

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.009

# 垃圾填埋场防渗浆材吸附阻滞作用的研究

代国忠,李文虎,张亚兴,陈飞,史贵才

(常州工学院 常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室,江苏常州 213002)

**摘要:**通过室内吸附阻滞性能实验、重金属污染物运移数学模型建立等方法进行了防渗浆材固结体的吸附阻滞作用研究,以合理确定隔离墙的厚度及设计使用年限。采用黏土基浆材固结体制作的隔离墙具有良好吸附阻滞性能,对磷、铵态氮等无机物阻滞率在98%以上,对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 阻滞率在86.09%以上,对Hg、As、Pb、Cd等重金属离子均有很好的阻滞作用,阻滞率均在98%以上。黏土基浆材通过渗透沉积作用和吸附滞留作用,实现了对垃圾填埋场渗滤液中污染物阻滞能力的提高。黏土基防渗浆材隔离墙对垃圾填埋场渗滤液等污染物的阻滞作用具有时效性,保证一定的隔离墙厚度(一般 $B \geq 60$  cm)可确保对渗滤液污染物的吸附阻滞效果。

**关键词:**垃圾填埋场;渗滤液;隔离墙;运移数学模型;吸附阻滞性

**中图分类号:**TU528.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0036-04

## Research of Adsorption Retardation Effect on Anti-Seepage Grouting for Landfill Site

Dai Guozhong, Li Wenhui, Zhang Yaxing, Chen Fei, Shi Guicai

(Changzhou Key Lab of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, Jiangsu)

**Abstract:** Through methods of indoor adsorption retardation experiments, established mathematical model of heavy metal pollutants transport, effect of adsorption retardation have been study on the grouting concretion body, so as to reasonable determine the thickness of the wall and design use fixed number of year. The isolation wall made in the clay base grouting consolidation system, has good adsorption retardation, block rate reach upper 98% to  $\text{NH}_4\text{-N}$  and phosphorus, block rate reach upper 86.09% to  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{BOD}_5$ , block rate reach upper 98% to Hg, Pb and other heavy metal ions. Through the infiltration sedimentation and adsorption fixation of clay base slurry material, the retardation capability of it is improved for pollutants of landfill site leachate. Adsorption retardation effect of the isolation wall made in the clay base impervious grouting has timeliness to leachate pollutants for landfill site, to guarantee a certain wall thickness (generally  $B \geq 60$  cm) can ensures blocking effect to it.

**Key words:** waste landfill site; leachate; isolation wall; mathematical model on transport; adsorption retardation

城市生活垃圾是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及垃圾滤液<sup>[1-2]</sup>。我国每年产生2亿t左右的生活垃圾,并以每年8%~10%的速度增加,据对我国666座城市的生活垃圾状况调查,有200多座城市陷于垃圾包围之中<sup>[3-4]</sup>,因此城市垃圾处置及污染防治已成为环境保护的突出问题,如果填埋场的渗滤液处理不当,将造成污染地下水和地表水、影响环境卫生、传播疾病等问题。

对垃圾填埋场渗滤液渗漏污染最直接的控制方法是建立有效的防渗系统,将渗滤液,特别是其中的有害污染物严格控制在水文地质单元体内,同时建立渗滤液处理设施进行处理,使其达到污水排放标准之后再排放,以避免污染周围地下水、地表水和土壤<sup>[5]</sup>。防渗系统的有效性一方面取决于防渗系统是否能有效阻止渗滤液渗漏,另一方面取决

于防渗系统能否有效阻止渗滤液中污染物向外迁移,同时还能有效阻止地下径流进入垃圾填埋场,避免在填埋库区产生更多渗滤液<sup>[6]</sup>。

目前,在垃圾填埋场应用最多的防渗系统有水平防渗衬层和帷幕注浆防渗(即在垃圾场四周建造一道地下防渗隔离墙)两种<sup>[7]</sup>。采用黏土垫层等建立起的水平防渗系统不具有修复性,且占据较大的填埋场空间,造价高。而利用深层搅拌桩(或帷幕注浆)等方法在填埋场四周建立起垂直防渗隔离墙,具有低成本、投资少及易修复等特点,有较广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。中国垃圾填埋场渗滤液防渗漏的技术与工艺正处于探索和发展中,已建垃圾填埋场防渗系统的应用还存在一些问题<sup>[9-10]</sup>。因此,针对垃圾填埋场渗滤液渗漏防治,采用低渗透性( $< 10^{-7}$  cm/s)、稳定性好、对污染物具有阻滞性的黏土基浆材制做隔离墙,并通过室内吸附阻滞性能实验、重金

收稿日期:2013-09-30

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2012592)资助

作者简介:代国忠(1963-),男,教授,博士,主要从事地基与基础工程、环境岩土工程研究,(E-mail) dai6342@sina.com。

属污染物运移数学模型建立等方法进行防渗浆材固体的吸附阻滞作用研究,合理确定隔离墙的厚度及设计使用年限,是当前需要解决的防渗技术难题之一<sup>[11-12]</sup>。

## 1 垃圾填埋场渗滤液污染物的主要成分

城市生活垃圾在填埋过程中,由于降水的淋溶作用、地表径流和地下水渗入、垃圾微生物的厌氧分解作用等形成渗滤液(也称渗沥液或沥出液)。由于垃圾在填埋过程中的压

实和微生物分解作用,垃圾中所含的重金属等污染物随之溶入渗滤液中。因此,渗滤液是一种污染很强的含有重金属离子的有机废水,其成分主要取决于垃圾种类及其成分,并随垃圾填埋场的“年龄”而变化<sup>[13-14]</sup>。经对国内外部分城市垃圾场渗滤液调查统计,渗滤液中污染物及其浓度变化范围见表 1,国内外部分城市垃圾渗滤液的水质情况见表 2,渗滤液特征与填埋场“年龄”的关系见表 3。

表 1 渗滤液中污染物及其浓度变化范围

				mg/L	
污染物	浓度范围	污染物	浓度范围	污染物	浓度范围
COD	100~90 000	pH	5~8.6	Cu	0~9.9
BOD <sub>5</sub>	40~73 000	Cl <sup>-</sup>	5~6 420	Pb	0.002~2
TS(总硫)	0~59 200	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1~1 600	Mn	0.07~125
SS	10~7 000	Ca <sup>2+</sup>	23~7 200	Zn	0.2~370
NH <sub>3</sub> -N	6~10 000	Fe	0.05~2 820	TCr(总铬)	0.01~8.7
NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N	0.2~124	Mg	17~1 560	VFA(挥发性脂肪酸)	10~1 702
TP	0~125	Cd	0.003~17	大肠菌群值/(cfu/L)	23 000~(2.3×10 <sup>8</sup> )

注:除 PH 和大肠菌群值外,其他项目的单位均为 mg/L。

表 2 国内外部分城市垃圾渗滤液的水质情况

参数	上海	杭州	广州	深圳	台北	英国 Bryn Posteg	西班牙巴塞罗那
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	1 500~8 000	1 000~5 000	1 400~5 000	15 000~60 000	4 000~7 000	5 518	86 000
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	200~4 000	400~2 500	400~2 000	5 000~36 000	6 000~28 000	3 670	73 000
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	100~700	80~800	150~900	650~2 000	200~2 000	157	2 750
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	30~500	60~650	200~600	1 000~6 000	500~2 000	184	1 500
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	60~450	50~500	160~500	400~1 500	100~1 000	130	1 750
pH	5~6.5	6~6.6	6.5~8	6.2~8	5.6~7.5	5~8	6.2

表 3 渗滤液特征与填埋场“年龄”的关系

参考指标	<5 a(年轻)	5~10 a(中年)	>10 a(老年)
pH	< 6.5	6.5~7.5	> 7.5
COD/(g·L <sup>-1</sup> )	> 10	< 10	< 5
COD/TOC	< 2.7	2.0~2.7	> 2.0
BOD <sub>5</sub> /COD	≥0.5	0.1~0.5	< 0.1
VFA(占 TOC 的百分比)/%	> 70	5~30	< 5

## 2 重金属污染物运移形式及数学模型建立

### 2.1 重金属污染物运移形式及特征

垃圾场渗滤液中的重金属离子随地下水渗流而发生运移,在防渗隔离墙中的运移转化是一个复杂的物理、化学和生物过程,对流作用、水动力弥散作用及吸附作用是运移运动的主要形式<sup>[15-16]</sup>。其一,当地下水流动所携带着的渗滤液污染物以水的渗流速度在多孔介质(采用黏土基防渗浆材做成的隔离墙可以看作是多孔饱和介质)空隙中产生迁移;其二,当渗滤液中的重金属离子浓度不均匀时,污染物自身会发生自高浓度区域向低浓度区域的运动,形成分子扩散效

应,并在运动中产生机械弥散作用;其三,吸附作用会对渗滤液污染物在固相和液相之间的交换产生重要影响,广义的吸附作用包括吸附、离子交换、沉淀及阻滞过滤等。水泥土隔离墙的比表面积较大,其阳离子交换容量较大,具有较强的吸附能力,能够使被吸附的重金属离子滞留在防渗系统中,从而降低渗滤液对地下环境的污染。

### 2.2 重金属污染物运移数学模型建立

假定渗滤液在帷幕防渗墙多孔介质表面均匀流动,则地下水渗流运动的二维数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $h(x, y, t)|_{t=0} = h_0$ ;  $h(x, y, t)|_{r_1} = h_1$ ;  $[-\partial h(x, y, t)/\partial n]|_{r_2} = q$ ;  $H = h - z$  ( $z$  为测试点深度);  $K_x$ 、 $K_y$  分别为横向和纵向渗透系数;  $\mu$  为给水度;  $h$  为水头高度;  $h_0$ 、 $h_1$  分别为初始水头和边界水头值;  $t$  为时间;  $W$  为地下水系统垂直方向补给量;  $q$  为地下水通量边界条件。

垃圾场渗滤液中的重金属污染物在帷幕防渗墙中的运移数学模型建立过程如下:

$$B_u \frac{\partial(HN)}{\partial t} + \frac{\partial(HNv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(HNv_y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \left( D_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ H \left( D_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right] + I_0 \quad (2)$$

$$H \left( D_{xx} \frac{\partial N}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial N}{\partial y} \right) - N(v_x + v_y) \Big|_{r_2} = 0 \quad (3)$$

式中:  $N(x, y, t) \Big|_{t=0} = 0$ ;  $N(x, y, t) \Big|_{x=0} = N_0$ ;  $N(x, y, t) \Big|_{r_1} = s$ ;  $B_u$  为阻滞因子;  $I_0$  为源汇相;  $s$  为污染物通量边界条件;  $N$  为渗滤液中重金属离子的浓度;  $N_0$  为为渗滤液中重金属离子的初始浓度;  $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$ 、 $D_{yx}$ 、 $D_{yy}$  为弥散系数张量。对于二维弥散体系, 假定纵向和横向弥散系数为常数, 则二维水动力弥散系数可表示如下:

$$D_{xx} = \beta_L \frac{v_x^2}{|V|} + \beta_T \frac{v_y^2}{|V|} + D_0 \quad (4)$$

$$D_{yy} = \beta_L \frac{v_y^2}{|V|} + \beta_T \frac{v_x^2}{|V|} + D_0 \quad (5)$$

$$v_x = -\frac{K_x}{n} \frac{\partial h}{\partial x}; v_y = -\frac{K_y}{n} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (6)$$

式中:  $\beta_L$ 、 $\beta_T$  式中分别为纵向和横向弥散系数;  $v_x$ 、 $v_y$  为地下水水平流速,  $|V| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ;  $n$  为有效孔隙率;  $D_0$  为有效分子扩散系数。

### 2.3 运移数学模型的耦合求解过程

地下水渗流模型与重金属污染物运移数学模型是相耦合的系统, 解耦基本方法为: 先由地下水渗流方程式(1)求出水头  $h$ , 然后代入流速方程式(6)可求出流速  $V$ , 并将其代入重金属污染物运移控制方程式(2)、(3), 求得重金属污染物在地下水含水层中的浓度值  $N$ 。采用隐式有限差分格式进

行数值离散求解, 从  $t = 0$  开始, 运用多次迭代可求出重金属污染物随时空变化的浓度值。

## 3 防渗浆材固结体的吸附阻滞作用

### 3.1 防渗浆材的配方组成及基本性能

通过试验确定黏土基防渗浆材的配方组成为: 膨润土 20%~30%、水泥 16%~28%、粉煤灰 18%~26%、纯碱 0.8%~1.5%、玻璃纤维 0.01%~0.05%、稀释剂 NUF-5 加量 0.25%~0.72%, 余之为水。该种浆材具有良好可灌性, 浆材结石率 >99.0%, 其固结体 28d 的渗透系数、无侧限抗压强度和弹性模量分别为  $0.10 \sim 0.85 \times 10^{-7}$  cm/s、0.80~2.5 MPa 和 60~800 MPa, 满足生活垃圾填埋场隔离墙对浆材渗透性及抗压强度的要求。

### 3.2 防渗浆材固结体的吸附阻滞性试验

取江苏省某市垃圾卫生填埋场渗滤液, 采用自制的渗透仪进行上述浆材固结体吸附阻滞性能实验。实验水头高度 2.0 m、试样直径 70 mm、试样高 35 mm, 实验结果见表 4。所研制的黏土基浆材固结体具有良好吸附阻滞性能, 对磷、铵态氮等无机物阻滞率在 98% 以上, 对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、铵态氮和磷的吸附阻滞率达到了 85% 以上, 对 Hg、As、Pb、Cd 等重金属离子均有很好的阻滞作用, 阻滞率均在 99.76% 以上。按单位长度阻滞率估算, 如防渗墙达到 10 cm 后就可使渗滤出的渗滤液  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  符合污水排放标准, 使深褐色垃圾渗滤液滤过浆材结石体后呈现浅白色<sup>[17]</sup>。

表 4 浆材固结体吸附阻滞性测试结果

渗滤液成分	磷酸盐 (以 P 计)	铵态氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	化学需氧量 $\text{COD}_{\text{Cr}}$	生化需氧量 $\text{BOD}_5$	重金属离子 Pb	重金属离子 Hg	重金属离子 Cd
原渗滤液/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	18.0	2 000	23 000	8 700	50	5.0	3.0
渗滤出的渗滤液/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.36	3.8	3 200	1 200	$0.48 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$7.6 \times 10^{-3}$
吸附阻滞率/%	98.00	99.81	86.09	86.21	99.99	99.74	99.75
单位长度阻滞率/%	28.00	28.52	24.60	24.63	28.57	28.50	28.50

### 3.3 吸附阻滞作用的运移数学模型模拟分析

以江苏省某市垃圾卫生填埋场为例, 采用本文所建立的重金属污染物运移数学模型对所配制的黏土基防渗浆材固结体的吸附阻滞性进行模拟分析, 模型主要参数取值规定如下: 浆材结石体渗透系数为  $K = 0.5 \times 10^{-7}$  cm/s, 阻滞因子  $B_u = 1.1$ , 弥散系数  $D = 3.0 \times 10^{-6}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , 隔离墙厚度  $B = 60$  cm, 墙体深度  $H = 25$  m (置于不透水黏土层 3 m 深), 隔离墙总长约 500 m, 场地下水埋深  $H_0 = 3$  m, 重金属铅、镉的初始浓度均为  $N_0 = 1 000$   $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其模拟计算结果如图 1、图 2 所示。

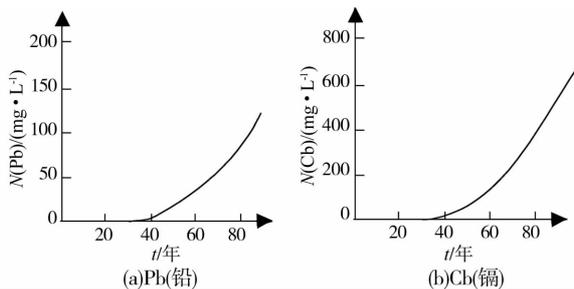


图 1 隔离墙外侧重金属污染物浓度变化曲线

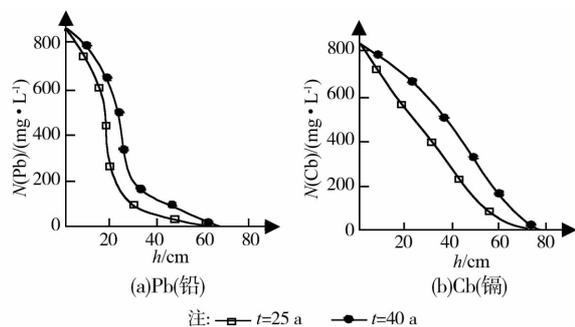


图 2 重金属污染物在隔离墙中的浓度分布曲线

由图 1 可以看出, 在垃圾填埋场设计使用的 40 a 以内, 隔离墙对铅的阻滞率达到 99.5% 以上, 对镉的阻滞率达到 98% 以上, 这与防渗浆材固结体浆材吸附阻滞性测试的结果 (见表 4) 比较接近。但当垃圾填埋场使用时间超过 40 a 以后, 隔离墙对铅、镉等重金属离子的阻滞率将下降很大, 若要提高垃圾填埋场设计使用年限 (大于 40 a), 就必须增加隔离墙厚度。因此, 采用黏土基防渗浆材做成的一定厚度的隔离

墙可以达到阻止重金属污染物运移的目的,具有较强的阻滞污染物能力。

由图 2 可以看出,隔离墙体中同一位置渗滤液污染物的浓度值随着时间的延续呈逐渐增大的趋势( $t = 40$  年时的浓度值明显大于  $t = 25$  年时的浓度值),且随着墙体的增厚(距离污染物越远),其污染物的浓度越低。总的来说,黏土基防渗浆材隔离墙对污染物的阻滞作用具有时效性,即初期阻滞作用较强,后期有逐渐减弱的趋势。因此,保证一定的隔离墙厚度(一般  $B \geq 60$  cm)可确保污染物的阻滞效果。

### 3.4 浆材固体的吸附阻滞作用机理

黏土基浆材结石体对垃圾填埋场渗滤液中污染物的阻滞能力强的原因是其低渗透系数的渗滤沉积作用和膨润土与粉煤灰对污染物的吸附滞留作用的有效发挥<sup>[18-19]</sup>。

#### 1) 渗滤沉积作用

由于隔离墙中黏土基浆材结石体的渗透系数低,结石体内部的孔隙很小且连通性较差,当垃圾场渗滤液通过浆材结石体时,一方面渗滤液中的悬浮物、固相颗粒和较大尺寸的分子、离子及胶团等被滞留沉积在结石体的微小孔隙中,随着渗透的持续进行被滞留沉积的固相颗粒越来越多,必将使孔隙发生堵塞,致使孔隙变得越来越小,渗透系数将随之降低,阻滞了污染物的径流扩散,起到很好的过滤作用,使得渗出的液量不断减少,最终,使得带出的污染物更少。

#### 2) 吸附滞留作用

垃圾渗滤液中的  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  等重金属离子和苯酚、硝基苯、苯胺、 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、三氮等有机污染物随液流渗入隔离墙浆材结石体时,与浆材结石体中的膨润土和粉煤灰产生了物理与化学吸附作用,从而阻止了污染物的进一步运移与扩散,使隔离墙对垃圾渗滤液的吸附滞留作用得以有效发挥。在蒙脱石、伊利石和高岭石三种黏土矿物中,蒙脱石吸附金属的等温吸附曲线的拐点出现得最迟,表明蒙脱石的稳定吸附能力最高。所以当渗滤液渗透过结石体时,其中的一些重金属离子和有机污染物被吸附滞留在浆材结石体中,阻止其径流扩散和化学扩散的发生,起到了净化作用。

## 4 结论

1) 黏土基浆材固结体制作的隔离墙具有良好吸附阻滞性能,通过隔离墙的渗滤沉积作用和吸附滞留作用的有效发挥,增强了浆材结石体对垃圾填埋场渗滤液中污染物的阻滞能力。运用自制的渗透仪进行室内吸附阻滞性能实验,得出该隔离墙对磷、铵态氮等无机物阻滞率在 98% 以上,对  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$  阻滞率在 86.09% 以上,对 Hg、As、Pb、Cd 等重金属离子均有很好的阻滞作用,阻滞率均在 99.76% 以上。按单位长度阻滞率估算,如防渗墙达到 10 cm 后就可使渗滤出的渗滤液  $\text{COD}_{\text{cr}}$  符合污水排放标准。

2) 所建立的重金属污染物运移数学模型具计算精确性较高,可判断出隔离墙能使重金属污染物在运移过程中,在水力梯度和浓度梯度作用下发生沉淀、扩散、吸附和转化,从而完成对渗滤液的污染控制。经模拟计算,在垃圾填埋场设计使用的 40 年内,隔离墙对铅的阻滞率达到 99.5% 以上,对镉的阻滞率达到 98% 以上,这与防渗浆材固结体浆材吸附阻滞性测试的结果比较接近。

3) 黏土基防渗浆材做成的隔离墙对污染物的阻滞作用

具有时效性。重金属污染物在隔离墙中的浓度范围沿地下水水流方向逐渐扩展,在隔离墙内的同一位置浓度值随着时间的延续呈逐渐增大的趋势,但距离污染物越远,污染物的浓度越低。保证一定的隔离墙厚度(一般  $B \geq 60$  cm)可确保对渗滤液污染物的吸附阻滞效果。

### 参考文献:

- [1] Inazumi S, Kimura M. Environmental impact evaluation on construction of vertical cutoff walls in landfill sites [J]. *Geotechnical Engineering Journal*, 2009, 40(4): 217-224.
- [2] 靖向党,于波,谢俊革,等. 城市垃圾填埋场防渗浆材的实验研究 [J]. *环境工程*, 2009, 27(1): 70-73.
- [3] Gartung I E. Landfill technology-German practice of geotechnical landfill design and construction [M]. Compiled for Zhejiang University, 2006.
- [4] 彭小红,郑泽根,丁文川. 垃圾填埋场的污染与防治 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(4): 140-143.
- [5] 陈永贵,邹银生,张可能. 城市垃圾卫生填埋场垂直防渗技术 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(6): 95-98.
- [6] 陈永贵,张可能,邓飞跃,叶为民. 黏土固化注浆帷幕对渗滤液中苯酚的吸附性能研究 [J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2009, 40(1): 243-247.
- [7] 张文杰,陈云敏,詹良通. 垃圾填埋场渗滤液穿过垂直防渗帷幕的渗漏分析 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 925-929.
- [8] Chen Y G, Zhang K N, Zou Y S, et al. Removal of  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  by adsorption on clay-solidified grouting curtain for waste landfills [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, 13(2): 166-170.
- [9] 肖诚,熊向阳,夏军. 生活垃圾卫生填埋场防渗结构设计影响因素分析 [J]. *环境卫生工程*, 2007, 15(5): 29-32.
- [10] Anil K Mishra, M Ohtsubo, Loretta Y Li, et al. Prediction of compressibility and hydraulic conductivity of soil-bentonite mixture [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 4(3): 317-424.
- [11] Daniele Pedretti, Marco Masetti, Tomaso Marangoni, et al. Slurry wall containment performance [J]. *Monitoring and Modeling of Unsaturated and Saturated Flow Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 184(2): 607-624.
- [12] 刘娜,陈畅曙,付云娜. 有机粘土矿物对水中菲萘混合物的吸附 [J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(5): 81-83.
- [13] The-Bao Nguyen, Chulho Lee, Hangseok Choi. Slug test analysis in vertical cutoff walls with consideration of filter cake [J]. *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(8): 785-797.
- [14] 刘芳,徐期勇, Townsend T G. 中美垃圾场渗滤液中的金属成分变化的调研 [J]. *环境科技*, 2010, 23(5): 77-80.
- [15] 陈永贵,邹银生,张可能. 黏土固化注浆帷幕控制重金属污染物运移的数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(s10): 31-34.
- [16] 周效志,桑树勋,曹丽文,等. 水分运移对填埋垃圾降解过程的影响模拟研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(1): 46-51.
- [17] 代国忠,靖向党. 生活垃圾填埋场垂直防渗浆材的试验研究 [J]. *混凝土*, 2010, 250(8): 139-141.
- [18] 靖向党,于波,谢俊革. 垃圾填埋场防渗浆材对污染物的阻滞规律 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(2): 46-50.
- [19] Guozhong Dai, Guicai Shi, Xiaofeng Wu, et al. Preparation and basic performance of anti-seepage slurry for domestic waste landfill site [J]. *Advanced Materials Research*, 2011(250-253): 2302-2306.