

垃圾填埋场中水泥土屏障对 Cu^{2+} 的阻滞性能

席永慧, 杨帆, 蔡策毅

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 通过室内模型试验,研究了不同水泥掺量的水泥土防渗屏障和上海老港填埋场的膨润土-砂-水泥(塑性混凝土)防渗屏障对 Cu^{2+} 的阻滞效果,并应用数值模拟的方法对 Cu^{2+} 在防渗屏障中的有效扩散系数进行求解. 研究结果表明,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阻滞效果会逐步提升; Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数($1 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)是在土中的有效扩散系数($9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)的 $1/35 \sim 1/100$;上海老港填埋场中的塑性混凝土防渗屏障对 Cu^{2+} 有较好的阻滞效果.

关键词: 垃圾填埋场; 防渗屏障; 阻滞性能; Cu^{2+} 的有效扩散系数

中图分类号: TU411.4; X53

文献标志码: A

Blocking Performance of Cement-Soil Barrier upon Cu^{2+} in Municipal Solid Waste Landfills

XI Yonghui, YANG Fan, CAI Ceyi

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the effects of cement-soil barrier with different cement content and bentonite-sand-cement (plastic concrete) barrier used in Shanghai Laogang landfill are studied through the laboratory model test. The effective diffusion coefficients of copper ions in the impervious barrier are solved by using numerical simulation method. The experimental results showed that with the increase of cement content and barrier thickness, the blocking effect of the cement-soil barrier on metal ions will be increased gradually. The effective diffusion coefficient ($1 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) of copper ions in cement soil is $1/25 \sim 1/100$ of the effective diffusion coefficient in soil ($9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). The plastic concrete impervious barrier used in Shanghai Laogang landfill has good blocking effect on copper ions.

Key words: landfill; barrier; blocking performance; diffusion coefficient of Cu^{2+}

填埋是生活垃圾处理的主要方式之一,国家统计局最新数据显示,2015 年全国生活垃圾产生量达到 19 141.9 万 t,其中垃圾填埋量达 11 483.1 万 t,占比达 60%^[1]. 为了避免填埋场中的渗滤液渗出污染周边环境,在填埋场地应用污染物防渗屏障技术,减少因渗滤液迁移造成的危害. 渗滤液中含有多种无机物离子和有机物质还可能通过扩散的形式迁移,击穿防渗屏障后污染周边环境^[2].

土-膨润土屏障在国外用得较为普遍,目前国内大多采用塑性混凝土作为防渗屏障材料^[3],也有采用水泥搅拌桩墙、注浆帷幕作为竖向屏障. 众多学者研究了 Cl^- 、 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cr^{3+} 等离子在膨润土、黏土-膨润土的扩散性能^[4-7],表明了膨润土类屏障对无机离子有较好的阻滞效果. 朱伟等^[8]对上海等 6 个城市的垃圾填埋场渗滤液进行了采样分析,结果显示上海、杭州、深圳等地的渗滤液中重金属含量从高到低依次为锌、铜、铬、砷. 这些重金属离子可通过扩散的形式污染周围环境,危害人体健康. 席永慧等^[9]研究了 Zn^{2+} 在水泥土防渗屏障中的扩散性能,针对 Cu^{2+} 的研究目前还只集中在 Cu^{2+} 在砂土中的扩散性能和防渗屏障对 Cu^{2+} 阻滞效果的数值模拟^[10-13]. 但水泥土和塑性混凝土屏障的阻滞性能和对 Cu^{2+} 阻滞性能的试验研究仍鲜有报道.

为了更好地了解水泥土屏障对重金属离子阻滞性能,本文通过大型模型试验来模拟实际填埋场中渗滤液的扩散,研究了水泥土屏障和上海老港填埋场中实际应用的塑性混凝土防渗屏障对 Cu^{2+} 的阻滞性能,并通过数值模拟分析求得 Cu^{2+} 在水泥土和膨润土-砂-水泥(塑性混凝土)介质中的有效扩散系

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 上海市科学技术委员会重大项目(13231202300); 中央高校基本科研业务费专项资金(KX0021020172725)

第一作者: 席永慧(1965-),女,工学博士,副教授,主要研究方向为环境岩土工程. E-mail:xiyonghui@tongji.edu.cn

数,填补了国内外对 Cu^{2+} 在水泥土和塑性混凝土屏障中扩散性能研究的空白。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 土样

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)

大小/mm	颗粒				
	粘粒	粉粒		砂	
	<0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.075	0.075~0.25
占比/%	16.2	4.1	65.3	8.5	5.9

1.1.2 水泥和膨润土

水泥采用海螺牌水泥,标号 425;

膨润土采用高庙子膨润土 GMZ001。高庙子膨润土,产自中国内蒙古境内。矿物成分:蒙脱石,75.4%;石英,11.7%;方石英,7.3%;长石,4.3%;高岭石,0.8%;方解石,0.5%。

1.1.3 仪器设备

试验中主要用到的仪器及具体型号见表 2。

表 2 试验主要仪器设备

序号	名称	型号	生产厂商
1	离心机	H1650 高速台式离心机	长沙湘仪离心机仪器有限公司
2	电热烘箱	101AS-2 型	上海浦东荣丰科学仪器有限公司
3	超声波震荡仪	B2200ST 型	BRANSON 超声上海有限公司
4	原子吸收分光光度计	3510 型原子吸收光谱仪	安捷伦科技上海有限公司

其他设备:烧杯、玻璃棒、容量瓶、各类玻璃器皿、一次性针筒、钻头等

表 3 试验方案

Tab.3 Experimental scheme

厚度/mm	屏障编号							
	H10C5	H10C9	H10C12	H15C15	H15C5	H10L	H15L	H10L
厚度/mm	10	10	10	15	15	10	15	10
配方	水泥含量 5%	水泥含量 9%	水泥含量 12%	水泥含量 15%	水泥含量 5%	老港配方	老港配方	老港配方

1.4 试验步骤

①模型的制作。按图 1 加工 PVC 模型;②材料的准备。胶水、自然风干的土样、水泥;③屏障的预制。按照表 3 将土和水泥混合均匀,在模板中养护成

1.1.4 污染物质

本试验选择 Cu^{2+} 作为污染离子,使用氯化铜(分析纯,含量大于 98.0%)作为污染物进行试验。

1.2 屏障模型的试验装置

根据一维扩散理论,设计试验模型如图 1 所示。此模型由聚氯乙烯(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 600、200、300 mm。模型内腔分为三部分,由左右各三分之一处设置水泥土屏障分隔开来,中间仓放置污染液体,其长度为 200 mm,远远大于屏障厚度;两边仓长度为 200 mm,在其中填装未受污染的净土。在距离箱体两端 200 mm 处,各设置了孔隙率达到 50% 以上的由 PVC 板加工而成的挡板,此挡板目的在于加强箱体的侧向稳定性。

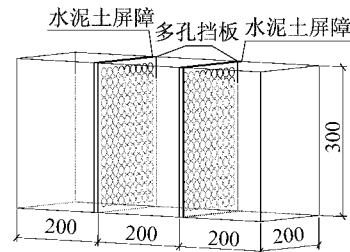


图 1 试验模型(单位:mm)

Fig.1 Device of test (unit: mm)

1.3 试验方案设计

本试验选取屏障材料中水泥掺量和屏障厚度作为两个影响因素,并考虑到试验过程中屏障过薄可能会提前破坏和屏障过厚可能导致金属离子无法在试验期间击穿防渗屏障,设计了水泥掺量 5%~15%、厚度为 10 和 15 mm 的 5 组屏障试验,另外依据上海老港填埋场实际防渗屏障配方设计了 3 组屏障试验,试验方案见表 3。表中,H 代表厚度;C 代表水泥掺量;L 为老港配方,膨润土:水泥:砂(质量比)为 2.57:1:1.2。

型;④屏障的放置。将制作好的屏障放置在净土侧,并用胶水固定在 PVC 板上;⑤土样的夯实。将土样倒入模型两端空仓中,分层夯实;⑥土样的饱和。土样夯实后,为模拟自然固结过程,每天向土样中加入

适量水,直至土样饱和;⑦钻孔.待两边仓土样饱和后,按图 2 所示位置钻孔,以便以后取样;⑧污染源溶液的加入.待两侧净土固结完成后,配置浓度为 0.3 mol · L⁻¹ 的 CuCl₂ 溶液,将其加入中间仓.⑨取样.每隔三个月从预先钻好的孔中(图 2)取得水样;⑩浓度的测定.将取得的水样(或泥浆样)在离心机上离心,取其清液进行稀释,然后利用原子发射光谱仪测(ICP)清样中的 Cu²⁺ 浓度.每个样品平行测定三次然后取其平均值.

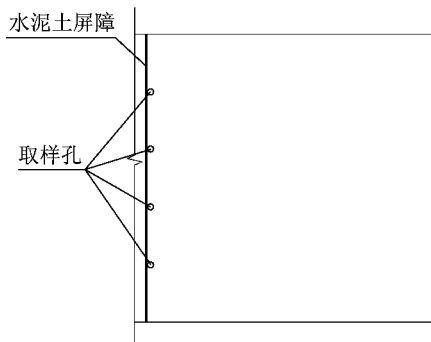


图 2 取样孔位置

Fig.2 Location of sampling apertures

2 结果与分析

Cu²⁺ 在防渗屏障中的扩散模型试验过程,共进行了 3 次取样,3 次取样的 Cu²⁺ 质量浓度结果见表 4.表中,污染源浓度为 0.3 mol · L⁻¹.

表 4 Cu²⁺ 的质量浓度

Tab.4 Concentration of Cu²⁺

编号	第一次取样 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	第二次取样 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	第三次取样 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)
H10C5	98.34	465.10	693.00
H10C9	57.50	309.90	452.70
H10C12	29.50	195.60	409.50
H15C15	12.40	60.80	81.59
H15C5	7.31	44.50	158.90
H10L	123.10	435.80	710.00
H10L	175.68	336.70	582.60
H15L	86.01	147.10	295.30

2.1 水泥掺量、屏障厚度对阻滞效果的影响

图 3 是厚度为 10 mm,水泥掺量分别为 5%、9%、12%的屏障三次取样浓度比较结果.三次取样的浓度曲线表明,随着水泥掺量的增大,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度大幅减少,说明屏障的阻滞效果大幅提升,净土中受污染程度大幅降低.以第一次取样为例,当水泥掺量为 5%,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度为

98.34 mg · L⁻¹;当水泥掺量增加至 12%时,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度为 29.5 mg · L⁻¹.由此可见水泥掺量增加 2.4 倍,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度降低了约 3.3 倍.

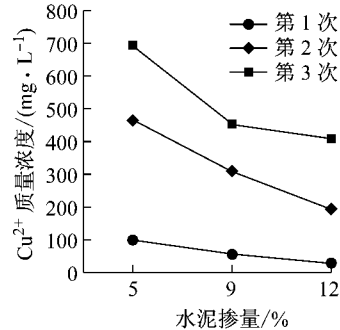


图 3 孔中 Cu²⁺ 质量浓度与水泥掺量的关系 (屏障厚度为 10 mm)

Fig.3 Relationship between concentration of Cu²⁺ and cement content (thickness is 10 mm)

图 4 是水泥掺量同为 5%,厚度不同的屏障的两次取样质量浓度的比较结果.可以看出,随着厚度增加,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度降低,说明阻滞效果随之提高.以第三次取样结果为例,当厚度为 10 mm 时,取样孔中质量浓度高达 693.00 mg · L⁻¹;当厚度增至 15 mm 时取样孔中质量浓度降为 158.90 mg · L⁻¹.由此可见厚度增加 1.5 倍,取样孔中 Cu²⁺ 质量浓度降低了约 4.4 倍.对比增加水泥掺量和屏障厚度对屏障阻滞效果的影响,可以看出此结果与乔兵等^[7]所得试验结果较为相符,铜固化淤泥孔隙直径以 0.1~1 μm 为主,增加水泥掺量不能有效降低其孔径大小,所以水泥土中盲目增加水泥掺量并不能够使水泥土屏障的阻滞效果达到质的提升,反而会降低其经济性.

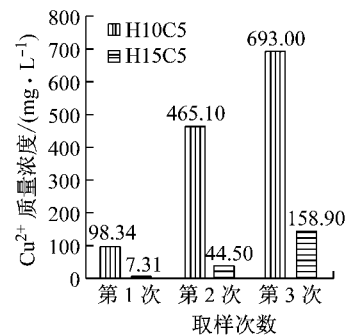


图 4 孔中 Cu²⁺ 质量浓度与屏障厚度关系 (水泥掺量为 5%)

Fig.4 Relationship between concentration of Cu²⁺ and cement thickness of barrier (cement content is 5%)

2.2 Cu²⁺ 在水泥土中的有效扩散系数求解及分析

2.2.1 一维对流-弥散迁移方程及边界条件

土中的迁移受各种物理、化学和生物反应的作用,是一个复杂的过程,包括对流、弥散、扩散、吸附、溶解、沉淀、水化等。通常污染物在土中的迁移机理主要包括对流运移、分子扩散、机械弥散、吸附作用等^[14]。

在填埋场中,污染物在填埋场衬垫中的迁移可用一维对流-弥散模型来描述对流、弥散与吸附等作用对渗滤液中污染物在屏障中迁移的影响。污染物在多孔介质中的对流-弥散方程为^[15]

$$\frac{\partial(\theta R c)}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[\underbrace{(\theta D \gamma + \alpha |v|)}_1 \frac{\partial c}{\partial x} \right]}_2 - \underbrace{v c}_3 - \underbrace{\mu \theta c}_4 \quad (1)$$

式中:1 表示扩散;2 表示弥散;3 表示对流;4 表示蜕变; 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,吸附是线性的;⑤弥散项与扩散项合并为一项。

则方程(1)可简化为

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

式中: R_f 为阻滞因子,且 $R_f = 1 + (\rho_b k_d / n)$;其中 ρ_b 为土体的干密度, k_d 为分配系数,指吸附达到平衡时被固相吸附的污染物浓度与液相浓度的比值,在吸附过程中, $k_d > 0$; n 为总的孔隙率。

不考虑污染物溶质的渗流($v=0$),则方程(2)又可进一步简化为

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范(CJJ176—2012)》^[16]中提到在重金属离子污染的土体中,阻滞因子可取 3~40,计算时,为保守起见,本文取阻滞因子 R_f 为 3,则方程(3)又进一步写成式(4)如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \\ D_e = \frac{D}{3} \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_e 为有效扩散系数(等于扩散系数与阻滞因子的比值)。

则根据式(4),迁移方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial c_1}{\partial t} = D_{e1} \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2}, & 0 < x < h \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} = D_{e2} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}, & h < x < H \end{cases} \quad (5)$$

初始条件为

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

边界条件如下:

(1)在左边界,假设浓度恒定:

$$c(x, t) = c_0, x = 0 \quad (7)$$

(2)在右边界,假设浓度恒定:

$$c(x, t) = 0, x = H \quad (8)$$

(3)在土与水泥土的交接面,保持浓度连续和通量连续:

$$c_1(x, t) = c_2(x, t), x = h \quad (9)$$

$$n_1 D_{e1} \frac{\partial c}{\partial x} = n_2 D_{e2} \frac{\partial c}{\partial x}, x = h \quad (10)$$

式(5)~(10)中: c_1 、 c_2 分别为离子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_{e1} 、 D_{e2} 分别为 Cu^{2+} 在水泥土和土中的有效扩散系数。

2.2.2 Cu²⁺ 的有效扩散系数求解

本文采用有限差分数值方法,运用 Matlab 软件,依据式(5)~(10)编制程序对试验数据进行模拟。席永慧等^[17]研究得到 Cu^{2+} 在土中的有效扩散系数为 $9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,模拟时, Cu^{2+} 在土中的有效扩散系数(D_{e2})取为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。模型 H10C5、H15C5 中 Cu^{2+} 浓度和时间 t 的关系分别见图 5 和图 6,对其拟合求得 Cu^{2+} 在水泥掺量为 5% 的水泥土屏障中的有效扩散系数 D_e 分别为 2.5×10^{-7} 、 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。两组模型求得的 Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数的结果接近,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。

本实验求得的 Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数与 Cu^{2+} 在一般黏土中的有效扩散系数值($9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)对比可知, Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数远远小于在土中的,约只有土中的 $1/35 \sim 1/100$ 。这个结果说明,水泥土防渗屏障对 Cu^{2+} 的阻滞效果远远好于一般的土屏障。Li 等^[18]研究了金属离子在页岩黏土混合物防渗屏障中的有效扩散系数,测得金属离子的有效扩散系数

约为 $1.816 \times 10^{-6} \sim 1.418 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。比较可以看出金属离子在水泥土屏障中的有效扩散系数 ($1 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 约为在页岩黏土屏障中的有效扩散系数的 $1/10 \sim 1/140$, 说明水泥土屏障对金属离子的阻滞效果明显好于黏土。

上海老港填埋场模型 H15L 中 Cu^{2+} 浓度和时间的关系见图 7, 对其拟合求得的 Cu^{2+} 的有效扩散系数约为 $4.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 比在水泥掺量为 5% 的水泥土中的有效扩散系数大约两倍以上, 证明上海老港填埋场的塑性混凝土防渗屏障对 Cu^{2+} 的阻

滞性能略差于水泥土屏障。 Cu^{2+} 在塑性混凝土防渗屏障中的有效扩散系数与 Cu^{2+} 在一般黏土中的有效扩散系数值 ($9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 对比可知, Cu^{2+} 在塑性混凝土防渗屏障中的有效扩散系数远远小于在土中的, 约只有土中的 $1/21 \sim 1/25$, 同时通过数值计算, Cu^{2+} 击穿上海老港填埋场的塑性混凝土屏障的时间约为 53 年^[19], 可见老港填埋场的防渗屏障对 Cu^{2+} 的阻滞性能也较好, 在屏障不出现质量问题的情况下可保证 Cu^{2+} 不对周边环境产生影响。

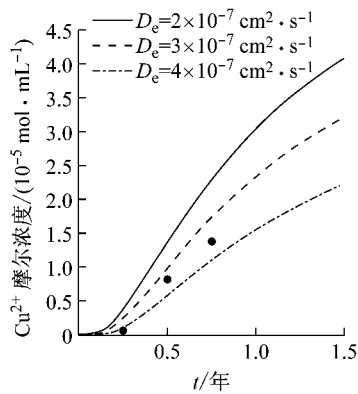


图 5 Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数拟合(模型 H10C5)
Fig.5 Fitting of Cu^{2+} diffusion the coefficient in cement-soil (model H10C5)

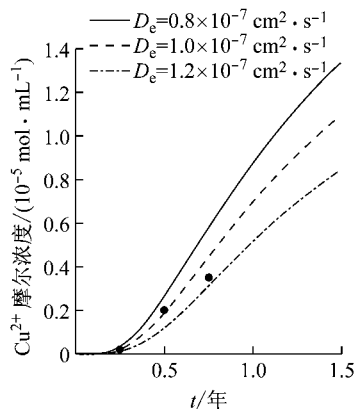


图 6 Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数拟合(模型 H15C5)
Fig.6 Fitting of Cu^{2+} diffusion the coefficient in cement-soil (model H15C5)

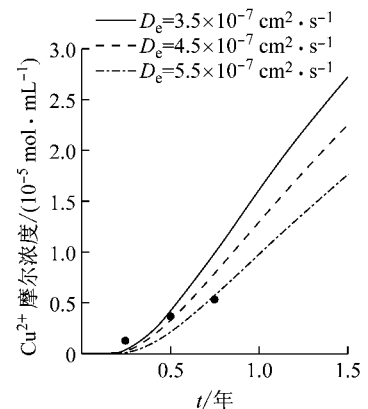


图 7 Cu^{2+} 在水泥土中的有效扩散系数拟合(模型 H15L)
Fig.7 Fitting of Cu^{2+} diffusion the coefficient in cement-soil (model H15L)

3 结论

(1) 在水泥掺量介于 5%~15% 之间时, 随着水泥掺量和屏障厚度增加, 水泥土屏障对金属离子的阻滞效果会大幅提升, 但盲目提升水泥掺量不会对屏障的阻滞效果有质的提升, 需综合考虑经济效益。

(2) Cu^{2+} 在水泥土(水泥掺量为 5%) 中的有效扩散系数约为 $1 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 说明水泥土屏障对 Cu^{2+} 的阻滞性能较好。但有研究表明垃圾填埋场渗滤液中有机污染物(COD)最先击穿填埋场防渗系统^[16], 今后还需进一步研究水泥土屏障对 COD 的阻滞性能, 由此来综合判断水泥土屏障的阻滞性能。

(3) 铜离子在土中的有效扩散系数 ($9.53 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 比在水泥土 ($1 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 中的大 35 倍以上, 说明一旦水泥土屏障失效, 离子进入周围土体中, 对周围的污染

危害将大大增加。

(4) 铜离子在上海老港填埋场塑性混凝土防渗屏障中的有效扩散系数约为 $4.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 约为在土中的有效扩散系数的 $1/21 \sim 1/25$, 表明老港填埋场的塑性混凝土防渗屏障对铜离子有较好的阻滞性能, 在正常使用情况下可保证铜离子不对周边环境产生影响。

参考文献:

- [1] 中国统计年鉴 2016[M]. 北京, 中国统计出版社, 2016.
China statistical yearbook 2016[M]. Beijing, China Statistics Press, 2016.
- [2] 张鸿郭, 陈迪云, 罗定贵, 等. 垃圾填埋场渗滤液中有机与重金属污染物特征的研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2009, 27(1): 86.
ZHANG Hongguo, CHEN Diyun, LUO Dinggui, et al. Research on character of organic matters and heavy metals in the landfill leachate[J]. Journal of Shanxi University of Science & Technology (Natural Science), 2009, 27(1): 86.
- [3] 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.
CHEN Yunmin, XIE Haijian, ZHANG Chunhua. Review on penetration of barriers by contaminants and technologies for groundwater and soil contamination control[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 1.
- [4] WU Tao, LI Jinying, DAI Wei, *et al.* Effect of dry density on ^{125}I diffusion in GMZ bentonite[J]. *Science China(Chemistry)*, 2012, 55(9): 1760.
- [5] LÜ Shuqing, ZHAO Yongsheng. The effect of metal ions with different valences on the retardation of soil-bentonite barrier materials and its mechanism[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, 24(12): 1075.
- [6] 张文杰, 顾晨, 楼晓红. 低固结压力下土-膨润土防渗墙填料渗透和扩散系数测试[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1915.
ZHANG Wenjie, GU Chen, LOU Xiaohong. Measurement of hydraulic conductivity and diffusion coefficient of soil-bentonite cutoff wall backfill under low consolidation pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1915
- [7] 乔兵, 赵仲辉, 王苏娜, 等. 水泥固化淤泥中重金属扩散的试验研究[J]. 河南科学, 2017, 35(3): 452.
QIAO Bing, ZHAO Zhonghui, WANG Suna, *et al.* Laboratory study on diffusion of heavy metals in cement-treated dredged Material[J]. *Henan Science*, 2017, 35(3): 452.
- [8] 朱伟, 舒实, 王升位, 等. 垃圾填埋场渗沥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.
ZHU Wei, SHU Shi, WANG Shengwei, *et al.* Investigation of indicating pollutant for landfill leachate breaking through anti-seepage system [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 619.
- [9] 席永慧, 张广年, 吴晓峰, 等. 填埋场中水泥土屏障对金属离子的隔离效果[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1067.
XI Yonghui, ZHANG Guangnian, WU Xiaofeng, *et al.* Isolation effect of cement-soil barrier upon heavy metal in MSW landfill[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(7): 1067.
- [10] 席永慧, 任杰, 胡中雄. 污染物离子在粘土介质中扩散系数的测定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003(5): 595.
XI Yonghui, REN Jie, HU Zhongxiong. Determination of diffusion coefficients of contaminant ions in clay soil [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003(5): 595.
- [11] 张建红, 吕禾, 王文成. 铜离子在非饱和土中迁移的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1885.
ZHANG Jianhong, LÜ He, WANG Wencheng. Centrifuge modeling of copper ionic migration in unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1885.
- [12] 周炼, 安达, 杨延梅, 等. 危险废物填埋场复合衬层渗漏分析与污染物运移预测[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2210.
ZHOU Lian, AN Da, YANG Yanmei, *et al.* Predicting leakage and contaminant transport through composite liners in hazardous waste landfill[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2210.
- [13] ZHANG Zhengying, WU Dazhi, CAI Qimao. Study on the diffusion properties of heavy metal copper Ion in sandy soil in hangzhou, China [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610-613: 804.
- [14] MATHUR S, JAYAWARDENA L P. Thickness of compacted natural clay barriers in MSW landfills[J]. *Practice Periodical of Hazardous Toxic & Radioactive Waste Management*, 2008, 12(1): 53.
- [15] 随红建, 饶纪龙. 土壤溶质运移的数学模拟研究现状及展望[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 76.
SUI Hongjian, RAO Jilong. Present situation and prospect of mathematical simulation of soil solute transport [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 76.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范: CJJ 176—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Ruban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill; CJJ 176—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [17] 席永慧, 任杰, 胡中雄. 污染物离子在黏土介质中扩散系数和分配系数的测定(英文)[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 397.
XI Yonghui, REN Jie, HU Zhongxiong. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants in clay soil (in English)[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 397.
- [18] LI Lei, LIN Cheng, ZHANG Zhigang. Utilization of shale-clay mixtures as a landfill liner material to retain heavy metals[J]. *Materials & Design*, 2017(114): 73.
- [19] 蔡策毅. 防渗屏障对重金属离子的隔离效果以及防渗系统的施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
CAI Ceyi. Study on the isolation effect of the barrier against heavy metal ions in landfill and the construction technology of the seepage control system [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.