

填埋场不同防渗配置下渗滤液及污染物泄漏

刘建国, 聂永丰, 王洪涛, 李金惠

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为改进填埋场防渗层系统设计, 建立了压实粘土衬层、土工膜衬层和复合衬层这三种衬层中水分与污染物迁移的数学模型。在填埋场典型设计条件下, 复合衬层年渗滤液泄漏量和溶质稳态泄漏量仅为粘土衬层的 0.4% 和 1.2%, 为土工膜衬层(下伏基础层)的 0.9% 和 0.1%。复合衬层土工膜与粘土层结合不紧密时, 渗滤液与溶质泄漏量为其结合紧密时的 5.5 倍。因此, 复合衬层在防止渗滤液和污染物泄漏方面较土工膜衬层和压实粘土衬层具有明显优势, 可作为卫生填埋场防渗衬层的优先推荐结构。在复合衬层设计中应保证土工膜与其下的压实粘土层的紧密良好接触, 并避免土工膜单独作为衬层使用。

关键词: 垃圾填埋场; 压实粘土衬层; 土工膜; 复合衬层; 渗滤液; 溶质; 泄漏

中图分类号: X 705; TU 411.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2004)12-1684-04

Leachate and contaminant leakage in various types of landfill liners

LIU Jianguo, NIE Yongfeng, WANG Hongtao, LI Jinhui

(Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Models of water and contaminant transport in a compacted clay liner (CCL), a geomembrane liner and a composite liner were developed to compare the abilities of the three liners to prevent leachates and contaminants from migrating out of the landfills. For typical landfill designs, the annual leachate and solute contaminant leakage from the composite liner were only 0.4% and 1.2% of those from a CCL, and 0.9% and 0.1% of those from a geomembrane liner with subsoils of medium permeability. For a composite liner with poor contact between the geomembrane and the underlying clay, the leachate and solute leakage rates were 5.5 times higher than that with good contact. Therefore, the composite liner should be significantly better than the geomembrane liner and the CCL as an engineered hydraulic barrier. However, close contact between the geomembrane and the underlying compacted clay must be guaranteed in the structural design of the composite liner.

Key words: landfill; compacted clay liner; geomembrane; composite liner; leachate; solute; leakage

填埋是处理城市生活垃圾和危险废物的最主要方法。现代填埋场一般根据“多重屏障”原则设计。针对生活垃圾的填埋方法称为卫生填埋, 针对危险废物的填埋方法称为安全填埋。防止填埋场渗滤液污染地下水是填埋场“卫生”与“安全”的主要内容, 因此衬层系统是填埋场的核心工程设施。填埋场衬层系统一般由排水层、保护层、防渗层、基础层等不同的功能层构成, 其中防渗层多采用压实粘土、土工膜(多采用高密度聚乙烯膜(HDPE))以及两者的复合结构。本文将根据卫生填埋场的衬层系统设计的典型参数, 对比分析压实粘土衬层、土工膜衬层以及复合衬层在防止填埋场渗滤液中水分和污染物穿透泄漏方面的不同性能, 并对不同防渗衬层中渗滤液及污染物泄漏的机理与特点进行研究, 以改进我国填埋场防渗衬层系统结构的设计提供一定的理论依据。

1 压实粘土衬层

填埋场压实粘土衬层中水分运动与污染物迁移模型如图1所示。一般情况下, 压实粘土中渗滤液的渗透流速 v 可由Darcy定律确定:

$$v = k_c i = k_c \frac{h + d}{d} \quad (1)$$

式中: k_c 为压实粘土渗透系数, i 为水力梯度, h 为衬层上渗滤液积水厚度, d 为压实粘土层厚度。

渗滤液穿透压实粘土衬层的时间为

$$t_c = \frac{d}{v/\eta} = \frac{d^2 \eta}{k_c (h + d)} \quad (2)$$

式中 η 为压实粘土孔隙度。

压实粘土中污染物迁移以分子扩散为主^[1,2]。假设粘土层之上排水层中积水厚度及其中污染物浓度相对恒定, 粘土层之下基础层透水性较好, 污染物很

收稿日期: 2004-01-12

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2003BA614A)

作者简介: 刘建国(1972-), 男(汉), 甘肃, 博士, 助理。

E-mail: jgliu@tsinghua.edu.cn

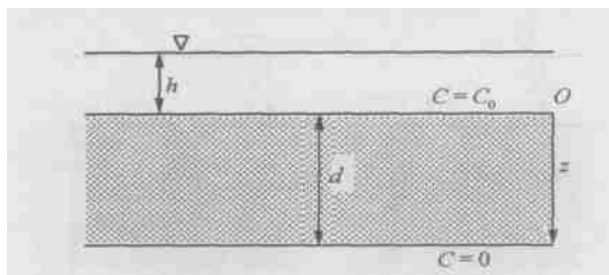


图1 压实粘土衬层渗滤液与污染物泄漏模型

快发生扩散和稀释, 则有限厚度的压实粘土层中污染物迁移可用如下的数学模型描述:

$$\begin{cases} R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \\ C = 0, & z > 0, t = 0; \\ C = C_0, & z = 0, t > 0; \\ C = 0, & z = d, t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: C 为某种污染物在压实粘土层中的质量浓度, C_0 为渗滤液中某种污染物质量浓度, z 为污染物向下迁移的距离, D_e 为该种污染物在粘土层中的有效扩散系数, R_d 为该种污染物在粘土层中的滞留因子。

该定解问题的解析解为^[2]:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{z}{d} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi z}{d}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_e}{R_d d^2} t\right), \quad (4)$$

t 时刻污染物扩散通过压实粘土层底部的面积为 M_c

$$M_c = C_0 R_d \eta d \left[\frac{D_e t}{R_d \eta d^2} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_e t}{R_d d^2}\right) \right]. \quad (5)$$

上式中的级数项收敛较快。当时间较长时, M_c 与 t 之间呈线性关系:

$$M_c = C_0 \left(\frac{D_e t}{d} - \frac{R_d \eta d}{6} \right). \quad (6)$$

当 $M_c = 0$ 时, 污染物穿透压实粘土层的时间称为延迟时间, 即

$$t_{\text{lag}} = \frac{R_d \eta d^2}{6 D_e}. \quad (7)$$

污染物扩散到达稳态的时间约为 t_{lag} 的 3 倍。压实粘土层底部污染物的稳态扩散通量 F_c 为 M_c 对时间 t 的导数:

$$F_c = C_0 \frac{D_e}{d}. \quad (8)$$

2 土工膜衬层

水分在 HDPE 膜中的渗透系数在 10^{-15} m/s 数

量级上, 完整情况下水分很难通过。但是, HDPE 膜在铺设施工和填埋操作条件下, 容易发生穿刺、拉裂等破坏, 产生小孔和裂缝等缺陷。此时, 渗滤液穿透土工膜的泄漏主要是小孔出流, 如图 2 所示。假设破损小孔为圆孔, 当小孔直径小于膜厚度时, 小孔出流的体积流量 q_v 可利用 Poiseuille 方程计算^[3]:

$$q_v = \frac{\pi \rho h r^4}{8 \mu d_g}. \quad (9)$$

式中: ρ 为渗滤液密度; μ 为渗滤液粘度, 一般可取水的密度和粘度; r 为小孔半径; d_g 为膜厚度。

多数情况下, 小孔直径大于膜厚度。此时, 小孔出流量可利用 Bernoulli 方程计算^[4]:

$$q_v = C_B a \sqrt{2gh\pi q}. \quad (9)$$

式中: C_B 为一因数, 对大多数土工膜可取 0.6; a 为小孔面积; g 为重力加速度。

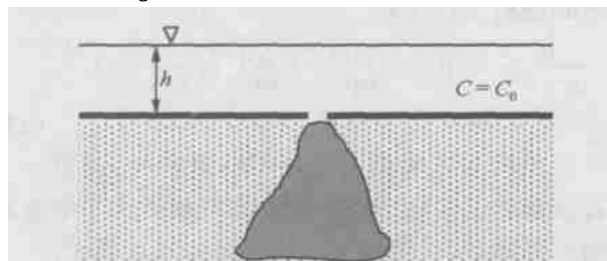


图2 土工膜衬层渗滤液与污染物泄漏模型

一般情况下, 土工膜衬层置于中等渗透性的基础层之上。基础层的存在对土工膜的小孔出流会产生一定的阻碍作用。此时, 渗滤液通过破损小孔穿透土工膜的泄漏量可根据如下的经验公式计算^[5]:

$$\frac{q_v}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} = 3 \left(\frac{a}{\text{m}^2} \right)^{0.75} \left(\frac{h}{\text{m}} \right)^{0.75} \left(\frac{k_d}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{0.5}. \quad (10)$$

式中 k_d 为下伏基础层渗透系数。式(10)适用于基础层渗透系数大于 10^{-8} m/s , 基础层厚度大于土工膜上的水头高度的情形。

在土工膜中, 污染物通过两个途径发生泄漏: 溶质通过土工膜上破损小孔随渗滤液直接泄漏; 有机物在浓度梯度作用下发生分子扩散而迁移穿透完整的土工膜。通过一个小孔泄漏的溶质通量为:

$$F_g = q_v C_0 \quad (11)$$

渗滤液中的有机物首先分配于土工膜中, 以蒸汽相在浓度梯度作用下向下扩散迁移, 穿透土工膜后再分配于孔隙水中。填埋场使用的土工膜一般厚度仅为 1~2mm, 因此可以认为浓度梯度恒定, 其中的扩散很快就达到稳态。污染物穿透土工膜底部的稳态扩散通量 F_g 计算公式为^[2]:

$$F_g = C_0 K_g \frac{D_g}{d_g}. \quad (12)$$

式中: D_g 为污染物在土工膜中的有效扩散系数, K_g 为污染物在土工膜中的分配系数。

3 复合衬层

土工膜+ 压实粘土复合防渗结构兼具土工膜和压实粘土的优点, 对填埋场提供了双重防渗保护, 在卫生填埋场得到了广泛应用。我国近年来新建的卫生填埋场大多采用了这种防渗方式。此时, 渗滤液中污染物的泄漏途径主要为: 首先通过破损部位泄漏到下伏压实粘土层, 然后在粘土层中较小的渗漏面积范围内向下迁移。在土工膜破损面积一定的情况下, 过水面积主要地取决于土工膜与压实粘土层结合的紧密程度, 二者结合越紧密, 渗漏面积越小。

土工膜与压实粘土结合紧密时, 通过一个小孔泄漏到压实粘土层中的渗滤液体积流量 q_v 可根据如下的经验公式计算^[5]:

$$\frac{q_v}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} = 0.21 \left(\frac{a}{\text{m}^2} \right)^{0.1} \left(\frac{h}{\text{m}} \right)^{0.9} \left(\frac{k_c}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{0.74} \quad (13)$$

土工膜与压实粘土结合不够紧密时, 通过一个小孔泄漏到压实粘土层中的渗滤液量远大于结合紧密时的泄漏量, 可根据如下的经验公式计算^[5]:

$$\frac{q_v}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} = 1.15 \left(\frac{a}{\text{m}^2} \right)^{0.1} \left(\frac{h}{\text{m}} \right)^{0.9} \left(\frac{k_c}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{0.74} \quad (14)$$

式(13)、(14)适用于粘土层渗透系数小于 10^{-8} m/s , 并且粘土层厚度大于土工膜上的水头高度的情形。

通过破损小孔泄漏到压实粘土层中的溶质实际上是在三维空间上发生迁移的。通过引入等效渗漏面积 A_e , 可将三维问题简化为污染物在截面积为 A_e 的土柱中的一维扩散迁移问题, 如图3所示。等效渗漏面积 A_e 由下式确定^[6]:

$$A_e = \frac{q_v}{k_c i} \quad (15)$$

确定等效渗漏面积后, 即可以利用式(6)和(8)计算在此面积上发生渗漏的溶质的量。

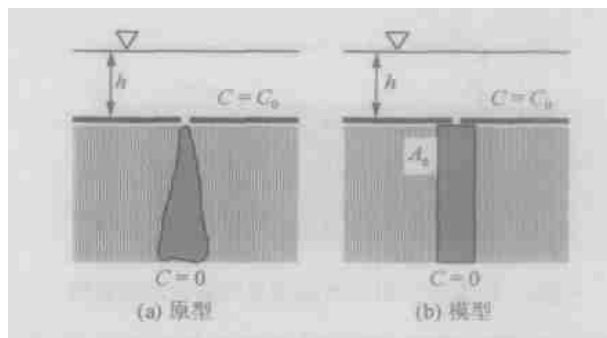


图3 复合衬层渗滤液与污染物泄漏模型

同时, 有机污染物在复合衬层中仍然在浓度梯度驱使下以分子扩散的形式迁移。由于土工膜的厚度远小于其下的压实粘土层厚度, 有机污染物扩散穿透土工膜的时间与其穿透压实粘土层的时间相比很短, 基本上可以忽略不计, 因此有机物在复合衬层中的迁移类似于其在压实粘土层中的迁移情况, 可以采用式(6)和式(8)计算泄漏量。

4 三种衬层防渗性能比较分析

上述三种衬层中渗滤液中水分与污染物迁移的机理各不相同。下面将根据卫生填埋场防渗衬层系统设计中采用的典型参数(见表1), 对三种衬层防止渗滤液水分与污染物泄漏的性能进行比较分析。国外的调查表明, 施工质量保证较好的情况下, 复合衬层土工膜上存在 $8 \sim 10$ 孔/ hm^2 ; 质量保证较差的情况下, 土工膜上存在 17 孔/ hm^2 ; 即使在质量保证极好的情况下, 土工膜上孔密度至少为 $1 \sim 2$ 孔/ hm^2 ^[3]。此处以施工质量保证较好(10 孔/ hm^2 土工膜, 孔径 3mm) 为例进行分析。土工膜衬层考虑下伏基础层或无基础层两种情况; 复合衬层考虑土工膜与下伏粘土层结合紧密与不紧密两种情况; 污染物则考虑保守性无机离子(如 Cl^- , $R_d = 1$) 与非保守性有机化合物(如三氯乙烯 TCE, $R_d = 100$) 两种情况, 假设其渗滤液中浓度均为 1mg/L 。衬层铺设面积均按 1hm^2 考虑。不同衬层配置下渗滤液及其中溶质与有机物泄漏量及穿透衬层的时间见表2。

表1 卫生填埋场衬层设计典型参数取值

衬层类型	d/m	d_g/m	$k_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h/m	η	$D_e/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_g/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	K_g
粘土衬层	2.0	—	10^{-9}	0.3	0.3	10^{-10} ^[6]	—	—
土工膜衬层	—	0.0015	10^{-5} *	0.3	—	—	10^{-12} ^[2]	100 ^[6]
复合衬层	0.5	0.0015	10^{-9}	0.3	0.3	10^{-10}	10^{-12}	100

注: * 土工膜下伏基础层渗透系数。

表2 不同衬层渗滤液与污染物泄漏比较

衬层类型	情形	$\frac{q_v}{\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}}$	$\frac{t_i}{\text{a}}$	$\frac{q_s}{\text{g} \cdot \text{a}^{-1}}$	$\frac{t_s}{\text{a}}$	$\frac{Q_{s100}}{\text{g}}$	$\frac{q_o}{\text{g} \cdot \text{a}^{-1}}$	$\frac{t_o}{\text{a}}$	$\frac{Q_{o100}}{\text{t}}$
粘土		362.7	16.5	15.8	63.4	577	15.8	6340	0
土工膜	土工膜下无基础层	3240	瞬间	3240	瞬间	324×10^3	21×10^3	短时间	2.1
	土工膜下有基础层	166	瞬间	166	瞬间	16.6×10^3	21×10^3	短时间	2.1
复合	膜与粘土层结合紧密	1.5	3	0.19	4	18.0	63.1	396	0
	膜与粘土层结合不紧密	8.2	3	1.03	4	98.4	63.1	396	0

表2中: q_v 为渗滤液渗漏通量, t_i 为渗滤液穿透衬层时间, q_s 为溶质稳态泄漏通量, t_s 为溶质穿透衬层时间, Q_{s100} 为溶质100 a内总泄漏量, q_o 为有机物稳态泄漏通量, t_o 为有机物穿透衬层时间, Q_{o100} 为有机物100 a内总泄漏量。

粘土衬层、聚合物衬层、复合衬层在防止渗滤液及污染物泄漏方面的具体性能对比如下。

1) 在防止渗滤液泄漏方面, 粘土衬层(厚2 m, 渗透系数1 mm/s) 泄漏渗滤液362.7 m³/a, 渗滤液穿透衬层需要16.5 a; 下伏基础层的土工膜衬层年泄漏渗滤液166 m³, 但渗滤液在瞬间即穿透衬层底部; 施工质量较好的复合衬层(土工膜下伏粘土层厚0.5 m, 渗透系数1 mm/s) 泄漏渗滤液仅为1.5 m³/a, 渗滤液穿透衬层底部需要3 a。复合衬层年渗滤液泄漏量仅为粘土衬层和土工膜衬层(下伏基础层)的0.4%和0.9%。

2) 在防止溶质泄漏方面, 保守性的溶质穿透粘土衬层并开始迁移出衬层底部需要63.4 a, 年稳态泄漏量为15.8 g, 100 a内总泄漏量为577 g; 对下伏基础层的土工膜衬层, 溶质随渗滤液瞬间即可穿透衬层, 年泄漏量为166 g, 100 a内总泄漏量达16.6 kg; 溶质穿透施工质量较好的复合衬层约需4 a, 但年稳态泄漏量仅0.19 g, 100 a内总泄漏量18 g。复合衬层溶质稳态泄漏量仅为粘土衬层和土工膜衬层(下伏基础层)的1.2%和0.1%。

3) 在防止有机物泄漏方面, 非保守性的有机物穿透厚度较大的粘土衬层和复合衬层也需要很长时间, 但却可以在短时间内穿透很薄的土工膜衬层。通过扩散泄漏出土工膜衬层的有机物高达16.6 kg/a。

4) 土工膜衬层下无基础层时, 即使在土工膜施工质量较好的情况下, 渗滤液泄漏量也高达3240 m³/a, 溶质泄漏量也相应地高达324 kg/a; 而土工膜下伏渗透系数为10 μm/s的基础层的情况下, 年渗滤液和溶质泄漏量均减少约95%。

5) 复合衬层土工膜与粘土层结合不紧密时, 渗滤液与溶质泄漏量约为其结合紧密时的5~5倍。

5 结 论

1) 在填埋场典型设计条件下, 复合衬层年渗滤液泄漏量和溶质稳态泄漏量仅为粘土衬层的0.4%和1.2%, 为土工膜衬层(下伏基础层)的0.9%和0.1%, 可见复合衬层在防止渗滤液和污染物泄漏方面较土工膜衬层和压实粘土衬层具有明显优势。

2) 复合衬层设计中, 在保证土工膜与其下的压实粘土层的紧密接触情况下, 可以减小渗滤液小孔出流的渗漏面积, 进而降低渗滤液和溶质的泄漏量。

3) 压实粘土衬层只要能够保证其较小的渗透系数(小于1 mm/s)和较大的厚度(不小于2 m), 其防渗性能也是有保障的。但是对于难降解的污染物, 一旦穿透粘土衬层后, 其泄漏量是较为可观的。

4) 由于土工膜衬层会不可避免地出现破损。下伏一种等渗透性的基础层可以显著改善其防渗性能, 但渗滤液与污染物泄漏量仍然较大。

参考文献 (References)

[1] Johnson R L, Cherry J R, Pankow J F. Diffusive contaminant transport in natural clays: A field example and implications for clay-lined waste disposal sites [J]. *Environ Sci Tech*, 1989, 23: 340~349

[2] Grathwohl P. Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption, and Dissolution Kinetics [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.

[3] Giroud J P, Bonaparte R. Leakage through liners constructed with geomembranes, Part I: Geomembrane liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8: 27~67.

[4] Giroud J P, Bonaparte R. Leakage through liners constructed with geomembranes, Part II: Composite liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8: 71~111.

[5] Giroud J P, Badu-Tweneboah K, Bonaparte R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1992, 11: 1~28.

[6] Katsumi T, Benson C H, Foose G J, et al. Performance-based design of landfill liners [J]. *Eng Geology*, 2001, 60: 139~148.