

文章编号:1673-9469(2026)01-0040-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.006

活性炭复合土工布吸附煤矸石路堤重金属污染物 试验研究

李凯鑫,孟潇康,王贺*,宋志文,李肖扬

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:为解决煤矸石填料在降雨入渗条件下,其淋出液所含重金属污染物对周边土壤及水资源造成的污染问题,设计了一种活性炭复合土工布材料,可铺设于煤矸石路堤中。开展了活性炭复合土工布对煤矸石填料淋出液中重金属离子的吸附试验,通过改变活性炭复合土工布层数和厚度、活性炭颗粒粒径等,探究不同影响因素条件下活性炭复合土工布对重金属离子的吸附规律及关键影响因素,证明了其用于治理煤矸石路堤对环境污染的可行性。研究表明:随着活性炭复合土工布厚度和层数的增加以及活性炭颗粒粒径的减小,试验中重金属离子的吸附率均有不同程度的提升,其中,改变活性炭复合土工布厚度和层数对吸附效果的影响最为显著,而活性炭颗粒粒径的改变对重金属离子的吸附效果影响不明显。

关键词:煤矸石填料;重金属污染;活性炭复合土工布;吸附试验;污染治理

中图分类号:U412.22;P642

文献标识码:A

Experimental Study on the Adsorption of Heavy Metal Pollutants from Coal Gangue Embankment by Activated Carbon Composite Geotextile

LI Kaixin, MENG Xiaokang, WANG He*, SONG Zhiwen, LI Xiaoyang

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: To address the pollution of surrounding soil and water resources caused by heavy metal pollutants in the leachate of coal gangue fill material under rainfall infiltration conditions, a type of activated carbon composite geotextile material was proposed and laid within the coal gangue road embankment. An adsorption experiment on heavy metal ions in the leachate of the coal gangue fill material by the activated carbon composite geotextile was carried out. By changing the number of layers and thickness of the activated carbon composite geotextile and the particle size of the activated carbon particles, the adsorption laws and key influencing factors of heavy metal ions under different conditions were explored, proving the feasibility of using the activated carbon composite geotextile to treat the environmental pollution caused by coal gangue road embankments. The research results show that with the increase of the thickness and number of layers of the activated carbon composite geotextile and the decrease of the particle size of the activated carbon particles, the adsorption rate of heavy metal ions in the experiment is improved to varying degrees. Among these factors, changing the thickness and number of layers of the activated carbon composite geotextile has the most significant impact on the adsorption effect, while the change in the particle size of the activated carbon particles showed a less obvious effect on the adsorption of heavy metal ions.

Key words: gangue filler; heavy metal contamination; activated carbon composite geotextile; adsorption test; pollution control

收稿日期:2024-08-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0104600);国家自然科学基金资助项目(52079078)

第一作者:李凯鑫(1998—),男,河南洛阳人,硕士研究生,从事加筋土和环境岩土方面的研究。

*通信作者:王贺(1974—),男,河北石家庄人,博士,副教授,从事加筋土和环境岩土方面的研究。

煤矸石是煤矿开采过程中产生的固体工业废料^[1],因其含煤量低、残留的有机物质易挥发、含有毒有害成分等特点^[2],资源化利用难度大,导致我国煤矸石堆积量巨大^[3-4]。煤矸石堆积形成的煤矸石山不仅占用大量土地、污染环境,还存在滑塌、粉尘爆炸等安全问题,也给相关治理部门造成一定的经济压力^[5-6]。在道路工程领域,碎石、砂土等传统路基填料资源有限且开采成本较高,而煤矸石作为一种潜在的替代材料,具有独特的优势^[7]。贺建清等^[8]通过动三轴试验,研究了掺土后的煤矸石用作路基填料的工程特性,结果表明,煤矸石作为填筑材料能够满足路基的力学性能要求。Ashfaq 等^[9]研究发现,将掺有黏土的煤矸石用作路基填料可有效提高路基的抗剪强度、弯沉值等性能指标。蒋晨煜等^[10]研究表明,煤矸石易受降雨影响,产生含有重金属的污染性液体。

探索煤矸石更为科学的综合利用途径,能有效减少煤矸石对环境的负面影响,实现煤矸石资源的再利用^[11-12]。土工合成材料被广泛应用于土木工程领域,土工布作为其中的一种,具有过滤、排水、防渗、加筋、隔离和防护等诸多用途^[13-14],将其应用于路基中还可起到加固作用^[15]。胡振琪等^[16]通过室内淋溶试验发现,土工布可有效阻隔煤矸石淋出液中重金属元素的迁移。近年来,活性炭因具有经济高效、吸附性能稳定等优势,已成为处理工业废水中重金属离子的重要吸附剂。唐佳伟等^[17]研究了影响吸附机理的因素,包括吸附材料、离子相互作用机制及离子的赋存形态等方面;有关研究^[18-19]认为,活性炭等吸附剂吸附重金属离子的机理主要有物理吸附、孔隙填充效应、络合作用、离子交换、表面化学吸附等。在活性炭吸附过程中,重金属离子先被活性炭表面的活性位点吸附,后扩散至活性炭内部孔洞中,孔洞的大小、分布及其表面特性对吸附性能起着重要作用,活性炭吸附效果主要受其化学性质(表面官能团、电荷特性等)以及吸附试验条件(溶液 pH 值、温度、离子强度等)共同影响。

为在实际工程中更好地使用活性炭对煤矸石路堤淋出液中污染物进行吸附,本研究提出活性炭复合土工布加筋煤矸石路堤的新型结构。在开展煤矸石填料淋溶试验的基础上,利用活性炭复合土工布对含有重金属离子的淋出液进行吸附试验,揭示其吸附规律,明确关键影响因素。本研究对煤矸石路堤的建筑工程具有重要参考意义,对煤矸石的综合利用具有促进作用。

1 吸附试验

1.1 试验材料

吸附试验材料主要包括淋溶试验得到的煤矸石淋出液、椰壳活性炭和聚丙烯无纺土工布,其中,煤矸石淋出液 pH 值为 2,镓离子、铜离子、钴离子、锌离子浓度分别为 0.048、0.432、1.665、1.190 mg/L;聚丙烯无纺土工布的横向、纵向极限抗拉强度均为 40 kN/m。不同颗粒大小的椰壳活性炭形态如图 1 所示,它们的碘值均为 1 100 mg/g,比表面积均为 1 100 m²/g,强度均为 95%,灰度均为 5%,水分均为 5%。活性炭复合土工布在上下两层土工布间夹封一定量的椰壳活性炭,通过针刺工艺连接上下层土工布,相邻两行针刺间便形成包裹活性炭的空间,确保活性炭均匀固定于夹层中,其结构如图 2 所示。



图 1 椰壳活性炭

Fig. 1 Coconut shell activated carbon

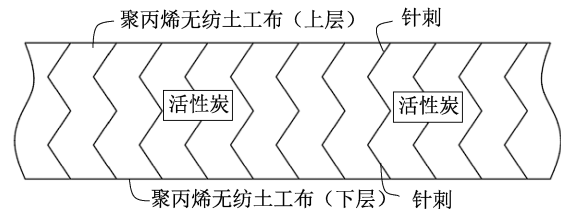


图 2 活性炭复合土工布的剖面结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sectional structure of the activated carbon composite geotextile

1.2 试验仪器

试验仪器包括电子天平、吸附装置和电感耦合等离子体发射光谱仪。其中,吸附装置为本研究自制,由多孔玻璃板抽滤漏斗和标口三角烧瓶组成,如图 3 所示。试验仪器的基本参数和关键性指标见表 1。

1.3 试验方案

在自制吸附装置的抽滤漏斗中分层铺设活性炭复合土工布,每次试验均加入 500 mL 的煤矸石淋出液。为确保溶液完全透过活性炭复合土工布,淋出液至少分 3 次加入。在抽滤漏斗下方放置三角烧瓶接收经吸附的液体,用电感耦合等离子

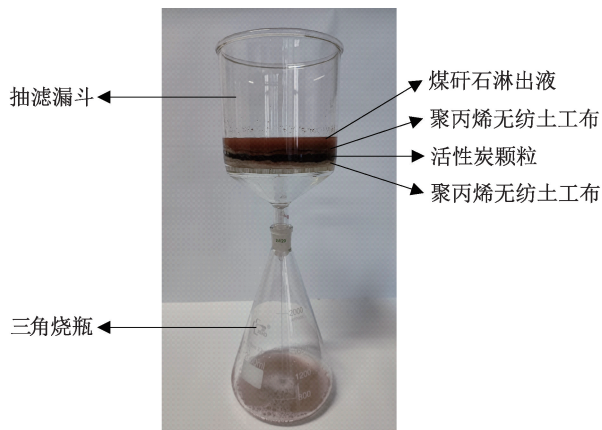


图3 吸附试验过程

Fig. 3 Adsorption test procedure

表1 试验仪器

Tab. 1 Testing instruments

仪器	规格型号	关键指标
电子天平	JE2002	量程 2 000 g、精度 1 g
抽滤漏斗	c11d24-2000j	容量 2 000 mL、 内径 145 mm
三角烧瓶	50092000-29/32	容量 2 000 mL
电感耦合等离子体发射光谱仪	Optima 8000	—

体发射光谱仪测定溶液中镓、钴、铜、锌等重金属离子的浓度并做好记录。

为探究活性炭复合土工布对煤矸石淋出液中污染物的吸附性能,本研究开展了吸附试验。为分析吸附试验过程中有关因素的影响规律,通过改变活性炭复合土工布的厚度、层数、活性炭颗粒大小等因素,试验共设计了 7 组样品,试验方案设计见表 2。

表2 吸附试验方案设计

Tab. 2 Design of adsorption test program

样品编号	活性炭颗粒大小/目	活性炭复合土工布层数/层	活性炭复合土工布厚度/mm
1	20	2	3
2	20	2	7
3	20	1	5
4	20	2	5
5	20	3	5
6	30	2	5
7	10	2	5

吸附率 E 可用于评价不同条件下活性炭对煤矸石淋出液中重金属离子的吸附效果,见式(1)。

$$E = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为各重金属离子的初始浓度, mg/L; C_1 为通过吸附试验后各重金属离子的浓度, mg/L。

2 试验结果分析

2.1 活性炭复合土工布层数对吸附效果的影响

随着活性炭复合土工布层数发生改变,煤矸石中重金属离子浓度及吸附率的变化规律见图 4。由图 4 可知,随着活性炭复合土工布层数由 1 层增加到 3 层,钴离子、锌离子、铜离子的浓度均有较大幅度降低,分别降低了 0.140、0.209、0.055 mg/L,而镓离子浓度仅降低了 0.006 mg/L。从吸附率来看,随着活性炭复合土工布层数的增加,镓离子和锌离子吸附率呈线性增长,分别增长了 12.50% 和 17.56%;铜离子和钴离子的吸附率变化趋势相似,当活性炭复合土工布层数从 1 层增加到 2 层时,吸附率分别增长了 12.27% 和 6.77%,继续增加层数,吸附率趋于稳定。

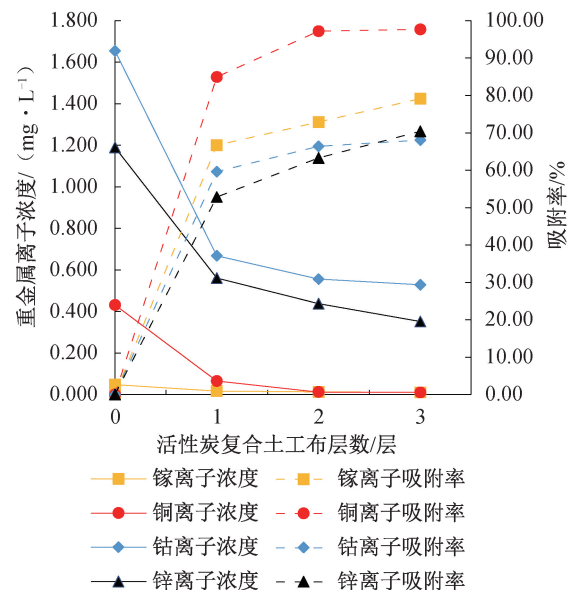


图4 重金属离子浓度随活性炭复合土工布层数的变化规律

Fig. 4 Changing law of heavy metal ion concentration with the number of layers of activated carbon composite geotextiles

随着活性炭复合土工布层数的增加,煤矸石淋出液中各重金属离子的吸附率均有一定程度的提升,分析其原因为,活性炭复合土工布层数增加,使煤矸石淋出液的下渗速度变缓,吸附作用时间变长;另外,多层土工布包裹的活性炭总量增多,煤矸石淋出液经历了多次吸附过程,各金属离子被反复吸附。然而,随着土工布层数的增加,重金属离子浓度逐渐降低,位于下层的土工布中单

位质量活性炭所包围的重金属离子数量随之减少,导致吸附传质动力减弱,平衡吸附容量降低,吸附率的增长速率逐渐减缓并最终趋于稳定,达到吸附平衡状态。

2.2 活性炭复合土工布厚度对吸附效果的影响

随着活性炭复合土工布厚度的改变,煤矸石淋出液中重金属离子浓度及吸附率的变化规律见图 5。由图 5 可知,随着土工布厚度由 3 mm 增加到 7 mm,镓离子及铜离子的浓度降幅较小,分别降低了 0.009、0.008 mg/L,钴离子和锌离子的浓度降幅明显,分别降低了 0.127、0.239 mg/L。从吸附率来看,随着土工布厚度由 3 mm 增加到 7 mm,各重金属离子的吸附率均有小幅度提升。钴离子、铜离子的吸附率增长幅度相对较小,分别增长了 7.68%、1.85%;镓离子和锌离子的吸附率变化趋势相似,随土工布厚度的增加呈增长趋势,但当厚度超过 5 mm 后,吸附率的增长速率变缓,二者的吸附率总体增长均接近 20%。

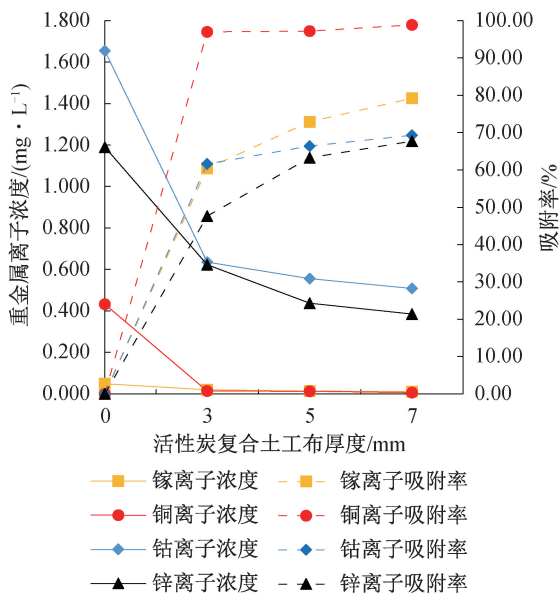


图 5 重金属离子浓度随活性炭复合土工布厚度的变化规律

Fig. 5 Variation of heavy metal ion concentration with activated carbon composite geotextile thickness

随着活性炭复合土工布厚度的增加,各重金属离子的吸附率均有所增加,分析其原因为,活性炭复合土工布厚度增加,土工布内所包裹的活性炭随之增多,吸附作用位点增多,活性炭达到吸附饱和的速度变缓,吸附作用更充分,对应各重金属离子的吸附率逐渐增长。由此可推断,随着活性炭复合土工布厚度的不断增加,淋出液中重金属离子的浓度越来越低,吸附率的增长速率逐渐减

缓,最终达到吸附平衡。

2.3 活性炭颗粒尺寸对吸附效果的影响

煤矸石淋出液中重金属离子浓度及吸附率随活性炭颗粒大小的变化规律见图 6。由图 6 可知,当颗粒大小由 10 目减小到 30 目时,所有重金属离子浓度均有所下降。镓离子及铜离子的浓度变化幅度较小,各降低了 0.007、0.005 mg/L,而钴离子、锌离子浓度分别降低了 0.033、0.054 mg/L。随着活性炭颗粒目数的增加,即随着颗粒粒径减小,各离子浓度变化量普遍较小。从吸附率曲线来看,随着活性炭颗粒大小由 10 目减小到 30 目,铜离子、钴离子、锌离子的吸附率增长很小且整体趋于稳定,分别增长了 1.16%、1.99%、4.54%,而镓离子的吸附率增长了 14.58%。

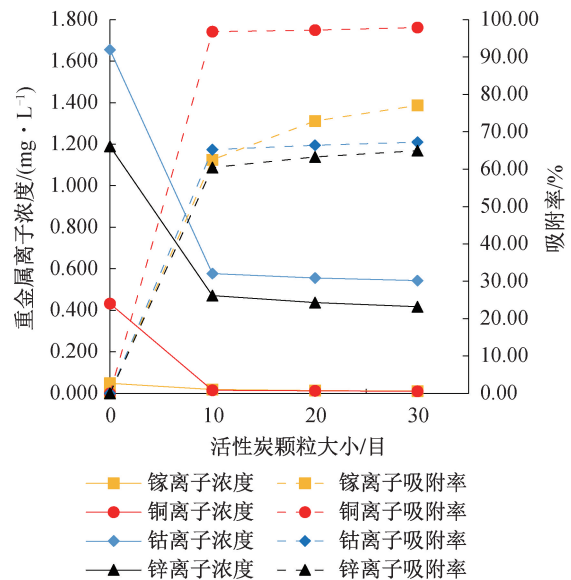


图 6 重金属离子浓度随活性炭颗粒大小的变化规律

Fig. 6 Variation of heavy metal ion concentration with particle size of activated carbon particles

根据试验结果可知,活性炭的颗粒大小对重金属离子的吸附性能无明显影响,随着活性炭颗粒粒径的减小,活性炭对各离子的吸附率仅有略微提升。分析原因如下:首先,活性炭颗粒目数增加,颗粒粒径减小,单位质量活性炭的比表面积相应增加,可提供吸附的活性位点增多,能够吸附更多的重金属离子;其次,不同目数的活性炭的孔径分布不同,小孔径的活性炭能够更有效地吸附小分子和离子,而大孔径的活性炭则更适合吸附较大的分子及离子;此外,高目数的活性炭通常孔隙结构更为复杂,包括微孔、介孔和大孔,该多样性使活性炭在吸附试验中更全面地利用各种孔隙,

从而增加重金属离子的接触机会和吸附速率;不同目数的活性炭具有不同的化学性质(如表面官能团的类型和数量),可影响活性炭与重金属离子之间的化学反应与亲和力,进而影响吸附性能。由此得出,活性炭颗粒粒径减小,增加了吸附剂的比表面积、改善了孔径分布、提高了各种孔隙的利用效率、改变了化学性质等因素,综合提升了吸附效果。但由于本次吸附试验所选用的活性炭颗粒粒径差异不大,得到的试验结果对比并不明显。

3 结论

1)随着活性炭颗粒粒径的减小以及活性炭复合土工布层数、厚度的增加,各重金属离子的吸附率均有所提升。

2)镓离子的吸附率受活性炭复合土工布的层数、厚度及活性炭颗粒大小改变的影响较明显。当复合土工布层数增加时,镓离子经过多层吸附,其吸附率呈线性增长,吸附效果最为明显。

3)铜离子的吸附率受活性炭复合土工布层数的影响较明显,受活性炭复合土工布的厚度和活性炭颗粒大小改变的影响较小,基本保持稳定。与镓离子、钴离子、锌离子对比,活性炭复合土工布对铜离子的吸附作用效果较好。

4)钴离子的吸附率受活性炭颗粒大小的影响较小,受活性炭复合土工布的厚度与层数的影响较明显,吸附率的变化趋势均为线性增长;试验中钴离子的最大吸附率仅为 69.31%,活性炭复合土工布对其的吸附效果相对较差。

5)锌离子的吸附率在各试验条件下的最大吸附率为 70.42%。随着活性炭复合土工布厚度的增加,吸附率先有较为明显的增长后增幅减缓;随着土工布层数的增加,吸附率呈线性增长;当活性炭颗粒粒径减小时,吸附率基本保持稳定。

参考文献:

- [1] JI H P, FANG M H, HUANG Z H, et al. Phase transformation of coal gangue by aluminothermic reduction nitridation: influence of sintering temperature and aluminum content[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101: 94-99.
- [2] HUANG G D, JI Y S, LI J, et al. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymer mortars via increasing calcium content[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 760-768.
- [3] 贾建慧, 马宁, 董阳, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S1): 36-45.
- [4] ZHENG Q W, ZHOU Y, LIU X, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2024, 34(2): 223-239.
- [5] YIN M Q, SHENG W Y, ZHANG X Y, et al. Effects of long-term coal gangue dumping on soil chemical environment and microbial community in an abandoned mine[J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(16): 4923-4934.
- [6] ZHANG M C, CHENG L S, YUE Z H, et al. Assessment of heavy metal(oid) pollution and related health risks in agricultural soils surrounding a coal gangue dump from an abandoned coal mine in Chongqing, Southwest China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 18667.
- [7] 张清峰, 王东权, 于广云, 等. 煤矸石风化对其物理力学性能影响的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(4): 768-774.
- [8] ZHANG Q F, WANG D Q, YU G Y, et al. Research on the effect of weathering on physical and mechanical properties of coal gangue[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(4): 768-774.
- [9] 贺建清, 阳军生, 靳明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 199-205.
- [10] HE J Q, YANG J S, JIN M. Experimental study on mechanical behaviors of coal gangue mixed with soil under cyclical loadings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 199-205.
- [11] ASHFAQ M, LAL M H, ALI BAIG MOGHAL A, et al. Carbon footprint analysis of coal gangue in geotechnical engineering applications[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2020, 50(4): 646-654.
- [12] 蒋晨煜, 杜倩卉, 张军辉, 等. 煤矸石路基填料中污染物的释放-迁移-抑制特性研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 21(6): 66-76.
- [13] JIANG C Y, DU Q H, ZHANG J H, et al. Release-migration-solidification characteristics of pollutants in coal gangue as subgrade fill material[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2024, 21(6): 66-76.
- [14] 潘硕, 胡雨晴, 王海燕, 等. 煤矸石综合利用技术现状与标准体系研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(7): 89-98.
- [15] PAN S, HU Y Q, WANG H Y, et al. Research on comprehensive utilization technology and standard system of coal gangue[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(7): 89-98.

- 损影响研究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- XU J B. Study on the creep characteristics of the surrounding rock of Wudang schist tunnel and its influence on the lining cracking[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [10] 宋仪,乔春生,朱举. 蠕变地层深埋隧道结构长期受力状态研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):343-350.
- SONG Y, QIAO C S, ZHU J. Study on long-term stress state of tunnel structure in creep stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1):343-350.
- [11] 武亚遵,田方正,林云,等. 基于强度折减法的软弱泥岩隧道围岩稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):65-71.
- WU Y Z, TIAN F Z, LIN Y, et al. Analysis on the tunnel surrounding rock stability of weak mudstone based on strength reduction method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5):65-71.
- [12] 左昌群,易毅,孙金山,等. 考虑岩体蠕变特性的片岩大变形隧道初期支护力学效应[J]. 公路交通科技,2014,31(5):102-108.
- ZUO C Q, YI Y, SUN J S, et al. Mechanical effect of primary support for large deformation tunnel in schist layer considering creep behavior of rock mass[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(5):102-108.
- [13] 王中文,方建勤,夏才初,等. 考虑围岩蠕变特性的隧道二衬合理支护时机确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3241-3246.
- WANG Z W, FANG J Q, XIA C C, et al. Determination method of supporting time for secondary lining in tunnel considering rock creep behaviors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):3241-3246.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第44页)
- [12] 崔邯龙,付志东,吴鸿飞,等. 路面基层矿渣粉稳定全固废混合料力学性能试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(3):60-66+74.
- CUI H L, FU Z D, WU H F, et al. Experimental study on mechanical properties of pavement base with all solid waste mixture stabilized by mineral powder[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2025, 42(3):60-66+74.
- [13] 杨广庆. 土工布发展现状及趋势展望[J]. 纺织导报,2017(5):19-20+22+24+25.
- YANG G Q. Development status quo and outlook of geotextiles[J]. China Textile Leader, 2017(5):19-20+22+24+25.
- [14] 赵俊豪,封严,李洪振,等. 聚丙烯非织造土工布研究进展及应用[J]. 化工新型材料,2024,52(10):248-252.
- ZHAO J H, FENG Y, LI H Z, et al. Research progress and application of polypropylene nonwoven geotextile[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(10):248-252.
- [15] 张国雨. 土工合成材料的性能及在地基加固中的应用[J]. 造纸装备及材料,2022,51(12):90-92.
- ZHANG G Y. Performance of geosynthetics and its application in foundation reinforcement[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2022, 51(12):90-92.
- [16] 胡振琪,王萍,张明亮,等. 土工布阻隔煤矸石中重金属迁移实验研究[J]. 环境工程学报,2008(4):536-541.
- HU Z Q, WANG P, ZHANG M L, et al. A column test for preventing heavy metal pollution from coal gangue with geotextiles[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008(4):536-541.
- [17] 唐佳伟,张锁,刘兆峰,等. 吸附法去除矿井水中F⁻研究进展[J]. 煤炭科学技术,2023,51(5):269-283.
- TANG J W, ZHANG S, LIU Z F, et al. Research progress in the removal of fluoride ions from mine water by adsorption method[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5):269-283.
- [18] 杨颖,李磊,孙振亚,等. 活性炭表面官能团的氧化改性及其吸附机理的研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(24):6132-6138+6147.
- YANG Y, LI L, SUN Z Y, et al. The research on the surface oxidation modification of activated carbon and its adsorption mechanisms of organic matter and heavy metal ions[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(24):6132-6138+6147.
- [19] DONG L H, LIU W J, JIANG R F, et al. Study on the adsorption mechanism of activated carbon removing low concentrations of heavy metals[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(17):7812-7822.
- (责任编辑 王利君)