



文章编号:1005-0930(2024)05-1349-011 中图分类号:TU411 文献标识码:A  
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.05.011

## 尿素预水解策略对微生物-活性氧化镁 联合固化软黏土的影响

雷光会<sup>1</sup>, 王瑞<sup>2,3</sup>, 王少丹<sup>1</sup>, 王海猛<sup>4</sup>,  
刘宇佳<sup>2</sup>, 唐朝生<sup>2,3</sup>

(1.厦门路桥百城建设投资有限公司,福建 厦门 361000;2.南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210023;  
3.南京大学(苏州)高新技术研究院,江苏 苏州 215123;4.中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430040)

**摘要:**我国基础设施建设导致产生大量工程弃土,为实现软黏土的固化与资源化利用,提出了基于尿素预水解策略的生物碳化活性氧化镁技术.通过开展一系列的无侧限抗压强度测试、酸洗测试、干密度和含水率测试,重点探究了固化方式、预水解时间和尿素浓度对土体固化性能的影响.研究表明:(1)预水解策略可实现软黏土的高效固化,养护7d后生物碳化试样的强度相较于未预水解试样提升了1.5倍,甚至与养护28d水泥固化试样的强度相当;(2)预水解时间和尿素浓度的增加均可提高尿素水解量并产生更多碳酸根参与到活性氧化镁的生物碳化,但固化试样的强度整体呈现出先增后减的趋势,最优预水解时间和最优尿素浓度分别为12h和2mol/L;(3)适当增大碳酸根含量可促进更多胶结产物水合碳酸镁的形成,以提高固化试样的强度;但过高的碳酸根含量反而会影响水合碳酸镁的胶结性能,导致强度降低.

**关键词:**软黏土;活性氧化镁;生物碳化;预水解;微生物;无侧限抗压强度

当前,我国正处于城市化和现代化建设飞速发展的时期,大规模基础工程建设不可避免地要产生大量的工程弃土.工程弃土的随意堆置不仅会占用大量土地资源,还会导致扬尘污染、土壤污染和水土流失等灾害风险的发生<sup>[1-2]</sup>.面对工程弃土产量逐年攀升的现状,一味地堆置处理已经无法解决当前面临的严峻问题.为保证工程建设的健康运营和可持续发展,工程弃土的回填再利用成为解决当前问题的重要举措<sup>[3-5]</sup>.

在现场施工时,一些压实性能好、天然含水率低的工程弃土(如砂土、粉砂土等)一般可直接用于路基回填,而天然含水率较高的软黏土因强度低、变形大、固结周期长等不良

收稿日期:2024-05-20;修订日期:2024-08-13

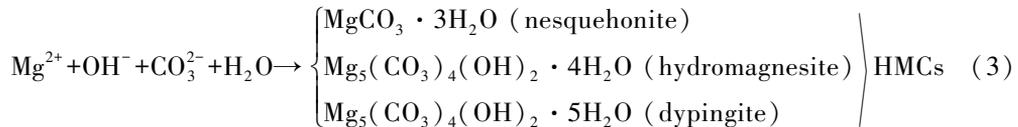
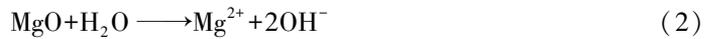
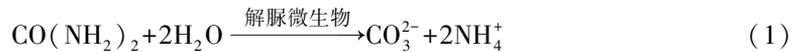
基金项目:国家自然科学基金项目(41925012)

作者简介:雷光会(1978—),男,高级工程师.E-mail:2200657424@qq.com

通信作者:王瑞(1997—),男,博士研究生.E-mail:wr@smail.nju.edu.cn

性质则需要通过改良处理后才能利用<sup>[6-7]</sup>.特别是针对天然含水率处于塑限与液限之间的软黏土,自然晾晒和化学固化是最常用的处理措施.然而由于黏土具有强持水性和高黏性的特点,处理时往往存在晾晒干燥周期长和固化剂拌合不均匀的现象,严重制约着其在施工现场的改良效果和资源化利用效率.因此,亟需寻求一种新的土体固化技术以实现软黏土的高效固化.

近年来,生物碳化活性氧化镁技术因其低碳、高效的固化优势在岩土领域倍受关注<sup>[8-12]</sup>.其原理主要是利用解脲微生物催化尿素水解产生的碳酸根参与到活性氧化镁水化后的碳化过程,依靠产生的生物碳化产物水合碳酸镁(HMCs)可实现对土体的高效胶结与固化<sup>[9,13]</sup>.该技术涉及的化学反应原理如式(1)~式(3)所示.



该技术中所使用的活性氧化镁由于具有来源广泛、生产能耗低、固化效率高和碳封存潜力大等特点,被广泛考虑作为水泥等传统胶凝材料的替代品.目前,国内外学者基于该技术在土体固化领域开展了大量的研究工作<sup>[8,11,12,14-16]</sup>.Yang等<sup>[8]</sup>、Yan等<sup>[16]</sup>探究了活性氧化镁掺量对砂土固化性能的影响,结果表明随着活性氧化镁掺量的增加,试样的无侧限抗压强度得到显著提升的同时渗透系数发生了明显下降;Wang等<sup>[11]</sup>利用该技术对建筑垃圾进行固化与资源化利用研究,验证了该技术在地下工程中应用的可行性;陈哲等<sup>[15]</sup>开展了对电解锰废渣的固化研究,肯定了该技术在重金属污染土固化领域的应用前景.然而,尽管当前已经开展了大量的研究工作,但很少涉及对细粒土的改良,尤其是对具有一定初始含水率的软黏土的固化研究甚少.一方面是因为黏性土狭窄的孔隙通道不利于解脲细菌的生存,会导致尿素水解程度和活性氧化镁生物碳化效率的降低<sup>[13,17]</sup>;另一方面软黏土的高含水率会减弱土颗粒间的有效黏结,影响HMCs对土颗粒的胶结效果<sup>[14]</sup>.

基于提出的尿素预水解策略开展了生物碳化活性氧化镁技术对软黏土的固化试验,重点探究了固化方式、预水解时间和尿素浓度对软黏土固化效果的影响,并结合酸洗测试、含水率和干密度测试对影响固化性能的机理进行了分析,为生物碳化活性氧化镁技术在软土固化领域的应用提供了新的见解.

## 1 试验材料与方方法

### 1.1 试验材料

**1.1.1 土样** 试验所用的软黏土取自厦门地区,其基本物理性质参数如表1所示.按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[18]</sup>标准,该土样属于高液限黏土.为保证制样的均匀性,试验前将土样烘干粉碎,过2mm筛备用.

**1.1.2 解脲微生物** 所使用的解脲微生物为巴氏芽孢八叠球菌,具有极高的脲酶活性,能够快速催化尿素水解产生碳酸根<sup>[19-20]</sup>.该细菌以菌液的形式在特定的液体培养基中

培养,液体培养基由 10g/L 硫酸铵、15.73g/L 三羟甲基氨基甲烷和 20g/L 酵母提取物组成<sup>[21]</sup>. 试验前将菌液按照 1% 体积比接种于新的液体培养基中,并在温度为 30℃、转速为 200r/min 的恒温振荡培养箱中培养 24h 备用.使用电导率仪测试菌液的脲酶活性为 0.5mS/cm,使用分光光度计测试菌液的 OD<sub>600</sub> 值为 1.15<sup>[21]</sup>.

**1.1.3 活性氧化镁和尿素** 试验所使用的氧化镁固化剂为轻烧氧化镁,粉末状颗粒,按照《轻烧氧化镁化学活性测试方法》(YB/T 4019—2020)<sup>[22]</sup> 中水合法测试其活性氧化镁含量为 54.47%.所使用的尿素为农业用尿素,总氮含量高于 46.0%,属优等品.

## 1.2 试样制备

**1.2.1 预水解的尿素溶液制备** 为了提高解脲细菌对尿素的水解程度以产生更多的碳酸根促进活性氧化镁的生物碳化,采用预水解策略制备尿素溶液.具体为:在样品制备前,提前将菌液和固体尿素混合配置成一定浓度( $C$ )的尿素溶液,并将其在室温条件下(25℃)密封静置预定时间( $T$ )完成尿素的预先水解过程.Wang 等<sup>[23]</sup> 研究表明,相较于直接将固化剂材料(菌液、尿素和活性氧化镁)与土体拌合处理的方式,预水解策略中的液相环境可为解脲细菌提供更适宜的生存条件(生存空间、营养获取和 pH 环境),从而显著提升细菌对尿素的水解程度,增强生物碳化活性氧化镁技术对土体的固化效果.该试验中尿素浓度的定义如式(4)所示

$$C = \frac{n_{\text{urea}}}{V} \quad (4)$$

式中: $C$  为尿素浓度, mol/L;  $n_{\text{urea}}$  为尿素的摩尔质量, mol;  $V$  为尿素溶液的体积, L.

**1.2.2 生物碳化试样制备** 使用自来水将过筛烘干后的土样配制成初始含水率为 40% 的软黏土,接近于土体的天然含水率.之后,向其中依次加入掺量为 20% 的预水解尿素溶液和 10% 的氧化镁固化剂,充分搅拌均匀形成混合浆液;将其倒入直径为 4.5cm、高度为 10.0cm 的亚克力模具中,反复震荡消除样品中的气泡.样品制备完成后,将其置于温度为 25℃、相对湿度为 95% 的环境箱中养护 7d 后脱模进行试验测试.值得注意的是,由于混合后样品初始为流塑状态,这将可以有效避免固化剂拌合不均匀的问题.尿素溶液掺量( $x$ )和氧化镁掺量( $y$ )定义如下

$$x = \frac{m_{\text{us}}}{m_{\text{ds}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$y = \frac{m_{\text{MgO}}}{m_{\text{ds}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $x$  为尿素溶液的掺量,%;  $y$  为氧化镁的掺量,%;  $m_{\text{us}}$  为尿素溶液的质量, g;  $m_{\text{MgO}}$  为氧化镁的质量, g;  $m_{\text{ds}}$  为烘干土样的质量, g.

表 1 试验土样的基本物理性质参数

Table 1 Basic physical properties of soil used in this study

物理性质参数	值
比重	2.68
天然含水率/%	39.66
塑限/%	28.15
液限/%	50.75
塑性指数/%	22.60
粒径级配分布/%	
砂粒( $2\text{mm} \geq d > 0.075\text{mm}$ )	5.72
粉粒( $0.075\text{mm} \geq d > 0.005\text{mm}$ )	42.17
黏粒( $d \leq 0.005\text{mm}$ )	52.11

### 1.3 试验内容

为调查基于预水解策略的生物碳化活性氧化镁技术对软黏土的固化性能,共设置3组试验,分别探究固化方式(S1:仅氧化镁固化,S2:未预水解生物碳化,S3:预水解生物碳化,S4~S5:水泥固化)、预水解时间( $T$ 为0h、3h、6h、12h、24h、48h)和尿素浓度( $C$ 为1mol/L、2mol/L、3mol/L、4mol/L、5mol/L)的影响,具体试验方案如表2所示.研究<sup>[13,23]</sup>表明,生物碳化试样在养护7d后便能获得稳定的强度提升,因此该试验中养护时间设置为7d.

表2 试验方案及制样参数

Table 2 Experimental design of sample preparation

试样编号	研究因素	氧化镁(水泥)掺量 /%	预水解尿素溶液掺量 /%	预水解时间 /h	尿素浓度 /(mol/L)	养护时间 /d
S1	固化方式	10				7
S2		10	20	0	2	7
S3		10	20	12	2	7
S4		10(水泥)				7
S5		10(水泥)				28
T0	预水解时间	10	20	0	2	7
T3		10	20	3	2	7
T6		10	20	6	2	7
T12		10	20	12	2	7
T24		10	20	24	2	7
T48		10	20	48	2	7
U1	尿素浓度	10	20	48	1	7
U2		10	20	48	2	7
U3		10	20	48	3	7
U4		10	20	48	4	7
U5		10	20	48	5	7

注:试验中所使用的水泥为普通硅酸盐水泥,强度等级为42.5;S2和T0、S3和T12、T48和U2均为同一试样.

### 1.4 试验方法

**1.4.1 尿素水解率测试** 尿素溶液预水解特定时间后,使用酸洗-排水法测试尿素的水解率,实验装置及具体测试流程如先前研究所述<sup>[13,23]</sup>.通过测试10ml尿素溶液排出的二氧化碳体积,尿素水解率可通过式(7)计算得出

$$UHR = \frac{\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}{M_{CO_2} \cdot V_{tested} \cdot C} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $UHR$ 为尿素水解率,%; $\rho_{CO_2}$ 为二氧化碳的气体密度,取1.80g/L(25°C+1atm); $V_{CO_2}$ 为CO<sub>2</sub>的排放量,L; $M_{CO_2}$ 为CO<sub>2</sub>的相对摩尔质量,取44g/mol; $V_{tested}$ 为待测尿素溶液量,取0.01L.

**1.4.2 无侧限抗压强度、含水率和干密度测试** 按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[24]</sup>,对脱模后的生物碳化试样进行无侧限抗压强度测试,仪器的加载速率为1mm/min.之后,收集强度测试后的样品,采用烘干法和蜡封法分别测试样品的含水率和干密度.每个样品共设置3组平行样,以保证测试结果的准确性和可靠性.

## 2 结果与讨论

### 2.1 固化方式的影响

对比不同固化方式下软黏土固化试样的无侧限抗压强度测试结果(图1).从图1中可以看到,在仅添加氧化镁的条件下(S1),由于活性氧化镁的水化作用,试样的无侧限抗压强度提高至225.36kPa.细菌和尿素的参与促进了活性氧化镁生物碳化反应的发生,使得试样的强度得到进一步增强(S2:382.69kPa).尽管如此,由于解脲细菌在黏土环境中水解尿素的能力有限,S2试样的强度仍低于同等养护时间条件下水泥固化试样的强度(S4:441.80kPa).

预水解策略能显著提高解脲细菌对尿素的水解能力,以产生更多的碳酸根促进活性氧化镁的生物碳化反应.结果表明,更多生物碳化产物HMCs产生的胶结作用使得生物碳化试样(S3)的强度得到明显提升,其强度(966.40kPa)相较于S2试样提升了1.5倍,且为同等养护时间(7d)下水泥固化试样(S4)的2.2倍,甚至与养护28d水泥固化试样的强度(S5:986.71kPa)相当.由此可见,基于预水解策略的生物碳化活性氧化镁技术对软黏土固化的可行性,同时也证明该技术相较于水泥固化的高效性.

在固化过程中,土体内部水分的大量消耗和胶结产物的膨胀效应会导致固化试样的含水率和干密度发生显著变化<sup>[12,15]</sup>.除了固化剂的胶结作用外,含水率的降低和干密度的增加同样能够增大土体的黏聚力和内摩擦角,进而提高固化试样的强度性能.图2展示了固化试样含水率和干密度的测试结果.尿素溶液的添加使得生物碳化试样的含水率要显著高于仅添加氧化镁固化(S1)和水泥固化(S4和S5)的试样,干密度反之.相较于7d和28d养护时间条件下水泥固化的试样,预水解生物碳化试样(S3)的含水率分别增大了0.4倍(从31.49%到44.55%)和1.8倍(从15.88%到44.55%),干密度分别降低了17.3%(从1.39g/cm<sup>3</sup>到1.15g/cm<sup>3</sup>)和26.8%(从1.57g/cm<sup>3</sup>到1.15g/cm<sup>3</sup>).尽管如此,如前所述S3试样的强度仍显著高于S4

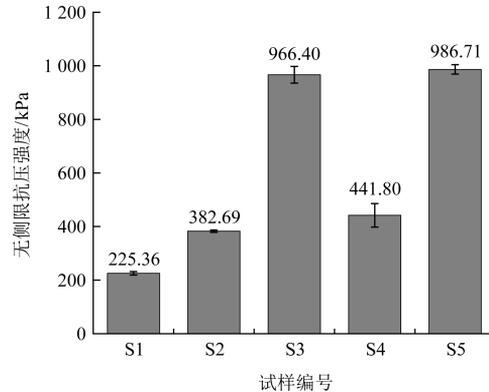


图1 不同固化方式下固化试样的无侧限抗压强度结果

Fig.1 Results of unconfined compressive strength for samples cured by different solidification methods

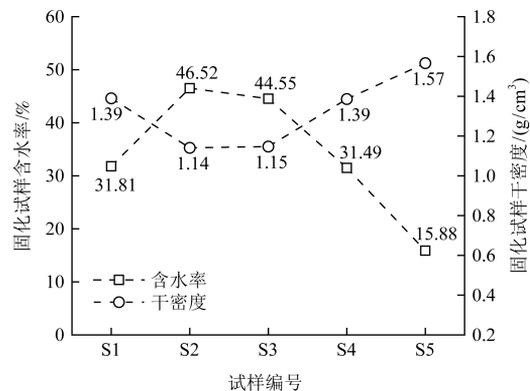


图2 不同固化方式下试样的含水率和干密度结果

Fig.2 Results of water content and dry density for samples cured by different solidification methods

试样,近似于 S5 试样,这暗示了生物碳化产物 HMCs 的胶结性能要明显优于水化硅酸钙 (C-S-H) 和水化铝酸钙 (C-A-H) 等水泥水化产物。

## 2.2 预水解时间的影响

尿素水解率 (UHR) 是用来衡量尿素水解程度的重要指标,尿素水解率高表明当前尿素浓度的尿素溶液中有更多的尿素被水解产生碳酸根参与到活性氧化镁的生物碳化过程<sup>[25]</sup>。实际上,在预水解过程中尿素的水解量同时受尿素浓度和尿素水解率的综合调控。对此,提出“水解尿素浓度 (HUC, mol/L)”的概念用来量化表征尿素溶液中被水解尿素的含量,如式 (8) 所示。HUC 越大,表明尿素水解产生的碳酸根含量越高。

$$HUC = C \times UHR \quad (8)$$

高的 pH 和铵根浓度会严重危害解脲细菌的活性表达,从而抑制尿素水解过程的持续进行<sup>[26]</sup>。

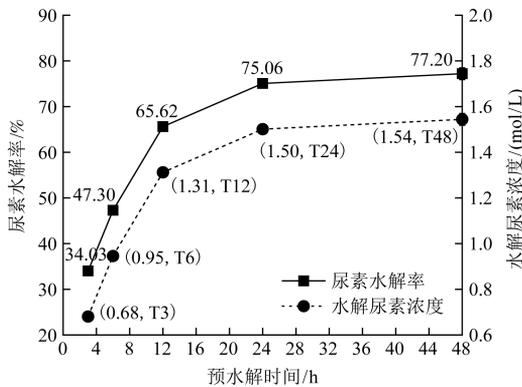


图3 不同预水解时间下尿素水解率和水解尿素浓度结果 ( $C=2\text{mol/L}$ )

Fig.3 Results of urea hydrolysis ratio and hydrolyzed urea concentration for urea solutions with different pre-hydrolysis durations ( $C=2\text{mol/L}$ )

图3展示了尿素浓度为  $2\text{mol/L}$  的尿素溶液在不同预水解时间下的尿素水解率和水解尿素浓度的测试结果。从图3可以看出,在前12h预水解时间内(0~12h),尿素利用率和水解尿素浓度均得到了显著的提升,分别达到  $65.62\%$  和  $1.31\text{mol/L}$ ;然而,在此后的12h内,二者的增长速率明显放缓,仅增加了约  $14.5\%$ ,此时预水解过程基本结束(0~24h)。即使预水解时间延长至48h,尿素水解率和水解尿素浓度也分别仅有  $2.85\%$  (从  $75.06\%$  到  $77.20\%$ ) 和  $2.67\%$  (从  $1.50\text{mol/L}$  到  $1.54\text{mol/L}$ ) 的增长率。这与前人研究<sup>[21-23]</sup>结果基本一致,尿素水解速率的降低主要与尿素溶液的 pH 和铵根含量的增大有关。

图4(a)和图4(b)分别呈现了不同预水解时间下生物碳化试样的无侧限抗压强度、含水率和干密度的测试结果。随着预水解时间的增加,生物碳化试样的强度呈现出先增后减的趋势(图4(a)),而不同试样的含水率和干密度之间并无明显差异(图4(b)),这表明不同试样之间强度的差异主要与生物碳化产物 HMCs 的性质有关。

从图4(a)中可以看到,当预水解时间为12h时,生物碳化试样(T12)的强度最高,为  $966.40\text{kPa}$ 。在预水解时间为0~12h内,随着预水解时间的延长,水解尿素浓度逐渐升高(图3),形成更多的碳酸根参与到活性氧化镁的生物碳化,从而产生了更多的 HMCs 促进黏土颗粒之间的胶结,提高了生物碳化试样的强度。当预水解时间继续增加至24h和48h时,尽管碳酸根含量继续增大,生物碳化试样(T24和T48)的强度却发生了显著下降,相较于T12试样分别降低了  $33.27\%$  (从  $966.40\text{kPa}$  到  $644.91\text{kPa}$ ) 和  $48.67\%$  (从  $966.40\text{kPa}$  到  $496.10\text{kPa}$ )。这表明适当地增加碳酸根含量可促进生物碳化试样强度的提升,但在过高

碳酸根含量的参与下,试样的强度反而会发生明显的衰减.

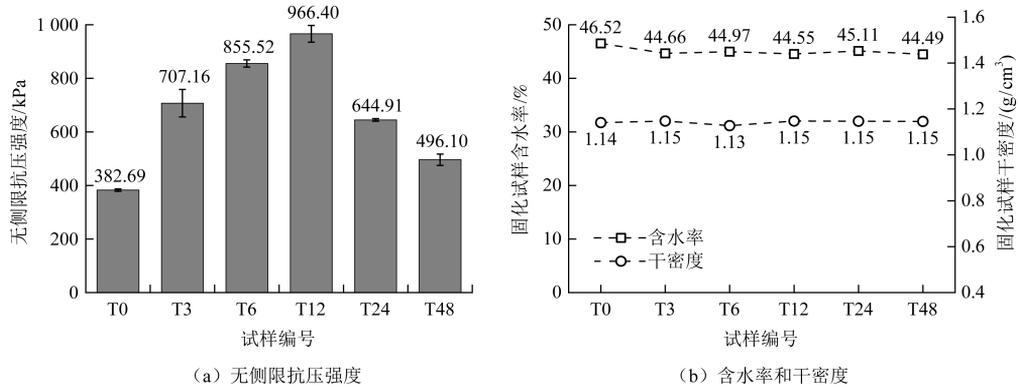


图4 不同预水解时间下生物碳化试样的测试结果 ( $C = 2\text{mol/L}$ )

Fig.4 Testing results of bio-carbonized samples with different pre-hydrolysis durations ( $C = 2\text{mol/L}$ )

### 2.3 尿素浓度的影响

图5所示为不同浓度的尿素溶液预水解48h后尿素水解率和水解尿素浓度的测试结果.可以看到,随着尿素浓度的增大,尿素水解率持续降低,而水解尿素浓度则呈现出先增后减的变化趋势.当尿素浓度从 $1\text{mol/L}$ 增加到 $4\text{mol/L}$ 时,尽管尿素水解率降低了 $31.1\%$ (从 $81.68\%$ 到 $56.25\%$ ),但水解尿素浓度却增大了 $1.7$ 倍(从 $0.82\text{mol/L}$ 到 $2.25\text{mol/L}$ ),表明尿素水解量和碳酸根的含量仍在随着尿素浓度的增大持续增加.然而,当尿素浓度增大到 $5\text{mol/L}$ 时,相较于 $C = 4\text{mol/L}$ 时,水解尿素浓度下降了 $4\%$ (从 $2.25\text{mol/L}$ 至 $2.16\text{mol/L}$ ),尿素水解量随之降低.这是因为尿素浓度的升高会导致解脲细菌细胞内、外渗透压差的增大,高的渗透压差会促进细胞的过度失水和收缩,从而降低细菌的脲酶活性,不利于其对尿素的水解<sup>[27-29]</sup>.

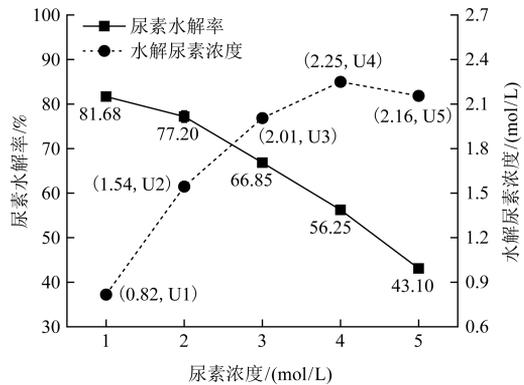


图5 不同尿素浓度下尿素水解率和水解尿素浓度结果 ( $T = 48\text{h}$ )

Fig.5 Results of urea hydrolysis ratio and hydrolyzed urea concentration for urea solutions with different urea concentrations ( $T = 48\text{h}$ )

图6呈现了不同尿素浓度下生物碳化试样的无侧限抗压强度、含水率和干密度的测试结果.如图6(a)所示,在尿素浓度为 $1\sim 4\text{mol/L}$ 内,随着尿素浓度的增加,尿素水解量增大(图5),但生物碳化试样的强度却呈现出先增后减的变化趋势.这与图4(a)的结果类似,即:尿素水解量或碳酸根含量的适当增加能够提高生物碳化试样的强度,但过高的含量反而会造成强度降低.当尿素浓度继续增大至 $5\text{mol/L}$ 时, U5试样的强度反而增长了 $8.8\%$ (从 $328.64\text{kPa}$ 到 $357.49\text{kPa}$ ),这与尿素水解量的轻微降低(图5)有关.

如图6(b)所示,在尿素浓度增大的过程中,不同生物碳化试样的含水率和干密度之间并无显著的差异.相较于其他试样,强度最高的U2试样反而具有最高的含水率

(44.49%) 和较低的干密度 ( $1.15\text{g}/\text{cm}^3$ ), 这进一步表明不同生物碳化试样之间强度的差异主要取决于 HMCs 的胶结性能。

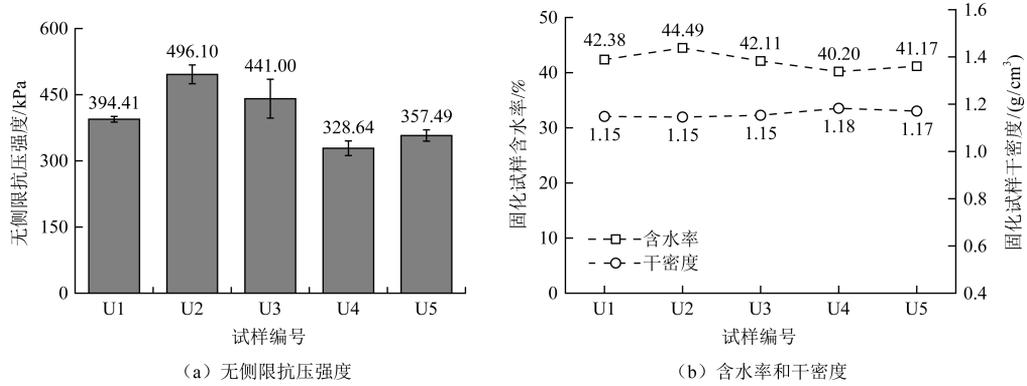


图 6 不同尿素浓度下生物碳化试样的测试结果 ( $T=48\text{h}$ )

Fig.6 Testing results of bio-carbonized samples with different urea concentrations ( $T=48\text{h}$ )

### 2.4 影响生物碳化试样强度性能的机理

碳酸根含量高能够促进更多的活性氧化镁发生生物碳化反应, 从而增加胶结产物 HMCs 的生成量<sup>[23,25,30]</sup>. 相较于直接拌合的处理方式, 预水解策略可显著增大尿素水解量和碳酸根含量, 以此产生更多的 HMCs 促进黏土颗粒间的胶结, 提高生物碳化试样的强度。

在预水解策略中, 当预水解时间过长 (图 4) 或尿素浓度过高 (图 6) 时, 生物碳化试样的强度反而会因碳酸根含量过高而发生明显下降. 含水率和干密度的测试结果表明不同试样之间强度的差异主要与生物碳化产物 HMCs 的性质有关。

前人研究<sup>[23,31-33]</sup>表明, 碳酸根含量的差异会对活性氧化镁的生物碳化模式和 HMCs 的胶结性能产生显著影响. 一方面, 适宜地增加碳酸根含量有利于活性氧化镁的均匀水化

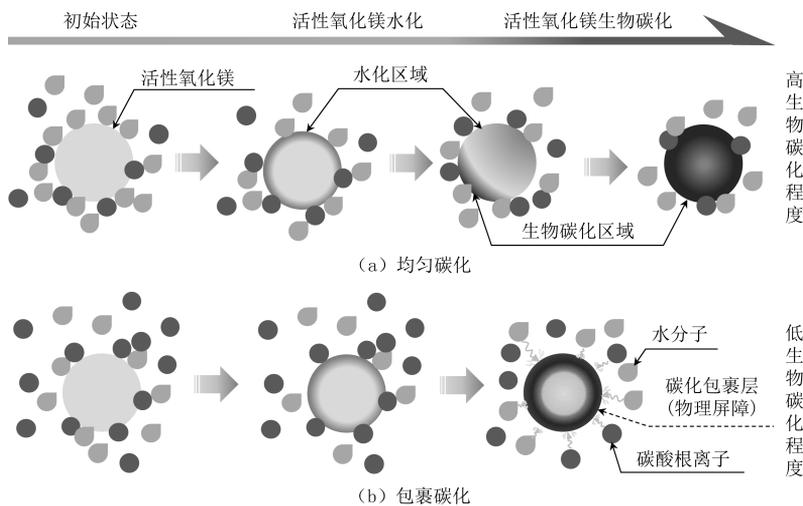


图 7 活性氧化镁的两种生物碳化模式

Fig.7 Two bio-carbonation patterns of reactive magnesia

和生物碳化(图 7(a)),促进更多的 HMCs 形成;而过高的碳酸根含量则会加速活性氧化镁的早期碳化,从而在颗粒表面快速形成碳化包裹层(图 7(b)).其存在能够在活性氧化镁颗粒表面形成物理屏障,阻碍活性氧化镁颗粒的水化溶解和颗粒内部生物碳化反应的发生,导致 HMCs 产量的降低,进而影响 HMCs 的胶结效果和生物碳化试样强度的提升<sup>[29-30]</sup>.此外,过高的碳酸根含量还会导致生成的 HMCs 晶体尺寸更小、结晶度更差,此时生成的 HMCs 难以在黏土颗粒间形成有效胶结,同样会导致试样强度的显著降低<sup>[21]</sup>.

### 3 结论

为实现软黏土的高效固化,提出了基于尿素预水解策略的生物碳化活性氧化镁技术.基于对比不同固化方式验证预水解策略促进土体高效固化的可行性,重点探究了预水解时间和尿素浓度对生物碳化试样固化性能的影响,并对影响固化效果的机理进行分析.得出主要结论如下:

(1) 尿素预水解策略可显著促进生物碳化活性氧化镁技术对软黏土的高效固化.经过 7d 养护后,生物碳化试样的强度可高达 966.40kPa,相较于未预水解试样提升了约 1.5 倍,甚至与养护龄期为 28d 的水泥固化试样的强度相当;

(2) 预水解时间的延长可促进尿素溶液中尿素利用率和尿素水解量的提升.但生物碳化试样的强度随着预水解时间的增大呈现出先升后降的趋势,预水解时间为 12h 时试样的无侧限抗压强度最高;

(3) 尿素浓度的增加会导致尿素水解率的降低和尿素水解量的增大.生物碳化试样的强度随尿素浓度的增加整体呈现出先增后减的趋势,最优尿素浓度为 2mol/L;

(4) 适当地增加尿素水解量能够通过产生更多的碳酸根促进活性氧化镁的生物碳化和 HMCs 的生成,进而提高生物碳化试样的强度;但过高的碳酸根含量反而会影响 HMCs 的胶结性能,导致试样强度下降.

### 参 考 文 献

- [1] 肖建庄,沈剑羽,高琦,等.工程弃土现状与资源化创新技术[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):1-13  
Xiao Jianzhuang, Shen Jianyu, Gao Qi, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 1-13
- [2] 朱伟,刘汉龙,高玉峰.工程废弃土的再生资源利用技术[J].再生资源研究,2001,(6):32-35  
Zhu Wei, Liu Hanlong, Gao Yufeng. The technology for recycling of engineering waste soil[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2001, (6): 32-35
- [3] 李建明,王志刚,王一峰,等.基于固体废弃物资源化利用的“无废城市”建设初探[J].中国水土保持,2019,(7):25-29  
Li Jianming, Wang Zhigang, Wang Yifeng, et al. A preliminary study on the construction of a "waste-free city" based on the resource utilization of solid wastes[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, (7): 25-29
- [4] 张毅,严柏杨,元永帅,等.自密实水泥土在地下工程回填中应用研究[J].河南科学,2021,39(1):98-104  
Zhang Yi, Yan Baiyang, Qi Yongshuai, et al. The application of self-compacting cemented soil for the foundation excavation backfill in underground construction[J]. Henan Science, 2021, 39(1): 98-104
- [5] 廖雄飞,王婧,张璟泓.工程弃土的陆域回填再利用技术[J].水运工程,2021,(7):185-191  
Liao Xiongfei, Wang Jing, Zhang Jinghong. Land backfill and reuse technology of engineering waste soil[J]. Port & Waterway Engineering, 2021, (7): 185-191
- [6] 易昕政,骆睿栋,高游,等.固化废弃软黏土强度特性及水稳定性研究[J].硅酸盐通报,2022,41(3):976-984  
Yi Xinzheng, Luo Ruidong, Gao You, et al. Research on strength behavior and water stability of solidified waste soft clay[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(3): 976-984

- [ 7 ] 马聪.饱和软土高效固化剂及固化土强度特性研究[D].上海:上海交通大学,2019  
Ma Cong.Investigation on the high-efficiency stabilizer for saturation soft clay and strength characteristics of stabilized clay[D].Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2019
- [ 8 ] Yang Y, Ruan S Q, Wu S F, et al.Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement[J].Acta Geotechnica, 2021,16:1113-1125
- [ 9 ] Zhang J, Li Y, Luo Y, et al.An experimental study of mitigating coastal dune erosion by using bio-carbonization of reactive magnesia cement[J].Marine Georesources & Geotechnology,2024,42(2):161-175
- [ 10 ] Dong Z H, Pan X H, Tang C S, et al.An efficient microbial sealing of rock weathering cracks using bio-carbonation of reactive magnesia cement[J].Construction and Building Materials,2023,366:130038
- [ 11 ] Wang D L, Tang C S, Pan X H, et al.Construction and demolition waste stabilization through a bio-carbonation of reactive magnesia cement for underwater engineering[J].Construction and Building Materials,2022,335:127458
- [ 12 ] 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+16  
Huang Tao, Fang Xiangwei, Zhang Wei, et al. Experimental study on solidified loess by microbes and reactive magnesium oxide[J].Rock and Soil Mechanics,2020,41(10):3300-3306+16
- [ 13 ] Wang R, Tang C S, Pan X H, et al.Stabilization of dredged sludge using bio-carbonation of reactive magnesia cement method[J].Acta Geotechnica,2023,18(3):1529-1541
- [ 14 ] 吴尚彬,贾苍琴,王贵和.微生物-活性氧化镁固化红黏土试验研究[J].人民长江,2022,53(8):167-172  
Wu Shangbin, Jia Cangqin, Wang Guihe. Experimental study on microbial-active magnesia solidified red clay[J]. Yangtze River,2022,53(8):167-172
- [ 15 ] 陈哲,方祥位,刘汉龙,等.氧化镁掺量对氧化镁微生物固化电解锰废渣影响研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增2):3687-3695  
Chen Zhe, Fang Xiangwei, Liu Hanlong, et al. Influence of MgO content on solidified electrolytic manganese residue with MgO and microbe[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(S2):3687-3695
- [ 16 ] Yan J C, Wu H X, Ding Y M, et al.Bio-carbonization of reactive magnesia for sandy soil solidification[J].Geomicrobiology Journal,2023,40(6):519-526
- [ 17 ] Dejong J T, Fritzes M B, Nusslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2006,132(11):1381-1392
- [ 18 ] 交通运输部.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communication Press,2020
- [ 19 ] Tang C S, Yin L Y, Jiang N J, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review[J]. Environmental Earth Sciences,2020,79:1-23
- [ 20 ] 谢约翰,唐朝生,尹黎阳,等.纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J].岩土工程学报,2019,41(4):675-682  
Xie Yuhan, Tang Chaosheng, Yin Liyang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(4):675-682
- [ 21 ] 王瑞,泮晓华,唐朝生,等.MICP联合纤维加筋改性钙质砂的动力特性研究[J].岩土力学,2022,43(10):2643-2654  
Wang Rui, Pan Xiaohua, Tang Chaosheng, et al. Dynamic behaviors of MICP and fiber-treated calcareous sand under dynamic triaxial testing[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(10):2643-2654
- [ 22 ] 工业和信息化部.轻烧氧化镁化学活性测定方法:YB/T 4019—2020[S].北京:金工业出版社,2020  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Determination of chemical activity of light calcined magnesia: YB/T 4019—2020[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2020
- [ 23 ] Wang R, Tang C S, Pan X H, et al. Efficient stabilization of dredged sludge with high water content using an improved bio-carbonation of reactive magnesia cement method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024
- [ 24 ] 住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press,2019
- [ 25 ] Wang D L, Tang C S, Pan X H, et al. A novel bio-carbonation method of reactive magnesia with urea pre-hydrolysis for geomaterial stabilisation[J]. Géotechnique,2023:1-15
- [ 26 ] Laidler K, Hoare J. The molecular kinetics of the urea-urease system. I. The kinetic laws[J]. Journal of the American Chemical Society,1949,71(8):2699-2702

- [27] Mitchell J K, Santamarina J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10):1222-1233
- [28] Peng E X, Hu X, Chou Y, et al. Study of microbially-induced carbonate precipitation for improving coarse-grained salty soil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365:132788
- [29] Hu L, Wang H, Xu P, et al. Biomineralization of hypersaline produced water using microbially induced calcite precipitation [J]. *Water Research*, 2021, 190:116753
- [30] Cui H Y, Hoang T, Chu J, et al. Pre-bio-carbonation method for using reactive MgO for rapid pavement repair and the carbonation mechanisms [J]. *Acta Geotechnica*, 2024:1-13
- [31] Dung N, Unluer C. Carbonated MgO concrete with improved performance: The influence of temperature and hydration agent on hydration, carbonation and strength gain [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 82:152-164
- [32] Dung N, Lesimple A, Hay R, et al. Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 125:105894
- [33] Dung N T, Hoang T, Yang E H, et al. New frontiers in sustainable cements: Improving the performance of carbonated reactive MgO concrete via microbial carbonation process [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356:129243

## Influence of Urea Pre-hydrolysis Strategy on Soft Clay Solidification by Microbes and Reactive Magnesia

LEI Guanghui<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2,3</sup>, WANG Shaodan<sup>1</sup>, WANG Haimeng<sup>4</sup>,  
LIU Yujia<sup>2</sup>, TANG Chaosheng<sup>2,3</sup>

(1. Xiamen R&B Baicheng Company Ltd., Xiamen 361000, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing University (Suzhou) High-tech Institute, Suzhou 215123, China; 4. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China)

### Abstract

Substantial quantities of engineering waste soils are generated due to the rapid infrastructure development in China. To alleviate this issue, bio-carbonation of reactive magnesia (r-MgO) technology, utilizing a urea pre-hydrolysis strategy, was employed to solidify soft clay for resource utilization. The effects of solidification methods, pre-hydrolysis duration ( $T$ ), and urea concentration ( $C$ ) on soil improvement were systematically investigated through unconfined compressive strength tests, pickling-drainage tests, dry density measurements, and water content assessments. The results show that: (1) The urea pre-hydrolysis strategy significantly enhances the solidification of soft clay, with the 7-day cured bio-carbonized sample exhibiting a 1.5-fold strength increase compared to samples without pre-hydrolysis, matching the strength of Portland cement-treated samples with 28-day curing. (2) Increases in both  $T$  and  $C$  promote urea hydrolysis and produce more carbonate ions for r-MgO bio-carbonation; however, the strength of bio-carbonized samples shows a change from rise to fall, with optimum  $T$  and  $C$  at 12 hours and 2mol/L, respectively. (3) A moderate increase in carbonate content produces more hydrated magnesium carbonates (HMCs) to improve the strength of bio-carbonized samples, while excessive carbonate content inhibits strength enhancement by negatively affecting the cementation performance of HMCs.

**Keywords:** soft clay; reactive magnesia; bio-carbonation; pre-hydrolysis; microbes; unconfined compressive strength