文章编号:1007-9629(2024)07-0620-09

活性MgO碳化固化疏浚底泥的影响因素及作用机理

孔祥辉[1]，　梁允鹏[1]，　崔　帅[2]，　王潇康[1]，　张思峰[1,*]
(1.山东建筑大学 交通工程学院,山东 济南 250101;
2.山东易方达建设管理集团有限公司,山东 济南 250014)

摘要:采用MgO碳化技术对疏浚底泥进行固化处理,通过强度试验和微观特性试验,系统分析了活性MgO碳化固化底泥的主要影响因素及微观机理.结果表明:增加活性MgO掺量能生成较多的水化产物和碳化产物,使得底泥强度明显增大;土体含水率与压实度能够影响CO_2在土体内部的运移,二者增大导致CO_2吸附量减少,从而影响底泥的碳化固化效果;长时间的碳化作用导致部分碳化产物发生变质反应,底泥强度随碳化时间的延长呈先增后减趋势;水化产物和碳化产物对土颗粒的包裹、胶结和孔隙填充是活性MgO碳化固化底泥的主要作用机理.

关键词:疏浚底泥;活性MgO;碳化;影响因素;微观机理
中图分类号:U416.1　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.007

Influencing Factors and Mechanism of Dredged Sediment Carbonated and Solidified with Reactive MgO

KONG Xianghui[1]，　*LIANG Yunpeng*[1]，　*CUI Shuai*[2]，　*WANG Xiaokang*[1]，　*ZHANG Sifeng*[1,*]
(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
2. Shandong Yifangda Construction Management Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: MgO carbonization technology was used to solidify the dredged sediment. The main influencing factors and micro-mechanism of reactive MgO carbonization solidification of sediment were systematically analyzed through strength tests and microscopic characteristic tests. The results indicate that more hydration products and carbonization products can be generated with the increase of reactive MgO content, and the strength of sediment increases significantly. The water content and compaction degree are two main factors that affect the transport of CO_2 in soil, and the increase of both will lead to the decrease of CO_2 absorption, thus affecting the carbonization and solidification effect of sediment. The long-term carbonization can cause some carbonization products to undergo metamorphic reaction, so the strength of sediment increases first and then decreases with the increase of carbonization time. The encapsulation, cementation and pore filling of soil particles by hydration products and carbonization products are the main mechanism of reactive MgO carbonization solidification of sediment.

Key words: dredged sediment; reactive MgO; carbonization; influencing factor; micro-mechanism

对疏浚底泥进行固化改良,使其转化为可再生利用的岩土工程材料,是目前处理底泥最有效的途径之一[1-2].通过煅烧菱镁矿制备得到的活性MgO,具有比表面积大、活性高及水化速率快等特点,是一种

收稿日期:2023-09-03;修订日期:2024-02-03
基金项目:山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(2020CXGC011404)
第一作者:孔祥辉(1978—),男,山东青岛人,山东建筑大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:kongxh@sdjzu.edu.cn
通讯作者:张思峰(1976—),男,山东济宁人,山东建筑大学教授,硕士生导师,博士.E-mail:sddxzsf@163.com

可持续发展的新型固化材料[3-5].Harrison[6]从环保角度出发，率先开发了由活性MgO和普通硅酸盐水泥混合而成的新型固化剂，并证实其具有良好的工程性能和环境效益.碳化技术是利用材料中的部分矿物与CO_2发生反应，生成结构稳定的碳酸盐，从而提高基体强度的方法[7-8].该技术目前大多应用于混凝土养护[9]、砂浆表面处理[10]、再生骨料强化[11]和再生微粉制备[12]等绿色建材领域.将活性MgO固化与CO_2碳化相结合，使MgO的水化产物与CO_2发生反应，生成一系列不同类型的镁式碳酸盐，能够显著提高土体的固化强度[13-15].Yi等[16]使用MgO碳化固化砂土，发现固化砂土碳化3 h时的强度即可达到同掺量水泥固化土养护28 d时的强度，效果十分显著.王东星等[17]针对碳化矿渣-MgO-CaO固化土进行研究，发现MgO对固化土强度的贡献远大于CaO.

作为一项新兴技术，MgO碳化固化在土体固化改良方面的研究较少.鉴于此，本研究采用活性MgO碳化技术对疏浚底泥进行固化处理，分析活性MgO掺量(质量分数，文中涉及的掺量、含水率等除特别说明外均为质量分数)、土体含水率、压实度和碳化时间等对固化效果的影响，明确碳化作用下土体内部矿物组成、微观形貌和孔隙结构的演变特征，从微观层面探索活性MgO碳化固化疏浚底泥的作用机理.

1　试验

1.1　原材料

疏浚底泥取自山东省济南市小清河疏浚治理工程，土样外观呈黄褐色.由于取样之前底泥已在河岸晾晒，土体的初始含水率不高，仅为17.9%.疏浚底泥的基本物理力学性能如表1所示，颗粒级配曲线见图1，其中砾粒、砂粒和细粒的含量分别为13.7%、62.7%和23.6%.

表1　疏浚底泥的基本物理力学性能

Table 1　Basic physical and mechanical properties of dredged sediment

Natural water content(by mass)/%	Plastic limit(by mass)/%	Liquid limit(by mass)/%	Plasticity index	Optimum water conten(by mass)/%	Maximum dry density/($g\cdot cm^{-3}$)	Unconfined compression strength/MPa
17.90	22.94	29.34	6.40	14.40	1.93	0.31

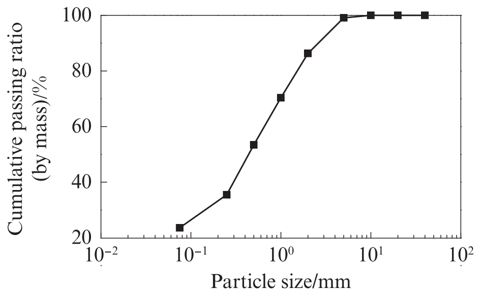


图1　疏浚底泥颗粒级配曲线

Fig. 1　Particle gradation curve of dredged sediment

活性MgO为上海市奉贤区某化工厂生产，外观呈白色粉末状，平均粒径小于5 μm，比表面积为72 m^2/g.参照YB/T 4019—2006《轻烧氧化镁化学活性测定方法》，测定该MgO活性含量为73.2%，具有较好的反应活性.活性MgO的化学组成如表2所示.

试验拌和水采用普通自来水.

表2　活性MgO的化学组成

Table 2　Chemical composition(by mass) of reactive MgO

Unit:%

MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	IL
96.87	1.50	0.09	0.08	1.46

1.2　碳化装置

采用自行研发的小型碳化釜(图2)对试件进行碳化处理.碳化釜内设置3层金属格网，用来放置试件；顶部上盖设进气口和排气口，并安装数显压力表，进气口经通气管与CO_2气罐相连.首先，将制备好的试件置于碳化釜内的金属格网上，盖上上盖板，拧紧螺栓；然后，打开CO_2气罐通气，并打开排气孔，使釜内压力保持在50 kPa，通气1 min后，排出釜内空气；最后，关闭排气孔，持续通气，使釜内压力达到200 kPa，调节减压阀保持此压力，并开始计时.

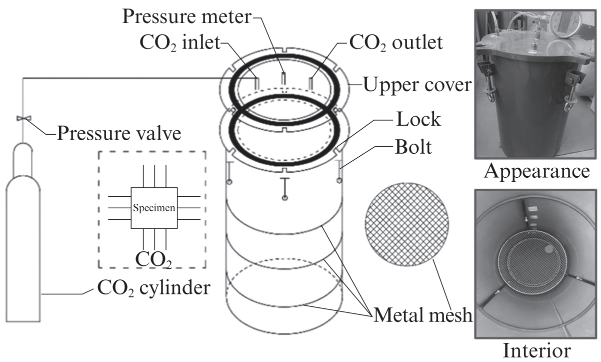


图2　碳化釜示意图

Fig. 2　Schematic diagram of carbonization kettle

2　试验方案与方法

采用不同活性MgO掺量(以底泥烘干土质量计)、土体含水率和压实度制备试件，并考虑碳化时间的影响，分析4种单一因素对底泥固化效果的影

响,以确定合适的碳化固化条件.具体试验方案如表3所示.按照表3确定各组分的质量,将其混合搅拌均匀后采用静压法制备尺寸为ϕ50×50 mm的圆柱体试件.对于未碳化试件,脱模后直接放入标准养护箱((20±2) ℃、相对湿度不低于95%)中养护1、7、14、28 d;对于碳化试件,脱模后先称重,随后按方案中的碳化时间进行碳化试验,碳化完成后再次称重,取试件碳化前后的质量差来确定CO_2吸附量.

试件养护或碳化结束后,首先,开展无侧限抗压强度(f_{UCS})试验,分析不同因素对底泥强度的影响规律,探寻底泥碳化固化的最佳条件;然后,对最佳条件下制备的试件进行X射线衍射(XRD)、扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)和压汞(MIP)试验,分析固化底泥的水化产物、碳化产物和微观结构;最后,从微观特征及演化规律方面探索活性MgO碳化固化作用机理.总体试验流程图如图3所示.需要说明的是,未碳化底泥微观试样取自养护7 d的试件.

表3　碳化固化试验方案

Table 3　Carbonization solidification test scheme

w(MgO)/%	Water content (by mass)/%	Compaction degree/%	Carbonization time/h
5/10/15/20/25	15	92	1.0
15	12/15/18/21/24	92	1.0
15	15	86/89/92/95/98	1.0
15	15	92	0.5/1.0/2.0/3.0/6.0

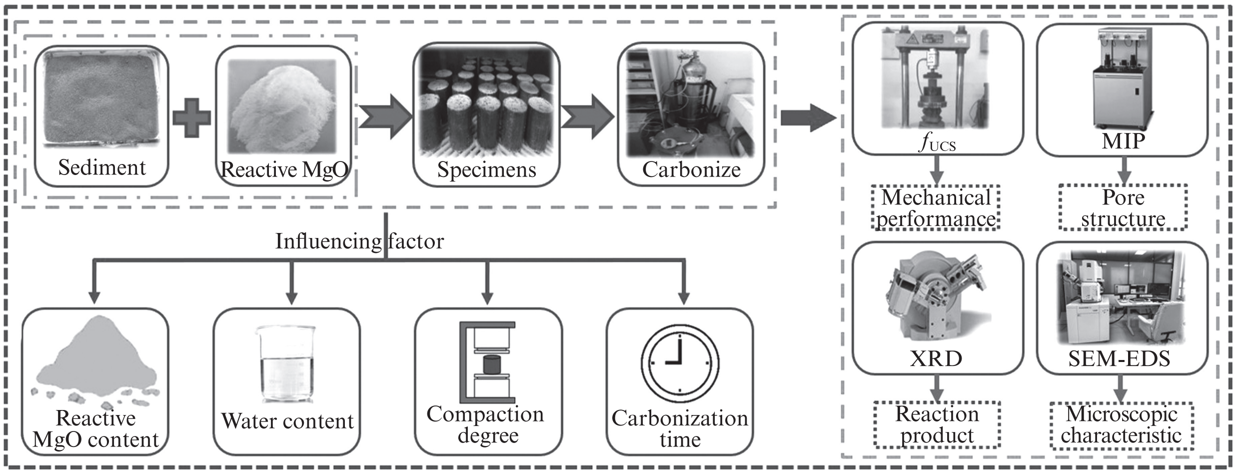


图3　总体试验流程图

Fig. 3　Overall test flow chart

2.1　无侧限抗压强度试验

为研究不同条件下碳化固化底泥的力学强度性能,对达到养护龄期或碳化时间的试件,采用路强仪进行无侧限抗压强度测试,加载速率设定为1 mm/min.

2.2　X射线衍射试验

试样取自无侧限抗压强度试验破坏后的试件,将试件碎块放入40 ℃烘箱中,烘干后取出进行研磨,并过0.075 mm筛.采用日本理学Ultima Ⅳ型XRD,分析碳化固化底泥中的水化产物与碳化产物的变化情况.

2.3　扫描电镜-能谱分析试验

试样取自无侧限抗压强度试验完成后试件断面未破坏部分,将其切削成约1 cm^{3}小正方体后放入烘箱中,持续烘干48 h以上.试验前将试样掰断,取断裂面干净整洁的小块土粒进行喷金处理,置于GeminiSEM 300型SEM内,抽真空后进行微观形貌观察.

2.4　压汞试验

为研究碳化前后底泥土体内部孔隙结构的变化,对小尺寸块状试样进行烘干处理,将其掰断,形成自然断面后采用Autopore Ⅳ 9500型压汞仪开展MIP试验.

3　结果与分析

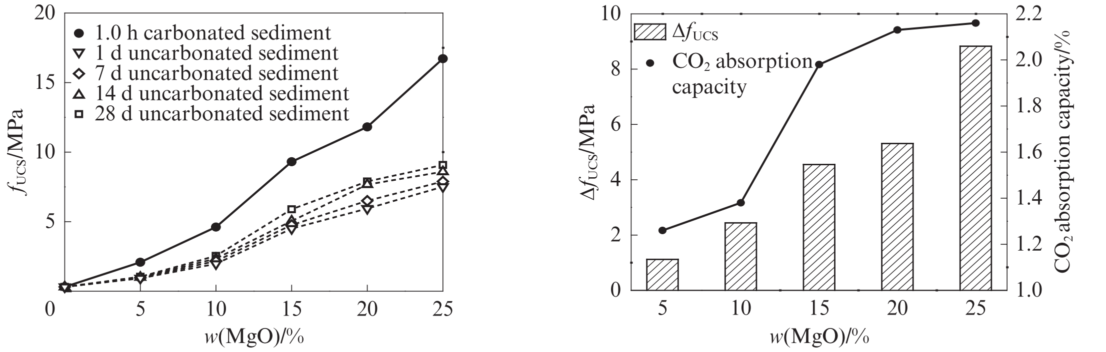
3.1　碳化固化效果的影响因素

3.1.1　活性MgO掺量

活性MgO掺量对试件无侧限抗压强度(f_{UCS})和CO_2吸附能力的影响如图4所示.由图4(a)可见:(1)碳化和未碳化试件的f_{UCS}均随着活性MgO掺量的增加而增大,且碳化作用对试件强度的增强效果更加显著.(2)不同活性MgO掺量下,试件碳化1.0 h时,其强度平均值为未碳化试件养护28 d时强度的1.7倍.对于未碳化试件,活性MgO水化产物的胶结作

用是其强度增长的主要原因，当活性MgO掺量增加时，土体中的水化产物也相应增多，试件强度随之增大；当试件经碳化处理后，土体内的水化产物进一步发生反应生成碳化产物，在水化产物与碳化产物共同作用下，其强度显著提高．

参照JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中道路基层、底基层材料7 d无侧限抗压强度不小于3 MPa的要求，定义底泥无侧限抗压强度增长值（Δf_{UCS}）为碳化试件与养护7 d未碳化试件的强度之差．采用单位质量试件的CO_2吸附量来对比各碳化试件对CO_2的吸附能力．由图4(b)可见：试件的Δf_{UCS}与CO_2吸附能力具有明显相关性，二者均随活性MgO掺量增加而增大，进一步说明活性MgO的水化产物越多，在碳化过程中所吸收的CO_2就越多．



(a) f_{UCS}　　(b) Δf_{UCS} and CO_2 absorption capacity

图4　活性MgO掺量对试件无侧限抗压强度和CO_2吸附能力的影响

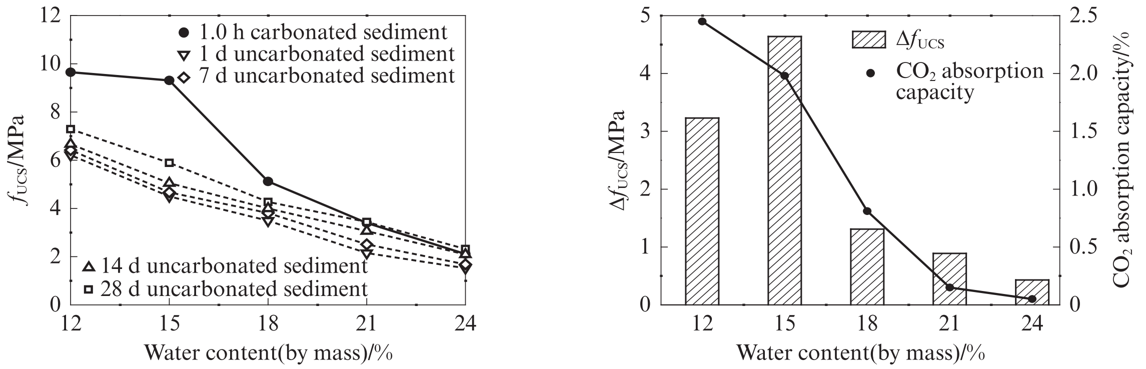
Fig. 4　Effect of reactive MgO content on unconfined compression strength and CO_2 absorption capacity of specimens

3.1.2　土体含水率

土体含水率对试件无侧限抗压强度（f_{UCS}）和CO_2吸附能力的影响如图5所示．

由图5(a)可见：(1)随着含水率的增加，不同龄期下未碳化试件的f_{UCS}均逐渐减小，且二者呈现一定的线性关系．(2)碳化试件的f_{UCS}也同样随着含水率的增加而减小，当含水率从12%增加到15%时，试件强度的降幅不大；而当含水率大于15%后，试件强度出现大幅下降．

由图5(b)可见：随着含水率的增加，试件的CO_2吸附能力逐渐降低，除15%含水率外，试件碳化前后无侧限抗压强度增长值（Δf_{UCS}）也相应减小．这表明，含水率是影响CO_2在土体内部扩散的主要因素，当含水率较高时，试件内部的大部分孔隙被水分填充，CO_2进入内部的通道被堵塞，从而导致碳化固化效果减弱．值得注意的是，当含水率由12%提高到15%时，试件的Δf_{UCS}与CO_2吸附能力的变化出现了不一致的现象．这可能是当含水率较低时，水分的少许增加虽然减小了CO_2的吸附量，但是能使碳化作用更加充分，利于试件强度增长，对此还有待进一步深入研究．



(a) f_{UCS}　　(b) Δf_{UCS} and CO_2 absorption capacity

图5　土体含水率对试件无侧限抗压强度与CO_2吸附能力的影响

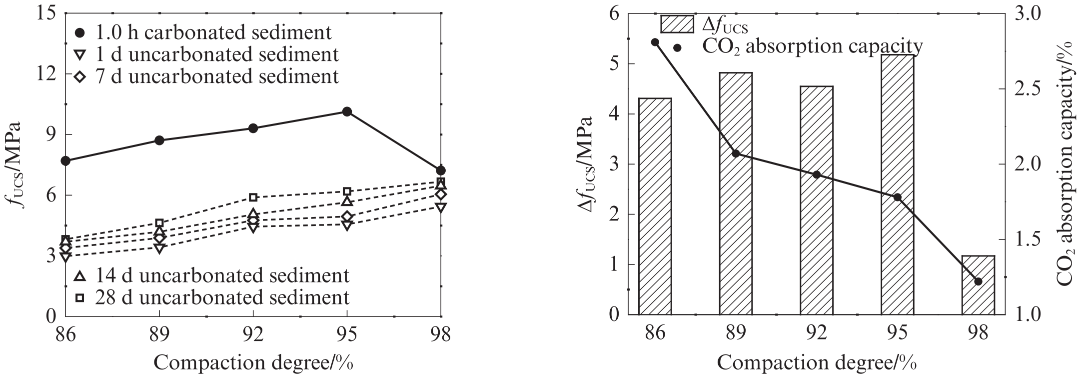
Fig. 5　Effect of soil water content on unconfined compression strength and CO_2 absorption capacity of specimens

3.1.3　土体压实度

土体压实度对试件无侧限抗压强度（f_{UCS}）和CO_2吸附能力的影响如图6所示．由图6(a)可见：未碳化试件的f_{UCS}与压实度呈正相关，即压实度越高，土颗粒之间嵌挤咬合得越充分，从而其f_{UCS}越大；而碳化试件的f_{UCS}随着压实度的增大呈先增后减趋势，强度

峰值出现在95%压实度处.

由图6(b)可见:(1)随着压实度的增大,试件的CO_2吸附能力明显降低,是由于压实度增大导致土体孔隙率减小,CO_2难以向试件内部扩散.(2)当压实度为86%时,试件对CO_2的吸附能力并不弱,可生成较多的碳化产物,但由于土颗粒间的孔隙较大,碳化产物无法充分胶结土颗粒,导致该压实度下试件的Δf_{UCS}不及压实度为89%、92%和95%的试件;当压实度为98%时,土体孔隙率过小,严重影响CO_2的通入,碳化作用对试件强度的提升效果甚微,其Δf_{UCS}大幅下降.



(a) f_{UCS}　　(b) Δf_{UCS} and CO_2 absorption capacity

图6　土体压实度对试件无侧限抗压强度与CO_2吸附能力的影响

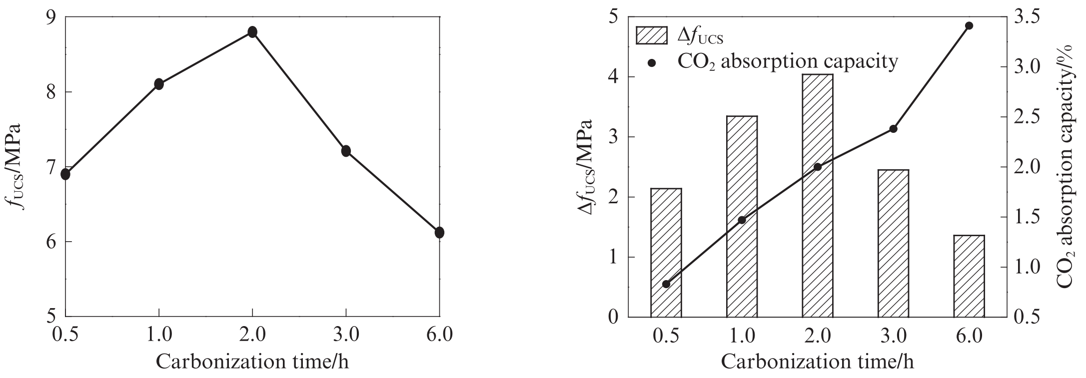
Fig. 6　Effect of compaction degree on unconfined compression strength and CO_2 absorption capacity of specimens

3.1.4　碳化时间

图7为碳化时间对试件无侧限抗压强度(f_{UCS})和CO_2吸附能力的影响.

由图7(a)可见:碳化时间对试件f_{UCS}的影响十分明显,碳化0.5 h时,试件的f_{UCS}已明显高于未碳化试件养护28 d时的强度(5.89 MPa);然而碳化试件的f_{UCS}并非随着碳化时间的延长而持续增加,而是呈先增后减趋势,碳化2.0 h时试件强度的提升效果最佳,随后试件强度大幅下降.可能是长时间的碳化作用使碳化产物发生了变质反应,逐渐向对土体强度贡献度较低的产物转化,具体原因需结合微观特性试验进一步分析.

由图7(b)可见:当碳化时间小于2.0 h时,试件的Δf_{UCS}和CO_2吸附能力具有明显相关性,即随着碳化时间的延长,二者均增大;当碳化时间大于2.0 h后,虽然CO_2持续吸收,但由于部分碳化产物发生了变质反应,导致试件Δf_{UCS}下降.



(a) f_{UCS}　　(b) Δf_{UCS} and CO_2 absorption capacity

图7　碳化时间对试件无侧限抗压强度与CO_2吸附能力的影响

Fig. 7　Effect of carbonization time on unconfined compression strength and CO_2 absorption capacity of specimens

3.2　微观特性分析

基于对底泥强度影响因素的分析,同时考虑材料的经济成本,本研究将10%活性MgO掺量、15%含水率、95%压实度,以及2.0 h碳化时间作为底泥碳化固化的最佳条件.针对天然疏浚底泥、最佳条件下的未碳化底泥和碳化底泥试样开展微观特性试验,明确碳化作用下底泥的矿物组成、微观形貌和孔隙结构的演变特征.

3.2.1　X射线衍射试验分析

各试样的XRD图谱如图8所示.由图8可见:(1)天然疏浚底泥中含有石英、方解石与钠长石;未碳化底泥中除了天然疏浚底泥中含有的3种矿物衍

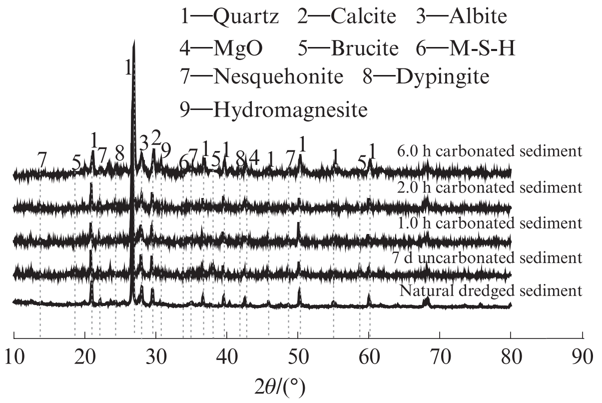


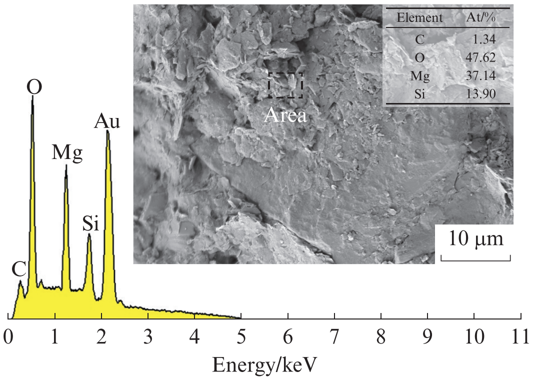
图8　各试样的XRD图谱

Fig. 8　XRD patterns of samples

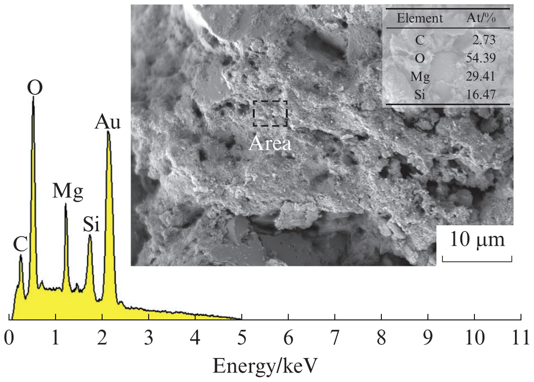
射峰外，还有以水镁石（brucite：$Mg(OH)_2$）和水化硅酸镁（M-S-H：MgO-SiO_2-H_2O）为主的物相，二者由活性MgO掺入土体后发生的水化反应与火山灰反应产生；而在碳化底泥中存在球碳镁石（dypingite：$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2·5H_2O$）、水碳镁石（hydromagnesite：$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2·4H_2O$）和三水菱镁石（nesquehonite：$MgCO_3·3H_2O$）等矿物的衍射峰，且水化产物水镁石衍射峰的峰值强度显著降低．这表明碳化底泥中的水镁石与CO_2发生了碳化反应．(2)与未碳化底泥相比，3组碳化底泥中的水镁石衍射峰峰值强度均大幅下降，说明碳化反应在短时间内即可发生．(3)碳化2.0 h试样中三水菱镁石衍射峰(14.02°)的峰值强度明显高于碳化1.0 h试样，说明随着碳化时间的延长，碳化反应不断进行；但碳化6.0 h试样中三水菱镁石衍射峰的峰值强度近似为0，表明长时间碳化作用导致三水菱镁石发生了变质反应，逐渐向球碳镁石和水碳镁石转化[18]．尽管球碳镁石和水碳镁石也是对强度有益的碳化产物，但二者对土体强度的贡献率远不及三水菱镁石[19]，这也是长时间碳化作用下试件强度降低的原因．

3.2.2　能谱分析

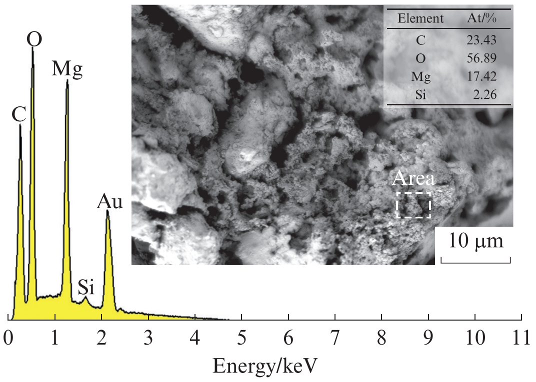
为进一步验证XRD对微观产物的分析，分别对未碳化和碳化底泥中的特征区域进行EDS扫描，结果如图9所示．由图9(a)可见，未碳化底泥中片状产物主要由O、Mg和Si元素构成，结合XRD试验分析可以确定该片状产物为水镁石，此处Si峰的出现说明该区域含有部分M-S-H凝胶．由图9(b)可见，未碳化底泥中凝胶状产物的主要元素也是O、Mg和Si，综合考虑Mg/Si原子比和微观形貌[20]，可以确定该凝胶状产物为M-S-H．由图9(c)、(d)可见，碳化底泥中花骨状和棱柱状碳化产物的元素均以C、O和Mg为主，表明二者均为镁式碳酸盐．根据以往研究[18-19]，同



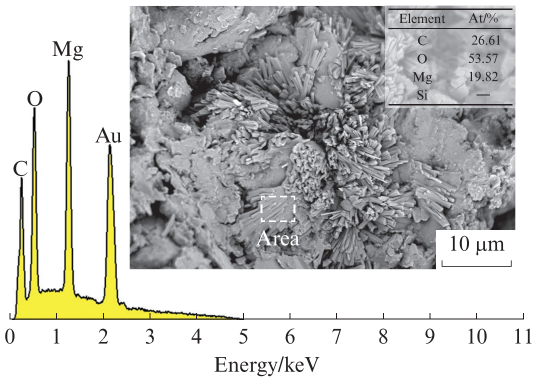
(a) Uncarbonated sediment-flake product



(b) Uncarbonated sediment-gel product



(c) Carbonated sediment-flower bone like product



(d) Carbonated sediment-elongated prismatic product

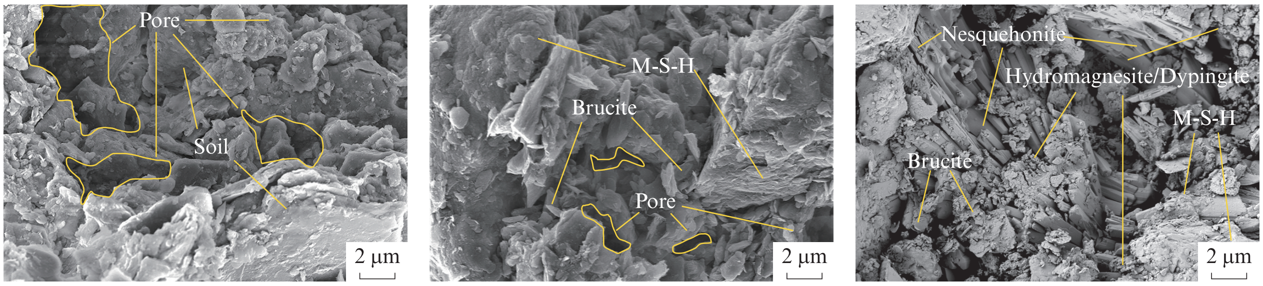
图9　未碳化和碳化底泥的EDS能谱分析

Fig. 9　EDS spectrum analyses of uncarbonated and carbonated sediment

时结合2种产物的微观形貌和元素组成，基本确定花骨状产物为水碳镁石和球碳镁石，棱柱状产物为三水菱镁石．值得注意的是，在三水菱镁石、水碳镁石和球碳镁石的特征区域中检测到的Mg/C原子比均为0.74，二者均小于预测产物的Mg/C原子比（分别为1.25和1.00），这表明扫描区域中还存在其他含碳物质，如底泥中的有机质．

3.2.3 扫描电镜试验分析

天然疏浚底泥、未碳化和碳化底泥的SEM照片如图10所示．由图10可见：（1）天然疏浚底泥的土颗粒较大且排列较为散乱，土体结构整体性差，存在较多孔隙与裂缝，宏观表现为力学性能较差．（2）未碳化底泥的土颗粒周围充斥着大量松散无序的凝胶状和片状水化产物，这些水化产物主要为水镁石及M-S-H凝胶，其黏结或填充在土颗粒表面与层间，形成以线面接触为主的团粒结构，但因团粒间的连接并不紧密，因此未碳化底泥土体结构中仍存在许多孔隙，整体性不强，对底泥强度的提高效果有限．（3）碳化底泥的土体结构中有生成的水化产物，土颗粒孔隙间存在棱柱状的三水菱镁石、花骨状的水碳镁石和球碳镁石，这些水化产物和碳化产物的填充和胶结作用减少了土体中的孔隙和裂隙，提高了土体微观结构的稳定性．相较未碳化底泥，碳化底泥微观结构中的反应产物更加丰富，这些反应产物相互交织胶结周围土颗粒，极大地提高了土体结构的密实程度，因此碳化处理对底泥强度的提升效果显著．



(a) Natural dredged sediment (b) Uncarbonated sediment (c) Carbonated sediment

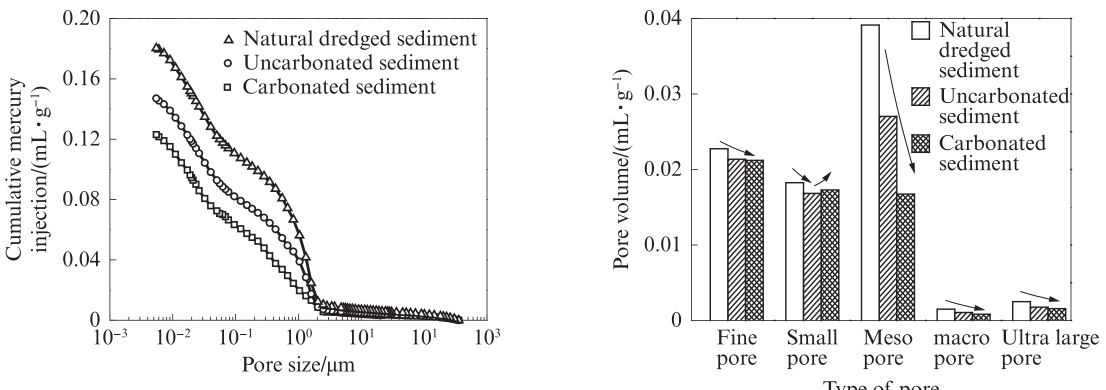
图10 天然疏浚底泥、未碳化和碳化底泥的SEM照片

Fig. 10 SEM images of natural dredged sediment, uncarbonated and carbonated sediment

3.2.4 压汞试验分析

天然疏浚底泥、未碳化和碳化底泥的MIP试验结果如图11所示．由图11(a)可知，未碳化底泥、碳化底泥对应的累计进汞量分别为0.147、0.122 mL/g，相较天然疏浚底泥的累计进汞量0.180 mL/g分别降低18.3%和32.2%，说明活性MgO的水化与碳化作用均能改善底泥内部的孔隙结构，且碳化作用效果更为明显．

为深入研究底泥内部孔隙的分布特征，按孔径d将孔隙划分为5种类型：微细孔隙（fine pore，$d \leqslant$ 0.04 μm）、小孔隙（small pore，0.04 μm$<d\leqslant$0.40 μm）、中孔隙（mesopore，0.40 μm$<d\leqslant$4.00 μm）、大孔隙（macropore，4.00 μm$<d\leqslant$40.00 μm）和超大孔隙（ultra large pore，$d>$40.00 μm）[21]．由图11(b)可见，天然疏浚底泥中的孔隙类型主要以中孔隙为主，经碳化固化作用后，中孔隙的体积减小最为明显．总体来看，与未碳化底泥相比，碳化作用对于底泥孔隙的



(a) Cumulative mercury injection (b) Distribution of pore volume

图11 天然疏浚底泥、未碳化和碳化底泥的压汞试验结果

Fig. 11 MIP test results of natural dredged sediment, uncarbonated and carbonated sediment

填充效果更为显著,这与土体强度的发展规律相同.

3.3　作用机理分析

综合上述微观特性试验结果,提出活性MgO碳化固化疏浚底泥的微观机制模型,如图12所示.由图12可见,碳化固化过程包含以下3个阶段.

阶段Ⅰ　将活性MgO与底泥烘干土搅拌均匀后加入水,MgO迅速发生水化反应,产生大量Mg^{2+}与OH^-.随着Mg^{2+}与OH^-浓度的升高,不规则薄片状弱胶结产物水镁石($Mg(OH)_2$)逐渐析出.该水镁石既可以提高土颗粒之间的黏结力并填充部分粒间孔隙,达到一定的固化效果,又能够作为反应物参与后续的碳化反应.此阶段,活性MgO掺量作为关键因素直接决定水镁石的生成量,从而影响土体的碳化固化效果.

阶段Ⅱ　向土体通入CO_2后,CO_2迅速被土体中的水分吸收形成CO_3^{2-}.随后水化产物$Mg(OH)_2$与CO_3^{2-}发生一系列碳化反应,生成棱柱状三水菱镁石及部分花骨状水碳镁石和球碳镁石.碳化产物本身强度高,且随着这些晶体生成量的增加,它们之间相互交叉生长、搭建成稳定的骨架结构,并通过胶结和填充作用,将土颗粒凝聚成团,形成非常致密的微观结构,宏观上表现为碳化试件强度显著增强.此阶段,土体含水率与压实度是影响CO_2运移的主要因素,并最终影响碳化产物数量及整体碳化效果.

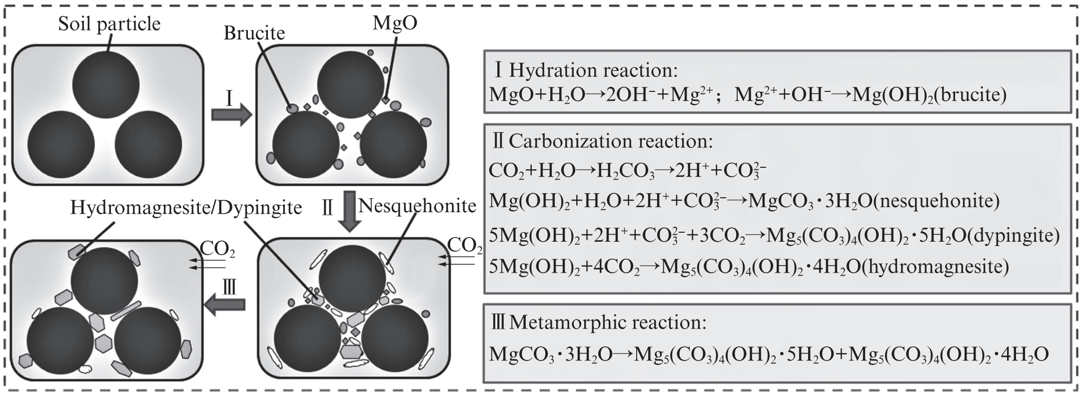


图12　MgO碳化固化微观机制模型

Fig. 12　Micro-mechanism model of MgO carbonization and solidification

阶段Ⅲ　随着CO_2的持续通入,部分三水菱镁石发生变质反应,逐渐向水碳镁石和球碳镁石转化.由于水碳镁石和球碳镁石的晶体强度和骨架支撑能力不及三水菱镁石,试件强度出现下降现象.因此,对土体进行碳化作用时,须严格控制碳化时间,以达到更好的碳化固化效果.

4　结论

(1)随着活性MgO掺量的增加,疏浚底泥碳化和未碳化试件的无侧限抗压强度(f_{UCS})均增大,且碳化试件强度增幅更为显著.同时,碳化试件的无侧限抗压强度增长值(Δf_{UCS})和CO_2吸附能力也明显提升.

(2)随着土体含水率的增加,疏浚底泥碳化和未碳化试件的f_{UCS}均减小.土体中水分的增多引起CO_2内移通道堵塞,导致碳化试件的CO_2吸附能力降低,从而影响底泥的碳化固化效果.对于本文中的疏浚底泥碳化试件,其最佳含水率为15%.

(3)压实度对碳化固化底泥强度的增长具有双面影响.压实度的增大一方面使土体结构更加密实,底泥抗压强度得以提升;另一方面减小了土体结构孔隙率,影响CO_2的吸附和运移,从而削弱底泥的碳化效果.对于本文中的疏浚底泥碳化试件,其最佳压实度为95%.

(4)在适宜的碳化时间内,疏浚底泥碳化试件的CO_2吸附能力和碳化产物生成量随碳化时间的延长而提高,底泥强度也相应增强;但长时间的碳化作用使碳化产物三水菱镁石发生变质反应,逐渐向强度贡献较低的球碳镁石和水碳镁石转化,导致底泥强度降低.

(5)对于疏浚底泥未碳化试件,其水化产物水镁石与水化硅酸镁(M-S-H)凝胶的生成是强度提高的根本原因;而对于碳化试件,强度的提高主要归功于水镁石经碳化反应后形成的三水菱镁石、水碳镁石与球碳镁石.水化产物与碳化产物对土颗粒的包裹、胶结和填充作用,使土体微观结构更加稳定.

参考文献:

[1] KONG X H, ZHANG Z B, LIANG Y P, et al. Experimental study on solidified dredged sediment with MgO and industrial waste residue[J]. Construction and Building Materials, 2023,366:130105.

[2] LANG L, LIU N, CHEN B. Strength development of solidified dredged sludge containing humic acid with cement, lime and nano-SiO_2[J]. Construction and Building Materials, 2020,230:116971.

[3] 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(增刊2):221-224.
ZHONG Yuqing, CAI Guanghua, WANG Junge, 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(Suppl 2):221-224. (in Chinese)

[4] 王倩,武志红,张国丽,等.MgO活性对MgO-SiO_2-H_2O胶凝体系的影响[J].建筑材料学报,2020,23(4):771-777.
WANG Qian, WU Zhihong, ZHANG Guoli, et al. Effect of MgO reactivity on MgO-SiO_2-H_2O cementitious system[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):771-777. (in Chinese)

[5] 崔潮,孙小惠,王岚,等.活性MgO对碱-矿渣-偏高岭土基地聚物干缩特性的影响[J].建筑材料学报,2023,26(6):579-586.
CUI Chao, SUN Xiaohui, WANG Lan, et al. Influence of activated MgO on drying shrinkage of alkali-slag-metakaolin based geopolymer[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):579-586. (in Chinese)

[6] HARRISON J. New cements based on the addition of reactive magnesia to Portland cement with or without added pozzolan[C]// Proceedings of the CIA Conference:Concrete in the Third Millennium. Brisbane:CIA, 2003.

[7] SHI C J, WU Z M, CAO Z J, et al. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO_2 and pozzolan slurry[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 86:130-138.

[8] 曹伟达,杨全兵.碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的影响[J].建筑材料学报,2023,26(3):324-331.
CAO Weida, YANG Quanbing. Effect of carbonation curing on durability of carbon fixing steel slag-slaked lime brick[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):324-331. (in Chinese)

[9] 张丰,莫立武,邓敏.碳化养护对钢渣混凝土强度和体积稳定性的影响[J].硅酸盐学报,2016,44(5):640-646.
ZHANG Feng, MO Liwu, DENG Min. Effect of carbonization curing on mechanical strength and volume stability of steel slag concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(5):640-646. (in Chinese)

[10] 曾海马,刘志超,王发洲.碳化养护对大掺量钢渣砂浆的力学性能及显微结构的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(11):1801-1807.
ZENG Haima, LIU Zhichao, WANG Fazhou. Effect of carbonization curing on mechanical properties and microstructure of high volume steel slag mortar[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11):1801-1807. (in Chinese)

[11] 冷勇,余睿,范定强,等.碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备[J].建筑材料学报,2022,25(11):1185-1189,1218.
LENG Yong, YU Rui, FAN Dingqiang, et al. Preparation of environmentally friendly UHPC containing carbonized recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1185-1189,1218. (in Chinese)

[12] 莫媛媛,唐薇,占宝剑,等.碳化再生微粉水泥基材料性能及其碳足迹评价[J].建筑材料学报,2023,26(11):1207-1213.
MO Yuanyuan, TANG Wei, ZHAN Baojian, et al. Performance and carbon footprint evaluation of cement-based composites incorporating carbonated recycled fine powder[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(11):1207-1213. (in Chinese)

[13] 蒋正武,高文斌,杨巧,等.低碳混凝土技术理念与途径思考[J].建筑材料学报,2023,26(11):1143-1150.
JIANG Zhengwu, GAO Wenbin, YANG Qiao, et al. Technical principles and approaches for low carbon concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(11):1143-1150. (in Chinese)

[14] 刘松玉,曹菁菁,蔡光华,等.压实度对MgO碳化土加固效果的影响及其机理研究[J].中国公路学报,2018,31(8):30-38.
LIU Songyu, CAO Jingjing, CAI Guanghua, et al. Study on the influence of compaction degree on the reinforcement effect of MgO carbonated soil and its mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8):30-38. (in Chinese)

[15] 黄涛,方祥位,张伟,等.活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3300-3306,3316.
HUANG Tao, FANG Xiangwei, ZHANG Wei, et al. Experimental study on active magnesium oxide-microbial solidified loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10):3300-3306,3316. (in Chinese)

[16] YI Y L, LISKA M, UNLUER C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50:899-905.

[17] 王东星,何福金,朱加业.CO_2碳化矿渣-CaO-MgO加固土效能与机理探索[J].岩土工程学报,2019,41(12):2197-2206.
WANG Dongxing, HE Fujin, ZHU Jiaye. Study on efficiency and mechanism of CO_2 carbonized slag-CaO-MgO reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12):2197-2206. (in Chinese)

[18] RAUSIS K, ĆWIK A, CASANOVA I. Phase evolution during accelerated CO_2 mineralization of brucite under concentrated CO_2 and simulated flue gas conditions[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2020, 37:122-133.

[19] 王东星,肖杰,李丽华,等.基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J].岩土力学,2019,40(8):3045-3053.
WANG Dongxing, XIAO Jie, LI Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhan based on carbonation-solidification technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8):3045-3053. (in Chinese)

[20] XIAO J M, LI H, HU Y R. Structure, formation, properties, and application of calcium and magnesium silicate hydrates system-a review[J]. Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition, 2023, 38(3):604-615.

[21] 孔祥辉,崔帅,胡文军,等.冻融作用下水泥稳定风化砂的劣化特征与机制[J].山东建筑大学学报,2023,38(1):80-87.
KONG Xianghui, CUI Shuai, HU Wenjun, et al. Deterioration characteristics and mechanism of cement-stabilized weathered sand under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2023, 38(1):80-87. (in Chinese)