $C_b/C_0$ ), 渗滤液为 10 m 时双人工复合衬层的击穿时间约为 120 a。以 500 a 的底部浓度为例, 渗滤液水头  $h_w$  从 0.3 m 增大到 10 m 时的底部浓度双人工复合衬层仅增加了 4.9%。从图 2 (b) 可以看出, 渗滤液水头  $h_w$  从 0.3 m 增大到 10 m 时, 500 a 的衬垫系统剖面浓度变化很小 (小于 5%)。以  $h_w=3$  m 为例, 次衬

表 1 甲苯在各介质中相关运移参数的取值

Table 1 Transport parameters for toluene in liners

参数	厚度 $L/\text{m}$	有效扩散系数 $D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	孔隙率 $n$	阻滞因子 $R_d$	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	漏洞频率 $m/(\text{个} \cdot \text{hm}^{-2})$	褶皱宽度 $b/\text{m}$	褶皱长度 $L_w/\text{m}$	索雷特系数 $S_T/\text{K}^{-1}$	热渗透系数 $k_T/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	渗滤液水头 $h_w/\text{m}$
GMB1/GMB2	0.002	$3 \times 10^{-13}$	—	—	—	2.5	0.1	200/30	0.03	$1 \times 10^{-12}$	0.3
CCL1/CCL2	0.3/0.5	$4.1 \times 10^{-10}$	0.35	9.8	$1 \times 10^{-9}$	—	—	—	—	—	—
AL	2	$8.9 \times 10^{-10}$	0.40	2.1	$1 \times 10^{-7}$	—	—	—	—	—	—

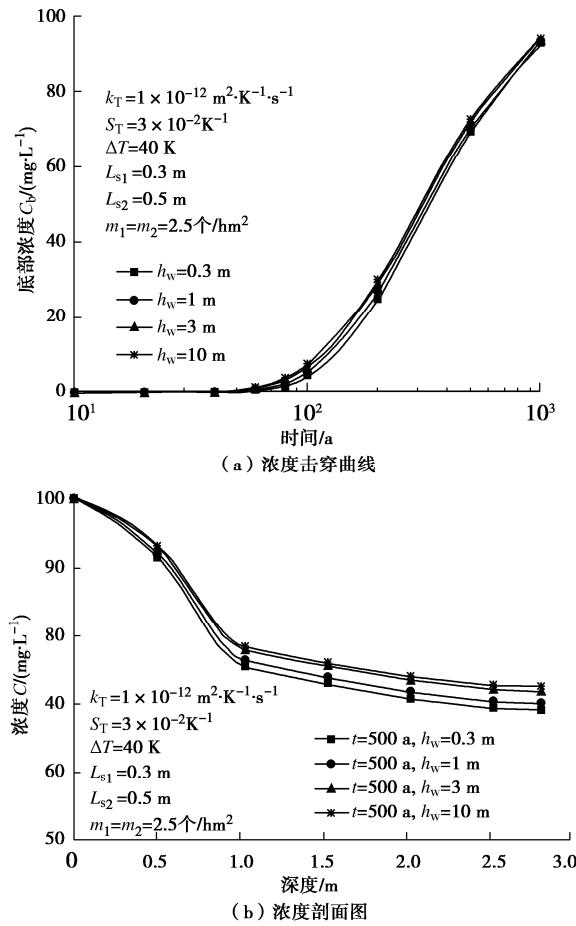


图2 渗滤液水头对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响

Fig. 2 Effects of leachate head on transport of organic contaminants in double-artificial composite liner

层下表面 ( $z=0.804 \text{ m}$ ) 较主衬层上表面 ( $z=0$ ) 的有机污染物浓度减少了 22%，而 AL 层下表面 ( $z=2.804 \text{ m}$ ) 较上表面 ( $z=0.804 \text{ m}$ ) 的有机物浓度减少了 6%。这表明主、次衬层对有机污染物的阻隔效果远胜于 AL 层，这主要是因为主、次衬层的渗透系数远低于 AL 层。

可以看出，渗滤液水头对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响不明显（小于 5%），这主要是因为渗滤液水头虽然会显著增加主衬层的渗漏率，然而由于主、次衬层中的土工膜的低渗透性，且土工膜采用的是较厚的如 2 mm 的 HDPE，以及次衬层的导排系统的要求也更高，使得作用在次衬层中的渗滤液水头一般都较低（低于 0.6 m），进而使次衬层的渗滤液渗漏率保持在一个较低的状态，这直接影响了有机污染物通过次衬层的渗漏进入到含水层中。因此，与传统的单层复合衬垫相比，双人工复合衬层能够显著降低渗滤液水头对有机污染物运移的影响，这为解决高渗滤液水头引起的污染物渗漏问题提供了有效的解决方法。

## 2.2 热渗透作用的影响

为了研究了热渗透作用对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响，分别考虑了热渗透系数  $k_T$  为

$5 \times 10^{-11}$ ,  $1 \times 10^{-11}$ ,  $5 \times 10^{-12}$ ,  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的 4 种情况<sup>[14-15]</sup>。渗滤液水头  $h_w$  为 0.3 m，其他参数与表 1 相同。计算结果如图 3 所示。

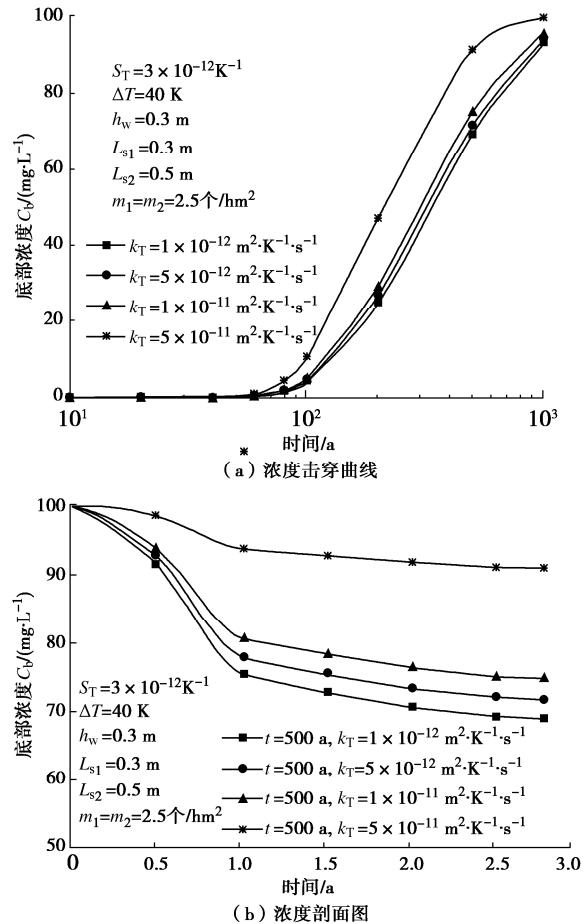


图3 热渗透作用对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响

Fig. 3 Effects of thermal osmosis on transport of organic contaminants in double-artificial composite liner

图 3 给出考虑不同热渗透作用下双人工复合衬层的有机污染物浓度击穿曲线和浓度剖面。从图 3 可以看出有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响会随着热渗透系数的增加而增大。以 500 a 的底部浓度为例，热渗透系数  $k_T$  从  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时的底部浓度分别由 69.09 mg/L 增加到 90.88 mg/L，增加了 31.5%。且当热渗透系数  $k_T \leq 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时，其对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响较小（小于 10%）；当热渗透系数  $k_T > 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时，热渗透作用的影响逐渐明显，在双人工复合衬层的设计中需要考虑。由图 3(b) 可以看出，随着热渗透系数的增大，其对剖面浓度的影响也逐渐增大。当  $k_T = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时，次衬层下表面较主衬层上表面的有机污染物浓度减少了 24%，而 AL 层下表面较上表面的有机污染物浓度减少了 7%；而当  $k_T = 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时，次衬层下表面较主衬层上表面的有机污染物浓度减少了 6%，而

AL层下表面较上表面的有机污染物浓度减少了3%。这是因为热渗透作用较大时会显著加速有机污染物在双人工复合衬层中的运移, 进而降低其防污性能。

### 3 主、次衬层参数敏感性分析

基于以上建立的数值模型利用有限元软件COMSOL Multiphysics分析了主、次衬层中CCL的厚度、土工膜的褶皱连接长度和漏洞频率等参数对双人工复合衬层的服役性能的影响进行分析。选取甲苯作为填埋场渗沥液中的典型有机污染物, 假设衬层顶底部温差 $\Delta T$ 为40 K, 索雷特系数 $S_T$ 为 $3 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ , 热渗透系数 $k_T$ 为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 渗滤液水头 $h_w$ 为0.3 m, 其他参数与表1相同。

#### 3.1 CCL厚度对双人工复合衬层性能的影响

根据《危险废弃物填埋标准》(GB18598—2019)中双人工复合衬层的规定, 主衬层中CCL的厚度不小于0.3 m, 次衬层中CCL的厚度不小于0.5 m。分别研究了主衬层CCL厚度 $L_{s1}$ 从0.3 m增加到1.2 m时和次衬层CCL厚度 $L_{s2}$ 从0.5 m增加到2 m时有机污染物在双人工复合衬层中运移的情况。计算结果如图4所示。

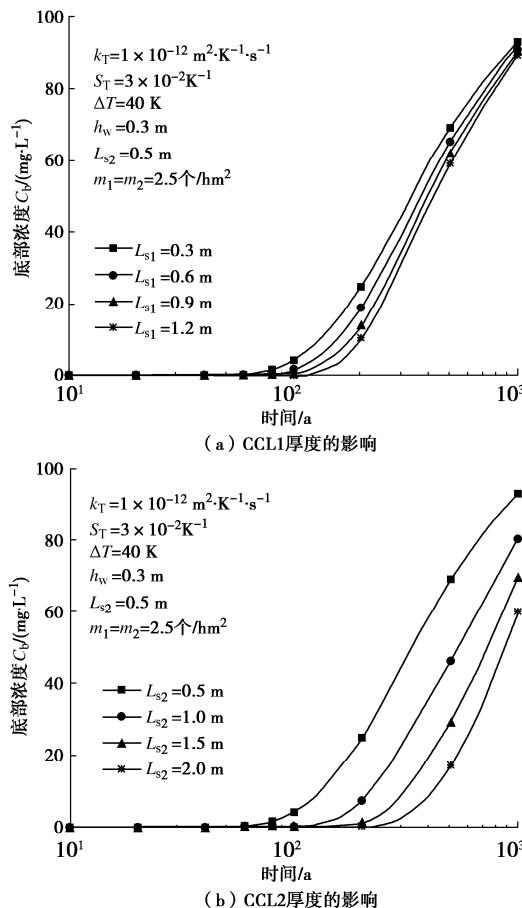


图4 主、次衬层CCL厚度对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响

Fig. 4 Effects of thickness of CCL1 and CCL2 on transport of organic contaminants in double-artificial composite liner

图4给出了不同主、次衬层CCL厚度对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响。可以看出有机污染物在双人工复合衬层的底部浓度会随着主、次衬层中CCL的厚度增加而减小, 而且次衬层CCL的厚度变化的影响更显著。以500 a的底部浓度为例, 从图4(a)可以得到, 主衬层CCL厚度 $L_{s1}$ 从0.3 m增加到1.2 m时衬垫系统的底部浓度由69.09 mg/L降低到59.14 mg/L, 减少了14.4%; 从图4(b)可以得到, 次衬层CCL厚度 $L_{s2}$ 从0.5 m增加到2 m时的底部浓度分别由69.09 mg/L下降到16.93 mg/L, 减少了75.5%。

可见, 增加主、次衬层中CCL的厚度都能改善双人工复合衬层的服役性能, 且增加次衬层中CCL的厚度的效果更为显著。这主要是因为次衬层中的CCL作为阻隔有机污染物进入AL层的最后一道屏障, 增加其厚度能够直接增加有机污染物运移到AL层的时间, 进而显著延缓了有机污染物进入到含水层中。因此, 在危险废物填埋场双人工复合衬层的设计中, 可以考虑适当增加次衬层防渗层的厚度, 这能够有效提高双人工复合衬层的防污性能。

#### 3.2 土工膜连接的褶皱长度对双人工复合衬层性能的影响

相关研究表明, 土工膜上连接的褶皱长度(以下简称为褶皱长度)变化范围为30~2510 m<sup>[31-32]</sup>。考虑主、次衬层GMB中的褶皱长度 $L_{w1}$ 和 $L_{w2}$ 分别从100 m增大到1000 m和10 m增大到100 m时, 其对双人工复合衬层服役性能的影响。计算结果如图5所示。

图5给出考虑不同主、次衬层土工膜的褶皱长度对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响。从图5可以看出有机污染物在双人工复合衬层的底部浓度会随着褶皱长度增加而增加, 而且次衬层土工膜的褶皱长度对有机污染物运移的影响更大。以500 a的底部浓度为例, 从图5(a)可以得到, GMB1的褶皱长度 $L_{w1}$ 从100 m增加到1000 m时的衬垫系统底部浓度由67.39 mg/L增加到71.86 mg/L, 增加了6.7%。从图5(b)可以得到, GMB2的褶皱长度 $L_{w2}$ 从10 m增加到100 m时的底部浓度由51.86 mg/L增加到96.85 mg/L, 增加了87%。

以上结果表明, 主衬层中土工膜的褶皱长度对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响不大(小于10%), 而次衬层中土工膜的褶皱长度的影响则十分显著。这主要是因为GMB2的褶皱长度的增加直接加速了渗滤液通过次衬层渗漏到含水层中, 促进了有机污染物的运移; 而GMB1的褶皱长度主要增加了渗滤液在主衬层中的渗漏, 对渗滤液渗漏到含水层中的影响有限。因此, 在填埋场双人工复合衬层的实际施工中,

应该尽量铺平伸展次衬层土工膜，降低连接的褶皱长度，这对于增强双人工复合衬层防污性能尤为重要。

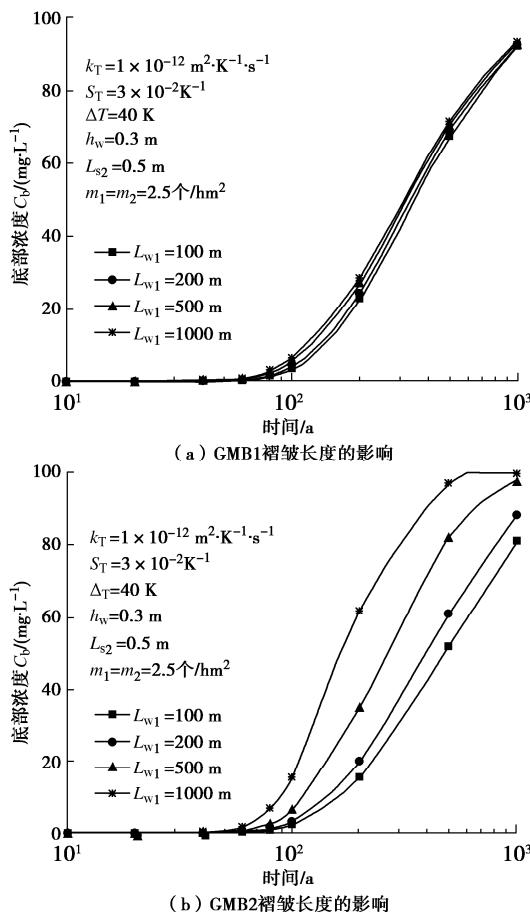


图 5 主、次衬层土工膜褶皱长度对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响

Fig. 5 Effects of length of wrinkle on GMB1 and GMB2 on transport of organic contaminants in double-artificial composite liner

### 3.3 土工膜漏洞频率对双人工复合衬层性能的影响

徐亚等<sup>[33]</sup>通过统计中国 80 个填埋场衬垫漏洞频率情况，发现填埋场衬垫的漏洞频率达 19 个/hm<sup>2</sup>。在严格控制施工过程和保证施工质量的前提下以及设置土工膜保护层以减轻土工膜所承受的张力的情况下，填埋场中一般采用 2.5~5 个/hm<sup>2</sup> 的漏洞频率进行计算较为合理<sup>[5]</sup>。为了研究漏洞频率对双人工复合衬层防污性能的影响，考虑主次衬层漏洞频率  $m_1$  和  $m_2$  分别从 2.5 个/hm<sup>2</sup> 增大到 10 个/hm<sup>2</sup> 时，其对双人工复合衬层性能的影响。计算结果如图 6 所示。

图 6 给出了主、次衬层的土工膜漏洞频率对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响。可以看出随着土工膜漏洞频率的增大，有机污染物在双人工复合衬层中的底部浓度会增加，而且次衬层土工膜漏洞频率的影响更大。以 500 a 为例，从图 6 (a) 可以得到，主衬层土工膜漏洞频率  $m_1$  从 2.5 个/hm<sup>2</sup> 增大到 10 个/hm<sup>2</sup> 时的底部浓度由 69.09 mg/L 增加到 71.59 mg/L，

增加了 3.6%；从图 6 (b) 可以得到，次衬层土工膜漏洞频率  $m_2$  从 2.5 个/hm<sup>2</sup> 增大到 10 个/hm<sup>2</sup> 时的底部浓度由 69.09 mg/L 增加到 98.69 mg/L，增加了 42.9%。

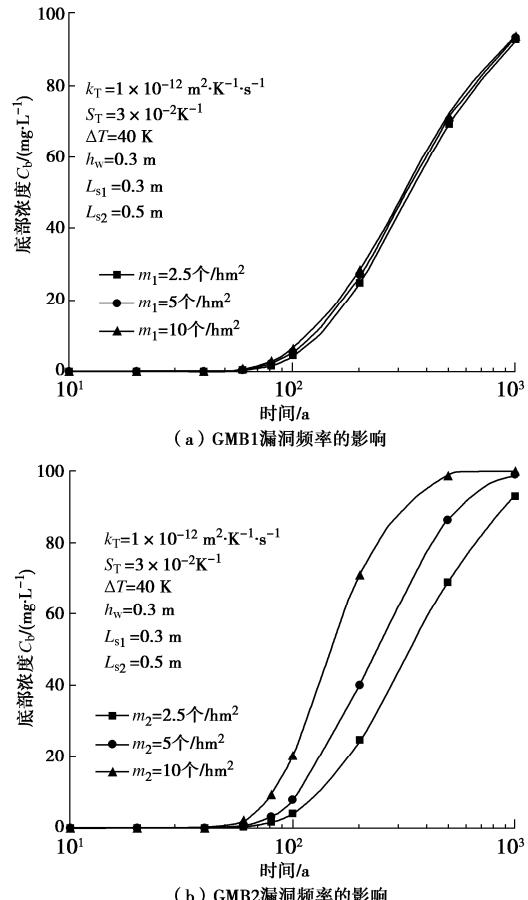


图 6 主、次衬层土工膜漏洞频率对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响

Fig. 6 Effects of frequency of holes on GMB1 and GMB2 on transport of organic contaminants in double-artificial composite liner

上述结果表明，主衬层土工膜的漏洞频率对双人工复合衬层服役性能的影响较小（小于 10%），而次衬层土工膜的漏洞频率的影响较大（可以达到 42.9%）。这主要是因为 GMB2 的漏洞频率直接影响了渗滤液通过次衬层渗漏到含水层中，而 GMB1 的漏洞频率主要影响了渗滤液在主衬层中的渗漏，对渗滤液渗漏到含水层中的影响有限。因此，在双人工复合衬层的施工过程中，应重点控制次衬层土工膜的漏洞频率，以便有效提高双人工复合衬层的防污性能，延长其服役寿命。

## 4 结 论

(1) 在对流作用下有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响较小，渗滤液水头  $h_w$  从 0.3 m 增大到 10 m 时双人工复合衬层的底部浓度仅增加了 4.9%，说明双人工复合衬层能够显著降低填埋场中渗滤液水头对

有机污染物在衬垫系统中运移的影响。

(2) 有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响会随着热渗透系数的增加而增大。热渗透系数  $k_T$  从  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时的底部浓度增加了 31.5%。当热渗透系数  $k_T \leq 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 其对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响较小 (小于 10%); 而当热渗透系数  $k_T > 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 热渗透作用的影响逐渐明显, 在双人工复合衬层的设计中需要考虑。

(3) 有机污染物在双人工复合衬层的底部浓度会随着主、次衬层中 CCL 的厚度增加而减小, 而且次衬层 CCL 的厚度变化的影响更显著。CCL1 厚度由 0.3 增加到 1.2 m 时衬垫系统的底部浓度减少了 14.4%; CCL2 厚度由 0.5 增加到 2 m 时的底部浓度减少了 75.5%。增加次衬层 CCL 厚度可以有效改善双人工复合衬层的服役性能。

(4) 主衬层中土工膜的褶皱长度和漏洞频率对有机污染物在双人工复合衬层中运移的影响不大 (小于 10%), 而次衬层中土工膜的褶皱长度和漏洞频率的影响则十分显著。当 GMB2 的褶皱长度由 10 增加到 100 m、漏洞频率由 2.5 增大到 10 个/ha 时底部浓度分别增加了 87% 和 42.9%。因此, 在双人工复合衬层施工中, 应该严格控制次衬层土工膜施工质量, 减少褶皱和漏铜的产生, 这对提高衬垫系统的使用寿命具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 薛强, 詹良通, 胡黎明, 等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 80-94. (XUE Qiang, ZHAN Liangtong, HU Liming, et al. Environmental geotechnics: state-of-the-art of theory, testing and application to practice[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 80-94. (in Chinese))
- [2] 周正兵, 王钊, 费香泽. 用于固体废弃物填埋场中的两种复合防渗系统的比较[J]. 环境工程, 2002, 20(3): 55-59, 5. (ZHOU Zhengbing, WANG Zhao, FEI Xiangze. Comparision of two kinds of composite impervious systems used in solid waste landfills[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(3): 55-59, 5. (in Chinese))
- [3] 周炼, 安达, 杨延梅, 等. 危险废物填埋场复合衬层渗漏分析与污染物运移预测[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2210-2217. (ZHOU Lian, AN Da, YANG Yanmei, et al. Predicting leakage and contaminant transport through composite liners in hazardous waste landfill[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2210-2217. (in Chinese))
- [4] 谢海建, 陈云敏, 楼章华. 污染物通过有缺陷膜复合衬垫的一维运移解析解[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(5): 486-495. (XIE Haijian, CHEN Yunmin, LOU Zhanghua. Analytical solution of one-dimensional migration of pollutants through defective membrane composite liner[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2010, 40(5): 486-495. (in Chinese))
- [5] 冯世进, 彭明清, 陈樟龙, 等. 复合衬垫中污染物一维瞬态扩散-对流运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 799-809. (FENG Shijin, PENG Mingqing, CHEN Zhanglong, et al. One-dimensional transport of transient diffusion-advection of organic contaminant through composite liners[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 799-809. (in Chinese))
- [6] 张春华, 吴家葳, 陈赟, 等. 基于污染物击穿时间的填埋场复合衬垫厚度简化设计方法[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1841-1848. (ZHANG Chunhua, WU Jiawei, CHEN Yun, et al. Simplified method for determination of thickness of composite liners based on contaminant breakthrough time[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1841-1848. (in Chinese))
- [7] 张春华, 黄江东, 李晓宙, 等. 热扩散作用下污染物在 CCL 中运移的一维解析模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 541-550. (ZHANG Chunhua, HUANG Jiangdong, LI Xiaozhou, et al. One-dimensional analytical model for contaminant transport through CCL under thermal diffusion and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 541-550. (in Chinese))
- [8] 李江山, 江文豪, 葛尚奇, 等. 非等温分布条件下压实黏土衬垫中固结与污染物运移耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 2071-2080. (LI Jiangshan, JIANG Wenhao, GE Shangqi, et al. Coupling model for consolidation and contaminant transport in compacted clay liners under non-isothermal condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(11): 2071-2080. (in Chinese))
- [9] CHEN Y F, ZHOU C B, JING L R. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: theory and validation against laboratory and field scale experiments[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(8): 1308-1329.
- [10] GHASSEMI A, TAO Q, DIEK A. Influence of coupled chemo-poro-thermoelastic processes on pore pressure and stress distributions around a wellbore in swelling shale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 67(1/2): 57-64.
- [11] GONÇALVÈS J, DE MARSILY G, TREMOSA J. Importance of thermo-osmosis for fluid flow and transport in clay formations hosting a nuclear waste repository[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 339/340: 1-10.
- [12] GONÇALVÈS J, TRÉMOSA J. Estimating thermo-osmotic coefficients in clay-rocks: I. Theoretical insights[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 342(1): 166-174.

- [13] THOMAS H R, VARDON P J, CLEALL P J. Three-dimensional behaviour of a prototype radioactive waste repository in fractured granitic rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(3): 246-259.
- [14] SOLER J M. The effect of coupled transport phenomena in the Opalinus Clay and implications for radionuclide transport[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **53**(1/2): 63-84.
- [15] ZAGORŠČAK R, SEDIGHI M, THOMAS H R. Effects of thermo-osmosis on hydraulic behavior of saturated clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(3): 04016068.
- [16] 张志红, 韩林, 田改垒. 饱和土体热-水-力-化全耦合一维溶质运移模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, **49**(6): 1178-1186. (ZHANG Zhihong, HAN Lin, TIAN Gailei. One-dimensional transport model for solute with thermo-hydro-mechanical-chemical coupling in saturated soil[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, **49**(6): 1178-1186. (in Chinese))
- [17] 田改垒, 张志红. 考虑热效应的污染物在土中扩散、渗透和固结耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(2): 278-287. (TIAN Gailei, ZHANG Zhihong. Coupled model for contaminant diffusion, osmosis and consolidation in soil considering thermal effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(2): 278-287. (in Chinese))
- [18] XIE H J, CHEN Y M, LOU Z H. An analytical solution to contaminant transport through composite liners with geomembrane defects[J]. Science China Technological Sciences, 2010, **53**(5): 1424-1433.
- [19] ROWE R K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta, 1998.
- [20] KALBE U, MÜLLER W W, BERGER W, et al. Transport of organic contaminants within composite liner systems[J]. Applied Clay Science, 2002, **21**(1/2): 67-76.
- [21] ROWE R K. Long-term performance of contaminant barrier systems[J]. Géotechnique, 2005, **55**(9): 631-678.
- [22] XIE H J, JIANG Y S, ZHANG C H, et al. An analytical model for volatile organic compound transport through a composite liner consisting of a geomembrane, a GCL, and a soil liner[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(4): 2824-2836.
- [23] XIE H J, CHEN Y M, KE H, et al. Analysis of diffusion-adsorption equivalency of landfill liner systems for organic contaminants[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(4): 552-560.
- [24] XIE H, ZHANG C H, FENG S J, et al. Analytical model for degradable organic contaminant transport through a GMB/GCL/AL system[J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, **144**: 04018006.
- [25] 张春华. 填埋场复合衬垫污染物热扩散运移规律及其优化设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (ZHANG Chunhua. Mechanisms for Contaminant Transport in Landfill Composite Liners under Thermal Effect and its Optimization Design Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))
- [26] WU X, SHI J Y, HE J. Analytical solutions for diffusion of organic contaminant through GCL triple-layer composite liner considering degradation in liner[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(20): 1-18.
- [27] LIU C L, ZHANG F G, ZHANG Y, et al. Experimental and numerical study of pollution process in an aquifer in relation to a garbage dump field[J]. Environmental Geology, 2005, **48**(8): 1107-1115.
- [28] DU Y J, SHEN S L, LIU S Y, et al. Contaminant mitigating performance of Chinese standard municipal solid waste landfill liner systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(3): 232-239.
- [29] XIE H J, CHEN Y M, ZHAN L T, et al. Investigation of migration of pollutant at the base of Suzhou Qizishan landfill without a liner system[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2009, **10**(3): 439-449.
- [30] ZHAN T L T, CHEN Y M, LING W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China[J]. Engineering Geology, 2008, **97**(3/4): 97-111.
- [31] CHAPPEL M J, BRACHMAN R W I, TAKE W A, et al. Large-scale quantification of wrinkles in a smooth black HDPE geomembrane[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(6): 671-679.
- [32] ROWE R K, CHAPPEL M J, BRACHMAN R W I, et al. Field study of wrinkles in a geomembrane at a composite liner test site[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(10): 1196-1211.
- [33] 徐亚, 能昌信, 刘玉强, 等. 垃圾填埋场 HDPE 膜漏洞密度及其影响因素的统计分析[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(9): 4558-4564. (XU Ya, NAI Changxin, LIU Yuqiang, et al. Statistical analysis on density of accidental-hole in landfill liner system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(9): 4558-4564. (in Chinese))