

氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和扩散行为研究

王 宝, 朱佳佳, 张 迪, 王娟娟, 王泽峰

Adsorption and diffusion behavior of ammonium on bentonite modified loess liners

WANG Bao, ZHU Jiajia, ZHANG Di, WANG Juanjuan, and WANG Zefeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

黄土与其矿物颗粒表面水膜类型及其定量表征

Types of water film on the surface of loess and related mineral particles and their quantitative characterization

刘佳婷, 付昱凯, 李同录, 赵晨曦, 李萍, 侯晓坤, 胡向阳 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 105-113

黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

范文, 魏亚妮, 于渤, 邓龙胜, 于宁宇 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 144-156

典型地貌区原状黄土孔隙微观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies

刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

原状黄土土水特征滞后性研究

A study of hysteresis of soil and water characteristics of intact loess

康海伟, 李萍, 侯晓坤, 李同录, 夏增选, 张辉 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 76-83



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309041

王宝, 朱佳佳, 张迪, 等. 氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和扩散行为研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 202-209.
WANG Bao, ZHU Jiajia, ZHANG Di, et al. Adsorption and diffusion behavior of ammonium on bentonite modified loess liners[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 202-209.

氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和 扩散行为研究

王 宝^{1,2}, 朱佳佳¹, 张 迪¹, 王娟娟³, 王泽峰³

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 (西安建筑科技大学) 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: 膨润土改性黄土可以用作生活垃圾填埋场底部衬垫层。然而, 污染物在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和扩散行为尚不明确, 无法对该类衬垫层的截污性能进行准确评价。研究向黄土中掺入质量占比为 15% 和 30% 的膨润土, 通过开展批式吸附试验和扩散试验, 研究氨氮在改性衬垫层中的吸附和扩散行为。研究结果显示: 当膨润土的掺入量为 15% 时, 氨氮在改性衬垫层上的吸附量与纯黄土衬垫层相比没有明显变化, 但扩散速率下降了 400%; 当膨润土的掺入量达到 30% 时, 氨氮在改性衬垫层上的吸附量增加了 1.25 倍, 而扩散速率下降了 420%。Pollute v7.0 的模拟计算结果表明, 在对膨润土改性黄土衬垫层的截污性能进行评价时, 如果不考虑污染物的扩散行为, 评价结果将产生 3.50 ~ 4.75 倍误差; 而不考虑污染物的吸附行为, 则将产生 334 ~ 382 倍误差。研究成果可为膨润土改性黄土衬垫层的截污性能评价提供理论依据。

关键词: 黄土; 膨润土; 氨氮; 吸附; 扩散

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0202-08

Adsorption and diffusion behavior of ammonium on bentonite modified loess liners

WANG Bao^{1,2}, ZHU Jiajia¹, ZHANG Di¹, WANG Juanjuan³, WANG Zefeng³

1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Bentonite-modified loess has been used as bottom liner material for municipal waste landfills. However, because the diffusion and adsorption behavior of pollutants was not determined, the performance of the bentonite-modified losses could not be evaluated. Two bentonite-modified loess liners were tested in the present study, containing 15% bentonite and 30% (by weight) bentonite, respectively. A series of batch adsorption and diffusion tests were conducted to examine the adsorption and diffusion behavior of ammonium in bentonite-modified loess liner. The test results show that the addition of 15% bentonite could not increase the adsorption capacity of

收稿日期: 2023-09-13; 修订日期: 2023-10-24

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602291)

第一作者: 王宝 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事固体废物处理与处置方面的研究工作。E-mail: wangbao@xauat.edu.cn

ammonium on the modified liner, whereas it could decrease the diffusion coefficients of ammonium in the modified loess liner by about 400%. When 30% bentonite was added, the adsorption capacity of ammonium on the modified liner increased by a factor of 1.25, whereas, the diffusion coefficient dropped by about 420%. Pollute v7.0 model results show that it would produce 3.50 ~ 4.75 times errors if the diffusion behavior of pollutants were not taken into account when estimating the performance of the bentonite-modified liner. Whereas, there would be 334 ~ 382 times errors in the estimating of the modified liner performance if the adsorption behavior of pollutant was not considered. The results of the present study provide parameters for the evaluation of bentonite-modified loess liner performance.

Keywords: loess; bentonite; ammonium; adsorption; diffusion

在我国西北黄土高原地区, 绝大部分县城和乡镇的生活垃圾都是通过卫生填埋进行处置的。卫生填埋场的关键结构是底部的衬垫层。目前填埋场建设中广泛使用的衬垫层主要包括: 压实黏土衬垫层、土工膜和土工合成黏土衬垫层 (geosynthetic clay liner, GCL)^[1]。黄土高原地区黏土资源匮乏, 很难就地获取黏土用于建设压实黏土衬垫层, 而土工膜和 GCL 单独使用容易造成填埋场衬垫层边坡失稳, 另外, 其高昂的价格还会极大增加填埋场的建设成本^[2]。在此情况下, 研究人员使用膨润土对当地的黄土进行改性, 制出膨润土改性黄土衬垫层^[3-4]。

根据环境保护部门的要求, 膨润土改性黄土衬垫层在使用之前必须进行截污性能评价, 只有其截污性能满足要求时才可以在实际工程中使用^[5]。Lake 等^[6]、唐晓武等^[7]指出, 要进行衬垫层的截污性能评价就必须明确污染物在其内部的运移行为。污染物在衬垫层中的运移行为既包括对流, 也包括扩散和吸附。Du 等^[8]、张春华等^[9]、Tong 等^[10]的研究都显示, 明确污染物的扩散行为对衬垫层的截污性能评价极为重要。Shackelford^[11]的研究则表明, 是否考虑污染物的吸附行为, 将对衬垫层的截污性能评价产生重要影响。然而, 目前研究人员主要关注污染物在膨润土改性黄土衬垫层中的对流行为 (测定渗透系数), 而对污染物在衬垫层中的吸附和扩散行为缺少研究^[3, 12]。由于不能确定污染物的吸附和扩散行为, 目前还无法对膨润土改性黄土衬垫层的截污性能进行准确评价。

为此, 本研究开展批式吸附试验和扩散试验, 以垃圾渗滤液中典型污染物氨氮为对象^[13-16], 研究氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和扩散行为, 重点分析膨润土添加量对氨氮吸附和扩散行为的影响, 研究结果将为膨润土改性黄土衬垫层的截污性能评价提供基础参数。

1 试验材料与方法

1.1 黄土和膨润土的基本性质

研究使用的黄土取自陕西省西安市沱河南岸, 取土深度距离地表 2 ~ 3 m, 属于晚更新世 (Qp₃) 黄土, 土质均匀。研究使用的膨润土购自某膨润土科技公司, 属于颗粒型天然钠基膨润土。黄土和膨润土均在实验室内风干, 然后研磨过 2 mm 土工筛, 筛下土样装入自封袋用于后续试验, 二者基本性质见表 1。

表 1 黄土及膨润土基本性质
Table 1 The characteristics of loess and bentonite

土样	含水率/%	土粒密度 /(g·cm ⁻³)	阳离子交换容量 /(meq·0.01 g ⁻¹)	液限 /%	塑限 /%
黄土	22.32	2.69	8.42	30.2	17.8
膨润土	6.56	2.65	91.00	314.0	40.0

试验中所用氨氮溶液由乙酸铵配制, 乙酸铵购自天津科密欧化学试剂有限公司, 为分析纯。使用去离子水配制质量浓度为 100, 200, 500, 1 000, 2000, 3 000, 4 000, 5 000 mg/L 的乙酸铵溶液 (以 NH₄⁺ 计), 此质量浓度范围涵盖了填埋场渗滤液中氨氮的质量浓度。

1.2 批式吸附试验

开展批式吸附试验研究氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附行为^[17]。批式吸附试验参照《Standard test method for 24-h batch type measurement of contaminant sorption by soils and sediments》(D 4646—03)^[18] 进行操作。将风干过筛后的膨润土按照质量占比 15% 和 30% 的比例掺入黄土中, 制成混合土样, 分别命名为 H15 和 H30。称取 (2±0.01) g 混合土样并转移到体积为 50 mL 的洁净聚乙烯塑料离心管中。向各离心管中注入 40 mL 不同质量浓度的乙酸铵溶液, 形成固液比为 1 : 20 的土悬液。拧紧离心管的盖子后将其安装到旋转振荡器上, 在转速为 35 rpm, 温度为 (20±2) °C 的条件下连续振荡 24 h (前期预备试验显示, 氨

氮和土样之间的化学反应可以在 24 h 内达到平衡)。研究中同时使用纯黄土,命名为 H0,开展空白对照试验。振荡结束后,将离心管从旋转振荡器上取下,使用高速离心机在 8 000 rpm 的速度下离心 5 min,然后取上清液,过滤,使用《纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)^[19]测定上清液中氨氮的质量浓度。根据式(1)计算土样对氨氮的吸附量:

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

式中: Q_e ——平衡时土样所吸附的氨氮的浓度(以质量比形式计)/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);

C_i ——初始时溶液中氨氮的质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

C_e ——平衡时溶液中氨氮的质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

V ——溶液的体积/L,本研究中为 0.004 L;

W ——土样的质量/g,本研究中为 (2 ± 0.01) g。

为了获取土样对氨氮的吸附模式和吸附参数,用于后续污染物运移模拟,使用 Henry 模型、Freundlich 模型和 Langmuir 模型对吸附试验数据进行拟合。3 个模型的表达式如式(2)、式(3)、式(4)所示:

$$Q_e = K_d C_e \quad (2)$$

式中: K_d ——分配系数/($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$)。

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

式中: K_F ——Freundlich 常数,可反映土样对污染物的吸附能力, K_F 的值越大,吸附能力越强/($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$);

n ——吸附常数。

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

式中: Q_m ——最大吸附浓度(以质量比形式计)/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);

K_L ——吸附常数/($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.3 扩散试验

在制好的 H15 和 H30 土样中喷淋一定量蒸馏水,以达到击实试样的最优含水率,充分拌匀后装入保湿器内润湿 24 h。

使用自主设计的扩散仪进行扩散试验,扩散仪的结构如图 1 所示。试验过程如下:首先在扩散仪的下筒中安装不锈钢多孔板和滤纸,然后将一定质量润湿后的试样添加到其中,使用击实锤击实,待试样达到预定高度后停止击实(预先开展的试验表明,此时试样的渗透系数已达到最低)。随后,在试样的顶部安装不锈钢多孔板和滤纸,最后将扩散仪的上筒与下筒连接,并用拉杆固定。试样的基本性质如表 2 所示。研究中同时开展纯黄土的空白对照试验。

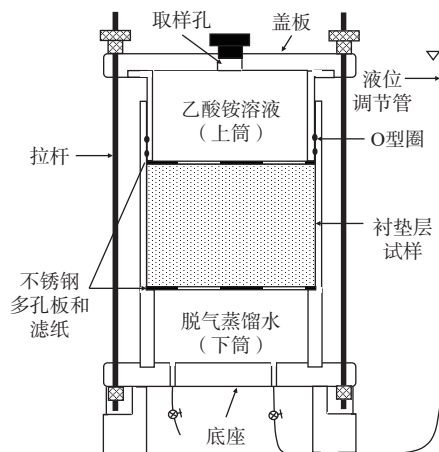


图 1 扩散仪结构示意图(修改自文献[20])

Fig. 1 Schematic diagram of the diffusion test apparatus (modified from Ref. [20])

表 2 扩散试验试样基本性质

Table 2 The characteristic of soil specimens used in the diffusion test

试样名称	试样组成	试样高度/cm	含水率/%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙率/%	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
H0	黄土+0%膨润土	4.0	18	1.54	29.60	3.06×10^{-9}
H15	黄土+15%膨润土	4.0	20	1.61	16.57	2.35×10^{-10}
H30	黄土+30%膨润土	4.0	23	1.50	24.14	2.40×10^{-10}

通过液位调节管向扩散仪下筒注入脱气蒸馏水,待蒸馏水缓慢通过试样并充满扩散仪的上筒后停止进水。关闭扩散仪下筒进水阀门,断开液位调节管,将扩散仪放入真空缸中抽真空饱和,时间持续 24 h。真空饱和完成后,将扩散仪从真空缸中取出,重新连接到液位调节管上(此时进水阀门仍处于关闭状态)。使用注射器将上筒中的溶液抽出,然后向其中注入质

量浓度为 2 000 mg/L 的乙酸铵溶液,开始扩散试验。

使用注射器定期从扩散仪上、下筒中各取 3 mL 溶液,随后向上、下筒中各补充 3 mL 蒸馏水。使用《纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)^[19]测定取出溶液中氨氮的质量浓度,绘制氨氮质量浓度随时间的变化曲线,使用 Pollute v7.0 对扩散试验数据进行拟合,计算扩散系数^[20]。

2 结果

2.1 吸附试验结果

批式吸附试验结果如图 2 所示。使用 Henry 模型(式 2)、Freundlich 模型(式 3)和 Langmuir 模型(式 4)对试验数据进行拟合, 结果见表 3。从表 3 可以看出, Henry 模型的拟合决定系数(R^2)介于 0.994 ~ 0.997, 高于 Freundlich 模型的 R^2 (0.932 ~ 0.988)和 Langmuir 模型的 R^2 (0.854 ~ 0.887)。另外, 表 3 还显示, H15 的 K_d 为 0.055 L/g, 与 H0 的 K_d (0.056 L/g)基本相同。

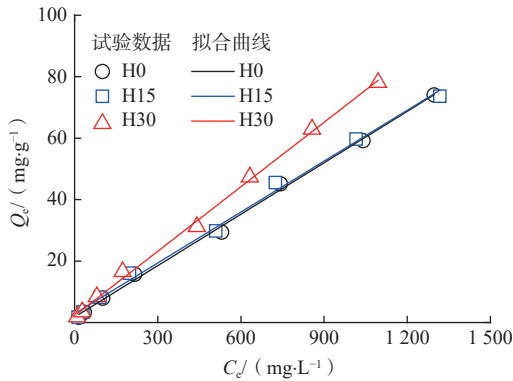


图 2 吸附试验数据及 Henry 模型模拟结果

Fig. 2 The experimental data and Henry model results for the adsorption tests

2.2 扩散试验结果

扩散试验结果如图 3 所示, H15 和 H30 所在扩散仪的上筒中氨氮质量浓度下降速率比 H0 有所减缓, 且膨润土的添加比例越大, 氨氮质量浓度下降的越慢。利用 Pollute v7.0 计算出氨氮在 H0、H15 以及 H30 中的扩散系数(D)分别为 1.8×10^{-10} , 4.5×10^{-11} , $4.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 。计算显示, 添加 15% 和 30% 膨润土后, 氨氮在衬垫层中的扩散速率降低了 400% 和 420%。

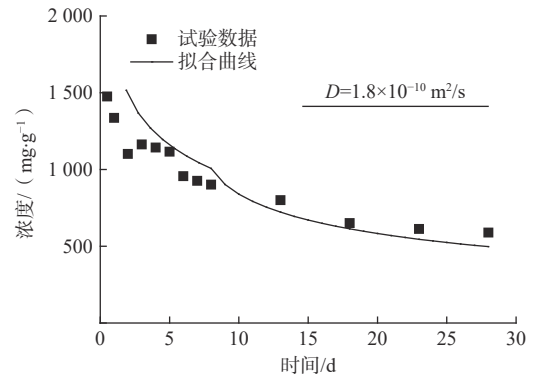
需要指出的是, 尽管 H30 试样和 H15 试样的孔隙率存在明显差别(24.14% 和 16.57%, 见表 2), 但氨氮在二者内部的扩散系数却非常接近(4.3×10^{-11} , $4.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$)。

图 4 是同时期开展的渗透试验试样内部的扫描电镜(SEM)照片。从图中可以看出, H0 内部黄土颗粒表面较为洁净, 颗粒间堆叠结构明显, 形成众多贯通孔隙。相反, 在 H15 和 H30 试样中, 可以看到黄土颗粒上或粒间存在大量膨润土颗粒。

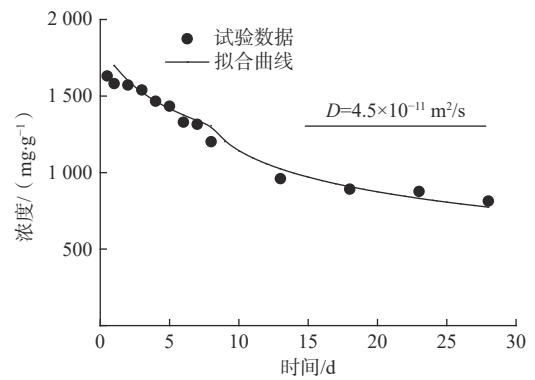
3 分析与讨论

3.1 添加膨润土对氨氮吸附行为的影响

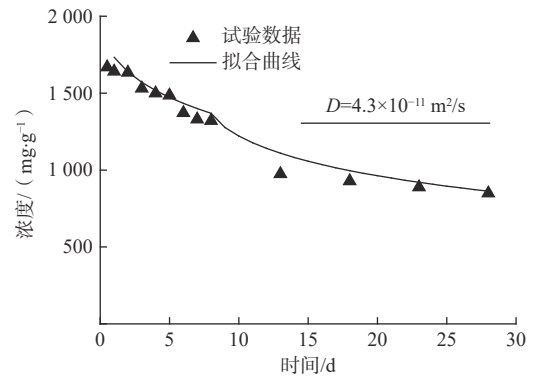
根据表 3 中 3 种模型的 R^2 , 可以推断氨氮在 3 个



(a) H0 试样



(b) H15 试样



(c) H30 试样

图 3 扩散仪上筒中氨氮质量浓度变化趋势及模拟结果

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

土样上的吸附过程均更符合 Henry 模型。需要指出的是, 氨氮在 H15 和 H30 上的吸附过程与 H0 相同, 这说明膨润土的添加不会改变氨氮在黄土上的吸附模式。

另外, 因为 H15 的 K_d (0.055 L/g)和 H0 的 K_d (0.056 L/g)基本相同, 这说明添加 15% 的膨润土未能提高土样(膨润土与黄土混合土样)对氨氮的吸附量。这一现象可用吸附过程中黄土释放出大量的 Ca^{2+} 来解释。黄土中含有大量的 Ca^{2+} , 进入溶液后, 可以与氨氮竞争膨润土表面的吸附点位, 抑制膨润土对氨氮

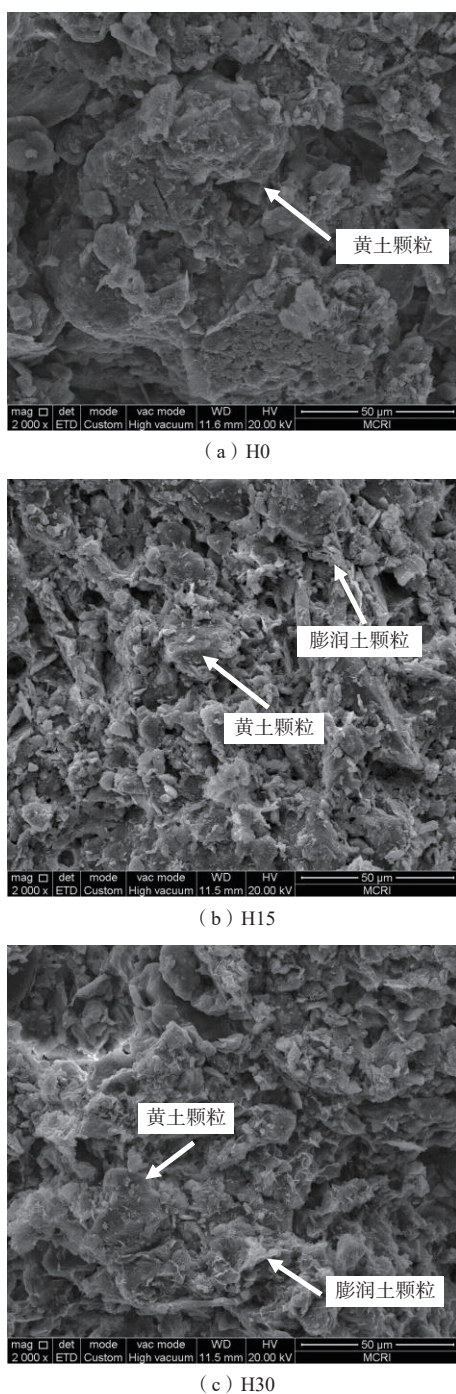


图 4 纯黄土及膨润土改性黄土试样内部电镜照片
(修改自文献 [21])

Fig. 4 The SEM for the loess and bentonite modified loess specimens (modified from Ref. [21])

的吸附,导致氨氮在土样上的吸附量无法增大。当膨润土的添加比例达到 30% 时,土样对氨氮的吸附量得到了一定程度的提高(H30 的 K_d 为 0.07 L/g,比 H0 提高了 1.25 倍)。这是因为:一方面膨润土吸附性能大于黄土(表 1),土样中膨润土比例提高,土样对氨氮的吸附能力必然增大;另一方面,土样中黄土比例下

降,其释放的 Ca^{2+} 的量减少,有利于土样对氨氮的吸附。

氨氮在土样上的吸附主要通过离子交换作用完成,土样中可交换阳离子主要有 Na^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 等^[22-23]。另外,因为黄土和膨润土颗粒表面均呈负电性,因此,氨氮还可以通过静电吸附作用吸附到土样表面^[24]。

3.2 添加膨润土对氨氮扩散行为的影响

添加膨润土后衬垫层中氨氮扩散速率下降主要归因于衬垫层内孔隙体积减小。对比 3 种土样的 SEM 结果(图 4)可以发现,在 H15 和 H30 试样中,黄土颗粒上及粒间存在膨润土黏粒,这些膨润土黏粒遇水后会急剧膨胀,充填黄土颗粒间的孔隙,使试样内部可供氨氮扩散的通道减少,导致扩散系数下降。另外,膨润土膨胀后还使得试样内部孔隙的曲折程度增加,也会造成氨氮扩散速率下降。

尽管试样 H15 与 H30 孔隙率存在差别,但扩散系数却相接近,这似乎与 Lake 等^[25] 的研究结果相矛盾,他们的研究结果显示,土样的孔隙率越小,污染物在其内部的扩散系数越低。之所以会出现这样的现象,可能是因为本研究中试样 H15 和 H30 均属于膨润土改性黄土试样,计算得到的孔隙率并不能反映其内部真实的孔隙分布情况(孔隙率是基于扩散试验开始之前试样的基本性质而得到的,但在扩散试验中,膨润土遇水会膨胀,导致试样孔隙体积减小)。由于 H30 试样中膨润土的比例更高,这些膨润土膨胀后能够填充更多的孔隙,所以 H30 试样中可供氨氮扩散的孔隙体积(可称之为有效孔隙)并不比 H15 多,因此,氨氮在二者内部的扩散系数没有显著差别。

3.3 氨氮吸附和扩散行为对衬垫层截污性能的影响

为了定量评价吸附和扩散行为在衬垫层截污性能评价中的作用,研究对 3 种不同工况下衬垫层的截污性能进行计算,即(1)对流;(2)对流+扩散;(3)对流+扩散+吸附。本研究中,衬垫层截污性能的强弱以污染物击穿衬垫层的时间进行衡量,击穿时间越长,衬垫层截污性能越强。计算模型如图 5 所示。

对于第(1)种工况,因只考虑对流,所以可直接采用达西定律进行击穿时间计算,计算公式如式(5):

$$t = \frac{L}{v} = \frac{L}{ki} \quad (5)$$

式中: t ——击穿时间/a;

L ——膨润土改性黄土衬垫层厚度/m,本研究中为 2 m;

表 3 吸附试验数据拟合结果
Table 3 The model result of adsorption test

样品	衬垫层材料	Henry模型		Freundlich模型			Langmuir模型		
		$K_d/(L \cdot g^{-1})$	R^2	$K_f/(L \cdot g^{-1})$	n	R^2	$K_L/(L \cdot g^{-1})$	$Q_m/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
H0	黄土+0%膨润土	0.056	0.997	0.085	1.040	0.953	0.002	82.382	0.887
H15	黄土+15%膨润土	0.055	0.994	0.103	1.066	0.932	0.001	95.280	0.887
H30	黄土+30%膨润土	0.070	0.997	0.105	1.049	0.988	0.002	73.830	0.854

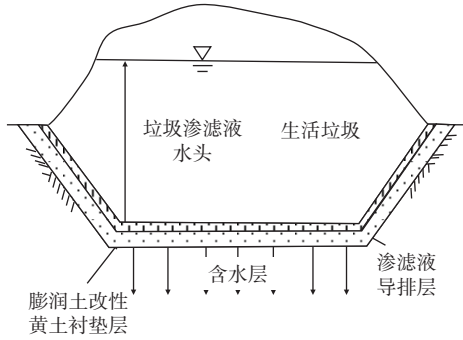


图 5 计算模型

Fig. 5 Computational model

v ——渗滤液流速/ $(m \cdot s^{-1})$;
 k ——膨润土改性黄土衬垫层的渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$;
 i ——膨润土改性黄土衬垫层上、下断面间的水力坡度。

$$t_{H15} = \frac{L}{v_{H15}} = \frac{L}{k_{H15}i} = \frac{2m}{2.35 \times 10^{-10} m/s \times \frac{20m + 2m}{2m}} = 7.74 \times 10^8 s \approx 24.53 a$$

$$t_{H30} = \frac{L}{v_{H30}} = \frac{L}{k_{H30}i} = \frac{2m}{2.40 \times 10^{-10} m/s \times \frac{20m + 2m}{2m}} = 7.58 \times 10^8 s \approx 24.02 a$$

对于工况(2)和工况(3), 本研究使用 Pollute v7.0 进行击穿时间计算。Pollute v7.0 是一款污染物运移计算软件, 被广泛用于填埋场衬垫层截污性能评价。计算时, 上边界设定为恒定质量浓度(2 000 mg/L, 与扩散试验相一致), 下边界设定为固定出流。以衬垫层底部含水层中氨氮质量浓度达到渗滤液中氨氮质量浓度的 10% 作为衬垫层被击穿的标准^[26-27]。模拟计算使用的其他参数列于表 4。

模拟计算结果列于表 5。对比工况(1)和工况(2)的计算结果可以发现, 考虑扩散时, 氨氮击穿衬垫层的时间缩短了 3.50~4.75 倍, 因此, 在进行衬垫层截污性能评价时, 如果不考虑扩散行为, 将高估衬垫层的截污性能。Shackelford^[11] 在研究 Cl 在衬垫层中的运移行为时也发现, 考虑扩散行为时, 计算得到的污染

表 4 输入到 Pollute v7.0 的参数

Table 4 The parameter used in Pollute v7.0

参数	H15	H30
填埋场长度/m	100.00	100.00
填埋场宽度/m	50.00	50.00
含水层厚度/m	3.00	3.00
地下水流速/ $(m \cdot a^{-1})$	0.10	0.10
渗滤液深度/m	20.00	20.00
渗滤液中氨氮质量浓度/ $(mg \cdot L^{-1})$	2 000.00	2 000.00
L/m	2.00	2.00
衬垫层干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	1.61	1.55
衬垫层孔隙率/%	16.57	24.14
$k/(m \cdot s^{-1})$	2.35×10^{-10}	2.40×10^{-10}
$D/(m^2 \cdot s^{-1})$	4.5×10^{-11}	4.3×10^{-11}
$K_d/(L \cdot g^{-1})$	0.055	0.070

物击穿衬垫层的时间要明显小于未考虑扩散时。将工况(2)和工况(3)的计算结果进行对比后可以看出, 考虑吸附时氨氮击穿衬垫层的时间比未考虑时延长了 334~382 倍, 因此, 在评估衬垫层截污性能时, 若忽视吸附行为, 将严重低估衬垫层的截污性能。

表 5 不同情形下氨氮击穿衬垫层的时间

Table 5 The breakthrough time of ammonium

试样	in liners /a		
	工况(1) 对流	工况(2) 对流+扩散	工况(3) 对流+扩散+吸附
H15	24.53	5.16	1 969
H30	24.02	6.86	2 294

需要指出的是, 本研究的模拟计算并未考虑衬垫层的裂隙, 因此, 是一种理想状态下的计算结果。在实际填埋场中, 衬垫层大多存在裂隙, 渗滤液可能沿着裂隙进行流动, 因此, 氨氮击穿衬垫层的时间将明显小于本研究的计算结果。

4 结论

通过开展批式吸附试验和扩散试验, 研究了氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附和扩散行为, 分析了膨润土添加量对氨氮吸附和扩散行为的影响。同时基于 Pollute v7.0 的模拟计算结果, 明确了吸附和扩

散行为在膨润土改性黄土衬垫层截污性能评价中的作用。结论如下:

(1) 氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的吸附行为符合 Henry 模式。

(2) 膨润土添加量为 15% 时, 衬垫层对氨氮的吸附量没有得到提高; 当膨润土添加量达到 30% 时, 氨氮的吸附量增加了 1.25 倍。

(3) 当膨润土的添加量为 15% 和 30% 时, 氨氮在衬垫层中的扩散速率比在纯黄土衬垫层中分别下降了 400% 和 420%。

(4) Pollute v7.0 的模拟计算结果显示, 如果不考虑污染物扩散行为, 将产生 3.50 ~ 4.75 倍的误差; 若不考虑吸附行为, 则会产生 334 ~ 382 倍误差。

氨氮在膨润土改性黄土衬垫层中的扩散和吸附行为还受到多种因素(如温度、荷载等)的影响, 未考虑扩散和吸附行为到底会给衬垫层截污性能评价带来多大误差还需要进一步开展试验验证。

参考文献 (References) :

- [1] 陈云敏, 谢海建, 张春华. 污染物击穿防污屏障与地下水污染防控研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 1 - 10. [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 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 冯世进, 高丽亚, 王印. 垃圾填埋场边坡上土工膜的受力分析 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1484 - 1489. [FENG Shijin, GAO Liya, WANG Yin. Analysis of tension of geomembranes placed on landfill slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1484 - 1489. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张虎元, 赵天宇, 吴军荣, 等. 膨润土改性黄土衬里防渗性能室内测试与预测 [J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1963 - 1969. [ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, WU Junrong, et al. Laboratory measurement and prediction to the permeability of bentonite-modified loess as a landfill liner[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1963 - 1969. (in Chinese with English abstract)]
- [4] WU Jiawei, XIE Haijian, ZHANG Chunhua, et al. Adsorption behavior of bisphenol A on bentonite-loess mixtures[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(4): 6360 - 6374.
- [5] CHALERMYANONT T, ARRYKUL S, CHAROENTHAISON N. Potential use of lateritic and marine clay soils as landfill liners to retain heavy metals[J]. Waste Management, 2009, 29(1): 117 - 127.
- [6] 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.
- [7] 唐晓武, 罗春泳, 陈云敏, 等. 粘土环境岩土工程特性对填埋场衬垫防渗标准的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1396 - 1401. [TANG Xiaowu, LUO Chunyong, CHEN Yunmin, et al. Effect of geoenvironmental characteristics of clay on standard of landfill liner[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1396 - 1401. (in Chinese with English abstract)]
- [8] DU Yanjun, LIU Songyu, LIN Chongde. Some factors controlling diffusive transport of potassium ion through clayey soils[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2006, 22(1): 106 - 111.
- [9] 张春华, 吴家葳, 陈赓, 等. 基于污染物击穿时间的填埋场复合衬垫厚度简化设计方法 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1841 - 1848. [ZHANG Chunhua, WU Jiawei, CHEN Yun, et al. Simplified method for determination of thickness of composite liners based on contaminant breakthrough time[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1841 - 1848. (in Chinese with English abstract)]
- [10] TONG Shan, SAMPLE-LORD K M. Coupled solute transport through a polymer-enhanced bentonite[J]. Soils and Foundations, 2022, 62: 101235.
- [11] SHACKELFORD C D. Transit-time design of earthen barriers[J]. Engineering Geology, 1990, 29(1): 79 - 94.
- [12] LIU Yangsheng, BAI Qingzhong, NIE Yongfeng. Properties of bentonite enhanced loess and laterite[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(1): 43 - 47.
- [13] 周睿, 吴玲, 簿丝, 等. 深圳简易垃圾填埋场水土环境污染指标识别 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1287 - 1294. [ZHOU Rui, WU Ling, BO Si, et al. Pollutant identification of water and soil of uncontrolled landfills in Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1287 - 1294. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 韩智勇, 许模, 刘国, 等. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(9):

- 2843 – 2852. [HAN Zhiyong, XU Mo, LIU Guo, et al. Pollutant identification and quality assessment of groundwater near municipal solid waste landfills in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2843 – 2852. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 孙启明, 高茂生, 党显璋. 垃圾填埋场渗滤液变密度地下水溶质运移模拟 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4): 1265 – 1274. [SUN Qiming, GAO Maosheng, DANG Xianzhang. Simulation of solute transport in variable-density groundwater for landfill leachate[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1265 – 1274. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘学浩, 邹金, 易秤云, 等. 基于地下水分层技术刻画污染场地水化学空间分布特征——以湖北某垃圾填埋场为例 [J]. *中国地质*, 2023: 1–19. [LIU Xuehao, ZOU Jin, YI Chengyun, et al. Spatial distribution characteristics of hydrochemistry in contaminated sites based on groundwater stratification technology: A case study of a landfill in Hubei Province[J]. *Geology in China*, 2023: 1–19. (in Chinese with English abstract)]
- [17] GUPT C B, BORDOLOI S, SEKHARAN S, et al. Adsorption characteristics of Barmer bentonite for hazardous waste containment application[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 396: 122594.
- [18] ASTM International. Standard test method for 24 h batch type measurement of contaminant sorption by soils and sediments: D 4646—03[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2008.
- [19] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. [Ministry of Environment of the People's Republic of China. Water quality-determination of ammonia nitrogen-nessler's reagent spectrophotometry: HJ 535—2009[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese)]
- [20] 王宝, 王泽峰, 窦桐桐, 等. 氨氮在土工合成黏土衬垫中的扩散行为研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 140 – 146. [WANG Bao, WANG Zefeng, DOU Tongtong, et al. Diffusion of ammonium through a geosynthetic clay liner[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 140 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王泽峰. 干湿循环作用下膨润土改良黄土劣化特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. [WANG Zefeng. Study on bentonite modified loess degradation characteristics under dry-wet cycles[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈延君, 王红旗, 赵勇胜, 等. 用改性膨润土作垃圾填埋场底部衬里的试验 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4): 437 – 440. [CHEN Yanjun, WANG Hongqi, ZHAO Yongsheng, et al. Test studies on using modified bentonite as the base bottom liner in the garbage landfill[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4): 437 – 440. (in Chinese with English abstract)]
- [23] XIE Haijian, WANG Shaoyi, QIU Zhanhong, et al. Adsorption of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ on Chinese loess: Non-equilibrium and equilibrium investigations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 202: 46 – 54.
- [24] ALSHAMERI A, HE Hongping, ZHU Jianxi, et al. Adsorption of ammonium by different natural clay minerals: Characterization, kinetics and adsorption isotherms[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 159: 83 – 93.
- [25] LAKE C B, ROWE R K. Diffusion of sodium and chloride through geosynthetic clay liners[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18(2): 103 – 131.
- [26] 詹良通, 刘伟, 曾兴, 等. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 1988 – 1996. [ZHAN Liangtong, LIU Wei, ZENG Xing, et al. Parametric study on breakthrough time of vertical cutoff wall for MSW landfills and simplified design formula for wall thickness[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(11): 1988 – 1996. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张文杰, 刘颖, 贾文强. 氯离子在黏土-膨润土屏障中迁移的离心试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2237 – 2242. [ZHANG Wenjie, LIU Ying, JIA Wenqiang. Centrifuge study of migration of Cl^- in clay-bentonite barriers[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2237 – 2242. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽