·监测技术·

低碳地聚合物应急阻隔屏障材料的 3D 打印性能

冯亚松[1,2],王水[1,2],李梦雅[1,2],尹芝华[1,2],吕宗祥[1,2]

(1. 江苏省环境科学研究院,江苏省环境工程重点实验室,江苏　南京　210036;
2. 江苏省土壤与地下水污染防控工程研究中心,江苏　南京　210036)

摘　要:通过流动度、可建造性和可打印时间测试,研究了玄武岩纤维、聚氨酯协同改性对低碳固废源地聚合物阻隔屏障材料 3D 打印性能的影响规律。结果表明,在玄武岩纤维掺量为 0~0.8%、聚氨酯掺量为 0~8%条件下,玄武岩纤维和聚氨酯协同改性不会显著影响打印材料的流动度,改性打印材料流动度处于 170 mm~190 mm;打印结构的横向变形指标、垂向变形指标均可以有效表征打印材料可建造性,且玄武岩纤维(<0.6%)和聚氨酯(<6%)协同改性对打印材料的可建造性影响微弱;聚氨酯改性可延长打印材料的可打印时间,当聚氨酯掺量为 6%时,可打印时间最长。

关键词:地聚合物;阻隔屏障;3D 打印;低碳材料;打印性能

中图分类号:X53;TP391.73　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0067-05

3D Printing Performance of Low-carbon Geopolymer as An Emergency Barrier Material

FENG Yasong[1,2], WANG Shui[1,2], LI Mengya[1,2], YIN Zhihua[1,2], LYU Zongxiang[1,2]

(1. *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering*, *Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210036, *China*; 2. *Jiangsu Provincial Engineering Research Centre of Soil and Groundwater Pollution Prevention and Control*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210036, *China*)

Abstract: The influence of the synergistic modification of basalt fiber and polyurethane on the 3D printing performance of low-carbon solid waste-derived geopolymer barrier material was investigated by testing fluidity, buildability and printable time. The results indicated that the synergistic modification of adding 0 to 0.8% basalt fiber and 0 to 8% polyurethane did not significantly affect the fluidity of the printable geopolymer, which ranged from 170 mm to 190 mm. Both the lateral and vertical deformation indicators of the printed structure could effectively characterize the buildability of the printable geopolymer, and the synergistic modification of basalt fiber (<0.6%) and polyurethane (<6%) had a weak effect on the buildability of the printable geopolymer. Polyurethane modified printing geopolymer could extend the printing time, and the longest printing time could be achieved when the amount of polyurethane added was 6%.

Key words: Geopolymer; Barrier; 3D printing; Low-carbon material; Printing performance

突发土壤和地下水污染会造成周边环境质量下降,须采取紧急措施予以应对[1-3]。阻隔屏障能够有效阻断污染物暴露途径,是污染场地风险管控最常用的技术[4]。与常规污染场地风险管控不同,突发土壤和地下水污染应急处置要求阻隔屏障建造过程少人化,阻隔屏障力学强度大、韧性好。结合我国当前减污降碳协同增效和无废城市建设的国家战略需求,研究人员尝试将大宗工业废弃物应用于污染场地治理[5-7]。虽然以钢渣、电石渣等为主要组分的低碳固废源地聚合物材料具有胶凝特性[5],能够

收稿日期:2024-09-10;**修订日期**:2025-10-29

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2022YFC3702500);江苏省环境工程重点实验室自主课题基金资助项目(ZX2023003);中国博士后科学基金资助项目(2022M711397,2024T170359)

作者简介:冯亚松(1987—),男,河北保定人,高级工程师,博士,研究方向为场地污染土壤与地下水绿色低碳防治。

实现场地污染快速阻隔,但应急处置过程中阻隔屏障承受的外界车辆荷载重、外力冲击频次高,尚须提升该类材料的韧性。用玄武岩纤维和聚氨酯对地聚合物材料进行改性,能够显著改善阻隔屏障材料的力学特性,增强阻隔屏障的服役性能。

3D 打印技术建造周期短、材料损耗少,在建筑、环境监测领域已被应用[8-10]。3D 打印可以实现阻隔屏障自动化、少人化建造,且可以根据污染程度灵活设计阻隔屏障厚度。打印材料的流动度、可建造性、可打印时间等和易性指标是阻隔屏障打印质量控制的关键[8]。今通过测试 3D 打印材料的流动度、可建造性及可打印时间等指标,研究聚氨酯和玄武岩纤维掺量对地聚合物 3D 打印材料施工和易性的影响规律,以期为固废源地聚合物阻隔屏障的打印质量提升与高质量推广应用提供支撑。

1　试验

1.1　主要材料

胶凝材料为固体废弃物组成的地聚合物,主要成分为转炉钢渣、电石渣和赤泥。预备试验表明,当上述 3 种组分质量比为 6∶2∶2 时,地聚合物反应活性最高,故本研究按照该质量比配制胶凝材料,采用干拌法将 3 种组分混匀后备用。不同批次废弃物的化学组成存在差异,影响地聚合物各组分间的化学反应活性。工程应用中须根据原材料氧化物组分含量适当调整 3 种原材料的配比,以获得地聚合物材料的最优阻隔性能。

钢渣为市售粒径 8 mm 以下的颗粒状转炉钢渣,主要组分为 CaO(39.59%)、Fe_2O_3(15.97%)、SiO_2(13.78%),用球磨机对转炉钢渣进一步研磨,获取 0.075 mm 以下钢渣粉备用。电石渣通常存在轻微结块现象,主要组分为 CaO(68.02%),试验前用粉碎机进行破碎,过 0.075 mm 方孔筛备用。赤泥主要组分为 SiO_2(21.32%)、CaO(45.12%)、Al_2O_3(6.17%),用粉碎机进行破碎,过 0.075 mm 方孔筛备用。

地聚合物的改性材料包括玄武岩纤维和聚氨酯。玄武岩纤维直径为 15 μm,密度为 2.90 g/cm^3。使用的玄武岩纤维长度分为 2 种,分别为 6 mm 和 3 mm,两者质量比为 1∶1。为了提升玄武岩纤维对阻隔屏障的力学性能改善效果,试验前将 2 种长度的玄武岩纤维充分混合后备用。聚氨酯为阴离子型聚氨酯,外观为乳白色,含有少量调节剂,密度为 1.10 g/cm^3,pH 值为 9.10,黏度为 275 MPa · s。将玄武岩纤维改性材料记为 F 改性材料、聚氨酯改性材料记为 P 改性材料、玄武岩纤维和聚氨酯协同改性材料记为 F+P 改性材料。实际工程中常采用细集料增加打印结构的强度,还可以减少胶凝材料的用量,降低建造成本。本研究中细集料选用转炉钢渣颗粒,根据《建筑用砂》(GB/T 14684—2022)标准,属于中砂,堆积密度为 1 850 kg/m^3,细度模数为 2.75。试验拌合用水为实验室制备的去离子水。

1.2　试样制备

将 3 种工业固废源粉材与 F 改性材料、钢渣细骨料采用干拌法混匀,加入去离子水充分拌合得到打印材料。阻隔屏障材料中胶凝组分与细骨料质量比为 1∶1,拌合用水与地聚合物胶凝材料质量比值为 0.35。

为了研究 F 改性材料和 P 改性材料掺量对阻隔屏障打印材料性能的影响,将 F 改性材料的掺量设定为 0.1%~0.8%,P 改性材料掺量设定为 1%~8%。在同时掺加两种改性材料的试样中,两种改性材料的掺量与单独掺加改性材料的试样中的对应掺量相同。采用手持式打印机制备试样,打印机材料出口为长方形,宽度为 10 cm、高度为 5 cm,出料速度约为 10 cm/min。

1.3　试验方法

流动性测试:流动度是评价材料可打印性的最基本指标,表征打印材料拌合后从储料仓经过导排管道,再由打印设备喷嘴打印整个过程中的传输性能[11]。现有研究主要参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)测试打印材料的传输性能。由于原料种类与打印设备不同,对材料的要求也不统一,故得出的最佳流动度范围存在差异。基于常规打印设备的工作性能,本研究将打印材料流动度范围设定为 170 mm ~ 190 mm,超出该范围后,认为改性对原材料的流动度具有显著影响,并对打印施工产生不利影响。

可建造性测试:可建造性指 3D 打印材料被打印后,保持静止状态,支撑后续打印条带的质量,不出现变形、倾斜或坍塌的性能[11]。在二维平面内,结构打印完成后,各层的厚度和宽度会出现一定程度的形变。对于 3D 打印材料的可建造性,目前尚没有统一测试标准。国内外学者通常采用表征水

平方向、垂直方向等方向打印条形变的指标评价 3D 打印混凝土材料的可建造性。故本研究采用表征打印材料的横向形变指标(W_{Li})或者表征打印材料的垂向形变指标(H_{Li})定量描述改性材料对地聚合物材料可建造性的影响。采用 3D 打印技术进行水平方向阻隔屏障建造,水平阻隔屏障厚度 0.25 m 可以满足常规场地污染物阻控需求。若每一层打印厚度为 0.05 m,则打印层数为 5 层,计算打印 5 层后的 W_{L5} 值和 H_{L5} 值,对阻隔屏障 3D 打印材料的可建造性进行评估,W_{L5}、H_{L5} 值按式(1)(2)计算。当改性材料的 W_{L5} 或 H_{L5} 超出原材料相应值的 25%后,本研究认为改性对原材料的可建造性具有显著影响。

$$W_{L5} = \frac{w_1 - w_5}{2 \times H_T} \tag{1}$$

$$H_{L5} = \frac{h_1 - h_5}{H_T} \times 100\% \tag{2}$$

式中:W_{L5} 为打印第 5 层后打印体横截面形成倾斜侧面正切值;w_1 为第 1 层(即首层)的宽度,mm;w_5 为第 5 层(即顶层)的宽度,mm;H_{L5} 为打印第 5 层后底层条带高度的相对变化率,%;h_1 为第 1 层的高度,mm;h_5 为 5 层的总高度,mm;H_T 为打印第 5 层后打印体的总高度,mm。

可打印时间测试:3D 打印材料从开始拌合到凝结,可打印性能随时间不断变化,仅有一段时间能满足 3D 打印要求,这段时间被称为可打印时间,即新拌 3D 打印材料保持良好的工作性能时间段[11]。凝结时间是水泥基打印材料的重要指标,凝结时间过长会导致打印构件变形甚至塌陷,而凝结时间过短则会降低层间黏结强度。本研究主要关注玄武岩纤维和聚氨酯对地聚合物 3D 打印材料施工和易性的影响,故对可打印时间和凝结时间进行测试。对于 3D 打印材料的可打印时间,目前尚没有统一的测试标准,本研究将打印条有效宽度缩减为原始宽度的 80%时,认为 3D 打印材料不适合继续打印,对应的时间点为可打印时间的上限,故将该时间段作为材料的可打印时间。凝结时间参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2023)(以下简称《标准》)进行测试。

2　结果与讨论

2.1　流动度

不同 F 改性材料、P 改性材料掺量和 F+P 改性材料协同掺加的流动度见图 1。通过前期预备试验,对材料配比、减水剂含量、种类等条件进行优化,确定对照打印材料(未添加聚氨酯或玄武岩的地聚合物)的流动度为 183 mm,处于阻隔屏障打印材料的设计流动度范围(170 mm ~ 190 mm)。

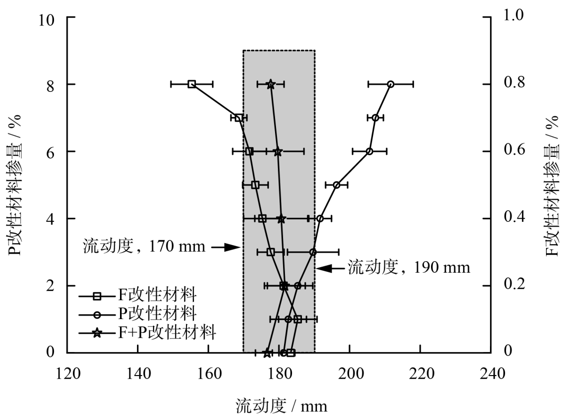

图 1　打印材料流动度

Fig. 1　Fluidity of the printable geopolymer

由图 1 可见,随着 F 改性材料掺量的增加,改性打印材料的流动度呈现下降趋势。与对照打印材料相比,掺量 0.6% 的 F 改性材料使改性打印材料的流动度降低了 6.36%。随着 F 改性材料掺量的增加,其与基体界面之间的摩擦阻力逐渐增大,对阻隔屏障打印材料流动性的阻碍作用也越明显。过多 F 改性材料的掺加,导致改性打印材料的流动性显著降低,限制打印效率[12]。当 F 改性材料掺量为 0.7%时,改性打印材料流动度 168.33 mm,超过阻隔屏障打印设计流动度范围(170 mm ~ 190 mm)。P 改性材料虽然能够提升改性打印材料的流动性,但低掺量(2%)的 P 改性材料对改性打印材料流动性的影响较小。随着 P 改性材料掺量的提升,对改性打印材料的流动性产生较为明显的影响。这是由于 P 改性材料的微珠效应,细小未聚合的聚氨酯颗粒或者聚氨酯膜包覆在水泥颗粒外,提升改性打印材料浆体的流动性[13]。当 P 改性材料掺量 > 4%时,改性打印材料的流动度超过阻隔屏障打印设计流动度范围。

通过对比 F 改性材料、P 改性材料单独掺加和 F+P 改性材料协同掺加样品的流动度发现,单独掺加 F 改性材料、P 改性材料后改性打印材料流动性显著变化;而对于同时掺加 F+P 改性材料的打

印材料而言,两种改性材料掺量变化则对改性打印材料的流动度影响不大。在本研究设计的掺量范围(F 改性材料掺量为 0 ~ 0.8%,P 改性材料掺量为 0 ~ 8%,其中 0 为对照组)内,改性打印材料流动度处于阻隔屏障打印设计流动度范围(170 mm ~ 190 mm)内。因此,在本研究涵盖的掺量范围内,可以同时掺加 F 改性材料、P 改性材料优化打印材料的服役性能,而不会对其流动性带来显著影响。

2.2 可建造性

5 层打印结构条件下,F 改性材料、P 改性材料、F+P 改性材料不同掺量的可建造性指标 W_{L5} 值和 H_{L5} 值测试结果见图 2(a)(b)。由图 2(a)可见,随着 F 改性材料掺量的增加,改性打印材料的 W_{L5} 值逐渐降低,至掺量为 0.7%时 W_{L5} 值达到最小值,之后随着 F 改性材料的增加,W_{L5} 值出现轻微增加。该现象产生的主要原因可能是纤维可以减小材料的流动度,增加材料打印之后保持直立状态的性能及支撑后续打印条带的质量,从而避免变形、倾斜或坍塌的情况。然而,过量纤维掺加会导致纤维团聚,在某些区域集中沉积,打印体呈现显著不均质性,造成打印体的不均匀变形。随着 P 改性材料掺量增加,W_{L5} 值改性打印材料的 W_{L5} 值呈现逐渐增加的趋势,该现象与改性打印材料的流动度变化规律一致。对于掺加 F+P 改性材料的改性打印材料而言,随着两种改性材料掺量增加,呈现出逐渐降低的趋势。在 F 改性材料掺量低于 0.6%、P 改性材料掺量低于 6%时,随着两者掺量的增加,W_{L5} 值缓慢降低至 0.065,大于该掺量之后,W_{L5} 值迅速降低至 0.051,超出了本研究确定的评价界限范围。尽管 2 种材料对打印材料的可建造性的影响趋势相反,但在较低的掺量范围(F 改性材料 < 0.6%、P 改性材料 < 6%)内,同时掺加两种改性材料对打印材料的 W_{L5} 值影响较小。此外,由图 2(b)可见,F 改性材料、P 改性材料对打印材料可建造性指标 H_{L5} 值和 W_{L5} 值的影响趋势较为相似。由于粗骨料会提升打印体的不均质性,纤维和聚氨酯类材料的掺量对添加粗骨料的混凝土打印材料的可建造性指标 H_{L5} 值和 W_{L5} 值的影响规律并不完全一致,因而需要分别测试 H_{L5} 值和 W_{L5} 值对改性材料的掺量进行优化。本研究添加的转炉钢渣颗粒为细骨料,而非粗骨料,发现改性打印材料的均质性未发生显著变化。

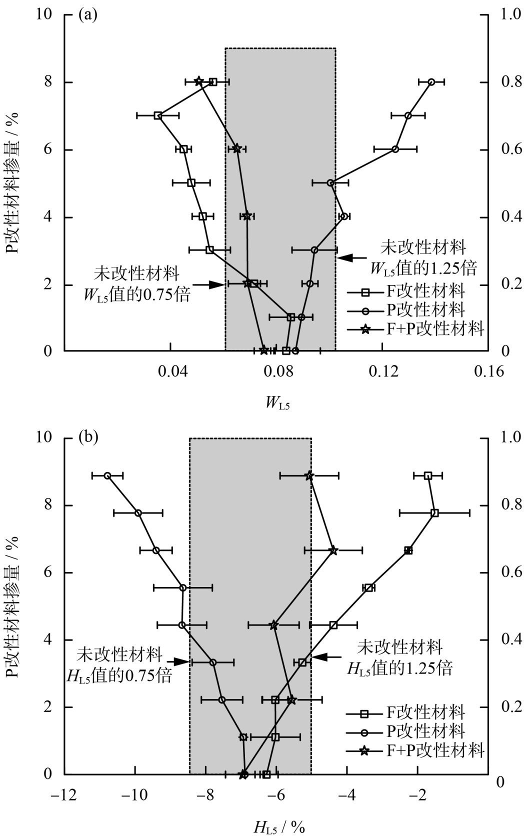

图 2 5 层打印结构的 W_{L5} 和 H_{L5} 值

Fig. 2 W_{L5} and H_{L5} of the 5-layer printed structure

将 F 改性材料、P 改性材料、F+P 改性材料掺量的可建造性指标 W_{L5} 值和 H_{L5} 值进行线性拟合,得到回归方程 $H_{L5} = -84.17 \times W_{L5} + 0.53$,$R^2$ 为 0.83,表明 W_{L5} 值和 H_{L5} 值呈现较强的线性相关性。为了减少材料组分优化的测试工作量,可以选取 W_{L5} 值和 H_{L5} 值中任何一个指标检测作为评判依据,提高材料和易性优化的工作效率。

2.3 可打印时间

不同 F 改性材料、P 改性材料、F+P 改性材料掺量条件下的改性打印材料的凝结时间测试结果见图 3。F 改性材料对改性打印材料的凝结时间的影响较小,当 F 改性材料掺量最大为 0.8%时,凝结时间最大增长率仅为 2.45%。与 F 改性材料相比,P 改性材料对改性打印材料凝结时间的延长效应较为明显,尤其是 P 改性材料掺量 > 3%的改性打印材料。其原因在于随着聚氨酯掺量的增加,聚氨酯会吸附更多浆体中的自由水,聚氨酯的极性表面形成氢键,分子间作用力增大,浆体黏度增加,抑制浆体流动;同时,聚氨酯掺量增加会减缓水泥的

水化过程,凝结时间也会随之延长。在掺加 F+P 改性材料条件下,随着改性材料掺量的增加,改性打印材料凝结时间逐渐增加。当玄武岩纤维掺量为 0.8%、聚氨酯掺量为 8%时,改性打印材料的凝结时间延长约 105%。由此可以推断,F 改性材料、P 改性材料能够适当增加施工和易性,为阻隔屏障打印施工提供更长打印时间。此外,需要注意的是,目前对于水泥砂浆凝结时间测试主要参考《标准》的试针贯入法,对于添加纤维改性的砂浆类材料尚无专门的测试方法。因此,采用《标准》方法对纤维改性砂浆凝结时间测试时,纤维引起试针贯入阻力增加,会出现测试得到的凝结时间缩短现象,造成试验误差。

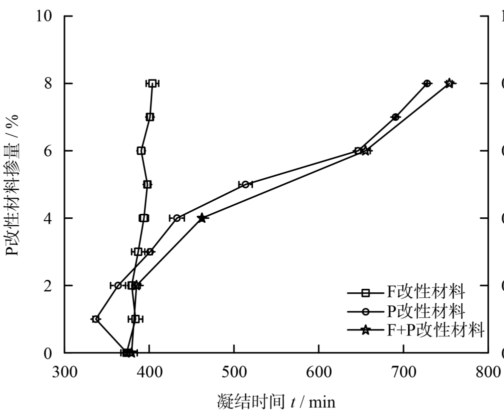

图 3　打印材料的凝结时间

Fig. 3　Setting time of the printable geopolymer

不同 F 改性材料、P 改性材料、F+P 改性材料掺量条件下改性打印材料的可打印时间见图 4。由图 4 可见,F 改性材料对改性打印材料可打印时间的影响可以忽略。随着 P 改性材料掺量的增加,改性打印材料打印时间呈现先增加后降低的趋势,在 P 改性材料掺量为 6%时,可打印时间达到最大值。对于掺加 F+P 改性材料的试样,改性打印材料打印时间变化趋势与单独掺加 P 改性材料试样变化规律类似。

通过对比分析不同 F 改性材料、P 改性材料掺量及协同掺加 F+P 改性材料条件下的改性打印材料的凝结时间和可打印时间变化规律,发现可打印时间测试过程中避免了纤维掺加对打印材料物理力学特性的影响,从而可以更为准确地反映材料的可打印性能。因此,对于与本研究类似的地聚合物类打印材料打印性能调控与优化,建议采用可打印时间作为比较依据。

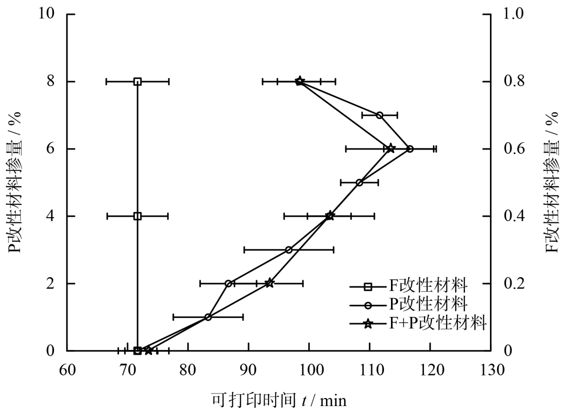

图 4　打印材料的可打印时间

Fig. 4　Printable time of the printable geopolymer

3　结语

(1)玄武岩纤维和聚氨酯单独掺加对地聚合物打印材料的流动性存在显著影响,两种改性材料共同掺加后改性打印材料的流动度变化不大,二者协同改性打印材料流动度处于阻隔屏障打印设计流动度范围(170 mm ~ 190 mm)内。

(2)在本研究改性材料掺量范围内,玄武岩纤维和聚氨酯协同改性对地聚合物打印材料可建造性影响较小,并且可采用打印结构的横向形变指标或者垂向形变指标对打印材料可建造性进行评估。

(3)聚氨酯会改变地聚合物打印材料可打印时间,当聚氨酯掺量为 6%时,可打印时间达到最大值。玄武岩纤维对地聚合物阻隔屏障材料的可打印时间影响可忽略。由于纤维对新拌合打印材料力学性能存在影响,建议采用可打印时间测试评估改性地聚合物打印材料的施工和易性。

[参考文献]

[1]　余光辉,王非凡,刘贤赵,等.中国 1991—2018 年突发环境事件时空特征及影响因素[J].环境科学,2023,44(1):572-582.

[2]　杨芊,王洪涛.关于工业园区突发环境事件应急管理体系的思考[J].环境监测管理与技术,2022,34(3):1-5.

[3]　尹芝华,王水,冯亚松,等.基于地球物理方法的典型 DNAPLs 污染场地精细化调查[J].环境监测管理与技术,2024,36(2):44-48.

(下转第 82 页)

的增加而增大,随高岭土含量的升高而减小;修饰土样的蒙脱石层间距随土样中蒙脱石含量的上升有不同程度的提高;与高岭土相比,受蒙脱石含量决定的 TOC 含量是影响对苯酚吸附能力的关键因素。通过黏土矿物含量对修饰土样吸附苯酚的影响研究,有助于提高土壤对有机污染物的吸附效果,对于污染土壤的治理有一定的应用前景。

［参考文献］

［1］ LEON-FERNANDEZ L F, RODRIGO M, VILLASENOR J, et al. Bio-electrocatalytic dechlorination of 2,4-dichlorophenol. Effect of pH and operational configuration［J］. Electrochimica Acta, 2021, 367(2): 137456.

［2］ ALENGEBAWY A, ABDELKHALEK S T, QURESHI S R, et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications［J］. Toxics, 2021, 9(3): 42-54.

［3］ WANG G F, SU X, HUA Y Y, et al. Kinetics and thermodynamic analysis of the adsorption of hydroxyl-Al cations by montmorilloni montmorillonite［J］. Applied Clay Science, 2016, 129: 79-87.

［4］ LIU W, WANG T T, HUANG L, et al. Adsorption of Cu^{2+} and Cd^{2+} on sierozem compositely modified by zwitterionic and anionic modifier［J］. Desalination and Water Treatment, 2022, 252: 200-209.

［5］ XIE C R, WANG Z W, IHU J M, et al. Adsorption of lead and copper from aqueous solutions on biochar produced from walnut green husk［J］. Acta Sci Circum, 2016, 36(4): 1190-1198.

［6］ 李婷,孟昭福,张斌,等. 两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征［J］. 环境科学, 2012, 33(5): 1632-1638.

［7］ 李彬,孟昭福,王建涛,等. BS-CTMAB 复配修饰膨润土对苯酚的吸附［J］. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1131-1138.

［8］ 杨亚莉. BS-12 与 OTMA 复配修饰膨润土和高岭土的性能表征及其对 Cd^{2+}、苯酚的吸附［D］. 杨凌:西北农林科技大学, 2015: 34-50.

［9］ 李文斌,孟昭福,刘泽,等. 两性与两性复配修饰膨润土增强塿土吸附 Cr(Ⅵ)的研究［J］. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3810-3817.

［10］ 李文斌,孟昭福,吴琼,等. 添加复合吸附剂对塿土吸附菲和 Cr(Ⅵ)的影响［J］. 环境科学, 2016, 37(11): 4419-4427.

［11］ 刘伟,孟昭福,任爽,等. BS+CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用［J］. 环境科学, 2017, 38(7): 3036-3044.

［12］ 刘伟,李文斌,孟昭福,等. 表面活性剂复配修饰添加了不同含量蒙脱石的黄棕壤对苯酚的吸附作用［J］. 环境科学学报, 2018, 38(5): 2014-2022.

［13］ 郭梦婷,王尹菲,李文斌,等. 不同两性复配修饰半碳化纤维对 Pb^{2+} 的吸附差异［J］. 环境监测管理与技术, 2024, 36(3): 59-62.

［14］ 李敏,邓红艳,李文斌,等. 均质化莲子草根系分泌物对黏土吸附四环素的影响［J］. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 60-63.

［15］ 张梦飞,孟昭福,任爽,等. BS-12 改性不同磁性黏土矿物对苯酚的吸附［J］. 土壤学报, 2021, 58(3): 712-721.

［16］ 刘伟. 两性-阴(阳)离子复配修饰在黄棕壤吸附苯酚和 Cd^{2+} 上的应用［D］. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.

［17］ LI W B, LIU Z, MENG Z F, et al. Composite modification mechanism of DTAB to BS-12 modified kaolin and its effects on surface characteristics［J］. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13(11): 2639-2648.

(上接第 71 页)

［4］ HONG C, SHACKELFORD C, MALUSIS M. Numerical evaluation of vertical cutoff walls comprising zeolite-amended backfills for enhanced metals containment［J］. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 04017028.

［5］ FENG Y, DU Y, ZHOU A, et al. Geoenvironmental properties of industrially contaminated site soil solidified/stabilized with a sustainable by-product-based binder［J］. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142778.

［6］ 欧洋洋,冯丽娟,刘安蓉,等. 酸改性污泥基复合陶粒对 Pb^{2+} 的吸附性能研究［J］. 环境监测管理与技术, 2024, 36(2): 60-63.

［7］ 冯亚松. 镍锌复合重金属污染黏土固化稳定化研究［D］. 南京:东南大学, 2021.

［8］ LIU D W, ZHANG Z G, ZHANG X Y, et al. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities［J］. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133364.

［9］ ZOU R, REZAEI B, KELLER S S, et al. Additive manufacturing-derived free-standing 3D pyrolytic carbon electrodes for sustainable microbial electrochemical production of H_2O_2［J］. Journal of Hazardous Materials, 2024, 467: 133681.

［10］ GARG M, RANI R, MEENA V K, et al. Significance of 3D printing for a sustainable environment［J］. Materials Today Sustainability, 2023, 23: 100419.

［11］ ZHAO Z F, JI C Y, XIAO J Z, et al. A critical review on reducing the environmental impact of 3D printing concrete: Material preparation, construction process and structure level［J］. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133887.

［12］ YE J H, CUI C, YU J T, et al. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete［J］. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122586.

［13］ OHAMA Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology［M］. Park Ridge, N. J.: Noyes Publications, 1995.