

基于 MICP 技术的深海天然气水合物储层加固初探

杨建宇¹ 王誉泽^{1,2*}

1 南方科技大学海洋科学与工程系 深圳 518000; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州) 深圳 518000

1 引言

天然气水合物具有储存含量高、分布范围广、能量密度高及燃烧清洁等优点,是极具潜力的新型清洁能源。已有勘探结果表明^[1]:全球天然气水合物资源量约为 $21 \times 10^{15} \text{m}^3$,为含碳化合物资源量的两倍,其中 95%的天然气水合物资源储存于深海区域(300–3000 m)。在我国,海域天然气水合物主要赋存于南海,水合物储层类型为泥质粉砂储层。该储层具有颗粒细、泥质含量高、强度低、渗透性差等特点,属于目前开发难度较高的水合物储层类型之一。在天然气水合物开发过程中,随着水合物饱和度降低,一方面水合物固相质量减少会降低储层颗粒间的胶结作用,另一方面水合物分解产生的大量水和甲烷气,增加孔隙压力,导致水合物储层骨架强度劣化;同时,分解产生的气液两相流会在生产压差作用下在储层孔隙中运移,并携带大量储层土颗粒,导致渗流通道扩大,产生土体侵蚀,在开采过程中易产生开采蚀空区和井筒出砂等问题。

现有天然气水合物储层加固方式主要为水泥注浆护壁法,即通过侧钻的方式向水合物储层中钻出多个小井眼,通过小井眼注入水泥浆,利用水泥固化后形成的水泥桩基加固水合物储层,但这种方法仍存在一些不足。一方面水泥固化过程释放热量,易对天然气水合物的稳定性造成影响^[2];另一方面,水泥浆固化严重降低水合物储层的渗透性,需补充成本较高的后续增产措施才可继续进行水合物的顺利开采。

近年来微生物诱导碳酸钙沉淀技术逐渐应用于土体加固,其中最常用的为脲酶微生物诱导碳酸盐矿化。已有研究表明^[3],微生物矿化技术可提高土体无侧限抗压强度、刚度和弹性模量;同时微生物矿化可用于防治土体侵蚀,具有降低储层出砂的潜力。因此,本文对基于微生物矿化技术天然气水合物储层改性研究进行初步探索,探究天然气水合物储层温度、压力及氧气条件下微生物矿化的适用性,研究微生物矿化晶体特性及储层孔隙度降低规律。

2 实验方法与原理

本文通过微计算机断层扫描技术(Micro-CT)观测小型砂柱,试验选用中国 ISO 标准砂($\text{SiO}_2 > 96\%$)。通过筛分的方法获得 0.075–0.1mm 及 0.1–0.25mm 粒径的砂土颗粒,本文通过将两种粒径的砂颗粒等比例混合,获得用于模拟深海砂质沉积物的砂土模型。实验采用的脲酶微生物取自中国南海沉积物,经平板分离、培养、提纯以及 PCR 测序,确定该微生物为巴氏芽孢杆菌,培养基为 ATCC-1376 $\text{NH}_4\text{-YE}$ 琼脂培养基。人工海水配方采用 Martin^[4]研究中配方,胶结液配方采用 WANG 等^[3]研究中配方。实验方案如表 1 所示。

表 1 各组实验条件总结

样品	温度/°C	压力/MPa	氧气	盐度
1	12	8	少氧	人工海水
2	12	0.1	少氧	人工海水
3	12	0.1	少氧	去离子水
4	12	0.1	有氧	人工海水

通过对 Micro-CT 扫描数据进行试样重构,并利用图像处理和阈值分割可获得试样横截面二维反向灰度(图 1)及二值化图(图 2),本文在样品纵向方向等距选取五个层面进行对比分析,层面选取方

式如图 1 所示，并利用 ImageJ 计算对应层面孔隙度及碳酸钙含量分布。

$$\frac{V_{c100\%}}{V_c} = \frac{0.5 \times IN \times 100}{2.71} \times 100\%$$

式中， V_c 为生成碳酸钙晶体总体积， $V_{c100\%}$ 为假设注入胶结液中 Ca^{2+} 为完全反应应该生成的碳酸钙总量， V_v 为孔隙体积， IN 为胶结液注入次数。

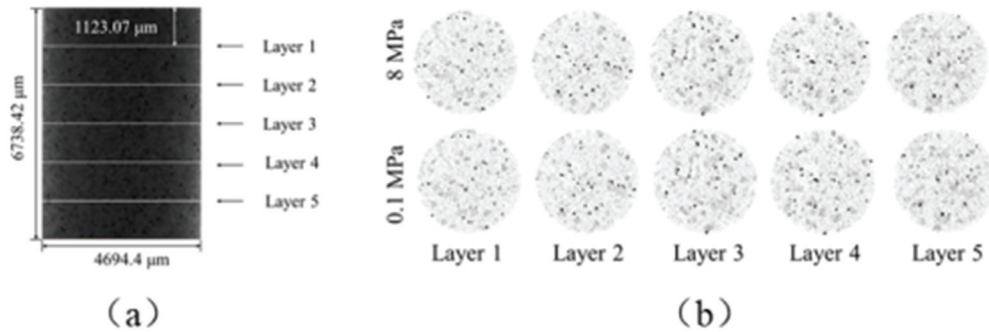


图 1 截面分布图及反向灰度图 (a) 各截面分布 (b) 反向灰度

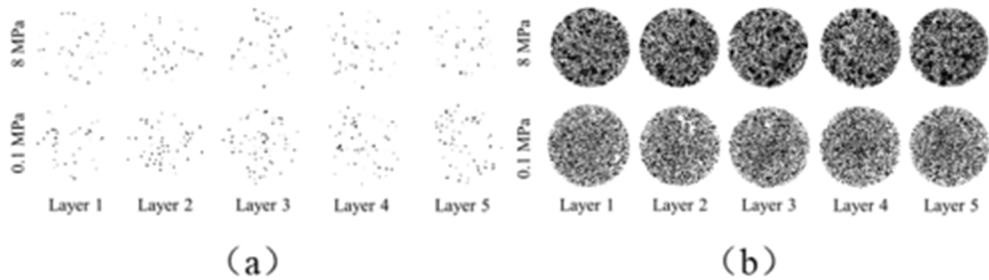


图 2 各截面二值化分布图 (a) 碳酸钙分布 (b) 孔隙分布

3 实验结果

为探究压力对微生物矿化生成碳酸钙晶体的影响，对比六次胶结液注入完成后试样 1、2 的矿化结果（图 3）可知，8 MPa 条件相比常压（0.1 MPa）条件生成的碳酸钙晶体个数减少（图 3a），孔隙占比降低 2.57% - 5.05%（图 3b）。该结果表明，高压会抑制巴氏芽孢杆菌生成碳酸钙晶体，但仍可形成相对较多的碳酸钙晶体，有助于实现海床及水合物储层强度的提高。

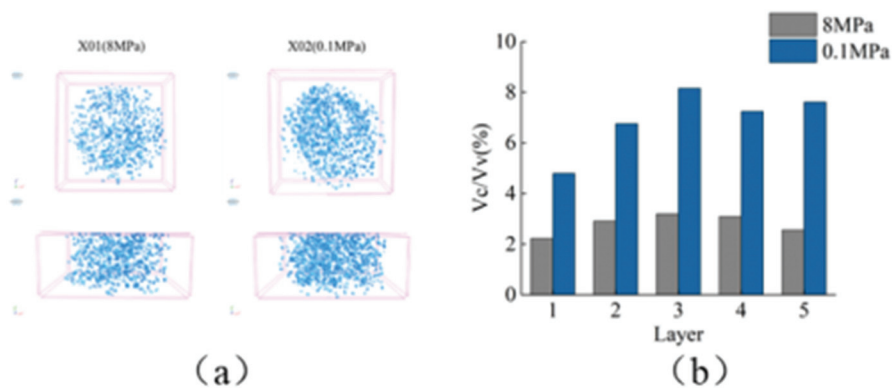


图 3 压力组碳酸钙量化图 (a) 碳酸钙分布 (b) 碳酸钙孔隙占比

为探究海洋环境盐分对微生物矿化生成碳酸钙晶体的影响，对比六次胶结液注入完成后试样 2、3 的矿化结果（图 4）可知，盐度对巴氏芽孢杆菌生成碳酸钙晶体的总量有重要影响，不含人工海水的砂柱中，碳酸钙生成晶体个数和总量显然更多。

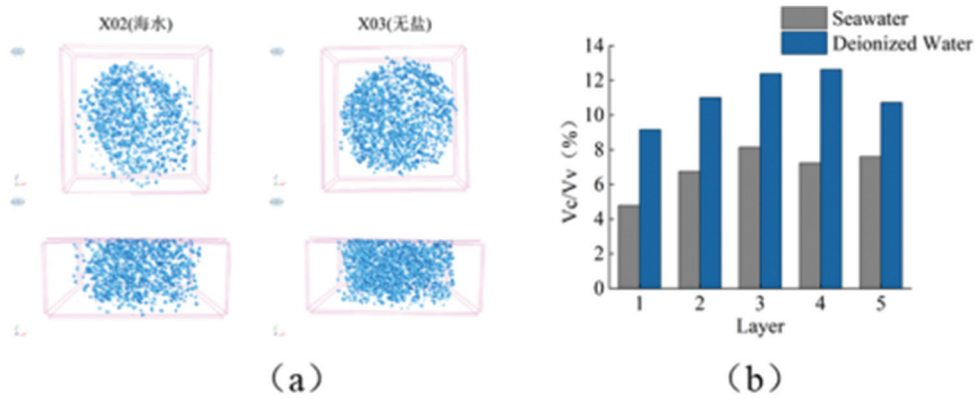


图4 盐度组碳酸钙量化图 (a) 碳酸钙分布 (b) 碳酸钙孔隙占比

为探究海洋环境氧气的引入对微生物矿化生成碳酸钙晶体的影响, 对比六次胶结液注入完成后试样 2、4 的矿化结果 (图 5) 可知, 有氧条件下, 经过微生物矿化处理后生成的碳酸钙晶体个数和总数更多, 这表明少氧条件会抑制碳酸钙晶体的生成。

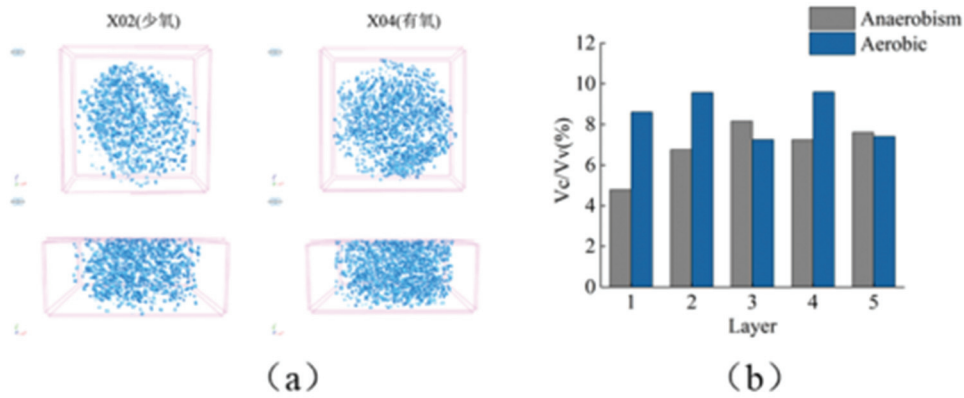


图5 氧气组碳酸钙量化图 (a) 碳酸钙分布 (b) 碳酸钙孔隙占比

对不同实验条件下试样各截面进行统计, 可获得微生物矿化前后试样平均孔隙度, 如图 6 所示。可见, 各试样初始孔隙度在 40%上下波动, 经过微生物矿化处理后, 各组实验条件下试样孔隙度均有不同程度的降低, 平均孔隙度降低幅度范围从 1.18%-3.28%不等, 这表明微生物矿化技术处理前后, 储层初始孔隙度几乎不发生改变。

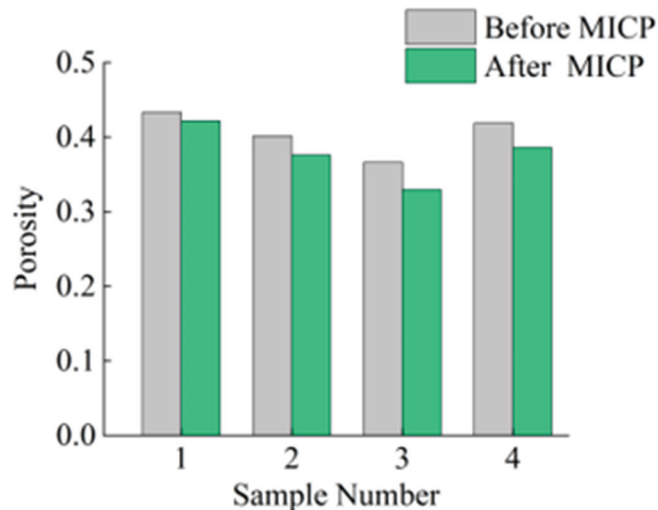


图6 不同实验条件下试样平均孔隙度对比

4 结论

本文对微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固天然气水合物储层进行初步探索,研究不同压力、温度及氧气环境下微生物矿化的碳酸钙晶体生长及其对储层孔隙度的影响,可得以下结论。

(1) 海洋中高压、盐分及少氧环境会抑制巴氏芽孢杆菌活性,导致微生物矿化生成碳酸钙效率和总量降低,但仍可生成较为可观数量和体积的碳酸钙,证明海洋天然气水合物储层环境下微生物矿化仍具有较好的适用性;

(2) 微生物矿化加固储层可近似维持储层初始孔隙度。微生物矿化加固后各组实验试样平均孔隙度降低幅度范围从 1.18%–3.28%不等,相较于初始孔隙度可以近似忽略。

(3) 微生物矿化技术加固天然气水合物储层是一种切实可行的新型天然气水合物储层加固方法。

参考文献

[1] Kvenvolden K A . Methane hydrate — A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?[J]. Chemical Geology, 1988, 71(1-3):41-51.

[2] 刘天乐,等. 固井水泥浆侵入对近井壁水合物稳定的不利影响[J]. 石油学报, 2018, 039(008):937-946.

[3] Wang Y. Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation: from micro to macro scale[D]. University of Cambridge, 2019.

[4] Könneke M, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon[J]. Nature, 2005, 437(7058): 543-54