

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.02.017

氧化石墨烯作用下渗透土层中重金属铅离子的迁移特性试验研究

王岩¹, 张国强¹, 张鹏远¹, 孙文超¹, 邓尚¹, 徐辉¹, 陈龙², 白冰²

(1. 北京住总基础设施建设集团有限责任公司, 北京 101200;

2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 对一种氧化石墨烯工程材料在渗透土层中的迁移过程以及在其作用下渗透土层中重金属铅离子的迁移过程进行了研究。结果表明: 对于氧化石墨烯, 流速越大, 氧化石墨烯的初始浓度越大, 流出液中氧化石墨烯的浓度越大, 氧化石墨烯的初始浓度越小, 土体中残余的氧化石墨烯越少; 流出液中氧化石墨烯出现时的孔隙体积为 0.625, 与氧化石墨烯悬浊液浓度以及流速无关; 流出液中氧化石墨烯初次出现仅与注入溶液的体积相关; 对于铅离子, 初始铅离子的浓度越大, 流出液中铅离子的浓度越大, 但流速对流出液中铅离子的浓度无影响; 氧化石墨烯作为吸附剂时, 氧化石墨烯的浓度越大, 流速越高, 流出液中铅离子的浓度越大 ($PV > 3.25$), 土体中残余的铅离子越少。因此, 氧化石墨烯可以有效的吸附固化溶液中的铅离子, 可作为重金属离子净化剂应用。

关键词: 氧化石墨烯; 铅离子; 渗流试验; 净化特性; 迁移过程

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0115-06

Migration Characteristics of Heavy Metal Lead Ions in the Presence of Graphene Oxide Caused by Seepage

WANG Yan¹, ZHANG Guoqiang¹, ZHANG Pengyuan¹, SUN Wenchao¹,
DENG Shang¹, XU Hui¹, CHEN Long², BAI Bing²

(1. Beijing Resident General Infrastructure Construction Group Co., Ltd., Beijing 101200, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this work, migration process of graphene oxide in the permeable soil layer and the migration process of heavy metal lead ions in the permeable soil layer under the action of graphene oxide are analyzed. The results show that for graphene oxide, the greater the flow rate, the greater the initial concentration of graphene oxide, and the greater the concentration of graphene oxide in the effluent. The higher the flow rate, the smaller the initial concentration of graphene oxide, and the less residual graphene oxide in the soil. When graphene oxide appears in the effluent, the pore volume is 0.625, which is independent of the concentration of graphene oxide suspension and flow rate. The first appearance of graphene oxide in effluent is only related to the volume of injected solution. For lead ion, the greater the initial lead ion concentration, the greater the lead ion concentration in the effluent, while the flow rate has no effect on the lead ion concentration in the effluent. When graphene oxide is used as an adsorbent, the greater the concentration of graphene oxide, the higher the flow rate, the greater the concentration of lead ions in the effluent ($PV > 3.25$), and the less residual lead ions in the soil. Graphene oxide can effectively adsorb lead ions in the solidified solution, which is a potential purifying agent for heavy metal ions.

Keywords: graphene oxide; lead ions; seepage test; purification properties; migration process

收稿日期: 2022-12-01

修稿日期: 2022-12-27

基金项目: 北京市自然科学基金(8222023)

作者简介: 王岩(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通与隧道桥梁工程等方面工作。E-mail: 4500820@qq.com

通讯作者: 白冰(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程教学和科研工作。E-mail: bbai@bjtu.edu.cn

随着工业的迅速发展,工业废气、废液以及废渣的排放,环境中的重金属污染日益严重^[1-2]。重金属铅离子不仅会影响植物的生长还会危害人类的身体健康,故处理重金属污染是十分必要的^[3-4]。目前,学者修复铅离子污染土的主要方法是吸附法,利用吸附剂表面活性使污染土中的铅离子富集在吸附剂表面,达到修复污染土的目的,故吸附剂的性能决定了修复污染土的效果^[5]。

学者们研究了多种吸附剂对铅离子的吸附性能。Hamid 等^[6]以海泡石、有机肥和石灰作为复合吸附剂对土壤中的 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 进行吸附,发现在施用 2% (w/w) 的吸附剂时可显著提高土壤 pH 值,从而有效吸附 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 。Lyu Fei 等^[7]采用二氧化硅和氢氧化钠对赤泥改性,改性赤泥对 Pb^{2+} 的吸附性能明显提高,几乎是原赤泥的 10 倍。Pociecha 等^[8]采用 EDTA 去除土中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 和 As^{3+} ,去除率分别为 44%、20%、53% 和 61%。Glatstein 和 Francisca^[9]采用天然钠膨润土对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 进行吸附,并通过 Zeta 电位和沉降试验,发现离子强度对 Pb^{2+} 的去除影响较小。

相较于以上吸附剂,氧化石墨烯具有比表面积大和含氧官能团多的优点,其对重金属离子的吸附容量约为活性炭的 10 倍以上^[10-11]。Bao Shuangyou 等^[12]采用磁性氧化石墨烯吸附 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} ,在中性条件下对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的最大吸附量分别为 385.1 mg/g 和 128.2 mg/g。Jiang Yanji 等^[13]发现氧化石墨烯提高了 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的迁移能力,但 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 降低了氧化石墨烯的迁移能力。氧化石墨烯主要是通过离子交换、静电吸引以及表面络合来吸附铅离子^[14-15]。氧化石墨烯表面含氧官能团可以与重金属阳离子发生螯合反应产生络合物,从而去除溶液中重金属阳离子^[16-17]。Hu Zhongliang 等^[18]制备氧化石墨烯包裹的 Fe_3O_4 磁性复合材料,在 10 次吸附-解吸循环后仍能对 Pb^{2+} 保持 80% 的吸附容量,且该吸附材料可以循环利用。

目前关于氧化石墨烯对重金属吸附性能相关的研究较多,但关于氧化石墨烯在孔隙介质中的迁移特性以及氧化石墨烯作为吸附剂时,对重金属离子在孔隙介质中的迁移特性及其机理方面的研究较少。通过研究氧化石墨烯在饱和熔融石英砂的渗透迁移试验以及氧化石墨烯作为吸附剂铅离子在饱和熔融石英砂的渗透迁移试验来探究氧化石墨烯作用下渗透土层中重金属铅离子的迁移特性。

1 试验材料、仪器与方案

1.1 试验材料

试验采用熔融石英砂(河南铭海环保科技有限公司)作为基质,能够满足孔隙介质多孔构造,还原自然界中土体结构。由于石英砂物理、化学性质稳定,自然界中广泛存在,常作为建筑材料使用^[19]。试验为控制变量,进一步提高石英砂纯度,将高纯度天然石英颗粒,高温下热熔烧造后快速冷却,形成未充分结晶的玻璃质固体。在经过物理破碎、筛选后,得到粒径均一、无色透明颗粒状石英,即石英砂。熔融石英砂纯度较高, SiO_2 含量可达到 99.9%,比重为 2.21,常温常压下性质稳定,不会与酸、碱等腐蚀性物质反应,耐腐蚀,在高温或低温条件下物理化学性质稳定,熔点为 1 713℃,在试验条件下,可视为其性质状态稳定。试验中选用石英砂中位粒径为 1 mm~2 mm,用以模拟地层结构。试验开始前,用 0.05 mol/L 的氢氧化钠溶液和 0.05 mol/L 的硝酸溶液,对石英砂进行碱洗和酸洗,然后用去离子水多次清洗石英砂,直至清洗液 pH 值恒定时,可认为去除石英砂表面干扰离子完全。

重金属污染物作为试验中控制变量,不同种类重金属污染物,性质不同,作为试验中可选择变量,采用国内污染最普遍、最严重的重金属铅离子作为试验对象。重金属铅离子溶液用 $Pb(NO_3)_2$ 试剂配制而成,浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$,其中含有 5% 的 HNO_3 ,溶液呈酸性,密度为 4.53 g/cm^3 ,有毒,属于危险化学品,使用时需注意试验安全。

现阶段重金属污染物等化学萃取领域,乙二胺四乙酸(ethylenediaminetetraacetic, EDTA)作为一种被广泛使用、研究的萃取剂,具有较强重金属离子萃取能力。在常温常压条件下,EDTA 可以与多数重金属离子反应形成稳定螯合物,针对所有非岩石碎屑构成土体,均能得到高萃取率。由于 EDTA 在水溶液中的溶解度较小,因此常用二钠盐代替 EDTA,即 EDTA 二钠盐。本试验中选用(天津致远生产)EDTA 二钠盐,针对试验中铅离子具有非常好的螯合效果,螯合物性质稳定,对人体、生物毒性小。

1.2 试验仪器

试验所使用的长土柱内径 80 mm,总长 900 mm,分上、中、下三部分,每部分长 300 mm,各部分间有橡胶圈,保证各部分连接紧密,保障试验装置的密闭性。试验长土柱底部有 0.5 mm 筛网,使溶液正常流出,并阻挡石英砂,防止石英砂流出土柱。

用紫外可见分光光度计测量氧化石墨烯浓度。本试验选用紫外分光光度计工作波长为 190 nm ~ 1 100 nm,工作波长误差小于 0.5 nm,试验测定氧化石墨烯波长为 488 nm。用 TAS-990 石墨炉原子吸收分光光度计,测量波长为 283.31 nm,测定铅离子浓度。

萃取剂萃取铅离子过程中,为加快反应速度、提高萃取效率,使用震荡方法。试验使用 HY-6A 双层振荡器,分为两层,每层规格为 600 mm × 500 mm,试验时设置振荡幅度为 20 mm,振荡频率 100 次/min,持续工作 4 h。试验中需采用蠕动泵控制渗流液在石英砂基质中流速,选用 BT600-2J 型蠕动泵可调流量范围为 0.07 mL/min 到 2200 mL/min,满足试验流速(0.087 cm/s;0.173 cm/s;0.260 cm/s)对应所需流量(4.37 mL/s;8.69 mL/s;13.06 mL/s)。

1.3 土柱穿透试验

将经过酸洗、碱洗去除杂质离子的石英砂放在烘箱里烘干后,作为试验所用基质装入长土柱中。长土柱按照下、中、上三部分,由下至上依次装填石英砂。每部分分成 10 次进行装填,为保证长土柱石英砂基质为饱和状态,装填石英砂时需先加入去离子水,并保证液面高出石英砂 2 cm 左右,每次大约装入 237 g 石英砂并击实,装填完成后,长土柱干密度约为 1.57 g/cm³。

浓度氧化石墨烯悬浊液(0.05 g/L;0.10 g/L)和硝酸铅溶液(100 ng/mL;400 ng/mL)配制体积为 5 L 到 10 L 左右,导入恒温水浴箱中并且搅拌,保证试验过程中渗流液均一、温度恒定。根据试验计划分别注入氧化石墨烯悬浊液、第一阶段注入铅离子溶液第二阶段注入去离子水、第一阶段注入铅离子溶液第二阶段注入氧化石墨烯悬浊液,试验设置流速为 0.087 cm/s、0.173 cm/s 和 0.260 cm/s。

按照试验计划,分别连续接取 140 瓶或者 280 瓶流出液,并且观察渗流出液状态。渗流完成后,马上停止渗流,打开两端控制阀,将土柱内渗流液放出。并且分别在距离土柱顶端为 0 cm、30 cm、60 cm 和 90 cm 处取 30 g 石英砂样品。测量流出液中氧化石墨烯浓度或铅离子浓度。将渗流出的溶液按照顺序,依次测量其浓度,并测定取样处氧化石墨烯沉积量、铅离子残余量。测定取样位置处氧化石墨烯沉积量方法为:取样后使用 30 mL 去离子水反复冲洗,直至冲洗干净后,测量冲洗液中氧化石墨烯浓度,进而计算石英砂中氧化石墨烯沉积量。

2 结果与讨论

2.1 氧化石墨烯迁移的影响因素

氧化石墨烯在多孔介质中迁移受流速以及氧化石墨烯悬浊液浓度的影响。图 1 为不同流速下氧化石墨烯的对比穿透曲线。由图 1 可得流速越大,流出的氧化石墨烯悬浊液的浓度越大。流速越大,氧化石墨烯越不容易沉积从而流出液中的浓度也相对较大。在孔隙体积(PV:流出液的累积体积与土柱总孔隙体积的比值)小于 1 时,流出液中已有氧化石墨烯,是因为氧化石墨烯在溶液中扩散使得其穿透速度更快。氧化石墨烯出现时孔隙体积为 0.625,与流速无关。在孔隙体积 PV 等于 2.5 时,流出的氧化石墨烯悬浊液的浓度达到稳定。

图 2 为不同氧化石墨烯悬浊液浓度下氧化石墨烯的对比穿透曲线。由图 2 可得浓度越大,流出的氧化石墨烯悬浊液的浓度越大。不同浓度注入液流出液中氧化石墨烯的浓度之比较注入液浓度比值大。氧化石墨烯出现时孔隙体积为 0.625,与氧化石墨烯悬浊液浓度无关。综上,流速越快,注入氧化石墨烯的浓度越大,氧化石墨烯在多孔介质中穿透力越强,越不容易沉积。氧化石墨烯初次出现时刻仅与注入溶液的体积相关。

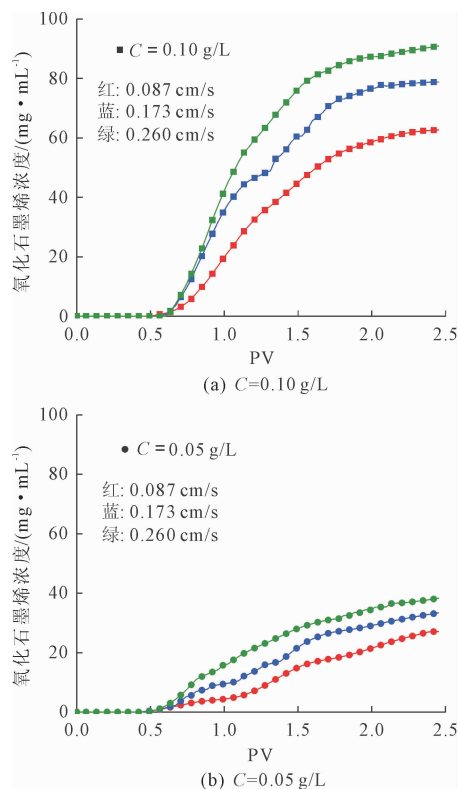


图 1 不同流速下氧化石墨烯的对比穿透曲线

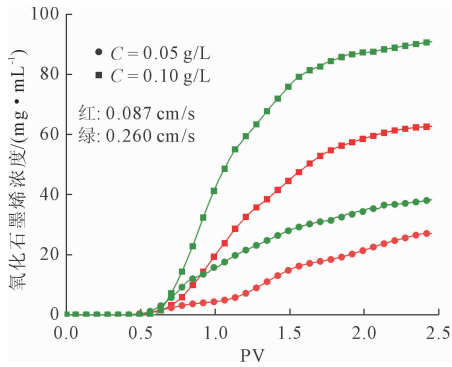


图 2 不同氧化石墨烯浓度下氧化石墨烯的对比穿透曲线

2.2 铅离子迁移过程的影响因素

铅离子在多孔介质中的迁移受流速以及铅离子溶液浓度的影响。进入多孔介质中的水量较小时迁移出的铅离子较少。随着注水量的增加,当 PV 为 0.625 时,流出液中出现铅离子,随 PV 增大,流出液中的铅离子浓度增大,并在 PV 为 1 时达到稳定,流出液中的铅离子浓度不变,水迁移铅离子的能力达到最大。随着注入去离子水的增加,流出液中的铅离子浓度降低直至接近于 0,去离子水对铅离子污染的土柱修复完成(见图 3、图 4)。

图 3 为不同流速下铅离子对比穿透曲线。由图 3 可知流速对流出液中铅离子的浓度无影响。流速会影响铅离子溶液与石英砂吸附解吸附的作用时间,但吸附解吸附反应很快,故流速对铅离子的穿透性无影响。

图 4 为不同初始铅离子浓度下铅离子对比穿透曲线。由图 4 可知铅离子的初始浓度越高,流出液中铅离子的浓度越高。由于非线性吸附解吸附特性,石英砂基质吸附铅离子呈非线性增长,铅离子吸附量之比小于注入铅离子浓度之比,流出液中铅离子峰值浓度比 5.5 大于注入溶液铅离子浓度比 4.0。

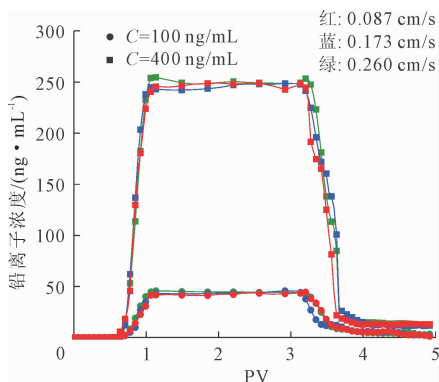


图 3 铅离子对比穿透曲线

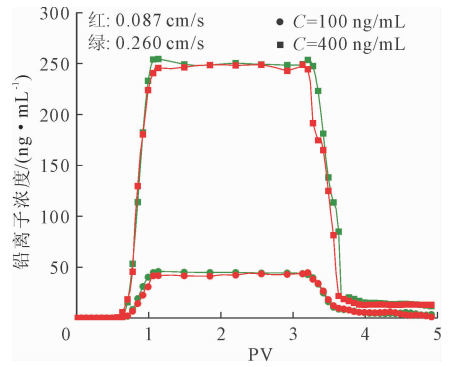


图 4 铅离子对比穿透曲线

2.3 氧化石墨烯去除铅离子的物理机制

氧化石墨烯作为吸附剂,其表面含氧官能团可以与重金属阳离子发生螯合反应产生络合物,去除溶液中重金属阳离子。吸附反应由吸附剂性质、被吸附物性质、作用时间以及吸附剂与被吸附物质浓度比等因素控制。

由图 5 可知,在 PV 小于 3.25 时,氧化石墨烯的浓度和流速对铅离子流出液的浓度无影响。在 PV 大于 3.25 时,氧化石墨烯浓度越大,铅离子流出液的浓度越大(见图 5)。

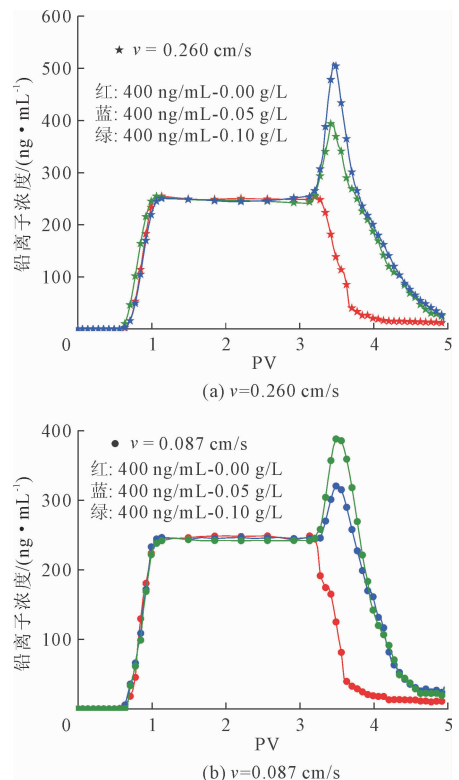


图 5 不同氧化石墨烯浓度下铅离子对比穿透曲线

氧化石墨烯浓度越大,发生反应吸附的铅离子越多,故流出液的铅离子浓度越大。使用去离子水

与氧化石墨烯悬浊液去除铅离子时,铅离子穿透曲线存在明显差异。使用氧化石墨烯悬浊液去除铅离子时铅离子穿透曲线存在明显的峰值强度。因为氧化石墨烯会吸附溶液中的铅离子,随流出氧化石墨烯浓度增大,其吸附的铅离子也在增多。流速越快,铅离子流出液的浓度相对越大。因为流速越大,流出液中氧化石墨烯浓度越大(见图1),而氧化石墨烯会吸附铅离子,故流出液的铅离子浓度越大(见图6)。初始铅离子浓度越大,流出液中铅离子的浓度越大(见图7)。

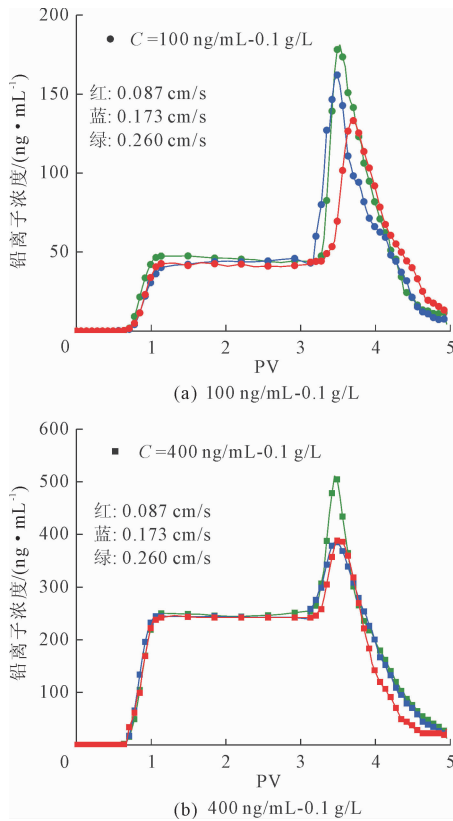


图6 不同流速下铅离子对比穿透曲线

2.4 氧化石墨烯残余量

氧化石墨烯残余量受流速以及注入的氧化石墨烯的浓度的影响。在流速相同时,注入的氧化石墨烯的浓度越大,氧化石墨烯的残余量越大(见图8(a))。距离越远,注入的氧化石墨烯的浓度对其残余量的影响越小,在最远端残余量差异不大。流速越大,氧化石墨烯越不容易沉积,其迁移能力越强,氧化石墨烯的残余量越小(见图8(b))。

2.5 铅离子残余量

铅离子残余量与氧化石墨烯浓度以及流速有关。流速主要影响流出液中氧化石墨烯浓度,而氧化石墨烯会吸附铅离子,从而影响铅离子的残余量。

随氧化石墨烯浓度增大,铅离子的残余量降低(见图9(a)),所以氧化石墨烯可以有效的吸附固化铅离子。使用氧化石墨烯作为吸附剂时,随流速的增大,铅离子的残余量降低(见图9(b))。

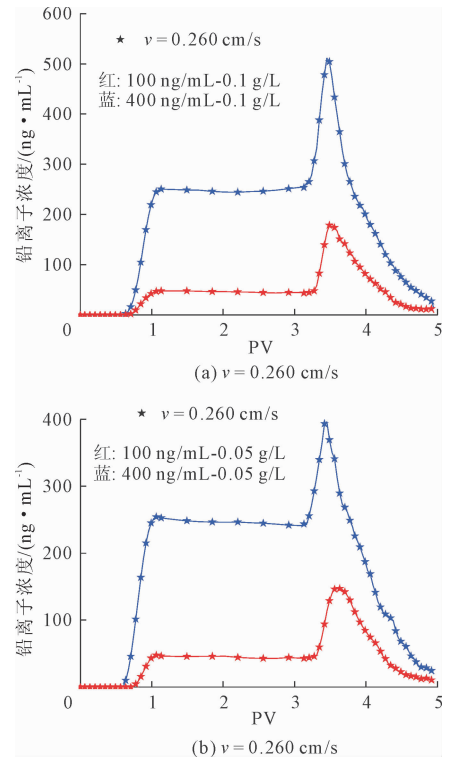


图7 不同初始铅离子浓度下铅离子对比穿透曲线

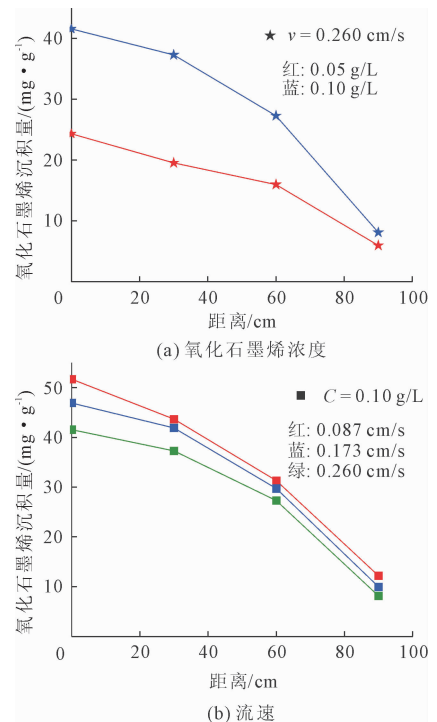


图8 氧化石墨烯残余量

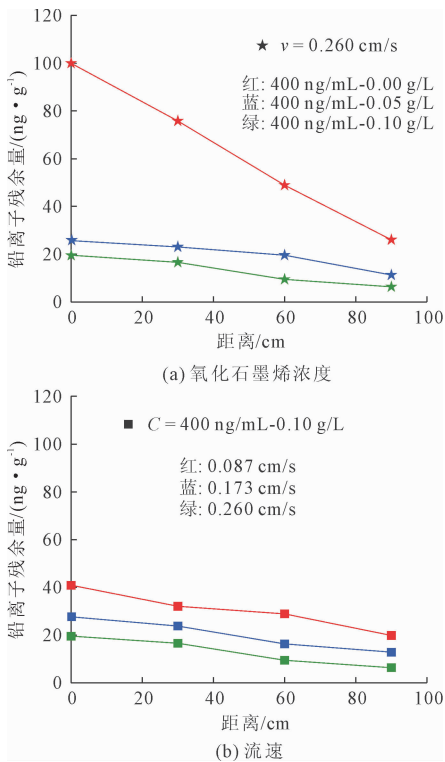


图9 铅离子残余量

3 结论

对于氧化石墨烯,流速越大,氧化石墨烯的初始浓度越大,流出液中氧化石墨烯的浓度越大。流速越大,氧化石墨烯的初始浓度越小,土体中残余的氧化石墨烯越少。流出液中氧化石墨烯初次出现仅与注入溶液的体积相关。在流速相同时,注入的氧化石墨烯的浓度越大,氧化石墨烯的残余量越大。距离越远,注入的氧化石墨烯的浓度对其残余量的影响越小,在最远端残余量差异不大。流速越大,氧化石墨烯的残余量越小。

对于铅离子,初始铅离子的浓度越大,流出液中铅离子的浓度越大。流速对流出液中铅离子的浓度无影响。石英砂基质吸附铅离子呈非线性增长,铅离子吸附量之比小于注入铅离子浓度之比。去离子水修复污染土柱后,铅离子残留量随着深度的增加而减小。

在 PV 小于 3.25 时,氧化石墨烯的浓度和流速对铅离子流出液的浓度无影响。在 PV 大于 3.25 时,氧化石墨烯浓度越大,流速越高,流出液中铅离子的浓度越大,进而土体中残余的铅离子越少。氧化石墨烯可以有效的吸附固化溶液中的铅离子。

参考文献:

[1] Xu Yanzhe, Fang Zhanqiang, Tsang Eric Pokeung. In si-

tu immobilization of cadmium in soil by stabilized biochar-supported iron phosphate nanoparticles [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (19):19164-19172.

- [2] Bogusz A, Oleszczuk P, Dobrowolski R. Application of laboratory prepared and commercially available biochars to adsorption of cadmium, copper and zinc ions from water[J]. Bioresour Technology, 2015,196:540-549.
- [3] Chen Lihuo, Ramadan A, Lu Lili, et al. Biosorption of methylene blue from aqueous solution using lawn grass modified with citric acid[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011,56(8):3392-3399.
- [4] Igalavithana A D, Kwon E E, Vithanage M, et al. Soil lead immobilization by biochars in short-term laboratory incubation studies[J]. Environment International, 2019, 127:190-198.
- [5] Rafatullah M, Sulaiman O, Hashim R, et al. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents; A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,177(1-3):70-80.
- [6] Hamid Y, Tang Lin, Hussain B, et al. Adsorption of Cd and Pb in contaminated gleysol by composite treatment of sepiolite, organic manure and lime in field and batch experiments[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,196:110539.
- [7] Lyu Fei, Niu Sulin, Wang Li, et al. Efficient removal of Pb(II) ions from aqueous solution by modified red mud [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 406: 124678.
- [8] Pocięcha M, Lestan D. Recycling of EDTA solution after soil washing of Pb, Zn, Cd and As contaminated soil [J]. Chemosphere, 2012,86(8):843-846.
- [9] Glatstein D, Francisca F. Influence of pH and ionic strength on Cd, Cu and Pb removal from water by adsorption in Na-bentonite [J]. Applied Clay Science, 2015, 118:61-67.
- [10] Mehmeti V, Halili J, Berisha A. Which is better for Lindane pesticide adsorption, graphene or graphene oxide? An experimental and DFT study [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022,347:118345.
- [11] Bai Bing, Nie Qingke, Zhang Yike, et al. Cotransport of heavy metals and SiO₂ particles at different temperatures by seepage[J]. Journal of Hydrology, 2021,597: 125771.
- [12] Bao Shuangyou, Yang Weiwei, Wang Yingjun, et al. One-pot synthesis of magnetic graphene oxide composites as an efficient and recoverable adsorbent for Cd(II) and Pb(II) removal from aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,381:120914.

降水开挖、新建桥墩的浇筑与加载。

(4) 当邻近既有高铁线桥梁段施工距离在 60 m 以上时,对既有高铁线几乎没有影响;在距离为 12 m~60 m 时,影响较小;在距离为 1.8 m~12.0 m 时,影响较大;在距离为 1.8 m 以下时,会产生很大影响。

参考文献:

- [1] Liyanapathirana D S, Nishanthan R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016,52:168-181.
- [2] Shakeel M, Ng C W W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018,96:55-72.
- [3] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2007,29(5):638-643.
- [4] 王菲,嵯一. 基坑开挖对既有铁路桥基础变位的影响分析[J]. *铁道工程学报*, 2012,29(8):28-33.
- [5] 苗笛. 基坑开挖对邻近桥梁影响的数值模拟[J]. *港工技术*, 2014,51(5):76-79.
- [6] 王木群. 基坑开挖对临近桥桩的影响及基坑稳定性分析[J]. *中外公路*, 2014,34(3):197-200.
- [7] 高东,汪东林. 基坑开挖对临近高架桥桩的影响[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2017,35(3):435-438.
- [8] 鲁宇威. 基坑开挖对临近高架桥承台基础的影响数值模拟研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2020,56(8):24-28.
- [9] 金宏刚,蔡连波,胡敏云. 基于有限元模型的深基坑开挖对邻近桥梁的影响分析[J]. *科学技术创新*, 2020(35):140-142.
- [10] 陈聪,王增吉. 基坑开挖对临近市域铁路高架桥影响的有限元分析[J]. *工程建设与设计*, 2021(7):39-41.
- [11] 陈金祥,於方莹,吴杰良. 基坑开挖对邻近桥梁承台影响的数值分析研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2015,11(8):157-159.
- [12] 高立刚,宁贵霞. 基坑开挖深度对既有铁路线变形的影响分析[J]. *南阳理工学院学报*, 2016,8(2):102-105.
- [13] 罗光财,蒋彪,汪庆桃,等. 穿越运营地铁车站的基坑开挖及对既有线的影响[J]. *市政技术*, 2017,35(2):158-161,165.
- [14] 胡军. 深基坑开挖对邻近既有高铁桩基影响研究[J]. *铁道工程学报*, 2017,34(6):12-17,22.
- [15] 孟繁增. 基坑开挖引起邻近高铁桥墩隆起变形实例分析[J]. *铁道标准设计*, 2020,64(4):98-103.
- [16] 铁路工程沉降变形观测与评估技术规程: Q/CR 9230—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [17] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(上接第 120 页)

- [13] Jiang Yanji, Zhang Xiongxiang, Yin Xianqiang, et al. Graphene oxide-facilitated transport of Pb^{2+} and Cd^{2+} in saturated porous media[J]. *Science of The Total Environment*, 2018,631-632:369-376.
- [14] Li Fen, Jiang Xue, Zhao Jijun, et al. Graphene oxide: A promising nanomaterial for energy and environmental applications[J]. *Nano Energy*, 2015,16:488-515.
- [15] Ramesha G K, Kumara A, Muralidhara H B, et al. Graphene and graphene oxide as effective adsorbents toward anionic and cationic dyes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011,361(1):270-277.
- [16] Bai Bing, Rao Dengyu, Chang Tao, et al. A nonlinear attachment-detachment model with adsorption hysteresis for suspension-colloidal transport in porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,578:124080.
- [17] Bai Bing, Jiang Sichen, Liu Lulu, et al. The transport of silica powders and lead ions under unsteady flow and variable injection concentrations[J]. *Powder Technology*, 2021,387:22-30.
- [18] Hu Zhongliang, Qin Shilin, Huang Zhi, et al. Recyclable graphene oxide-covalently encapsulated magnetic composite for highly efficient $Pb(II)$ removal[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017,5(5):4630-4638.
- [19] Ghosh D, Chakraborty K, Bharti, et al. The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022,647:129025.