

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.066



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



干湿循环作用下有机硅改性炭质泥岩的崩解特性及抑崩解机制

何志军^{1a}, 曾铃^{1a}, 查焕奕^{1a}, 付宏渊^{1a,1b}, 陈镜丞², 张红日³

(1. 长沙理工大学 a. 土木与环境工程学院; b. 交通学院, 长沙 410114;

2. 中建五局第三建设有限公司, 长沙 410114; 3. 广西交科集团有限公司, 南宁 530007)

摘要:为抑制干湿循环下炭质泥岩崩解与强度劣化,开展干湿循环作用下有机硅改性炭质泥岩无侧限抗压强度及崩解试验,研究干湿循环次数、有机硅掺量对改性炭质泥岩无侧限抗压强度、粒径级配、不均匀系数及曲率系数等参数的影响,明确有机硅对炭质泥岩强度劣化及崩解特性的抑制作用,并通过扫描电镜分析有机硅改性炭质泥岩在干湿循环作用下的微观结构变化规律,揭示其抑崩解机制。结果表明:改性炭质泥岩的无侧限抗压强度与有机硅掺量呈正相关,与干湿循环次数呈负相关;有机硅的团聚作用能有效增大炭质泥岩粒径,掺入有机硅后,改性炭质泥岩大于2 mm的粗颗粒含量、最大粒径 D_{max} 和最小粒径 D_{min} 均显著增大,且崩解过程中[10 mm, 20 mm)、[5 mm, 10 mm)和[2 mm, 5 mm)粒组的改性炭质泥岩颗粒含量变化最剧烈,但有机硅掺量越多,粒径变化幅度越小;改性炭质泥岩的中值粒径 d_{50} 、Weibull分布参数(λ 、 k)、分形维数 D 、耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 等参数均与有机硅掺量呈正相关,与干湿循环次数呈负相关,而不均匀系数 C_u 的变化规律则与之相反。有机硅主要通过网状结构交联炭质泥岩颗粒并在其表层形成疏水膜等作用抑制其强度劣化及崩解。

关键词:路堤工程;炭质泥岩;有机硅;疏水改性;抑崩解

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)04-0044-11

收稿日期: 2024-05-13

基金项目:国家自然科学基金(52378440、52078066、52078067);交通运输行业重点科技项目(2022-MS1-032);湖南省自然科学基金杰出青年基金(2023JJ10045);长沙市杰出创新青年培养计划(kq2305023);长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2019IC04);桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金(15KB01)

作者简介:何志军(1985-),男,博士生,主要从事软岩边坡防控减灾、特殊土路基处理研究,E-mail:504090410@qq.com。
查焕奕(通信作者),男,博士(后),E-mail:bsh028@csust.edu.cn。

Received: 2024-05-13

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52378440, 52078066, 52078067); The Key Science and Technology Program in the Transportation Industry (No. 2022-MS1-032); The Natural Science Foundation of Hunan Province Outstanding Youth Fund (No. 2023JJ10045); The Outstanding Innovative Youth Training Program of Changsha City (No. kq2305023); The “Double First-class” International Cooperation and Expansion Program for Scientific Research of Changsha University of Science & Technology (No. 2019IC04); The Open Fund of Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control, Ministry of Education (No. 15KB01).

Author brief: HE Zhijun (1985-), PhD candidate, main research interests: soft rock slope prevention and special soil foundation treatment, E-mail: 504090410@qq.com.

ZHA Huanyi (corresponding author), postdoctoral fellow, E-mail: bsh028@csust.edu.cn.

Disintegration characteristics and inhibition mechanism of organosilicon-modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycling effects

HE Zhijun^{1a}, ZENG Ling^{1a}, ZHA Huanyi^{1a}, FU Hongyuan^{1a,1b}, CHEN Jingcheng², ZHANG Hongri³

(1a. School of Civil and Environmental Engineering; 1b. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. The 3rd Construction Co., Ltd. of China Construction 5th Engineering Bureau, Changsha 410114, P. R. China; 3. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, P. R. China)

Abstract: To reduce the degradation of strength and prevent disintegration of carbonaceous mudstone under wet and dry cycling, tests on the unconfined compressive strength (UCS) and disintegration of silicone-modified carbonaceous mudstone under wet and dry cycling were carried out. The effects of the number of dry and wet cycles and the amount of organosilicon on the UCS, grain size gradation, inhomogeneity coefficient and curvature coefficient of the modified carbonaceous mudstone were studied, and the inhibition effect of organosilicon on the strength deterioration and disintegration characteristics of the charcoal mudstone was clarified. The changing pattern of microstructure of organosilicon-modified carbonaceous mudstone was also analyzed by scanning electron microscopy (SEM) to reveal its mechanism of inhibiting disintegration. The results showed that the pattern of modified carbonaceous mudstone was positively correlated with the organosilicon content and negatively correlated with the number of wet and dry cycles. Organosilicon can effectively increase the grain size of carbonaceous mudstone, and the content of coarse particles larger than 2 mm, the maximum grain size (D_{max}) and the minimum grain size (D_{min}) of modified carbonaceous mudstone were significantly increased after the incorporation of organosilicon. Meanwhile, the particle content of modified carbonaceous mudstone in the [10 mm, 20 mm), [5 mm, 10 mm) and [2 mm, 5 mm) grain groups changed most drastically during the disintegration process, but the greater the organosilicon content, the smaller the magnitude of the change in grain size. Moreover, the higher the organosilicon content, the smaller the change in particle size. The median grain size (d_{50}), Weibull distribution parameters (λ , k), fractal dimension (D), disintegration resistance index (I_{dn}) and disintegration ratio (D_r) of modified carbonaceous mudstone were positively correlated with organosilicon content and negatively correlated with the number of wet and dry cycles. However, the variation rule of the inhomogeneity coefficient (C_u) is opposite. Organosilicone mainly inhibits the strength deterioration and disintegration of carbonaceous mudstone particles by crosslinking them via a network structure and the formation of a hydrophobic film on the surface layer.

Keywords: embankment engineering; carbonaceous mudstone; organosilicon; hydrophobic modification; disintegration inhibition

炭质泥岩广泛分布于中国中南、西南等地区,在这些地区的道路修建过程中常将开挖的废弃炭质泥岩作为填料进行路堤填筑^[1-2]。炭质泥岩富含黏土矿物,具有水理性强、强度低、遇水易崩解等特性。路堤填筑后,在干湿循环作用下,内部炭质泥岩持续崩解软化,导致强度降低,路堤整体性能迅速降低,诱导发生不均匀沉降,甚至造成局部坍塌、失稳,严重威胁当地高速公路运营及交通安全^[3-4]。因此,亟须抑制炭质泥岩崩解,以解决干湿循环下炭质泥岩路堤变形问题。

现阶段,常采用化学改性方法对泥岩进行改性,以减小干湿循环作用对其路用性能的影响^[5-7]。水泥、粉煤灰及石灰等因价格低廉、容易得到等优点成为工程中应用最广泛的改性材料^[8-10]。祝艳波等^[11]探讨了石灰、水泥、粉煤灰对红层泥岩风化物击实特性、承载比、无侧限抗压强度的影响规律。徐鹏等^[12]分析了石灰改良红层泥岩的动力特性及改性后红层泥岩路堤的承载力及变形特征。然而,上述研究虽对泥岩的改性进行了初步探索,但受其内部原生裂隙及水理特性的影响,传统改性材料并不能

很好地阻止外界水分对泥岩微观结构的损伤。同时,随着环保需求的日益增长,越来越多的学者开始探索环保型高分子材料在泥岩改性中的应用。为提升预崩解炭质泥岩路用性能,曾铃等^[13]、Zeng等^[14]、付宏渊等^[15]、Zha等^[16]采用阿拉伯树胶、瓜尔胶、海藻酸钠等生物聚合物对预崩解炭质泥岩进行改性,分析改性后预崩解炭质泥岩的路用性能及改性机制。上述生物聚合物虽能增强预崩解炭质泥岩的力学特性,但在抑制炭质泥岩崩解、阻止水分渗入等方面仍存在一定的局限,因此,有机硅因其高效的成膜性及疏水性备受关注^[17]。周雨晴等^[18]采用有机硅对红层泥岩进行表面疏水改性来抑制毛细作用,初步探讨了有机硅对泥岩内部微裂隙发育的抑制作用,揭示有机硅改良红层泥岩疏水性的机理。张农等^[19]分析了有机硅对泥岩力学特性、渗透特性的影响规律,初步揭示了有机硅材料对泥岩微观结构的影响。但相较于上述泥岩,炭质泥岩内部次生裂隙更多,崩解性更强^[20-21]。因此,干湿循环作用下有机硅对炭质泥岩崩解特性及微观结构的影响亟待揭示。

笔者以炭质泥岩填料为研究对象,开展不同有机硅掺量下改性炭质泥岩无侧限抗压强度及崩解试验。分析干湿循环作用下不同有机硅掺量对改性炭质泥岩的力学特性及崩解特征的影响规律,明确有机硅对炭质泥岩强度劣化及崩解特性的抑制作用,并通过扫描电镜揭示有机硅改性炭质泥岩的抑制崩解机制。以期为炭质泥岩路堤变形控制提供理论依据。

表 1 炭质泥岩基本物理参数指标

Table 1 Basic physical indexes of carbonaceous mudstone

粗粒		细粒				最佳	最佳
抗压强度/MPa	吸水率/%	比重	液限 w_s /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	含水率/%	干密度/(g/cm ³)
13.8	0.72	2.71	32.9	25.3	7.6	6.41	2.30

1.1.2 有机硅

有机硅溶液是一种无色、无味、无毒的透明液体,具有良好的斥水性能,干燥后可形成强度较高的薄膜,如图 2 所示。其在未聚合前可溶于水,水解后可形成与矿物基料作用的 Si-OH 官能团,另一方面其自身还可发生缩聚反应,形成强度较高的高分子化合物。有机硅溶液中固体物含量为 40%,硅酮含量为 20%。

1.2 试验方法

1) 无侧限抗压强度试验:为减小制样过程中水分对炭质泥岩的影响,试验前向 0%、1%、2%、3%、4%、5% 的有机硅溶液中掺入定量纯净水,使搅拌后炭质泥岩的含水率为最佳含水率。然后再向干

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 炭质泥岩

炭质泥岩取自柳州市新柳南高速公路某段路堤。将取回的炭质泥岩烘干并剔除粒径大于 10 mm 的岩块,采用筛分试验和粒度分析仪得到其粒径级配曲线,如图 1 所示。工程上一般认为粒径小于 2 mm 的颗粒已完全崩解,故将 2 mm 作为炭质泥岩粗粒与细粒的分界线,即粒径小于等于 2 mm 的炭质泥岩为细颗粒,大于 2 mm 的炭质泥岩为粗颗粒^[1]。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行测试,得到粒径小于 2 mm 炭质泥岩的液限、塑限、塑性指数、比重等基本物理性质。依据《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024),通过压碎试验及吸水试验测得粒径大于 2 mm 炭质泥岩的抗压强度和吸水率,结果见表 1。

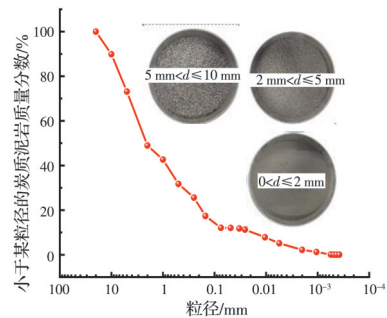
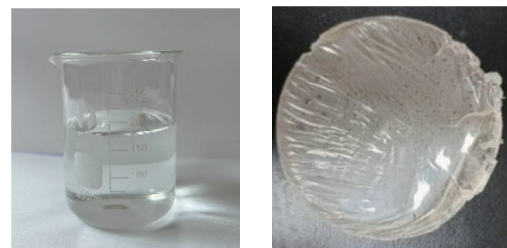


图 1 炭质泥岩粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curve of carbonaceous mudstone



(a) 有机硅溶液

(b) 有机硅薄膜

图 2 有机硅溶液与薄膜

Fig. 2 Organosilicon solution and film

燥炭质泥岩中掺入配置的有机硅溶液,采用机械搅拌均匀后密封静置 24 h。采用静压法制备直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形试样,试样的压实度

为94%。自然养护7 d后进行干湿循环作用下的无侧限抗压强度试验。

2)崩解试验:①采用同样的混合方式将炭质泥岩与有机硅进行拌合,自然养护7 d后,将有机硅改性炭质泥岩置于温度为60℃的烘箱中24 h,直至试样完全干燥,筛分得到干湿循环0次的改性炭质泥岩粒径级配。②将干燥后的改性炭质泥岩置于塑料盆中,缓慢倒入去离子水,直至有机硅改性炭质泥岩完全没入其中,然后将其置于实验室(20℃±5℃)中静置24 h。③用真空抽滤器将反应充分的有机硅改性炭质泥岩从浸泡溶液中抽滤出来,然后将得到的改性炭质泥岩在60℃烘箱中烘24 h。④冷却至室温后,利用20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm标准筛筛分,以获得改性炭质泥岩的颗粒级配。重复步骤②~④,直至改性炭质泥岩干湿循环10次。

3)微观表征试验:在崩解试验中选取有机硅胶结炭质泥岩中大小为5 mm×10 mm×10 mm(高×长×宽)的岩块进行扫描电镜(SEM)测试,以得到有机硅改性炭质泥岩微观结构的变化规律。

2 有机硅改性炭质泥岩的力学特性

图3为干湿循环作用下各掺量有机硅改性炭质泥岩的无侧限抗压强度变化规律。从图3可以看出,干湿循环前,随着有机硅掺量的增加,改性炭质泥岩的无侧限抗压强度快速增长,且强度增长幅度逐渐变小。0%掺量有机硅改性炭质泥岩的强度为453.56 kPa,掺入1%、2%、3%、4%、5%的有机硅后,炭质泥岩的无侧限抗压强度分别为875.54、1 245.56、1 567.89、1 632.56、1 687.67 kPa,分别增长了0.93倍、1.75倍、2.46倍、2.60倍、2.72倍。与瓜尔胶^[15]、木质素^[22]等改性炭质泥岩的强度发展规律相似,均由于改性材料的胶结作用改善了其内部微观结构。此外,在干湿循环作用下,各掺量有机硅改性炭质泥岩的无侧限抗压强度变化规律与0%掺量时相似,均随干湿循环次数的增加而减小,但干湿循环次数相同时,改性炭质泥岩的无侧限抗压强度保持率远大于0%掺量时,且随着有机硅掺量的增加,其强度保持率越大。以掺量1%、5%为例,干湿循环前其无侧限抗压强度分别为875.54、1 687.67 kPa,干湿循环10次后,其无侧限抗压强度分别为547.67、1 463.78 kPa,强度保持率为62.55%、86.73%,远大于0%掺量的43.99%,如图4所示。表明有机硅可有效减缓改性炭质泥岩在干湿循环作用下的强度劣化,有助于维持炭质泥岩路基的长期稳定。

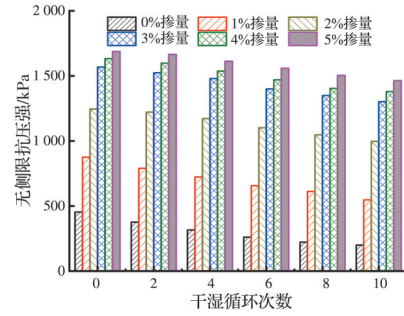


图3 有机硅改性炭质泥岩的无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compressive strength of organosilicon-modified carbonaceous mudstone

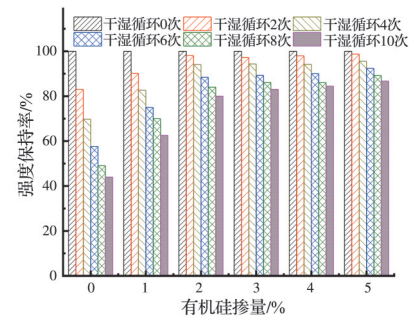


图4 干湿循环作用下改性炭质泥岩的强度保持率

Fig. 4 Strength retention rate of modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycles

3 有机硅改性炭质泥岩的崩解特性

3.1 改性炭质泥岩粒径的演变规律

有机硅具有较高的黏度及表面活性,将其掺入炭质泥岩后会导致炭质泥岩颗粒出现不同程度的团聚。图5为不同有机硅掺量下改性炭质泥岩的粒径分布。由图5可以看出:1)掺入有机硅后,改性炭质泥岩的粒径分布变化明显,尤其大于2 mm的粗颗粒含量显著增加,且改性炭质泥岩最大粒径 D_{max} 从10 mm增加至20 mm,最小粒径从0增大至0.5 mm。2)粒径为[10 mm, 20 mm)、[5 mm, 10 mm)的改性炭质泥岩含量随有机硅掺量的增加而增多,但粒径为[5 mm, 10 mm)的改性炭质泥岩含量在有机硅掺量为1%时出现突增。3)粒径为[2 mm, 5 mm)的改性炭质泥岩含量随有机硅掺量的增加呈先增多后减小的趋势,且粒径为[0 mm, 0.075 mm)、[0.075 mm, 0.15 mm)、[0.15 mm, 0.25 mm)、[0.25 mm, 0.5 mm)、[0.5 mm, 1 mm)、[1 mm, 2 mm)的改性炭质泥岩含量随有机硅掺量的增加而逐渐减小。出现上述现象的原因主要是有机硅将细颗粒黏聚在一起并附着在粗颗粒表面,从而形成粒径更大的改性炭质泥岩团聚体。

随着有机硅含量的增加,改性炭质泥岩中细颗粒含量逐渐减少,粗颗粒含量逐渐增多,如图6所示。可见,相较于0%掺量的有机硅改性炭质泥岩,

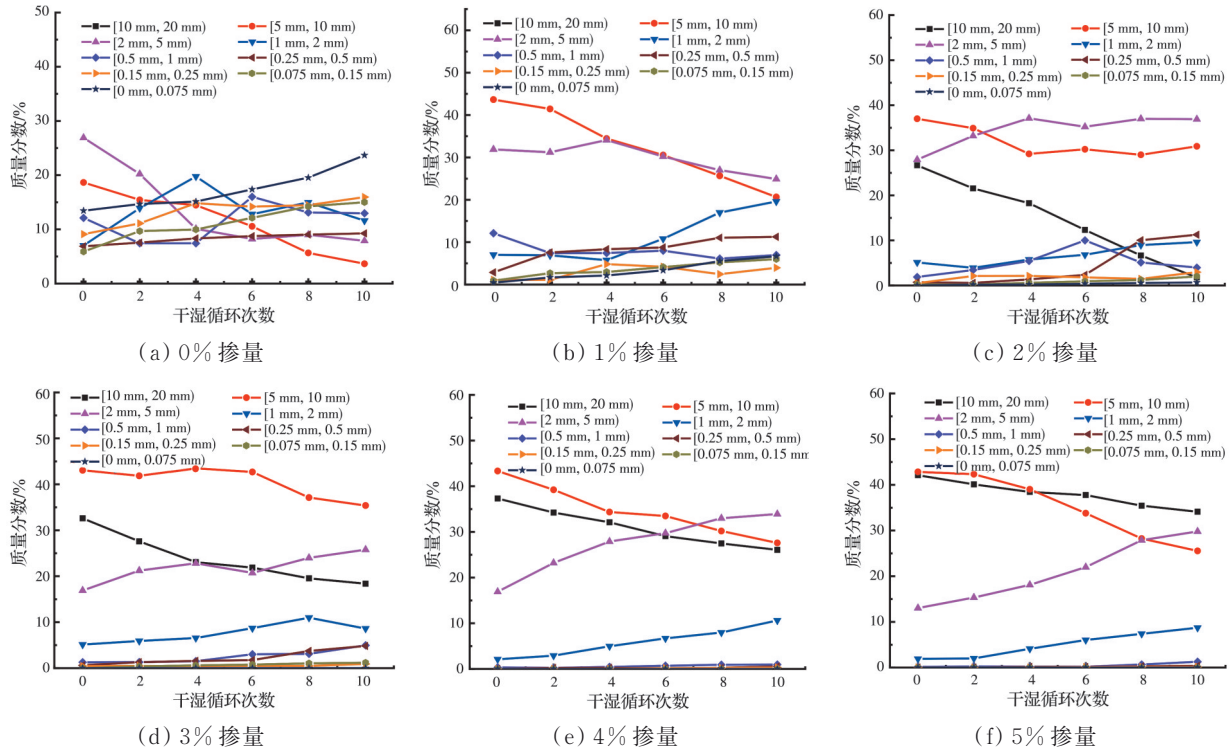


图 5 改性炭质泥岩在干湿循环作用下各组粒径的变化规律

Fig. 5 Particle size evolution of modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycles

掺入 1%、2%、3%、4%、5% 有机硅后,炭质泥岩的细颗粒含量分别减少了 29.70%、46.02%、47.20%、51.94%、52.42%。

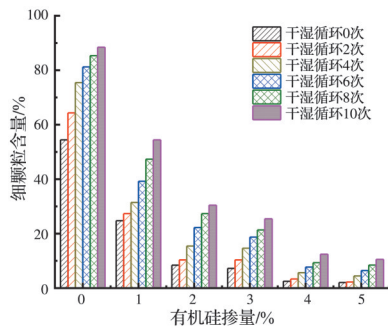


图 6 干湿循环作用下改性炭质泥岩细颗粒含量的变化规律
Fig. 6 Variation of fine particle content of modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycles

进一步分析干湿循环作用下改性炭质泥岩的粒径变化可知,有机硅改性炭质泥岩仍会发生崩解,细颗粒含量逐渐增多,但其粒径变化幅度显著减小,且崩解过程中[10 mm, 20 mm)、[5 mm, 10 mm)和[2 mm, 5 mm)粒组改性炭质泥岩颗粒含量变化最剧烈。同时,在干湿循环作用下,掺量为0%和1%的改性炭质泥岩[5 mm, 10 mm)和[2 mm, 5 mm)粒组含量快速减小,干湿循环10次后,其[5 mm, 10 mm)粒组含量分别为 3.65%、20.65%, [2 mm, 5 mm)粒组含量分别为 7.90%、24.89%。与掺量为0%和1%的改性炭质泥岩不同,在干湿循环作用下,2%、

3%、4%、5% 掺量的改性炭质泥岩[10 mm, 20 mm)与[5 mm, 10 mm)粒组含量随干湿循环次数的增加而快速减小,而[2 mm, 5 mm)粒组含量随干湿循环次数的增加而逐步增大。一方面,由于有机硅的胶结包覆作用,使得改性炭质泥岩粒径增大,且减小了炭质泥岩与外部水间的水-岩作用。另一方面,由于[10 mm, 20 mm)与[5 mm, 10 mm)粒组炭质泥岩缓慢崩解,改性炭质泥岩粒径减小并趋于[2 mm, 5 mm)粒组,从而使得该粒组含量增大。

3.2 改性炭质泥岩不均匀系数与曲率系数的演变规律

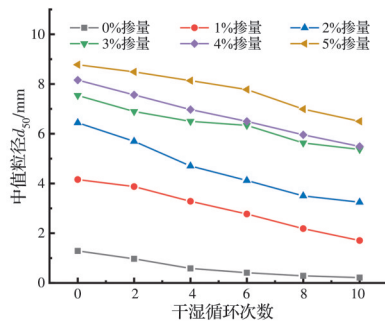
不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 是表征岩土体颗粒级配特征的 2 个重要指标。以 0% 掺量有机硅改性炭质泥岩为例,依据烘干后的粒径级配曲线,得到不同干湿循环次数下改性炭质泥岩特征粒径 d_{60} 、 d_{50} 、 d_{30} 及 d_{10} , 并求得其不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c , 见表 2。由表 2 可见, d_{60} 、 d_{50} 、 d_{30} 及 d_{10} 均随干湿循环次数的增加而快速减小,且减小速率逐步变小。

进一步分析不同掺量下有机硅改性炭质泥岩的中值粒径 d_{50} 、不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 随干湿循环次数的变化规律,如图 7 所示。各掺量下的有机硅改性炭质泥岩的中值粒径 d_{50} 、不均匀系数 C_u 变化规律相似,中值粒径 d_{50} 均随干湿循环次数的增加而减小,不均匀系数 C_u 随干湿循环次数的增加先

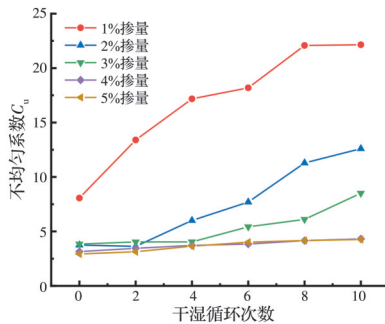
表 2 0% 掺量有机硅改性炭质泥岩的特征粒径、 C_u 及 C_c

Table 2 Characteristic grain size, C_u and C_c of carbonaceous mudstone with 0% organosilicon dosage
单位:mm

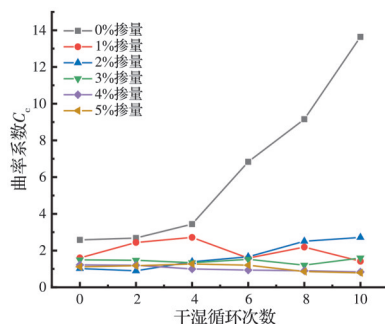
干湿循环次数	d_{60}	d_{50}	d_{30}	d_{10}	C_u	C_c
0	2.424	1.288	0.296	0.014	173.14	2.582
2	1.608	0.970	0.197	0.009	178.67	2.681
4	1.164	0.585	0.179	0.008	145.50	3.441
6	0.694	0.412	0.154	0.005	138.80	6.834
8	0.578	0.285	0.126	0.003	192.67	9.157
10	0.374	0.215	0.101	0.002	233.75	17.047



(a) 中值粒径 d_{50}



(b) 不均匀系数 C_u



(c) 曲率系数 C_c

图 7 改性炭质泥岩中值粒径 d_{50} 、不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 随干湿循环次数的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of d_{50} , C_u and C_c of modified carbonaceous mudstone with the number of dry and wet cycles

减小后增大。而各掺量下的有机硅改性炭质泥岩曲率系数 C_c 变化趋势复杂,其中 0% 掺量有机硅改

性炭质泥岩的曲率系数 C_c 随干湿循环次数的增加而增大,与付宏渊等^[23]的结果相同。有机硅改性炭质泥岩的曲率系数 C_c 在干湿循环作用下均增大,与 0% 掺量有机硅改性炭质泥岩相比,其变化幅度较小,说明崩解过程中经有机硅改性后的大粒径团聚体始终占据优势地位,细颗粒含量增长较小。此外,相同干湿循环次数下,有机硅掺量越大,改性炭质泥岩的中值粒径 d_{50} 越大,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 越小。

3.3 改性炭质泥岩 Weibull 分布参数的演变规律

研究表明,崩解过程中炭质泥岩粒径符合 Weibull 函数分布^[24],即粒径小于 d_i 的炭质泥岩颗粒累计质量分数 P_i 符合服从两参数 Weibull 分布函数

$$P_i = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{\lambda}\right)^k\right) \quad (1)$$

式中: λ, k 为 Weibull 分布函数的参数, $0 < P_i \leq 1$ 。

采用式(1)对各掺量下有机硅改性炭质泥岩级配曲线进行拟合,结果见图 8,并得到 Weibull 分布参数 λ, k 的变化趋势,见表 3。可见,掺入有机硅后,改性炭质泥岩 Weibull 分布参数 λ, k 均显著增长,且参数 λ, k 均随干湿循环次数的增加而减小。前期研究发现^[23],参数 λ 表示泥岩粒径分布的区间大小,可表征崩解过程中改性炭质泥岩的粒径差异; k 值代表 Weibull 曲线主体部分的斜率,可表征炭质泥岩的颗粒崩解进程。因此,掺入有机硅后,改性炭质泥岩在干湿循环作用下粒径变化显著,崩解剧烈。此外,掺入有机硅后,炭质泥岩颗粒间出现胶结、聚集,从而导致大粒径的炭质泥岩含量增多,细粒径的炭质泥岩含量减少,进而使其 Weibull 分布函数的参数 λ, k 增大。而当改性炭质泥岩经受干湿循环时,由于炭质泥岩自身的崩解作用,大粒径的炭质泥岩逐渐崩解成细颗粒,导致大粒径炭质泥岩的含量逐步减少,细粒径炭质泥岩的含量增多。

进一步分析改性炭质泥岩 Weibull 分布函数的参数 λ, k 与有机硅掺量 z 、干湿循环次数 n 两个因素之间的关系发现,改性炭质泥岩 Weibull 分布函数的参数 λ, k 与有机硅掺量 z 呈非线性增长关系,而与干湿循环次数 n 呈非线性减小关系,且有机硅掺量 z 、干湿循环次数 n 两个因素间存在一定的交互关系。故采用二阶非线性回归模型对改性炭质泥岩 Weibull 分布函数的参数 λ, k 进行正交非线性回归分析,得到参数 λ, k 与 z, n 之间的关系。

$$\lambda(z, n) = 2.497 + 2.965z - 0.252z^2 - 0.292n + 0.003n^2 + 0.001zn, \quad R^2 = 0.990 \quad (2)$$

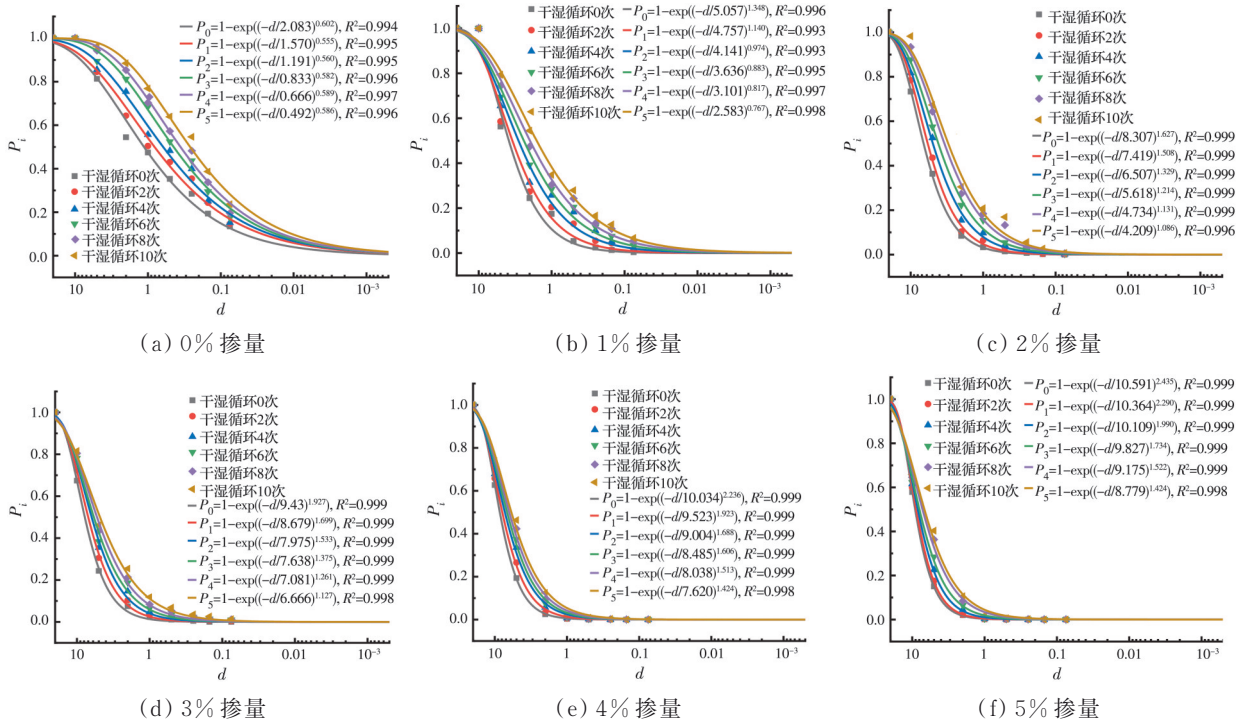


图 8 干湿循环作用下改性炭质泥岩粒径的 Weibull 分布

Fig. 8 Weibull distribution of grain size of modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycles

表 3 Weibull 参数 λ、k 的变化

Table 3 Variation of parameters λ, k of Weibull

干湿循 环次数	掺量 0%		掺量 1%		掺量 2%		掺量 3%		掺量 4%		掺量 5%	
	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k
0	2.083	0.602	5.057	1.348	8.307	1.627	9.433	1.927	10.034	2.236	10.591	2.435
2	1.570	0.555	4.757	1.140	7.419	1.508	8.679	1.699	9.523	1.923	10.364	2.290
4	1.191	0.560	4.141	0.974	6.507	1.329	7.975	1.533	9.004	1.688	10.109	1.990
6	0.833	0.582	3.636	0.883	5.618	1.214	7.638	1.375	8.485	1.606	9.827	1.734
8	0.666	0.589	3.102	0.817	4.734	1.131	7.081	1.261	8.038	1.513	9.175	1.522
10	0.492	0.586	2.583	0.767	4.249	1.086	6.666	1.127	7.620	1.424	8.779	1.424

$$k(z, n) = 0.738 + 0.485z - 0.027z^2 - 0.056n + 0.004n^2 - 0.018zn, \quad R^2 = 0.986 \quad (3)$$

式中: $\lambda(z, n)$, $k(z, n)$ 分别为掺入 $z\%$ 有机硅改性炭质泥岩在干湿循环 n 次时粒径的 Weibull 分布函数的参数。

3.4 改性炭质泥岩分形维数的演变规律

分形维数常被用于定量描述物体个体与总体间的非线性相似特征^[24-25], 广泛应用于泥岩崩解。基于建立的 Weibull 分布函数, 得到分形颗粒质量-粒径关系模型。

$$\frac{M(d)}{M_0} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\theta \quad (4)$$

$$D = 3 - \theta \quad (5)$$

式中: $M(d)$ 为粒径小于 d 的颗粒质量; M_0 为颗粒总质量; d_0 为颗粒平均粒径; θ 为常数。依据改性炭质

泥岩的粒径级配曲线, 得到 $\lg\left[\frac{M(d)}{M_0}\right]$ 与 $\lg\left[\frac{d}{d_0}\right]$ 的

拟合直线, 将拟合直线的斜率 θ 代入式(5), 即可得到各掺量下改性炭质泥岩的分形维数 D 。

图 9 为各掺量有机硅改性炭质泥岩在干湿循环作用下的分形维数演变规律。从图 9 可见, 干湿循环次数与有机硅掺量对改性炭质泥岩分形维数的影响相反, 干湿循环次数与改性炭质泥岩分形维数 D 呈负相关, 而有机硅掺量与改性炭质泥岩分形维数 D 呈正相关。1% 掺量的改性炭质泥岩在干湿循环 2、4、6、8、10 次后其分形维数 D 由最初的 2.00 分别下降至 2.26、2.33、2.44、2.47、2.51。此外, 干湿循环 10 次后, 0%、1%、2%、3%、4%、5% 掺量的改性炭质泥岩分形维数 D 分别由最初的 2.64、2.00、1.74、1.70、1.07、0.81 增加至 2.77、2.51、2.15、2.08、1.59、1.48。一般认为, 分形维数 D 反映了改性炭质泥岩颗粒的均匀性, 分形维数 D 越大, 其粒

径分布越不均匀。在干湿循环之初,由于有机硅的胶结作用,改性炭质泥岩颗粒团聚在一起,颗粒分布缓慢集中在[2 mm, 20 mm);随着改性炭质泥岩在干湿循环作用下逐步崩解,其颗粒由大变小,粒径分布更不均匀,后期颗粒崩解减缓并趋于稳定。

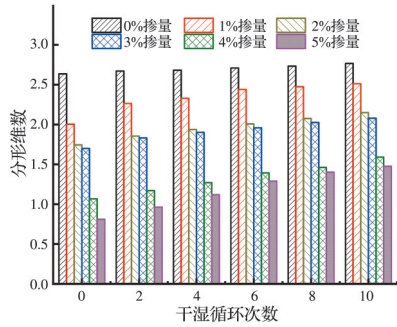


图 9 各掺量有机硅改性炭质泥岩分形维数的演变规律
Fig. 9 Evolution of fractal dimension of carbonaceous mudstone modified with various contents of organosilicon

3.5 改性炭质泥岩耐崩解指标的演变规律

改性炭质泥岩的耐崩解性可用耐崩解指数与崩解比来评价^[23]。图 10 为各掺量下改性炭质泥岩在干湿循环作用下耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 的演变规律。由图 10 可知,改性炭质泥岩耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 均与有机硅掺量 z 呈正相关,与干湿循环次数 n 呈负相关。采用二阶非线性回归模型进一步分析耐崩解指数 I_{dn} 、崩解比 D_r 与有机硅掺量 z 、干

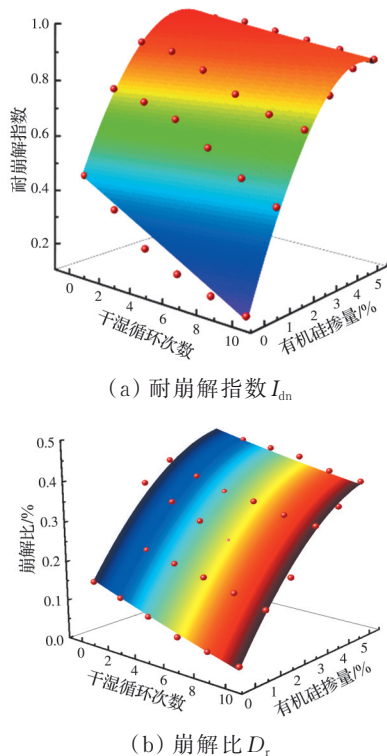


图 10 改性炭质泥岩耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 的演变规律
Fig. 10 Evolution of I_{dn} and D_r of modified carbonaceous mudstone

湿循环次数 n 之间的关系。

$$I_{dn}(z, n) = 0.458 - 0.034n + 0.302z - 5.520n^2 - 0.041z^2 + 0.006zn, R^2 = 0.971 \quad (6)$$

$$D_r(z, n) = 0.150 - 0.013n + 0.114z + 1.440n^2 - 0.010z^2 + 5.239zn, R^2 = 0.990 \quad (7)$$

式中: $I_{dn}(z, n)$ 、 $D_r(z, n)$ 分别为掺入 $z\%$ 有机硅改性炭质泥岩在干湿循环 n 次时的耐崩解指数与崩解比。可见,掺入有机硅后改性炭质泥岩的崩解速率显著减小,有机硅的胶结作用可很好地抑制其崩解,而干湿循环加速了改性炭质泥岩的崩解,对其崩解具有显著促进作用。

4 有机硅改性炭质泥岩的微观作用机制

为揭示有机硅改性炭质泥岩的抑崩解机制,需先对改性炭质泥岩崩解前的微观结构进行分析,以得到有机硅对炭质泥岩的改性作用机制。采用 SEM 对崩解过程中有机硅改性炭质泥岩的微观结构进行分析,如图 11 所示。由图 11 可见,炭质泥岩的微观结构较松散,微观孔隙较大,且主要以片状结构面-面接触为主。而掺入有机硅后,改性炭质泥岩的结构致密,颗粒间胶结明显,微观孔隙较小,表面平整光滑,并团聚成一个整体。同时,从图 11(c)、(d) 中可以看出,有机硅主要以网状结构胶联和包覆两种作用模式改变炭质泥岩的微观结构。一方面,有机硅的胶联作用使松散的炭质泥岩颗粒黏结在一起,形成致密且结构稳定的团聚体。另一方面,有机硅包覆在炭质泥岩颗粒表面,形成一层疏水膜,从而阻止水分进入改性炭质泥岩内部,抑制改性炭质泥岩的崩解。

已有研究发现^[23],在炭质泥岩崩解过程中,炭质泥岩内部微观结构在水-岩作用下出现侵蚀、孔隙增

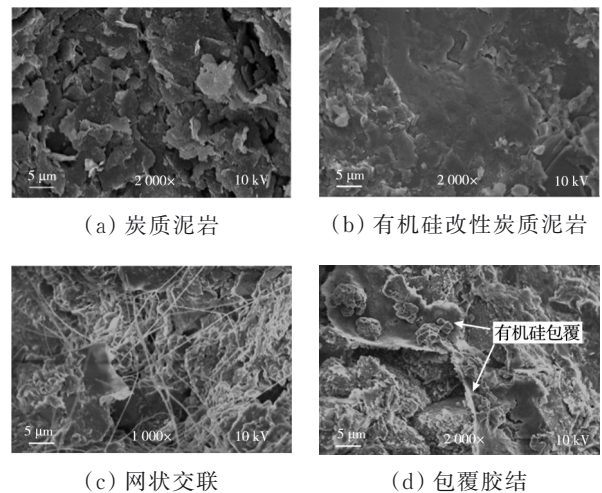


图 11 有机硅改性炭质泥岩 SEM 图
Fig. 11 SEM images of organosilicon-modified carbonaceous mudstone

大、微裂隙发育贯通等现象,从而使其在宏观上表现为大颗粒炭质泥岩崩解为粒径更小的细颗粒;掺入有机硅后,改性炭质泥岩在干湿循环作用下虽会出现一定程度的崩解,但其崩解比远小于炭质泥岩的崩解比,故有机硅的掺入有效抑制了炭质泥岩的崩解。为揭示上述现象出现的原因,利用SEM对干湿循环4、8次的炭质泥岩和有机硅改性炭质泥岩进行扫描电镜试验,得到改性炭质泥岩在干湿循环作用下微观结构,如图12所示。

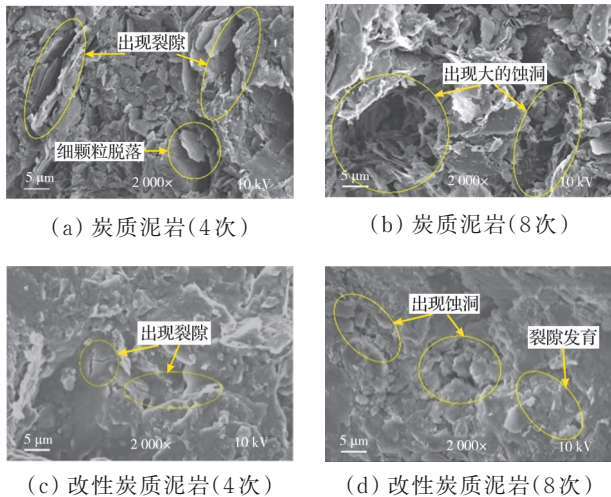


图12 干湿循环下改性炭质泥岩SEM图

Fig. 12 SEM images of modified carbonaceous mudstone under dry and wet cycles

从图12(a)、(b)中可以看出,干湿循环4次后,炭质泥岩微观结构更松散,细颗粒逐渐剥落,孔隙增大,且出现明显贯通的微细裂隙。干湿循环8次后,炭质泥岩出现明显的蚀洞,微观结构进一步被破坏,这主要是由于炭质泥岩中可溶性盐溶解,造成颗粒间胶结破坏,从而使颗粒进一步剥离。而对于有机硅改性炭质泥岩而言,干湿循环4次后,其颗粒间的胶结仍致密、稳定,仅出现少量微裂隙,并未出现明显的细颗粒剥落现象(图12(c));干湿循环8次后,改性炭质泥岩微观结构中的微裂隙进一步扩展,形成较大的贯通裂隙和蚀洞,但蚀洞尺寸远小于炭质泥岩(图12(d))。可见,掺入有机硅后,改性炭质泥岩的微观结构远比炭质泥岩稳定,干湿循环作用对改性炭质泥岩微观结构的影响远小于炭质泥岩。因此,有机硅的胶联和包覆作用能够有效阻止水的入渗,减小了干湿循环作用对改性炭质泥岩的影响,从而达到抑制其崩解的作用。

综上所述,有机硅对炭质泥岩的抑崩解机制可分为3个方面:1)胶结机制。掺入有机硅后,炭质泥岩颗粒间的黏聚力增强,使得周围细小炭质泥岩颗粒聚集成大的颗粒并黏附在大粒径的炭质泥岩颗

粒表面,进而形成有机硅炭质泥岩团聚体。这一机制增大了改性炭质泥岩的粒径,使得其颗粒的最大粒径及大粒径含量增加,亦增强了改性炭质泥岩间的胶结作用,使其无侧限抗压强度快速增长。2)填充机制。掺入有机硅后,有机硅随溶液的流动缓慢渗入炭质泥岩内部,填充颗粒间的孔隙。炭质泥岩颗粒间的孔隙被填充,堵塞了水分的入渗通道,防止了内部炭质泥岩与水的直接接触,抑制了炭质泥岩的崩解及软化。3)包覆成膜机制。有机硅可包裹炭质泥岩颗粒,并附着在炭质泥岩表面;干燥后在其颗粒表层形成高分子薄膜,并通过网状结构交联炭质泥岩颗粒。由于高分子薄膜具有斥水作用,阻止了水与炭质泥岩的直接反应,抑制了炭质泥岩的崩解及软化,减小了干湿循环的损伤作用。

5 结论

通过开展干湿循环作用下有机硅改性炭质泥岩无侧限抗压强度、崩解及SEM试验,分析不同掺量有机硅改性炭质泥岩在干湿循环作用下的强度特性、崩解特征及微观结构的演变规律,得到以下结论:

1)干湿循环作用下,各掺量有机硅改性炭质泥岩无侧限抗压强度均随干湿循环次数的增加而减小,且干湿循环次数一样时,改性炭质泥岩的无侧限抗压强度保持率远大于掺量为0%的改性炭质泥岩,且随着有机硅掺量的增加,其强度保持率越高。

2)掺入有机硅后,改性炭质泥岩中大于2 mm的粗颗粒含量显著增加,且炭质泥岩最大粒径 D_{max} 和最小粒径 D_{min} 均显著增大。此外,干湿循环作用下有机硅改性炭质泥岩虽仍会发生崩解,但其粒径变化幅度显著减小,且崩解过程中[10 mm, 20 mm)、[5 mm, 10 mm)和[2 mm, 5 mm)粒组的改性炭质泥岩颗粒含量变化最剧烈。

3)各掺量有机硅改性炭质泥岩的中值粒径 d_{50} 均随干湿循环次数的增加而减小,不均匀系数 C_u 随干湿循环次数的增加先减小后增大;相同干湿循环次数下,有机硅掺量越大,改性炭质泥岩中值粒径 d_{50} 越大,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 越小。

4)掺入有机硅后,改性炭质泥的Weibull分布参数 λ 、 k 均显著增大,且参数 λ 、 k 均随干湿循环次数的增加而减小。

5)干湿循环次数与有机硅掺量对改性炭质泥岩分形维数 D 、耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 的影响相反,改性炭质泥岩分形维数、耐崩解指数 I_{dn} 与崩解比 D_r 均与有机硅掺量 z 呈正相关,与干湿循环次数 n 呈负相关。

6)有机硅主要是以网状结构胶联和包覆两种作用模式改善炭质泥岩的微观结构,且掺入有机硅后,改性炭质泥岩的微观结构远比炭质泥岩稳定,干湿循环作用对改性炭质泥岩微观结构的影响远小于炭质泥岩。

参考文献

- [1] 刘琼,曾铃,查焕奕,等.击实和三轴压缩条件下炭质泥岩的颗粒破碎及力学响应研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(3):1120-1131.
Liu Q, Zeng L, Zha H Y, et al. Investigation of particle fragmentation and mechanical response of carbonaceous mudstone under percussive and triaxial compression conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3): 1120-1131. (in Chinese)
- [2] 付宏渊,杨琪毅,曾铃,等.多因素影响下预崩解炭质泥岩动回弹特性研究[J].土木工程学报,2024,57(2):117-128.
Fu H Y, Yang Q Y, Zeng L, et al. Dynamic resilient characteristics of disintegrated carbonaceous mudstone under the influence of multiple factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(2): 117-128. (in Chinese)
- [3] 何忠明,刘正夫,卢逸恒.动力湿化作用下炭质泥岩路堤填料崩解及强度特性试验[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(7):2853-2866.
He Z M, Liu Z F, Lu Y H. Disintegration and strength characteristics of carbonaceous mudstone embankment filler during dynamic humidification[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(7): 2853-2866. (in Chinese)
- [4] 李盛南,梁桥,刘新喜,等.干湿循环作用下炭质泥岩溶蚀孔隙度的化学计量方法[J].中国公路学报,2023,36(2):89-96.
Li S N, Liang Q, Liu X X, et al. A stoichiometric method for dissolution porosity of carbonaceous mudstone under dry and wet cycles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 89-96. (in Chinese)
- [5] Phan V T A. Improvement in engineering properties of mudstone in southwestern Taiwan through compaction and a cement additive[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(3): 1833-1843.
- [6] Ghadr S, Liu C H, Mrudunayani P, et al. Effects of hydrophilic and hydrophobic nanosilica on the hydromechanical behaviors of mudstone soil[J]. Construction and Building Materials, 2022, 331: 127263.
- [7] 唐静,丁启龙.改性预崩解炭质泥岩强度特性及微观机理分析[J].交通科学与工程,2021,37(1):13-18.
Tang J, Ding Q L. Analysis of strength characteristics and microscopic mechanism of modified disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 13-18. (in Chinese)
- [8] Hsiao D, Hsieh C. Improving mudstone materials in badland in southwestern Taiwan by increasing density and low-cement amount[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2290.
- [9] 姚佳良,易旺,张谭龙,等.改性废塑料纤维水泥稳定碎石性能与应用研究[J].交通科学与工程,2023,39(6):57-65,92.
Yao J L, Yi W, Zhang T L, et al. Experimental performance and application analysis of plastic waste fiber-reinforced cement-stabilized macadam[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(6): 57-65, 92. (in Chinese)
- [10] 梁志超,张爱军,任文渊,等.石灰改良黄土土水特征拟合模型及微观特性[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):241-246.
Liang Z C, Zhang A J, Ren W Y, et al. Fitting model for soil water characteristics of lime-improved loess and its microscopic properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 241-246. (in Chinese)
- [11] 祝艳波,余宏明,杨艳霞,等.红层泥岩改良土特性室内试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):425-432.
Zhu Y B, Yu H M, Yang Y X, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 425-432. (in Chinese)
- [12] 徐鹏,蒋关鲁,任世杰,等.红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):678-683,692.
Xu P, Jiang G L, Ren S J, et al. Experimental study of dynamic response of subgrade with red mudstone and improved red mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 678-683, 692. (in Chinese)
- [13] 曾铃,余慧聪,高乾丰,等.阿拉伯树胶改性预崩解炭质泥岩路用性能及改性机制[J].中国公路学报,2023,36(10):42-54.
Zeng L, Yu H C, Gao Q F, et al. Road performance and modification mechanisms of disintegrated carbonaceous mudstone modified with gum Arabic[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 42-54. (in Chinese)
- [14] Zeng L, Yu H C, Gao Q F, et al. Mechanical behavior and microstructural mechanism of improved disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1992-2002.
- [15] 付宏渊,查焕奕,潘浩强,等.生物聚合物改良预崩解炭质泥岩水稳性及冲刷试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2633-2644.
Fu H Y, Zha H Y, Pan H Q, et al. Experimental study on water stability and scour resistance of biopolymer

- modified disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7): 2633-2644. (in Chinese)
- [16] Zha H Y, Fu H Y, Zeng L, et al. Use of sodium alginate as a novel cementitious material to improve the engineering properties of disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(10): 431.
- [17] Wang J J, Fan K X, Du J H, et al. Effect of organosilicon modified epoxy resin on slurry viscosity and mechanical properties of polyurethane grouting materials[J]. Construction and Building Materials, 2023, 387: 131585.
- [18] 周雨晴, 陈晓斌, 程玉峰, 等. 有机硅改性红层泥岩表面疏水机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(12): 4828-4838.
Zhou Y Q, Chen X B, Cheng Y F, et al. Mechanism of surface hydrophobicity of red-bed mudstone modified by organosilicone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(12): 4828-4838. (in Chinese)
- [19] 张农, 项哲, 潘东江. 硅溶胶自吸渗注浆及泥岩防渗加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊 1): 3121-3130.
Zhang N, Xiang Z, Pan D J. Self-imbibition grouting and argillaceous rock mass anti-seepage reinforcement with silica sol[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3121-3130. (in Chinese)
- [20] 李盛南, 刘新喜, 李玉, 等. 炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 99-107.
Li S N, Liu X X, Li Y, et al. Study on the deformation characteristics and damage evolution law of the progressive failure process of carbonaceous mudstone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 99-107. (in Chinese)
- [21] 付宏渊, 杨海涛, 曾铃, 等. 炭质泥岩填料击实特性及颗粒破碎研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(3): 113-124.
Fu H Y, Yang H T, Zeng L, et al. Study on the compaction characteristics of carbonaceous mudstone filler and particle crushing[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(3): 113-124. (in Chinese)
- [22] Zha H Y, Fu H Y, Chen C Y, et al. The use of eco-friendly lignin as a cementitious material to improve the engineering properties of disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129456.
- [23] 付宏渊, 刘杰, 曾铃, 等. 考虑荷载及干湿循环作用的炭质泥岩崩解特征试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 22-31.
Fu H Y, Liu J, Zeng L, et al. Disintegration characteristics of carbonaceous mudstone under loading and wet-dry cycles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 22-31. (in Chinese)
- [24] Fu H Y, Zha H Y, Zeng L, et al. Disintegration behavior and mechanism of carbonaceous mudstone under acidic corrosion and wetting-drying cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 168.
- [25] Fu Q, Wang Z H, Peng G, et al. Pore structure related triaxial mechanical response and strength criterion of basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(4): 1325-1344.

(编辑 王秀玲)