

超软土快速碳化固化方法与微观机理研究

叶 焯¹, 刘松玉^{1*}, 蔡光华²

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 本文以超软土资源化利用为背景, 基于氧化镁碳化固化原理提出一种快速制粒碳化法应用于荷塘淤泥的碳化固化, 并进行了固化效果与微观机理分析。结果表明, 采用粒化碳化固化的方法, 可以快速降低超软土含水量, 3 h 左右能使淤泥含水量从 70% 以上降低到 30% 以下, 其无侧限抗压强度强度达 200 kPa 左右; 碳化固化土的含水率和 pH 值都随着碳化时间的增加而降低, 最佳碳化压力为 200 kPa, 且颗粒越小碳化固化效果越好; 碳化固化超软土主要碳化产物是三水菱镁石、水碳镁石和球碳镁石, 这些镁式碳酸盐类碳化产物填充了土颗粒间的孔隙且增强了化学胶结作用。这些成果为超软土现场快速固化利用技术提供了新的思路。

关键词: 超软土; 碳化固化; 无侧限抗压强度; 微观机理

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2020)02-0091-07

Study on the rapid carbonization and stabilization technique and its micromechanism of muddy soil

YE Ye¹, LIU Song-yu^{1*}, CAI Guang-hua²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: A rapid granulating carbonization method was proposed for high water content muddy soil for resource re-utilisation and safe treatment techniques. Results of this study showed that the carbonization and microscopic mechanism method could rapidly reduce the water content of muddy soil. For instance, in 3 hours, it could be reduced from at least 70% to at most 30% and unconfined compressive strength of the soil could reach about 200 kPa. The study also indicated the decrease of the water content and pH value of carbonized solidified soil with the increase of carbonization time. The optimal carbonization pressure was found to be 200 kPa, and the smaller the particle size, the better the carbonization effect. In this study, the main carbonization products were nesquehonite, hydromagnesite and dypingite. These products filled the pores among soil particles and hence enhancing the chemical cementation. In conclusion, these results provided new ideas for the rapid carbonization and solidification of muddy soil in the field.

Key words: muddy soil; carbonization and solidification; unconfined compressive strength; micromechanism

0 引 言

在围海吹填、隧道开挖、港口、航道及河道治理、公路建设的过程中, 河塘水田淤泥土、海洋疏浚泥等都是常见的高含水率软弱土。大量淤泥的堆放需要占用土地资源, 且极易产生环境问题。淤泥的资源化利用对疏浚江河湖泊, 防止水体富营养

化, 净化城市环境等具有重要的现实意义。

目前国内外对于淤泥及淤泥质土的固化处理技术主要包括物理脱水、高温烧结和化学固化^[1-2]。物理处理法包括换填、自然晾晒、机械脱水、排水固结等, 施工简单, 成本低但工期长, 处理效果一般; 热处理方法包括烧结、熔融等, 不仅受到工厂处理的局限性, 还消耗大量燃料; 固化处理法能最

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41902286, 41972269, 41977241); 江苏省高等学校自然科学研究项目 (18KJB560012); 江苏省交通科学研究项目 (2018T01)。

作者简介: 叶焯 (1995—), 女, 浙江台州人, 硕士研究生, 现为东南大学交通学院岩土工程所硕士研究生, 研究方向为地基处理。E-mail: 220174214@seu.edu.cn。

*通讯作者: 刘松玉, 男, 博士, 教授。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

大限度利用原土,具有环境影响小、施工工艺灵活和成本低等优点,被广泛用于软基加固。但传统固化方法通常采用水泥作为固化剂,而生产水泥的过程产生大量资源消耗,排放 CO_2 等等带来环境问题^[3]。

本世纪初,澳大利亚科学家 Harrison^[4]发明了一种将活性氧化镁和波特兰水泥混合的新型水泥,提出 MgO 可以发展为一种同时满足工程要求又具有环境效益的新型高效固化剂。随后,英国剑桥大学 Al-Tabbaa 课题组通过掺入活性 MgO 并碳化来快速提高混凝土强度^[5-6]。

2010年剑桥大学和东南大学首次提出 MgO 碳化搅拌桩技术^[7-9],发现用此方法加固软弱地基土不仅具有能耗低、可吸收 CO_2 、价格与普通硅酸盐水泥基本相当等优点,而且在应用中强度增长快,可在数小时内达到或超过相同掺量下水泥固化土 28 天时的强度。东南大学课题组在已有研究的基础上提出了碳化搅拌桩方法和整体碳化法^[8, 10-11],表现出显著的经济和环境优势。

王东星^[12-13]将活性氧化镁用于固化淤泥,研究了活性 MgO 固化淤泥的外观形态、质量等物理化学性质及力学性质的变化。结果表明活性 MgO 固化淤泥的水稳性随着氧化镁掺量的增加和标准养护龄期的增加而增加,可以通过加入粉煤灰等外掺剂显著增强活性 MgO 固化淤泥的抗压强度和水稳性。

本文在已有研究基础上,以活性氧化镁为固化剂,提出一种超软土快速碳化固化方法,重点分析其碳化固化效果与微观机理。

1 快速碳化固化方法

1.1 试验材料

试验所用土样取自宜兴-长兴段高速公路施工现场的河塘淤泥,位于地表下 1~2 m,其天然含水率为 70%~85%,其基本物理指标如表 1 所示,其中 pH 测试采用仪器 PHS-3C/3E pH 计测量,水土的质量比为 1:1,矿物成分见表 2。

试验所用的活性 MgO 为邢台市镁神化工有限公司生产的轻质 MgO (表 2); CO_2 气体为南京盈聚气体有限公司生产的高纯度工业 CO_2 (99%)。

1.2 碳化固化方法

对超软土而言,过高的含水率会阻碍 CO_2 气体在土体中的渗透^[14]。为此,提出了粒化碳化方法,即先将超软淤泥土与 MgO 搅拌后分成颗粒,如图 1

所示,为了寻找合适的颗粒大小,制备了 10 mm, 20 mm, 50 mm 直径对颗粒进行研究,然后置于碳化桶进行碳化。

试验的碳化装置如图 2 所示,碳化压力桶采用不锈钢材质,底面直径 500 mm,高 600 mm,最高能承受 8 MPa 的压力。根据已有研究^[15-16],制定了试验方案如表 3。



图 1 固化淤泥颗粒

Fig. 1 Solidified soil particles

(碳化颗粒底面直径大小从左往右依次为 10 mm, 20 mm, 50 mm)

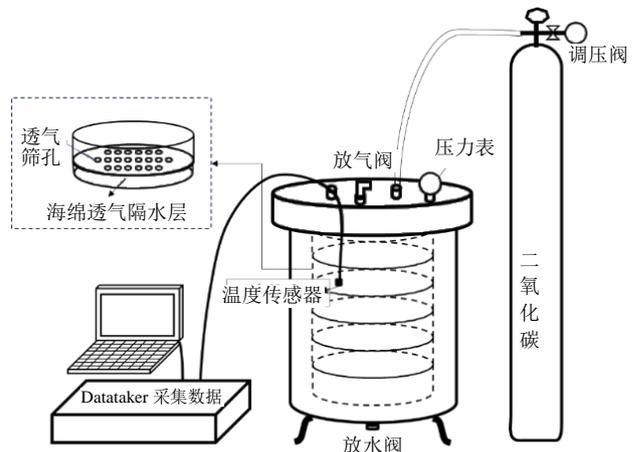


图 2 碳化装置示意图

Fig. 2 Carbonization diagram

2 碳化效果分析

2.1 含水率变化

如图 3 所示,随碳化时间的增长,固化淤泥的含水率快速降低。3 h 以内土样含水率下降迅速,3 h 以后下降幅度减小,6 h 以后含水率基本保持不变。

图 4 是在不同碳化压力下碳化 3 h 后对淤泥含水率变化图,可见固化土碳化后的含水率随压力的升高而降低,但在 200 kPa 后,含水率值降幅变缓;图 5 是土体含水率随碳化颗粒大小变化图,可见淤泥颗粒越小碳化效果越好。

2.2 无侧限抗压强度

图 6 为淤泥固化土的无侧限抗压强度随时间变化的情况,结果表明固化淤泥的无侧限抗压强度在

表1 试验土样的物理指标

Tab.1 Physical parameters of soil samples

源地	天然含水率/%	比重	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	烧矢量/%	pH
宜兴	70~85	2.72	50.1	32.0	3~5	7.26

表2 试验材料的化学成本表(单位: %)

Tab.2 Chemical compositions of materials (Unit: %)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	其他
宜兴土	69.79	17.84	5.34	1.11	1.22	7.26	0.76	1.24
MgO	3.91	1.43	0.30	1.26	91.8	—	0.31	0.95

表3 试验方案

Tab.3 Test scheme

工况	影响因素
MgO 掺量 20%, CO ₂ 通气压力 200 kPa, 颗粒大小 10 mm	碳化时间
	1 h
	3 h
	6 h
碳化时间 3 h, 颗粒大小 10 mm, MgO 掺量 20%	CO ₂ 通气压力
	100 kPa
	200 kPa
	300 kPa
碳化时间 3 h, CO ₂ 压力 200 kPa, MgO 掺量 20%	淤泥颗粒大小 (以颗粒断面直径为准)
	10 mm
	20 mm
	50 mm

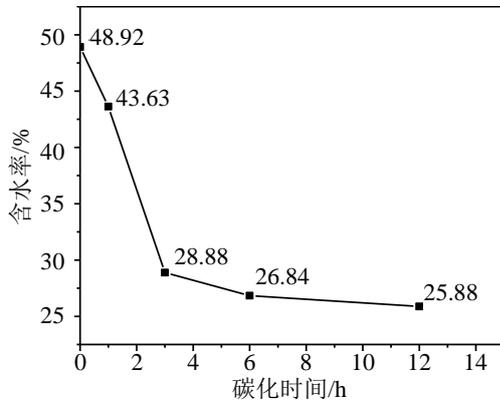


图3 不同碳化时间影响下的含水率变化
Fig. 3 Water content versus carbonization time

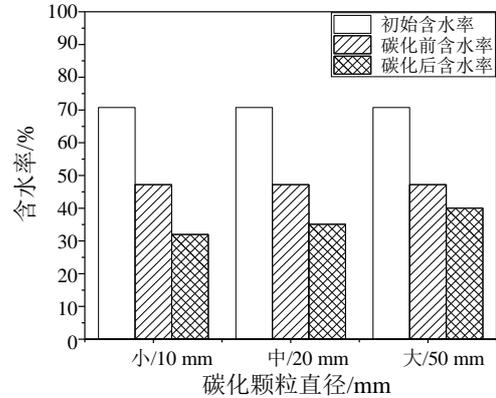


图5 不同碳化颗粒大小影响下的含水率
Fig. 5 Water content versus particle size

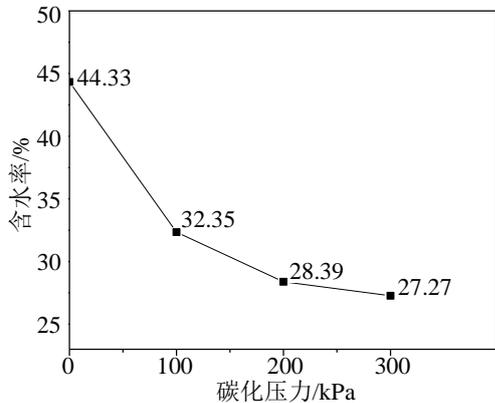


图4 不同碳化压力影响下的含水率
Fig. 4 Water content versus carbonization pressure

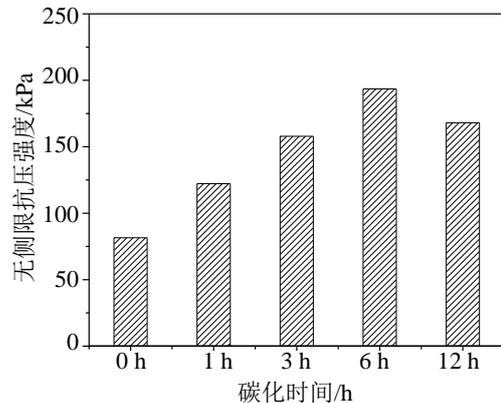


图6 不同碳化时间影响下无侧限抗压强度
Fig. 6 UCS versus carbonization time

碳化 6 h 时达到最大值。

图 7 是不同碳化压力条件下 MgO 碳化固化淤泥的无侧限抗压强度的变化图。由图可知, 碳化后土样的无侧限抗压强度随着压力增大而提高。

图 8 是 MgO 碳化固化淤泥无侧限抗压强度随碳化颗粒大小的变化图, 可见颗粒越小碳化后的强度越高。

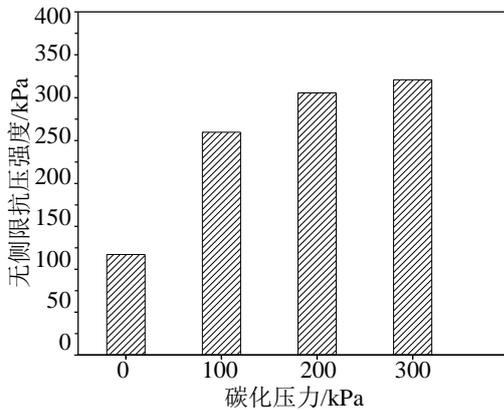


图 7 不同碳化压力影响下的无侧限抗压强度
Fig. 7 UCS versus carbonization pressure

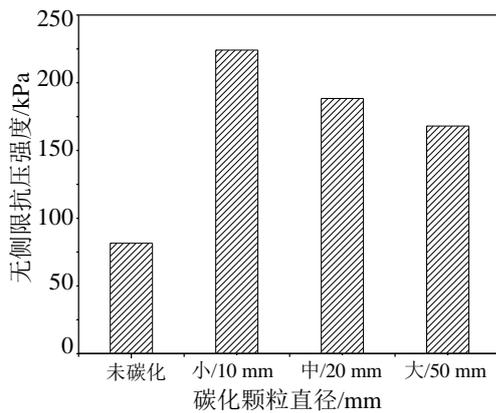


图 8 不同碳化颗粒大小影响下的无侧限抗压强度
Fig. 8 UCS versus particle size

3 快速碳化固化机理分析

3.1 pH 值

由图 9 可得, 当 MgO 掺入淤泥后发生水化反应, 生成大量的 $Mg(OH)_2$, 部分溶解在孔隙水中, 使孔隙液呈现较强的碱性。但一旦通入 CO_2 气体进行碳化, 消耗了大量的 $Mg(OH)_2$ 生成镁式碳酸盐, 使 pH 值迅速降低, 碳化完成后 PH 值为 9.5 左右, 低于水泥固化土。

3.2 碳化固化土成分分析

碳化前后主要成分列于表 4。采用 XRD 对其成分进行了分析。土体中的主要成分是石英,

MgO 搅拌后的水化产物主要为氢氧化镁。碳化后的产物主要为镁式碳酸盐, 主要以水碳镁石, 球碳镁石, 水菱镁石和纤水菱镁石为主。碳化过程中水化产物逐渐减少, 碳化产物增多^[11-12]。

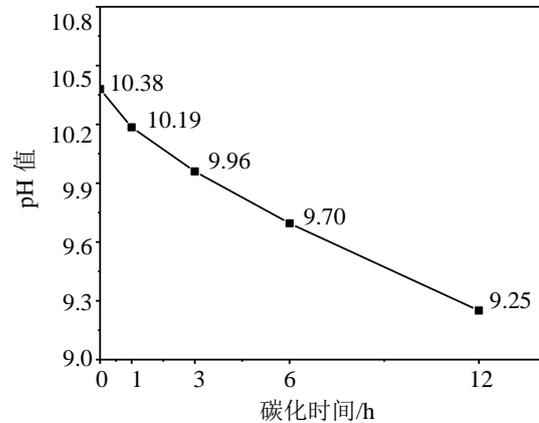


图 9 不同碳化时间影响下的 pH 值变化
Fig. 9 pH versus carbonization time

表 4 主要成分 XRD 图谱物相

Tab. 4 Phases detected from XRD of the main components

化学成分	化学式	英文 (文中字母简写)
石英	SiO_2	Quartz (Q)
氧化镁	MgO	Magnesia (Mg)
菱镁矿	$MgCO_3$	Magnesia (M)
氢氧化镁	$Mg(OH)_2$	Brucite (B)
水碳镁石	$MgCO_3 \cdot 3H_2O$	Nesquehonite (N)
球碳镁石	$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$	Dypingite (D)
水菱镁石	$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Hydromagnesite (H)
纤水碳镁石	$Mg_2(CO_3)(OH)_2 \cdot 3H_2O$	Aritinite (A)

(1) 碳化时间的影响

图 10 是在不同碳化时间影响下的氧化镁碳化固化超软土的 XRD 图谱。随着碳化时间的增加, 氢氧化镁的含量减少, 6 h 和 12 h 的氢氧化镁峰值都接近于 3 h, 没有明显降低。此外, 随着碳化时间的加长, 产物 N 和 A 的峰值略有升高。

(2) 碳化压力的影响

图 11 是不同碳化压力下氧化镁碳化固化超软土的 XRD 图谱。由图可见, 未碳化的土样 B 的峰值很高, 说明水化产生了大量的氢氧化镁。随着碳化压力的增大, B 的峰值强度逐渐降低, 同时, 碳化产物的峰值都略有升高。由于水化产物比较单一, 压力达到 200 kPa 之后, B 的峰值几乎不再降低, 继续升高压力的意义不大。

(3) 淤泥颗粒大小的影响

图 12 是不同碳化颗粒大小影响下氧化镁碳化

固化超软土的图谱。由图可得，B 的峰值强度随颗粒大小的减小而减小，碳化产物的峰值也随之略有上升。说明颗粒越小，越多的氢氧化镁被消耗，碳化反应程度越高。

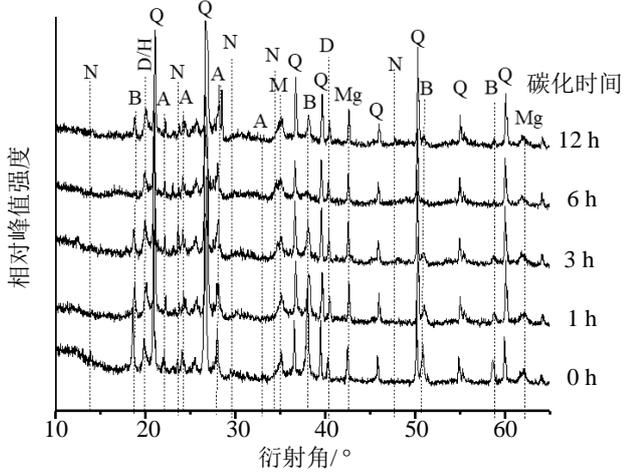


图 10 不同碳化时间影响下的 XRD 图谱
Fig. 10 X-ray diffractograms versus carbonization time

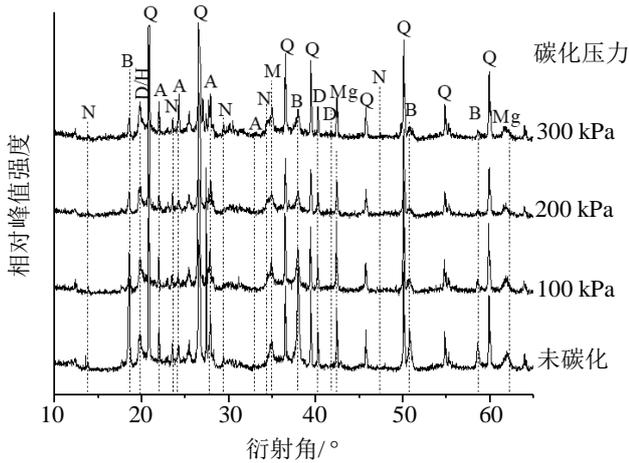


图 11 不同碳化压力影响下的 XRD 图谱
Fig. 11 X-ray diffractograms versus carbonization pressure

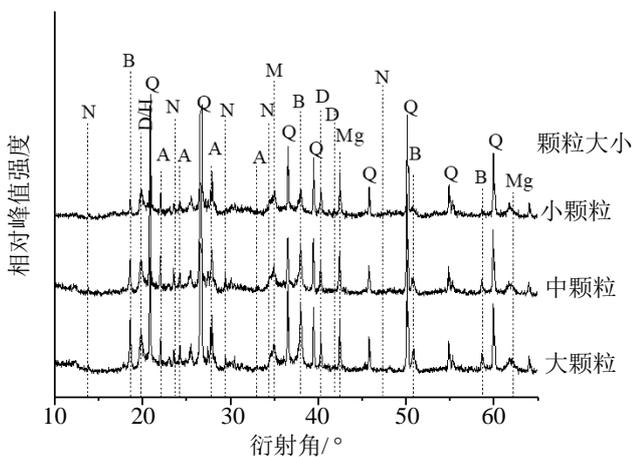


图 12 不同碳化颗粒大小影响下的 XRD 图谱
Fig. 12 X-ray diffractograms versus particle size

3.3 碳化固化土的微观结构

不同工况下土体的扫描电镜图可直观反映土体的微观结构特性。低倍镜下的 SEM 图可观察土体自然断面微观孔隙的疏密、分布及颗粒排列特征。高倍镜下的 SEM 图可观察碳化固化土产物的微观形态及分布，两者均可反映土颗粒间的连接状态。本文选用低倍放大倍数在 800~1 000 倍左右，高倍放大倍数在 3 000~5 000 倍左右。

(1) 碳化时间的影响

图 13 是不同碳化时间淤泥碳化固化土的扫描电镜图，左图是低倍图，右图是高倍图。由图可知，在掺入氧化镁后，土体中发生水化反应生成絮状产物水镁石，相比于天然淤泥土，孔隙被大量填充，土颗粒被逐渐包裹。但水镁石的胶结能力很弱，对土体的强度帮助不大，因此整个结构仍比较疏松；碳化 1 h 后，如图 13 (a) 和 (b)，絮状的水化产物水镁石的数量减少，开始产生薄片状的球碳镁石和水菱镁石附着在土颗粒表面或颗粒间空隙中，逐渐将土颗粒包裹起来；继续碳化 3 h，如图 13 (c) 和图 (d) 所示，通过 800 倍的扫描电镜图可以明显观察到土颗粒表面已经变得非常致密；在图 13 (d) 还可以观察到大量的球碳镁石和水菱镁石，部分产物在形态上还有向柱状发展的趋势，土颗粒间的孔隙几乎被填满；当碳化时间达到 6 h，观察图 13 (e) 和图 (f) 可得土颗粒已经被碳化产物胶结在一起，连土颗粒表面都布满了碳化产物。碳化 12 h 以后，土颗粒中可以观察到棱柱状的三水碳镁石和薄片花瓣状的球碳镁石或水碳镁石。

(2) 碳化压力的影响

图 14 是不同碳化压力影响下氧化镁碳化固化土的 SEM 图。由图可知，当土样与氧化镁充分搅拌后因水化反应产生水镁石，水镁石通常团聚在土颗粒的表面，如图 14 (b) 所示。当碳化压力为 100 kPa 时，水镁石不断与 CO₂ 发生反应生成碳化产物，因此在照片中可以看到部分水镁石和镁式碳酸盐混合在一起。但图片中的土颗粒仍然能被清楚看到，可见碳化产物含量较少，土颗粒没有被很好地包裹。当碳化压力为 200 kPa 后，在图 14 (e) 和图 (f) 中可以明显观察到棱柱状的碳化产物，且排列非常规则，将土颗粒牢固的胶结在一起，土粒表面十分致密。即使在高倍镜头下也很难用肉眼剥离出一颗单独的土颗粒。碳化压力为 300 kPa 时，SEM 图与 200 kPa 情况较为接近，都

可观察到明显的柱状碳化产物。

(3) 淤泥碳化颗粒大小的影响

图 15 是不同碳化颗粒大小影响下氧化镁碳化固化土的 SEM 图。由图可得，碳化颗粒越小，土体自然断面的表面孔小越少，排列越致密。碳化产物以片状和花朵状的水碳镁石和球碳镁石为主，但没有观察到棱柱状的三水碳镁石。碳化产物通过胶结作用将土颗粒很好地联结在一起，通过颗粒团粒化作用和胶结作用形成很多凝块状，这些凝块状的土之间形成了较大的粒间孔隙和架空孔隙。

综上所述，几乎在每个工况下的碳化土体中都能观察到片状及花朵状的球碳镁石 (D) 和水菱镁石 (H)，但棱柱状的碳镁石 (N) 或纤水镁式 (A) 出现较少，这主要与超软土含水量较高有关[16]。

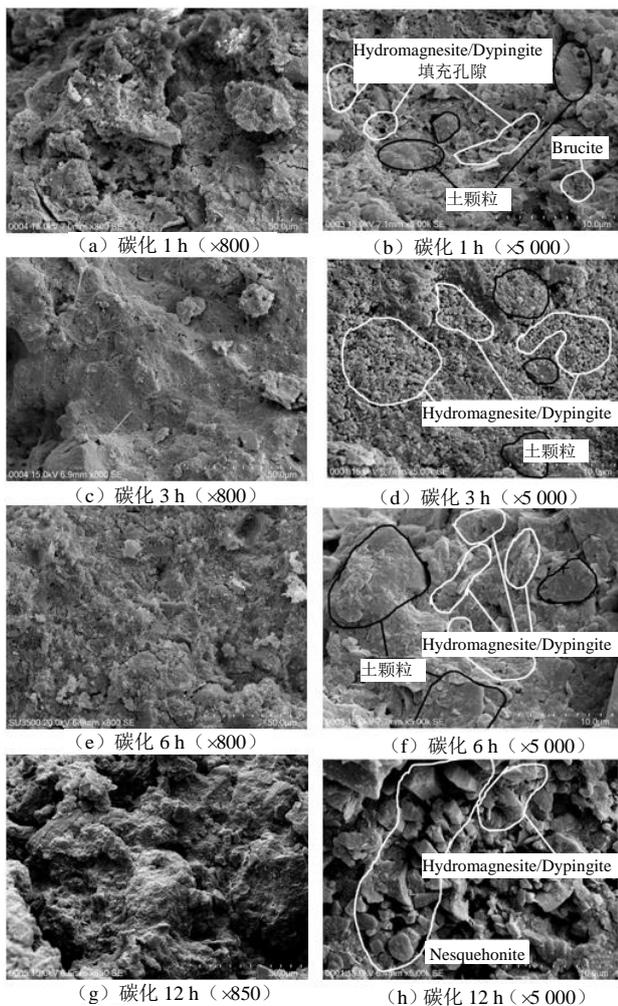


图 13 不同碳化时间影响下碳化固化超软土 SEM 图
Fig. 13 SEM images under different carbonization time

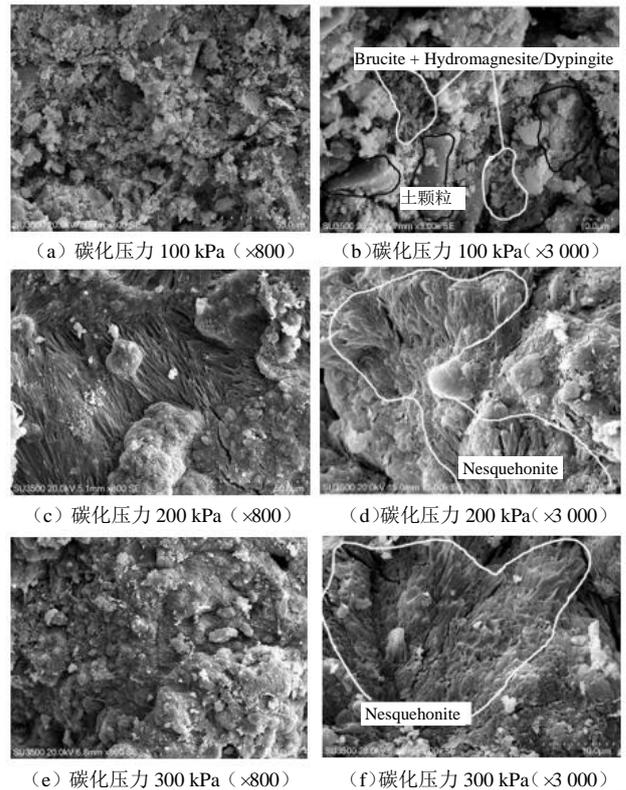


图 14 不同碳化压力影响下碳化固化超软土 SEM 图
Fig. 14 SEM images under different carbonization pressure

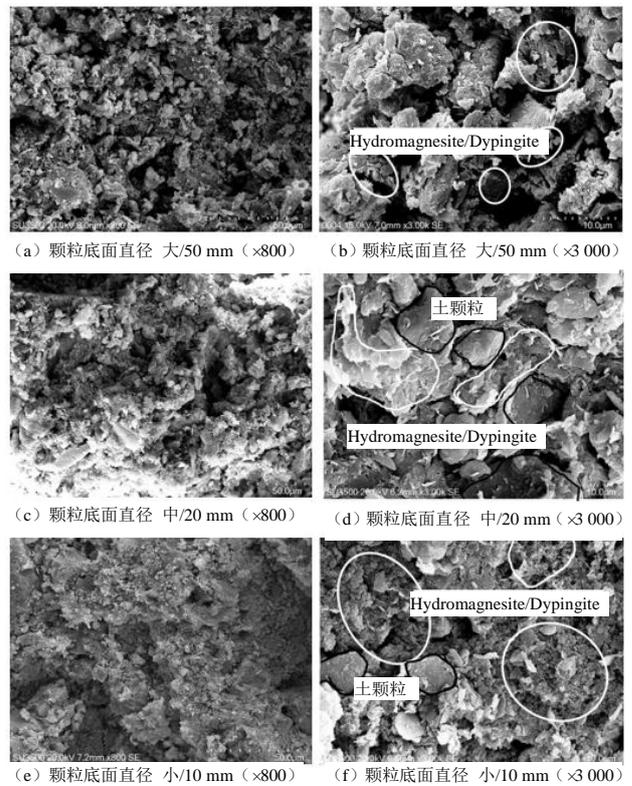


图 15 不同颗粒大小影响下碳化固化超软土 SEM 图
Fig. 15 SEM images under different particle size of soil

4 结 论

本文提出了超软土快速碳化固化方法,通过含水率、无侧限抗压强度、X射线衍射实验、扫描电镜试验分析了碳化时间、碳化压力、碳化颗粒大小影响下固化淤泥的碳化效果和微观机理,主要结论如下:

(1) 采用粒化碳化固化的方法,可以快速降低超软土含水量,3 h左右能使淤泥含水量从70%以上降低到30%以下,其无侧限抗压强度强度达200 kPa左右。

(2) 在室内试验条件下,碳化固化土的含水率和pH值都随着碳化时间的增加而降低,碳化3h的碳化固化土无侧限抗压强度最高,最佳碳化压力为200 kPa,且颗粒越小碳化固化效果越好。

(3) 通过微观试验分析,MgO碳化固化超软土的主要产物是三水菱镁石、水碳镁石和球碳镁石。土颗粒表面在掺入氧化镁后生成了絮状的水镁石,后伴随着碳化反应,水镁石逐渐转化为薄片状或花瓣状的球碳镁石和水碳镁石,当碳化条件充分时,土颗粒孔隙间还会生成大量的柱状的三水菱镁石,使结构更为致密。

参考文献

[1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39-41.

[2] 陈玮琳,季晓檬. 疏浚淤泥资源化利用技术综述[J]. 中国建材科技, 2013, 22(1): 50-53.

[3] 曹菁菁,刘松玉. 活性氧化镁水泥碳化加固软土地基研究进展[J]. 江苏建筑, 2014(6): 40-45.

[4] Harrison A J W. Reactive magnesium oxide cements: US 7347896[P]: 2008-03-25.

[5] Liska M, Vandeperre L J, Al-Tabbaa A. Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement-based pressed masonry units[J]. *Advances in cement research*, 2008, 20(2): 53-64.

[6] Al-Tabbaa A, Liska M. Ultra-green construction: Reactive magnesia masonry product[J]. *Waste & Resource Management*, 2009, 162(4): 185-196.

[7] Yi Y, Liska M, Unluer C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(8): 899-905.

[8] 蔡光华,刘松玉,王亮,等. 一种异位活性氧化镁碳化固化淤泥土处理系统: CN108128991B[P]. 2018-11-09.

[9] 蔡光华,刘松玉,杜延军,等. 不同活性氧化镁碳化粉土对比试验[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(5): 958-963.

[10] 蔡光华,刘松玉,曹菁菁. 活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(5): 105-113, 128.

[11] 刘松玉,曹菁菁,蔡光华. 活性氧化镁碳化固化粉质黏土微观机制[J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563.

[12] 王东星,王宏伟,邹维列,等. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4675-4684.

[13] 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理[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3045-3053.

[14] 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.

[15] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[16] 曹菁菁. 活性氧化镁碳化固化土微观机理及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.