



# 利用膨润土的膨胀和稠度特性对 GCL 渗透系数进行预测的试验研究

王 宝<sup>1</sup>, 董兴玲<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055;

2. 中煤科工集团西安研究院有限公司 水文地质研究所, 西安 710077)

**摘要:**以土工合成粘土衬垫(Geosynthetic Clay Liner, GCL)在尾矿库防渗层中的应用为背景,研究不同浓度重金属离子(Cu 和 Zn)作用下,膨润土的自由膨胀量、液限及 GCL 渗透系数的变化规律,并分析它们之间的对应关系。试验结果显示,当重金属离子浓度在 0.01 mol/L 到 0.1 mol/L 之间递增时,膨润土的自由膨胀量和液限会随着重金属离子浓度的增大而大幅度减小,但当重金属离子浓度从 0.1 mol/L 增加到 0.5 mol/L 时,膨润土的自由膨胀量和液限则只有微小变化。在渗透试验中,当渗透溶液中重金属离子浓度小于 0.01 mol/L 时,GCL 的渗透系数能够保持稳定;但当重金属离子浓度大于 0.02 mol/L 后,GCL 的渗透系数会随着渗透溶液中重金属离子的浓度增加而不断升高。研究表明,当尾矿库渗滤液中重金属离子浓度大于 0.02 mol/L 时,GCL 的渗透系数与膨润土的自由膨胀量和液限之间具有良好的数学对应关系,可以利用自由膨胀量和液限对渗透系数进行预测。

**关键词:**土工合成粘土衬垫;膨润土;自由膨胀量;液限;渗透系数

**中图分类号:**TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0066-06

## Relationship between hydraulic conductivity and swell index and liquid limits of GCL

Wang Bao<sup>1</sup>, Dong Xingling<sup>2</sup>

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and

Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. Institute of Hydrogeology, Xi'an Research Institute of China Coal

Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, P. R. China)

**Abstract:** Geosynthetic clay liner (GCL) has been increasingly used as a hydraulic barrier for tailing impoundment. Under the action of different concentrations of heavy metal ions (heavy metal compounds are  $\text{CuCl}_2$  and  $\text{ZnCl}_2$ ), the change regulation of the free swell index, liquid limits and GCL hydraulic conductivity is researched, and the correspondences between them are analyzed. It is shown that when the concentration of heavy metal ions ranges from 0.01 mol/L to 0.1 mol/L, the free swell index and liquid limits decrease with the increase of concentrations of heavy metal ions. However, further increasing of the

**收稿日期:**2015-05-27

**基金项目:**陕西省教育厅专项科研计划(11JK0761)

**作者简介:**王宝(1983-),男,博士,主要从事矿山固体废物污染控制研究,(E-mail) wangbao2016@gmail.com。

**Received:**2015-04-25

**Foundation item:** National Scientific Research Project of the Education Department of Shaanxi Province in China (No. 11JK0761)

**Author brief:** Wang Bao (1983-), PhD. main research interest: prevention and control of contamination resulted from mining waste, (E-mail) wangbao2016@gmail.com.

heavy metals ions concentration ( from 0.01 mol/L to 0.5 mol/L) can't cause the two index properties decrease continually. In the permeation test, when the concentration of heavy metal ions ranges is lower than 0.01 mol/L, the hydraulic conductivity of GCL can remain stable. By contrast, when the concentration of heavy metal ions is up to 0.02 mol/L, the hydraulic conductivity of GCL increases with the increase of heavy metals ions concentration. Results of the study show that the index properties of a bentonite has good correspondence with the hydraulic conductivity of the corresponding GCL when the heavy metal ions concentration is higher than 0.02 mol/L and they can be used to estimate the hydraulic conductivity.

**Key words:** geosynthetic clay liner (GCL); bentonite; free swell index; liquid limits; hydraulic conductivity

土工合成粘土衬垫层 (Geosynthetic Clay Liner, GCL) 是一种新型防渗材料, 与传统压实粘土衬垫层相比, 它具有渗透系数低 ( $k < 1.0 \times 10^{-9}$  cm/s)、施工简单、能够承受较大变形等特点, 故被广泛应用到金属矿山尾矿库的防渗工程中<sup>[1-2]</sup>。然而, 金属矿山尾矿库的渗滤液中往往含有大量的重金属污染物, 它们能够改变 GCL 内膨润土颗粒的理化性质和赋存状态, 进而对 GCL 的防渗性能产生不利影响; 而 GCL 防渗性能的稳定与否对整个尾矿库周围地下水污染控制的效果起到决定性作用。所以, GCL 防渗性能在尾矿库渗滤液长期作用下的变化规律问题, 已经成为环境岩土工程领域一个重要的研究内容<sup>[3]</sup>。目前, 这类问题的研究主要通过开展长期的渗透试验来完成, 也就是使用柔性壁渗透仪 (Flexible Wall Permeameter) 来测定 GCL 的渗透系数, 并观察其渗透系数随渗透时间的延长而出现的变化情况<sup>[4-6]</sup>, 以便对 GCL 的防渗性能做出合理判断。

然而, 这种研究方法在实际应用中却存在着一些问题<sup>[7]</sup>。首先, 利用柔性壁渗透仪测定 GCL 的渗透系数往往需要持续很长时间, 它无法为许多急需试验结果的工程项目服务。另外, 柔性壁渗透仪是一种相对复杂的土工试验设备, 它的操作方法较为繁琐, 只有具备丰富经验的试验人员才能够操作。同时, 柔性壁渗透仪在使用过程中需要长时间持续不断的空气压力, 而大多数土工实验室无法提供此类条件。所以, 利用柔性壁渗透仪测定 GCL 的渗透系数, 并不是一种理想的研究 GCL 防渗性能变化规律的试验方法。

Lee 等<sup>[8]</sup> 和 Katsumi 等<sup>[9]</sup> 研究发现, 在侵蚀性溶液作用下, GCL 的渗透系数与其内部所含膨润土的自由膨胀量和液限之间存在着良好的数学对应关系; 基于此, 他们提出可以利用膨润土的自由膨胀量试验和液限试验来代替渗透试验, 用于分析 GCL 的渗透系数变化规律。毕竟, 膨润土自由膨胀量和液

限的测定要比 GCL 渗透系数的测定简单容易得多。以 GCL 在垃圾填埋场衬垫层中的应用为背景, 相关研究已经证实这种方法是可行的<sup>[8]</sup>。然而, 这种研究方法是否适用于 GCL 在尾矿库衬垫层中的应用尚无法确定。因为, 在垃圾填埋场渗滤液中, 影响膨润土理化性质的主要成分是  $\text{Ca}^{2+}$ , 而在尾矿库渗滤液中, 影响膨润土理化特性的主要成分是各种重金属离子<sup>[10]</sup>。为此, 拟测定尾矿库渗滤液作用下膨润土的自由膨胀量、液限以及 GCL 的渗透系数, 并分析它们之间的数学对应关系, 讨论利用膨润土的自由膨胀量试验和液限试验来研究 GCL 防渗性能变化规律的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以市场上广泛销售使用的针刺型钠基 GCL 为试验对象, 其基本性质如表 1 所示。将  $\text{ZnCl}_2$  和  $\text{CdCl}_2$  (分析纯) 溶解到蒸馏水中, 配制成重金属离子浓度分别为 0.01 mol/L、0.02 mol/L、0.05 mol/L、0.1 mol/L 和 0.5 mol/L 的溶液 5 份, 溶液中  $\text{Zn}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的浓度各占一半; 使用滴管向各重金属溶液中加入 2 mol/L 的盐酸溶液一滴, 以抑制溶液中  $\text{Zn}^{2+}$  水解。

表 1 试验中所用 GCL 的基本性质  
Table 1 Properties of bentonite used in test

基本性质	数值
单位面积膨润土质量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	5.72
初始未水化厚度/mm	5.20
pH	9.85
CEC/( $\text{meq} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ )	89

### 1.2 自由膨胀试验

用剪刀将 GCL 中的针刺线剪断, 取出其中的膨润土, 风干后过 0.5 mm 筛; 然后在 105 °C 的温度下

烘干至恒重,冷却后待用。根据 ASTM D 5890-06 进行自由膨胀试验。以配制好的重金属离子溶液作为膨润土的分散液。向容积为 100 mL 的量筒中注入 90 mL 重金属离子溶液,然后将 2 g 膨润土分 20 次缓慢加入到重金属离子溶液的表面,每次加入后暂停 10 min,待膨润土完全分散到溶液中后,再加入下一次。全部膨润土加入完毕后,用重金属离子溶液淋洗量筒壁,并将量筒加满至 100 mL。将溶液静置 24 h,然后记录量筒中土面的高度。试验中同时设置以蒸馏水作为分散液的空白对照试验。

### 1.3 液限测定试验

将 GCL 中的膨润土取出后,风干并过 0.5 mm 筛。分别称取 200 g 代表性土样 5 份。将土样用 5 种不同浓度的重金属溶液进行浸润后,装入塑料袋,放到密闭的保湿器中,静置 24 h;试验中同时采用蒸馏水制作空白试样,以便对比分析。根据 ASTM D 4318,采用碟式液限仪测定土样的液限。试验中每一土样进行 5 次,碟式液限仪击数控制在 15~35 次之间。

### 1.4 渗透试验

GCL 的渗透试验参照 ASTM D 5084-10 和 ASTM D6766-12 进行操作。首先根据 Daniel 等<sup>[11]</sup>的方法进行渗透试样制备,用记号笔在大块方形 GCL 上标记出若干直径为 102 mm 的圆,然后,沿着圆周用洗瓶将 GCL 内的膨润土润湿,最后,用剪刀沿着圆周将试样剪出。将试样安装到柔性壁渗透性中,以蒸馏水作为水化溶液(Hydrating Liquid)对试样进行为期 7 d 的反压饱和处理。然后,以蒸馏水作为渗透溶液对 GCL 试样进行渗透试验,测定各个试样的基准渗透系数(Base Hydraulic Conductivity)。当试样渗透系数稳定,并满足 ASTM D6766-12 所规定的试验停止时,停止试验。随后,将渗透溶液换成不同浓度(0.01~0.5 mol/L)的重金属溶液,进行渗透试验。在本试验中,通过外部压力系统向 GCL 试样施加围压为 35 kPa,变水头管初始水位高度设定为 187.5 cm。在渗透试验过程中,定期收集渗出液,并测量其电导率(EC),当渗出溶液的 EC 值与渗入液 EC 平衡时停止试验<sup>[12]</sup>。

## 2 试验结果分析

### 2.1 自由膨胀试验结果

图 1 是膨润土的自由膨胀量随分散溶液中重金属离子浓度增加而表现出的变化情况。从图 1 中可以看出,膨润土的自由膨胀量随着重金属离子浓度

的增加而不断减小。膨润土颗粒吸附重金属离子,进而造成其表面扩散双电层被压缩,应该是其膨胀量下降的主要原因。当重金属离子浓度在 0.01 到 0.1 mol/L 范围内递增时,膨润土的膨胀量快速下降;而当重金属离子浓度从 0.1 mol/L 增大到 0.5 mol/L 时,膨润土膨胀量的降低幅度则很小。Jo 等<sup>[13]</sup>在研究 NaCl、KCl 等金属溶液对膨润土自由膨胀量的影响时也发现,当溶液中阳离子浓度超过 0.1 mol/L 时,膨润土的膨胀量不会再出现显著降低的现象。

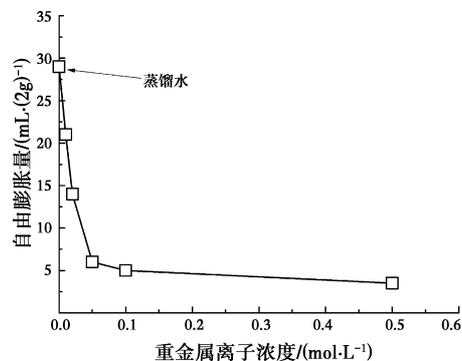


图 1 膨润土自由膨胀量与溶液中重金属离子浓度关系  
Fig. 1 Correlations between free swell index and concentration of heavy metals in solutions

### 2.2 液限测定试验结果

膨润土的液限随浸润溶液中重金属离子浓度的增加而产生的变化情况如图 2 所示。随着浸润溶液中重金属离子浓度的增加,膨润土液限不断下降,从最初的 305%降低到了 98%。与自由膨胀量的变化趋势类似,当重金属离子浓度由 0.01 mol/L 增大到 0.1 mol/L 时,膨润土液限快速减小;但当重金属离子浓度从 0.1 mol/L 继续增大后,膨润土液限的变化则趋于稳定。表面扩散双电层被压缩变薄所引起

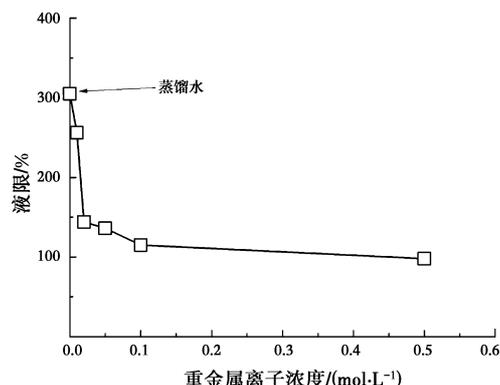


图 2 膨润土液限与浸润溶液中重金属离子浓度关系  
Fig. 2 Correlations between liquid limit of bentonite and concentration of heavy metals in solutions

的持水能力下降,应该是膨润土液限降低的根本原因。根据不同阳离子在膨润土颗粒表面吸附亲和力的变化规律,浸润溶液中的  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  很容易与膨润土颗粒表面的  $Na^+$  离子发生交换反应;由于  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  相对于  $Na^+$  具有更高的电荷,所以,在维持扩散双电层电荷总量不变的情况下,膨润土颗粒外扩散双电层中的离子数目必然减少,最终扩散双电层变薄。而溶液中重金属离子浓度越高,膨润土颗粒表面被交换的  $Na^+$  的数目越多,导致双电层被压缩的幅度越大,持水能力下降更加严重,最终液限不断减小。

### 2.3 渗透试验结果

图 3 是 GCL 的渗透系数在不同渗透溶液作用下随时间的变化情况。在用蒸馏水渗透阶段,由于试样内部膨润土遇水后不断膨胀,GCL 的渗透系数随着试验的进行而逐渐降低。在试验进行到 11 d 后,GCL 的渗透系数保持稳定,其数值介于  $6.8 \times 10^{-9}$  cm/s 到  $1.1 \times 10^{-8}$  cm/s 之间,这是各个 GCL 试样的基准渗透系数,大小与我国大多数 GCL 的渗透系数相一致<sup>[12, 14]</sup>。将渗透溶液由蒸馏水换成重金属溶液后,各个 GCL 试样的渗透系数出现了不同的变化趋势。在 0.01 mol/L 的重金属溶液渗透作用下,GCL 的最终渗透系数为  $6.1 \times 10^{-9}$  cm/s,与其基准渗透系数相比略有下降,见图 3(a)。

在重金属离子浓度为 0.02 mol/L、0.05 mol/L 和 0.1 mol/L 三种溶液渗透作用下,GCL 的渗透系数变化规律基本类似,都是在持续稳定一段时间后开始逐渐升高,并最终分别达到  $1.1 \times 10^{-8}$ 、 $6.6 \times 10^{-8}$  和  $9.5 \times 10^{-8}$  cm/s,如图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)所示;3 个试样的最终渗透系数比基准渗透系数高出 Shackelford 等<sup>[15]</sup> 曾用  $ZnCl_2$  溶液作为渗透溶液研究 GCL 渗透系数的变化情况,其所得试验结果也显示,当渗透溶液中重金属离子浓度大于 0.02 mol/L 后,GCL 的渗透系数会逐渐增大。在本试验中,渗透溶液所含  $Cu^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  对膨润土颗粒表面扩散双电层的压缩进而引起颗粒间孔隙增大,应该是 GCL 渗透系数的根本原因。有必要指出的是,虽然试验所用的 3 种渗透溶液中离子浓度成倍增加,但对应的 GCL 渗透系数并没有表现出类似的线性变化规律。这种现象在 Lee 等<sup>[8]</sup> 开展的使用  $CaCl_2$  溶液渗透 GCL 的试验中也存在。

当渗透溶液中重金属离子浓度达到 0.5 mol/L 时,GCL 的渗透系数在试验开始后迅速增大,在 20 d 左右的时间内就升高至  $5.4 \times 10^{-7}$  cm/s,这比其基准渗透系数升高了近 2 个数量级,如图 3(e)所示。这是因为,渗透溶液中高浓度的重金属离子能

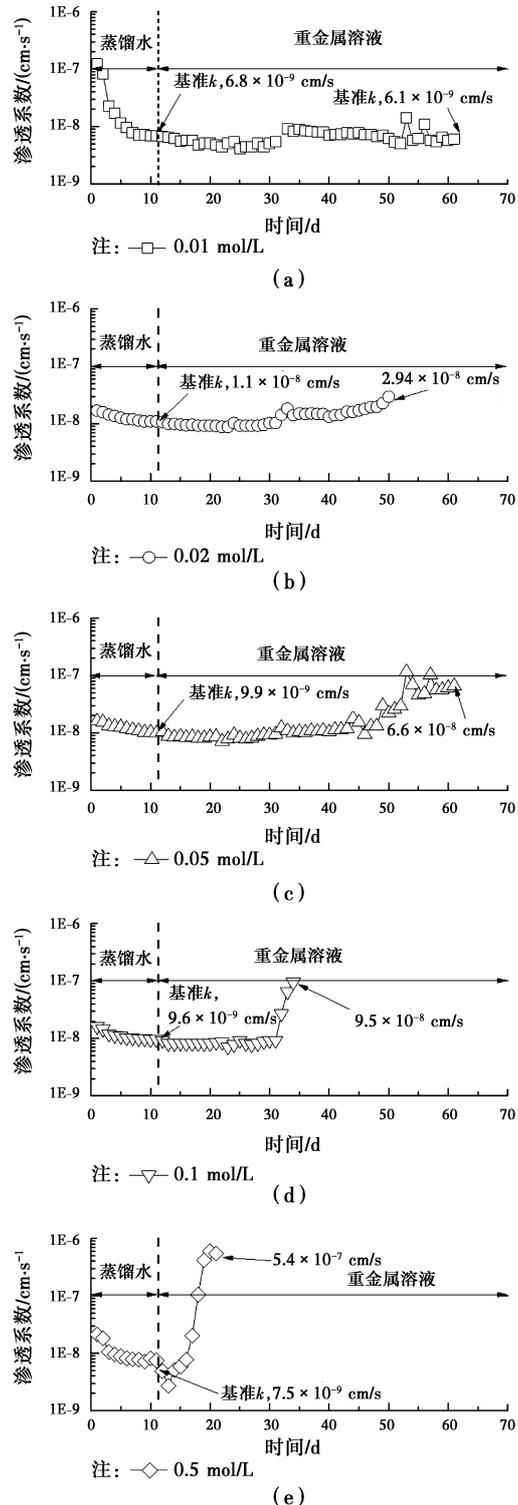


图 3 GCL 渗透系数随时间的变化情况

Fig. 3 Hydraulic conductivity versus time for bentonite permeated with heavy metals solutions

够快速大量置换膨润土颗粒表面的  $Na^+$ ,使膨润土颗粒表面的扩散双电层被更快更大幅度地压缩。另外,由于溶液中重金属离子浓度较高,部分离子可以进入到膨润土颗粒表面的固定层中;而重金属离子进入到固定层中后将会使膨润土颗粒表面的 Zeta

电位下降的更快,从而导致膨润土颗粒外部扩散双电层更快、更大幅度地变薄,颗粒间孔隙变得更大,最终引起渗透系数快速升高<sup>[16]</sup>。

图4是GCL的最终渗透系数与渗透溶液中重金属离子浓度的关系。从图中可以看出,GCL的渗透系数随着渗透溶液中重金属离子浓度的增加而不断升高。与自由膨胀量和液限的变化趋势类似,当渗透溶液中重金属离子浓度较低时,随着重金属离子浓度的增加,GCL渗透系数升高的幅度较为明显;但当渗透溶液中重金属离子浓度较高时,GCL渗透系数随着溶液中重金属浓度的增加只表现出较小的变化趋势。这种变化趋势与GCL内膨润土的自由膨胀量和液限随溶液中重金属离子浓度改变而表现出的变化趋势基本是一致的。

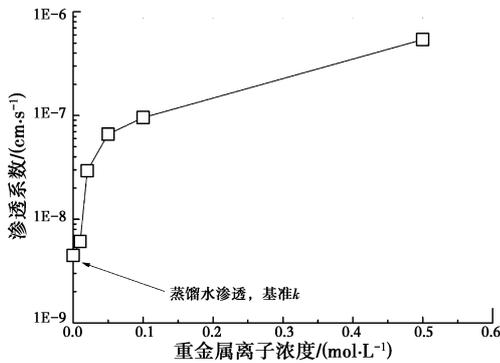
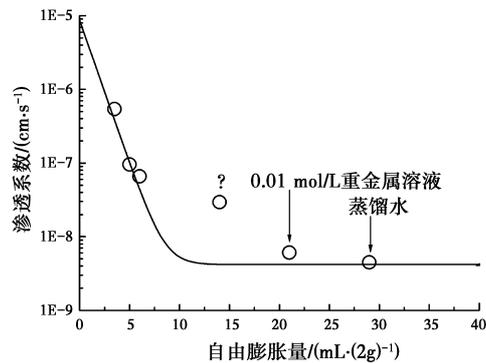


图4 GCL渗透系数与渗透溶液中重金属离子浓度关系  
Fig. 4 Correlations between hydraulic conductivity and concentration of heavy metals in permeation solutions

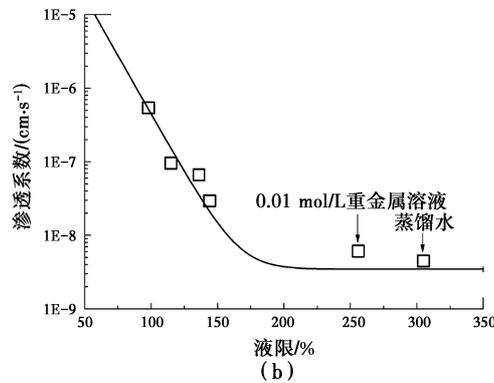
2.4 自由膨胀量和液限与渗透系数之间的对应关系

图5是GCL试样最终渗透系数与膨润土自由膨胀量和液限之间的非线性拟合对应关系。从图5中可以看出,可以从自由膨胀量为12 mL/2 g和液限为200%处(所用溶液重金属浓度为0.01 mol/L)划分为两个部分。在分界点的右侧,虽然膨润土的自由膨胀量和液限发生改变,但GCL的渗透系数与自由膨胀量和液限之间不能同步变化如下:这部分试验是在低浓度重金属溶液(<0.01 mol/L)作用下完成的,在自由膨胀量和液限试验中,膨润土颗粒与重金属溶液能够充分接触,所以,较低浓度的重金属溶液可以使膨润土颗粒外扩散双电层被压缩,促使它们的自由膨胀量和液限出现比较明显的变化;然而,在渗透系数测定试验中,由于GCL试样内膨润土颗粒彼此之间紧密结合,所以,重金属溶液与膨润土颗粒之间的接触并不充分,膨润土颗粒外扩散双电层被压缩的幅度有限,故渗透系数并未出现明显的变化,这一现象在Lee等<sup>[8]</sup>的研究中也曾出现过。当自由膨胀量低于12 mL/2 g和液限低于200%后

(重金属浓度 $\geq 0.02$  mol/L),之所以会出现渗透系数与自由膨胀量和液限之间同步变化的现象,是因为在这一阶段,所用的溶液中重金属离子浓度较高,虽然在GCL试样中渗透溶液与膨润土颗粒之间的接触仍然不够充分,但由于存在着较高的浓度梯度,重金属溶液可以使膨润土颗粒外扩散双电层大幅度压缩,进而导致其渗透系数增大;所以渗透系数的变化与自由膨胀量和液限之间的变化基本同步。



(a)  
注:  $y=a+b \cdot \exp(c \cdot x), R^2=0.79$   $y$ :渗透系数, cm/s  
 $x$ :自由膨胀量, mL/2 g  $a=4.18 \times 10^{-9}, \text{cm/s}$   
 $b=8.66 \times 10^{-6}, \text{cm/s}$   $c=-0.9, 2 \text{ g/mL}$



(b)  
注:  $y=a+b \cdot \exp(c \cdot x), R^2=0.96$   $y$ :渗透系数, cm/s  
 $x$ :液限, %  $a=3.45 \times 10^{-9}, \text{cm/s}$   
 $b=6.71 \times 10^{-4}, \text{cm/s}$   $c=-0.07, 1\%$

图5 自由膨胀量(a)和液限(b)与渗透系数之间的对应关系  
Fig. 5 Relationships between (a) free swell index and (b) liquid limits

基于以上结果,可以认为:当渗透溶液中重金属离子的浓度较高时(重金属浓度 $\geq 0.02$  mol/L),可以通过自由膨胀量和液限测定试验来代替渗透系数试验,进行GCL长期防渗性能变化规律的研究;但是,当渗透溶液中重金属离子浓度较低时(重金属浓度 $< 0.01$  mol/L),则不能使用自由膨胀量和液限测定试验来代替渗透试验进行GCL长期防渗性能变化规律研究;在这种情况下,为得到真实的结果,必须进行渗透系数测定试验。

### 3 结 论

1) 在自由膨胀和液限试验中,膨润土的自由膨胀量和液限随着重金属溶液中离子浓度的增大而不断减小。当溶液中重金属浓度在 0.01 mol/L 到 0.1 mol/L 之间变化时,自由膨胀量和液限的变化幅度较大;但当重金属离子浓度超过 0.1 mol/L 后,二者的变化幅度则很小。

2) 在渗透试验中,当渗透溶液中重金属离子浓度较低,如本试验所用 0.01 mol/L 时,GCL 的渗透系数并不会增大;但当重金属浓度超过此值时,GCL 的渗透系数会出现了 1~2 个数量级的升高。

3) GCL 渗透系数的变化趋势与自由膨胀量和液限的变化趋势之间存在着一定的对应关系;当渗透溶液中重金属离子浓度超过 0.02 mol/L 时,可以利用膨润土的自由膨胀量和液限变化趋势对 GCL 的长期防渗性能做出合理的预判。

#### 参考文献:

[1] Lange K, Rowe R K, Jamieson H. Diffusion of metals in geosynthetic clay liners[J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16(1): 11-27.

[2] Bouazza A, Gates W P. Overview of performance compatibility issues of GCLs with respect to leachates of extreme chemistry [J]. *Geosynthetics International*, 2014, 21(2): 151-167.

[3] Liu Y, Bouazza A, Gates W P, et al. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners to sulfuric acid solutions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(1): 14-23.

[4] Shackelford D, Sevick W, Eykholt R. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(2): 149-162.

[5] Angelica N, Takeshi K, Giancarlo F. Evaluation of mineral barriers against acid rock drainage [J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2012, 43(3): 35-42.

[6] Lange K, Rowe R K, Jamieson H. The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(2): 199-205.

[7] 徐红,龚时宏,赵树旗,等. GCL 柔性壁渗透仪测试过程中相关问题的探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 37-40.

Xu H, Gong S H, Zhao S Q, et al. The introduction of

GCL flexible wall permeameter and discussion for its focused problems during GCL hydraulic conductivity testing [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 37-40. (in Chinese)

[8] Lee J M, Shackelford C D, Benson C H, et al. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(11): 1319-1329.

[9] Takeshi K, Hiroyuki I, Masanobu O, et al. Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(1): 14-30.

[10] Lottermoser B G. *Mine Wastes* [M]. New York: Springer, 2007.

[11] Daniel D E, Bowders J J, Gilbert R B. Laboratory hydraulic conductivity testing of GCLs in flexible-wall permeameters [M]. // Well L W. *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners*. West Conshohocken: ASTM STP 1308, 1997, 208-226.

[12] 徐超,李志斌,高彦斌. 溶液特征对 GCL 膨胀和渗透特性的影响[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2009, 37(1): 36-40.

Xu C, Li Z B, Gao Y B. Influence of solution characteristics on swelling and hydraulic performance of geosynthetic clay liner [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(1): 36-40. (in Chinese)

[13] Young J H, Takeshi K, Benson C H, et al. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(7): 557-567.

[14] Xue Q, Zhang Q, Liu L. Impact of high Concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials [J]. *Materiales*, 2012(5): 2326-2341.

[15] Shackelford C D, Benson C H, Katumi T, et al. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18(2/3/4): 133-161.

[16] 周正兵,王钊,王俊奇. 离子交换对 GCL 防渗能力的影响[J]. *长江科学院院报*, 2002, 19(3): 37-40.

Zhou Z B, Wang Z, Wang J Q. Influence of ion exchange on hydraulic conductivity of GCL [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, 19(3): 37-40. (in Chinese)