

改性膨润土作为反应型材料的双层防渗层性能研究

屈智慧¹, 赵勇胜^{1*}, 王铁军², 任何军¹, 周睿¹, 花菲¹, 王冰¹, 侯垠婷¹, 戴韵¹

(1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026; 2. 国家城市供水水质监测网长春监测站, 长春 130022)

摘要:通过静态实验对粘性土、450℃高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土吸附垃圾渗滤液中污染物的能力进行对比,并以新鲜垃圾渗滤液为对象,对粘性土/450℃高温焙烧膨润土双层防渗层和黏性土/双阳离子有机膨润土双层防渗层的防渗性能和截污能力进行研究.结果显示,黏性土、450℃高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中污染物的吸附平衡时间均为24 h; 450℃高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中COD和NH₄⁺的吸附作用均大于黏性土.同时,2种双层防渗层的渗透系数分别能达到 $1.31 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.80 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;黏性土/450℃高温焙烧膨润土双层防渗层对于NH₄⁺有较强的吸附能力,而黏性土/双阳离子有机膨润土双层防渗层对有机污染物质有很强的吸附能力,对COD的衰减率比前者高出33.82%.故针对垃圾填埋场不同污染物类型的差异可以选择不同改性膨润土作为反应型材料构建双层防渗层模式.

关键词:450℃高温焙烧膨润土;双阳离子有机膨润土;双层防渗层

中图分类号:X705 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2009)06-1867-06

Study on Performance of Double Mineral Base Liner Using Modified Bentonite as Active Material

QU Zhi-hui¹, ZHAO Yong-sheng¹, WANG Tie-jun², REN He-jun¹, ZHOU Rui¹, HUA Fei¹, WANG Bing¹, HOU Yin-ting¹, DAI Yun¹

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Changchun Monitoring Station of State City Water Supply Quality Monitoring Network, Changchun 130022, China)

Abstract: The absorbing capacity of clay, roasting bentonites by 450℃ and dual-cation organobentonites of the pollutions in landfill leachate was compared through static experiment, and investigations were conducted into availability of controlling the permeating of landfill leachate and feasibility of removing the main pollutants in leachate on the double mineral base liners of clay/roasting bentonites by 450℃ and clay/dual-cation organobentonites by using nice landfill leachate as the filter fluid. Experiment indicated that the adsorption equilibrium time of landfill leachate in clay, roasting bentonites by 450℃ and dual-cation organobentonites was 24 h; the absorbing capacity of roasting bentonites by 450℃ and dual-cation organobentonites was larger than that of clay. Simultaneous the penetration coefficients of the two liners were respective $1.31 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2.80 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; Double mineral base liners of clay/roasting bentonites by 450℃ owned larger absorbing capacity of NH₄⁺, however, double mineral base liners of clay/dual-cation organobentonites had strong absorbing capacity of organic pollutants and the attenuation rate of COD was 33.82% higher than the other. Conclusion was drawn that different types of modified bentonite should be chosen as "the active layer" according to different styles of landfill pollutants.

Key words: roasting bentonite by 450℃; dual-cation organobentonites; double mineral base liner

作为城市垃圾卫生填埋场关键性的防渗措施,填埋场底部防渗层的设计和施工在国内外开展了广泛研究,主要集中在自封-自修材料的防渗性能和“高度反应型”材料的截污能力等方面^[1~5].同时,部分学者^[6,7]致力于研究双层基底矿物的衬里,即由有效防渗的上部“惰性”材料和具有较大吸附容量的下部“高度反应型”材料组成的双层防渗层.

由于高温焙烧可减小膨润土中水膜和杂质对有机污染物质的吸附阻力,提高其对污染物的吸附量.同时,在450℃温度下,焙烧不致破坏膨润土的结构骨架和卷边构造,又能使其比表面积达到最大^[8,9].此外,双阳离子有机改性使膨润土表面性能由亲水

性转变为亲油性,分配作用和表面吸附作用的协同效应有利于有机污染物的去除.因此,本试验定量分析防渗材料黏性土、450℃高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液污染物的去除作用,并研究了黏性土/450℃高温焙烧膨润土和黏性土/双阳离子有机膨润土2种双层防渗层模式控制垃圾渗滤液渗透的可行性和去除垃圾渗滤液中主要污染物的有效性.

收稿日期:2008-08-03;修订日期:2008-11-06

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)重大项目(2008AA06A410)

作者简介:屈智慧(1983~),女,博士研究生,主要研究方向为水土污染的防治与治理, E-mail: qzh-19831001@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaoyongsheng@jlu.edu.cn

1 材料与方

1.1 实验设备和材料

实验分为 2 个部分:第一部分为静态实验,主要利用 250 mL 锥形瓶;第二部分为动态模拟实验,采用 2 个直径为 14 cm 的有机玻璃柱,柱长为 70 cm,装置如图 1 所示。

天然钠基膨润土为市场购得,经测定其阳离子

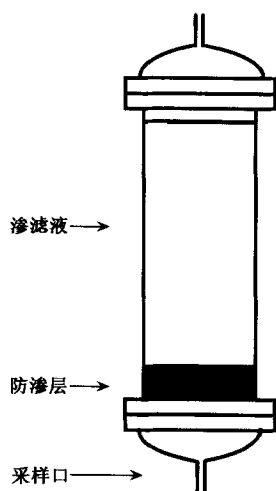


图 1 实验装置示意

Fig.1 Experimental equipment

交换容量(CEC)为 $716 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,后经 450°C 高温焙烧改性和双阳离子有机改性。黏性土取自长春市郊长吉公路沿线,原土化学成分详见表 1。实验所用垃圾渗滤液取自长春市三道垃圾填埋场,其特性见表 2。各柱防渗层的配置见表 3。

1.2 实验方法

1.2.1 改性膨润土的制备

(1)高温焙烧膨润土的制备 取钠基膨润土于马弗炉内以 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度升至 450°C 高温,加热 2 h,出炉冷却,即制成高温改性膨润土。

(2)双阳离子有机膨润土的制备 将一定质量干燥后过 0.25 mm 筛的钠基膨润土加入到 80% CEC 的 HDTMA(十六烷基三甲基溴化铵)和 20% CEC 的 TMAB(四甲基溴化铵)双阳离子表面活性剂溶液中,在 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 水浴中搅拌 2 h,滤干后,在 105°C 下活化 1 h,经研磨,过 0.25 mm 筛,制成 80HDTMA/20TMAB 双阳离子有机膨润土。其中表面活性剂的加入量按照改性时每 100 g 膨润土的 CEC 的百分比计算。

1.2.2 静态吸附实验

(1)吸附平衡时间的确定 设定防渗材料与垃圾渗滤液的反应时间分别为:1、3、6、9、12、24、48 和 72 h。振荡离心后测定水样中 COD、TN、 NH_4^+ 和

表 1 膨润土的化学组成/%

Table 1 Chemistry component of bentonite/%

土样	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	NaO	LOS	TiO_2	P_2O_5	MnO
膨润土	71.29	14.17	1.75	1.62	2.22	1.78	1.92	4.24	—	—	—
黏性土	65.70	12.13	3.71	5.05	1.55	2.47	2.08	6.09	0.50	0.35	0.06

表 2 实验所用垃圾渗滤液的物理化学特性参数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Physical chemistry property parameters of leachate/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

pH	COD	NH_4^+	NO_3^-	TN	Cl^-	总 Fe	Mn^{2+}	Zn^{2+}	Cu^{2+}	总 Cr
6.25	17 136	4 209.63	12.40	15 058.99	29 390.89	0.87	5.73	30.9	2.95	0.027

表 3 各柱防渗层的配置

Table 3 Materials of impermeable layers

柱号	双层防渗层组成	水分/mL	厚度/cm	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	上层 黏性土 350 g	65	1.5	1.80
	下层 450°C 高温焙烧膨润土 350 g	120	1.8	1.75
2	上层 黏性土 350 g	65	1.5	1.80
	下层 双阳离子有机膨润土 350 g	100	1.8	1.67

NO_3^- 等指标,实验方法见文献[10]。

(2)理论最大吸附量的计算 取不同稀释浓度的垃圾渗滤液 100 mL,分别与 5 g 不同防渗材料混

合,振荡 24 h 后离心,测定水样中 COD 和 NH_4^+ 指标。

1.2.3 动态模拟实验

实验柱填装完毕后,使防渗层保持一定湿度静置 8 d,之后加入 60 cm 高的垃圾渗滤液,控制水头高度.当渗滤液通过防渗层时定时取样,监测水样中 COD 和 NH_4^+ 等主要污染物指标.

2 结果与分析

2.1 静态吸附实验结果

2.1.1 吸附平衡时间的确定

众多研究表明,黏性土对污染物的吸附在 24 h 内就能达到平衡,而对于高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液的吸附性能的定量研究还比较少见.从图 2 可知,振荡时间为 24 h 时,3 种防渗材料都达到了对污染物的吸附平衡,24 h 后各种指标虽有小幅度的波动,但是均逐渐趋于平衡.故将黏性土、高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中污染物的吸附平衡时间确定为 24 h.

2.1.2 理论最大吸附量的确定

从表 4 中可以看出,高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对 COD 和 NH_4^+ 的吸附作用大于黏性土,其中前者对 NH_4^+ 的吸附量最大,后者对 COD 的吸附量最大;黏性土和双阳离子有机膨润土对 COD 的最大吸附量均大于对 NH_4^+ 的最大吸附量.其主要原因有以下 3 个方面:①经过改性的高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土的颗粒比黏性土颗粒更分散,相比于黏性土其与垃圾渗滤液的接触面积更大,这有利于提高吸附性能;②大量研究表明,吸附介质有机碳含量越高越有利于其对污染物的吸附,实验测得黏性土中有机碳的含量为 0.55%,故其吸附效果较差;高温焙烧膨润土中有机碳的含量虽然只有 0.12%,但高温焙烧减小了水膜和杂质产生的吸附阻力,使其吸附性能得到改善;双阳离子有机改性膨润土中有机碳的含量高达 16.18%,较高的有机碳含量使其有利的吸附垃圾渗滤液中污染物,其理论

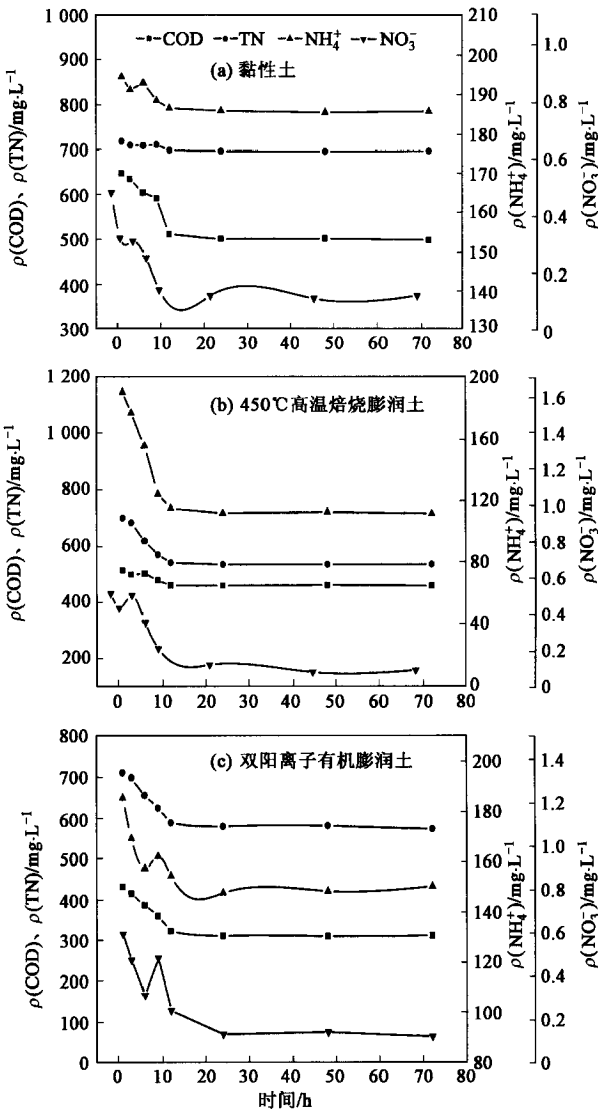


图 2 黏性土与各改性膨润土对垃圾渗滤液中污染物的吸附效果
Fig.2 Adsorption effects of contaminations in leachate
by clay and modified bentonites

最大吸附量分别是黏性土和高温焙烧膨润土最大吸附量的 7.75 和 4.88 倍.③对于无机 NH_4^+ 的吸附性能以无机改性的高温焙烧膨润土最有优势,故其对 NH_4^+ 的吸附量最大.

表 4 Langmuir 吸附等温方程
Table 4 List of Langmuir equations

吸附介质	污染物	Langmuir 方程	理论最大吸附量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	R^2
黏性土	COD	$Y = 15.712X + 0.0062$	161.29	0.9896
	NH_4^+	$Y = 0.0689X + 0.0093$	107.53	0.9787
450℃高温焙烧膨润土	COD	$Y = 2.5937X + 0.0039$	256.41	0.9466
	NH_4^+	$Y = 0.0432X + 0.0021$	476.19	0.9760
双阳离子有机膨润土	COD	$Y = 0.4024X + 0.0008$	1250	0.8561
	NH_4^+	$Y = 0.0854X + 0.0026$	384.62	0.9285

2.2 动态实验结果

2.2.1 渗透系数变化规律

2 种双层防渗层渗透系数的测定根据达西公式原理,计算方法如下:

$$\text{由达西公式: } Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L} = KAI$$

$$\text{可得渗透系数: } K = \frac{Q}{AI}$$

式中, Q 为渗流量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); K 为渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); A 为过水断面面积 (cm^2); H_1 、 H_2 为分别为实验柱上、下端水头 (cm); L 为垃圾渗滤液经过实验柱的长度 (cm); I 为水力梯度 (无量纲)。

从图 3 可看出,柱 1 和柱 2 渗透系数在实验初始阶段分别为 1.64×10^{-8} 和 $8.43 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 随着时间的推移,渗透系数均有下降,且柱 2 下降的速度比柱 1 显著.柱 1 的渗透系数波动性小,保持在 $1.31 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右.柱 2 在 60 d 后趋于稳定,波动在 $2.80 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 上下,比柱 1 高出 2 倍以上,平均值为 $4.21 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 2 种防渗结构渗透系数的差异主要取决于“高度反应型”材料的性能差别,柱 1 中高温焙烧膨润土只是在改性过程中失去了表面水、水化水和结构骨架中的结合水,而柱 2 中双阳离子有机膨润土的层间距明显增大,因而渗透性增加。

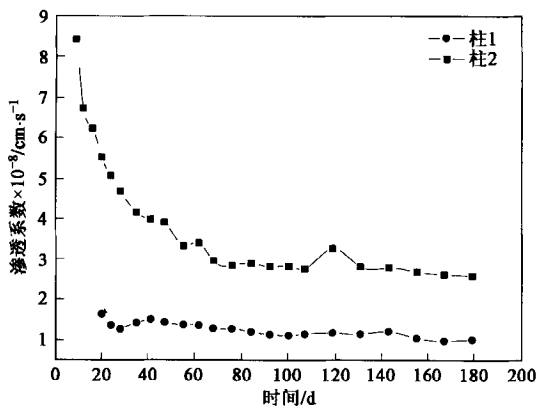


图 3 防渗层渗透系数变化

Fig. 3 Variations of penetration coefficients in impermeable layers

柱 1 比柱 2 出水的时间延迟了 9 d,表明高温焙烧膨润土的防渗性能优于双阳离子有机膨润土.同时,由于双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中污染物具有非常好的截污能力,污染物在渗透过程中不断地被吸附去除,堵塞了反应层的孔隙,导致柱 2 的渗透系数迅速减小.到防渗效果稳定时,柱 2 的渗透系数比实验之初下降了 1/4 倍左右.总体上,2 种

双层防渗层都能够达到国家标准 $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的要求,故这 2 种材料均可作为防渗材料。

2.2.2 对 COD 的衰减作用

从图 4 中可以看出,柱 1 和柱 2 出水 COD 值均随时间增加而不断增大,其中柱 1 出水的 COD 值上升速度较快,在 W/S (出水量与防渗土层质量之比) 为 0.43 时实现了穿透,而此时实验经历了 120 d,由于原液在微生物作用下得到了降解,故柱 1 的最大值偏低,为 $11290.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.柱 2 在 W/S 为 1.29 时达到最大值,而后有降低的趋势.总体上两柱中 COD 都呈先升高后降低的变化趋势,且下降的速度非常缓慢。

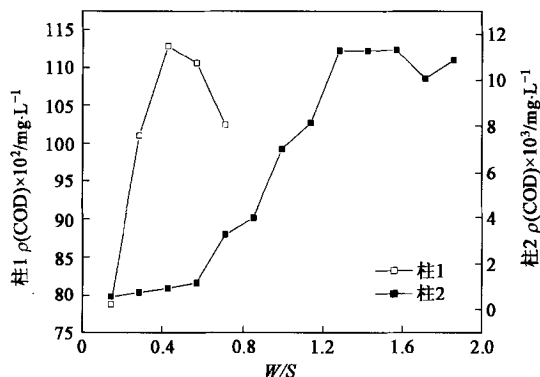


图 4 柱 1 和柱 2 中的 COD 的变化

Fig. 4 Change of COD in column 1 and 2

在双层防渗层实验过程中,垃圾渗滤液首先与黏性土“隋性层”接触,黏性土对污染物质的阻隔和净化机制主要是通过机械过滤、物理吸附、阳离子交换、生物或生物化学作用完成的.当含污染物的渗滤液经过黏性土时,黏性土首先对其中的大分子物质发生拦截过滤作用;其次黏性土颗粒具有一定的表面能,可以借助于分子引力把某些呈分子态的物质吸附在介质表面;同时,黏性土介质中还可以和渗滤液中带同种电荷的离子进行等量代换.而在适宜的条件下,黏性土介质中的微生物会对垃圾渗滤液的有机污染物进行水解和降解,从而达到去除目的。

但是黏性土对垃圾渗滤液中污染物质的吸附能力是有限的,随着吸附作用的逐渐减弱,渗滤液开始穿透黏性土层与下层反应层相接触.由静态实验可知,即使黏性土对主要污染物的吸附达到理论最大吸附量,其对 COD 和 NH_4^+ 的吸附总量仅为:56.45 和 37.64 mg,而高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中 COD 和 NH_4^+ 的吸附作用均大于黏性土,故在对 COD 的衰减过程中,反应层对 COD 的吸附贡献率应该较“隋性层”更显著.结合图

4 和表 5 可知,在相同渗漏量情况下,双阳离子有机膨润土防渗层对污染物的衰减能力远远大于高温焙烧膨润土防渗层.虽然柱 1 的穿透时间比柱 2 延长了 20 d,但是柱 2 对 COD 的衰减百分比却比柱 1 高出 33.82%,如表 5. 这是由于双阳离子有机改性膨润土对有机物的吸附是分配作用和表面吸附共同作用的结果,且经过有机改性的膨润土对渗滤液中多种有机物均具有较好的吸附效果.相比之下,无机改性的高温焙烧膨润土在减小了膨润土结构中水膜对

有机物污染物质的吸附阻力的同时,并没有大幅度提高其对多种并存有机物的分配作用和表面吸附作用,所以吸附效果次之.

由于柱 1 的防渗性能要优于柱 2,故在相同时间内出水量柱 1 小于柱 2. 同时,随着时间的延长,防渗层中存在的微生物对垃圾渗滤液的降解作用不断加强,导致实验过程中出现了各柱在穿透时刻的 COD 值明显低于原液.此外,各柱在达到最大值之后,COD 都有下降的趋势.

表 5 柱 1 和柱 2 中 COD 值及衰减比例

Table 5 List of attenuation rate of COD in column 1 and 2						
柱号	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	达到最大值时间/d	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/原溶液浓度/%	衰减率/%
1	7 874.4	11 290.58	120	9 756.41	56.94	43.06
2	589.64	11 286	100	4 133.34	24.12	75.88

2.2.3 对 NH_4^+ 的衰减作用

由图 5 可知,柱 1 和柱 2 在初始阶段对 NH_4^+ 均有很好的去除效果,去除率分别达到了 84.62% 和 90.03%. 这主要是由于黏性土和改性膨润土发生了离子吸附和交换作用、化学沉淀等作用.随着时间的延长,防渗层介质中的吸附能力变弱, NH_4^+ 浓度增大.同时,由于 NH_4^+ 的降解要通过生物硝化-反硝化过程完成,而反应柱内没有适合硝化作用发生的好氧环境,因此微生物降解有机物不断产生 NH_4^+ ,使各柱出水中 NH_4^+ 不断升高,并大于渗滤液原样 NH_4^+ 含量.到实验结束时,柱 1 和柱 2 出水的 NH_4^+ 值分别达到 $7\,324.21$ 和 $12\,055.38\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明柱 1 对 NH_4^+ 具有持久的吸附衰减能力,而柱 2 比较快地达到了吸附饱和,上升的速度较快.原因是虽然改性后膨润土的层间距都被拉大,对 NH_4^+ 的吸附作用均有增强,但是无机改性膨润土对无机 NH_4^+ 离子的吸附能力比有机改性膨润土对无机离子的吸附能力更

强.故针对以无机 NH_4^+ 离子为主要污染物的垃圾填埋场渗漏,应用高温焙烧膨润土作为防渗层更具实际应用价值.

2.2.4 对重金属的衰减作用

从图 6 和图 7 中,柱 1 和柱 2 中重金属的变化规律可以看出,两柱对总 Fe、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 和总 Cr 都有很好的吸附能力.但是由于在防渗层铺设的过程

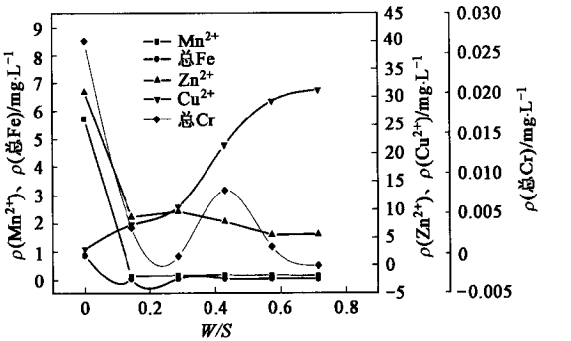


图 6 柱 1 中重金属的变化
Fig.6 Change of heavy metals in column 1

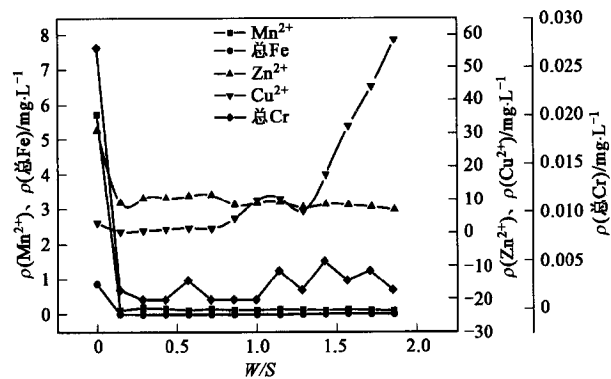


图 7 柱 2 中重金属的变化
Fig.7 Change of heavy metals in column 2

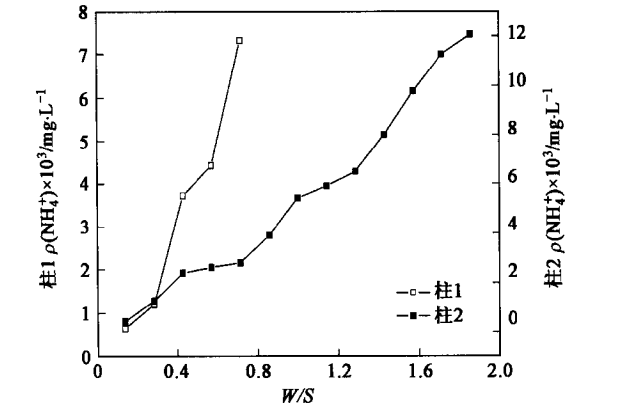


图 5 柱 1 和柱 2 中 NH_4^+ 的变化
Fig.5 Change of NH_4^+ in column 1 and 2

中在底部放置了铜丝网,在渗滤液经过防渗层时,携带铜离子进入了出水,导致两柱出水 Cu^{2+} 的变化呈先降低后升高的趋势.到实验结束时,柱 1 和柱 2 对总 Fe、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 和总 Cr 的去除率分别为 99.32%、97.75%、82.16%、88.89% 和 98.27%、98.05%、77.80%、92.59%.由此可见,2 种双层防渗层对重金属都具有很强的阻滞能力,且去除率差别不大.

对于防渗层吸附重金属的原因主要包括:①机械拦截作用;②双层防渗层中含有天然的膨润土,而膨润土对阳离子的吸附能力主要取决于膨润土中的粘土矿物颗粒对金属阳离子的吸附能力.同时有研究表明:拥有巨大的比表面、表面能和带电荷的胶体能够强烈的吸附各种分子和离子,对重金属在环境中的迁移有重大的影响.其中,粘粒矿物胶体是无机胶体中最主要的一种,而本次实验中采用的黏性土和膨润土就是较为常见的 2 种.③有研究表明,对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等重金属离子的吸附容量大小关系为蒙脱石 > 伊利石 > 高岭石^[11].可见本实验采用的黏性土和膨润土是对重金属吸附能力较强的粘土矿物.④交换吸附即非专属吸附.蒙脱土对重金属离子的吸附为交换吸附,吸附时所发生的反应为阳离子交换,吸附发生的位置为扩散层.

3 结论

(1)黏性土、高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中污染物的吸附平衡时间均为 24 h;高温焙烧膨润土和双阳离子有机膨润土对垃圾渗滤液中 COD 和 NH_4^+ 的吸附作用均大于黏性土,其中双阳离子有机膨润土对 COD 的吸附量最大,高温焙烧膨润土对 NH_4^+ 的吸附量最大;黏性土和双阳离子有机膨润土对 COD 的最大吸附量大于对 NH_4^+ 的最大吸附量.

(2)黏性土/高温焙烧膨润土和黏性土/双阳离子有机膨润土双层防渗层的渗透系数均能达到国家最低标准 $1 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下.

(3)黏性土/双阳离子有机膨润土双层防渗层对有机污染物有很强的吸附能力,对 COD 的衰减百

分比却比黏性土/高温焙烧膨润土双层防渗层高出 33.82%.而黏性土/高温焙烧膨润土双层防渗层对于 NH_4^+ 有较强的吸附能力.2 种双层防渗层模式对 Mn^{2+} 、总 Fe 和总 Cr 的去除率较高,对 Zn^{2+} 的去除率偏低,由于防渗层填装过程中铜丝网的设置导致出水 Cu^{2+} 的含量升高.

(4)针对不同的垃圾填埋场污染物类型的差异可以选择不同改性膨润土作为反应型材料,但在实际应用时,应根据场地防护要求及经济条件的可行性等选择双层防渗层的配置模式.

参考文献:

- [1] Shi C, Booth R. Laboratory development and field demonstration of self-sealing /self-healing landfill liner[J]. Waste Management, 2005, 25(3): 231-238.
- [2] Bastiaens W, Bernier F, Li X L. SELFRAC: Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(8): 600-615.
- [3] Lorenzetti R J, Bartelt-Hunt S L, Burns S E, et al. Hydraulic conductivities and effective diffusion coefficients of geosynthetic clay liners with organobentonite amendments [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(5): 385-400.
- [4] Smith J A, Jaffe P R. Benzene Transport through Landfill Liners Containing Organophilic Bentonite[J]. Environmental Engineering, 1994, 120(6): 1559-1599.
- [5] Lo I M C, Mak R K M. Transport of phenolic compounds through a compacted organoclay liner [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(2): 143-150.
- [6] Wagner J F. Concept of a Double Mineral Base Liner. Landfill of Waste: Barrier[M]. London: An Imprint of Chapman & Hall, 1994. 91-98.
- [7] 陈延君. 改性膨润土作为新型双层矿物基底衬里的可行性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004. 10-13.
- [8] 杨性坤, 杨莹琴, 周涛, 等. 膨润土的改性研究新进展[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2004, 17(4): 491-494.
- [9] 夏新兴, 彭毓秀, 李少鹏, 等. 膨润土改性方法的研究[J]. 中国造纸, 2003, 22(2): 20-23.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 何宏平, 郭九皋, 朱建喜, 等. 蒙脱石、高岭石、伊利石对重金属离子吸附容量的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 573-578.