

海水基微生物钻井液微生物菌种优选实验研究

黄艳艳^{1,2}, 杜泽华^{1,2}, 李之军^{1,2*}, 王 胜^{1,2}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:在海域天然气水合物钻采过程中,受沉积物胶结程度与水合物稳定影响的储层井壁失稳问题严重制约了钻井安全与效率。研发一种兼具增强储层胶结强度和抑制水合物分解与再生特性的新型海水基钻井液体系是保障井壁稳定并实现高效钻井的关键。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术为解决该问题提供了可资借鉴的新途径,而微生物种类作为MICP过程的关键因素,其在海水基钻井液中的生长情况,将直接影响固壁效果。因此,本文通过实验探究了在30、20、10、4℃的温度条件下,巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌两种微生物在海水中的生长规律,筛选出适合构建海水基微生物钻井液体系的微生物菌种。结果表明:在海水中,巴氏芽孢杆菌产出脲酶的活性均远高于巨大芽孢杆菌,48 h内菌种浓度(OD_{600})为0.583~0.926,脲酶活性可达0.77~0.88 mmol/min,对数生长期更短,最大生长速率更高,稳定期更长,故以巴氏芽孢杆菌作为海水基微生物钻井液体系的优选菌种。

关键词:海域天然气水合物;海水基钻井液;MICP技术;巴氏芽孢杆菌;巨大芽孢杆菌;生长规律

中图分类号:TE254;P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0151-06

Experimental study on the selection of microbial strains for seawater-based drilling fluids

HUANG Yanyan^{1,2}, DU Zehua^{1,2}, LI Zhijun^{1,2*}, WANG Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: During the drilling and extraction of gas hydrates in marine areas, the problem of reservoir wellbore instability caused by the degree of sediment cementation and the stability of hydrates severely restricts the safety and efficiency of drilling. Developing a new type of seawater-based drilling fluid system that can enhance the cementation strength of the reservoir and inhibit the decomposition and regeneration of hydrates is the key to ensuring wellbore stability and achieving efficient drilling. The microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology provides a new reference for solving this problem, and the type of microorganisms as a key factor in the MICP process, their growth conditions in seawater-based drilling fluids will directly affect the wellbore stability. Therefore, through experiments in this paper, the growth patterns of two types of microorganisms, *Bacillus pasteurii* and *Bacillus megaterium*, in seawater at temperatures of 30, 20, 10, and 4℃ were investigated. Microbial strains suitable for constructing a seawater-based microbial drilling fluid system were selected. The results show that in seawater, the urease activity produced by *Bacillus pasteurii* is much higher than that of *Bacillus megaterium*. The bacterial concentration (OD_{600}) within 48 hours is 0.583~0.926, and the urease activity can reach 0.77~0.88 mmol/min. The logarithmic growth

收稿日期:2025-05-29; 修回日期:2025-07-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.023

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备”(编号:2024ZD1003100)

第一作者:黄艳艳,女,汉族,1999年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为微生物钻井液技术,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,1225802618@qq.com。

通信作者:李之军,男,汉族,1984年生,副教授,地质工程专业,博士,从事岩土钻掘工程科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,lizhijun2014@cdut.edu.cn。

引用格式:黄艳艳,杜泽华,李之军,等.海水基微生物钻井液微生物菌种优选实验研究[J].钻探工程,2025,52(S1):151-156.

HUANG Yanyan, DU Zehua, LI Zhijun, et al. Experimental study on the selection of microbial strains for seawater-based drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):151-156.

period is shorter, the maximum growth rate is higher, and the stable period is longer. Therefore, *Bacillus pasteurii* is selected as the preferred strain for the seawater-based microbial drilling fluid system.

Key words: marine gas hydrate; seawater-based drilling fluid; MICP technology; *Bacillus pasteurii*; *Bacillus megaterium*; growth pattern

0 引言

天然气水合物是由水和甲烷等气体在高压、低温条件下形成的一种外表类似冰状的固体^[1],因具有储气密度高、碳排放低等特点,被视为清洁高效的能源和化工原料,广泛分布在陆地的冻土区域和海底沉积物中^[2-5]。据统计,全球天然气水合物储量为 $2.8 \times 10^{15} \sim 8 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ^[6],其中90%以上分布在海底沉积物中,是地球上最丰富的天然气藏之一^[7]。我国天然气水合物总储量高达 $8.4 \times 10^{13} \text{ m}^3$,其中近海天然气水合物主要集中在南海和东海,其储量相当于 $7 \times 10^{10} \text{ t}$ 石油^[8]。海域天然气水合物的开采方法包括降压法、热刺激法、抑制剂法、 CO_2 置换法和联合开采法等,其中,降压法是目前海域天然气水合物最常使用的开采方法^[9-10]。但大部分海域天然气水合物分布在水深800 m以深、海底以下400 m的黏土质粉砂或淤泥质沉积物中,温度低,储层未成岩,沉积物胶结程度差,地层渗透率低,依赖固体形态的天然气水合物发挥胶结和承压作用^[11-12]。其中,南海海域天然气水合物储层主要由黏土矿物与细粉砂组成,沉积物颗粒直径为 $7.89 \sim 25.76 \mu\text{m}$,渗透率为 $2.38 \sim 6.8 \text{ mD}$ ^[13-14]。因此,在使用降压法开采海域天然气水合物时,井壁围岩内部分水合物会发生分解^[15],引起地层压力升高,破坏原有储层的应力状态,极易发生出砂现象,诱发缩径、坍塌等井壁失稳问题^[16-18]。鉴于此,研发具有胶结储层沉积物、提高井壁围岩强度作用的新型钻井液体系,是解决海域天然气水合物钻采过程中井壁失稳问题的重要途径。

近年来,基于微生物矿化的微生物诱导碳酸钙沉淀技术(Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation, MICP)成为国内外热门研究对象,其核心是通过硫酸盐还原、反硝化作用、尿素水解等途径生成具有胶结作用的碳酸钙沉淀,进而改善土体强度、渗透性及抗液化性能。其中,基于尿素水解机制的固化方法反应过程易于控制,固化效率高,与其他碳酸钙生成途径相比更具优势^[19],被广泛应用于土体固化、降渗、修复裂缝等领域。MICP

技术为解决天然气水合物储层井壁稳定性问题提供了可资借鉴的有效路径,但受菌液及胶结液的性质、pH值、温度等因素对MICP过程的影响,以及周围环境和细菌本身对尿素水解菌的调控作用,导致矿化过程所产生的碳酸钙晶型、生成量、分布因其发生改变,进而影响碳酸钙对岩土体的胶结作用。不同类型的菌种因自身代谢特性差异,使得相同条件下各菌种的尿素水解速率存在一定差别,进而导致碳酸钙产出量有所不同^[20]。而温度作为影响MICP过程的重要因素,与微生物的生长繁殖和碳酸钙沉淀过程存在显著关联^[21-22]。当温度升高时,微生物生长繁殖速率加快,脲酶活性升高,但温度过高时,微生物自身会受到破坏;温度下降时,微生物的生长繁殖受限,甚至进入休眠,脲酶活性下降,从而显著影响微生物对土壤力学性能的改良效果^[23-24]。因此,探究不同微生物菌种在不同温度的海水中的生长特征,筛选出适应海水环境的微生物菌种,是将MICP技术用于解决海域天然气水合物钻采井壁失稳首先要解决的问题。

以尿素水解为途径的MICP主要依赖球形芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌及巴氏芽孢杆菌等尿素水解菌新陈代谢活动所分泌的脲酶来控制与催化反应过程^[25-26],故本文考虑以产酶能力高、环境适应性强的巴氏芽孢杆菌^[27-28]与可在低温环境中生长繁殖的巨大芽孢杆菌^[29]两种能适应淡水到各种浓度海水的尿素水解菌^[30]为实验菌种,研究在30、20、10、4℃的温度条件下,巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌在海水中的生长特征与规律,优选出更适用于构建海水基微生物钻井液体系的微生物菌种。

1 实验材料与方法

1.1 材料

本研究选用的微生物为北京百欧博伟生物有限公司生产的巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌,编号为ATCC-11859和ATCC-14581,实验所用其他材料为:去离子水、海水、酪蛋白胨、大豆蛋白胨、氯化钠、尿素、氢氧化钠和氯化钙。

1.2 实验方法

1.2.1 微生物的扩大培养

实验所购巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌均为已复苏的培养物,可在扩大培养后直接使用,二者培养方法一致。按表 1 中的配比配制巴氏芽孢杆菌与巨大芽孢杆菌的液体培养基,并用氢氧化钠溶液调节其 pH 至 7.3,封口。将配制好的培养基放入高压蒸汽灭菌锅中,在 121 ℃、0.1 MPa 条件下高温灭菌 20 min,后置于无菌操作台中冷却至室温。

表 1 不同菌种液体培养基组成	
菌种类别	培养基组成
巴氏芽孢杆菌	1 L 海水/去离子水,5 g 大豆蛋白胨,15 g 酪蛋白胨,5 g 氯化钠,20 g 尿素
巨大芽孢杆菌	1 L 海水/去离子水,15 g LB 培养基,20 g 尿素

用无菌移液枪将菌液全部吸出,按体积比 1:10 接种至装有液体培养基的锥形瓶中,用封口膜封口,然后放入 ZQZY-AS8ES 型振荡培养箱中,在 30 ℃、120 r/min 条件下培养 24 h。培养结束后,观察到液体明显浑浊,则说明培养成功。

将上述培养的菌液置于高速离心机中,在 20 ℃、8000 r/min 条件下离心 30 min,弃去上清液后加入新液体培养基,重复离心 1~2 次。随后,使用无菌移液枪吸取菌体,接种至装有新培养基的锥形瓶中,并用封口膜密封瓶口。重复上述培养操作,培养结束后,若观察到培养基明显浑浊,表明扩大培养成功。

1.2.2 菌种浓度及脲酶活性检测

菌种浓度的检测通常使用比浊法,每隔 4 h 取 5 mL 菌液于比色皿中,并放入分光光度计,通过测量 600nm 时的吸光度(OD₆₀₀)来测定菌种数量。本文使用 UV2000 型分光光度仪进行菌种浓度检测,并以 OD₆₀₀ 值来表示菌体浓度。

根据 Whiffin^[31] 所得试验结论,1 mS/min 的电导率变化等同于 11 mmol/min 的尿素分解量,将平均每分钟电导率变化值(mS/min)换算成单位时间脲酶水解的尿素量,再乘以稀释倍数,可得到待测菌液每分钟水解的尿素量(mmol/min),即菌液脲酶活性,计算公式:

每分钟尿素水解量 = 电导率变化值 × 11 ×
稀释倍数/5

(1)

在室温条件下,按体积比 1:9 将菌液与 1.6 mol/L 的尿素溶液混合均匀,使用电导率仪测量 5 min 内混合溶液的电导率变化值,通过公式换算每分钟水解尿素量来表示菌液脲酶活性。

2 实验结果与讨论

2.1 微生物在去离子水液体培养基中的生长状况

根据每 4 h 取样测得的微生物菌种浓度与脲酶活性数值绘制巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌的生长曲线,如图 1 所示。

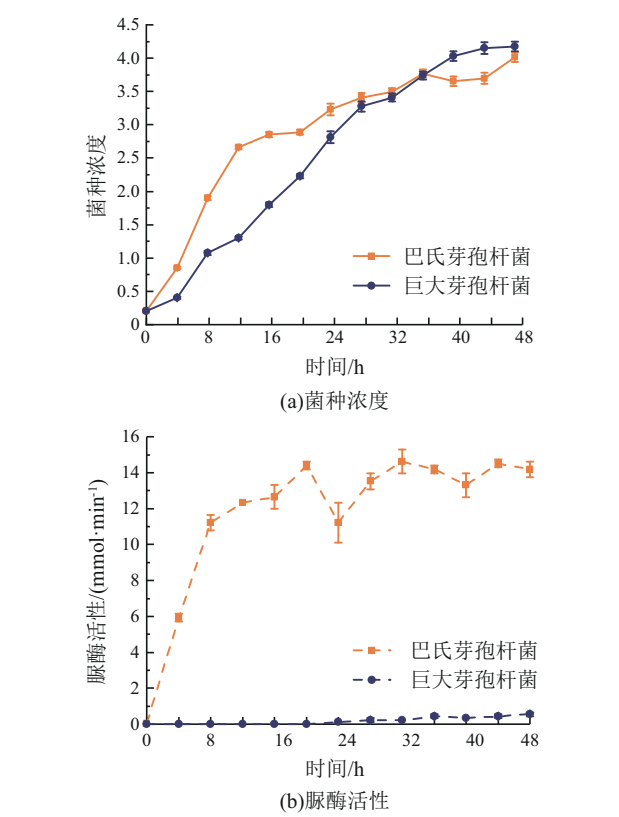


图 1 微生物在去离子水中 48 h 生长曲线

微生物的生长可以分为延滞期、对数期、稳定期以及衰亡期。在去离子水液体培养基中,巴氏芽孢杆菌延滞期极短(≤4 h)或无明显延滞期。4~12 h 内,巴氏芽孢杆菌进入对数生长期,呈现快速增殖态势,菌种浓度与脲酶活性显著提升,生长速率达到峰值,此时新陈代谢最为活跃。12 h 后,受营养消耗与有害物质积累影响,生长速率减缓,菌种浓度增幅下降,脲酶活性趋于稳定,进入稳定生长期,且在 48 h 内未观测到衰亡期。

巨大芽孢杆菌同样无明显延滞期或延滞期很

短。4~40 h内,巨大芽孢杆菌进入对数生长期,繁殖速率显著提升,菌种浓度呈指数增长,脲酶活性增强,新陈代谢及生长速率均达到峰值。40 h后进入生长稳定期,生长速率趋于0,微生物数量变化不大,脲酶活性处于最高水平,且在48 h内同样未观测到衰亡期。

在30℃液体培养基中,两种菌液的脲酶活性变化与菌种浓度变化在整体上呈线性正相关,但巨大芽孢杆菌的脲酶活性出现时间晚于巴氏芽孢杆菌,巴氏芽孢杆菌呈现对数期短、最大生长速率高、稳定期长等特点。48 h时,二者菌种浓度相近(OD_{600} 值4.0~4.5),而脲酶活性差异显著,巴氏芽孢杆菌脲酶活性(14 mmol/min)约为巨大芽孢杆菌(0.66 mmol/min)的21倍。

2.2 微生物在不同温度海水中的生长状况

研究表明,微生物对温度具有显著的敏感性,且每一种与酶相关的机制都高度依赖于其所处的环境温度^[32]。当温度为30~35℃时,微生物活性较高,但若温度高于40℃,尿素分解菌则可能会死亡,而当温度低于10℃时,其生长将受到抑制或阻碍,导致脲酶活性降低^[33-36]。由于天然气水合物储层温度通常维持在4~10℃,故而在钻采过程中,海水基钻井液温度的变化可极大影响微生物的生长繁殖与功能代谢,进而改变其在沉积物胶结等方面的作用效能。

因此,实验将以MICP微生物菌种的最佳生长温度(30℃)为上限,储层温度4℃为下限,设置30、20、10、4℃4个温度值,通过调控液体培养基温度环境,对不同温度下两种微生物菌种的生长状况进行系统评价。

2.2.1 30℃海水中微生物的生长状况

如图2所示,与去离子水液体培养基中的生长情况相比,在30℃海水中,巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌的菌种浓度和脲酶活性均受到一定影响。其中,巴氏芽孢杆菌受海水影响较大,对数生长期延长至24 h,最大生长速率降低,48 h时的脲酶活性与菌种浓度仅为培养基中的三分之一。而巨大芽孢杆菌受海水影响较小,与其在培养基中的生长特征基本一致。结果表明,在30℃条件下,巨大芽孢杆菌对海水环境的适应性优于巴氏芽孢杆菌,但脲酶活性仍相对较低。

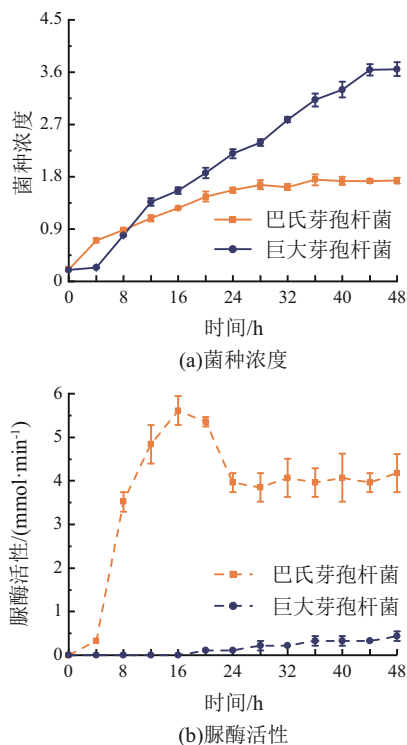


图2 30℃海水中微生物48 h生长曲线

2.2.2 20℃海水中微生物的生长状况

如图3所示,当海水温度降至20℃时,两种菌种的生长繁殖和新陈代谢受到进一步抑制。巨大芽孢杆菌无明显延滞期,但对数生长期缩短至20 h,最大生长速率显著降低,48 h时菌种浓度和脲酶活性仅为30℃海水时的一半。巴氏芽孢杆菌出现12 h的延滞期,12~28 h内进入对数生长期,菌种浓度快速上升,脲酶活性于24 h后出现明显升高,存在滞后性,48 h时,菌种浓度相对30℃海水条件时的变化不大,但脲酶活性减半。由此可见,温度下降可明显抑制微生物生长代谢,在此条件下,微生物会将更多营养物质优先分配至繁殖过程,而非脲酶合成,导致脲酶活性降低并出现滞后现象。

2.2.3 10℃海水中微生物的生长状况

如图4所示,在温度降至10℃时,两种菌种均出现明显滞后期,巴氏芽孢杆菌延滞期延长至20 h,巨大芽孢杆菌则直接延长至40 h。在48 h时,两种菌种浓度接近(OD_{600} 值为0.926),脲酶活性分别下降至0.88 mmol/min和0.22 mmol/min。可见,随温度的持续性下降,两种菌种的生长繁殖与脲酶活性都受到明显的抑制作用,但巴氏芽孢杆菌产生的脲酶活性更高。

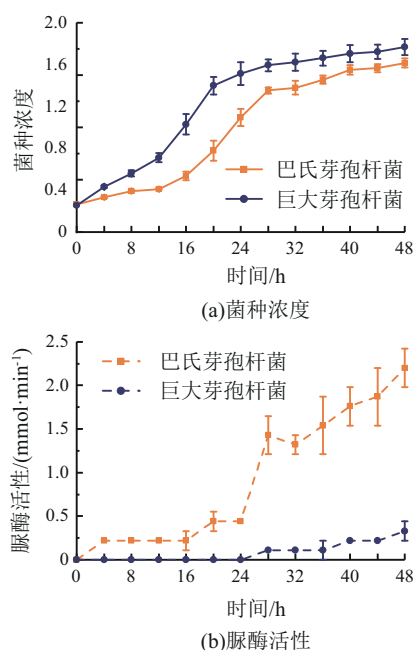


图3 20 °C 海水中微生物48 h生长曲线

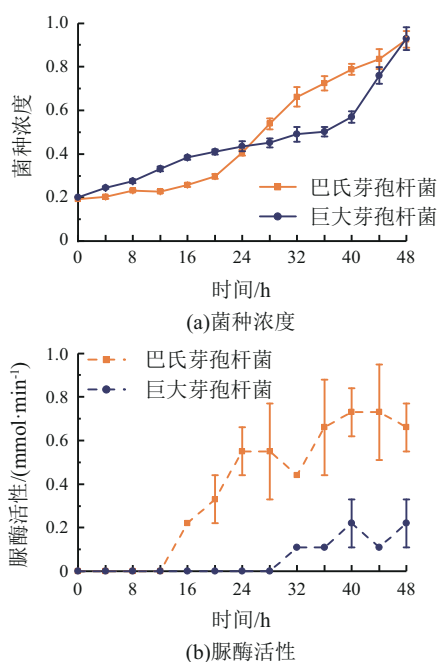


图4 10 °C 海水中微生物48 h生长曲线

2.2.4 4 °C海水中微生物的生长状况

如图5所示,当温度下降至一般天然气水合物储层的温度时,巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌仍能生长繁殖,但速度缓慢。巴氏芽孢杆菌的延滞期约为24 h,延滞期期间微生物数量基本不变,24~36 h为对数生长期,36 h后进入稳定期,48 h时OD₆₀₀值为0.583。其脲酶活性在16 h后出现并持续增长,在

32 h达到最高值(0.77 mmol/min),此后呈下降趋势,48 h时降至0.44 mmol/min。相比于巴氏芽孢杆菌,巨大芽孢杆菌表现出更长的延滞期(约为28 h),且脲酶活性极低,40 h时最高仅为0.22 mmol/min,但在28~48 h的对数生长期后,最大生长速率更高,菌种浓度快速上升,48 h时OD₆₀₀值达到0.701,且48 h内没有进入稳定期的迹象,仍有增长趋势。

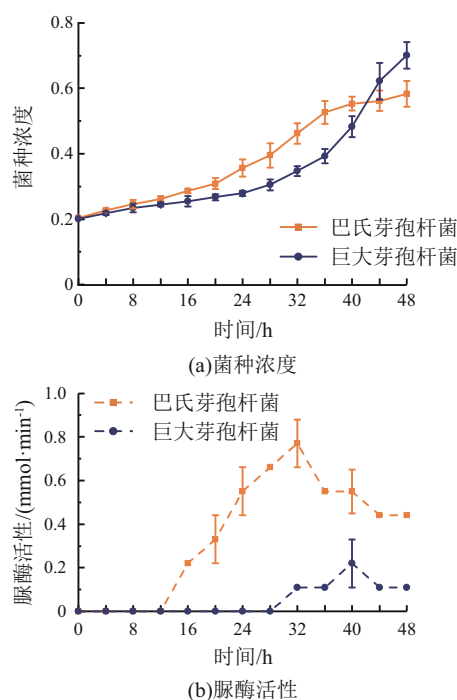


图5 4 °C 海水中微生物48 h生长曲线

3 结论

本文通过实验探究了不同温度条件下,巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌在海水中的生长特征,分析其生长规律,筛选出更适合于构建海水基微生物钻井液的微生物菌种,为海域天然气水合物钻采过程中提高储层胶结程度,维持井壁稳定奠定了一定的基础。本文所得结论如下:

(1)在30 °C的去离子水液体培养基中,巴氏芽孢杆菌与巨大芽孢杆菌的脲酶活性变化与其菌种浓度的变化呈正比。其中,巴氏芽孢杆菌的脲酶活性出现时间早于巨大芽孢杆菌,对数生长期更短,最大生长速率更高,稳定期更长。

(2)海水环境对微生物的生长繁殖与新陈代谢活动产生抑制作用,导致脲酶活性下降。巨大芽孢杆菌在海水环境中表现出更好的适应性,但脲酶活

性远低于巴氏芽孢杆菌。

(3)在4~10℃的低温海水中,巴氏芽孢杆菌产生脲酶的活性均远高于巨大芽孢杆菌,48 h内菌种浓度(OD_{600} 值)为0.583~0.926,脲酶活性可达0.77~0.88 mmol/min,且巨大芽孢杆菌的繁殖速度与巴氏芽孢杆菌相比未表现出优势。因此,应选择巴氏芽孢杆菌作为构建海水基微生物钻井液体系的首选菌种。

参考文献:

- [1] 年廷凯,宋晓龙,张浩,等.水合物注热开采影响下海底斜坡动态稳定性评价[J].岩土工程学报,2022,44(12):2167-2176.
- [2] 李丽霞,梁前勇,谢文卫,等.海域天然气水合物地层固井水泥浆技术挑战与展望[J].地球科学,2024,49(12):4530-4545.
- [3] 李清平,周守为,赵佳飞,等.天然气水合物开采技术研究现状与展望[J].中国工程科学,2022,24(3):214-224.
- [4] 胡敏芝,王乐,鹿擎梁,等.海上天然气水合物勘探发现状与展望[J].船舶工程,2021,43(12):23-28.
- [5] 陈强,胡高伟,李彦龙,等.海域天然气水合物资源开采新技术展望[J].海洋地质前沿,2020,36(9):44-55.
- [6] 温达洋,田进,赵琥,等.天然气水合物地层MICP稳固实验研究[J].钻探工程,2025,52(4):17-25.
- [7] 王金堂,徐嘉崎,廖波,等.海域天然气水合物钻井液用多功能处理剂制备与性能评价[J].钻探工程,2023,50(6):11-17.
- [8] 刘姝,李文杰,李莉佳,等.天然气水合物开采方法研究现状及展望[J].钻探工程,2024,51(5):12-23.
- [9] 阮徐可,杨明军,李洋辉,等.不同形式天然气水合物藏开采技术的选择研究综述[J].天然气勘探与开发,2012,35(2):39-43,88.
- [10] 张旭辉,鲁晓兵,刘乐乐.天然气水合物开采方法研究进展[J].地球物理学进展,2014,(2):858-869.
- [11] You K, Flemings P B, Malinverno A, et al. 2019. Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems[J]. Reviews of Geophysics, 57(4): 1146-1196.
- [12] 王志刚,董凯飞,郭永宣,等.海域天然气水合物储层改造增产技术研究进展[J].地质论评,2024,70(S1):257-259.
- [13] Ye J, Qin X, Xie W, et al. The second natural gas hydrate production test in the South China Sea[J]. China Geology, 2020, 3(2):197-209.
- [14] Wang X, Sun Y, Li B, et al. Reservoir stimulation of marine natural gas hydrate—a review [J]. Energy, 2023, 263: 126120.
- [15] 杨鹏程,李斌,邵文潮,等.2021.海域天然气水合物三维地震处理关键技术应用[J].海洋石油,41(3):1-7.
- [16] 方翔宇.不同储层因素下含水合物沉积物降压开采出砂规律实验研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [17] 郭东东,黄芳飞,宁伏龙,等.大洋科学钻探与海洋水合物钻井液体系研究进展[J].海洋石油,2023,43(3):64-69.
- [18] 赵元喆.水合物钻采井壁稳定特性研究[D].大庆:东北石油大学,2024.
- [19] 陈焱,王重卿,王浩,等.菌胶比影响微生物固化黏土的效果分析[J].水利与建筑工程学报,2024,22(4):175-180.
- [20] 王楠,王琼,叶为民,等.微生物加固技术研究进展[J].水文地质工程地质,2024,51(5):231-244.
- [21] Kitamura M, Konno H, Yasui A, et al. Controlling factors and mechanism of reactive crystallization of calcium carbonate polymorphs from calcium hydroxide suspensions [J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 236(1): 323-332.
- [22] Whiffin V S, van Paassen L A, Harkes M P, et al. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [23] 赵茜.微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D].北京:中国地质大学,2014.
- [24] van Paassen L A, Ghose R, van der Linden T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [25] 徐溪晨.微生物矿化胶结砂土材料强度增长机理及可控性研究[D].北京:清华大学,2023.
- [26] 丁洪强.MICP胶结粗粒土的物理力学特性研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [27] Dejong J T, Fritzges M B, Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [28] Mobley H L, Island M D, Hausinger R P. Molecular biology of microbial ureases [J]. Microbiological reviews, 1995, 59(3): 451-480.
- [29] Garrity G, Vos P D, Jones D, et al. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology[M]//The Firmicutes (volume 3). Springer: Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 2009: 89-100.
- [30] 彭劼,何想,刘志明,等.低温条件下微生物诱导碳酸盐沉积加固土体的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(10):1769-1774.
- [31] Whiffin V S. Microbial $CaCO_3$ Precipitation for the Production of Biocement[D]. Western Australia, Murdoch University, 2004.
- [32] 王靖.巴氏芽孢杆菌对黄河滩区镉污染土壤修复及冬小麦镉富集影响[D].郑州:河南大学,2024.
- [33] Nayanthara P G, Dassanayake A B, Nakashima K, et al. Microbial induced carbonate precipitation using a native inland bacterium for beach sand stabilization in nearshore areas [J]. Applied Sciences, 2019, 9(15): 3201.
- [34] Keykha H A, Asadi A, Zareian M. Environmental factors affecting the compressive strength of microbiologically induced calcite precipitation-treated soil [J]. Geomicrobiology Journal, 2017, 34(10): 889-894.
- [35] Zamarreño D V, May E, Inkpen R. Influence of environmental temperature on biocalcification by non-sporing freshwater bacteria [J]. Geomicrobiology Journal, 2009, 26(4): 298-309.
- [36] Krajewska B, van Eldik R, Brindell M. Temperature- and pressure-dependent stopped-flow kinetic studies of jack bean urease. Implications for the catalytic mechanism [J]. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2012, 17: 1123-1134.

(编辑 王跃伟)