

填埋场中水泥土屏障对金属离子的隔离效果

席永慧¹, 张广年¹, 吴晓峰¹, 解子军², 许丽萍²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 填埋法是处理城市固体垃圾最经济和有效的方法之一, 当采用水泥土墙作为垃圾填埋场的防渗帷幕时, 在设计中并未将污染物以扩散形式的迁移考虑进去。通过大型模型实验分析屏障厚度和水泥掺量对重金属离子的隔离效果的影响, 应用数值模拟方法对锌离子在水泥土中的扩散系数进行求解。实验结果表明, 随着水泥掺量和屏障厚度的增加, 水泥土屏障对金属离子的隔离效果会大幅提升。同时, 增加水泥掺量取得的隔离效果要优于增加屏障厚度。试验结果还表明金属锌离子在土中的扩散系数远远大于在水泥土的扩散系数。

关键词: 垃圾填埋场; 水泥土屏障; 重金属离子; 扩散; 水泥掺量

中图分类号: X53

文献标志码: A

Isolation Effect of Cement-soil Barrier Upon Heavy Metal in MSW Landfills

XI Yonghui¹, ZHANG Guangnian¹, WU Xiaofeng¹, XIE Zijun², XU Liping²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Geotechnical Investigation and Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Land filling is one of the most economical and efficient ways to treat municipal solid waste (MSW). When cement-soil barrier was used in landfills as vertical barrier curtains, diffusion of contaminant was not taken into consideration in design. Influence of barrier's thickness and cement content on isolation effect of heavy metal was analyzed through a large model test. Diffusion coefficient of Zn^{2+} in cement-soil was calculated with numerical simulation method. The results show that isolation effect will be enhanced greatly by increasing the cement content or the thickness of barrier. In fact, the barrier cement content affects the isolation more than the barrier thickness. The results also prove that the diffusion coefficient of Zn^{2+} in soil is far more than that in cement-soil.

Key words: landfill; cement-soil barrier; heavy metal ions; diffusion; cement content

随着城市化的迅速发展, 世界各国的城市垃圾以快于其经济增长近3倍的平均速度增长。目前, 我国城市垃圾以每年8%~9%的速度在增长, 城市人均年生活垃圾产生量约为450~500 kg^[1]。国内的生活垃圾处理大多数采取填埋的方法。在堆积过程中, 垃圾体由于各种物理化学作用, 会产生有毒有害的渗滤液, 如不采取有效的防渗措施, 渗滤液会随着地下水的渗流迁移, 造成填埋场周围生态的污染, 因此, 防渗系统是垃圾填埋场最重要的部分之一。垃圾填埋场的防渗系统一般包括场底防渗衬里系统和垂直防渗系统^[2-3]。常见的用于控制污染物迁移的垂直隔离措施有^[4]: 帷幕注浆、地下隔离墙、深层搅拌桩墙、钢板桩墙、高压喷射灌浆板墙等。国内垃圾填埋场大多采用设置防渗帷幕(墙)的方式, 垂直帷幕注浆防渗和深层搅拌桩由于在技术性与经济性上具有一定优势, 在填埋场工程中常作为首选方案, 水泥浆与土壤颗粒胶结形成的渗透系数较小的隔离帷幕可以截断污染物溶质迁移路径, 从而隔离污染物。国外也有采用泥浆墙(slurry wall)作为防渗墙^[5], 而这种墙体材料在国内应用较少。

当采用水泥土屏障作为防渗帷幕时, 在设计中只把防渗帷幕当作防渗屏, 其实污染物还可能通过扩散的形式迁移, 而现有的研究多集中于研究屏障的渗透性, 关于水泥土屏障的扩散方面的研究鲜有报道, 本文对于水泥土屏障扩散性质的研究将填补这一空白。通过现场试验测定迁移参数虽然很准确, 但很难控制试验条件, 实验周期长且会对环境造成污染。所以本文通过大型模型屏障试验来模拟实际填埋场中渗滤液的扩散, 所得结果对于水泥土屏障的设计与施工具有较好的借鉴意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 土样

取自上海市某工地(第③层土,淤泥质粉质黏土),风干后磨细过 2.5 mm 筛后储存待用。具体颗粒组成见表 1。

表 1 土样颗粒级配(质量分数)

Tab.1 Soil particle size distribution(mass fraction)

砂/%	粉粒/%			黏粒/%
0.250~0.075 mm	0.075~0.050 mm	0.050~0.010 mm	0.010~0.005 mm	<0.005 mm
5.9	8.5	65.3	4.1	16.2

1.1.2 水泥

实验采用海螺牌水泥,标号 425。

1.1.3 仪器设备

实验中使用的主要仪器设备有离心机(将取得的水样、泥浆样离心取得清样)和原子吸收分光光度计(测金属离子浓度)等。

1.1.4 污染物质

经过对上海地区大量的污染场地的取样调查,检测结果显示上海地区重金属污染较重的元素是镉、铅、铜、锌,故本实验选择其中的锌作为污染离子,使用氯化锌(分析纯,质量分数大于 98.0%)作为污染物进行实验。

1.2 屏障模型的实验装置

根据 1 维屏障迁移扩散理论,设计的实验模型如图 1 所示。该模型由 PVC 板加工而成,板厚 10 mm。模型的内部尺寸如图所示:长、宽、高分别为 1 200 mm,300 mm,300 mm。模型由两道水泥土屏障分成 3 个仓,中间仓作为污染源,其长度为 600 mm,远远大于屏障厚度;两边仓长度为 300 mm,装未受污染的土。

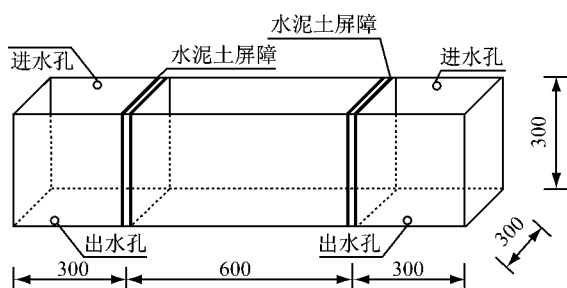


图 1 实验模型(单位:mm)

Fig.1 Device of tests(unit:mm)

1.3 实验方案设计

屏障的扩散系数主要取决于屏障本身的特性,本实验选取水泥掺量和屏障厚度作为 2 个影响因素,设计了 6 个屏障实验,实验方案如表 2。

表 2 实验方案

Tab.2 Experimental scheme

屏障编号	厚度/mm	水泥掺量/%
H10C9	10	9
H10C12	10	12
H10C15	10	15
H15C5	15	5
H20C5	20	5
H30C5	30	5

1.4 实验步骤

(1) 模型制作。由专业装潢公司按图 1 加工成 PVC 模型。

(2) 屏障制作。总共制作 3 个模型,共 6 个屏障,其屏障参数如表 1。制作屏障时,两侧用 PVC 板作为模板(见图 1)。将一定量的土和水泥混合均匀,加水成水泥浆后注入模板中。经过 14 d 养护成型,拆除需要装净土侧的模板,用不锈钢钢丝网作为屏障的临时支护。

(3) 夯土。先将土壤自然风干,然后过 2.5 mm 筛倒入模型两端的空仓中,分层压实,边压边加少量水以便压实。

(4) 土样饱和。土样夯实后,为了模拟自然固结过程,开始 2 d 先加 30% 的水,以后每天加入少量的水,持续 45 d 后,打开出水孔处的水龙头排出土中的水和气。排水固结的过程持续 14 d 后,关闭水龙头,再加水至饱和。

(5) 加入污染源溶液。土样饱和和工作结束后先拆除中间仓两边的模板。然后将配制好的 ZnCl_2 溶液加入中间仓,锌离子浓度控制在 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。经实际测定,在各个模型中锌离子浓度均为 $0.29 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(6) 钻孔。在溶液加入 30 d 后,在两边仓饱和土中钻孔,以便以后取样用。取样孔布置见图 2。H15C5 共 4 排取样孔,与屏障的距离分别为 2,6,9,12 cm。其余均只有第 1 排取样孔,与屏障距离为 2

cm.

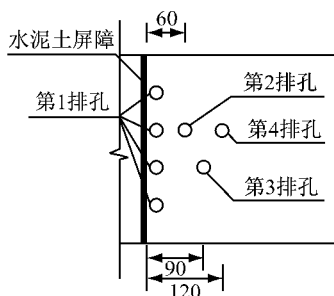


图2 取样孔位置(单位:mm)

Fig.2 Locations of sampling apertures(unit:mm)

(7) 取样. 本实验共进行3次取样,分别在实验进行到4个月、6个月、12个月时,从孔中取得水样或泥浆样.

(8) 浓度测定. 将取得的水样(或泥浆样)进行离心以获得清液,接着将清液稀释,最后利用原子吸收分光光度法测清样中的锌离子浓度.

2 结果与分析

实验进行到4个月及6个月时的两次取样结果,锌离子的质量浓度如表3所示.

表3 锌离子的质量浓度

Tab.3 Concentration of Zn^{2+} $g \cdot L^{-1}$

取样编号	质量浓度		取样编号	质量浓度	
	第1次	第2次		第1次	第2次
H10C9-1	0.25	2.32	H15C5-3	0.07	1.93
H10C12-1	0	0.12	H15C5-4	0.06	0.60
H10C15-1	0	0	H20C5-1	0.95	1.34
H15C5-1	2.26	4.88	H30C5-1	0.05	0.15
H15C5-2	0.10	4.39			

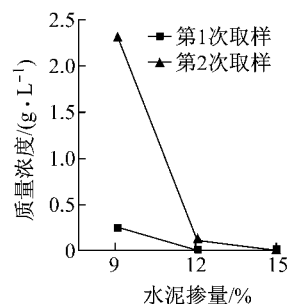
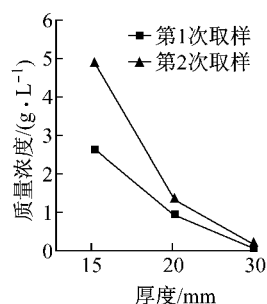
注:编号最后1位数字代表取样孔为第几排.

2.1 屏障厚度、水泥掺量对隔离效果的影响

图3是厚度同为10 mm,水泥掺量不同的屏障的第1排取样孔中两次取样浓度比较结果.两次取样的浓度曲线表明,随着水泥掺量的增大,屏障的隔离效果会大幅提升,净土中受污染的程度大幅降低.以第2次取样为例,当水泥掺量为9%时,孔中锌离子质量浓度高达 $2.32 g \cdot L^{-1}$;当水泥掺量增至12%时,孔中质量浓度降为 $0.12 mg \cdot L^{-1}$;水泥掺量为15%时,基本已经检测不到锌离子.

图4是水泥掺量同为5%,厚度不同的屏障的第1排取样孔中得到的两次取样浓度比较结果.从中可以看出一个趋势:随着厚度的增大,取样孔中浓度降低,说明隔离效果随之提高.以第1次取样为例,当

厚度为15 mm时,孔中质量浓度高达 $2.62 g \cdot L^{-1}$;当厚度增至20 mm时,孔中质量浓度降为 $0.95 mg \cdot L^{-1}$;当厚度达到30 mm时,质量浓度为 $0.05 mg \cdot L^{-1}$.

图3 孔中锌离子质量浓度与水泥掺量的关系
(屏障厚度为10 mm)Fig.3 Variation of concentration with cement content
(thickness of barrier is 10 mm)图4 孔中锌离子质量浓度与屏障厚度的关系
(水泥掺量为5%)Fig.4 Variation of concentration with thickness
(cement content is 5%)

随着屏障厚度的增加或者水泥掺量的提高,屏障的隔离效果都会有显著提升,但是对比图3与图4,前者的提升效果不如后者. H10C15和H30C5使用的水泥总量相同,对比表3中两者的第1排孔锌离子取样浓度,可以看出两者隔离效果悬殊,前者几乎阻绝了锌离子的扩散.可以推测,在本实验涉及的水泥掺量范围内(5%~30%),若是水泥总量相同,增加水泥土墙的厚度不如增加水泥掺量,后者的隔离效果更好.

2.2 水泥土屏障扩散系数的求解及分析

2.2.1 1维平流—弥散迁移方程及边界条件

污染物离子在多孔介质中迁移通常有以下4种形式^[6]:① 污染物离子随着孔隙水的流动而被输送,称为平流;② 由不同水流速度导致高浓度区的几何扩散,称为弥散;③ 由布朗运动导致均匀化,污染物离子从高浓度区向低浓度区迁移,称为扩散;④

水中溶解物质通过多孔介质时,减速、滞留等吸附作用,如分子渗滤及离子交换,由于化学反应与蜕变过程,溶解在水中的物质会被稀释。

1989 年欧洲六国(法国、瑞士、德国、意大利、荷兰、英国)组成的第八欧洲技术委员会所编订的《废弃物填埋场设计》中,提出的迁移模型表达式为

$$\frac{\partial(\theta Rc)}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[(\theta D \gamma + \alpha |v|) \frac{\partial c}{\partial x} \right]}_1 - \underbrace{vc}_3 - \underbrace{\mu \theta c}_4 \quad (1)$$

式中:1 为扩散;2 为弥散;3 为渗流;4 为蜕变; c 为水中溶解物质的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-3}$; D 为扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; R 为阻滞系数; v 为单位时间内沿 x 方向的渗流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为蜕变系数; θ 为体积含水量, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; t 为时间, s ; x 为沿运移方向距离, m ; α 为弥散距离, m ; γ 为阻抗因数。

假定:① 屏障多孔介质系统是均质的、半无限的;② 土壤是饱和的,地下水在土壤中的流动符合达西定律;③ 溶质沿一个方向迁移;④ 不考虑污染物的蜕变和吸附;⑤ 弥散项与扩散项合并为 1 项。则 1 维平流—弥散迁移方程为

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

式中: R_f 为延迟因数; v 为单位时间内沿 x 方向的渗流速度; D 为溶质在土壤中包括弥散项与扩散项的扩散系数。

本模型试验中,迁移方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1^* \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2}, & 0 < x < h \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} = D_2^* \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}, & h < x < H \end{cases} \quad (3)$$

初始条件为

$$t = 0: c(x, t) = 0 \quad (4)$$

边界条件如下:

(1) 在左边界,假设浓度恒定

$$x = 0: c(x, t) = c_0 \quad (5)$$

(2) 在右边界,假设浓度恒定

$$x = H: c(x, t) = 0 \quad (6)$$

(3) 在土与水泥土的交接面,保持浓度连续和通量连续

$$x = h: c_1(x, t) = c_2(x, t) \quad (7)$$

$$x = h: n_1 D_1^* \frac{\partial c}{\partial x} = n_2 D_2^* \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8)$$

式中: c_1, c_2 分别为在水泥土和土中的浓度; h 为水泥土屏障厚度; H 为水泥土屏障厚度加上土的厚度; c_0 为初始浓度; n_1, n_2 分别为水泥土和土的空隙率; D_1^*, D_2^* 分别为锌离子在水泥土和土中的有效扩散

系数(等于扩散系数与延迟因子的比值)。

2.2.2 锌离子通过水泥土屏障的扩散系数求解

图 5 是在水泥掺量为 5%,水泥土屏障墙厚度为 15 mm 时,与水泥土墙距离不同的 4 排取样孔中锌离子 2 次取样浓度的比较结果。在第 1 次取样时,第 1 排孔中浓度比其他孔高出许多倍,而在第 2 次取样时,第 2, 3, 4 排取样浓度已明显高于第 1 次取样浓度。

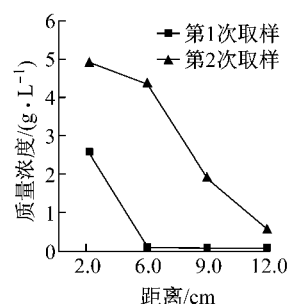


图 5 孔中锌离子质量浓度与取样孔到屏障距离的关系 (模型 H15C5)

Fig.5 Variation of Zn^{2+} concentration with the distance between sampling aperture and barrier (Model H15C5)

为了更好地求得锌离子在水泥土中的扩散系数,在实验进行到 12 个月时对 H20C5 模型进行了第 3 次取样,第 1 排孔中锌离子质量浓度为 $2.44 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于扩散方程和边界条件的复杂性,通过解析解求得锌离子在水泥土屏障中的扩散系数十分困难,本文采用有限差分数值方法,运用 Matlab 软件,依据公式(3)—(8)编制程序对实验进行模拟。模拟过程中,锌离子在土中的有效扩散系数(D_2^*)取为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [7-8],分别对模型 H20C5 和 H15C5 进行拟合,模型 H20C5 中锌离子浓度拟合时考虑对于时间 t 的变化,模型 H15C5 中锌离子浓度拟合时考虑对于距离 x 的变化(采用表 3 中第 2 次取样的数据),结果分别见图 6 和图 7。求得的锌离子在水泥掺量为 5% 的水泥土屏障中的有效扩散系数 $D^* (D/R_f)$ 分别为 $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $3.8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。两组模型求得的锌离子在水泥土中的有效扩散系数的结果还是比较接近,这说明本文的试验方法及计算方法均是可行的,计算结果是可信的。

现有研究表明[7-8],锌离子在天然土中的有效扩散系数在 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。与本实验结果对比可知,锌离子在土中的有效扩散系数远远大于在水泥土中的,这可解释图 5 的结果。这个结果说明,在实际工程中,一旦水泥土墙失效,其污染的危

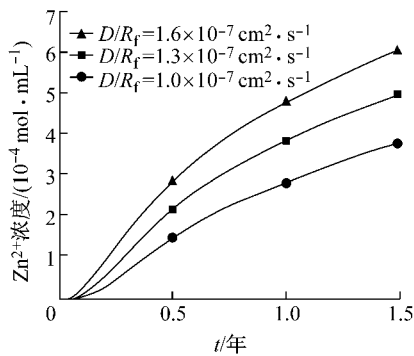


图6 锌离子在水泥土中的有效扩散系数拟合
(模型 H20C5)

Fig.6 Evaluation of Zn^{2+} diffusion the coefficient
in cement-soil (Model H20C5)

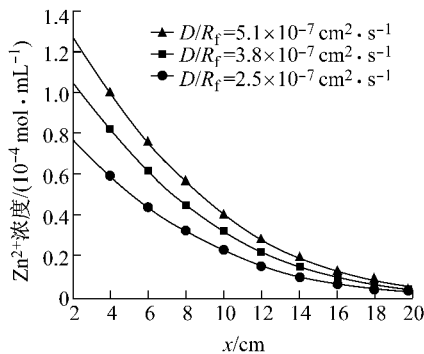


图7 锌离子在水泥土中的有效扩散系数拟合
(模型 H15C5)

Fig.7 Evaluation of Zn^{2+} diffusion the coefficient
in cement-soil (Model H15C5)

害将大大增加,这也就要求对于水泥土墙的施工质量要严格把关,保证其在使用年限内不会出现裂缝等质量问题。

3 结论

(1) 在水泥掺量介于5%~30%之间时,随着水泥掺量和屏障厚度的增加,水泥土屏障对金属离子的隔离效果会大幅提升。

(2) 在水泥掺量介于5%~30%之间,且不存在渗流的情况下,增加水泥掺量取得的隔离效果要优于增加屏障厚度。因而在实际中,若是水泥使用总量

相同,应该倾向于增加水泥掺量,而不是增加水泥土墙厚度。

(3) 锌离子在水泥土(水泥掺量为5%)中的有效扩散系数约为 $1 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 锌离子在土中的有效扩散系数比在水泥土中的大得多,所以一旦水泥土屏障失效,对周围的污染危害将大大增加。因此当水泥土屏障墙应用于填埋场时,施工质量要严格控制,以保证其在使用年限内不会出现裂缝等质量问题。

参考文献:

- [1] 纪涛. 城市生活垃圾堆肥处理现状及应用前景[J]. 天津科技, 2008, 35(5): 46.
JI Tao. Application and outlook of municipal domestic refuse composting[J]. Tianjin Technology, 2008, 35(5): 46.
- [2] 赵由才, 龙燕, 张华. 生活垃圾卫生填埋技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
ZHAO Youcai, LONG Yan, ZHANG Hua. Sanitary landfill technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 张云, 王秀艳, 刘长礼. 垃圾填埋场砂土衬垫中膨润土添加剂的防渗能力[J]. 地球学报, 2000, 21(1): 98.
ZHANG Yun, WANG Xiuyan, LIU Changli. Penetration-preventing capacity of landfill site liner of sandy soils and bentonite[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2000, 21(1): 98.
- [4] 徐超, 黄亮, 邢皓枫, 等. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 422.
XU Chao, HUANG Liang, XING Haofeng, et al. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall[J]. Rock And Soil Mechanics, 2010, 31(2): 422.
- [5] Kurzydlo A S, Mohammadi J. Modeling long-term reliability of vertical barriers [C]//Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management—Proceedings of the ICVRAM 2011 and ISUMA 2011 Conferences, Hyattsville: ASCE, 2011: 930-937.
- [6] 俞调梅. 废弃物填埋场设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
YU Tiaomei. Waste landfill design [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.
- [7] 席永慧. 镍和锌离子在饱和的粉煤灰-粘土介质中扩散系数的测定[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1520.
XI Yonghui. Determination of diffusion coefficients of Zn^{2+} and Ni^{2+} in saturated fly ash-clay medium[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1520.
- [8] Do N Y, Lee S P. Temperature effect on migration of Zn and Cd through natural clay [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 118(1/3): 267.