

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0151

活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究

黄涛¹, 方祥位², 张伟¹, 申春妮³, 雷宇龙¹

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401311; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 以活性氧化镁和微生物共同作用固化的黄土试样为研究对象, 通过含水率、无侧限抗压强度、X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)等试验, 研究了活性氧化镁掺量、养护龄期和初始含水率对固化试样含水率、无侧限抗压强度、固化产物和微观结构等的影响。结果表明: 固化试样含水率随氧化镁掺量增加和养护龄期增长而降低; 无侧限抗压强度随活性氧化镁掺量(5%~20%)增加而增大, 随龄期发展总体上不断增大, 但当氧化镁掺量为10%和15%时, 后期强度稍有降低; 当氧化镁掺量为5%和10%时, 无侧限抗压强度随初始含水率增加而减小, 而当氧化镁掺量为15%和20%时, 无侧限抗压强度随初始含水率增加先增大后减小。XRD和SEM结果显示, 随着氧化镁掺量增加, 水化后未进一步反应的氢氧化镁越多; 反应生成的水合碳酸镁具有膨胀性和胶结性, 对土颗粒间缝隙进行填充, 并将土颗粒胶结在一起。

关键词: 黄土; 微生物; 活性氧化镁; 含水率; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)10-3300-08

Experimental study on solidified loess by microbes and reactive magnesium oxide

HUANG Tao¹, FANG Xiang-wei², ZHANG Wei¹, SHEN Chun-ni³, LEI Yu-long¹

(1. Department of Military Installations, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The loess samples solidified by reactive magnesium oxide (MgO) and microbes are analyzed in this paper. Water content and unconfined compressive strength are measured, and X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) are conducted on different samples to investigate the curing product and microstructure change with varying amount of reactive MgO, curing time duration, initial water content. The results show that the water content of solidified sample decreases with the increasing content of reactive MgO and the growing curing period. The unconfined compression strength increases with the increasing content of reactive MgO, and also increases with the growing curing period in general, but decreases slightly in the later period with the content of reactive MgO being 10% or 15%. With the increase of initial water content, the unconfined compressive strength of solidified samples decreases when the reactive MgO content is 5% or 10%. But it will first increase and then decrease while the amount of reactive MgO is 15% or 20%. The results of XRD and SEM tests show that the higher the content of reactive MgO, the more magnesium hydroxide remains. The hydrated magnesium carbonate produced by the reaction is swellable and cementitious, which can fill the gaps between the soil particles and cement the soil particles together.

Keywords: loess; microbes; reactive magnesium oxide; water content; unconfined compression strength

1 引言

黄土在我国西北、华北及东北地区分布广泛。黄土作为一种特殊土, 由于其不良的工程性质(大

孔性、水敏性、湿陷性等), 通常不能满足工程建设的需要。黄土力学性能改良剂研究已日趋成熟, 利用粉煤灰、石灰、石膏、水泥等固化剂对黄土固化研究成果较多, 但是这类加固方法普遍存在施工周

收稿日期: 2020-02-20

修回日期: 2020-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51978103, No. 41831282); 军队后勤科研项目(No. CY114C022)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978103, 41831282) and the Military Logistics Research Program (CY114C022).

第一作者简介: 黄涛, 男, 1996年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 2272349722@qq.com

通讯作者: 方祥位, 男, 1975年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及岩土微生物技术研究。E-mail: fangxiangwei1975@163.com

期长、成本高等问题；而且外加剂大多有强碱性和生物毒性，对地下水与周围植被均会造成不良的影响，环境污染过大，使加固技术的应用受到限制^[1]。随着我国经济建设的发展以及“一带一路”倡议的实施，对黄土加固与改良技术提出了更高要求。

氧化镁是一种环保材料。自 Harrison^[2-3]提出氧化镁水泥以来，氧化镁在土体固化中的研究迅速发展，主要采用碳化固化的方式。刘松玉等^[4]研究了氧化镁活性对固化效果的影响，发现氧化镁活性越高，固化效果越好；高活性的氧化镁碳化固化 24 h 强度比养护 28 d 水泥土强度还高。蔡光华^[5]、刘松玉^[6]等分别对粉土以及粉质黏土的固化效果进行了研究，并提出了相应的微观机制模型。但是碳化固化需要人工通入一定浓度和压力的 CO₂，在实际工程中不好控制，并且会造成固化的不均匀。

近年来，基于微生物诱导碳酸钙沉淀作用的土体改性技术在岩土工程领域引起了人们的广泛关注。微生物固化技术是一项具有广阔前景的生物介导土壤改良技术。由于其有造价低、反应可控、对环境的影响较小等特点，在土地加固、岩土防渗、砂土液化治理以及污染土修复等岩土领域得到广泛的应用^[7-14]。方祥位^[15]、陈适^[16]等进行了微生物固化珊瑚砂的试验研究，并提出了适用于南海岛礁建设的微生物珊瑚砂桩复合地基。孙潇昊等^[17]采用注射的方式利用微生物对砂土进行了固化试验研究，研究表明：注射液流速越小，固化时间越长，固化效果越好；固化试样破坏模式都是脆性破坏，且破坏后具有残余强度。沈泰宇等^[18]采用灌注的方法对砂质黏性紫色土进行了固化试验，研究发现，砂质的紫色土因渗透性低和土颗粒细小等特点，固化效果弱于砂土。目前，微生物固化技术主要应用于砂土等粗粒土，取得了良好效果；而在细粒土中的应用较少，在黄土中未见应用报道，这主要是因为黄土颗粒较细，适用于砂土的微生物灌注等方式不适用于黄土。

本文基于氧化镁固化土体技术和微生物固化技术，提出一种新的黄土固化技术，即黄土的氧化镁-微生物固化技术。该技术采用活性氧化镁为基本固化剂，利用微生物技术均匀地提供碳化所需的 CO₂，提高黄土强度，为黄土地基的处理提供一种新方法。通过无侧限抗压强度试验、X 射线衍射（XRD）试验和微观测试，研究了活性氧化镁掺量、养护龄期和初始含水率对氧化镁-微生物固化黄土效果的影响，为氧化镁-微生物固化黄土技术的应

用奠定基础。

2 试验方法

2.1 试样材料

试验用土为取自延安的 Q₃ 黄土，呈浅黄色，土质较均匀，结构疏松。试验前将土样烘干碾碎，过 2 mm 筛备用。其主要物理性质指标见表 1。

表 1 试验土样物理性质指标
Table 1 Physical property indices of soil sample

塑限/%	液限/%	塑性指数	最大干密度 /(g · cm ⁻³)	最优含水率 /%
15.5~17.4	30.4~31.8	13.0~16.3	1.78	14.6

试验所用活性氧化镁为 ICL 集团生产的轻质氧化镁，利用柠檬酸中和法测得氧化镁的活性值为 25 s，利用水合法测得的氧化镁活性分数为 75%，属于高活性氧化镁。

试验所用微生物为高脲酶活性的巴斯德芽孢杆菌，是一种耐碱细菌，能够以尿素为营养源，通过生物代谢活动，将尿素分解为 NH₄⁺和 CO₃²⁻。首先将菌株放入恒温振荡培养箱中进行活化培养，再进行扩大培养，待菌液浑浊后进行活性测定，保证固化用菌液活性达到 1.5 mmol/(L · min)，将扩培后的菌液放入 4 ℃ 的冷藏箱中保存。

尿素溶质为分析纯级别，加入蒸馏水配制浓度为 3 mol/L 的溶液，使用前将菌液与尿素溶液按 1:1 的比例混合。

2.2 试样制备

试样采用静压法进行制备。为了保证平行试样的均匀性、不同配比试样的可比性，控制试样干土密度均为 1.6 g/cm³（最大干密度为 1.78 g/cm³，压实度为 90%），初始土体含水率为 15%（接近最优含水率 14.6%），试样中的水分全部由菌液与尿素的混合溶液提供。

制样前，首先将黄土用粉碎机进行粉碎，并用 2 mm 筛进行过筛处理，再将过筛后的土放入烘箱进行烘干。然后根据预设的 MgO 掺量和干密度称取黄土和 MgO，将其搅拌均匀。再根据设定的初始含水率，按 1:1 的比例量取菌液与尿素溶液，使用前进行混合，倒入混合料中进行搅拌，搅拌均匀后采用静压法进行制样。不同掺量之间制备 3 个平行试样。

静压法制样采用直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的涂有薄层凡士林的铁质模具。制样过程如下：①称取每层所需的混合料依次装入模具中，每个试样

分 5 次进行分层人工压实;②进行下一层装土之前,应对上层的土样表面用土工刀进行刮毛处理,避免试样断裂;③当压实完成后,将辅助模具卸下,使用脱模器进行脱模出样,脱模过程中用力要尽量轻而均匀,防止用力过大将试样震碎。得到制备好的试样,放入保湿器中(25±2)℃进行养护,当养护龄期达到预设时间后进行无侧限抗压强度试验。

2.3 试验方案

为了研究氧化镁掺量(氧化镁干粉质量除以干黄土与氧化镁干粉质量之和)、养护龄期和初始含水率(定义为水的质量除以干黄土与氧化镁干粉质量之和)对氧化镁-微生物固化黄土效果的影响,氧化镁掺量取 5%、10%、15%、20%,养护龄期取 3、6、9、12、18、24、72 h,初始含水率取 15%、18%、21%、24%。具体方案如表 2 所示。

表 2 试验方案
Table 2 Experimental program

研究因素	各因素取值		
	氧化镁掺量/%	养护时间/h	初始含水率/%
氧化镁掺量	5, 10, 15, 20	3, 6, 9, 12, 18, 24, 72	15
养护时间	5, 10, 15, 20	3, 6, 9, 12, 18, 24, 72	15
初始含水率	5, 10, 15, 20	24	15, 18, 21, 24

2.4 测试方法

无侧限抗压强度试验采用 SJ-1A 型应变控制式三轴仪,不加围压,以 1 mm/min 的加荷速率给试样施加轴向压力,直至测力计的读数达到峰值,记录百分表读数。根据无侧限抗压强度试验结果,选取代表性土样进行含水率测试、X 射线衍射试验和扫描电镜试验。

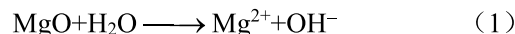
取无侧限抗压强度破坏后的试样进行含水率测试,为避免高温对固化试样中的产物造成影响,烘箱温度设置为 48℃(因为当温度高于 50℃时,三水碳酸镁可能脱水转换为碱式碳酸镁)。烘干 2 d 后每隔 1 d 称一次质量,直至重量不再变化,每组试样取 3 个平行样,最后求得的平均值记为固化后的含水率。

取烘干后的土样进行 X 射线衍射试验和扫描电镜试验。XRD 试验采用 D/mAX 2500 型智能衍射仪对碾碎过筛后小于 0.075 mm 的固化土进行测试,扫描范围为 10°~90°,步宽为 0.02°。SEM 测试采用美国赛默飞世尔公司生产的 Quattro S 扫描电镜对土样的新鲜断面进行测试。

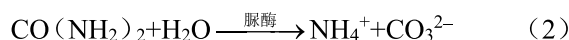
3 试验结果与分析

3.1 固化原理

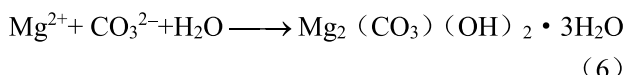
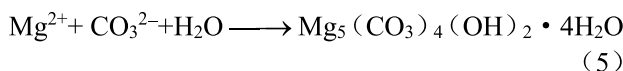
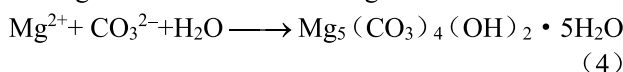
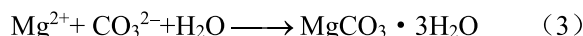
黄土加入活性氧化镁、尿素和细菌后,活性氧化镁极易水化并生成碱性膨胀产物,反应式为



但是,由于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 胶结能力很弱,对土体的固化效果不明显。加入的尿素和菌液将发生作用,即微生物活动产生的脲酶能够将加入的尿素分解,产生大量的 CO_3^{2-} ,反应式为



产生的 CO_3^{2-} 与活性氧化镁水化后产生的 Mg^{2+} 反应生成大量水合碳酸镁,反应式为



这些产物具有膨胀性和具有良好的胶结性,能对土颗粒间的孔隙进行填充,还能将土颗粒胶结在一起,从而对黄土起到显著的加固效果^[5-6]。本文试验中,加入的尿素全部反应生成的 CO_3^{2-} 尚不足以满足掺入的氧化镁全部进行固化反应,但继续增加尿素和细菌用量,将导致试样初始含水率增加,从而影响固化效果。本次试验尿素水解生成的 CO_3^{2-} 已能满足试样前期均匀碳化固化试样的需求,从而快速提高强度;而在后期,在潮湿的环境中,水化后的氧化镁能继续吸收空气中的 CO_2 从而使碳化固化反应继续缓慢进行。

3.2 养护龄期对固化试样含水率的影响

固化反应的进行均需要水的参与,因此,随着养护龄期的改变,试样中的含水率将会发生变化。图 1 给出了氧化镁-微生物固化黄土试样含水率随养护龄期的变化曲线。由图可知,固化试样含水率随养护龄期的增长而降低。各掺量试样的干物质质量(干黄土与氧化镁干粉质量之和)相同,初始含水率均为 15%,固化 3 h 后试样含水率分别降低至 10.77%、9.18%、7.83%、6.15%。此时含水率的降低主要是因为氧化镁的水化,发生了式(1)的反应,消耗了大量的水。同时,微生物活动产生的脲酶分解尿素时也会消耗试样中的水,导致试样的含水率快速降低。并且,脲酶分解尿素后生成的碳酸根离子与水化生成的氢氧化镁反应生成具有胶结作

用的碱式碳酸镁, 发生式 (3) ~ (6) 的反应, 这些反应将自由水转化为生成物中的结晶水, 进一步降低了试样的含水率。随着养护龄期的增长含水率逐渐下降, 但下降速度逐渐减缓, 这也反映出随着反应的进行, 反应所需的物质减少, 微生物活性逐渐降低, 固化反应逐渐减弱。

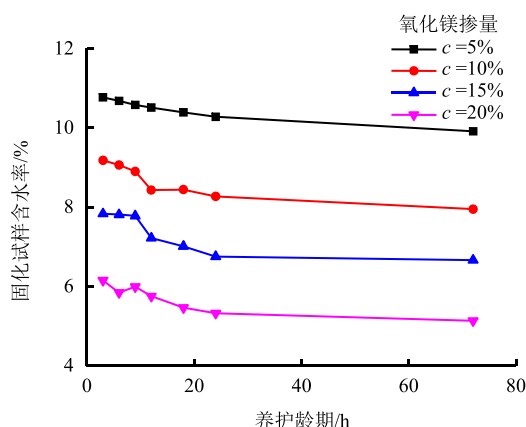


图 1 养护龄期对固化试样含水率的影响
Fig.1 Influence of curing time on water content of cured samples

3.3 氧化镁掺量对固化试样强度的影响

活性氧化镁的碳化产物具有膨胀性质, 能减小孔隙, 同时固化产物能胶结黄土颗粒, 提高黄土强度。图 2 给出了氧化镁-微生物固化黄土试样无侧限抗压强度随氧化镁掺量的变化曲线。从图中可以看出, 在 5%~20% 掺量范围内, 固化黄土试样的无侧限抗压强度随活性氧化镁掺量的增加而增大。这是因为随氧化镁掺量的增加, 参与反应的物质增多, 生成的具有胶结作用的物质增加, 因此, 固化作用增强。养护 3 h 时, 20% 掺量固化试样的强度达到 2.633 MPa, 分别为 5%、10%、15% 掺量固化试样强度的 5.51、2.74、1.88 倍, 所以可以使用高氧化

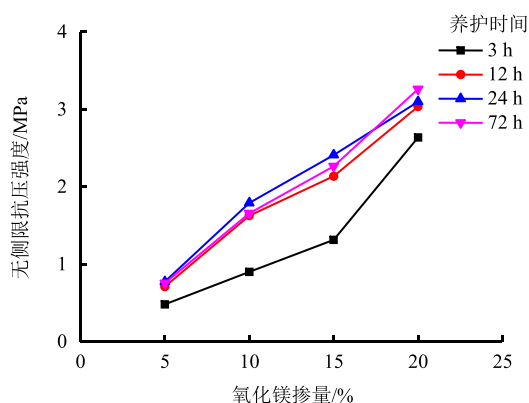


图 2 氧化镁掺量对无侧限抗压强度的影响
Fig.2 Influence of MgO content on unconfined compressive strength

镁掺量在短时间内获得较高强度。并结合图 1 可知, 固化试样含水率随氧化镁掺量的增加而降低, 这是因为随着氧化镁掺量增加, 氧化镁反应消耗的水增加, 导致固化试样含水率降低。含水率的降低能增强黄土颗粒间的黏聚力, 提高试样强度, 因此, 含水率的降低也是促进试样强度增长的因素之一。由此可知, 固化试样强度的提高与固化试样含水率的降低有一定关系, 但最终强度与含水率无明显关系。活性氧化镁掺量对固化黄土无侧限抗压强度有重要影响, 在 5%~20% 掺量范围内, 活性氧化镁掺量越高, 固化试样强度越高。

3.4 养护龄期对固化试样强度的影响

固化作用的进行需要微生物分解尿素来提供 CO_3^{2-} , 而微生物分解尿素的速度是有限的, 固化反应需要一定的时间进行。图 3 给出了氧化镁-微生物固化黄土试样无侧限抗压强度随养护龄期的变化曲线。从图中可以看出, 在 5%~20% 掺量范围内, 固化黄土试样的无侧限抗压强度随活性氧化镁掺量增加而增大, 随龄期的发展因氧化镁掺量的不同而稍有不同。5% 掺量固化试样的强度变化可分为快速增长阶段、慢速增长阶段以及稳定阶段。10% 和 15% 掺量固化试样的强度变化可分为快速增长阶段、慢速增长阶段以及缓慢下降阶段。20% 掺量固化试样的强度变化可分为快速增长阶段和慢速增长阶段。各掺量下, 养护龄期为 9 h 时, 强度已经达到相应掺量最大强度的 80% 以上。

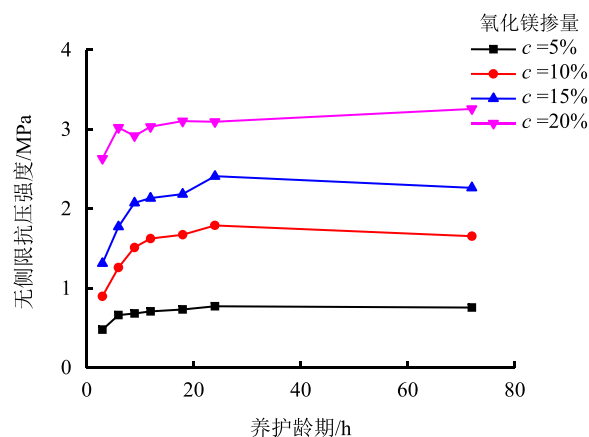


图 3 养护龄期对无侧限抗压强度的影响
Fig.3 Influence of curing time on unconfined compressive strength

但对于 20% 掺量固化试样来说, 固化 6 h 后的强度也进入了慢速增长阶段。这是因为氧化镁水化消耗了大量的水, 导致试样的含水率过低, 抑制了式 (2) ~ (6) 反应的进行, 因此, 强度进入慢速

增长阶段的时间也较早。并且, 由于活性氧化镁掺量增加, 导致试样碱性升高, 抑制了微生物的部分活动, 式(2)~(6)所进行的反应缓慢, 所以 20% 掺量试样的强度在养护 72 h 后还未出现降低的现象, 而 10% 和 15% 掺量固化试样的强度在养护 24 h 后就开始下降。此外, 各掺量固化试样养护 72 h 后的强度相比养护 3 h 时的强度分别增长了 0.277、0.758、0.954、0.625 MPa。这是因为 5% 掺量固化试样氧化镁掺量有限, 试样的强度发展没有 10% 和 15% 掺量固化试样的强度总体增长幅度大; 20% 掺量试样由于碱性升高, 微生物活动受到抑制, 试样的强度发展也没有 10% 和 15% 掺量固化试样的强度总体增长幅度大, 但仍比 5% 掺量固化试样的强度增长幅度大。

3.5 初始含水率对固化试样强度的影响

初始含水率会影响固化反应的进行, 图 4 给出了氧化镁-微生物固化黄土试样无侧限抗压强度随初始含水率的变化曲线。从图中可以看出, 5% 和 10% 掺量试样的强度随初始含水率增加而减小, 而 15% 和 20% 掺量试样的强度随初始含水率增加先增大后减小。这是因为氧化镁掺量为 5% 和 10% 时, 15% 的初始含水率已经满足活性氧化镁水化和后续的固化反应进行, 故初始含水率的增加, 不能促进活性氧化镁的水化, 也不能促进具有胶结作用的晶体物质生成, 而固化后的含水率随着初始含水率的增加而增加, 因此, 试样强度随初始含水率的增加而有所下降。但氧化镁掺量为 15% 和 20% 时, 15% 的初始含水率只能使加入的活性氧化镁部分水化, 随着含水率的增加, 加入的水能增加活性氧化镁的水化, 还能促进固化作用的发生, 故强度继续增长。但当初始含水率增加到满足活性氧化镁水化以及固化作用进行的极限后, 继续增加含水率也不能促进具有胶结作用的晶体物质生成, 与低掺量下随含水率变化的现象相同, 强度有所下降 (15% 掺量试样的强度在含水率增加到 18% 后开始下降, 20% 掺量试样的强度在含水率增加到 21% 后开始下降)。不过此时, 高氧化镁掺量固化试样的强度仍比低氧化镁掺量固化试样的强度大, 在 5%~20% 掺量范围内, 各初始含水率下固化试样的强度仍随氧化镁掺量增加而增大。根据试验结果, 最优初始含水率会随氧化镁掺量的变化而变化。当氧化镁掺量较低 (5%~10%) 时, 15% 的初始含水率已经能够保证反应的进行; 但是随着氧化镁掺量的增大 (15%~20%), 由于固化剂的增加, 反应所需的水增加, 需要适当提高试样的初始含水率。

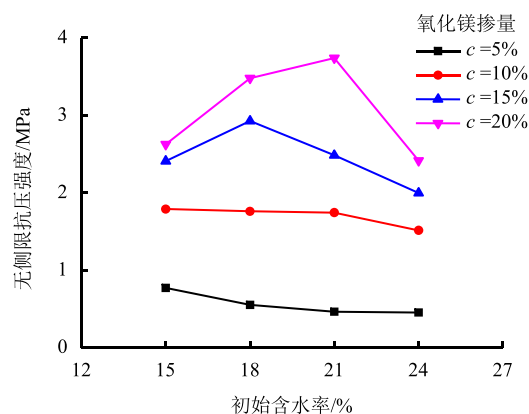
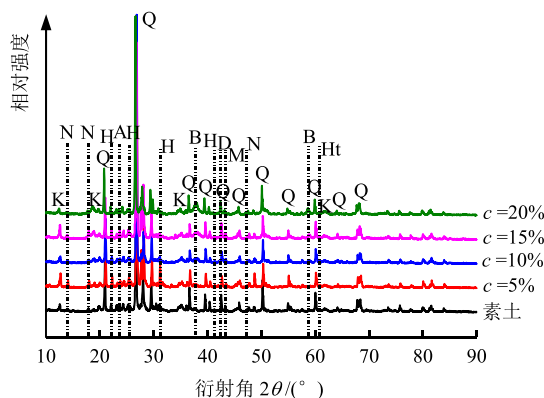


图 4 初始含水率对无侧限抗压强度的影响

Fig.4 Influence of initial water content on unconfined compressive strength

3.6 XRD 分析

试样固化时发生了一系列化学反应, 得到了很多新的物质, 通过 XRD 试验对固化试样的主要化学成分进行定性分析。图 5 为不同活性氧化镁掺量固化试样 (初始含水率 15%) 养护 72 h 后的 XRD 结果。从图中可以看出, 黄土的主要矿物成分为石英和高岭石; 不同掺量活性氧化镁固化试样的化学成分中均有碱式碳酸镁生成, 同时在固化试样中还检测到未水化的氧化镁、水化后未进一步反应的水镁石和少量水滑石。这说明氧化镁并没有全部水化, 并且氧化镁水化后与土颗粒间发生了离子交换反应和火山灰反应, 这与刘松玉等^[9]的研究结果一致。各掺量试样固化产物的种类大体相同, 包括三水菱镁石、水纤菱镁石、球碳镁石和水碳镁石等。



注: K 为高岭石 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; Q 为石英 SiO_2 ; B 为水镁石 $\text{Mg}(\text{OH})_2$; M 为 MgO ; Ht 为水滑石 $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; A 为水纤菱镁石 $\text{Mg}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; N 为三水菱镁石 $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; H 为球碳镁石 $\text{Mg}_3(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; D 为水碳镁石 $\text{Mg}_3(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。

图 5 不同氧化镁掺量固化试样 XRD 结果

Fig.5 X-ray diffractograms of cured samples with different MgO contents

3.7 SEM 分析

图6和图7分别为不同氧化镁掺量固化试样(初始含水率为15%, 养护龄期为72 h)放大5 000倍和1 000倍的SEM图像。已有研究表明, MgO反应产物中, 团絮状为氢氧化镁, 片状和花朵状产物为水碳镁石和球碳镁石, 棱柱状的产物为三水菱镁石。由图6可知, 在各掺量的固化试样中均有片状水菱镁石或球碳镁石晶体, 并且随着氧化镁掺量的增加, 团絮状的氢氧化镁越多。从图7可以看出,

晶体与晶体之间连接成块, 随着活性氧化镁掺量的增加, 晶体的数量越多, 晶体之间的连接越紧密。虽然固化试样中仍存在大量孔隙, 但是可以看到孔隙的数量较原土已有明显减少, 并且掺量越高, 孔隙的数量越少。晶体与土颗粒胶接在一起, 一些晶体填充在颗粒间的孔隙处, 随着掺量的增加, 包裹在原生矿物表面的物质越来越多, 原生矿物的形状变得越来越模糊, 颗粒间的连接方式转为了面-边接触和面-线接触, 结构更为致密。

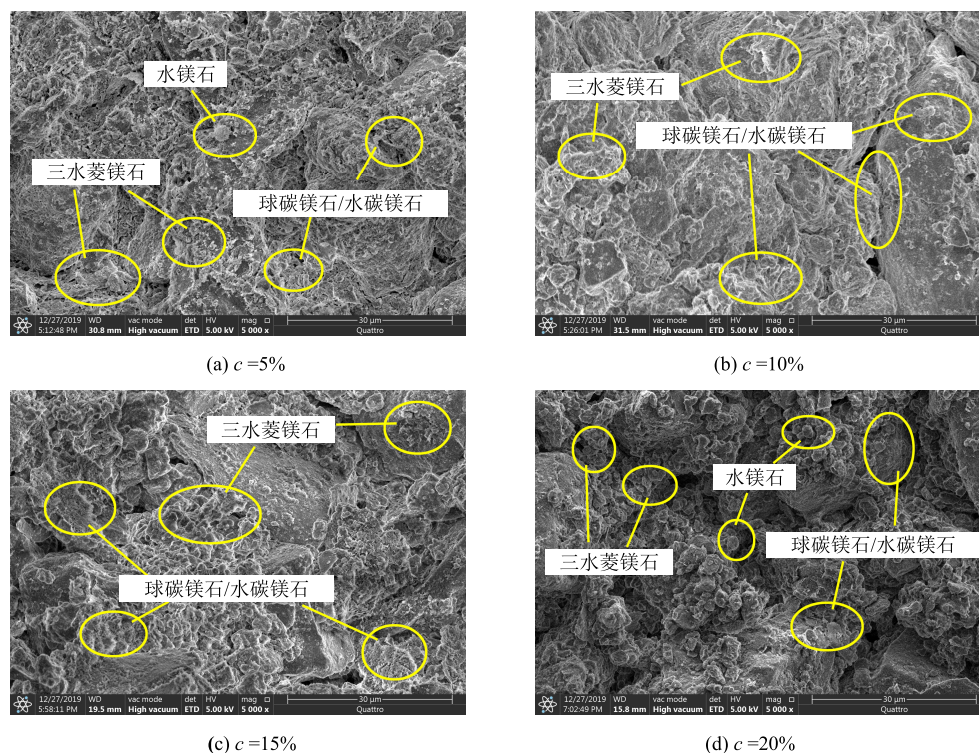


图6 不同氧化镁掺量固化试样 SEM 照片 (5 000 倍)

Fig.6 SEM photos of cured samples with different MgO contents ($\times 5\,000$)

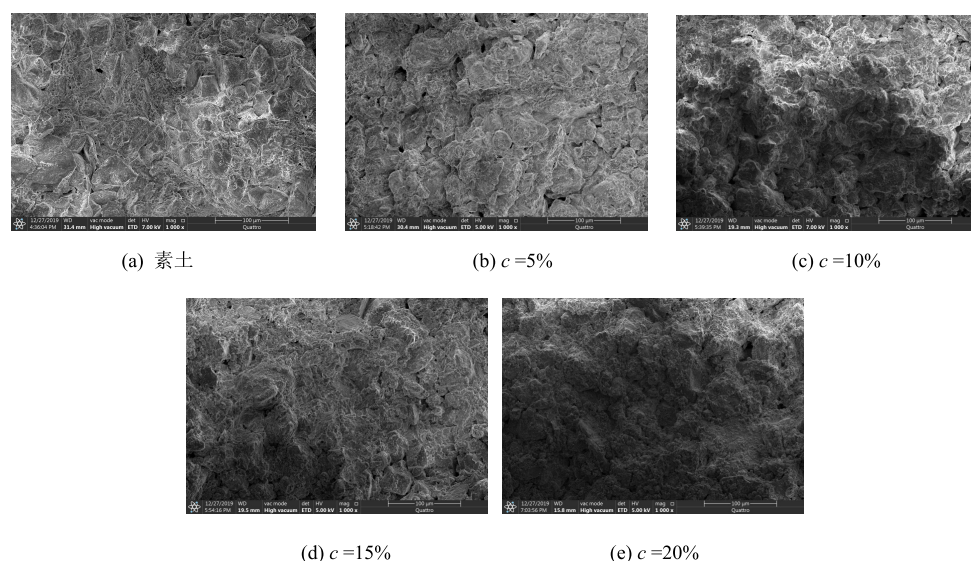


图7 不同氧化镁掺量固化试样 SEM 照片 (1 000 倍)

Fig.7 SEM photos of cured samples with different MgO contents ($\times 1\,000$)

4 结 论

进行了延安黄土的氧化镁-微生物固化试验,研究了活性氧化镁掺量、养护龄期和初始含水率等对固化效果的影响,并分析其机制。主要结论如下:

(1) 氧化镁-微生物固化黄土试样含水率随氧化镁掺量的增加和养护龄期的增长而降低。

(2) 氧化镁-微生物固化黄土试样的无侧限抗压强度随活性氧化镁掺量(5%~20%)增加而增大,随龄期的发展总体上不断增大,但当氧化镁掺量为10%和15%时,后期强度稍有降低。固化试样养护9 h后的强度能达到最大强度的80%以上。

(3) 当氧化镁掺量为5%和10%时,固化黄土无侧限抗压强度随初始含水率增加而减小;当氧化镁掺量为15%和20%时,无侧限抗压强度随初始含水率增加先增大后减小,最优初始含水率随氧化镁掺量的变化而变化。

(4) XRD和SEM结果显示,随着氧化镁掺量的增加,水化后未进一步反应的氢氧化镁越多,氧化镁掺量不宜过多。反应后生成的含结晶水的碳酸镁具有膨胀性和胶结性,对土颗粒间的缝隙进行填充,并将土颗粒胶结在一起,从而起到加固效果。

参 考 文 献

- [1] SHERWOOD P. Soil stabilization with cement and lime: State of the art review[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1993.
- [2] HARRISON J. Reactive magnesium oxide cement: WO/055049[P]. 2001-01-29.
- [3] HARRISON J. Reactive magnesium oxide cements: 7347896[P]. 2004-12-21.
- [4] 刘松玉, 李晨. 氧化镁活性对碳化固化效果影响研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 148-155.
LIU Song-yu, LI Chen. Influence of MgO activity on stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 148-155.
- [5] 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.
CAI Guang-hua, LIU Song-yu, CAO Jing-jing. Research on micro-mechanism of carbonated reactive MgO-stabilized silt[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, 50(5): 105-113, 128.
- [6] 刘松玉, 曹菁菁, 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固粉质黏土微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563.
LIU Song-yu, CAO Jing-jing, CAI Guang-hua. Microstructural mechanism of reactive magnesia carbonated and stabilized silty clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563.
- [7] AL-THAWADI S M. High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria[D]. Perth: Murdoch University, 2008.
- [8] ISMAIL K. Microbiological improvement of the physical properties of soils[D]. Phoenix: Arizona State University, 2008.
- [9] WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, MEURS G A M, et al. A mathematical model for biogrout[J]. **Computational Geosciences**, 2013, 17(3): 463-478.
- [10] JIAN C, VIKTOR S, VOLODYMYR I. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. **Geomicrobiology Journal**, 2012, 29(6): 544-549.
- [11] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.
HE Jia, CHU Jian, LIU Han-long, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 643-653.
- [12] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548.
QIAN Chun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1537-1548.
- [13] 李明东, LIN Li, 张振东, 等. 微生物矿化碳酸钙改良土体的进展、展望与工程应用技术设计[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 80-87.
LI Ming-dong, LIN Li, ZHANG Zhen-dong, et al. Review, outlook and application technology design on soil improvement by microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(10): 80-87.
- [14] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.
LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. **Journal of Civil and Environment Engineering**, 2019, 41(1): 1-14.