

黄河泥沙的固碳能力及其持水性能研究

郭德辉¹, 张敏¹, 冯晋华¹, 张建伟¹, 赫中营¹, 李小春²

(1.河南大学 建筑工程学院,河南 开封 475004;2.中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北 武汉 430071)

摘要:【目的】研究改良后黄河泥沙的固碳能力以及持水性能。【方法】基于活性氧化镁碳化的方法,通过CO₂吸收量测试、持水率测试以及微观测试,研究固化剂掺量、碳化时间和初始含水率对黄河泥沙固碳能力、持水性能及微观结构的影响。【结果】黄河泥沙的固碳能力与固化剂掺量、碳化时间等因素呈正相关,存在一个最优初始含水率,使得黄河泥沙的固碳能力达到最佳。黄河泥沙的持水性能与固碳能力呈正相关,但其持水性能提升幅度随固化剂掺量和碳化时间的增加而降低。初始含水率较低时,固碳过程促进了黄河泥沙持水性能的提升,而较高的初始含水率则显著降低了黄河泥沙固碳后的持水性能。微观测试结果揭示:黄河泥沙碳化过程中生成的棱柱状水碳镁石及片状球碳镁石/水菱镁石等镁碳酸盐,通过胶结作用将松散的土颗粒胶结在一起,形成块状胶结物,使得黄河泥沙更加密实,进而提升了松散黄河泥沙的持水性能。

【结论】碳化方法提升了黄河泥沙的固碳能力与持水性能,为后续黄河泥沙的创新利用提供了一定的技术和理论参考依据。

关键词:黄河泥沙;固化剂掺量;CO₂吸收量;持水性能;微观结构

中图分类号:TU521

文献标识码:A

黄河泥沙的资源化利用是黄河流域高质量发展的重要内容^[1]。黄河年输沙量居于世界前列^[2],每年由中游输送而来的大量泥沙导致下游河床持续抬升,进而形成“地上悬河”的状况,对周边地区的安全构成威胁^[3]。泥沙治理是协调黄河水沙关系的关键,在新时代绿色发展理念的推动下,黄河泥沙的资源属性日益凸显^[5]。现如今已开展了将黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料^[6],以及用于改良盐碱地^[8]等方面研究,且均取得了初步成果。

黄河泥沙主要由砂土、粉土、黏粒组成^[9],其持水性能较差,极大地限制了其在建筑工程、安全工程以及生态改良等不同方向的应用潜力。在针对改善土体持水性能的研究中,张雷等^[10]将水泥作为淤泥质黏土的固化剂,发现水泥的加入可以有效降低土体的渗透系数,但是水泥的生产伴随着显著的碳排放;之后张俊然等^[11]针对粉土采用环境友好的生物聚合物作为固化剂,使得土体饱和含水率增大,孔隙比增大,持水能力显著提高,生物聚合物的使用显著减少了水泥改良方法中产生的碳排放;随后王亮等^[12]采用活性氧化镁碳化技术对粉土和粉质黏土进行改良,在实现土体抗渗性能与水泥固化土相当

的同时,展现出固碳潜力,该方法不仅使得土体抗渗性得到了改善,而且还具有良好的环境效益,就实现“双碳”目标而言,该技术更具有优势。因其独特的固碳潜力,该方法在岩土工程的应用中得到了广泛重视^[13],郑旭等^[19]基于该方法开展了针对粉土和粉质黏土冻融耐久性能的研究,发现改良土与水泥固化土相似,具有较好的抗冻融性能;刘松玉等^[20]通过研究经该方法改良后粉土的抗硫酸盐侵蚀性能,发现改良土具有比水泥固化土更强的抗硫酸盐侵蚀能力;王东星等^[21]将淤泥质土通过该方法进行改良后,发现改良土的抗压强度得到了进一步增加。上述研究证明了该方法对于不同质地较差材料的改良具有显著优势,然而该方法对于成分复杂的黄河泥沙的作用尚不清晰,缺乏充分而系统的研究,相关工作亟待开展。

本文通过分析经过持水性能改良后的黄河泥沙在CO₂吸收量和持水率的变化,研究其固碳能力和持水性能。探明固化剂掺量、碳化时间和初始含水率对土体固碳能力和持水性能的影响。并且通过电子显微镜、扫描电镜仪(SEM)和X-射线衍射仪(XRD)对碳化土的微观结构和化学成分进行了分

收稿日期/Received:2025-03-10

修回日期/Revised:2025-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(42307243);河南省科技攻关项目(242102321012,252102320040);河南省青年人才托举工程(2025HYTP034)。

第一作者:郭德辉(1999—),男,硕士研究生,从事土壤性能改良方面的研究。E-mail:guodehui@henu.edu.cn。

通信作者:张敏(1988—),女,副教授,博士,从事环境岩土与区域碳中和方面的研究。E-mail:minzhang@henu.edu.cn。

析。该研究为黄河泥沙的高值化利用提供了技术和理论参考依据,对推动流域“双碳”目标实现具有一定实践价值。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用黄河泥沙取自开封市袁坊乡王庵控导工程黄河沿线,经过烘干处理至稳定状态后,作为试验材料。活性氧化镁购自河北镁神科技股份有限公司。使用智能粒度分析仪测定了材料的颗粒级配,颗粒级配曲线如图 1 所示。试验所用黄河泥沙的基本性质见表 1,通过 X-射线荧光光谱仪(XRF) 测定了黄河泥沙和活性氧化镁的主要化学成分,化学成分含量见表 2。

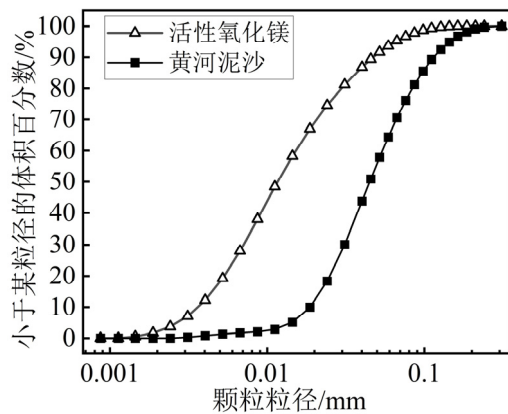


图 1 材料的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves of materials

表 1 试验用土的基本性质

Tab.1 Characteristics of studied soils

液限/ %	塑限/ %	土粒 比重	最大干 密度 /(g/cm ³)	最优含 水率/%	天然含 水率/%	天然干密 度/(g/cm ³)
28.35	19.78	2.70	1.68	17.10	20.50	1.43

表 2 原材料的化学组成

Tab.2 Chemical composition of raw materials

成分	成分含量/%	
	黄河泥沙	活性氧化镁
SiO ₂	64.50	1.19
Al ₂ O ₃	12.72	/
CaO	8.87	1.5
Fe ₂ O ₃	4.82	0.19
MgO	2.41	96.27
Na ₂ O	1.91	/
其他	4.77	0.85

1.2 试验装置

1.2.1 碳化试验装置

本试验所用碳化装置是基于普通反应釜改进。针对常温常压下碳化松散土,在反应釜内增加了“工”字形塑料平台。改进后的碳化装置由反应釜、“工”字形塑料平台、CO₂ 储气罐以及 CO₂ 调压阀组成,试验装置简图如图 2 所示。盖子左边和中间各设有一个出气口,在左边的出气口 1 上方套有一个气球,通过起球的鼓起状况来体现反应釜内气体消耗以及气压情况。若气球略微鼓起,则表明反应釜内 CO₂ 充足;若气球收缩,则说明反应釜内 CO₂ 被消耗或者已经泄露。在碳化过程中需始终保持气球处于略微鼓起状态,如果发现气球收缩,应当及时通入 CO₂,以确保反应釜内始终处于 CO₂ 饱满状态。

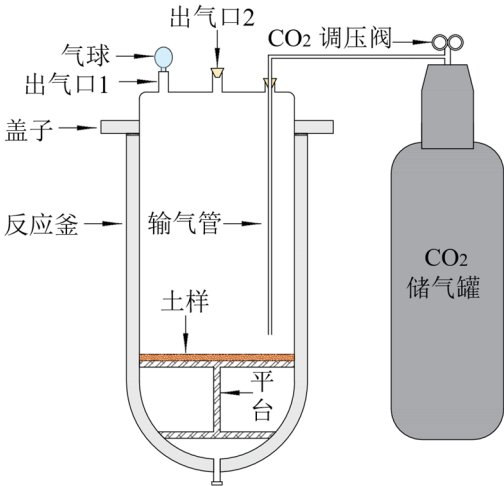


图 2 碳化装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of carbonation apparatus

1.2.2 持水试验装置

持水试验装置包含精度为 0.01 g 的电子秤、烧杯、内径为 60 mm 的布氏漏斗以及直径为 60 mm 的滤纸。

1.3 试验方案

本文所有试验均在常温常压条件下进行。试验方案如表 3 所示。每组试验均进行三次平行试验,试验结果取三次试验数据的算术平均数。基于此表的试验方案,CO₂ 吸收量采用黄河泥沙碳化前后的质量差表示^[22],体现固碳能力的变化。黄河泥沙持水性能通过其持水率表征。

碳化试验具体步骤如下: ①对拌合好的土样进行称量,随后将其平铺于反应釜内的平台上,持续通入 CO₂,使 CO₂ 充盈整个反应釜;②反应釜密封好后继续通入 CO₂,直至气球呈现略微鼓起的状态,此时碳化正式开始;③在碳化过程中,气球一旦出现收缩,表明反应釜内 CO₂ 已经不再饱满,应及时通入 CO₂,始终保持反应釜内 CO₂ 处于饱满状态,直至碳化结束;④碳化结束,称量碳化后的土样质量,通过

碳化前后土体质量差得出 CO_2 吸收量。碳化试验的技术路线如图 3(a)所示。

碳化试验结束后,称取一定量的碳化土进行持水试验,持水试验具体步骤如下:①称取 50 g 碳化后的土样($M=50$ g)置于铺有滤纸的布氏漏斗中,称取漏斗、滤纸、土样的总质量 M_1 ;②不间断均匀滴水,直至达到设定的注水量(设定注水量为 50 g);③注水完成后,静置 1 小时,此时漏斗内已没有水滴出,称量漏斗、滤纸、土样以及土样吸收水的总质量 M_2 ;④采用下式(1)计算持水率,持水试验的技术路线如图 3(b)所示。

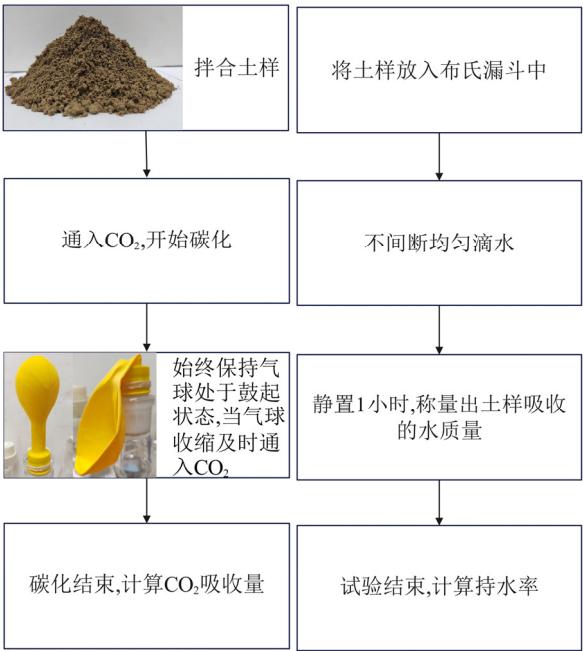
$$\text{持水率} = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M 为土样质量(g), M_1 为注水前漏斗、滤纸和土样总质量(g), M_2 为注水后漏斗、滤纸、土样以及土样吸收水的总质量(g)。

对碳化后的土样采用 Nova Nano SEM 450 型扫描电镜仪进行微观结构观测,化学组成通过 X-射线衍射仪进行测试。

表 3 试验方案
Tab. 3 Test schemes

活性氧化镁掺量/%	碳化时间/min	初始含水率/%
0,10,15,20,25	30	20
20	0,15,30,45,60	20
20	30	0,10,15,20,25



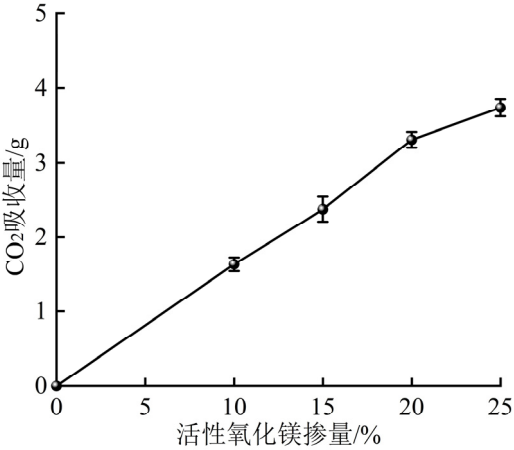
(a) 碳化试验技术路线 (b) 持水试验技术路线
图 3 试验技术路线

Fig.3 Experimental workflow

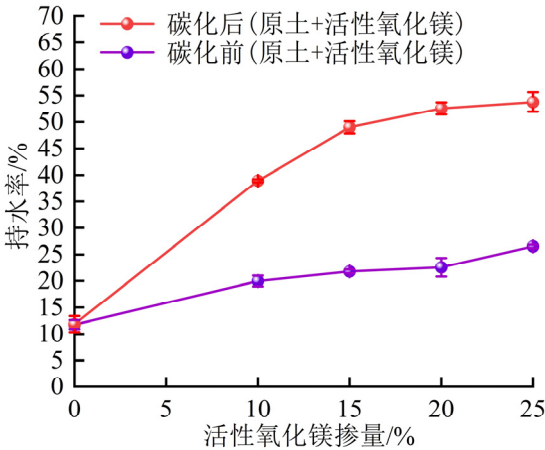
2 试验结果与分析

2.1 活性氧化镁掺量的影响

活性氧化镁掺量对黄河泥沙 CO_2 吸收量以及持水率变化的影响特征如图 4 所示,土样初始含水率均为 20%,碳化时间均为 30 min。活性氧化镁水化和碳化反应如式(1)~式(4)所示。



(a) 每 100 g 土样的 CO_2 吸收量变化曲线



(b) 持水率变化曲线

图 4 不同活性氧化镁掺量下黄河泥沙 CO_2 吸收量和持水率变化曲线

Fig.4 CO_2 absorption and water retention capacity variation curves of soil under different reactive MgO contents

根据图 4(a)所示结果, CO_2 吸收量随活性氧化镁掺量的增加而上升,具体原因可通过式(1)~式(4)的反应过程解释。活性氧化镁这一固化剂加入到黄河泥沙中,先经历水化反应,后参与碳化反应。针对该反应过程,当活性氧化镁掺量增加时,黄河泥沙中生成的水化产物(主要是 $\text{Mg}(\text{OH})_2$)随之增多,水化产物与 CO_2 发生碳化反应,增加了黄河泥沙的 CO_2 吸收量,生成一系列碳化产物。另外,图 4(a)也进一

步表明,活性氧化镁掺量增加时,黄河泥沙对 CO_2 吸收量的提升幅度先增加后降低,其中活性氧化镁掺量 15%到 20%的黄河泥沙 CO_2 吸收量提升幅度最大。原因是,活性氧化镁掺量持续增加时,由于黄河泥沙的初始含水率有限,超出碳化反应所需的活性氧化镁则无法得到利用,导致 CO_2 吸收量提升幅度随之减少。

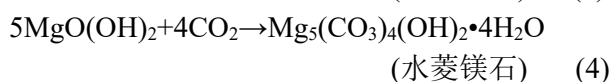
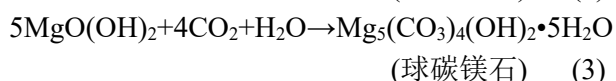
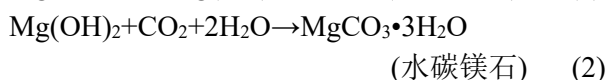
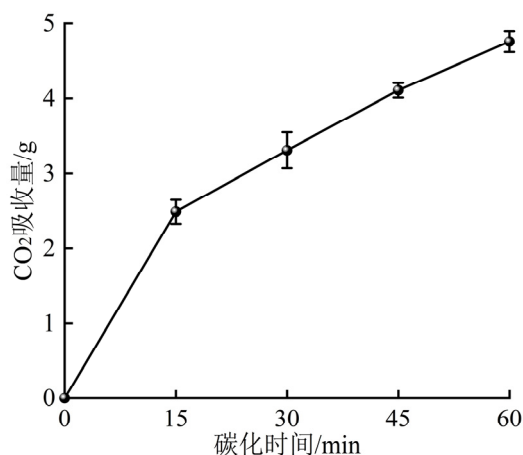


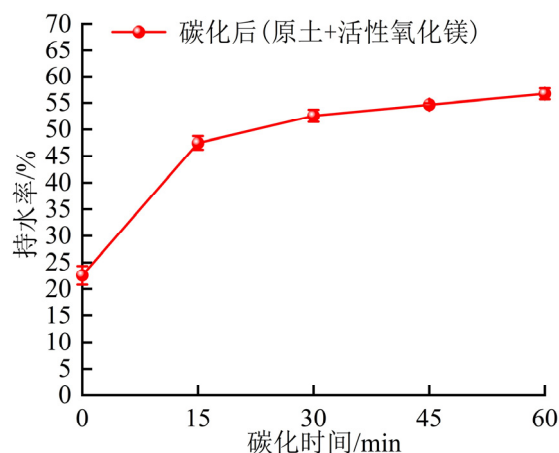
图 4(b)表明,黄河泥沙的持水率与活性氧化镁掺量呈正相关,碳化后黄泥泥沙的持水率高于碳化前的数值,揭示了碳化反应能够进一步提升黄河泥沙持水率。另外,图 4(b)中碳化前的持水率曲线表明,相较于未掺入活性氧化镁的原土(活性氧化镁掺量为 0%的点),活性氧化镁的掺入可小幅提升黄河泥沙的持水率,原因在于活性氧化镁作为一种类似生石灰的碱性物质,易于吸收水分并发生水化反应,生成体积膨胀的水化产物 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。在此基础上,碳化反应则能够进一步提升黄河泥沙的持水率。

2.2 碳化时间的影响

碳化时间对黄河泥沙 CO_2 吸收量以及持水率变化的影响特征如图 5 所示,土样中活性氧化镁掺量均为 20%,初始含水率均为 20%。在图 5(a)中能够观测到, CO_2 吸收量随碳化时间的延长呈现出上升的趋势,这是由于碳化反应会随着时间的推移而逐步加深,从而使得 CO_2 吸收量不断增加。



(a) 每 100 g 土样的 CO_2 吸收量变化曲线



(b) 持水率变化曲线

图 5 不同碳化时间下黄河泥沙 CO_2 吸收量和持水率变化曲线

Fig.5 CO_2 absorption and water retention capacity variation curves of soil under different carbonation times

图 5(b)的试验结果表明,黄河泥沙持水率与碳化时间为非线性关系,黄河泥沙持水率随着碳化时间的增加逐渐提高,其提升幅度却随之逐渐减小。碳化时间从 0 min 至 15 min 时,黄河泥沙持水率提升幅度较大,持水率从 23%提升到 48%,增长率为 108%。然而,黄河泥沙持水率的增长率随时间持续降低。该现象揭示了黄河泥沙持水性能不会随碳化时间增加而无限提高,而是存在一定的阈值。

2.3 初始含水率的影响

初始含水率对黄河泥沙 CO_2 吸收量以及持水率变化的影响特征如图 6 所示,土样中活性氧化镁掺量均为 20%,碳化时间均为 30 min,作为对照组的原土未掺入活性氧化镁也未经过碳化。从图 6(a)可以观测到, CO_2 吸收量呈现出先增后减的态势,这表明存在一个最优初始含水率,使得 CO_2 吸收量达到最大。这是由于在低初始含水率情况下,活性氧化镁的水化不够充分,水化生成的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 较少,而在高初始含水率情况下,水会堵塞一部分气体运移通道,减缓了 CO_2 在黄河泥沙中的扩散与渗透^[12]。此外,当初始含水率过高时,微溶于水的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 表面会形成一层水膜,阻碍了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 之间的反应,进一步减少了 CO_2 的吸收^[12]。

随着黄河泥沙初始含水率的升高,其持水率会随之降低,但是图 6(b)中,当初始含水率从 0%增加到 10%时,碳化后的持水率曲线中持水率会先增加,原因在于水分是水化和碳化反应能否启动的关键,在文章 2.1 和 2.2 节中证明了碳化可以提升黄河泥沙持水率,所以当水存在时,黄河泥沙发生了水化和碳化反应,致使持水率会先增加。当初始含水率为 25%时,碳化后的持水率曲线中持水率会大幅降低,

这是因为初始含水率较高,土颗粒形成了较大的团聚体,随后进行碳化,在碳化产物的胶结作用下,团聚体变得不易分散,形成大的土颗粒,如图 6(b)中的示意图 2 所示。图 6(b)中的示意图 1、2 分别是初始含水率为 20%、25%的碳化土,从图中可以明显地观察到示意图 2 中的土颗粒整体较大,这些大的土颗粒使得黄河泥沙中大孔隙增多,水分更容易流失,从而造成了持水率的大幅降低。

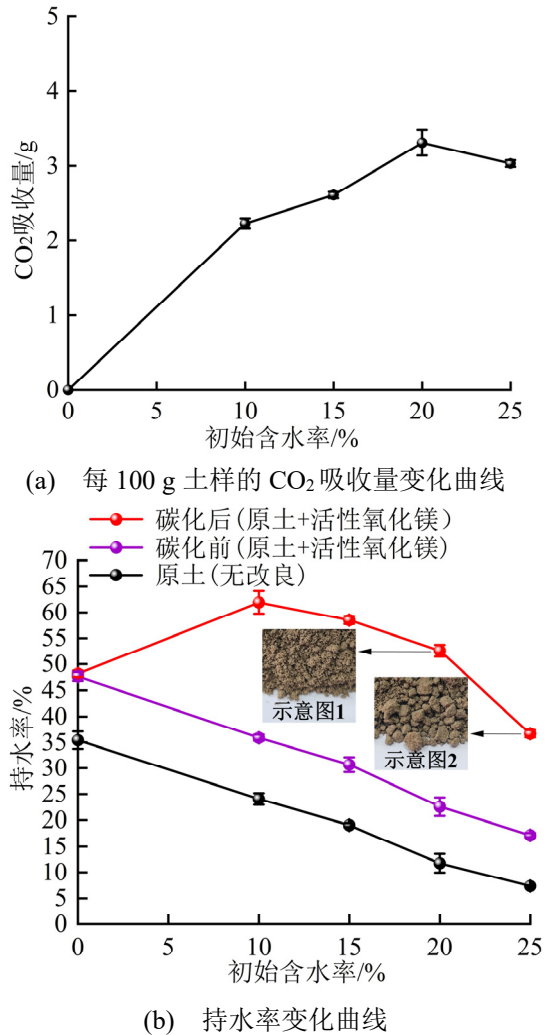


图 6 不同初始含水率下黄河泥沙 CO₂ 吸收量和持水率变化曲线

Fig.6 CO₂ absorption and water retention capacity variation curves of soil under different initial water contents

将图 6(b)中碳化前与原土的持水率曲线进行对比,进一步证明了掺入活性氧化镁能小幅提升黄河泥沙的持水率,这与文章 2.1 节中的研究结果相一致。碳化前与碳化后的试验结果可进一步证明,碳化过程能够显著提升黄河泥沙的持水率。此次研究发现松散状黄河泥沙经过碳化后,其持水性能得到了提升。这一发现是对碳化改良黄河泥沙水力性能的新认识。王亮^[12]等发现,碳化过程降低了粉土

和黏土渗透系数,本研究则直接揭示了碳化过程对黄河泥沙持水性能的提升。基于此,可以推断,碳化方法不仅对有较高压实度的粉土和黏土有效,对松散状黄河泥沙同样有效。

3 微观测试

为了证实黄河泥沙中产生了碳化反应,开展了微观测试。微观测试所选取的土样为:活性氧化镁掺量 20%、初始含水率 20%、碳化时间 30 min。

黄河泥沙碳化前、后电子显微镜成像如图 7 所示。图 7(a)为黄河泥沙碳化前的状态,揭示了土颗粒的原始松散状态,图 7(b)为黄河泥沙碳化后的状态,揭示了原本松散的土颗粒局部被胶结在一起,胶结物为碳化反应形成的产物。因此,该图中的块状土体直观证实了黄河泥沙中碳化反应的存在。碳化后黄河泥沙的 XRD 图谱如图 8 所示,物相检测汇总见表 4。该图谱进一步表明,黄河泥沙中碳化反应的产物主要由水碳镁石 (Nesquehonite)、球碳镁石 (Dypingite) 和水菱镁石 (Hydromagnesite) 组成。该测试结果与既有研究的发现一致^[24]。

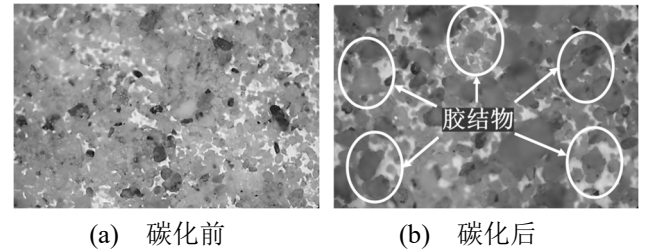


图 7 黄河泥沙碳化前、后电子显微镜图

Fig.7 Electron microscopy images of natural soil and carbonated soil

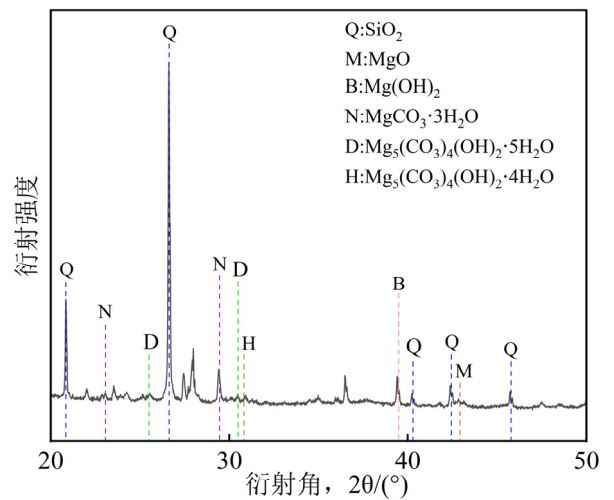


图 8 碳化后黄河泥沙 XRD 图谱

Fig.8 XRD pattern of carbonated soil

图 9 为碳化后黄河泥沙的 SEM 成像。由图 9 可以观测到,土颗粒表面和土颗粒之间存在许多呈棱柱状的水碳镁石,以及呈片状的球碳镁石/水菱镁

石,即黄河泥沙碳化后的主要产物。这些产物形态与既有研究的发现完全一致^[24]。碳化产物之间交叉生长,具有较强的胶结能力,能够将松散的土颗粒胶结在一起,形成致密结构。胶结在一起的土颗粒在电子显微镜下表现为块状土,如图 7(b)所示,胶结物的形成使黄河泥沙变得密实,是黄河泥沙持水性能改善的主要原因。

表 4 XRD 物象检测汇总

Tab.4 Summary of phases detected from XRD		
名称	化学式	符号
石英	SiO ₂	Q
方镁石	MgO	M
氢氧化镁	Mg(OH) ₂	B
水碳镁石	MgCO ₃ ·3H ₂ O	N
球碳镁石	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·5H ₂ O	D
水菱镁石	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O	H

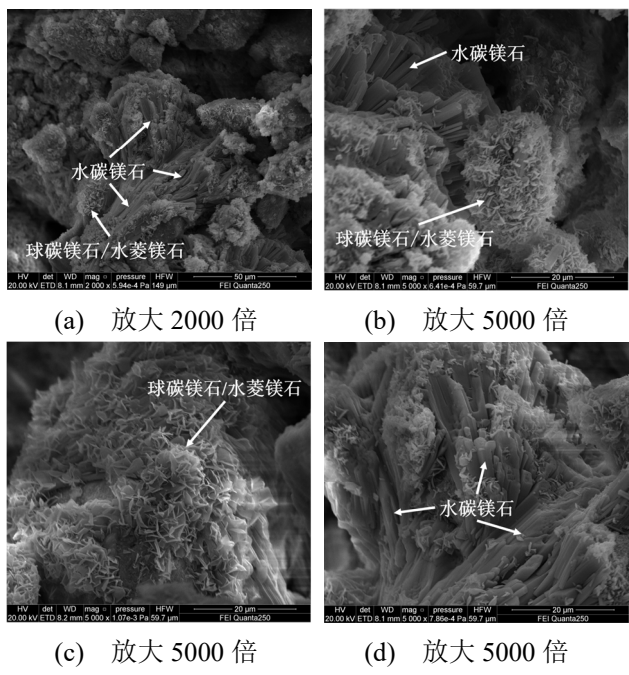


图 9 碳化后黄河泥沙扫描电镜图

Fig.9 SEM images of carbonated soils

4 结语

通过对碳化后黄河泥沙的固碳能力和持水性能的研究,得出以下结论:

- 1) 引入固化剂后,未经碳化就能小幅改善黄河泥沙的孔隙结构和持水性能,经过碳化后孔隙结构和持水性能会得到更显著的改善。
- 2) 黄河泥沙的固碳能力与碳化因素如固化剂掺量和碳化时间等呈正相关,存在一个最优初始含水率,使得黄河泥沙的固碳能力达到最佳。
- 3) 黄河泥沙的持水性能与固碳能力呈正相关,但其持水性能的提升幅度随固化剂掺量和碳化时

间的增加而降低。

4) 初始含水率较低时,固碳过程促进了黄河泥沙持水性能的提升,而较高的初始含水率则显著降低了黄河泥沙固碳后的持水性能。

5) 微观测试结果表明,相互交叉生长的镁碳酸盐将松散的土颗粒胶结成块,使黄河泥沙变得更加密实,进而提升了黄河泥沙的持水性能。

6) 经过碳化后的黄河泥沙其固碳能力在得到提升的同时,其持水性能也得到了提升。该研究表明碳化方法在提升黄河泥沙的固碳能力与持水性能方面取得了初步成效,为后续黄河泥沙的创新利用提供了一定的技术和理论参考依据。

未来将进一步开展不同阶段含水率对黄河泥沙固碳效果及持水性能的影响,并拓展二者在含水率、长周期碳化时间、固化剂掺量等因子交互作用下的发展规律。

参 考 文 献

[1] 汪安南.深入推进黄河流域生态保护和高质量发展战略努力谱写水利高质量发展的黄河篇章[J].人民黄河,2021,43(9):1-8.[WANG A N.Promoting national strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin, endeavor to compose new Yellow River chapter of China's high-quality water resources development [J]. Yellow River,2021,43(9):1-8.]

[2] ZHANG J,SHANG Y,LIU J,et al.Optimisation of reservoir operation mode to improve sediment transport capacity of silt-laden rivers[J].Journal of Hydrology,2021,594:125951.

[3] 江恩慧,屈博,王远见,等.基于流域系统科学的黄河下游河道系统治理研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(04):7-15.[JIANG E H,QU B,WANG Y J,et al.Research on synergistic regulation of the lower Yellow River based on watershed system Science[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2021,42(04):7-15.]

[4] 邢译丹,花玉凤,唐磊,等.基于土地利用变化的黄河流域河南段景观生态风险评估[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-8[2025-04-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20250223.2100.004.html>. [XING Y D,HUA Y F, TANG L,et al. Landscape ecological risk assessment of Henan section of the Yellow River basin based on land use change[J/OL].Journal of North China University of

- Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),1-8[2025-04-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20250223.2100.004.html>.]
- [5] 刘慧,柴泉雄,李长明,等.黄河泥沙物化特性与改性利用研究进展[J].人民黄河,2023,45(5):41-45,50.[LIU H,CHAI X X,LI C M,et al.Research progress of physical-chemical characteristics and modification utilization of sediment in Yellow River[J].Yellow River,2023,45(5):41-45,50.]
- [6] 王培俊,胡振琪,邵芳,等.黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析[J].煤炭学报,2014,39(6):1133-1139.[WANG P J,HU Z Q,SHAO F,et al.Feasibility analysis of Yellow River sediment used as the filling reclamation material of mining subsidence land[J].Journal of China Coal Society,2014,39(6):1133-1139.]
- [7] 胡振琪,多玲花,王晓彤.采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J].煤炭学报,2018,43(1):198-206.[HU Z Q,DUO L H,WANG X T.Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):198-206.]
- [8] MAO W,KANG S,WAN Y,et al.Yellow River sediment as a soil amendment for amelioration of saline land in the Yellow River Delta[J].Land Degradation & Development,2016,27(6):1595-1602.
- [9] 孙剑辉,柴艳,王国良,等.黄河泥沙对水质的影响研究进展[J].泥沙研究,2010,(1):72-80.[SUN J H,CHAI Y,WANG G L,et al.Review on effects of sediment on the water quality of the Yellow River[J].Journal of Sediment Research,2010,(1):72-80.]
- [10] 张雷,王晓雪,叶勇,等.水泥土抗渗性能室内试验研究[J].岩土力学,2006,27(S2):1192-1196.[ZHANG L,WANG X X,YE Y,et al.Study on anti-permeability performance of soil-cement[J].Rock and Soil Mechanics,2006,27(S2):1192-1196.]
- [11] 张俊然,赵鑫鑫,姜彤.3种生物聚合物改良粉土的持水特性研究[J].岩土力学,2022,43(8):2157-2164.[ZHANG J R,ZHAO X X,JIANG T.Water retention characteristics of silt improved by three types of biopolymer[J].Rock and Soil Mechanics,2022,43(8):2157-2164.]
- [12] 王亮,刘松玉,蔡光华,等.活性 MgO 碳化固化土的渗透特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(5):953-959.[WANG L,LIU S Y,CAI G H,et al.Permeability properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(5):953-959.]
- [13] 孔祥辉,梁允鹏,崔帅,等.活性 MgO 碳化固化疏浚底泥的影响因素及作用机理[J].建筑材料学报,2024,27(7):620-628.[KONG X H,LIANG Y P,CUI S,et al.Influencing factors and mechanism of dredged sediment carbonated and solidified with reactive MgO[J].Journal of Building Materials,2024,27(7):620-628.]
- [14] 张鹤年,陈亮,李雄威,等.活性 MgO 碳化生土砌块材料配比与机理研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):233-236.[ZHANG H N,CHEN L,LI X W,et al.Ratio and mechanism of activated magnesium oxide carbonized raw earth block materials[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(S2):233-236.]
- [15] 钟煜清,蔡光华,王俊阁,等.GGBS-活性 MgO 碳化/稳定化锌污染土的强度及电导率特性试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):221-224.[ZHONG Y Q,CAI G H,WANG J G,et al.Strength and electrical conductivity characteristics of zinc contaminated soil carbonated/stabilized with GGBS-reactive MgO[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(S2):221-224.]
- [16] LI W,CHEN Y,LI R,et al.A new method for carbonating magnesia and its possible application to soil stabilization and CO₂ capture[J].Construction and Building Materials,2023,383:131263.
- [17] YANG Y,RUAN S,WU S,et al.Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement[J].Acta Geotechnica,2021,16:1113-1125.
- [18] ONYEKWENA C C,LI Q,WANG Y,et al.Impacts of biochar and slag on carbon sequestration potential and sustainability assessment of MgO-stabilized marine soils: insights from MIP analysis[J].Environmental Science: Advances,2024,3(11):1564-1577.
- [19] 郑旭,刘松玉,蔡光华,等.活性 MgO 碳化固化土的冻融循环特性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(3):595-600.[ZHENG X,LIU S Y,CAI G H,et al.Experimental study on freeze-thaw properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J].Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2015,45(3):595-600.]
- [20] 刘松玉,郑旭,蔡光华,等.活性 MgO 碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究[J].岩土力学,2016,37(11):3057-3064.[LIU S Y,ZHENG X,CAI G H,et al.Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive

- MgO-stabilized soils[J].Rock and Soil Mechanics, 2016,37(11):3057-3064.]
- [21] 王东星,肖杰,肖衡林,等.武汉东湖淤泥碳化-固化试验研究[J].岩土力学,2019,40(05):1805-1812. [WANG D X, XIAO J, XIAO H L, et al. Experimental study of carbonated-solidified sludge in East Lake, Wuhan[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(5):1805-1812.]
- [22] ONYEKWENA C C, LI Q, WANG Y, et al. Dredged marine soil stabilization using magnesia cement augmented with biochar/slag[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2024,16(3): 1000-1017.
- [23] WANG D, ZHU J, HE F. Quantification and micro-mechanisms of CO₂ sequestration in magnesia-lime-fly ash/slag solidified soils[J].International Journal of Greenhouse Gas Control,2019,91:102827.
- [24] YI Y, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J].Canadian Geotechnical Journal,2013,50(8):899-905.
- [25] 吴丹,王玉琪,武海虹,等.三水碳酸镁合成与形貌演变过程研究[J].人工晶体学报,2014,43(3):606-613.[WU D, WANG Y Q, WU H H, et al. Research on preparation and morphology evolution of magnesium carbonate tri-hydrate[J].Journal of Synthetic Crystals, 2014,43(3):606-613.]
- [26] CAI G H, LIU S Y, ZHENG X. Influence of drying-wetting cycles on engineering properties of carbonated silt admixed with reactive MgO[J].Construction and Building Materials,2019,204:84-93.

Research on Carbon Sequestration and Water retention Characteristics of Yellow River Sediment

GUO Dehui¹, ZHNAG Min¹, FENG Jinhua¹, ZHANG Jianwei¹, HE Zhongying¹, LI Xiaochun²

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: [Objective] Investigation of the carbon sequestration capacity and water retention characteristics of modified Yellow River sediment. [Methods] Based on the carbonation method using reactive magnesium oxide, through CO₂ absorption tests, water retention rate measurements, and microscopic analyses, the effects of curing agent content, carbonation duration, and initial water content on the sediment's carbon sequestration capacity, water retention characteristics, and microstructural evolution were systematically examined. [Results] The results demonstrate that the carbon sequestration capacity of Yellow River sediment exhibits positive correlations with factors such as curing agent dosage and carbonation duration, with an optimal initial moisture content identified to maximize its carbon sequestration capacity. The water retention characteristics of the sediment show a positive correlation with carbon sequestration capacity, but the magnitude of improvement in water retention characteristics decreases as curing agent dosage and carbonation duration increase. At lower initial moisture content, the carbonation process enhances the sediment's water retention characteristics, while higher initial moisture content significantly reduces the post-carbonation water retention characteristics. Microscopic characterization reveals that prismatic nesquehonite and lamellar dypingite/hydromagnesite crystals generated during carbonation function as cementitious agents, effectively binding loose soil particles into compact aggregates. This cementation mechanism not only densifies the soil matrix but also significantly improves the water retention characteristics of the originally loose sediment. [Conclusion] The carbonation method enhances both the carbon sequestration capacity and water-retention characteristics of Yellow River sediment, providing technical and theoretical references for its innovative utilization.

Keywords: Yellow River sediment; curing agent content; carbon sequestration; water retention characteristic; microstructure