

DOI: 10.11779/CJGE202101016

氨氮在土工合成黏土衬垫中的扩散行为研究

王 宝^{1,2}, 王泽峰^{3,2}, 窦桐桐¹, 赵亚峰¹, 葛碧洲¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 氨氮是垃圾渗滤液中最具代表性的污染物之一, 但其在土工合成黏土衬垫(GCL)中的扩散行为至今尚未得到重视。开展批式吸附试验和扩散试样浸提试验测定氨氮在GCL中的吸附分配系数; 进行扩散试验测定氨氮在GCL中的扩散系数; 基于试验得到的吸附分配系数和扩散系数, 使用数值软件 POLLUTE v7.0 对氨氮在GCL中的迁移行为进行模拟。试验结果表明, 氨氮在膨润土上的吸附分配系数为0.017 L/g, 在GCL中的扩散系数约为 $9.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。POLLUTE v7.0的模拟结果显示, 当考虑扩散存在时, 氨氮将提前30 a击穿GCL。

关键词: 土工合成黏土衬垫; 氨氮; 扩散; 吸附

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)01-0140-07

作者简介: 王 宝(1983—), 男, 讲师, 主要从事固体废物填埋处置方面的研究工作。E-mail: wangbao@xauat.edu.cn。

Diffusion of ammonium through a geosynthetic clay liner

WANG Bao^{1,2}, WANG Ze-feng^{3,2}, DOU Tong-tong¹, ZHAO Ya-feng¹, GE Bi-zhou¹

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi

Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055,

China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Ammonium is a typical pollutant encountered in municipal solid waste landfill leachate. However, there have been no researches about the diffusion behavior of ammonium in a geosynthetic clay liner (GCL) until now. A series of batch adsorption tests and diffusion specimen leaching tests are conducted to measure the distribution coefficient of ammonium onto bentonite. In addition, the diffusion tests are conducted to estimate the diffusion coefficient of ammonium in the GCL. Both the adsorption and diffusion coefficients are used in the POLLUTE v7.0 to simulate the mass transfer of ammonium through the GCL. The test results show that the distribution coefficients of ammonium onto bentonite is 0.017 L/g, and the diffusion coefficient through the GCL is $9.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. The simulated results obtained by the POLLUTE v7.0 show that the ammonium will break through the GCL about 30 years earlier when the diffusion behavior is considered.

Key words: geosynthetic clay liner; ammonium; diffusion; adsorption

0 引言

土工合成黏土衬垫(geosynthetic clay liners, GCLs)是一种将膨润土夹封在土工织物中间或胶黏在土工膜上而制成的防渗材料。由于具有现场铺设简单, 占用体积小以及价格相对低廉等诸多优点, GCL被广泛用于建造生活垃圾填埋场底部防渗层^[1-5]。已有研究表明, 在垃圾渗滤液作用下, GCL可以维持极低的渗透系数($1.0 \sim 3.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$)^[6-7]。但是, 这并不意味着GCL能够彻底阻隔污染物向外迁移。事实上, 在极低的渗透系数条件下, 垃圾渗滤液中的污染物仍然可以通过分子扩散(diffusion)的方式通过GCL^[8], 而且在极低的渗透系数条件下, 分子扩散还是污染物运移的主导方式^[9]。因此, 为了科学评估GCL对垃圾渗滤

液中污染物的截污性能, 有必要对污染物在GCL中的扩散行为进行研究。

Rowe等^[10]、Lake等^[11]率先开展了垃圾渗滤液中污染物在GCL中扩散行为研究, 他们以Cl⁻和Na⁺作为垃圾渗滤液中典型污染物, 研究二者在GCL中的扩散行为。Malusis等^[12]对Cl⁻和K⁺在GCL中的扩散行为进行了研究, 分析了浓度及有效应力对污染物扩散行为可能产生的影响。Ashmawy等^[13]开展了类似的研究, 以Cl⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺为研究对象, 分析了GCL孔隙比对污染物在GCL中扩散的影响。何

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41602291)

收稿日期: 2020-05-25

表1 试验用膨润土的基本性质^[21]

Table 1 Properties and mineralogy of bentonites in geosynthetic clay liner

界限含水率/%		膨胀指数 (mL·2g ⁻¹)	主要矿物质/%				阳离子交互容量 (meq·100g ⁻¹)
液限	塑限		蒙脱石	石英	斜长石	高岭石	
314	40	39	70.56	18.30	5.80	2.94	2.40

何俊等^[14]选择 Cl⁻、Ca²⁺ 和 Zn²⁺ 作为垃圾渗滤液中的代表性污染物, 研究它们在 GCL 中的扩散行为, 重点讨论 GCL 孔隙率对污染物扩散行为的影响。

垃圾渗滤液所含有机污染物在 GCL 中的扩散行为也受到了研究人员的关注。Lake 等^[15]率先研究了各类挥发性芳烃(苯和甲苯等)在 GCL 中的扩散行为, 给出了各个挥发性芳烃在 GCL 中的扩散系数。Paumier 等^[16]和 Mendes 等^[17]分别以挥发性有机物(苯和甲苯等)和酚类污染物(甲酚和五氯苯酚等)为对象, 重点讨论了 GCL 预水化过程以及膨润土性质等因素对污染物在 GCL 中扩散行为的影响。最近, Saheli 等^[18]对垃圾渗滤液中双酚 A(一种内分泌干扰素, 对人类脑发育和生殖系统发育具有危害)在 GCL 中的扩散行为进行了研究。

尽管垃圾渗滤液中众多污染物在 GCL 中的扩散行为已受到关注, 但是氨氮在 GCL 中的扩散行为至今还未得到研究。垃圾渗滤液中的氨氮主要来源于有机物, 特别是蛋白质类有机物的生化降解过程, 不仅浓度高^[19], 而且具有显著的生物毒性^[20], 因此, 氨氮已成为垃圾填埋场场地环境风险评价和污染控制工程中优先关注的污染物。为提高 GCL 截污性能评价的科学性, 有必要对氨氮在 GCL 中的扩散行为进行研究。

为此, 本文拟开展扩散试验, 研究氨氮在 GCL 中的扩散行为。要研究氨氮在 GCL 中的扩散行为, 必须首先确定氨氮在 GCL 中的吸附分配情况, 因此, 本研究还开展了批式吸附试验和扩散试样浸提试验, 测定了氨氮在膨润土上的吸附分配系数。

1 试验材料与方法

1.1 GCL 与膨润土的基本性质

研究使用的 GCL 购自某膨润土科技公司, 其所含膨润土为颗粒状天然钠基膨润土。该 GCL 的单位面积膨润土含量为 6000 g/m², 厚度为 5.2~5.7 mm; 其他有关膨润土的基本性质, 见表 1。其中, 界限含水率依据 ASTM D 4318-05 测定; 膨胀指数按 ASTMD 5890-06 测定; 主要矿物质含量采用 X 射线法测定; 阳离子交互容量按 ASTM D 7503-10 测定。批式吸附试验(batch test) 所用膨润土粉末取自 GCL: 将 GCL 的针刺线剪断, 取出膨润土, 在实验室内风干, 研磨后过 2 mm 土工筛, 筛下膨润土装入自封袋备用。

试验中所用氨氮溶液使用乙酸铵试剂配制(天津科密欧化学试剂有限公司)。之所以选用乙酸铵是因为垃圾渗滤液中氨氮主要来自于有机垃圾的降解过程, 而乙酸是有机垃圾降解的另一个主要产物^[20]。使用去离子水配制浓度为 100~2500 mg/L 的乙酸铵溶液(以 NH₄⁺计), 此浓度范围基本涵盖国内外主要垃圾填埋场渗滤液中氨氮的浓度。

1.2 GCL 水化膨胀厚度确定

污染物在 GCL 中的扩散行为与 GCL 的孔隙比直接相关^[11]。在填埋场中, 随着填埋垃圾厚度的不断增加, GCL 所承受的上覆荷载会逐渐增大, 在此情况下, GCL 会逐渐固结, 孔隙比不断下降, 扩散系数将随之减小。为保守考虑, 本文选择在较低有效应力(15 kPa)下进行扩散试验; 15 kPa 有效应力相当于渗滤液收集和导排系统以及第一层填埋垃圾作用在 GCL 上的荷载(此荷载可以被认定为是 GCL 在整个服役期间所承受的最低荷载)。

具体试验操作如下: 首先, 根据 ASTM D 6766^[22]中的方法, 从 GCL 卷材上切割直径为 101 mm 的圆形试样, 将其安装到柔性壁渗透仪中, 施加 15 kPa 有效应力, 使用蒸馏水对 GCL 进行历时 7 d 的连续渗透, 让其充分膨胀; 膨胀完成后, 将 GCL 从柔性壁渗透仪中取出, 使用游标卡尺在 GCL 的周边 6 个不同位置处测量其厚度, 取平均值作为 GCL 水化膨胀后的厚度。

1.3 扩散系数测定试验

从 GCL 卷材上切割直径为 101 mm 的 GCL 圆形试样并将其安装到自制的扩散系数测定仪中(图 1)。安装 GCL 试样时, 根据前述确定的 GCL 水化膨胀厚度, 在扩散系数测定仪的上筒和下筒之间预留一定空间(1.2 节中确定的 GCL 水化膨胀厚度), 以供 GCL 水化膨胀。通过液位调节管向扩散系数测定仪的下筒注入脱气去离子水, 直至去离子水渗透通过 GCL 并充满扩散系数测定仪上筒; 之后, 让 GCL 水化膨胀(为确保 GCL 完全水化膨胀, 此过程持续 28 d)。待水化膨胀完成后, 用注射器将扩散系数测定仪上筒中的去离子水抽出, 随后向其中注入浓度为 1500 mg/L 的乙酸铵溶液至完全充满; 关闭液位调节管上的阀门, 开始扩散试验。在试验过程中, 定期从上筒和下筒中取出 3 mL 溶液, 使用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)^[23]测定其中氨氮浓度, 绘制上下筒中氨氮浓度随时间变化曲线。为保持上下筒中溶液体积恒定, 每

次取样后，各补充 3 mL 去离子水。待上下筒溶液中氨氮浓度趋于稳定，停止试验。将 GCL 从扩散系数测定仪中取出，测量厚度并称重，样品装入自封袋，用于后续的氨氮吸附分配系数测定。

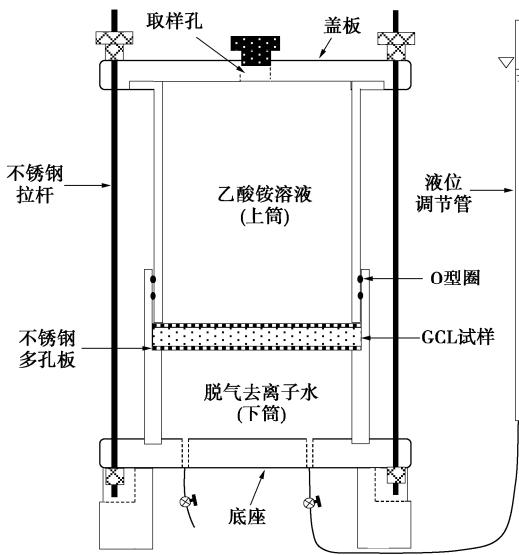


图 1 扩散系数测定仪示意图

Fig. 1 Schematic of diffusion test apparatus

1.4 分配系数测定试验

为了得到氨氮在 GCL 中的扩散系数，首先需要确定氨氮在 GCL 中的吸附分配系数^[14]。本文使用两种方法确定氨氮的吸附分配系数：批式吸附法和扩散后 GCL 试样浸提法（以下简称扩散浸提法）。批式吸附法测定氨氮的吸附分配系数参照 Roy 等^[24]的方法进行，具体操作过程如下：取多支洁净的 50 mL 聚乙烯塑料离心管，向各离心管加入 1.0 g（干质量）风干过筛后的膨润土，随后分别向各离心管注入 20 mL 不同浓度的乙酸铵溶液（100~2500 mg/L），形成土水比为 1:20 的膨润土悬液。将离心管的盖子拧紧后，固定到旋转振荡器上，设定转速为 30 rpm，在 23°C±2°C 温度下振荡 24 h（预先进行的动力学试验显示，膨润土对氨氮的吸附在 24 h 内可以完成）。待振荡完成后，将离心管取下，使用高速离心机在 10000 rpm 的转速下对膨润土悬液进行离心，持续时间为 10 min。取上清液，使用 0.45 μm 微孔滤膜对上清液进行过滤。最后，使用纳氏试剂分光光度法（HJ 535—2009）^[23]测定水样中氨氮的浓度。膨润土对氨氮的吸附量为

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \quad (1)$$

式中 q_e 为吸附平衡时单位质量膨润土吸附的氨氮的质量 (mg/g)； C_i 、 C_e 分别为试验溶液中氨氮初始浓度与平衡浓度 (mg/L)； V 为试验溶液的体积 (L)； W 为膨润土的质量 (g)。使用 Henry 公式 (线性) 对试验数据进行拟合，拟合直线的斜率便是氨氮在膨润

土上的吸附分配系数 K_{dp} 。

扩散浸提法测定氨氮吸附分配系数参照《土壤 氨氮、亚硝态氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取—分光光度法：HJ634—2012》^[25]进行，具体操作过程如下：首先将 1.2 节中使用的 GCL 样品两端的土工织物拆除，取出其中的膨润土芯；按圆心角 120° 将膨润土芯均分为 3 个面积相同的扇形。从每一个扇形样品中取出一定量膨润土，用于确定含水率。待含水率确定后，再从每块扇形膨润土样品中取出 3.0 g 膨润土（干质量）；将膨润土转移到 50 mL 的聚乙烯塑料离心管中，并向离心管中注入一定量的去离子水，形成土水比为 1:10 的土悬液；将离心管盖子拧紧后固定到旋转振荡器上，在室温 23°C±2°C 旋转 24 h；然后，使用高速离心机将膨润土悬液固液分离，倒掉离心管的上清液，保留其底部的膨润土；此操作主要是为了洗脱膨润土芯孔隙液中的氨氮。紧接着，向离心后的塑料离心管中注入 20 mL 浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液，拧紧离心管的盖子后，将其再次固定到旋转振荡器上，在 23°C±2°C 条件下振荡 24 h，离心，取上清液并测定其中氨氮的浓度；该操作的目的是测定膨润土黏粒上氨氮的吸附量 c_s 。膨润土液相中（孔隙液）中氨氮的浓度 c_{aq} 为扩散试验结束时扩散系数测定仪上下筒中氨氮浓度的平均值。氨氮在膨润土上的吸附分配系数 K_{dk} 为

$$K_{dk} = \frac{c_s}{c_{aq}} \quad (2)$$

2 GCL 中污染物扩散系数确定方法

污染物在 GCL 中的扩散系数通过反分析法确定。使用扩散系数测定仪进行试验时，污染物在 GCL 中的运移控制方程为

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = n D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \rho_d K_d \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3)$$

式中 c 为污染物在 GCL 中的浓度； z 为空间坐标； t 为时间坐标； n 为 GCL 中膨润土的孔隙率； D_e 为有效扩散系数； ρ_d 为 GCL 中膨润土的干密度； K_d 为污染物的吸附分配系数。

控制方程 (3) 的初始条件为

$$c(z, t) = 0 \quad (0 \leq z \leq h, t = 0) \quad (4)$$

控制方程 (3) 的边界条件：

(1) 上边界为有限质量边界。根据质量守恒原理， t 时刻上筒中污染物的量 c_s 等于初始量 c_{s0} 减去 t 时刻经过 GCL 上断面 ($z=0$) 进入到 GCL 中污染物的量和因取样分析取出的污染物的量，所以控制方程的上边界条件表示为^[10]

$$c_s(z,t) = c_{s0} - \frac{1}{h_s} \int_0^t f_s(t) dt - \frac{q_c}{h_s} \int_0^t c_s(z,t) dt \quad (z=0, t>0). \quad (5)$$

式中 c_{s0} 为扩散系数测定仪上筒中污染物初始浓度, 本文取 1500 mg/L; h_s 为上筒中溶液的高度, 本文取 70 mm; $f_s(t)$ 为任意时刻 t 进入到 GCL 中污染物的量; q_c 为每次取样分析时从上筒中取出的溶液的体积, 本研究设定为 3 mL。

(2) 下边界为恒定流速边界。根据质量守恒原理, t 时刻下筒中污染物浓度等于初始浓度加上 t 时刻经过 GCL 下断面 ($z=h$) 运移到下筒中污染物的量, 并减去因取样分析取出的污染物的量, 所以控制方程的下边界条件可以表示为^[10]

$$c_r(z,t) = c_{r0} + \frac{1}{h_r} \int_0^t f_r(t) dt + \frac{q_c}{h_r} \int_0^t c_r(z,t) dt \quad (z=h, t>0). \quad (6)$$

式中 c_{r0} 为扩散系数测定仪下筒中污染物初始浓度, 本文取 0; h_r 为下筒中溶液高度, 本文设定为 35 mm; $f_r(t)$ 为 t 时刻进入到下筒中污染物的量; q_c 为每次分析时从下筒中取出的溶液的体积, 本文设定为 3 mL。

因为 K_d 已通过批式吸附试验和扩散浸提试验确定, 控制方程(3) 中仅有一个未确定参数 D_e 。通过控制方程(3) 拟合扩散系数测定仪上下筒中污染物浓度随时间变化曲线便可得到 D_e 。这个拟合过程可以借助 POLLUTE v7.0 软件完成^[18, 26]。

3 试验结果与分析

3.1 分配系数测定试验结果

膨润土对氨氮的等温吸附试验结果示于图 2, 从图中可以看出, 在试验所用的氨氮浓度范围内 (100~2500 mg/L), 膨润土对氨氮的吸附量随着初始溶液中氨氮浓度的增大而不断增加。使用 Henry 方程 (线性) 对试验数据进行拟合, 得到拟合决定系数 R^2 为 0.97, 显然, Henry 方程能够较好地描述膨润土对氨氮的吸附过程。Xie 等^[27]在研究黄土对垃圾渗滤液中氨氮吸附特性时也发现, 黄土对氨氮的吸附过程可以使用 Henry 模型进行拟合。根据图中拟合直线的斜率, 可以得出氨氮的吸附分配系数 K_{dp} 为 0.017 L/g。

在扩散浸提法中, 测得膨润土固相中氨氮的吸附量 c_s 为 3.80 mg/g。扩散试验结束时上筒中氨氮浓度为 508.20 mg/L, 下筒中氨氮浓度为 346.35 mg/L, 平均值为 427.27 mg/L, 此值可视为氨氮在 GCL 孔隙溶液中的浓度 c_{aq} 。根据式(2), 可求得氨氮在膨润土上的吸附分配系数 K_{dk} 为 0.009 L/g。

以上试验结果显示, K_{dp} 大于 K_{dk} , 这与 Lange 等^[28]的研究相似, 他们在对膨润土中重金属的吸附分配系

数进行测定时也发现, 批式吸附法中测得的重金属吸附分配系数普遍大于扩散浸提法得到的吸附分配系数。 K_{dp} 之所以大于 K_{dk} , 可能是因为批式吸附法中膨润土颗粒充分分散, 能够与乙酸铵溶液完全接触, 所以氨氮吸附量偏高, 吸附分配系数偏大。而在扩散浸提法中, 由于 GCL 中膨润土芯是一个完整的试样, 部分膨润土颗粒无法与乙酸铵溶液接触, 不能吸附氨氮, 导致膨润土芯氨氮吸附量偏低, 吸附分配系数偏小。

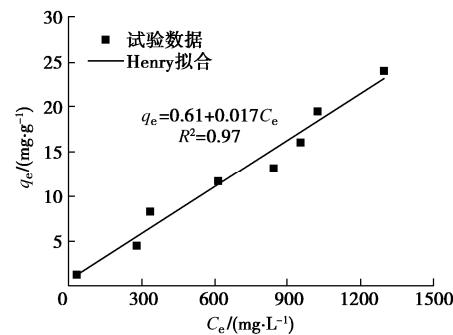


图 2 批式吸附试验结果

Fig. 2 Result of batch adsorption tests

3.2 扩散系数计算结果

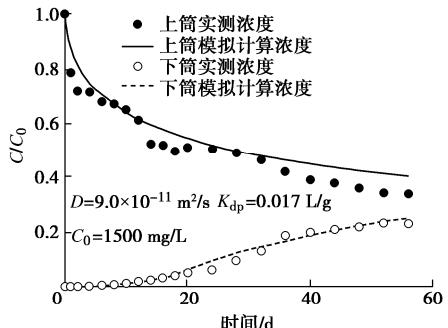
图 3 是扩散系数测定仪上下筒中氨氮浓度随时间的变化情况。图 3 中同时还给出了 POLLUTE v7.0 模拟结果: 图 3(a) 中的模拟曲线是使用批式吸附法所得的吸附分配系数 K_{dp} 进行模拟的, 据此反算得到的氨氮扩散系数为 $9.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$; 图 3(b) 中的模拟曲线是使用扩散浸提法所得的吸附分配系数 K_{dk} 进行模拟的, 反算得到的氨氮扩散系数为 $6.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。对比图 3(a), (b) 中拟合曲线和实测数据的接近程度可以看出, 图 3(a) 拟合的结果要优于图 3(b)。所以, 本研究中氨氮在 GCL 中的扩散系数应为 $9.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。这一数值与何俊等^[14]和 Lange 等^[28]测得的 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 在 GCL 和膨润土中的扩散系数非常接近。正如 Lange 等^[28]所报道, 污染物在 GCL 中的扩散系数可能存在一个数值范围, 大部分污染物在 GCL 中的扩散系数应该都在这个数值范围内, 大小变化可能只有几倍。

使用 K_{dp} 模拟的结果之所以会优于使用 K_{dk} 模拟的结果, 可能是因为, 在扩散试验中只有一部分膨润土 (扩散通道周围的膨润土) 参与氨氮的吸附, 而部分膨润土 (主要是死孔隙周围的膨润土) 则由于不能构成扩散通道, 无法对氨氮进行吸附。但是, 在将 GCL 样品拆散后进行吸附分配系数测定时, 这部分膨润土也包含在内, 它们的存在导致 K_{dk} 比氨氮在膨润土上的实际吸附分配系数偏小, 最终导致使用 K_{dk} 进行拟合所得结果与氨氮实际运移情况偏离较为严重。

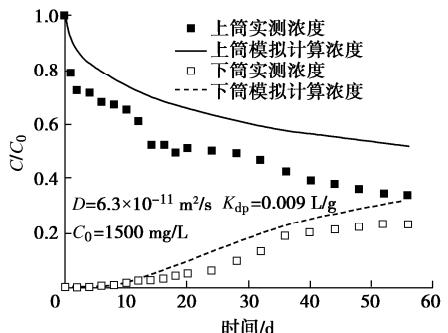
表 2 输入到 POLLUTE v7.0 的参数

Table 2 Input data for modeling ammonium transport through GCL using POLLUTE v7.0

参数	填埋场长 L/m	填埋场宽 W/m	垃圾填埋高度 H/m	填埋场中垃圾密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	单位质量垃圾中氨氮含量 $\omega/(g \cdot kg^{-1})$	渗滤液初始浓度 $c_0/(mg \cdot L^{-1})$	垃圾渗滤液深度 H_e/m	GCL 厚度 H_{Li}/m	GCL 中膨润土干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	GCL 中膨润土孔隙率 $n/(m \cdot s^{-1})$	GCL 渗透系数 $k/(m^2 \cdot s^{-1})$	氨氮在 GCL 上分配系数 $D_e/(m^2 \cdot s^{-1})$	氨氮在含水层扩散系数 $k_d/(m \cdot a^{-1})$	氨氮在含水层孔隙度 h_a/m	氨氮在含水层流速 $v_a/(L \cdot g^{-1})$	
数值	100	50	20	600	0.35	1500	0.30	0.075	0.79	0.73	5.0×10^{-11}	9.0×10^{-11}	0.017	5.0	0.3	5.0



(a) 使用批式吸附法获得的吸附分配系数进行拟合



(b) 使用扩散浸提法获得的吸附分配系数进行拟合

图 3 扩散系数测定仪上下筒中氨氮浓度变化趋势及模拟数值

Fig. 3 Observed and predicted change of ammonium with time during diffusion tests

3.3 氨氮在 GCL 中的运移模拟

为进一步阐明扩散在氨氮运移过程中所起到的作用,选取填埋场的典型参数,使用数值软件 POLLUTE v7.0 分别模拟考虑扩散作用和不考虑扩散作用时氨氮在 GCL 底部出流中浓度的变化情况。模拟的场景的模型如图 4 所示,其上边界选用 POLLUTE v7.0 软件中的有限质量边界,对应填埋场封场后氨氮总量不再增加的工况;下边界设定为固定流速边界,对应填埋场地下水恒定流动工况。

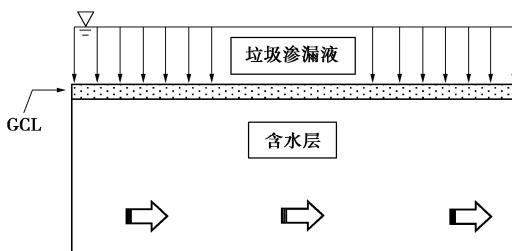


图 4 垃圾渗滤液运移通过 GCL 的模型

Fig. 4 Mathematical model for landfill leachate transport through GCL

POLLUTE v7.0 软件模拟时输入的具体参数见表 2。其中,垃圾填埋场的长度、宽度以及垃圾填埋高度均参考 Du 等^[29]以及 Saheli 等^[18]的研究进行设定;填埋场内垃圾的密度根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范: GB50869—2013》^[30]的要求设定。

垃圾渗滤液中氨氮浓度设定为 1500 mg/L,与本研究中扩散试验所使用的氨氮浓度相同。GCL 上部渗滤液的深度根据《生活垃圾填埋场污染控制标准: GB 16889—2008》^[31]的要求设定为 0.3 m。GCL 的渗透系数设定为 $5.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$,该值与《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范: CJJ113—2007》^[32]中的规定一致;GCL 的其他性质与本研究中扩散试验所用 GCL 的性质相同。

图 5 是考虑扩散作用和不考虑扩散作用时, GCL 底部出流中氨氮的浓度随时间变化情况。从图中可以看出,考虑扩散作用时, GCL 底部出流中氨氮的浓度快速升高,并在第 7 年达到峰值 514.70 mg/L;而不考虑扩散作用时,GCL 底部氨氮的浓度始终很低,在第 30 年时仅为 2.19 mg/L(垃圾填埋场封场后管理时间一般为 30 a)。若将 GCL 底部出流中氨氮浓度达到垃圾渗滤液中氨氮浓度的 10% (即 150 mg/L) 所需要的时间设定为 GCL 击穿时间^[33-34],从图 5 中可以看出,考虑扩散作用存在时,氨氮只需要 1.2 a 便可击穿 GCL;而忽略扩散作用存在时,在 30 a 内,氨氮都无法击穿 GCL。从以上分析可以看出,如果忽略了扩散作用的存在,对 GCL 截污性能的评价将极为不保守,由此将严重低估填埋场渗滤液中氨氮对地下水可能造成危害。

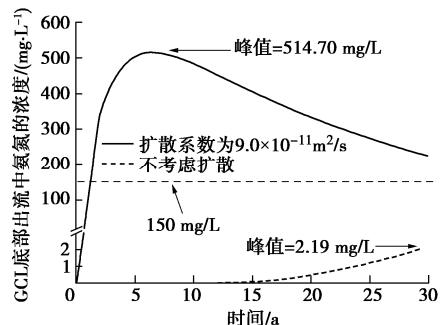


图 5 GCL 底部出流中氨氮浓度随时间变化情况

Fig. 5 Calculated concentration in outflow of GCL versus time

4 结 论

本文通过开展扩散试验、批式吸附试验和扩散试样浸提试验, 测定了氨氮在 GCL 中的扩散系数和吸附分配系数, 得出以下 3 点结论。

(1) 在批式吸附试验中, 氨氮的吸附分配系数为 0.017 L/g , 而在扩散试样浸提试验中氨氮的吸附分配系数为 0.009 L/g 。批式吸附试验中得到的吸附分配系数更适合用于反算氨氮的扩散系数。

(2) 氨氮在 GCL 中的扩散系数约为 $9.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(3) 考虑扩散作用存在时, 氨氮只需要 1.2 a 便可击穿 GCL; 而忽略扩散作用存在时, 氨氮在 30 a 内都无法击穿 GCL。因此, 在对 GCL 的截污性能进行评价时, 必须考虑扩散作用的存在, 否则评价结果将极为不保守。

参考文献:

- [1] 李志斌, 徐超. 竖向应力作用下 GCL 的膨胀特性和渗透性能[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1876 - 1880. (LI Zhi-bin, XU Chao. Swelling characteristics and hydraulic properties of GCLs under vertical stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1876 - 1880. (in Chinese))
- [2] 谢海建, 楼章华, 陈云敏, 等. 污染物通过 GCL/AL 防渗层的对流-弥散解析解[J]. 科学通报, 2010, 55(21): 2153 - 2163. (XIE Hai-Jian, LOU Zhang-hua, CHEN Yun-min, et al. An analytical solution to contaminant advection and dispersion through a GCL/AL liner system[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(21): 2153 - 2163. (in Chinese))
- [3] 谢海建, 詹良通, 陈云敏, 等. 我国四类衬垫系统防污性能的比较分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 133 - 141. (XIE Hai-jian, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 133 - 141. (in Chinese))
- [4] GUAN C, XIE H J, WANG Y Z, et al. An analytical model for solute transport through a GCL-based two-layered liner considering biodegradation[J]. Science of The Total Environment, 2014, 466/465/467: 221 - 231.
- [5] ROWE R K. Geosynthetic clay liners: Perceptions and misconceptions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(2): 137 - 156.
- [6] BRADSHAW S L, BENSON C H, RAUEN T L. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to recirculated municipal solid waste leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(2): 4015074.
- [7] RUHL J L, DANIEL D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 369 - 381.
- [8] SHACKELFORD C D. The ISSMGE Kerry Rowe Lecture: The role of diffusion in environmental geotechnics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51: 1219 - 1242.
- [9] 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 - 1921. (ZHANG Wen-jie, GU Chen, LOU Xiao-hong. Measurement of hydraulic conductivity and diffusion coefficient of backfill for soil-bentonite cutoff wall under low consolidation pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1915 - 1921. (in Chinese))
- [10] ROWE R K, LAKE C B, PETROV R J. Apparatus and procedures for assessing inorganic diffusion coefficients for geosynthetic clay liners[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(2): 206 - 214.
- [11] LAKE C B, ROWE R K. Diffusion of sodium and chloride through geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(2/3/4): 103 - 131.
- [12] MALUSIS M A, KANG J B, SHACKELFORD C D. Restricted salt diffusion in a geosynthetic clay liner[J]. Environmental Geotechnics, 2015, 2(2): 68 - 77.
- [13] ASHMAWY A K, MUHAMMAD N, ELHAJJI D. Advection, diffusion, and sorption characteristics of inorganic chemicals in GCL bentonite [C]// Waste Containment and Remediation, 2005, Austin.
- [14] 何俊, 施建勇, 廖智强, 等. 膨润土中离子扩散特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 831 - 835. (HE Jun, SHI Jian-yong, LIAO Zhi-qiang, et al. Test of ions diffusion in bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 831 - 835. (in Chinese))
- [15] LAKE C B, ROWE R K. Volatile organic compound diffusion and sorption coefficients for a needle-punched GCL[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(4): 257 - 272.
- [16] PAUMIER S, TOUZE-FOLTZ N, MAZEAS L, et al. Quantification of volatile organic compounds diffusion for virgin geosynthetic clay liners and for a GCL after contact with a synthetic leachate[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(11): 1039 - 1046.
- [17] MENDES M J A, TOUZE-FOLTZ N, GARDONI M, et al.

- Quantification of diffusion of phenolic compounds in virgin GCL and in GCL after contact with a synthetic leachate[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **38**: 16 – 25.
- [18] SAHELI P T, ROWE R K. Sorption and diffusion of bisphenol: A (BPA) through a geosynthetic clay liner (GCL)[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**(5): 731 – 738.
- [19] 姚海楠, 张立秋, 李淑更, 等. 厌氧铁氨氧化处理模拟垃圾渗滤液的影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(9): 2953 – 2963. (YAO Hai-nan, ZHANG Li-qiu, LI Shu-geng, et al. Study on the factors affecting simulated landfill leachate treatment by anaerobic ferric ammonia oxidation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(9): 2953 – 2963. (in Chinese))
- [20] KJELDSEN P, BARLAZ M A, ROOKER A P, et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2002, **32**(4): 297 – 336.
- [21] 王宝, 陈彬, 窦桐桐, 等. 干湿循环与垃圾渗滤液耦合作用下 GCL 防渗性能[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(2): 701 – 707. (WANG Bao, CHEN Bin, DOU Tong-tong, et al. Hydraulic performance of GCL under wet-dry cycling concurrent with municipal solid waste leachate permeation[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(2): 701 – 707. (in Chinese))
- [22] ASTM D 6766. Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions[S]. 2012.
- [23] 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 2009. (Water Quality Determination of Ammonia Nitrogen Nessler's Reagent Spectrophotometry: HJ 535—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [24] ROY W R, KRAPAC I G, CHOU S F J, et al. Batch-Type Procedures for Estimating Soil Adsorption of Chemicals[M]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 1991.
- [25] 土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取——分光光度法: HJ 634—2012[S]. 2012. (Soil-Determination of Ammonium, Nitrite and Nitrate by Extraction with Potassium Chloride Solution -Spectrophotometric Methods: HJ 634—2012 [S]. 2012. (in Chinese))
- [26] ROWE R K, MUKUNOKI T, SANGAM H P. Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m&p-Xylene, o-Xylene diffusion and sorption for a geosynthetic clay liner at two temperatures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(10): 1211 – 1221.
- [27] XIE H, WANG S, QIU Z, et al. Adsorption of NH₄⁺-N on Chinese loess: Non-equilibrium and equilibrium investigations[J]. Journal of Environmental Management, 2017, **202**: 46 – 54.
- [28] LANGE K, ROWE R K, JAMIESON H. Diffusion of metals in geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 2009, **16**(1): 11 – 27.
- [29] DU Y J, SHEN S L, LIU S Y, et al. Contaminant mitigating performance of Chinese standard municipal solid waste landfill liner systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(3): 232 – 239.
- [30] 生活垃圾卫生填埋处理技术规范: GB 50869—2013[S]. 2013. (Technical Code for Municipal Solid Waste Sanitary Landfill: GB 50869—2013 [S]. 2013. (in Chinese))
- [31] 生活垃圾填埋场污染控制标准: GB 16889—2008[S]. 2008. (Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste: GB 16889—2008[S]. 2008. (in Chinese))
- [32] 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范: CJJ 113—2007[S]. 2007. (Technical Code for Liner System of Municipal Solid Waste Landfill: CJJ 113—2007 [S]. 2007. (in Chinese))
- [33] 张文杰, 黄依艺, 张改革. 填埋场污染物在有限厚度土层中一维对流-扩散-吸附解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1197 – 1201. (ZHANG Wen-jie, HUANG Yi-yi, ZHANG Gai-ge. Analytical solution for 1D advection-diffusion-adsorption transport of landfill contaminants through a soil layer with finite thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1197 – 1201. (in Chinese))
- [34] 张文杰, 贾文强, 张改革, 等. 黏土-膨润土屏障中氯离子对流扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2076 – 2081. (ZHANG Wen-jie, JIA Wen-qiang, ZHANG Gai-ge, et al. Advection and dispersion of Cl⁻ in clay-bentonite barriers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2076 – 2081. (in Chinese))