

DOI: 10.11779/CJGE202010009

# 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

张春华<sup>1</sup>, 吴家蔚<sup>2</sup>, 陈 赘<sup>3</sup>, 谢海建<sup>\*2, 4</sup>, 陈云敏<sup>4</sup>

(1. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 浙江大学水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 4. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 通过对我国 6 个典型垃圾填埋场中渗滤液各组分的实测浓度值的统计分析, 并与中国生活饮用水卫生标准中的界限浓度值进行对比分析, 确定了以渗滤液中不同污染物组分为指示性污染物时的典型击穿标准和极端情况的击穿标准分别为 0.1 和 0.01。基于已有的污染物在复合衬垫 GMB+CCL 中的一维迁移解析解, 在分别考虑了以有机物污染物和无机污染物为击穿指标的情况下, 利用数值拟合的方法得到了两种情况下复合衬垫中 CCL 厚度的简化计算公式。以杭州天子岭垃圾填埋场为例, 利用简化计算方法对复合衬垫的厚度设计进行了验证; 结果表明, 若要保证渗滤液中的 Pb 击穿 GMB/CCL 复合衬垫的时间大于 50 a, 则土工膜下覆的 CCL 的厚度至少需要 0.6 m。

**关键词:** 填埋场; 渗滤液; 击穿标准; 简化计算; 复合衬垫系统

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)10-1841-08

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

## Simplified method for determination of thickness of composite liners based on contaminant breakthrough time

ZHANG Chun-hua<sup>1</sup>, WU Jia-wei<sup>2</sup>, CHEN Yun<sup>3</sup>, XIE Hai-jian<sup>2, 4</sup>, CHEN Yun-min<sup>4</sup>

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000,

China; 2. Institute of Hydrology and Water Resources Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. The Architectural

Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China; 4. MOE Key Laboratory of Soft Soils and

Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Based on the statistic analysis of the measured concentrations of leachate pollutants found in the six landfill sites in China and the contaminant limit concentration specified in the drinking water standard, the breakthrough standard values for the indicative contaminant in the leachate in the typical and extreme situations are determined to be 0.1 and 0.01, respectively. Based on the analytical solution of contaminant transport through a composite liner consisting of a geomembrane (GMB) and a compacted clay liner (CCL), the simplified formula for determination of the thickness of the composite liner is obtained for the indicative inorganic and organic contaminants by using the numerical fitting method. The simplified method is used to design the composite liner system at the Tianziling landfill site in Hangzhou. When considering the lead (Pb) as the index contaminant, the breakthrough time will be longer than 50 years in the case with the thickness of CCL larger than 0.6 m.

**Key words:** landfill; leachate; breakthrough standard; simplified calculation; composite liner system

## 0 引言

中国固体废弃物的处置以填埋为主, 垃圾填埋场的底部衬垫系统是一种水利屏障, 被用来阻隔和延缓渗沥液中的污染物进入地下水从而对环境造成污染<sup>[1]</sup>。垃圾填埋场的衬垫系统主要用于防止衬垫层上部的渗滤液扩散迁移至地下水, 用于保护地下水不受渗滤液中可能存在的有毒物质的污染。在中国垃圾填埋场底部防渗系统的主要结构包括以下两种<sup>[2]</sup>: ①压实黏土

衬垫(CCL); ②土工膜(GMB)与压实黏土层组成的复合衬垫系统(GMB+CCL)。

目前, 对于污染物在垃圾填埋场衬垫系统中运移的

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC18 02303); 国家自然科学基金面上项目(41977223); 国家自然科学基金重点支持项目(41931289); 浙江省杰出青年基金项目(LR20E080002)

收稿日期: 2019-12-06

\*通信作者(E-mail: xiehaijian@zju.edu.cn)

研究主要包括数值法和解析解法。被用于模拟污染物在垃圾填埋场中运移的数值法主要包括有限差分法<sup>[3-4]</sup>、有限层法 (POLLUTE 软件) 和有限元法<sup>[5-8]</sup>。Liu 等<sup>[9]</sup>给出了有机酸在垃圾填埋场底部衬垫中运移的一维数值模型。然而, 在垃圾填埋场场地的选择以及屏障系统的初步设计阶段, 数值法的复杂程度远远超出了可用数据的复杂性<sup>[10]</sup>。基于此, 许多学者尝试通过利用解析解来对污染物在填埋场衬垫系统中的运移进行模拟。对于污染物在填埋场衬垫中存在的扩散、对流、吸附、降解、固结和热扩散等作用, 已有大量学者对其进行研究并给出了污染物运移的解析模型<sup>[11-19]</sup>。然而, 解析解虽然可以模拟污染物在垃圾填埋场衬垫系统中的运移, 但在水头、污染物浓度场等作用下复合衬垫中污染物运移的解析解形式仍较为复杂 (如解中包含积分项等), 较难被用于填埋场衬垫系统的设计中。

本文首先对垃圾填埋场渗滤液常见污染物组分的浓度进行统计分析, 并与中国生活饮用水卫生标准中的界限值进行比较后, 确定了填埋场衬垫系统的击穿标准; 而后以中国垃圾填埋场中最常用的复合衬垫系统 (GMB+CCL) 为研究对象, 以 Chen 等<sup>[15]</sup>提出的污染物在复合衬垫系统中运移的解析解公式为基础, 通过数据拟合的方法得到了垃圾填埋场衬垫厚度的初步设计的简化计算公式。以杭州天子岭垃圾填埋场为例, 利用本文所得的简化计算公式及其设计曲线对填埋场复合衬垫系统中的 CCL 的厚度进行了设计。

## 1 击穿标准

### 1.1 渗滤液各组分浓度调研

通过对我国 6 个典型的填埋场 (上海老港垃圾填埋场、深圳下坪垃圾填埋场、杭州天子岭垃圾填埋场、南京水阁垃圾填埋场、苏州七子山垃圾填埋场和西安江村沟垃圾填埋场) 渗滤液中污染物组分浓度测试结果进行总结, 见表 1<sup>[20-22]</sup>。由表 1 可知, 渗滤液中的重金属含量最高的为 Zn, 但是不同的填埋场渗滤液中的 Zn 的浓度相差很大, 其总的浓度范围是 0~88.01 mg/L, 平均浓度为 19 mg/L。而有机污染物中含量最高的是氯苯, 其浓度范围是 0.1~1.0 mg/L, 平均浓度为 0.92 mg/L。

### 1.2 击穿标准的确定

由于中国 70%以上的人口依赖地下水作为其饮用水, 因此根据渗滤液中常见污染物组分的浓度值, 与中国生活饮用水卫生标准中规定的各组分浓度的界限值作比较, 可得渗滤液中各组分浓度的超出倍数, 具体结果见表 1。

表 1 中国 6 个典型垃圾填埋场渗滤液中各组分浓度实测值

Table 1 Measured concentrations of leachate pollutants found in six landfill sites in China

污染 物种 类	浓度范围 /(mg·L <sup>-1</sup> )	平均浓度 /(mg·L <sup>-1</sup> )	界限浓度 /(mg·L <sup>-1</sup> )	超出 倍数	平均 超出 倍数
Ni	0.16~0.91	0.49	0.02	8~45.5	24.5
Cu	0.47~8.73	2.56	1.0	0.47~8.73	2.56
Zn	0.00~88.01	19.00	1.0	0~88.01	19
Pb	0.046~0.98	0.28	0.01	4.6~98	28
Cr	0.23~1.31	0.52	0.05	4.6~26.2	10.4
Cd	0.0042~0.34	0.073	0.005	0.84~68	14.6
As	0.082~1.54	0.49	0.01	8.2~154	49
DDT	0.01~0.1	0.015	0.001	10~100	15
六氯化苯	0.05~0.15	0.07	0.005	10~30	14
二氯甲烷	0.02~0.54	0.2	0.02	1~27	10
苯	0.01~0.04	0.023	0.01	1~4	2.3
氯苯	0.1~1.0	0.92	0.3	0.33~3.33	3.1

由表 1 可以看出, 渗滤液中污染物组分超标最严重的为砷, 超出界限值 8.2~154 倍, 平均浓度超出界限值 49 倍。而有机污染物中超标最严重的则为 DDT (双对氯苯基三氯乙烷), 超出界限浓度值的 10~100 倍, 平均超出 15 倍。本文将中国饮用水中的界限值与渗滤液中污染物的浓度值的比值作为污染物的击穿标准  $C_N$ , 由表 1 可以看出, 击穿标准为 0.1~0.01 可囊括所有典型指示性污染物的情况。而且由各组分平均超出倍数的情况可以看出,  $C_N=0.1$  是较常见的击穿标准, 本文称之为典型击穿标准; 而  $C_N=0.01$  只有在以个别的污染物为指示性击穿指标时才可能达到的击穿标准, 称之为极端击穿标准。因此, 本文以渗滤液中的污染物组分为击穿指标, 考虑了两种不同的击穿标准, 即典型击穿标准  $C_N=0.1$  和极端击穿标准  $C_N=0.01$ , 并分别得到了在两种击穿标准下的复合衬垫厚度的简化计算公式。

本文考虑的击穿标准和通常所说的水平防渗 0.01 源浓度的击穿标准相比, 更具有普遍性和适用性, 能充分考虑不同填埋场渗滤液中的典型污染物浓度的差异性, 同时还能为渗滤液污染物浓度超标较低的填埋场复合衬垫厚度提供设计或验证方法。

## 2 GMB+CCL 复合衬垫简化计算的理论基础

当垃圾填埋场中的底部衬垫系统为由土工膜

(GMB) 和压实黏土层 (CCL) 组成的复合衬垫时, 污染物通过复合衬垫的运移模型如图 1 所示。

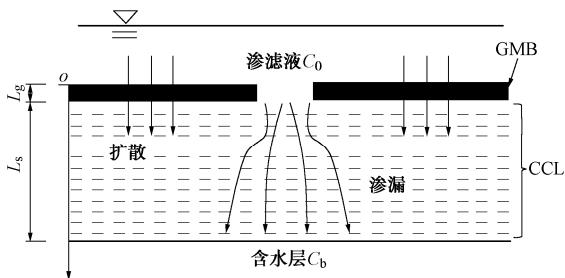


图 1 污染物通过 GMB+CCL 复合衬垫示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contaminant transport in landfill composite liner consisting of a GMB and a CCL

其中  $L_g$  和  $L_s$  分别为土工膜和压实黏土层的厚度。此时, 假设污染物通过复合衬垫的运移是一维的, 且 CCL 为均质且饱和的。当以渗滤液中典型污染物组分为指示性污染物时, 采用 Chen 等<sup>[15]</sup>提出的污染物在复合衬垫 GMB/CCL 中的一维运移解析解进行计算:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{K}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R / P_{Ls}}} \right) + e^{P_{Lg} + P_{Ls}} \operatorname{erfc} \left( \frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R / P_{Ls}}} \right) - e^{\frac{P_{Ls}}{4}(-1+e^{P_{Lg}}+T_R)} \operatorname{csch}^2 \left( \frac{P_{Lg}}{2} \right) (1+e^{P_{Lg}}) \operatorname{erfc} \left[ \frac{1+T_R \coth \left( \frac{P_{Lg}}{2} \right)}{2\sqrt{T_R / P_{Ls}}} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中,

$$K = \frac{S_{gf}}{S'_{gf}} \quad , \quad (2)$$

$$P_{Lg} = \frac{v_a L_g}{S'_{gf} D_g} \quad , \quad (3)$$

$$P_{Ls} = \frac{v_s z}{D^*} \quad (L_g \leq z \leq L_g + L_s) \quad , \quad (4)$$

$$T_R = \frac{v_s t}{R_d z} \quad (L_g \leq z \leq L_g + L_s) \quad . \quad (5)$$

式中  $S_{gf}$  为污染物在渗滤液和土工膜上的分配系数;  $S'_{gf}$  为污染物在 GMB 和 CCL 之间的分配系数;  $v_a$  为复合衬垫系统的达西流速;  $L_g$  为土工膜的厚度;  $D_g$  为污染物在土工膜中的扩散系数;  $v_s$  为 CCL 中的渗流流速;  $z$  为衬垫层深度;  $D^*$  为污染物在 CCL 中的有效扩散系数;  $R_d$  为阻滞因子, 可根据室内试验获得;  $t$  为时间。达西流速  $v_a$  计算公式为

$$v_a = \frac{Q}{A} \quad , \quad (6)$$

式中,  $Q$  为土工膜上漏洞产生的渗漏率,  $A$  为土工膜的面积。CCL 中的渗流流速  $v_s$  的计算式为

$$v_s = \frac{v_a}{n} \quad , \quad (7)$$

式中,  $n$  为 CCL 的孔隙率。

### 3 GMB+CCL 复合衬垫简化计算的过程

#### 3.1 渗漏率的计算

污染物在有缺陷土工膜中的渗漏率主要包括以下两个部分<sup>[23]</sup>: ①污染物通过平坦土工膜漏洞产生的渗漏率; ②污染物通过与褶皱相连的土工膜漏洞产生的渗漏率。污染物在土工膜中的渗漏率为两者计算得到的和。

对于污染物通过平坦土工膜漏洞产生的渗漏率的计算, 采用 Rowe<sup>[24]</sup>提出的关于圆形缺陷产生渗漏率的解析解。对于复合衬垫, 底部水头为零时, 该公式可以表达为

$$Q_1 = \pi K_s \left( r^2 \frac{h_t}{L_s} + 2 \frac{h_t}{L_s} \Delta_1 + 2 \frac{h_t}{L_s} \Delta_2 - 2 \frac{h_w}{L_s} \Delta_2 \right) \quad , \quad (8)$$

式中,  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  是和 Bessel 函数相关的表达式,  $r$  为缺陷孔的半径,  $K_s$  为土层渗透系数,  $L_s$  为下覆土层厚度,  $h_w$  为水头,  $h_t$  为接触界面的导水系数。可利用 POLLUTEv7 软件进行计算。

计算与褶皱相连的漏洞产生的渗漏率时, 利用 Rowe<sup>[24-25]</sup>给出的渗漏率计算公式:

$$Q_2 = 2L[(kb + (kL_s \theta)^{0.5})]H/L_s \quad , \quad (9)$$

式中,  $L$  为与漏洞相连接的水力连通的褶皱长度,  $2b$  表示褶皱的宽度,  $k$  为土层的渗透系数,  $\theta$  为 GMB 层与黏土衬垫界面的导水系数,  $H$  为复合衬垫的水头损失。

Rowe 指出<sup>[26]</sup>, 当土工膜在上午 8:00 之前或者下午 16:00 之后进行覆盖时, 每公顷的土工膜上约存在 6~7 条水力连通的褶皱, 且水力连通的褶皱长度  $L \leq 200$  m。此时, 如果土工膜漏洞频率为 2.5~5 个/公顷时, 有 1 个漏洞处于  $L \leq 200$  m 的水力连通的褶皱上的情况比较合理。

因此, 本文对于 GMB+CCL 复合衬垫, 考虑平坦的土工膜上的漏洞个数为 4 个/公顷, 而与褶皱相连的漏洞个数为 1 个/公顷, 漏洞半径为 0.5 mm, 连接的褶皱长度为 200 m, 宽度为 0.2 m<sup>[27]</sup>。假设 GMB 和 CCL 之间接触条件较好, 则其界面导水系数为  $1.6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[28]</sup>。需要指出的是, 当以无机物 (如重金属离子) 为击穿指标时, 由于无机物很难以扩散作用通过土工膜, 主要通过土工膜漏洞迁移<sup>[29-30]</sup>, 因此在计算过程中, 将土工膜的有效扩散系数选取较小的值 (本文考虑  $D_g = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ )。其他参数取值参照相关文献中报道过的典型值<sup>[31]</sup>, 具体见表 2。

表 2 垃圾填埋场衬垫相关计算参数取值

Table 2 Parameters for composite liner system of landfill

分类	参数				
	厚度 /m	分配系数	有效扩散系数 /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	孔隙度	渗透系数 /(m·s <sup>-1</sup> )
土工膜 (GM)	0.0015	100	$3 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-15}$	—
黏土衬垫 (CCL)	—	—	$3 \times 10^{-10}$	0.4	$1 \times 10^{-9}$

计算污染物在复合衬垫中的击穿曲线时,首先根据式(8)和式(9)计算得到土工膜漏洞产生的渗漏率,将结果代入式(6)和式(7)中,可计算得到达西流速和CCL中的渗流流速,而后将渗流流速结果代入式(1)中,可得到污染物的击穿曲线。

### 3.2 GMB+CCL 复合衬垫的厚度简化计算过程

考虑到有机污染物和无机污染物在GMB中的扩散系数明显不同,本文分别考虑了以有机物和无机物为击穿指标时的复合衬垫的简化计算方法。

首先计算了在以有机物为指示性污染的情况下,污染物在50 a时的浓度击穿曲线。为反映不同污染物的影响,选取了阻滞因子分别为 $R_d=1, 5, 10, 20$ 和50的情况进行计算,得到的CCL厚度与渗滤液水头的关系如图2所示。图中 $C_N$ 为击穿标准,表示为含水层中污染物的浓度和渗滤液中污染物浓度的比值。

图2结果表明,高水头条件下,阻滞作用的影响较为显著;低水头条件下,阻滞作用的影响相对较小。同时,由图可知,除 $R_d=1$ 的情况下线性关系不够显著,其他情况下CCL厚度 $L_s$ 与 $H$ 之间呈明显的线性关系。因此,选用线性拟合方式对计算结果进行拟合,根据拟合结果,推导获得CCL厚度和水头的建议关系式:

$$L_s = EH + F \quad , \quad (10)$$

式中, $E, F$ 为待定系数。用式(10)对图2中的计算结果进行拟合,拟合结果如图2所示。

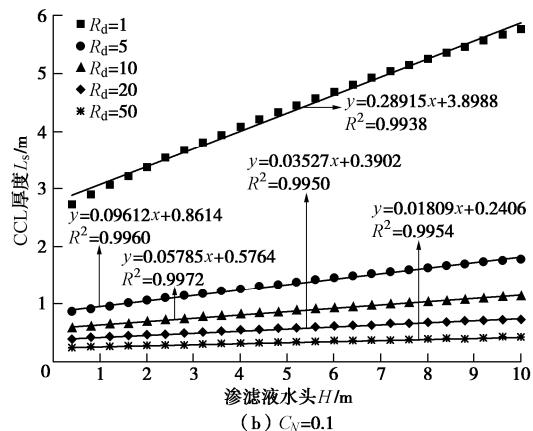
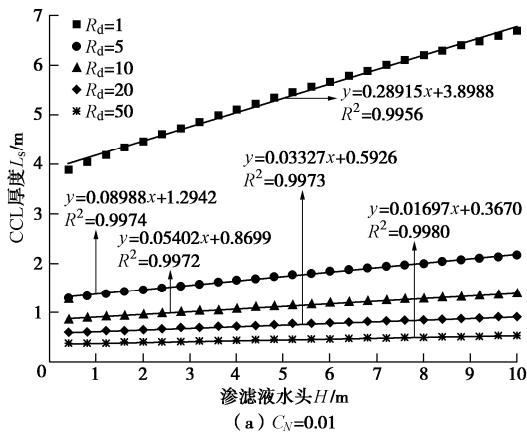


图2 基于有机物击穿复合衬垫时CCL厚度随渗滤液水头变化的线性拟合结果

Fig. 2 Linear fitting results of relationship between thickness of composite liner and leachate head based on breakthrough of organic contaminant

结果表明系数 $E$ 和系数 $F$ 的取值与阻滞因子和击穿标准有关。根据图2的拟合结果,可给出系数 $E$ 和系数 $F$ 与阻滞因子 $R_d$ 和击穿标准 $C_N$ 的关系曲线如图3所示。

由图3可以得到,对复合衬垫GMB+CCL的CCL厚度的简化计算公式中,当考虑的污染物击穿标准为极端击穿标准时(即 $C_N=0.01$ ),系数 $E$ 和 $F$ 的表达式分别为

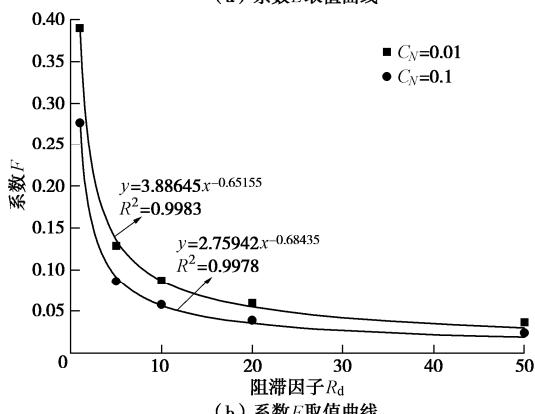
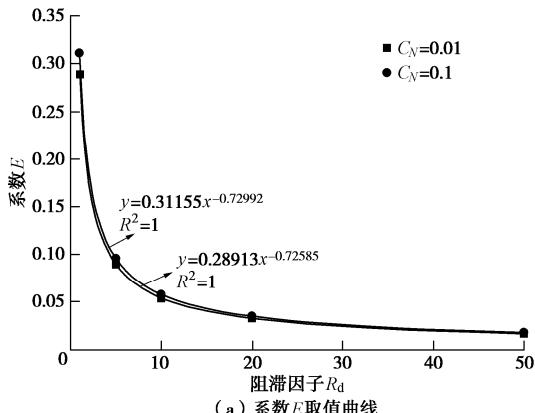


图3 复合衬垫中CCL厚度设计系数 $E$ 和系数 $F$ 取值曲线

Fig. 3 Relationship between design coefficient ( $E$  and  $F$ ) and retardation factor

$$E = 0.28913 \times R_d^{-0.72585} , \quad (11)$$

$$F = 3.88645 \times R_d^{-0.65155} . \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入式(10)可得到在极端击穿标准条件(即 $C_N=0.01$ )下, 复合衬垫GMB+CCL中CCL厚度的简化计算公式为

$$L_s = (0.28913 \times R_d^{-0.72585}) \times H + 3.88645 \times R_d^{-0.65155} . \quad (13)$$

同样, 在典型击穿标准(即 $C_N=0.1$ )下, 系数 $E$ 和 $F$ 的表达式分别为

$$E = 0.31155 \times R_d^{-0.72992} , \quad (14)$$

$$F = 2.75942 \times R_d^{-0.68435} . \quad (15)$$

将式(14)、(15)代入式(10)可得到在典型击穿标准(即 $C_N=0.01$ )下, 复合衬垫GMB+CCL中CCL厚度的简化计算公式为

$$L_s = (0.31155 \times R_d^{-0.72992})H + 2.75942 \times R_d^{-0.68435} . \quad (16)$$

由拟合结果可知, 当击穿标准 $C_N$ 由0.01增加到0.1时, 系数 $E$ 的值就会有所增大, 但是两者相差不大(0.00113~0.02243), 且随着阻滞因子的增加, 不同的击穿标准下系数 $E$ 的取值的差距会逐渐减小; 而当击穿标准 $C_N$ 由0.01增加到0.1时, 系数 $F$ 的值减小, 两者相差0.1264~1.1302, 并且随着阻滞因子的增加, 不同击穿标准下系数 $F$ 的取值的差距逐渐减小。

同样, 当以无机物为指示性污染物时, 复合衬垫厚度的简化计算方法的步骤与前面一致。首先得到的渗滤液水头与CCL的厚度关系如图4所示。采用线性拟合公式对结果进行拟合。

$$L_s = GH + I , \quad (17)$$

式中,  $G$ ,  $I$ 为待定系数。拟合结果如图4所示。

同样, 结果表明系数 $G$ 和系数 $I$ 的取值与阻滞因子和击穿标准有关。根据图4的拟合结果, 可以画得系数 $G$ 和系数 $I$ 与阻滞因子 $R_d$ 和击穿标准 $C_N$ 的关系曲线如图5所示。

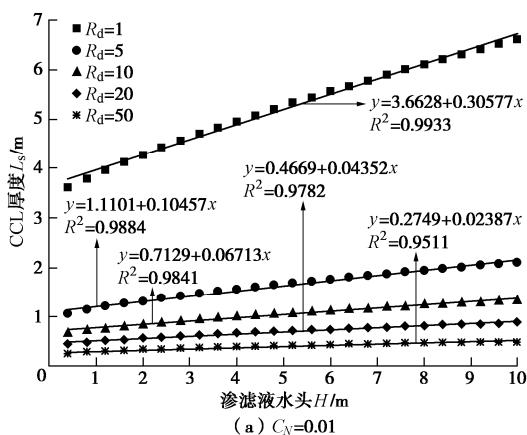
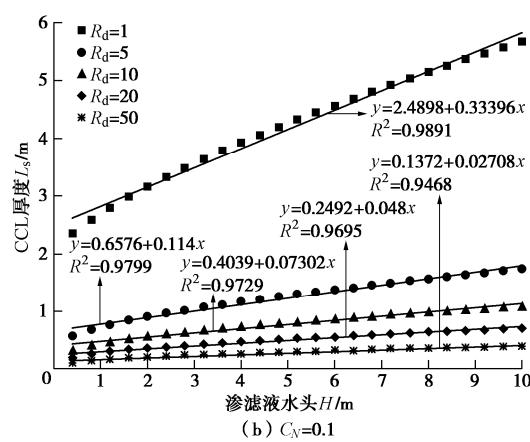
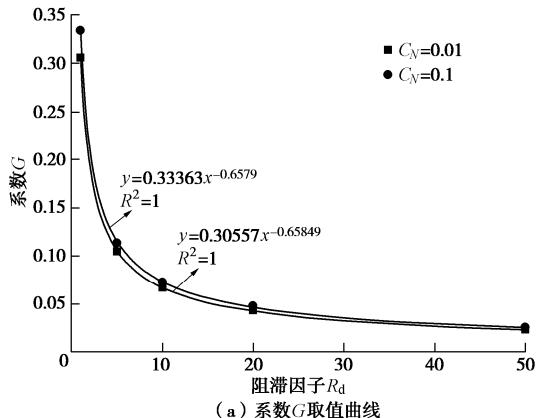
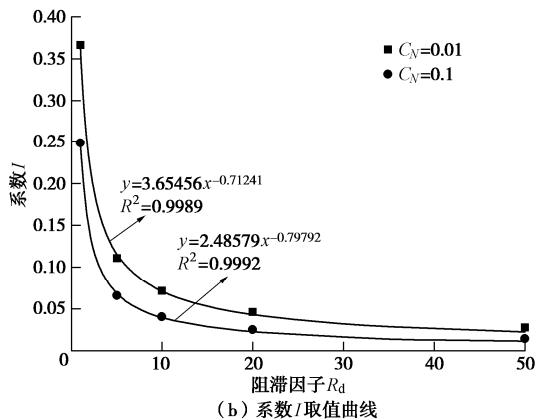
(a)  $C_N=0.01$ (b)  $C_N=0.1$ 

图4 基于无机物击穿复合衬垫时CCL厚度随渗滤液水头变化的线性拟合结果

Fig. 4 Linear fitting results of relationship between thickness of composite liners and leachate head based on breakthrough of inorganic contaminant



(a) 系数G取值曲线



(b) 系数I取值曲线

图5 复合衬垫中CCL厚度设计系数 $G$ 和系数 $I$ 取值曲线

Fig. 5 Relationship between design coefficient ( $G$  and  $I$ ) and retardation factor

由图5可以得到, 对复合衬垫GMB+CCL的CCL厚度的简化计算公式中, 以无机物作为击穿指标时, 当污染物击穿标准为极端击穿标准时(即 $C_N=0.01$ ), 系数 $G$ 和 $I$ 的表达式分别为

$$G = 0.30557 \times R_d^{-0.65849} , \quad (18)$$

$$I = 3.65456 \times R_d^{-0.71241} \quad (19)$$

将式(18)、(19)代入式(17)可得到在极端击穿标准条件(即  $C_N=0.01$ )下,复合衬垫 GMB+CCL 中 CCL 厚度的简化计算公式为

$$L_s = (0.30557 \times R_d^{-0.65849})H + 3.65456 \times R_d^{-0.71241} \quad (20)$$

同样,在典型击穿标准(即  $C_N=0.1$ )下,系数  $G$  和  $I$  的表达式分别为

$$G = 0.33363 \times R_d^{-0.6579} \quad , \quad (21)$$

$$I = 2.48579 \times R_d^{-0.79792} \quad . \quad (22)$$

将式(21)、(22)代入式(17)可得得到在典型击穿标准(即  $C_N=0.1$ )下,复合衬垫 GMB+CCL 中 CCL 厚度的简化计算公式为

$$L_s = (0.33363 \times R_d^{-0.6579})H + 2.48579 \times R_d^{-0.79792} \quad (23)$$

## 4 实例分析

针对本文提出复合衬垫厚度的简化计算方法,以杭州天子岭垃圾填埋场为例进行分析。杭州天子岭填埋场占地面积 48 公顷,填埋库容量 600 万 m<sup>3</sup>,设计填埋量初期为 1949 t/d,终期为 4000 t/d,日均填埋量为 2671 t/d,总库容为 2202 万 m<sup>3</sup>。该填埋场为山谷型垃圾填埋场,堆体高达 130 m,为全国最高,无害化处置杭州全市 60%的生活垃圾。该填埋场采用的衬垫类型为 GMB+CCL 复合衬垫。

通过对天子岭垃圾填埋场的渗滤液组分进行浓度测定发现,渗滤液中超标最严重的污染物是铅(Pb),浓度达到了 162.3 μg/L。其他相关参数如表 3 所示<sup>[32-36]</sup>。

表 3 天子岭填埋场污染物参数取值

Table 3 Parameters of pollutant in Tianziling landfill

渗滤液头/m	指示性污染物	渗滤液中指示性污染物浓度/(μg·L <sup>-1</sup> )	指示性污染物的界限浓度/(μg·L <sup>-1</sup> )	击穿标准	指示性污染物的阻滞因子
11.2	Pb	162.3	10	0.062	30

基于表 3 得到的杭州天子岭垃圾填埋场的相关参数,利用本文提出的 CCL 厚度的简化计算方法,对天子岭垃圾填埋场所需的 CCL 厚度进行了简化计算。

由于天子岭垃圾填埋场的指示性污染物为重金属离子 Pb,因此可以根据击穿标准  $C_N=0.062$  和 Pb 的阻滞因子  $R_d=30$ ,对照图 5,采用插值法可以得到系数  $G$  和  $I$  的取值分别为 0.03444 和 0.21668;因为渗滤液水头为 11.2 m,利用式(17)可以计算得到杭州天子岭垃圾填埋场中 GMB+CCL 复合衬垫所需的 CCL 厚度为 0.603 m。这表明,若要保证填埋场渗滤液中的 Pb 击穿复合衬垫的时间大于 50 a,则复合衬垫中所需的 CCL 的厚度至少为 0.6 m。

Pb 在黏土中吸附性较强,以其作为设计的目标污

染物进行衬垫厚度设计偏于危险,本文再以氯离子作为指示性污染物时进行验算。天子岭填埋场渗滤液中的氯离子实测浓度为 2560 mg/L,而其界限浓度为 250 mg/L,因此得到氯离子的击穿标准  $C_N=0.098$ 。氯离子的阻滞因子  $R_d=1$ ,对照图 5,采用插值法可以得到系数  $G$  和  $I$  的取值分别为 0.333 和 2.252;渗滤液水头为 11.2 m,利用式(17)可以计算得到复合衬垫所需的 CCL 厚度为 6.0 m,远高于以 Pb 作为目标污染物时所需的厚度。这表明,在进行填埋场衬垫系统的厚度设计时,应该以惰性污染物(如氯离子)作为目标污染物进行设计。

## 5 结 论

本文基于已有的污染物在复合衬垫 GMB/CCL 中的一维运移解析解,给出了基于击穿时间的垃圾填埋场 GMB+CCL 复合衬垫的 CCL 厚度的简化计算方法。主要结论有:

(1) 通过对我国 6 个典型垃圾填埋场渗滤液中常见组分的实测浓度数据的统计分析,并与我国饮用水卫生标准进行了比较,得到了以渗滤液中不同污染物组分为指示性污染物时,其典型的击穿标准值为  $C_N=0.1$ ,而极端情况下的击穿标准值为  $C_N=0.01$ 。

(2) 给出了在以有机物为击穿指标时垃圾填埋场 GMB+CCL 复合衬垫系统的 CCL 厚度在极端击穿标准和典型击穿标准下的简化计算公式。因此,在确定了垃圾填埋场中渗滤液有机污染物类型和浓度以及可能的渗滤液水头的情况下,可利用以上公式对填埋场复合衬垫所需的 CCL 的厚度进行简化计算。

(3) 参数阻滞因子  $R_d$  的取值对计算的结果有很大影响,因此在进行填埋场底部衬垫的初步设计中,需要根据不同的污染物种类以及 CCL 的相关性质,参考前人研究成果或进行相应的室内试验进行合理取值。

(4) 以杭州天子岭垃圾填埋场为例,利用简化计算方法对复合衬垫的厚度设计进行了验证。结果表明,若要保证渗滤液中的 Pb 击穿 GMB/CCL 复合衬垫的时间大于 50 a,则土工膜下覆的 CCL 的厚度至少需要 0.6 m;而要保证氯离子的击穿时间大于 50 a,则 CCL 的厚度至少需要 6.0 m。

## 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] 陈云敏, 谢海建, 张春华. 污染物击穿防污屏障与地下水土污染防控研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, **36**(1): 1 - 10. (CHEN Yun-min, XIE Hai-jian, ZHANG Chun-hua. Review on penetration of barriers by contaminants and technologies for groundwater and soil contamination control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2016, **36**(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [3] FOOSE G J, BENSON C H, EDIL T B. Comparison of solute transport in three composite liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(5): 391 - 403.
- [4] PARK M G, EDIL T B, BENSON C H. Modeling volatile organic compound transport in composite liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(6): 641 - 657.
- [5] EL-ZEIN A. A general approach to the modelling of contaminant transport through composite landfill liners with intact or leaking geomembranes[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, **32**(3): 265 - 287.
- [6] EL-ZEIN A, MCCARROLL I, TOUZE-FOLTZ N. Three-dimensional finite-element analyses of seepage and contaminant transport through composite geosynthetics clay liners with multiple defects[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **33**(4): 34 - 42.
- [7] El-Zein A, ROWE R K. Impact on groundwater of concurrent leakage and diffusion of dichloromethane through geomembranes in landfill liners[J]. Geosynthetics International, 2008, **15**(1): 55 - 71.
- [8] ZHANG H J, JENG D S, SEYMOUR B R, et al. Solute transport in partially-saturated deformable porous media: application to a landfill clay liner[J]. Advances in Water Resources, 2012, **40**(5): 1 - 10.
- [9] LIU T, HU L. Organic acid transport through a partially saturated liner system beneath a landfill [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(5): 428 - 436.
- [10] XIE H J, JIN A M, TANG X W. An analytical solution to organic contaminant diffusion through composite liners considering the effect of degradation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **36**(36): 10 - 18.
- [11] FOOSE G J, BENSON C H, EDIL T B. Predicting leakage through composite landfill liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(6): 510 - 520.
- [12] 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.
- [13] ROWE R K, DUQUENNOI C. Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems[J]. Geosynthetics International, 1999, **6**(6): 455 - 479.
- [14] 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.
- [15] CHEN Y M, WANG Y Z, XIE H J. Breakthrough time-based design of landfill composite liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(2): 196 - 206.
- [16] XIE H J, JIANG Y S, ZHANG C H, et al. Steady-state analytical models for performance assessment of landfill composite liners[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, **22**(16): 12198 - 214.
- [17] ROWE R K, NADARAJAH P. An analytical method for predicting the velocity field beneath landfills[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(2): 264 - 282.
- [18] CHEN Y M, XIE H J, HAN K, et al. An analytical solution for one-dimensional contaminant diffusion through multi-layered system and its applications[J]. Environmental Geology, 2009, **58**(5): 1083 - 1094.
- [19] 谢海建, 蒋元生, 杨文参, 等. 考虑降解时双层介质中有机污染物的一维扩散解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊1): 190 - 196. (XIE Hai-jian, JIANG Yuan-sheng, YANG When-can, et al. Analytical solutions for contaminant diffusion in two-layered porous media considering degradation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 190 - 196. (in Chinese))
- [20] SHU S, ZHU W, WANG S W, et al. Leachate breakthrough mechanism and key pollutant indicator of municipal solid waste landfill barrier systems: centrifuge and numerical modeling approach[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 1123 - 1131.
- [21] 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 Chun-hua. Mechanisms for Contaminant Transport in Landfill Composite Liners under Thermal Effect and its Optimization Design Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))

- [22] 朱伟, 舒实, 王升位, 等. 垃圾填埋场渗滤液击穿防渗系统的指示污染物研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 619 - 626. (ZHU Wei, SHU Shi, WANG Sheng-wei, et al. Investigation of indicating pollutant for landfill leachate breaking through anti-seepage system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 619 - 626. (in Chinese))
- [23] ROWE R K, SAHELI P T, RUTTER A. Partitioning and diffusion of PBDEs through an HDPE geomembrane[J]. Waste Management, 2016, **55**: 191 - 203.
- [24] 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, Industrial Fabrics Association International, 1998, St Paul: 27 - 102.
- [25] ROWE R K. Short- and long-term leakage through composite liners, the 7th Arthur Casagrande Lecture[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(2): 141 - 169.
- [26] ROWE R K. Short- and long-term leakage through composite liners[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(2): 141 - 169.
- [27] ROWE R K, YANG P, CHAPPEL M J, et al. Wrinkling of a geomembrane on a compacted clay liner on a slope[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS and AGSSEA, 2012, **43**(3): 11 - 18.
- [28] ROWE R K. Long-term performance of contaminant barrier systems[J]. Géotechnique, 2005, **55**(9): 631 - 678.
- [29] HAXO H E. Determining the Transport Through Geomembranes of Various Permeants in Different Applications [M]// Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, KOERNER R M, ed. Las Vegas: ASTM Special Publication, 1990: 75 - 94.
- [30] ROWE R K, HRAPOVIC L, KOSARIC N. Diffusion of chloride and dichloromethane through an HDPE geomembrane[J]. Geosynthetics International, 1995, **2**(3): 507 - 536.
- [31] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I, et al. Barrier Systems for Waste Disposal Facilities[M]. London: Spon Press, 2004.
- [32] 谢海建. 成层介质污染物的运移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (XIE Hai-jian. A Study on Contaminant Transport in Layered Media and the Performance of Landfill Liner Systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [33] STUERMER M M, BOSCOV M E G, OLIVEIRA E. Metal transport parameters of a gneiss saprolitic silty soil for liner design[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(4): 509 - 518.
- [34] 何晓晓. 江村沟垃圾渗滤液尾水的深度处理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (HE Xiao-xiao. Deep Research on the Tail Water of Leachate from Jiang Cungou MSW Landfill[D]. Xi'an: Chan'an University, 2013. (in Chinese))
- [35] 刘海龙, 何海杰, 兰吉武. 填埋场渗滤液水位对填埋气收集的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, **15**(5): 129 - 133. (LIU Hai-long, HE Hai-jie, LAN Ji-wu. Influences of leachate level on landfill gas collection[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, **15**(5): 129 - 133. (in Chinese))
- [36] 陈云敏, 刘晓成, 徐文杰, 等. 填埋生活垃圾稳定化特征与可开采性分析: 以中国第一代卫生填埋场为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(2): 199 - 211. (CHEN Yun-min, LIU Xiao-cheng, XU When-jie, et al. Analysis on stabilization characteristics and exploitability of landfilled municipal solid waste: case of a typical landfill in China[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, **49**(2): 199 - 211. (in Chinese))