

DOI: 10.11779/CJGE201807018

微生物诱导碳酸镁沉淀试验研究

孙潇昊, 缪林昌*, 童天志, 王呈呈

(东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 碳酸镁和碳酸钙一样也具有胶结作用, 且镁矿强度远大于钙矿, 因此研究碳酸镁固化技术具有重要意义。本文测量了巴氏芽孢杆菌在培养过程中的吸光度和脲酶活性, 并计算得到单位脲酶活性; 研究了尿素、氯化钠、醋酸根、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度对脲酶活性的影响; 控制温度、pH值和离子浓度对比了钙和镁沉淀效率和不同温度不同尿素浓度下碳酸镁沉淀产率; 对比研究了碳酸钙和碳酸镁沉淀下砂土固化效果。结果表明, 48 h培养过程中, 吸光度和脲酶活性的增长都先缓慢后迅速增长再减小最后停止, 单位脲酶活性则是先增加后减小。适当增加尿素或 Mg^{2+} 浓度可增强细菌脲酶活性, 氯化钠和醋酸根浓度对酶活性无明显影响, Ca^{2+} 浓度对脲酶活性有明显抑制作用。同一温度、pH值和离子浓度条件下, 碳酸镁产率明显小于碳酸钙。而在菌液中添加尿素可促进碳酸镁沉淀生成, 且温度相同, 尿素浓度越高, 碳酸镁产率越大。菌液中添加尿素可使得碳酸镁固化砂土成型并具有一定强度, 因此, 该方法可解决砂土固化碳酸镁沉淀不足的问题, 为后续碳酸镁固化试验奠定基础。

关键词: 巴氏芽孢杆菌; 影响因素; 碳酸钙; 碳酸镁; 砂土固化

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)07-1309-07

作者简介: 孙潇昊(1993-), 男, 博士, 主要从事隧道地铁的研究工作。E-mail: sunxiao14hao@126.com。

Comparison between microbiologically-induced calcium carbonate precipitation and magnesium carbonate precipitation

SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, TONG Tian-zhi, WANG Cheng-cheng

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The magnesium carbonate has a cementing feature like calcium carbonate, and the strength of magnetite ore is much higher than that of calcium ore, so it is important to study the solidification technology of magnesium carbonate. The absorbance and urease activity of *Sporosarcina pasteurii* are measured in the cultural process, and the unit urease activity is calculated. The influences of various factors on the urease activity are studied. Some comparison tests on the precipitation efficiency between calcium carbonate and magnesium carbonate are conducted as well as the magnesium precipitation efficiency with various urea additions. The solidification tests on the calcium carbonate and magnesium carbonate are comparatively studied. The results show that during 48 h-culture period, the absorbance and urease activity curve both increase gradually and boom, then slow down and tend to be stable. The unit urease activity increases to the peak and then decreases. The increase of the urea concentration and magnesium ion can enhance the urease activity. The concentration of sodium chloride and acetate has little effect on it, and that of calcium ion has a significant inhibitory effect. Under the same condition, the yield of magnesium carbonate is significantly smaller than that of calcium carbonate. By adding urea to medium, the precipitation significantly increases. The higher the urea concentration, the more the magnesium carbonate gets. The sample with adding urea is solidified to own certain strength in the case of magnesium carbonate precipitation. Therefore, this method can solve the problem of insufficient magnesium precipitation and establish the foundation for the curing tests on magnesium carbonate in future.

Key words: *Sporosarcina pasteurii*; influence factor; calcium carbonate; magnesium carbonate; sand solidification

0 引言

微生物固化技术最早由 Whiffin^[1]提出, 该技术的核心是分解生成碳酸根离子并将其与金属阳离子结合从而生成具有胶结作用的矿物沉淀^[2]。由于碳酸钙沉

淀的应用非常广泛, 这些年生物矿化技术在不同的领

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578147, 51278099)

收稿日期: 2017-08-12

*通讯作者 (E-mail: lc.miao@seu.edu.cn)

域被大量研究^[3]。例如：利用微生物诱导碳酸钙可用于生物修复、无机污染物的固化、岩石或多孔材料裂缝的封堵等方面^[4]。

近年来, Jiang 等^[5]研究了不同温度和 pH 条件下微生物的脲酶活性。在砂土固化方面, Martinez 等^[6]对长 50 cm 的砂柱进行固化并研究固化的均匀性。而 Harkes 等^[7]则针对固化均匀性提出了相关工艺。由于生成的碳酸镁沉淀也具有胶凝性, 同时自然界镁矿的强度远大于钙矿。然而关于诱导碳酸镁沉淀固化砂土的研究几乎尚未有人涉及, 于是研究碳酸镁固化砂土从而提高强度对微生物固化技术有较大的意义。本文首先研究巴氏芽孢杆菌在培养过程中吸光度、脲酶活性和单位脲酶活性^[1, 8]的变化情况, 然后分析各因素对脲酶活性的影响; 再对比得到不同温度碳酸钙和碳酸镁沉淀效率和菌液中添加不同尿素浓度条件下碳酸镁沉淀产率; 最后利用醋酸钙和醋酸镁对砂土进行固化, 并对对比分析固化效果, 为后续沉积碳酸镁固化砂土试验奠定基础。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

砂土固化试验使用的菌种为巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*)。培养基主要成分为营养肉汤, 酵母浸膏。

1.2 试验方法

本文直接采用分光光度计 600 nm 波长测得的吸光度 OD_{600} 值来表示细菌浓度。当吸光度在 0.2~0.8 范围内, 通过公式^[9] $Y=8.59 \times 10^7 \cdot Z^{1.3627}$ 换算得到每毫升细胞浓度 Y , 其中 Z 为 OD_{600} 值; 超出此范围, 需稀释后再换算。

至于脲酶活性, 由于尿素水解量与溶液电导率变化量成正比, 可通过测量每分钟电导率变化来得到^[1]。因此于室温将 3 mL 待测细菌溶液与 27 mL 尿素溶液混合, 使用电导率仪监测 5 min 内电导率变化并计算得平均每分钟变化值。再将其换算成每分钟水解尿素量。因此本文用此值来表示脲酶活性, 单位为 $M \text{ urea hydrolysed}/\text{min}$ ^[1, 8]。

2 菌种生长和脲酶活性变化

将活化的菌种以 1% 接种到培养液中, 将其放入 30℃ 培养箱内连续培养 48 h (震荡频率为 100 rpm), 每隔 3h 利用分光光度计测量其 OD_{600} 值, 同时利用电导率仪检测菌液脲酶活性。以时间为横坐标, 菌种浓度 (OD_{600}) 和脲酶活性为纵坐标, 绘制曲线如图 1 所示。图 2 为单位脲酶活性变化情况。

如图 1 所示, 刚开始菌种数量增长都十分缓慢, 只有小部分细胞分裂, 处于延迟期。之后细菌生长进入对数期, 数量呈几何级数增长, 此阶段细胞新陈代谢作用强, 生长速度快。然后随着培养液中营养物质的消耗, 有害代谢产物的不断积累, 新增殖与死亡细菌都逐渐趋于相等并处于稳定期。因此, 一般选用 33~36 h 培养后的巴氏芽孢杆菌进行试验。脲酶活性曲线变化趋势大体和生长曲线一致, 随时间和细菌浓度的增大, 脲酶活性变大, 催化尿素水解的能力也逐渐增强。但图 2 中单位脲酶活性则一开始不断增强, 在 24 h 时出现峰值, 之后开始下降, 最后趋于稳定。因此可知 24 h 时细菌利用率最高。

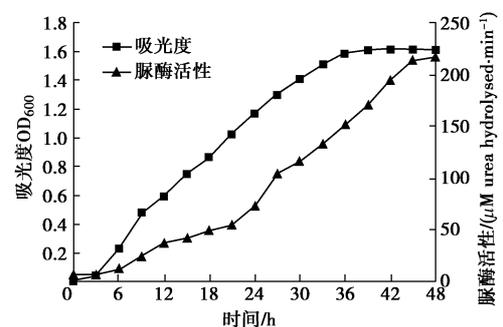


图 1 菌种生长曲线和脲酶活性曲线

Fig. 1 Growth curve of bacterium and curve of urease activity

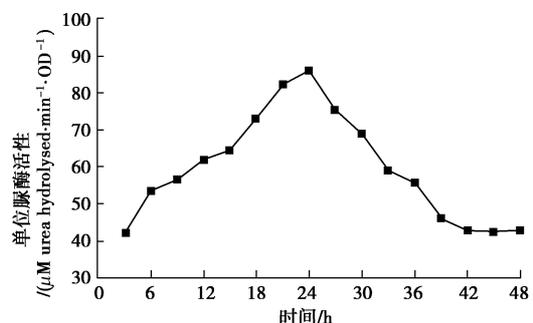


图 2 巴氏芽孢杆菌单位脲酶活性曲线

Fig. 2 Curve of unit urease activity

3 不同因素对脲酶活性的影响

3.1 尿素浓度

尿素作为 MICP 过程的重要原料, 是 MICP 作用的重要影响因素。研究表明, 尿素存在时可诱导细菌产生脲酶^[10]。为研究尿素浓度对脲酶活性的影响, 分别准备 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 M 的尿素溶液各 54 mL, 向其中加入 6 mL 菌液 (OD_{600} 分别为 0.6, 0.9, 1.2, 1.5) 后, 测定 30℃, pH 为 7 的条件下 5 min 内电导率变化值, 计算得到不同尿素浓度下细菌脲酶活性, 如图 3 所示。

随尿素浓度增加, 脲酶活性开始明显增加, 尤其在 0.2~0.6 M 之间。 OD_{600} 超过 1.2 的菌液的脲酶活

性增长速度快于较低浓度菌液。尿素浓度大于 0.6 M 时, 酶活性增长速度变缓。当 $OD_{600}=0.6$ 或 0.9 时, 在 0.8 M 左右出现不再增长甚至有下降的趋势, 其中 $OD_{600}=0.6$ 的菌液下降趋势相对明显。结果与赵茜^[8]得出的结论类似, 但酶活性的转折点稍有不同, 可能是由控制的温度 pH 值不同导致, 而 Whiffin^[1]则得出尿素对酶活性影响不明显的结论。因此, 试验时可适当增加尿素浓度来增强脲酶活性, 但不能过高。

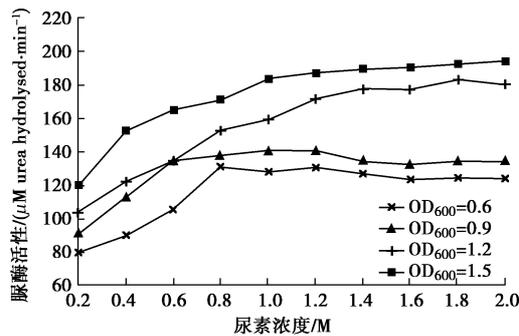


图 3 尿素浓度对脲酶活性的影响

Fig. 3 Effect of urea concentration on urease activity

3.2 氯化钠浓度

由于氯化钠是常用的盐类, 因此应研究氯化钠对脲酶活性的影响, 来判断加入氯化钠是否会影响到菌种。配制 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 M 的氯化钠和尿素混合液各 54 mL, 尿素浓度均为 0.5 M。向混合液中加入 6 mL 的细菌溶液 (OD_{600} 分别为 0.5, 1.0, 1.5), 同样测定 30°C 条件下 5 min 内电导率变化值, 计算得到不同氯化钠浓度下细菌脲酶活性的变化情况, 如图 4 所示。

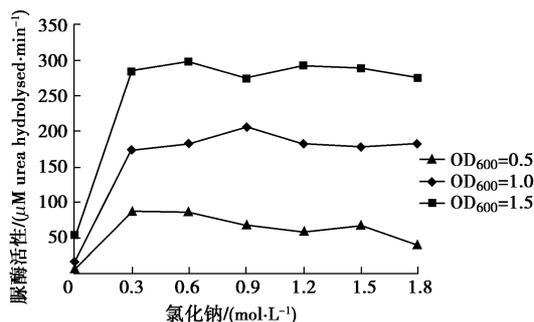


图 4 氯化钠浓度对脲酶活性的影响

Fig. 4 Effect of NaCl concentration on urease activity

图 4 中, 随着氯化钠浓度的增加, 细菌脲酶活性除了 0 mol/L 之外, 基本保持稳定, 因此可认为 NaCl 浓度对脲酶活性没有明显影响。由于 Na^+ 和 Cl^- 都是菌种培养液配置的常用离子, 该结论符合常见规律, 也是 Whiffin^[1]没有将其作为脲酶活性的影响因素之一的原由。至于不加氯化钠, 脲酶活性较小的现象, 分析其原因可能是因为加入少许氯化钠对脲酶活性具有

促进作用, 也可能是因为加入氯化钠使测得电导率增大了 1~2 个数量级, 导致计算的脲酶活性存在数量级差异, 不加氯化钠时结果太小。

3.3 醋酸根浓度

由于后续 MICP 反应需要用到醋酸钙和醋酸镁, 于是研究醋酸根对脲酶活性的影响, 采用与研究氯化钠浓度影响相同的方法配制醋酸钠溶液, 测定 5 min 内电导率变化, 脲酶活性变化见图 5。

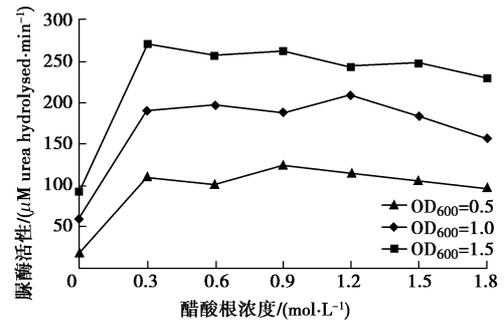


图 5 醋酸根离子浓度对脲酶活性的影响

Fig. 5 Effect of acetate concentration on urease activity

图 5 中, 除 0 mol/L 之外, 随醋酸根浓度增加, 细菌脲酶活性减小趋势平缓, 可认为保持稳定, 即醋酸根浓度对脲酶活性没有明显的作用。当浓度为 1.8 M 时, 3 种情况脲酶活性都稍有所减小, 可能是因为溶液中含盐量较大稍微抑制了菌种反应。因此实际应用中若醋酸根浓度不高, 可忽略其影响, 但浓度也不应太大。

3.4 Ca^{2+} 浓度

钙离子为 MICP 生成碳酸钙提供原料, 因此需研究钙离子浓度对脲酶活性的影响。同样的条件配制氯化钙和尿素混合液与菌液。由于反应体系中, Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 反应生成 $CaCO_3$ 沉淀会影响电导率, 因此不用测量电导率的方法计算脲酶活性, 而是利用 Berthelot 显色原理, 测定 5 min 的 NH_4^+-N 浓度。根据尿素水解反应式, 1 mol 尿素水解出 2 mol NH_4^+ , 同样可计算 5 min 内的脲酶活性。细菌脲酶活性随 Ca^{2+} 浓度变化见图 6。

图 6 中, 不同浓度的菌液, 随着 $CaCl_2$ 浓度的增加, 脲酶活性降低趋势明显, 几乎成线性下降, 因此高浓度 $CaCl_2$ 对脲酶有明显抑制作用。当 $CaCl_2$ 浓度为 1.2 M 时, 脲酶活性下降近三分之一, 当 $CaCl_2$ 浓度增大到 1.8 M 时, 脲酶活性几乎下降一半。由于 NaCl 对脲酶活性没有明显影响, 而 $CaCl_2$ 产生的抑制作用明显, 因此, 可推断是 Ca^{2+} 对酶活性有抑制作用。结论与 Whiffin^[1]、赵茜^[8]和张越^[11]得到的类似, 不同的是 Whiffin^[1]采用的是 $Ca(NO_3)_2$ 溶液, 赵茜^[8]提出 $CaCl_2$ 浓度为 1.0 M, 脲酶活性下降 35%, $CaCl_2$ 浓度增大到

2.0 M, 脲酶活性下降达 80%, 而张越^[11]则观察到钙盐浓度由 0.5 M 提高到 0.75 M 时, 脲酶活性有小幅度上升。因此试验时需要控制 Ca²⁺浓度, 否则碳酸钙沉淀非但没有增加反而受到抑制。

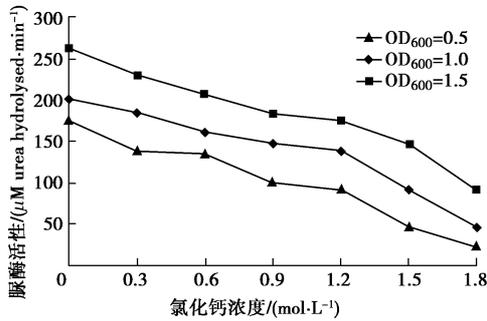


图 6 钙离子浓度对脲酶活性的影响

Fig. 6 Effect of Ca²⁺ concentration on urease activity

3.5 Mg²⁺浓度

镁离子为生成碳酸镁沉淀提供原料, 与研究 Ca²⁺浓度影响同样的方法研究 Mg²⁺浓度影响。细菌脲酶活性随 Mg²⁺浓度变化见图 7。

图 7 中, 不同菌液浓度条件下, 除了高浓度 MgCl₂对脲酶有明显抑制作用外, 随着 MgCl₂浓度的增加, 脲酶活性都有所增加。当菌液 OD₆₀₀ 为 1.5 时, 脲酶活性增加的更明显。因此, 可得出结论 Mg²⁺对脲酶活性有促进作用, 但当 MgCl₂浓度很高时, 脲酶明显受到抑制, 这可能是因为当浓度较高时, 一单位 Mg²⁺对于两单位 Cl⁻, 溶液中含盐量太大抑制了菌种反应。因此, 试验选取镁盐进行试验应控制其浓度适当。

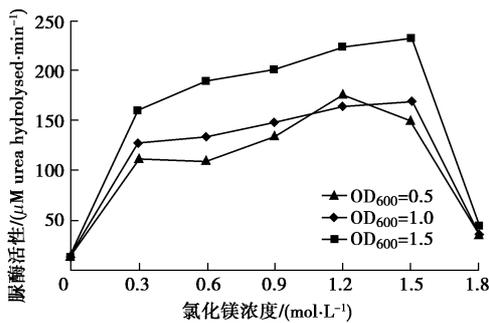


图 7 镁离子浓度对脲酶活性的影响

Fig. 7 Effect of Mg²⁺ concentration on urease activity

4 钙镁沉淀生成效率对比

4.1 温度的影响

控制不同的温度, 采用醋酸钙和醋酸镁作为两种生成沉淀的原料进行对比研究。控制 pH 值为 7, 醋酸钙、醋酸镁和尿素浓度均为 0.5 M, 菌液 OD₆₀₀ 为 1.01。将 5 mL 菌液加入 45 mL 混合液, 分别测量 2, 4, 6 d 后称量沉淀质量并计算产率, 如表 1 所示。

通过观察表 1 可知, 采用醋酸镁作为沉淀生成的

原料, 同等条件下, 碳酸镁的产率明显小于碳酸钙的产率, 特别是当温度 30℃, 碳酸钙产率高达 85.2%, 而碳酸镁的产率只有 37.3%。一个原因是碳酸镁和碳酸钙溶解度分别约为 1×10⁻²和 1×10⁻³, 两者相差一个数量级, 这也解释了第二天加入醋酸镁的试样几乎都观察不到沉淀的现象, 如图 8 所示。另一个原因是碳酸镁会发生少量水解, 生成氢氧化镁, 同物质的量的氢氧化镁质量明显小于碳酸钙。

表 1 不同温度碳酸钙和碳酸镁产率对比

Table 1 Production rates for calcium carbonate and magnesium carbonate with different temperatures

原料	时间/d	不同温度/%		
		20℃	25℃	30℃
醋酸钙	2	9.5	9.5	22.3
	4	11.8	12.3	23.6
	6	14.9	17.8	25.4
醋酸镁	2	—	—	—
	4	1.1	3.7	5.9
	6	7.3	11.2	13.3

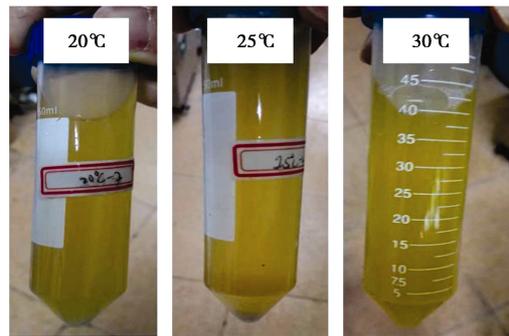


图 8 反应 2 d 不同温度下醋酸镁试样的沉淀情况

Fig. 8 Samples with magnesium acetate at different temperatures after reaction of 2 days

4.2 pH 值和离子浓度的影响

由上述可知, 不同温度条件下, 碳酸镁的产率明显小于碳酸钙的产率, 为防止其他特定条件获得不同对比结果, 对 pH 值和离子浓度进行控制。pH 值分别设置为 6, 7, 8, 9。由于 Ca²⁺和 Mg²⁺都是二价离子, 因此醋酸镁和醋酸钙浓度统一设置为 0.5, 1.0, 1.5 M。控制温度为 30℃, 尿素浓度均为 0.5 M, 菌液 OD₆₀₀ 为 1.23。采用同样的方法获得 6 d 后沉淀产率, 如表 2 所示。

通过表 2 可知, 不同条件下, 生成的碳酸钙沉淀都明显多于碳酸镁沉淀, 原因也是由于溶解度的差异。而当离子浓度相同时, pH 为 7 和 8 得到的碳酸钙和碳酸镁沉淀产率都明显大于另外两种情况。有所不同的是, 生成碳酸钙最适宜 pH 为 7, 与王瑞兴^[12]得到的结论 pH 为 8 有所不同, 而生成碳酸镁最适宜 pH 为 8。

当 pH 值相同时, 离子浓度为 1.5 M 产生的沉淀最多, 0.5 M 条件下最少。但需要注意的是, 当离子浓度为 1.0 M 和 1.5 M 时, 醋酸镁溶液无法完全溶解, 出现浑浊现象, 因此虽然沉淀较多, 但为碳酸镁和氢氧化镁混合物。因此后续沉淀试验均采用 pH 为 7, 离子浓度为 0.5 M。

表 2 不同 pH 值和离子浓度下钙镁沉淀产率对比

Table 2 Production rates for calcium and magnesium with different pH and ion concentrations

原料	PH 值	不同离子浓度/%		
		0.5 M	1 M	1.5 M
醋酸钙	6	22.1	28.1	35.7
	7	27.4	33.3	41.5
	8	26.3	32.9	40.4
	9	23.3	28.6	37.9
醋酸镁	6	11.2	20.5	27.0
	7	15.2	25.9	33.4
	8	17.4	27.3	36.5
	9	13.7	21.4	30.2

5 不同尿素添加量碳酸镁沉淀对比

微生物诱导碳酸镁沉淀主要目的是固化砂土, 但相比于碳酸钙沉淀, 碳酸镁沉淀量要小很多, 于是在菌种培养液中添加尿素, 使尿素先被分解出 CO_3^{2-} 再与 Mg^{2+} 结合生成沉淀, 即将生物沉淀转化为化学沉淀的方式来加快镁沉淀的生成。

通过控制不同尿素浓度, 以醋酸镁作为沉淀原料, 研究不同温度条件下沉淀产率。控制 pH 值为 7, 醋酸镁和尿素浓度均为 0.5 M。为控制菌液浓度这一影响因素, 保证和上述钙镁沉淀对比试验所用菌液浓度相近, 选用 OD_{600} 为 0.98 的菌液, 将 5 mL 菌液加入 45 mL 混合液, 分别测量 1, 2, 3 d 后称量沉淀质量并计算产率, 如表 3 所示。

表 3 不同尿素添加量碳酸镁产率对比

Table 3 Production rates of magnesium carbonate under various urea concentrations added

尿素浓度	时间/d	不同温度/%		
		20℃	25℃	30℃
0 g/L	2	—	—	—
	4	1.0	3.1	4.5
	6	6.3	11.8	12.2
10 g/L	2	9.4	10.1	17.4
	4	10.7	11.3	18.2
	6	12.6	14.5	27.5
20 g/L	2	12.3	14.5	19.9
	4	14.8	15.2	21.7
	6	17.6	19.1	28.4

通过观察表 3 可知, 当菌液中添加尿素, 随着菌种的生长繁殖, 尿素被分解生成 CO_3^{2-} , 此时将菌液加入混合液, 很快便生成大量镁沉淀, 因此, 不论尿素添加量是 10 g/L 还是 20 g/L, 第一天沉淀产率都有明显的提高。之后菌种继续将胶凝液中的尿素分解, 生成更多的沉淀物。当温度相同的情况下, 尿素添加量越大, 生成的沉淀越多。而且温度为 30℃ 产生的沉淀量明显最多。

通过试验得出, 通过在菌液中添加尿素的方法, 可以明显促进碳酸镁沉淀的生成。因此, 利用此方法进行砂土固化试验可解决碳酸镁沉淀量不足无法固化完全的问题。

6 碳酸钙和碳酸镁固化效果对比

试验砂土粒径小于 0.25 mm, 称量 210 g 砂土 (已在 110℃ 条件下烘干的不良级配江砂) 装入 PVC 管 (内径 46 mm, 外径 50 mm) 中, 砂样高度约为 11 cm, 即初始干密度约为 1.57 g/cm^3 。砂土固化试验采用两种胶凝液, 分别为醋酸钙和醋酸镁。采用醋酸钙是因为利用醋酸钙固化砂柱可以得到相比于氯化钙和硝酸钙更高的均匀性^[13]。

每种情况又分为培养液灭菌后添加尿素 (20 g/L) 和不加尿素两种。试验温度为 30℃, 菌液和胶凝液控制 pH 值为 7。

将培养 48 h 的菌液以 4 mL/min 的速度灌入 PVC 管, 直至流出明显菌液为止。静置 2 h 后, 控制 4 mL/min 的流速灌入 150 mL 胶凝液 (各 0.5 mol/L 尿素与醋酸钙/醋酸镁的混合液), 之后静置约 20 h 进行下一个循环操作。每天按上述步骤循环 1 次, 同时采用正反向灌注的方式进行双向固化, 固化 10 d 后完成固化。然后对砂柱进行无侧限抗压试验, 如图 9 所示, 得到的强度如表 4 所示。

通过对比表 4 发现, 在醋酸镁固化试验中, 菌种培养液中添加尿素可以使得砂土固化成型并具有一定的强度, 如图 10 所示, 且比两种情况下醋酸钙固化砂柱的强度都略高。而未添加尿素的醋酸镁固化砂土试样由于沉淀量较少, 砂土无法固化完整, 出现断节现象, 如图 11 所示。但需要注意的是, 不加尿素时, 醋酸钙试样强度反而高于添加尿素的试样, 这是因为试样长度较长且试样孔隙较小, 在双向灌注的情况下, 大量的固化反应发生在试样两端, 使得两端固化明显。而离两端距离较远的中间部分, 固化反应明显减小, 因此整体强度较小。但砂柱两端的强度明显高于中间部分, 同样证实了添加尿素的方法可以促进砂土固化。



图9 砂土固化示意图

Fig. 9 Sand solidification tests

表4 试样的无侧限抗压强度

Table 4 Unconfined compressive strengths of samples

试样	尿素添加方式	胶凝液	无侧限抗压强度/MPa
1	添加尿素	醋酸钙	0.32
2	不加尿素	醋酸钙	0.58
3	添加尿素	醋酸镁	0.65
4	不加尿素	醋酸镁	—



图10 钙镁固化砂柱

Fig. 10 Samples with magnesium carbonate and calcium carbonate precipitation



图11 试样4 固化情况

Fig. 11 Sample No. 4 without adding urea

因此采用微生物诱导镁沉淀固化砂土在添加尿素的情况下具有可行性,且强度略大于碳酸钙固化的情况,至于不同尿素浓度对镁沉淀固化砂土效果的影响有待下一步研究。

7 结 论

本文分析了各因素对脲酶活性的影响,并对比研究了碳酸钙和碳酸镁沉淀生成速率和砂土固化效果,

为后续研究提供重要参考,并得到以下4点结论。

(1) 适当增加尿素浓度和 Mg^{2+} 浓度可增强细菌脲酶活性,但浓度不应过高。氯化钠浓度和醋酸根离子浓度对脲酶活性都没有明显影响。 Ca^{2+} 浓度对脲酶活性有明显抑制作用。

(2) 温度、pH 值和离子浓度都相同条件下,碳酸镁沉淀产率明显小于碳酸钙。温度越高,钙和镁沉淀产率都越大,pH 值为 7 和 8 得到的两种沉淀产率较大,且离子浓度越高沉淀最多。离子浓度为 1.0, 1.5 M 时,沉淀可能为碳酸镁和氢氧化镁混合物。因此后续沉淀试验均采用 pH 值为 7,离子浓度为 0.5 M。

(3) 通过在菌液中添加尿素的方法,可以明显促进沉淀的生成,且同一温度、pH 值和离子浓度条件下,添加尿素浓度越高,碳酸镁的产率越大。

(4) 菌种培养液中添加尿素可以使得碳酸镁固化砂土成型并具有一定的强度,且略大于碳酸钙固化的情况。因此,添加尿素的方法可解决砂土固化试验碳酸镁沉淀量不足无法固化完全的问题。

参考文献:

- [1] WHIFFIN V S. Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [2] DEJONG J T, FRITZGES 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.
- [3] WIJNGAARDEN W, VERMOLEN F, MEURS G, et al. Modelling biogrout: a new ground improvement method based on microbial-induced carbonate precipitation[J]. Transp. Porous Media, 2011, 87(2): 397 - 420.
- [4] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3225 - 3260+3239. (SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, TONG Tian-zhi, et al. Sand solidification test based on microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3225 - 3260+3239. (in Chinese))
- [5] JIANG N J, YOSHIOKA H, YAMAMOTO K, et al. Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: implication for subsurface sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP)[J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 96 - 104.
- [6] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al.

- Experimental optimization of microbially-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. *Geotech Geoenviron Eng*, 2013, **139**(4): 587 - 598.
- [7] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 112 - 117.
- [8] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. (ZHAO Qian. Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation (MICP)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese))
- [9] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms[J]. *ACI Mater*, 2001, **98**: 3 - 9.
- [10] FRIEDRICH B, MAGASANIK B. Utilization of arginine by *Klebsiella aerogenes*[J]. *Journal of Bacteriology*, 1978, **133**(2): 680 - 685.
- [11] 张越. 微生物用于砂土胶凝和混凝土裂缝修复的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. (ZHANG Yue. Research on sand cementation and concrete cracks repairment by microbially induced carbonate precipitation technology[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese))
- [12] 王瑞兴. 碳酸盐矿化菌研究[D]. 南京: 东南大学, 2005. (WANG rui-xing. Study on carbonate-mineralization microbe[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese))
- [13] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, **77**: 160 - 167.
-

本期广告索引

- 封2 北京理正软件股份有限公司
封3 重庆地质仪器厂
封4 南瑞集团水利水电技术分公司