

微生物钻井液在深厚覆盖层钻探中的应用 及固壁护心机理研究

张 浩¹, 李之军^{1*}, 李奉霖², 宋礼勇³, 袁长金³, 方 鑫³, 王 胜¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 3. 四川省第一地质大队, 四川 成都 610032)

摘要:针对深厚覆盖层钻探中存在的孔壁失稳与岩心采取率低等技术难题, 本文以巴氏芽孢杆菌为核心微生物, 基于微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术, 综合考虑微生物生长特性与钻井液流变性能要求, 构建了羧甲基纤维素钠(CMC)和生物聚合物(XC)2种适用于绳索取心钻进的微生物钻井液体系, 并在我国西部某重大水电勘察工程的深厚覆盖层取心钻探中进行了工程应用试验, 完成了258.75 m钻探进尺, 同时根据岩心样品表面和内部的X射线衍射与扫描电子显微镜分析结果, 探讨了微生物钻井液固壁护心作用机理。研究表明: 在CMC加量为0.8%、XC加量为0.3%时, 既能保障微生物的良好生长, 又能满足钻进过程对钻井液流变性能的要求, 确定微生物钻井液配方为0.8% CMC/0.3% XC+巴氏芽孢杆菌($OD_{600}=0.8$)+0.5% 氯化钠+2% 尿素+2% 胰蛋白胨; 2种微生物钻井液均兼具良好的流变性能与生物活性, 现场应用中有效维持了孔壁稳定, 岩心采取率超过90%, 实现了深厚覆盖层长孔段裸孔钻进, 显著简化了孔身结构; 钻井液中的微生物在岩心表面及孔壁周围诱导生成碳酸钙晶体(球霏石、方解石等), 沉积于覆盖层松散颗粒表面及孔隙中, 有效胶结松散颗粒, 形成致密保护层, 从而实现固壁护心。研究为深厚覆盖层取心钻探孔壁失稳、岩心采取率低等技术难题提供了新的解决方案, 对提升深厚覆盖层钻探勘察质量具有重要的工程应用价值。

关键词: 深厚覆盖层; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 微生物钻井液; 固壁护心; 孔壁失稳; 岩心采取率; 巴氏芽孢杆菌

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0134-11

Application and mechanism of microbial drilling fluid for wall stabilization and core protection in deep overburden drilling

ZHANG Hao¹, LI Zhijun^{1*}, LI Fenglin², SONG Liyong³, YUAN Changjin³, FANG Xin³, WANG Sheng¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072, China; 3. The 1st Geological Brigade of Sichuan, Chengdu Sichuan 610032, China)

Abstract: To address technical challenges such as borehole wall instability and low core recovery in deep overburden drilling, this paper constructs two microbial drilling fluid systems suitable for wire-line coring—sodium carboxymethyl cellulose (CMC) and biopolymer (XC)-based systems—using *Bacillus pasteurii* as the core microorganism, based on microbially induced carbonate precipitation (MICP) technology and by comprehensively balancing microbial growth

收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2026-01-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.014

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项目(编号: 2024ZD1003100); 成都理工大学珠峰科学研究计划项目(编号: 8000-2025ZF11411); 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室自由探索课题(编号: SKLGP2023Z012); 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(编号: ZKKJ202423)

第一作者: 张浩, 男, 汉族, 2001年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为岩土钻掘技术, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 3308611961@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, 从事钻井液理论与技术方面的科研与教学工作, 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: 张浩, 李之军, 李奉霖, 等. 微生物钻井液在深厚覆盖层钻探中的应用及固壁护心机理研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 134-144.

ZHANG Hao, LI Zhijun, LI Fenglin, et al. Application and mechanism of microbial drilling fluid for wall stabilization and core protection in deep overburden drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 134-144.

characteristics with drilling fluid rheological requirements. Engineering application tests were conducted in deep overburden coring for a major hydropower exploration project in western China, achieving a total footage of 258.75 m. Concurrently, the mechanism of wall stabilization and core protection of microbial drilling fluids was investigated through X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) analyses of core sample surfaces and interiors. The results indicate that a CMC dosage of 0.8% and an XC dosage of 0.3% ensure good microbial growth while meeting the rheological requirements for drilling fluid in the drilling process. The optimized formula is determined as: 0.8% CMC/0.3% XC + *Bacillus pasteurii* ($OD_{600}=0.8$) + 0.5% NaCl + 2% urea + 2% tryptone. Both microbial drilling fluids exhibit excellent rheological properties and biological activity. Field applications demonstrated effective borehole wall stability maintenance, with core recovery rates exceeding 90%, enabling long-section open-hole drilling in deep overburden and significantly simplifying the borehole structure. The microorganisms in the drilling fluid induced calcium carbonate crystal formation (e.g., vaterite, calcite) on core surfaces and around borehole walls. These crystals deposited on the surfaces of loose overburden particles and within pores, effectively cementing the loose particles to form a dense protective layer, thereby achieving wall stabilization and core protection. This study provides a novel solution for technical problems such as borehole wall instability and low core recovery in deep overburden core drilling, holding significant engineering application value for improving the quality of deep overburden drilling and exploration.

Key words: deep overburden; microbially induced carbonate precipitation (MICP); microbial drilling fluid; wall stabilization and core protection; borehole wall instability; core recovery rate; *Bacillus pasteurii*

0 引言

深厚覆盖层通常指厚度超过 30 m 的第四系松散沉积物^[1],以碎石、砂砾和卵砾石为主,具有结构松散、胶结性差等特点。在我国西部某重点水电工程勘察钻探工程中,遇到大量此类地层,对勘察工作的精度与可靠性带来了极大挑战。水利水电钻探在技术层面具有显著的专业特殊性^[2],主要体现在岩心采取与原位测试两方面:一方面需严格控制岩心的原状性与岩心采取率^[3],以确保样本真实反映地层结构与力学特性,为岩体质量评价与工程设计提供依据^[4];另一方面需系统开展水文地质试验(如抽水、压水及注水试验)与多项孔内原位测试(如标贯、动探、原状取样、声波测井及光学成像等),以全面获取岩土力学与水文地质参数,为坝基、隧洞及边坡等关键工程部位的稳定性与安全评价提供支撑。因此,在深厚覆盖层这一复杂地质环境中,钻探技术的选择直接影响勘察数据的准确性与完整性,对优化工程设计、控制建设风险具有重要影响。

深厚覆盖层钻探中,受地层松散、易扰动等特性的影响,常面临孔壁坍塌、掉块、卡钻、岩心卡堵、岩心采取率低、取心质量差等诸多技术难题。针对上述挑战,国内外学者和工程技术人员进行了大量研究和实践,采用空气潜孔锤跟管钻进^[5]、跟管干钻^[6]、冷冻取心技术及偏心扩孔跟管取心工艺等方

法,然而在实际应用中,这些方法的适应性、可靠性与取心质量尚未达到预期。绳索取心技术在硬岩钻进中效率显著,但因深厚覆盖层的松散、易塌等特性,在该类地层中应用受限,尤其在沉积物深度达 300 m 以上的深厚覆盖层中,钻进效率低。为了增强孔壁稳定性,有研究尝试将绳索取心与跟管钻进工艺相结合,以增强孔壁稳定性^[7]。该方法虽可在一定程度上抑制孔壁垮塌,但因覆盖层岩屑细小、环空间隙易被堵塞等,常引发套管“抱死”。分段切割或强力起拔等常规处理手段在覆盖层中应用效果有限,还容易导致套管遗留^[8],给后续工程带来隐患。

采用优质钻井液体系也是维持孔壁稳定的常用方法。绳索取心环空间隙小、地层松散易塌的特点,要求钻井液具有适宜的黏度和切力,以保障携岩能力^[9-10],同时具有优异的防塌护壁性能。为此,发展了多种专用的防塌钻井液体系,如基于纳米材料等新型抑制剂的抑制型钻井液体系^[11-12],旨在抑制黏土水化,解决强水敏性地层孔壁失稳问题,但在高应力裂缝性地层应用效果有限;借助纳米复合、智能材料在孔壁形成阻隔层的成膜封堵体系^[13-14],但其形成的封堵膜往往强度不足,难以承受钻具频繁起下带来的机械扰动;以及借鉴自然黏附或矿化机理的仿生固壁钻井液体系^[15],虽能实现高效黏结与加固,但目前多处于实验研究阶段,面临

材料成本高、现场配制与维护工艺复杂等挑战。在实际应用中,仅靠钻井液就能完全满足护壁和取心要求的案例极少,大多数情况下,即使采用了高性能钻井液,仍难以避免孔壁失稳和取心质量差的问题。

研究和实践表明,提升深厚覆盖层的胶结强度,是增强孔壁稳定性与提高岩心采取率的有效途径。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)作为一种新兴的生物矿化技术,已在土壤重金属处理^[16]、古建筑表面修复^[17]、建筑材料缺陷修复^[18]、岛礁地基加固和沙漠治理^[19]等多个领域得到广泛应用。该技术依靠微生物代谢活动促使岩土体孔隙及颗粒表面沉积CaCO₃,从而有效改善其力学特性^[20]、渗透特性^[21-22]和提升其抗侵蚀能力^[23],强化整体胶结状态与耐久性。课题组将MICP技术引入无固相钻井液体系中,通过岩心浸泡实验发现,微生物钻井液可以将松散碎石土胶结成型,并显著提高其抗压强度^[24-25]。鉴于此,本文采用2种最常用的钻井液材料,构建了适合深厚覆盖层绳索取心钻进工艺的微生物钻井液体系配方。通过现场实践应用验证该钻井液的固壁护心效果,并结合X射线衍射分析(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)测试结果,分析其固壁护心作用机理。本研究旨在为解决深厚覆盖层孔壁失稳和取心质量差等技术难题提供一种新的方案,实现深厚覆盖层地质勘探质量质的提升。

1 实验材料与方法

本文选用的巴氏芽孢杆菌购自北京百欧博伟生物技术有限公司,其他材料见表1。主要仪器有高压蒸汽灭菌锅、恒温振荡培养箱(ZHTY-50S)、电导率仪、紫外分光光度计、漏斗黏度计、NDJ-1旋转黏度计、密度计等,其中恒温振荡培养箱用于微生物活化与培养,电导率仪和紫外分光光度计用于测定微生物脲酶活性(以尿素水解速率表征)和菌体浓度,具体使用方法可参考相关文献^[26-28]。

表1 微生物钻井液组分及材料
Table 1 Components and materials of microbial drilling fluid

组 分	材 料
培养基	胰蛋白胨
	尿素
	氯化钠
处理剂	羧甲基纤维素钠(CMC)
	生物聚合物(XC)
钙源	氯化钙

2 微生物钻井液构建

2.1 无固相钻井液

根据课题组前期研究结果^[25-27],本文选择CMC和XC 2种材料构建微生物钻井液,其加量及性能见表2。

表2 无固相钻井液配方及性能
Table 2 Formulas of solid-free drilling fluid and their properties

材料	加量/%	苏氏漏斗黏度 μ_F/s	表观黏度 $\mu_A/(mPa \cdot s)$	塑性黏度 $\mu_P/(mPa \cdot s)$	动切力 τ_0/Pa	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$
CMC	0.4	23.01	21.01	15.1	7.95	1.00
	0.6	52.23	34.50	21.2	12.15	1.01
	0.8	98.44	51.12	29.7	20.74	1.01
	1.0	168.02	65.04	36.5	28.50	1.02
XC	0.1	20.03	6.75	3.7	3.14	0.98
	0.2	22.41	10.94	4.9	5.75	0.98
	0.3	28.49	14.56	6.6	7.46	1.00
	0.4	34.23	17.25	7.5	9.75	1.00

2.2 无固相钻井液中巴氏芽孢杆菌生长活性

为了筛选出既适宜巴氏芽孢杆菌生长又能够满足深厚覆盖层绳索取心钻进要求的CMC和XC加量,将巴氏芽孢杆菌($OD_{600}=0.8^{[29-31]}$)接种至配制的含培养基的CMC、XC钻井液中,测定巴氏芽孢

杆菌在不同CMC、XC加量的钻井液中的24 h生长活性(菌体浓度和脲酶活性)。

生长情况如图1、图2所示。可以看出,巴氏芽孢杆菌在2种钻井液中均能良好生长,生长曲线整体上符合巴氏芽孢杆菌的生长规律。随着CMC和XC

加量的增加,菌体浓度和脲酶活性均呈下降趋势,说明CMC、XC的加量会影响巴氏芽孢杆菌的生长繁殖。对比巴氏芽孢杆菌在不同CMC、XC加量的钻井液中的生长情况,发现巴氏芽孢杆菌在CMC加量为0.4%时的生长情况最佳, OD_{600} 达到4.99,尿素水解速率达到6.6 mmol/(L·min);在XC加量为0.1%时,巴氏芽孢杆菌的生长情况最佳, OD_{600} 达到4.43,尿素水解速率达到6.38 mmol/(L·min)。

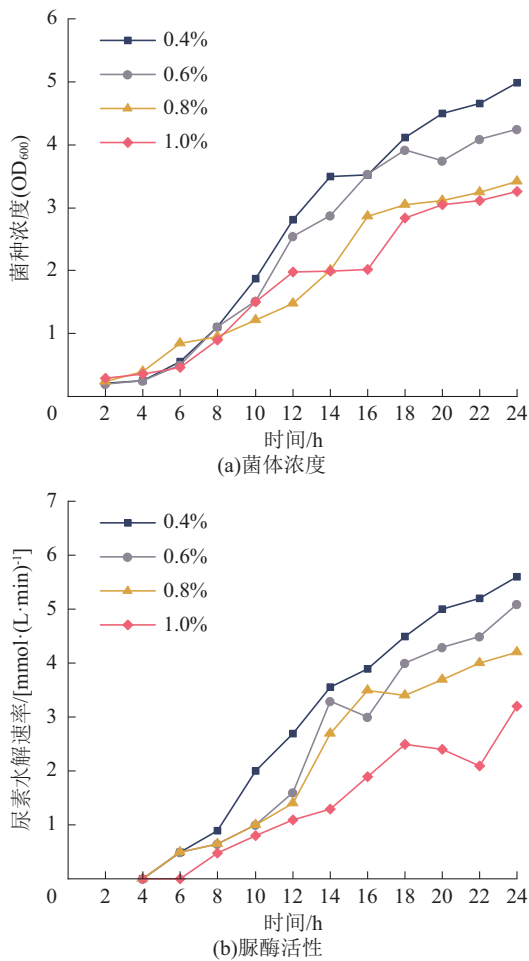


图1 巴氏芽孢杆菌在CMC钻井液中的生长曲线

Fig.1 Growth curves of *Bacillus pasteurii* in CMC drilling fluids

虽然在0.4% CMC、0.1% XC加量的无固相钻井液中巴氏芽孢杆菌生长情况最佳,分解尿素能力最强,脲酶活性最高,但结合表2中2种钻井液的性能,该加量的钻井液流变性能不满足覆盖层钻探携砂需求^[32-33]。故选择CMC加量为0.8%、XC加量为0.3%构建微生物钻井液,既能保证巴氏芽孢杆菌的良好生长,具有高效MICP效率,又能满足钻进工艺

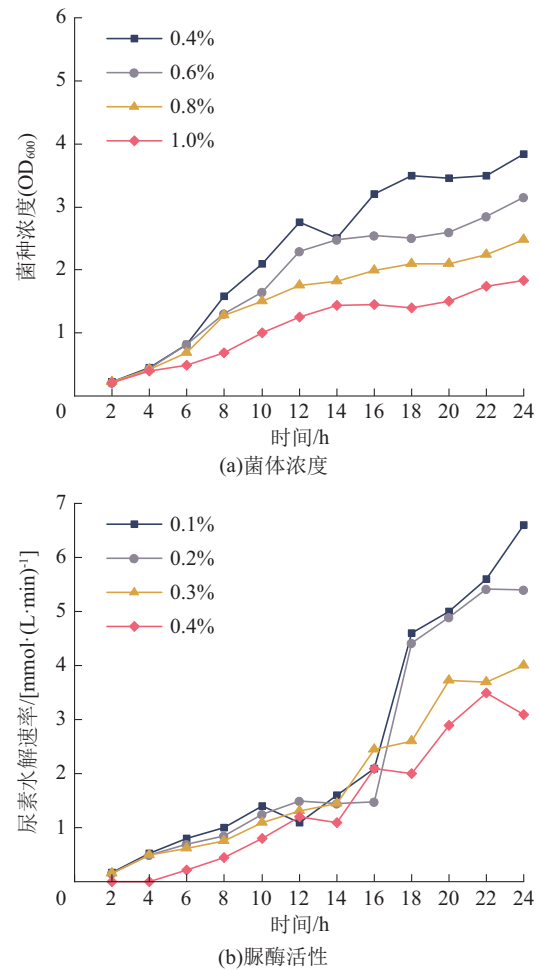


图2 巴氏芽孢杆菌在XC钻井液中的生长曲线

Fig.2 Growth curves of *Bacillus pasteurii* in XC drilling fluids

对钻井液流变性能的要求。由此确定2种微生物钻井液的配方为:(1) 0.8% CMC+巴氏芽孢杆菌($OD_{600}=0.8$)+0.5%氯化钠+2%尿素+2%胰蛋白胨;(2) 0.3% XC+巴氏芽孢杆菌($OD_{600}=0.8$)+0.5%氯化钠+2%尿素+2%胰蛋白胨。

3 微生物钻井液现场实践

3.1 地层概况

现场试验钻孔位于我国西部高原东南缘过渡地带,属于典型的高山峡谷构造地貌单元,新构造运动显著,地质条件复杂,主要为新生代晚期形成的松散堆积层构成,涉及深度达300~500 m。钻遇地层包括砂卵砾石层、中粗砂层、中细砂层及黏土淤泥层,成分包含砾石、砂土及黏土混杂,结构松散,渗透性差异大,钻进过程中易出现坍塌、缩径及取心空管等问题。

3.2 钻孔结构设计

参考该区域其他钻孔施工经验及孔身结构,试验孔孔身结构设计如图3所示,采用 $\varnothing 172\text{ mm}$ 口径开孔,下入多级套管,以 $\varnothing 76\text{ mm}$ 口径终孔,为套管护壁预留充足空间。

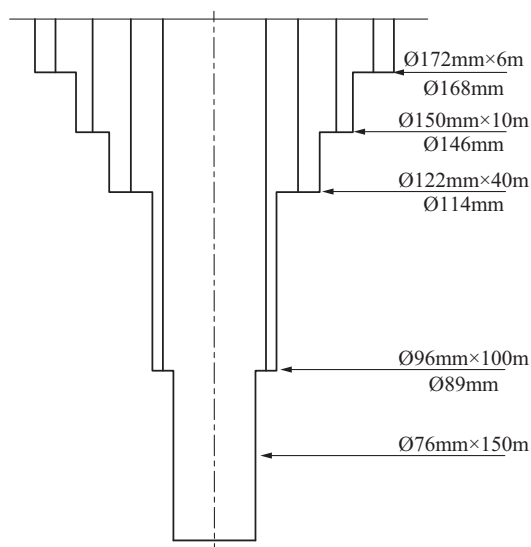


图3 试验孔孔身结构设计

Fig.3 Structural design drawing of the test hole

3.3 微生物钻井液制备

3.3.1 微生物钻井液配制方法

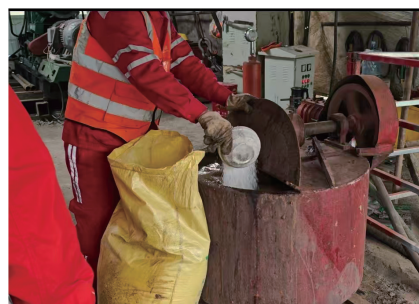
首先利用灭菌锅、恒温振荡培养箱等设备进行培养基灭菌、微生物活化与培养等操作,得到菌液,并冷藏保存。接着在扩大培养容器(图4a)中配制培养基并加入菌液,静置培养。最后将菌液与无固相材料、尿素和氯化钙在立式搅拌机中混合搅拌,操作如图4(b)所示。

3.3.2 现场巴氏芽孢杆菌生长情况

巴氏芽孢杆菌的生长活性对维持微生物钻井液的固壁护心效果具有重要影响,菌体数量与脲酶活性不足将直接影响其固壁护心效果。设置了2种pH环境进行对比分析:pH=6.3是施工现场配浆用水的实测平均值,对照组pH=7.3是巴氏芽孢杆菌脲酶活性与生长速率最适宜值^[34]。监测13.3℃(当地当时日平均气温)下72 h内菌体浓度的变化,如图5所示。结果表明,在现场水质为酸性条件(pH=6.3)下,巴氏芽孢杆菌生长较为缓慢,培养48、56、64 h的 OD_{600} 分别为0.535、0.676、0.715;相比之下,当培养基pH调整为7.3时,巴氏芽孢杆菌增殖速度



(a)微生物扩大培养容器



(b)微生物钻井液配置

图4 微生物钻井液现场配制

Fig.4 On-site preparation of microbial drilling fluid

显著提高,相同时间点(48、56、64 h)的 OD_{600} 分别达到1.005、1.094、1.215。因此,在钻井工程应用中需调控微生物钻井液的pH,以保障巴氏芽孢杆菌具有最佳代谢活性。

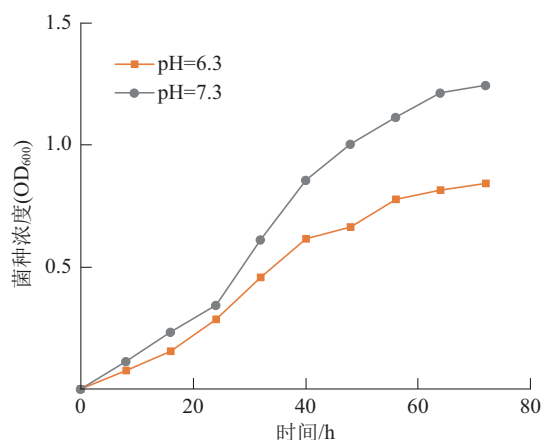


图5 现场巴氏芽孢杆菌生长情况

Fig.5 The growth of *Bacillus pasteurii* in the on-site environment

3.4 微生物钻井液应用及效果

3.4.1 钻进规程参数

深厚覆盖层钻进参数控制原则为低转速、小泵量和小钻压。在砂卵石中钻进时,采用低转速配合小泵

量及适当的钻压;在松散破碎的砂、砂砾、黏土和泥岩地层中钻进时,采用低转速、小钻压及小泵量;在使用常规钻井液钻进时,应限制转速和回次纯钻进时间,保证钻杆内壁清洁。具体钻进规程参数见表 3。

表 3 钻进规程参数
Table 3 Drilling parameters

钻孔编号	钻进孔段/m	钻孔口径/mm	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
Zkdj41	0~6.06	172	8~15	142~166	52
	6.06~40.43	150	0~2	142~166	30
	40.43~152.02	122	0~2	100~207	25~30
Zkdj42	0~5.32	172	9~14	142~166	52
	5.32~38.06	150	0~2	100~306	30
	38.06~150.76	98	0~2	100~306	20~30

3.4.2 钻井液性能参数

利用漏斗黏度计、NDJ-1 旋转黏度计和密度计测试现场配制的微生物钻井液性能参数,见表 4。钻进时,微生物钻井液的 μ_p 、 μ_F 、 ρ 均上升,这是因为钻井液携带破碎的细砂及黏土,固相含量增加,而 τ_0 变化则是受微生物钻井液中 Ca^{2+} 浓度变化影响。根据性能参数和现场应用效果,微生物钻井液具备良好的携砂能力,能够满足钻探工程的要求。

表 4 微生物钻井液性能参数
Table 4 Performance parameters of microbial drilling fluids

配 方	位 置	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	μ_F/s	$\mu_A/(mPa\cdot s)$	$\mu_p/(mPa\cdot s)$	τ_0/Pa
微生物-CMC	入口	1.01	98	42.5	24.1	18.5
	出口	1.07	111	51.3	28.7	11.5
微生物-XC	入口	1.01	57	20.6	12.7	8.1
	出口	1.05	79	31.3	17.6	14.2

3.4.3 微生物钻井液应用效果

钻孔 Zkdj41 实际孔身结构相较设计孔身结构得到了明显简化(图 6):一开采用 $\varnothing 172\text{ mm}$ 单管钻具配套金刚石钻头钻进至 6.06 m,下入 $\varnothing 168\text{ mm}$ 套管;二开采用 $\varnothing 150\text{ mm}$ 金刚石绳索取心钻具钻进至 40.43 m,下入 $\varnothing 146\text{ mm}$ 套管;三开采用 $\varnothing 122\text{ mm}$ 绳索取心钻具(内管为半合管)配套复合片钻头钻进至 152.02 m 终孔。该孔一开与二开均采用普通钻井液,配方为 1% 膨润土+1.2% 植物胶+0.3% CMC,漏斗黏度为 125 s,密度为 1.15 g/cm³,获取的岩心原状性极差,如图 7(a)所示。使用微生物-CMC 无固相钻井液钻进孔段为 44.03~152.02 m,

钻遇地层主要为细砂夹黏土、粗砂夹黏土层及淤泥夹泥岩层,获取的岩心较为完整,岩心采取率超过 90%,如图 7(b)所示。

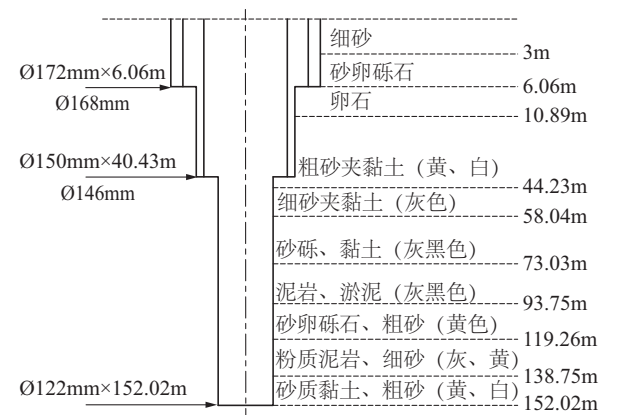


图 6 Zkdj41 试验孔实际钻孔结构
Fig.6 The actual drilling structure of the Zkdj41 test hole

钻孔 Zkdj42 孔身结构同样得到了明显简化(图 8):一开采用 $\varnothing 172\text{ mm}$ 金刚石钻头单管钻进至 5.32 m,下入 $\varnothing 168\text{ mm}$ 套管;二开采用 $\varnothing 150\text{ mm}$ 绳索取心钻具(内管为半合管)配套复合片钻头钻进至 38.06 m,下入 $\varnothing 146\text{ mm}$ 套管;三开采用 $\varnothing 98\text{ mm}$ 金刚石绳索取心钻具(内管为半合管)钻进至 150.76 m 终孔。该孔全孔使用微生物-XC 无固相钻井液,钻遇地层主要包括细砂夹黏土、砂卵砾石、粗砂夹黏土及淤泥夹泥岩层,岩心采取率超过 95%,获取的岩心如图 9 所示。由图 9(b)可见,岩心表面形成一层致密的保护壳,有效维持了岩心的原状性和完整性。

Zkdj41 孔使用的普通钻井液防塌护壁性能较



(a)常规钻井液取心效果



(b)微生物-CMC钻井液取心效果

图7 Zkdj41孔现场岩心

Fig.7 In-situ core of Zkdj41 hole

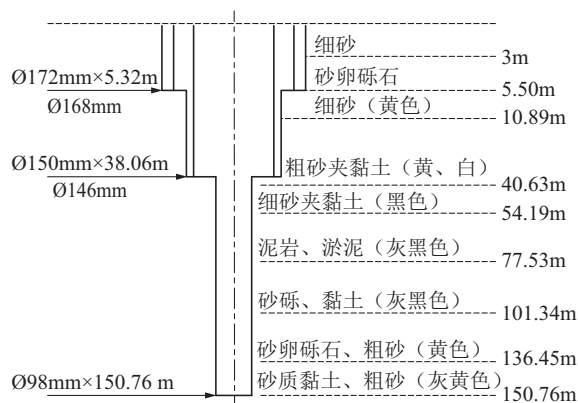


图8 Zkdj42试验孔实际钻孔结构

Fig.8 The actual drilling structure of the Zkdj42 test hole

差,孔壁垮塌严重。使用微生物-CMC无固相钻井液后,在砂层钻进过程中,孔壁稳定,未出现塌孔,每次下钻均能顺利到底。58.04~73.03 m孔段钻遇淤泥层,孔壁未出现缩径,这是由于微生物钻井液中的 Ca^{2+} 具有抑制淤泥层黏土矿物水化膨胀的能力。73.03~93.75 m孔段钻遇涌砂层,期间扫孔2次,孔壁在12~24 h内能够趋于稳定,之后每次下钻都能顺利到底。Zkdj42孔全孔几乎无垮塌、掉块或取心空管问题。实践表明,采用微生物钻井液可有效维持覆盖层孔壁稳定,实现长孔段(>100 m)裸孔钻进,可比该区域同类钻孔少下两层套管,大幅



(a)微生物-XC无固相钻井液取心效果



(b)岩心表面形成的“保护壳”

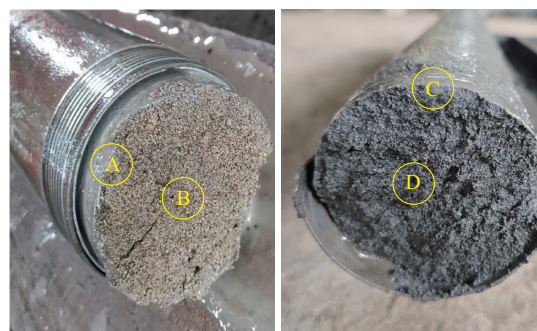
图9 Zkdj42孔现场岩心

Fig.9 In-situ core of Zkdj42 hole

简化了钻孔结构。

4 微生物钻井液固壁护心作用机理

为探究微生物钻井液的固壁护心作用机理,本研究采集现场岩心样品,依据钻井液类型与样品部位的不同划分为4组(图10):A、B组分别为微生物-CMC钻井液取心的表面、中心区域,C、D组分别为微生物-XC钻井液取心的表面、中心区域。采用X射线衍射分析各组样品的矿物组成,并利用扫描电子显微镜观察其微观结构与形貌。通过对比岩心表面与内部的物质成分和结构特征差异,揭示微生物钻井液固壁护心作用机理。



(a)巴氏芽孢杆菌-CMC无固相钻井液

(b)巴氏芽孢杆菌-XC无固相钻井液

图10 微观分析取样位置示意

Fig.10 Schematic diagram of microanalysis sampling location

4.1 XRD分析

4组样品的X射线衍射分析结果如图11所示。对比碳酸钙标准PDF卡片发现,所有样品中都存在

明显的碳酸钙波峰。表面区域:A组主要的衍射峰是球霏石(PDF#33-0268)和文石(PDF#76-0606),C组主要的衍射峰是方解石(PDF#05-0586)和文石(PDF#76-0606)。中心区域:B组主要的衍射峰是

文石(PDF#76-0606),D组主要的衍射峰是方解石(PDF#05-0586)和文石(PDF#76-0606)。为进一步验证微生物钻井液作用效果,判定样品内外区域胶结程度,利用扫描电镜分析样品微观结构。

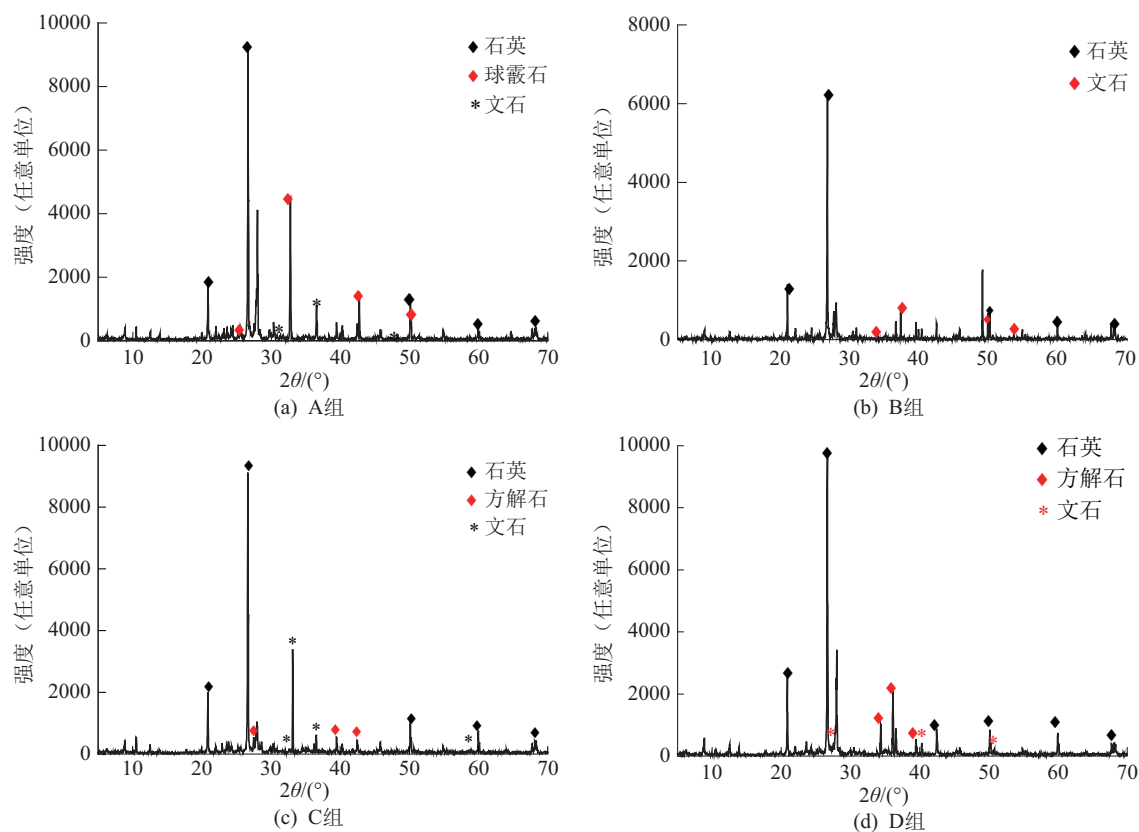


图 11 岩样XRD图谱

Fig.11 XRD pattern of the rock samples

4.2 SEM分析

SEM扫描结果如图12所示。A组样品(图12a)中,砂粒表面完全被 CaCO_3 晶体覆盖,颗粒间孔隙被充分填充,结构致密,晶体形态主要为球霏石,结果与已有研究结论一致^[35-36]。而C组样品(图12c)中, CaCO_3 多以方解石形态存在,孔隙未被完全

填充。通过对比可发现,A组样品在巴氏芽孢杆菌-CMC钻井液作用下,MICP反应所生成的 CaCO_3 晶体分布更为密集且均匀,胶结能力更强。反观B、D组(图12b和12d),B组几乎未观察到 CaCO_3 ,砂粒间无胶结;D组仅观察到极少量方解石和文石形态的 CaCO_3 ,砂粒间胶结性差。

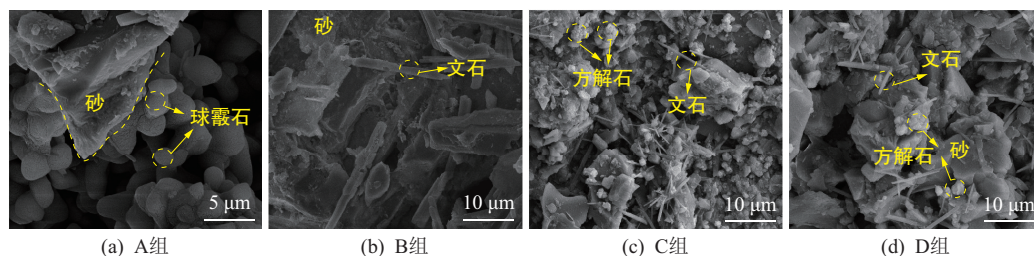


图 12 岩样微观形貌

Fig.12 Microscopic morphology of rock samples

由于微生物钻井液在一个钻进回次时间内向岩心内部渗透能力有限,样品内部更接近原始地层状态。根据岩心表面与内部在 CaCO_3 晶体形态和数量上的显著差异,表面晶体主要是由外源MICP作用生成,而内部晶体则反映地层原本特征。从图12中可以看出,两组岩心表面区域的胶结程度均明显好于对应中心区域,说明岩心表面的保护壳是由微生物钻井液诱导形成,证实其固壁护心的能力。

4.3 微生物钻井液固壁护心机理

如图13所示,在深厚覆盖层钻进过程中,巴氏芽孢杆菌随钻井液侵入孔壁地层或岩心,分布于孔隙或吸附于砂颗粒表面,在原位产生脲酶,催化尿

素水解生成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} 。由于巴氏芽孢杆菌细胞壁带负电,可吸附环境中的 Ca^{2+} ,并以菌体作为成核位点诱导 CaCO_3 晶体形成,从而胶结松散颗粒,增强地层力学性能并降低其渗透性。从图12可观察到,在不同材料配制的微生物钻井液中,巴氏芽孢杆菌于岩心表面诱导生成的 CaCO_3 晶体形态存在明显差异。该差异是由钻井液材料分子量、钻井液流变性等因素所导致^[37],在CMC和XC 2种钻井液材料中,羟基与羧基的数量差异可能是导致岩心表面 CaCO_3 晶体形貌与结晶度变化的原因^[38],其中,CMC中羟基和羧基有利于球霏石形态 CaCO_3 的形成与稳定。

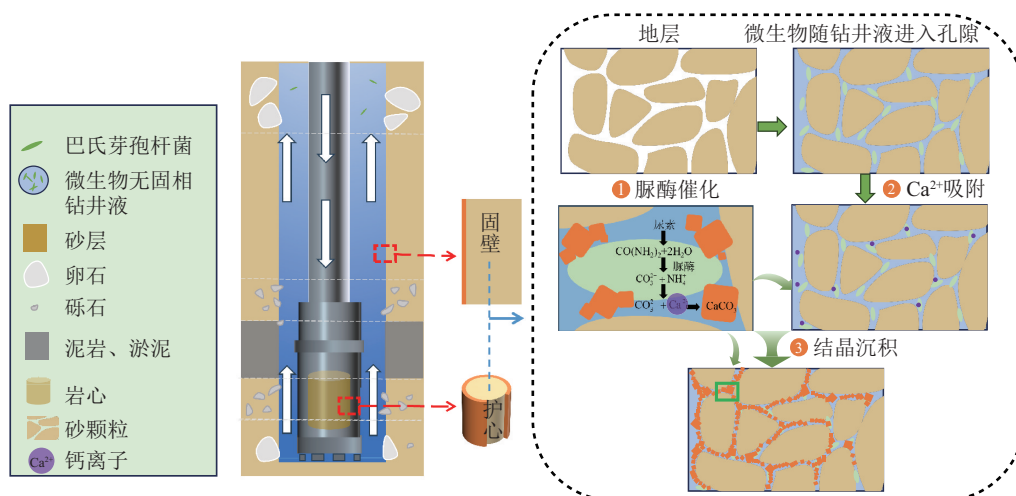


图13 微生物钻井液固壁护心作用机理示意

Fig.13 Schematic diagram of the mechanism of borehole wall enhancement and core protection by microbial drilling fluid

综上所述,尽管在不同钻井液环境下巴氏芽孢杆菌所诱导生成的 CaCO_3 在数量与形态上存在差异,但实践表明其具有良好的固壁和护心效果,证实了微生物钻井液在松散破碎地层中实现孔壁加固与岩心保护的有效性。该技术为应对深厚覆盖层中孔壁失稳和岩心采取率低等问题提供了新的解决方案。

5 结论

(1)确定用于深厚覆盖层微生物钻井液的配方为:0.8% CMC/0.3% XC+巴氏芽孢杆菌+0.5%氯化钠+2%尿素+2%胰蛋白酶。

(2)微生物钻井液在松散砂岩、泥岩、砂卵砾石层和涌砂层等复杂深厚覆盖层完成钻探工作量

258.75 m,钻进过程中孔壁稳定,钻孔Zkdj41、Zkdj42的岩心采取率分别大于90%、95%,充分验证了微生物钻井液在深厚覆盖层应用具有良好的固壁护心效果。

(3)在钻进过程中,微生物随钻井液渗入地层,在孔隙或颗粒表面原位诱导生成 CaCO_3 晶体(球霏石、方解石),胶结松散颗粒,降低孔壁围岩的渗透性,提高其力学性能,从而维护了孔壁稳定,并在岩心表面形成“保护壳”,有效保持了岩心的原状性和完整性。

参考文献(References):

- [1] 程红涛,吴向涛,张辉,等.深厚覆盖层中超长桩的应用[J].山西建筑,2021,47(23):53-55.
CHENG Hongtao, WU Xiangtao, ZHANG Hui, et al. Applica-

- tion of super-long pile in deep overburden[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(23):53-55.
- [2] 张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(6):1377-1404.
ZHANG Shishu. Research status and development trend of deep geological exploration techniques for hydraulic and hydropower engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6):1377-1404.
- [3] 肖冬顺, 马明, 项洋. 水利水电钻探技术进展及发展趋势[J]. 钻探工程, 2021, 48(1):103-111.
XIAO Dongshun, MA Ming, XIANG Yang. Progress and development trend of water conservancy and hydropower drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1):103-111.
- [4] 张世殊, 李青春, 刘松玉, 等. 深厚覆盖层孔内原位测试技术现状与展望[J]. 岩土力学, 2025, 46(12):4009-4028.
ZHANG Shishu, LI Qingchun, LIU Songyu, et al. A state-of-the-art review on the borehole in-situ testing techniques in deep overburden layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(12):4009-4028.
- [5] 李政昭, 吴金生, 钱锋, 等. 覆盖层绿色钻探新方法——空气潜孔锤取心跟管钻进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10):122-125.
LI Zhengzhao, WU Jinsheng, QIAN Feng, et al. New method for overburden green drilling—air downhole hammer core drilling with casing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):122-125.
- [6] 宋继伟, 蒋国盛, 班金彭. 中国南海珊瑚岛礁泻湖砂层钻探取心技术[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6):1251-1257.
SONG Jiwei, JIANG Guosheng, BAN Jinpeng. Coring drilling technology for the coral-reef lagoon sandstone formation in the south China sea[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6):1251-1257.
- [7] 李柏军, 邹润, 郭超. 绳索取心技术在覆盖地层钻井中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3):217-222.
LI Baijun, ZOU Run, GUO Chao. Application of wire line coring technique in overburden drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3):217-222.
- [8] 张士超. 浅谈松散砂砾岩地层钻井取芯工艺[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(7):56-58.
ZHANG Shichao. A brief discussion on drilling core-taking technology in loose sandstone and conglomerate formations[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(7):56-58.
- [9] 王光明, 阳正强, 熊德全, 等. 金沙江其宗水电站上坝址深厚覆盖层钻进工艺探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(5):57-60.
WANG Guangming, YANG Zhengqiang, XIONG Dequan, et al. Discussion on drilling process for upper damsite deep overburden layer of Qizong hydropower station in Jinsha River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(5):57-60.
- [10] 肖冬顺, 张辉, 黄炎普, 等. 雅鲁藏布江深厚砂砾卵石覆盖层钻探工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014(8):21-25.
XIAO Dongshun, ZHANG Hui, HUANG Yanpu, et al. Drilling technology in deep sandy gravel overburden layer at brahma-putra river[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014(8):21-25.
- [11] 吴宇, 侯珊珊, 由福昌. 高分子纳米复合材料在水基钻井液中的研究进展[J]. 油田化学, 2024, 41(3):543-552.
WU Yu, HOU Shanshan, YOU Fuchang. Research progress of polymer nanocomposites in water-based drilling fluid[J]. Oil-field Chemistry, 2024, 41(3):543-552.
- [12] 安莹慧, 汪伟, 张毅, 等. 硅基材料在钻井液中的应用及研究进展[J]. 钻探工程, 2024, 51(4):64-73.
AN Yinghui, WANG Wei, ZHANG Yi, et al. Application and research progress of silicon-based materials in drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):64-73.
- [13] 崔彦琦, 于洪江, 雷亮, 等. 水基钻井液复合纳米成膜封堵剂的制备及性能[J]. 精细化工, 2024, 41(9):2031-2037.
CUI Yanqi, YU Hongjiang, LEI Liang, et al. Preparation and properties of composite nano film-forming sealing agent for water-based drilling fluid[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(9):2031-2037.
- [14] 刘振东, 李海斌, 徐海, 等. PDPA/无机纳米颗粒交替吸附沉积及提高钻井井壁稳定性[J]. 石油化工, 2025, 54(2):227-232.
LIU Zhendong, LI Haibin, XU Hai, et al. Alternating adsorption and deposition of PDPA/inorganic nanoparticles and stability improvement of drilling wellbore[J]. Petrochemical Technology, 2025, 54(2):227-232.
- [15] 蒋官澄, 宣扬, 王金树, 等. 仿生固壁钻井液体系的研究与现场应用[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(3):1-5.
JIANG Guancheng, XUAN Yang, WANG Jinshu, et al. Study and application of bionic borehole wall strengthening agent[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(3):1-5.
- [16] 钱春香, 王明明, 许燕波. 土壤重金属污染现状及微生物修复技术研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3):669-674.
QIAN Chunxiang, WANG Mingming, XU Yanbo. Current situation of soil contamination by heavy metals and research progress in bio-remediation technique[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(3):669-674.
- [17] Ivanov V, Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2008, 7(2):139-153.
- [18] Iqbal D M, Wong L S, Kong S Y. Bio-cementation in construction materials: A review[J]. Materials, 2021, 14(9):2175.
- [19] 李驰, 王硕, 王燕星, 等. 沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4):1291-1298.
LI Chi, WANG Shuo, WANG Yanxing, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4):1291-1298.
- [20] 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 Hanlong, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1):1-14.

- [21] Katsman A, Polishchuk I, Pokroy B. On the mechanism of calcium carbonate polymorph selection via confinement[J]. Faraday Discussions, 2022, 235:433-445.
- [22] Xie G, Liu L, Suo Y L, et al. Hydration mechanism of calcium chloride modified coal gasification slag-based backfill materials[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 182:127-138.
- [23] Gu Z R, Chen Q, Wang L S, et al. Morphological changes of calcium carbonate and mechanical properties of samples during microbially induced carbonate precipitation (MICP)[J]. Materials, 2022, 15(21):7754.
- [24] 李之军, 朱茂, 智晶子, 等. 微生物无固相钻井液体系构建及其固壁作用机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4):187-194.
LI Zhijun, ZHU Mao, ZHI Jingzi, et al. Study on construction of microbial solid-free drilling fluid system and its borehole wall enhancement mechanism[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4):187-194.
- [25] 李之军, 杜泽华, 霍力焯, 等. 不同pH值生物聚合物无固相钻井液中巴氏芽孢杆菌的生长预测模型[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1):106-112.
LI Zhijun, DU Zehua, HUO Lixuan, et al. Predictive model for the growth of *Bacillus* sp. in biopolymer solid-free drilling fluids at different pH conditions[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):106-112.
- [26] Li Z J, Chen J X, Zhao G, et al. Effect and mechanism of microbial solid-free drilling fluid for borehole wall enhancement[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(Part D):109705.
- [27] Li Z J, Huo L X, Zhi J Z, et al. Growth kinetics of *Bacillus pasteurii* in Xanthan gum solid-free drilling fluid at different temperatures[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223:211482.
- [28] Li Z J, Wu X K, Zhang S X, et al. Growth kinetic model of *Bacillus pasteurii* under different pH and temperature conditions in sodium carboxymethyl cellulose solid-free drilling fluid[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 231(Part A):212372.
- [29] 向浩天. 微生物无固相钻井液固壁作用与机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
XIANG Haotian. Research on reinforce borehole wall effect and mechanism of microbial solid-free drilling fluids[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [30] 陈俊秀. 微生物的钻井液诱导驯化及其固壁性能与机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
CHEN Junxiu. Drilling fluid induction and domestication of microorganism and its borehole wall strengthening kinetics[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.
- [31] 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.
- [32] 杨联锋, 彭志平, 宋振杰, 等. 深厚覆盖层绳索取心钻探工艺实践[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1):274-280.
YANG Lianfeng, PENG Zhiping, SONG Zhenjie, et al. Application practice of wire-line core drilling technology for deep and thick overburden strata[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):274-280.
- [33] 尹亮先, 李得新, 田小林, 等. 沙漠地区页岩气地质调查井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3):17-20.
YIN Liangxian, LI Dexin, TIAN Xiaolin, et al. Construction technology of geological survey well for shale gas in desert area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3):17-20.
- [34] Du Z H, Li Z J, Chen J X, et al. Temperature and alkali-resistant induced domestication of *Bacillus pasteurii* in drilling fluid and its borehole wall enhancement properties[J]. Petroleum Science, 2024, 21(6):4358-4375.
- [35] Meier A, Kastner A, Harries A, et al. Calcium carbonates: induced biomineralization with controlled macromorphology[J]. Biogeosciences, 2017, 14(21):4867-4878.
- [36] Nasser A A, Sorour N M, Saafan M A, et al. Microbially-induced calcite precipitation (MICP): a biotechnological approach to enhance the durability of concrete using *Bacillus pasteurii* and *Bacillus sphaericus*[J]. Heliyon, 2022, 8(7):e09879.
- [37] Zhang J G, Zhao C, Zhou A J, et al. Aragonite formation induced by open cultures of microbial consortia to heal cracks in concrete: insights into healing mechanisms and crystal polymorphs[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224:815-822.
- [38] Khanjani M, Westenberg D J, Kumar A, et al. Tuning polymorphs and morphology of microbially induced calcium carbonate: controlling factors and underlying mechanisms[J]. ACS Omega, 2021, 6(18):11988-12003.

(编辑 王跃伟)