

填埋场水分运移模拟实验研究

刘建国, 聂永丰, 王洪涛

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 在实验室中建立了一个具有填埋场典型构造的单元隔室系统, 研究了盖层渗透性较强而衬层渗透性较弱和盖层、衬层渗透性均较弱两种不同防渗配置下系统内的水分运移规律。两种情况下, 盖层底部与废物层交界处始终处于非饱和状态, 造成通过盖层的水分入渗速率远远大于其设计入渗能力(渗透系数), 反映了强透水的废物层对盖层防渗性能的不利影响。两种配置在防止渗滤液穿透衬层而污染“地下水”方面并无显著差异, 其效率高低主要取决于介于废物层与衬层之间的排水层工作性能的优劣。

关键词: 填埋场; 水分运移; 土水剖面; 渗滤液; 入渗速率; 顶部盖层

中图分类号: X 705; TU 411.4

文章编号: 1000-0054(2001)05-0244-04 **文献标识码:** A

Water movement in simulated laboratory scale landfills

LIU Jianguo, NIE Yongfeng, WANG Hongtao

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

Abstract: A laboratory scale model with typical landfill structures was built to simulate water movement in a landfill with either a medium-pemeability cover and a low-pemeability liner or both low-pemeability cover and liner. In both circumstances, the interface between the cover and the underlying waste was not saturated during the experiment, which results in a much higher infiltration rate through the liner than its designed infiltration capacity (pemeability). The results show that high-pemeability waste negatively impact on the cover. There is no significant difference in the groundwater pollution due to the leachate for the two cases. The leachate control effectiveness depends mainly on the performance of the drainage layer between the waste and the liner.

Key words: landfill; water movement; soil water profile; leachate; infiltration rate; surface cover

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。填埋场的核心工程设施, 如盖层系统、衬层系统的设计均以此为主要目的。其中, 盖层系统的主要功能是阻止降雨、地表径流等水分进入填埋场内, 减少填埋场渗滤液产生量, 而衬层系统的主要功能是拦截和收集已经产生的渗滤液, 防止其污染地下水。

填埋场渗滤液的产生和对地下水的污染过程, 实际上就是一个水分的运移过程。为最大限度地减小填埋场渗滤液的产生量和浸出浓度, 降低渗滤液对地下水的污染风险, 必须弄清填埋场水分运移规律, 并在设计中采取经济有效的防治措施。为此, 在实验室中建立了一个具有填埋场典型构造的单元隔室系统, 通过模拟实验, 研究了不同盖层、衬层防渗配置下系统内的水分运移规律, 为填埋场的优化设计提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

模拟实验装置由 4 部分组成, 包括填埋单元隔室、供水装置、渗滤液收排装置、土水势监测装置。填埋单元隔室为 8mm 厚有机玻璃箱体, 横截面积 40 cm × 60 cm, 高 134 cm。供水由置于螺旋升降凳上的 20 L 马氏瓶提供, 通过调节螺旋升降凳高度, 控制马氏瓶供水流量。渗滤液收排装置由衬层之上的横向排水砂砾层、断面尺寸为 15 cm × 20 cm 的矩形排水沟渠、与沟槽连接的排水管和收集瓶组成。土水势监测由若干埋设在各层土壤和废物中的陶土头探头、塑料细管和 WH-1 型水银负压计完成。

填埋是国内外处理城市固体废物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, 针对城市固体废物的填埋方法称为卫生填埋,

收稿日期: 2000-06-17

基金项目: 国家“八五”科技攻关项目 (85-909-03-02-03)

作者简介: 刘建国(1972-), 男(汉), 甘肃, 博士生。

1 2 实验材料

模拟系统自下而上包括 6 层: 1) 潜水层; 2) 下包气带; 3) 防渗衬层; 4) 排水层; 5) 废物层; 6) 顶部盖层。各层水分分配见图 1。

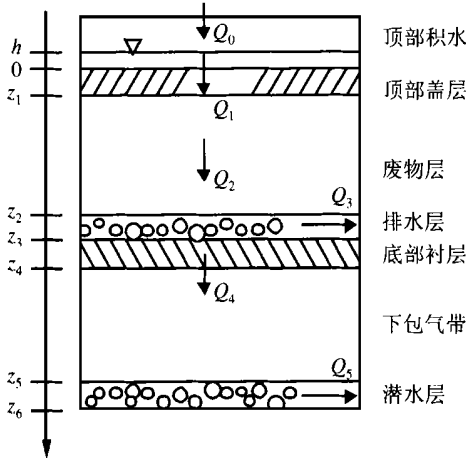


图 1 模拟实验装置水分分配示意图

为确定卫生填埋场工程屏障的核心结构——盖层和衬层的不同防渗性配置对填埋场水分运移和渗滤液产生量的影响, 本实验考虑了两种不同的情况: a) 盖层防渗性能差而衬层防渗性能好; b) 盖层和衬层的防渗性能均较好。各层所选用的材料及相应参数见表 1^[1]。

1 3 实验方法

1 3 1 水分入渗速率控制

稳定入渗情况下, 通过填埋单元隔室顶部盖层进入废物层的水分的入渗速率 q_1 定义为

$$q_1 = Q_1/A, \tag{1}$$

式中: Q_1 为一定时间内通过填埋单元隔室顶部盖层进入废物层水分通量, 可由马氏瓶刻度读出, A 为单元隔室过水截面积, 本文中 A 取 $2\,400\text{ cm}^2$ 。

入渗时间较长时, 顶部盖层之上存在薄层积水, 顶部盖层基本处于饱和水状态, 可根据 Darcy 定律确定水分入渗速率 q_1 :

$$q_1 = K_1(h_1 + z_1)/z_1, \tag{2}$$

式中: K_1 为顶部盖层的渗透系数, z_1 为顶部盖层厚度, h_1 为盖层之上的积水厚度。

但是, 考虑到废物层的渗透性远高于顶部盖层的渗透性, 盖层底部与废物层交界面处由于重力疏干, 仍处于非饱和水状态。此时的水分入渗近似符合 Green-Ampt 模型^[2], 可由下式确定水分入渗速率:

$$q_1 = K_1(h_1 + z_1 - \Psi)/z_1, \tag{3}$$

式中 Ψ 为盖层底部与废物层交界面处的负压水头值, 即土水势。

1 3 2 含水率剖面的确定

单元隔室内各层的含水率分布由土水势监测装置测得的土水势值推算得到。在入渗实验进行之前, 通过实验绘制废物层及盖层、衬层材料的土壤水分特征曲线。根据土水势监测装置测得的土水势值, 查相应的土壤水分特征曲线, 即可得到各测点处(实验 a 中布设 12 个测点, 实验 b 中布设 13 个测点)的土壤含水率。将各测点处的土壤含水率值连接成曲线, 即可得到单元隔室内的土壤含水率剖面。

1 3 3 渗滤液产生量的确定

稳定入渗情况下, 渗滤液产生量 Q_2 等于马氏瓶的供水流量 Q_0 。不稳定入渗时, 渗滤液产生量 Q_2 的

表 1 模拟实验参数

实验	层名	成分	深度 cm	孔隙度	压实密度 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	渗透系数 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
a	顶部盖层	亚粘土	0~50	0.64	1.59	5.7×10^{-6}
	废物层	触媒渣、铬渣、粗砂	50~385	0.45	1.60	1.4×10^{-4}
	排水层	粒径 2~5mm 砾石	385~425	0.50	1.28	1.5×10^{-2}
	底部衬层	膨润土	425~485	0.56	1.12	5.7×10^{-8}
	下包气带	粉砂土	485~885	0.33	1.51	5.7×10^{-5}
b	顶部盖层	亚粘土, 10% 膨润土	0~60	0.59	1.55	5.1×10^{-7}
	废物层	触媒渣、铬渣、粗砂	60~500	0.45	1.60	1.0×10^{-4}
	排水层	粒径 2~5mm 砾石	500~540	0.50	1.28	1.5×10^{-2}
	底部衬层	膨润土	540~600	0.56	1.22	1.0×10^{-8}
	下包气带	粉砂土	600~1000	0.33	1.51	5.7×10^{-5}

确定较为复杂。在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时间段内产生的渗滤液量, 通常可由下式求出:

$$Q_2 = Q_1 - A \int_{z_1}^{z_2} [\theta(z, t_2) - \theta(z, t_1)] dz, \quad (4)$$

式中: z_1, z_2 分别为废物层顶部与底部深度; $\theta(z, t)$ 为 t 时刻废物层的含水率剖面分布函数。当含水率剖面分布不随时间而变化时, 有:

$$Q_2 = Q_1 \quad (5)$$

渗滤液产生量也可通过下述关系确定:

$$Q_2 = Q_3 + Q_4, \quad (6)$$

式中: Q_3 为通过渗滤液收集系统收集到的渗滤液量, Q_4 为渗透进入底部衬层的渗滤液量, 确定方法与式(3)类似。

2 结果与讨论

2.1 盖层底部与废物层交界处的土水吸力

由于废物层的渗透性远远强于顶部盖层, 因此入渗到盖层底部的水分迅速疏干而进入废物层, 使盖层底部与废物层交界处始终处于非饱和状态。实验 a, b 中盖层底部与废物层交界处的土水吸力 S 随时间的变化见图 2。

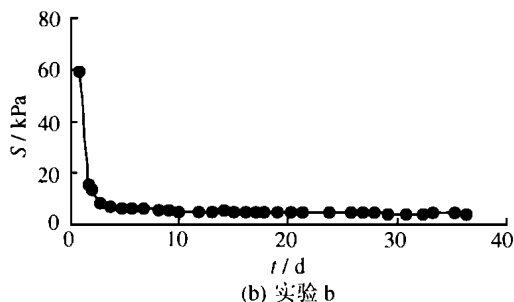
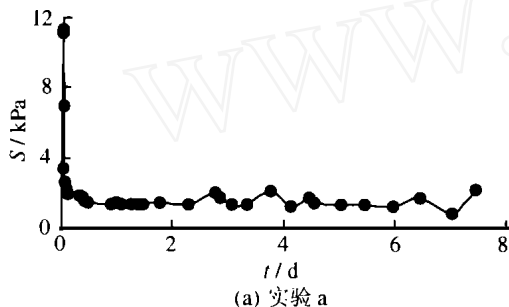


图 2 盖层底部与废物层交界处土水吸力随时间的变化

图 2 表明: 土水吸力在实验初期很大, 但随着水分入渗锋面的到达而迅速降低, 之后基本上保持一个相对稳定的吸力值。实验 a 中的初始吸力值 (11.3 kPa) 和稳定吸力值 (1.9 kPa) 远小于实验 b 中的初始吸力值 (66.9 kPa) 和稳定吸力值 (4.5 kPa), 说明盖层渗透性越弱, 交界处土水吸力越大。

2.2 水分入渗速率

根据式(1)~(3)确定的水分入渗速率见表 2, 其中式(1)确定的值为实测值。工程上常用式(2)来预测和评价填埋场盖层的防渗效果, 由表 2 可见, 这种将填埋场盖层作为一个孤立的构件来处理的预测和评价方法大大高估了盖层的防渗性能。因此, 根据式(2)来进行填埋场盖层设计是不安全的。事实上, 不饱和废物层的土水势(吸力)大大增加了盖层内的水力梯度, 从而使通过盖层系统的水分渗透速率大大增加。式(3)考虑了不饱和废物层对上覆盖层的渗透性能的影响, 预测结果与实测值较为接近。但由于实验中盖层底部与废物层界面处土水势的测定难度较大, 测定值存在一定误差; 同时饱和带并未贯穿整个盖层厚度, 式(3)中适用的 z_1 值应小于盖层厚度, 因此计算值与实测值仍有一定差距。

利用式(3)还可解释实验过程中渗透速率的动态变化: 实验刚开始时, 盖层中含水量很小, 入渗锋面处吸力很大, 因此实际渗透速率远远大于盖层的渗透系数。随着渗入水分的不断增多, 渗透锋面不断向下移动, 盖层中含水量逐渐增大, 吸力逐渐减小, 渗透速率逐渐下降, 趋于稳定。

表 2 水分通过盖层的入渗速率 (cm/s)

实验	q_1		
	据式(1)	据式(2)	据式(3)
a	1.1×10^{-4}	5.7×10^{-6}	2.9×10^{-5}
b	3.9×10^{-6}	6.0×10^{-7}	4.5×10^{-6}

2.3 饱和度剖面分布

通过实验测定, 可以绘出模拟系统在实验初期、中期和入渗达到稳定时等不同阶段的土水势、含水率和饱和度在深度方向上的分布。由于系统各层密度、孔隙度等物理特性差别较大, 因此含水率剖面分布直观性较差, 此处用直观性较好的饱和度 S_a 剖面分布来代替(见图 3)。

根据图 3 中饱和度的剖面分布, 结合表 1 中给出的盖层、衬层、排水层和废物层所处的深度, 模拟系统内的水分迁移具有如下特点:

1) 实验初期, 顶部盖层处于非饱和状态。随着入渗过程的延续, 湿润锋面不断向下推移, 顶部盖层中饱和带厚度不断扩大。但直到入渗达到稳定状态, 饱和带也未能贯穿顶部盖层, 其下部与废物层接触部位仍处于非饱和状态, 反映了强透水性的废物层

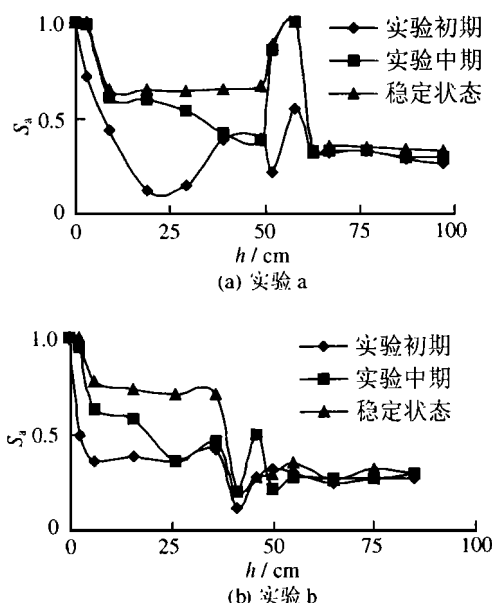


图3 模拟系统饱和度剖面分布

对盖层水分运移的影响。

2) 废物层的饱和度在入渗过程中逐渐增大,但始终处于非饱和状态。稳定状态时,废物层厚度范围内饱和度约为 0.7,其剖面分布较为均匀。

3) 实验 a 中,排水层饱和度在实验过程中变化不大(0.12~0.2);实验 b 中,排水层饱和度在实验初期较小(0.22),但中期和稳定状态时较大(0.86~0.88)。这说明实验 a 中排水层的排水性能优于实验 b,可能的原因是实验 b 中废物层中的细粒物质进入排水层,造成排水层堵塞。实验后拆除装置对排水层进行检查,验证了这一判断。

4) 实验 a 中,底部衬层中部始终处于非饱和状态;实验 b 中,底部衬层中部在稳定状态时达到饱和。出现这种反常现象的原因可能是:实验 a 中的水分入渗速率远大于实验 b,积水容易形成“径流”而被排水层排出;而实验 b 中由于水分入渗速率较小,底部衬层入渗过程的“供水控制”阶段持续较长;后期“入渗能力控制”阶段,又由于排水层排水不畅,积水不能及时排出,衬层在有压入渗条件下逐渐饱和。

5) 实验 a 和实验 b 中的下包气带饱和度分别保持在 0.27 和 0.33 的天然饱和度左右,在整个实验过程中增加很小,说明通过衬层下渗进入下包气带的水量很小。

实验 a 中顶部盖层的防渗性能远不如实验 b,底部衬层的防渗性能也逊于实验 b,但二者的这种不同配置在防止渗滤液进入下包气带的效果上并无

显著差异,前者甚至优于后者。究其原因,排水层的性能优劣至关重要。这一点对卫生填埋场防渗系统的设计的意义在于:仅从防止渗滤液污染地下水的角度出发,在卫生填埋场设计中,如果排水层能够按设计标准正常工作,则对盖、衬层系统的防渗标准的要求可适当降低。但降低盖层防渗性能标准会带来渗滤液产生量大,污染物浸出浓度高的问题^[3]。

3 结论

1) 填埋场盖层系统和衬层系统是防止渗滤液污染地下水,保证填埋场的“卫生”或“安全”的核心部件。但是,盖层系统和衬层系统并不是孤立地发挥作用,而是与降雨入渗和蒸发系统、固体废物系统、下包气带和地下水系统相互联系、相互作用、相互影响,构成一个完整的填埋场水分运移系统。

2) 由于废物层的强透水性,入渗到盖层底部的水分迅速疏干,顶部盖层与废物层交界处长期处于非饱和状态,土水吸力的存在使通过盖层的水分入渗速率远远大于盖层的设计入渗能力。填埋场设计中,不考虑强透水性的废物层的不利影响,仅根据设计入渗能力(渗透系数)对盖层的防渗性能进行预测和评价是不安全的。

3) 两种不同防渗配置的实验系统在防止渗滤液穿透底部衬层而进入下包气带的效率方面并无显著差异,究其原因,除水分入渗速率大小的影响外,排水层工作性能的优劣起了至关重要的作用。仅从防止渗滤液污染地下水的角度出发,只要排水层能够按设计标准正常工作,则对盖、衬层系统的防渗标准的要求可适当降低。这一结论对填埋场防渗系统的设计有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 张继红. 填埋场水运移及浸出液控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 1994.
ZHANG Jihong. Study on Water Transportation and Leachate Control in Landfill [D]. Beijing: Tsinghua University, 1994 (in Chinese).
- [2] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil Water Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 (in Chinese).
- [3] 聂永丰. 三废处理工程技术手册: 固体废物卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
NIE Yongfeng. Technological Handbook of Waste Water, Waste Air and Solid Waste Treatment Engineering: Volume of Solid Waste [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000 (in Chinese).