

粘土环境岩土工程特性对填埋场衬垫 防渗标准的影响

唐晓武¹, 罗春泳², 陈云敏¹, 史成江¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要: 采用溶质运移的一维迁移模型, 研究了粘土环境岩土工程特性对填埋场衬垫防渗标准的影响, 对目前采用的填埋场粘土类衬垫防渗设计标准及其有效性进行了多参数组合的计算分析; 此外, 还比较了粘土衬垫与复合衬垫对污染物离子的防渗阻隔性能, 对土工膜在衬垫中的作用进行分析; 研究表明, 应针对不同地区的情况(干旱少雨或多雨等)考虑衬垫的形式。与其他因素相比, 粘土的渗透系数对衬垫层渗漏影响最大, 以水力渗透系数作为填埋场粘土衬垫的设计标准是可行的, 但离子扩散系数的影响也不可忽略; 而增强粘土的活性, 提高粘土吸附离子的性能, 则可延长离子通过衬垫的击穿时间; 与单纯的粘土衬垫相比, 复合衬垫对离子具有更好的阻隔性能, 故在南方多雨地区宜采用复合衬垫; 而用污染物的渗漏总量作为填埋场衬垫的设计标准比击穿时间更合理。

关键词: 岩土力学; 粘土; 环境岩土工程特性; 填埋场衬垫; 防渗标准

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)08-1396-06

EFFECT OF GEOENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF CLAY ON STANDARD OF LANDFILL LINER

TANG Xiao-wu¹, LUO Chun-yong², CHEN Yun-min¹, SHI Cheng-jiang¹

(1. Geotechnic Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Using 1D flow and transport model, the effect of geoenvironmental characteristics of clay soil on landfill liner is evaluated. And the results are used to analyze the effectiveness of the standard of landfill liner. Two types of liner, i. e., clay liner and single-layer composite liner, are studied. And three index, breakthrough time, leaching rate and leaching contaminant quantity are calculated, respectively. The results show that the type of liner must meet the special needs of field condition in droughty or rainy area. And the composite liner can limit the spread of pollutants more effectively than clay liner in rain-belt of South China. Among all the parameters, the effect of k_s on landfill liner is the highest. Thus, it is reasonable to use k_s as the design parameter of liner. But the effect of diffusion and adsorption of ion in clay cannot be ignored. And the leaching contaminant quantity adopted as control index is more suitable than breakthrough time.

Key words: rock and soil mechanics; clay; geoenvironmental characteristics; landfill liner; seepage standard

1 引言

垃圾的卫生填埋是我国城市生活垃圾的主要处

理手段。一个现代化的卫生填埋场主要由衬垫系统、渗滤液收集、排除系统、气体控制系统和顶盖系统等 5 个系统组成。其中, 衬垫系统的作用是将垃圾与周围环境隔开以免垃圾中的有害物质污染周围的

收稿日期: 2003-06-27; 修回日期: 2003-09-01

基金项目: 浙江省留学回国基金项目; 浙江大学留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 唐晓武(1966-), 男, 日本佐贺大学博士, 现任教授, 主要从事环境岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: tangxiaowu@zju.edu.cn.

土地和地下水，为垃圾填埋场最重要和最基本的防护系统。为确保衬垫系统的隔离功能，欧美日各国都制定了相应的填埋场底部衬垫规范，见图 1。虽然影响衬垫中污染物迁移的因素较多，但这些规范的要点主要集中在是否使用土工膜，以及粘土层必须多厚、渗透系数必须多低的要求上。目前，欧美国家大都已采用土工合成材料防渗系统。如美国环保局(EPA)规定的单层复合衬垫，是由一层 HDPE 土工膜和渗透系数 $k \leq 10^{-7}$ cm/s、厚度 0.6 m 的粘土层组成，而无土工膜的天然或压实粘土衬垫仅在渗滤液量极少或无害的情况下才采用。

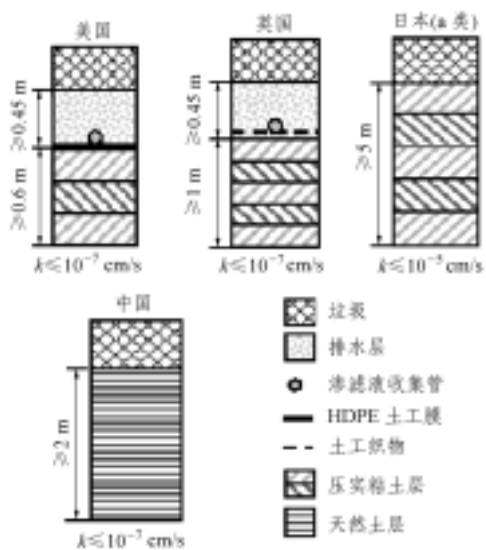


图 1 部分国家的填埋场底部衬垫

Fig.1 Regulations of bottom liner systems in several countries

文[1]指出，采用天然粘土作衬垫系统时，“衬垫的渗透系数不应大于 1.0×10^{-7} cm/s，场底及四壁衬垫厚度不应小于 2 m”。由于我国的卫生填埋工作起步不久，因此，对土工膜的使用尚无具体说明。我国的这一标准是建立在水力渗透系数基础上的，对填埋场中实际水头、污染物质的扩散系数、吸附情况等极为重要的环境岩土工程指标却没有任何附加说明。

本文采用溶质运移的一维对流-弥散模型^[2-4]，模拟渗滤液在衬垫层中的迁移规律，以分析目前采用的填埋场粘土类衬垫防渗标准的有效性，并对粘土环境岩土工程特性(吸附、扩散等)和渗滤液水头高度对填埋场粘土类衬垫防渗标准的影响进行研究。此外，还通过粘土衬垫与土工膜复合衬垫的比较，对土工膜在衬垫中的作用进行定量分析。

2 一维迁移方程

对污染物质在粘土中的迁移过程，可采用多孔介质中的对流-弥散模型来描述。在该模型中，溶质的运移表现为对流和弥散两部分。对流指的是溶质随渗滤液的流动而迁移，是由粘土层上的水力梯度引起的；弥散则包括机械弥散和分子扩散，是由浓度梯度引起的。在渗滤液的迁移过程中，粘土对污染物具有一定的吸收作用，可采用线性等温吸附形式^[5]来表示。渗滤液中污染物质在填埋场衬垫中的迁移如图 2 所示。

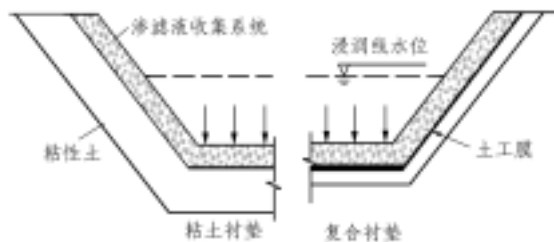


图 2 渗滤液在衬垫中迁移示意图

Fig.2 Transferring sketch of leachate in two types of bottom liners

填埋场底面衬垫的面积相对于厚度而言是非常大的，可用对流-弥散模型的一维形式描述为

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{q}{\theta} \frac{\partial C}{\partial z} + D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中： C 为单位体积孔隙溶液中的污染物浓度，为深度 z 和时间 t 的函数； q 为单位时间内通过单位面积的流量，满足达西定律； θ 为粘土的体积含水量； D_s 为污染物通过粘土层的水动力弥散系数，包括机械弥散与分子扩散； R_d 为粘土对污染物的阻滞因子，其值不小于 1.0。 D_s 和 R_d 主要与粘土和污染物的相互物理化学特性有关，对同种土与同种污染物可视为常值，由实验室试验测定^[6-8]。由于解析解较难求，可采用数值法(如有限差分法)求解式(1)。

在进行室内试验时，通常用垂直扩散的方法来研究污染物在土样中的迁移，其原理见图 3。污染物初始浓度可在试验开始前取土样测定。试验所用的渗滤液可人工配制，因而，土样上作用的渗滤液浓度为已知值。由此可得，在实验室条件下，粘土中污染物分布的初始条件和边界条件为

$$C(z, 0) = C_0 \quad (0 \leq z \leq L) \quad (2)$$

$$C(0, t) = C_1 \quad (t > 0) \quad (3)$$

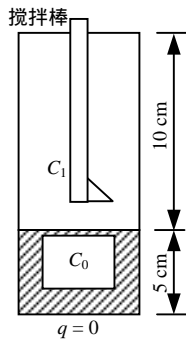


图3 离子垂直扩散原理图

Fig.3 Schematic diagram of diffusion test

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (t > 0) \quad (4)$$

式中： L 为衬垫层厚度； C_0 为土中污染物的初始浓度，在填埋场中， C_0 可在填埋场施工前由现场取土测定； C_1 为衬垫上的渗滤液浓度，在填埋场中，可由填埋场现场监测数据得到。

综合式(1)~(4)，可求得衬垫层中污染物含量随时间及深度的变化。对于底部密封的情况，此时 $q = 0$ ，式(1)可简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

式中： $D^* = D_s / R_{d0}$

综合式(2)~(5)，可求得类似于二维固结理论解形式的解为

$$C = C_1 + \frac{4}{\pi} (C_0 - C_1) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin\left(\frac{m\pi z}{2L}\right) e^{-m^2 \frac{\pi^2 D^* t}{4L^2}} \quad (6)$$

式中： m 为正奇数($m = 1, 3, 5, \dots$)。

3 室内试验验证

采用浙江省温州地区某粘土进行分析，将解析解、有限差分解与试验测得的钾离子在该粘土中的垂直扩散进行比较。所用装置从日本佐贺大学引进，其原理见图3。试样筒上部为9 cm高的KCl溶液，浓度为7.8 g/L；下部为直径6.2 cm、高5 cm的饱和土试样，钾离子初始含量为1 980 mg/L。试样底部密封，为不透水面，土中流量 $q = 0$ 。试验时间为6 d，由于试验时间不是很长，可忽略上部溶液的浓度变化，用式(6)求解离子在土样中的浓度分布。

试验结束后，测得钾离子在粘土中的浓度分布如图4所示。用式(6)对试验结果进行拟合，求得钾

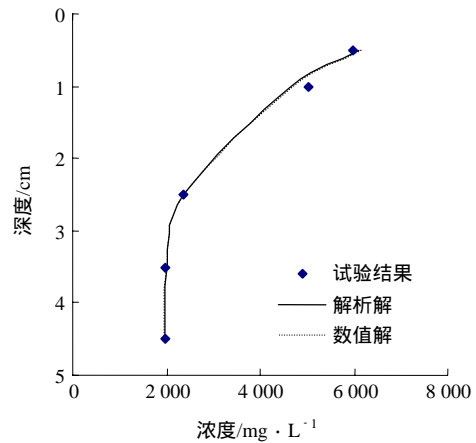


图4 钾离子在粘土中的浓度分布

Fig.4 Measured and theoretical concentration profiles of K^+

离子在该粘土中的扩散系数 D^* 为 $1.75 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。文[7]利用自行设计的水平扩散试验装置，测定了多种阳离子($K^+, Ca^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}$)和阴离子(Cl^-)在粘土介质中运移的扩散系数。该试验中所用土样为上海粉质粘土，扩散距离为10 cm。在无水头差、污染源浓度为0.1 mol/L的情况下，测得各离子的数量级均为 10^{-6} ，其中，钾离子的扩散系数为 $1.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，与本文结果接近。

根据求得的 D^* 以及试验测得的 $R_d (R_d = 1.1)$ ，用解析解和有限差分法分别求得浓度分布。由图4可知，解析解、数值解与实测值3者基本一致。因此，用对流-弥散方程来模拟土中的离子扩散是可行的。

4 影响因素分析

根据文[1]要求，以厚2 m、渗透系数为 10^{-7} cm/s 的粘土衬垫为基准，以钾离子在衬垫中的扩散为例，分析粘土的环境岩土工程特性对衬垫防渗性能的影响。与重金属相比，钾离子具有高浓度、低吸附和高扩散的特点，用钾离子的扩散代表重金属离子的扩散是偏安全的。在此基础上，比较不利状况下粘土衬垫与单层土工膜复合衬垫的防渗阻隔性能。复合衬垫中的粘土性质与粘土衬垫相同，并按美国环保局的标准取最小值60 cm。同时，假定土工膜质量较好，即每4 047 m^2 的面积相当于0.1 cm^2 的孔^[9]。

假定土中钾离子初始浓度为0，渗滤液中钾离子的浓度取中间值为1 000 mg/L ^[10]。离子在粘土中的阻滞因子和扩散系数参照杭州天子岭垃圾填埋场

底层粘土的实测结果, 分别取为 1.1 和 2×10^{-6} cm^2/s , 并根据分析需要在个别算例中进行变动。主要水头取为 30 cm, 根据文[11]的要求: “渗滤液收集系统的设计, 必须能保持衬垫层上的水头不超过 30 cm”。但考虑到我国填埋场水头可高达几十米的实际情况, 文中也分析了高水头对离子扩散的影响。

表 1, 2 分别列出了各种参数条件下, 粘土衬垫与复合衬垫的击穿时间和污染物渗漏量计算值。其中, 编号 1 为作为基准的厚 2 m、渗透系数为 10^{-7} cm/s 的粘土衬垫; 编号 2~9 为粘土的各种环境岩土工程特性对钾离子渗漏的影响分析; 编号 10~12 为钾离子在复合衬垫中扩散的结果。

表 1 离子通过粘土衬垫的击穿时间和渗漏量计算值
Table 1 Breakthrough time and leaching quantity of ion through clay liner

编号	渗透系数 $k_s/10^{-7}$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	扩散系数 $D_s/10^{-6}$ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	阻滞因子 R_d	水头 h/cm	渗透率 q $/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	击穿时间 /a	20 a 渗漏总量 $/\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
1	1.0	2.0	1.1	30	1.15×10^{-9}	8.5	15.2
2	0.1	2.0	1.1	30	1.15×10^{-10}	15.2	0.001 5
3	10.0	2.0	1.1	30	1.15×10^{-8}	1.9	6 360.0
4	1.0	1.0	1.1	30	1.15×10^{-9}	11.8	3.58
5	1.0	20.0	1.1	30	1.15×10^{-9}	1.5	219.7
6	1.0	2.0	1.5	30	1.15×10^{-9}	11.6	1.2
7	1.0	2.0	2.0	30	1.15×10^{-9}	15.5	0.037
8	1.0	2.0	1.1	100	1.5×10^{-9}	7.5	271.0
9	1.0	2.0	1.1	1 000	6.0×10^{-9}	3.1	700.0

表 2 离子通过复合衬垫的击穿时间和渗漏量计算值
Table 2 Breakthrough time and leaching quantity of ion through composite liner

编号	渗透系数 $k_s/10^{-7}$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	扩散系数 $D_s/10^{-6}$ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	阻滞因子 R_d	水头 h/cm	渗透率 q $/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	击穿时间 /a	20 a 渗漏总量 $/\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
10	1.0	2.0	1.1	30	$1.29 \times 10^{-12(a)}$	1.5	0.14 ^(a)
					$7.05 \times 10^{-12(b)}$		0.78 ^(b)
11	1.0	2.0	1.1	1 000	$7.03 \times 10^{-11(a)}$	1.5	7.75 ^(a)
					$3.85 \times 10^{-10(b)}$		42.45 ^(b)
12	10.0	2.0	1.1	30	$7.08 \times 10^{-12(a)}$	1.5	0.78 ^(a)
					$3.87 \times 10^{-11(b)}$		4.27 ^(b)

注: (a) 表示接触良好时的结果, (b) 表示接触不好时的结果。

表 1, 2 中的击穿时间是指衬垫底部渗漏出来的渗滤液浓度开始大于初始浓度的时刻。在击穿时间之前, 污染物离子通过衬垫层的渗漏浓度等于 0。渗漏总量为, 一段时间内, 通过单位面积衬垫渗漏

出来的污染物离子总量, 为渗透率、渗漏浓度和计算时间的积分。通过单位面积粘土衬垫的渗滤液的渗透率 q 可由达西定律得

$$q = k_s \frac{h + L}{L} \tag{7}$$

式中: k_s 为粘土的渗透系数, h 为衬垫上部水头, L 为粘土衬垫厚度。

通过单位面积复合衬垫的渗透率则由 Giroud 公式^[12]求得

$$q = 0.976nC_{q0}[1 + 0.1(h/L_s)^{0.95}]d^{0.2}h^{0.9}k_s^{0.74} \tag{8}$$

式中: n 为单位面积上的缺陷个数; C_{q0} 为接触因子, 当膜与粘土层接触良好时, $C_{q0} = 0.21$, 膜与粘土层接触较差时, $C_{q0} = 1.51$; L_s 为粘土层厚度; d 为圆孔直径。

由表 1 可知, 粘土的渗透系数、离子在粘土中的扩散系数、粘土对离子的阻滞因子、衬垫上的渗滤液水头等, 对污染物离子击穿粘土衬垫的时间和渗漏的污染量都有一定影响。相对于其他各因素, 粘土衬垫的渗透系数对流出污染物渗漏量影响最大。比较编号 1, 2 和 3 可知, 渗透系数增大一个数量级, 污染物渗漏量可增加上百倍; 反之, 渗透系数的降低可使污染物渗漏量大幅降低。因此, 控制渗透系数的大小对减少粘土衬垫的渗漏量有明显作用, 以渗透系数小于一定值(如 10^{-7} cm/s)作为填埋场粘土衬垫的基本设计标准是可行的。

扩散系数对离子击穿粘土层的时间和渗漏量也有较大影响(编号 1, 4 和 5), 随着扩散系数的提高, 击穿时间缩短, 渗漏量增大。我国的填埋场规范目前仅对衬垫的水力渗透性和厚度有限制, 而对衬垫的环境土工特性没有要求。但当污染物离子的扩散系数较大时, 即使水头和渗透系数能满足规范的要求, 通过衬垫的污染物渗漏仍较大, 因此, 有必要对污染物的扩散系数加以控制, 并在设计中考虑扩散系数的影响。

由编号 1, 6 和 7 的比较可知, 阻滞因子对击穿时间的影响较大, 仅是小数级的变化, 就可使击穿时间相差几年, 且使渗漏量变得很小。这表明, 可通过改善衬垫中粘土的物理化学性质, 增强粘土的活性, 提高粘土吸附离子的性能, 以延长离子通过衬垫的击穿时间, 减少渗漏量, 从而增加衬垫的防污染扩散能力。

由编号 1, 8 和 9 的比较可知, 随着水头的增高, 离子通过粘土衬垫的击穿时间缩短, 渗漏量增加。

当水头达到 10 m 后, 击穿时间缩短到仅 3.1 a, 远小于 10~20 a 的填埋期, 且产生的渗漏量较大, 对周围环境的危害不可忽视。我国目前的填埋场规范对填埋场内的水头尚未进行限制, 在设计衬垫时仅考虑衬垫的水力渗透性和厚度, 这在降雨少的干旱地区可能是适用的。但在我国南方地区, 降水量丰富, 年均可达上千毫米, 以致在填埋期间进入填埋场的水量较多, 使得填埋场内的浸润线可达数十米, 如杭州天子岭垃圾填埋场水头最高处达 20 多米, 非常有必要加强底部渗滤液排放措施, 防止雨水渗入, 限制填埋场水头高度, 以减小对填埋场周围环境的危害。

由表 1 可知, 粘土的渗透系数和衬垫上水头对污染物离子的扩散有较大的影响, 因而表 2 重点考察这 2 个参数对离子在复合衬垫中扩散的影响。由表 2 可知, 几种情况下复合衬垫的击穿时间无变化, 这是因为复合衬垫中承担防渗功能的主要是土工膜, 即使水头和渗透系数增加, 对总体防渗性能影响也不大。

与相同水头和渗透系数的粘土衬垫相比, 离子通过复合衬垫的击穿时间缩短了约 80%。这主要是因为击穿时间是按渗漏浓度来确定的。土工膜中存在缺陷, 而对通过缺陷的污染物离子的阻隔作用主要由膜下 60 cm 的粘土层承担, 与 2 m 厚的粘土衬垫相比, 离子较易扩散出去, 使得衬垫底部浓度偏高。但与粘土衬垫相比, 通过复合衬垫的污染物渗漏总量可减少约 100 倍。因而加入土工膜可明显改善填埋场衬垫的性状, 对防止填埋场危害周围环境具有很好的隔离作用, 且减小了衬垫层的厚度, 使填埋场的容量增加, 从而降低了填埋场的成本。

若以击穿时间来评价衬垫的有效性, 复合衬垫因土工膜存在缺陷, 导致击穿时间较短, 这与实际填埋场工程中复合衬垫表现出的良好阻隔作用不相符。因而用击穿时间作为衬垫设计标准, 不能正确描述复合衬垫的功能。如果用通过粘土衬垫的渗漏总量作为控制标准, 则既能考虑到渗滤液中污染物浓度的影响, 也可考虑到渗滤液水量的变化, 可更合理地描述离子的渗漏情况。以渗漏总量作为评价标准时, 由编号 9 与 11 的比较可知, 即使在水头高达 10 m, 且土工膜与粘土层接触不好的情况下, 通过复合衬垫的污染物渗漏总量也远小于粘土衬垫。因此, 当填埋场现场条件不好(如水头较高、渗透系数达不到要求等)时, 建议采用土工膜复合衬垫, 以确保周围环境的安全。

5 结 论

本文以对流-弥散方程为基础, 研究了粘土环境土工特性对衬垫防渗性能的影响, 对我国目前采用的填埋场粘土类衬垫防渗设计标准及其有效性进行了多参数组合的计算分析, 并比较了粘土衬垫与复合衬垫对污染物离子的防渗阻隔性能。通过这些研究发现:

(1) 总体而言, 文[1]对填埋场粘土类衬垫的要求(渗透系数小于等于 10^{-7} cm/s、厚度大于等于 2 m)是可行的, 特别是对干旱少雨地区适用。对南方多雨地区, 存在填埋场浸润线水头较高的危险, 宜采用土工膜复合衬垫。

(2) 我国南方地区由于降水量丰富, 在填埋期间进入填埋场的水量较多, 使得填埋场内的浸润线可达数十米, 因此, 非常有必要加强底部渗滤液排放措施, 防止雨水渗入, 限制填埋场水头高度, 以减小对填埋场周围环境的危害。

(3) 与其他因素相比, 粘土衬垫的渗透系数对流出的污染物渗漏总量影响较大, 控制渗透系数小于一定值(如 10^{-7} cm/s)作为填埋场粘土衬垫的设计标准是可行的。但当污染物离子的扩散系数较大时, 应在填埋场设计中考虑其对污染物扩散的影响。

(4) 采用粘土作为衬垫材料时, 可通过改善粘土的物理化学性质, 来增强粘土的活性, 提高粘土吸附离子的性能, 以延长离子通过衬垫的击穿时间, 减少渗漏量。

(5) 评价粘土衬垫的有效性时, 用击穿时间作为评价指标不能正确描述复合衬垫的功能, 建议采用渗漏总量作为综合评价指标。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. 城市生活垃圾卫生填埋技术规范(CJJ17-2004)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Code for Sanitary Landfill of Municipal Solid Waste(CJJ17-2004)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [2] Foose G J, Benson C H, Edil T B. Evaluating the effectiveness of landfill liners[A]. In: Kamon D ed. Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. 217-221.
- [3] Devulapalli S N, Reddy K R. Effect of nonlinear adsorption on

- contaminant transport through landfill clay[A]. In : Kamon D ed. Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics[C]. Rotterdam : A. A. Balkema , 1996. 473 – 478.
- [4] 陈湘生, 张建红, 胡黎明等. 离心模拟技术在环境岩土工程中的应用[A]. 见: 包承纲, 陈云敏编. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 122 – 131.(Chen Xiangsheng, Zhang Jianhong, Hu Liming, et al. Centrifuge modeling application in geoenvironmental engineering[A]. In : Bao Chenggang, Chen Yunmin ed. Proceedings of the First Chinese Symposium on Geoenvironmental and Geosynthetics[C]. Hangzhou : Zhejiang University Press, 2002. 122 – 131.(in Chinese))
- [5] Travis C C, Etnier E L. A survey of sorption relationships for reactive solutes in soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1981, 10(1) : 9 – 17.
- [6] Sasaki S. Mechanism of heavy metal migration in soil during water permeation[A]. In : Kamon D ed. Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics[C]. Rotterdam : A. A. Balkema, 1996. 143 – 146.
- [7] 席永慧, 任杰, 胡中雄. 污染物离子在粘土介质中扩散系数的实验室测定[A]. 见: 包承纲, 陈云敏编. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 186 – 191.(Xi Yonghui, Ren Jie, Hu Zhongxiong. Laboratory determination of diffusion coefficients of contaminant ions in clay soil[A]. In : Bao Chenggang, Chen Yunmin ed. Proceedings of the First Chinese Symposium on Geoenvironmental and Geosynthetics[C]. Hangzhou : Zhejiang University Press, 2002. 186 – 191.(in Chinese))
- [8] Du Y J, Hayashi S, Hino T, et al. Contaminant adsorption characteristics of Kyushu regional soils[J]. Lowland Technology International, 2000, 2(2) : 31 – 41.
- [9] 钱学德, 郭志平, 施建勇等. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(Qian Xuede, Guo Zhiping, Shi Jianyong, et al. Design and Construction of Modern Sanitary Landfill[M]. Beijing : China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [10] 蒋海涛, 周恭明, 高廷耀. 城市垃圾填埋场渗滤液的水质特性[J]. 环境保护科学, 2002, 28(11) : 11 – 13.(Jiang Haitao, Zhou Gongming, Gao Tingyao. The characteristics of MSW landfill Leachate[J]. Science of Environment Protection, 2002, 28(11) : 11 – 13.(in Chinese))
- [11] 乔辉, 黄俊, 周申范. 美国的城市固体废物填埋标准[J]. 环境卫生工程, 1999, 7(4) : 133 – 137.(Qiao Hui, Huang Jun, Zhou Shenfan. Municipal solid waste landfill criteria of the United States[J]. Environment and Sanitary Engineering, 1999, 7(4) : 133 – 137.(in Chinese))
- [12] 赵爱根, Richardson G N, 王铁儒等. 垃圾填埋场的水力学设计[A]. 见: 包承纲, 陈云敏编. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 88 – 98.(Zhao Aigen, Richardson G N, Wang Tieru, et al. Hydraulic design of landfills[A]. In : Bao Chenggang, Chen Yunmin ed. Proceedings of the First Chinese Symposium on Geoenvironmental and Geosynthetics[C]. Hangzhou : Zhejiang University Press, 2002. 88 – 98.(in Chinese))