

# 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用与机理初探

李之军, 赵 淦, 向浩天, 杜泽华, 陈俊秀, 刘 阔

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:**松散破碎性地层孔壁失稳一直是困扰钻探工程界的难题之一, 增强该类地层的胶结性, 提高其力学性能是有效解决孔壁失稳的技术关键。本文将微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术与CMC无固相钻井液相结合, 构建微生物-CMC无固相钻井液体系。通过岩心浸泡实验、X射线衍射实验(XRD)以及扫描电镜分析两种微观分析手段对微生物-CMC无固相钻井液的固壁作用与机理进行了初探。结果表明: 微生物-CMC无固相钻井液对松散破碎性地层具有较明显的加固作用, 且作用时间越长, 初始菌种浓度越高, 钙源浓度越大, 固壁效果越好。在固壁过程中, 微生物随钻井液渗透进入试样内部, 在松散颗粒之间诱导生成碳酸钙晶体, 填充孔隙空间, 将松散颗粒胶结成整体, 并具有一定的力学强度, 从而达到加固孔壁的目的。本研究结果为解决松散破碎性地层孔壁失稳提供了新的钻井液技术方案。

**关键词:** 松散破碎性地层; 孔壁失稳; 微生物; CMC无固相钻井液; 固壁作用与机理

**中图分类号:** TE254 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0249-05

## Preliminary study on wall enhancing and mechanism of microbe-CMC solid-free drilling fluid

LI Zhijun, ZHAO Gan, XIANG Haotian, DU Zehua, CHEN Junxiu, LIU Kuo

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Hole wall instability in loose and fractured formations has always been one of the problems that plagued the drilling engineering community. Enhancing this type of formation and improving its mechanical properties are the technical keys to effectively solving the hole wall instability. In this paper, the microbially induced calcium carbonate deposition (MICP) technology is combined with the CMC solid-free drilling liquid phase to construct a microbial-CMC solid-free drilling fluid system. Through core immersion experiment, X-ray diffraction experiment (XRD), and scanning electron microscopy, two microanalysis methods are used to explore the solid wall effect and microbial-CMC solid-free drilling fluid mechanism. The results show that the microbial-CMC solid-free drilling fluid has a more obvious reinforcement effect on loose and fractured formations. The longer the action time, the higher the initial bacterial concentration and the calcium source concentration, the better the wall-fixing effect. In the process of wall solidification, microorganisms penetrate the inside of the sample with the drilling fluid, induce calcium carbonate crystals between the loose particles, fill the pore space, cement the loose particles into a whole, and have a particular mechanical strength to achieve the reinforcement hole The purpose of the wall. The results of this study solve the problem of hole wall instability in loose and fractured formations and explore new drilling fluid technical solutions.

**Key words:** loose and fractured formation; borehole instability; microbe; CMC-solid-free drilling fluid; wall enhancing effect and mechanism

收稿日期: 2021-05-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.041

基金项目: 国家自然科学基金青年基金“微生物无固相钻井液固壁作用与机理研究”(编号: 41702388); 国家创新训练项目“金刚石取心钻探无固相冲洗液超细岩粉清除技术”(编号: 202010616010); 成都理工大学珠峰科学研究计划“青藏高原深部找矿绿色智能钻进关键技术研究”(编号: 80000-2020ZF11411)

作者简介: 李之军, 男, 汉族, 1984年生, 博士, 讲师, 主要从事钻井液及井壁稳定理论与技术科研与教学工作, 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: 李之军, 赵淦, 向浩天, 等. 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用与机理初探[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 249-253.

LI Zhijun, ZHAO Gan, XIANG Haotian, et al. Preliminary study on wall enhancing and mechanism of microbe-CMC solid-free drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 249-253.

## 0 引言

钻探作为探索地球奥秘的主要技术支撑手段,遇到的地层也越来越复杂<sup>[1]</sup>。复杂地层亦称为不稳定地层,属于钻探工程中的难钻进地层,主要包括水敏性地层、破碎性地层、断层等<sup>[2]</sup>。在复杂地层钻进过程中,孔壁失稳的情况时常发生<sup>[3]</sup>,导致钻进效率低,取心效果差,施工成本高<sup>[4]</sup>。既有研究主要针对水敏性泥页岩地层、断层等复杂地层的孔壁失稳问题,却鲜有针对取心钻探中常遇到的破碎性地层的孔壁失稳问题进行研究<sup>[5-6]</sup>。破碎性地层是指受构造应力作用而原本破碎的地层以及在井眼形成后在上覆压力作用下产生的地层,具有裂隙发育、胶结性差、破碎不完整等特点<sup>[7]</sup>。增强松散破碎地层孔壁围岩胶结性,是维持该类地层孔壁稳定的关键。因此,探索一种能提高孔壁围岩胶结性从而稳定钻孔孔壁的钻井液技术,具有积极的理论和现实意义。

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术为解决破碎性地层孔壁失稳提供了借鉴,其主要是利用产脲酶微生物巴氏芽孢杆菌分解尿素生成的碳酸根离子

与钙离子反应最终生成碳酸钙沉淀的过程,其化学反应式表示为<sup>[8-9]</sup>:



本文尝试将MICP技术与地质钻探应用最广泛的无固相钻井液体系相结合,选择巴氏芽孢杆菌作为微生物菌种,基于羧甲基纤维素钠(CMC)无固相钻井液,构建微生物-CMC无固相钻井液体系。通过试样浸泡实验,以试样的渗透系数、碳酸钙生成量以及力学强度为指标,对微生物-CMC无固相钻井液体系的固壁作用进行了初探,并借助X射线衍射实验(XRD)、扫描电镜(SEM)分析探讨了微生物-CMC无固相钻井液体系的固壁作用机理。为解决破碎性地层孔壁失稳探寻新的钻井液技术方案。

## 1 微生物-CMC无固相钻井液体系构建

### 1.1 微生物在CMC无固相钻井液中的适应性研究

本文选用CMC配制无固相钻井液,其流变性能如表1所示。

表1 CMC无固相钻井液流变性能

加量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	表观粘度/(mPa·s)	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa
0.3	1.0	25.1	11.5	9.0	2.6
0.4	1.0	27.5	14.3	10.5	3.8
0.5	1.0	31.1	18.3	13.0	5.4
0.6	1.01	39.0	23.8	17.0	6.9

由表1可知,随着材料加量的增加,无固相钻井液的性能参数也相应发生了改变。将巴氏芽孢杆菌接种至表1所示的CMC无固相钻井液中,并补充相应的营养物质,测定24 h内微生物的菌种数量和脲

酶活性的变化,绘制其生长曲线和脲酶活性曲线,并计算二者的增长率,分析微生物在CMC无固相钻井液中的适应性,选择最适应微生物生长的CMC加量。结果见图1所示。

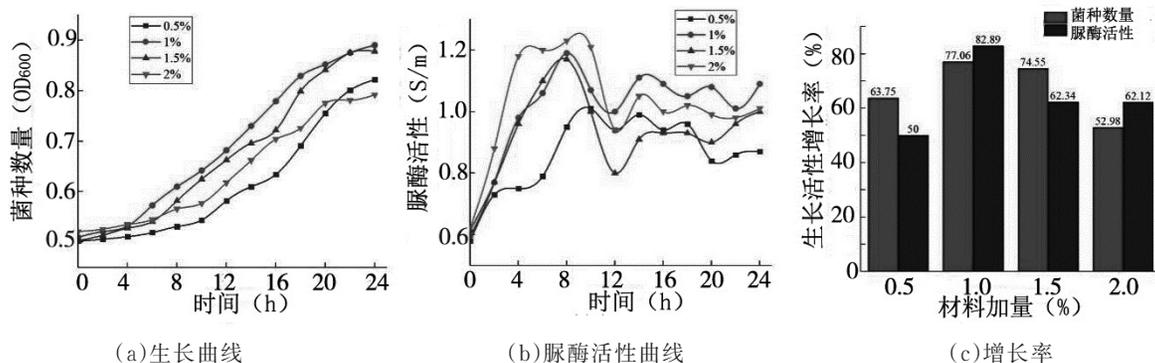


图1 微生物-CMC无固相钻井液的生长情况

由图1可见,在不同浓度的CMC无固相钻井液中,微生物的生长情况并不一样。在CMC浓度为0.4%的钻井液中长势最好,经过24 h的生长,微生物数量的增长率达到了47.5%。微生物脲酶活性也受到CMC浓度的影响,并且在24 h内,脲酶活性处于波动状态。根据MICP技术原理,微生物的脲酶活性越高,越有利于碳酸钙的沉积。综合微生物生长曲线以及脲酶活性曲线,可知微生物在浓度为0.4%的CMC无固相钻井液中的生长情况较好,更加适应微生物的生长。因此,后续研究采用浓度为0.4%的CMC无固相钻井液。

## 1.2 微生物-CMC无固相钻井液体系基本性能

微生物-CMC无固相钻井液体系由微生物菌液和CMC无固相钻井液组成,各材料具体加量见表2。其中尿素、酪蛋白胨、大豆蛋白胨、氯化钠是微生物生长所需要的营养物质。

表2 微生物-CMC无固相钻井液体系的组成

水/ L	尿素/ g	酪蛋白胨/ g	大豆蛋白胨/ g	氯化钠/ g	CMC/ g
1	20	15	5	5	4

测试15 d内该体系流变性能和密度的变化,以评价其稳定性,结果如图2所示。

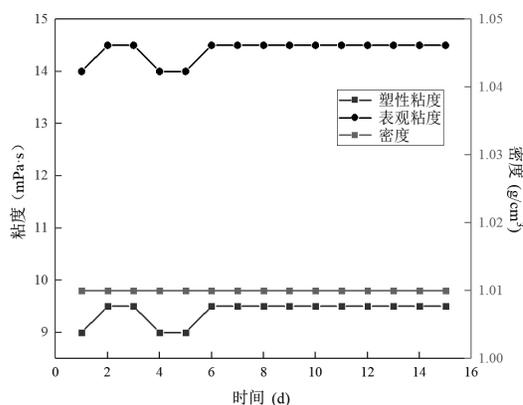


图2 15 d内微生物-CMC无固相钻井液基本性能变化情况

由图2中可见,15 d内,微生物-CMC无固相钻井液体系的表观粘度和塑性粘度都表现出了较好的稳定性。其表观粘度保持在14 mPa·s左右,塑性粘度保持在10 mPa·s左右,密度保持在1.01 g/cm<sup>3</sup>。

## 2 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用研究

用松散砂土模拟破碎性地层,采用浸泡法研究微生物-CMC无固相钻井液的固壁作用,实验示意图如图3所示。以初始菌种浓度、钙源浓度和作用时间为因素,以试样无限抗压强度为指标,实验设计与结果见表3。

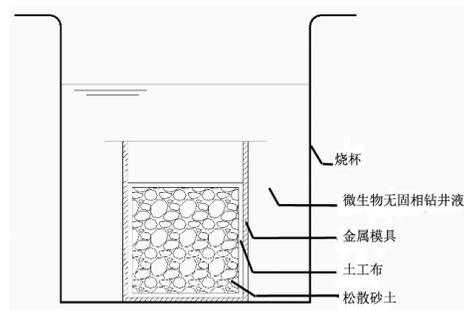


图3 微生物-CMC无固相钻井液固壁实验示意

由表3可知,经过微生物-CMC无固相钻井液作用后,原本松散无胶结的砂土胶结成了整体,并具有了一定的力学强度,平均无侧限抗压强度为0.18 MPa,最高为0.324 MPa。表明微生物-CMC无固相钻井液具有较为明显的提高破碎性地层胶结性和力学性能的作用,有利于破碎性地层孔壁稳定,且作用时间越长,初始菌种浓度越高,钙源浓度越大,其固壁作用越好。

## 3 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用机理研究

基于固壁作用实验研究结果,取微生物-CMC钻井液中固壁效果最好的试样,采用X射线衍射(XRD)、扫描电镜测试(SEM)两种分析测试手段,分析试样在微生物-CMC无固相钻井液作用后的物相成分和微观形貌,浅析其固壁作用机理。

### 3.1 XRD

取试样中的生成物进行分析,XRD图谱如图4所示,并运用Jade 6.5软件对检测样品的物相进行了分析,结果如表4所示。

由图4、表4可知,在25°、30°、40°衍射角附近和50°到60°的衍射角区间内出现了与PDF卡片33-0268的球霏石相对应的特征峰,在20°、30°、45°衍射角附近和55°到65°的衍射角区间内出现了与PDF卡片05-0586的方解石相对应的特征峰,在30°、45°、55°衍射角附近出现了与PDF卡片51-1167的碳化钙相对应的特征峰。

表3 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用实验结果

组号	反应时间/h	钙源浓度/ (mol·L <sup>-1</sup> )	初始菌种浓度/ (OD <sub>600</sub> )	无侧限抗压 强度/MPa
1	6	0.2	0.6	0.13
2	6	0.4	0.2	0.142
3	6	0.6	0.4	0.154
4	6	0.2	0.2	
5	6	0.8	0.4	0.168
6	12	0.6	0.2	
7	12	0.8	0.4	0.168
8	12	0.4	0.2	0.142
9	12	0.2	0.6	0.176
10	12	0.2	0.4	0.188
11	24	0.4	0.6	0.188
12	24	0.2	0.4	0.152
13	24	0.6	0.2	0.196
14	24	0.2	0.4	0.188
15	24	0.8	0.2	0.174
16	48	0.2	0.4	0.188
17	48	0.8	0.2	0.248
18	48	0.2	0.2	0.154
19	48	0.4	0.4	0.224
20	48	0.6	0.6	0.268
21	72	0.8	0.6	0.292
22	72	0.6	0.4	0.324
23	72	0.2	0.2	0.196
24	72	0.2	0.2	0.188
25	72	0.4	0.4	0.264

表4 生成物的物相组成

物相名称	球霏石 (Vaterite)	方解石 (Calcite)	碳化钙 (Calcium carbide)
化学式	CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaC <sub>2</sub>
含量/%	94.72	2.24	2.04

### 3.2 电镜扫描(SEM)

取微生物-CMC无固相钻井液作用后无侧限抗压强度最高的试样进行SEM扫描电镜分析,如图5所示。

由图5可以看出,试样中生成的碳酸钙主要为大小不一的球形晶体,从形态上可以分析得出该条件下生长的碳酸钙晶体为球霏石。从图5(a)中可知,碳酸钙颗粒整体均匀分布,以大型球形晶体零散分布,小型球形晶体均匀分布的形式存在。在具有

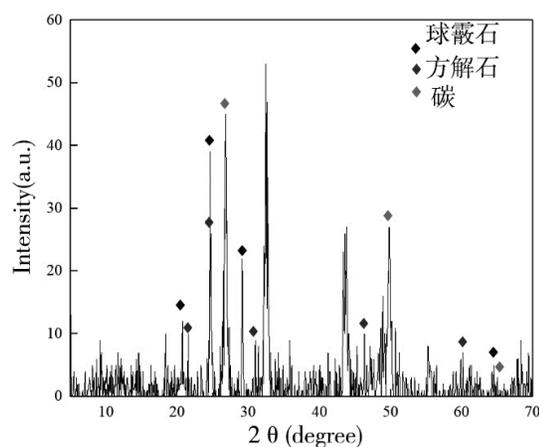


图4 生成物的XRD图谱

最佳固壁效果条件下,充足的生长时间保证了微生物-CMC无固相钻井液在试样孔隙中的渗透过程充分完成,微生物得以均匀分布。而钙源浓度和初始菌种浓度较高,则为MICP作用提供了良好的反应条件,碳酸钙沉积过程会以微生物的晶核作为作用中心,在晶核周围不断沉积富集,从而形成了碳酸钙晶体的均匀分布。从图5(b)可知,碳酸钙晶体之间间距小,贴合紧密,足以在试样颗粒间形成胶结网络,提高砂土颗粒之间胶结性的同时减小岩心内部的孔隙空间,从而提高岩心的物理力学强度。从图5(c)、(d)中可知,碳酸钙晶体的直径大者能达到22.61 μm,这一数值符合Al Qanany<sup>[10]</sup>研究所得结果。但小者仅为6.33 μm,初步推断,在无固相钻井液环境中,碳酸钙沉积过程受到抑制,小型球形晶体直径无法超过10 μm,碳酸钙晶体形成的完整程度不充分。

### 3.3 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用机理

结合XRD和SEM分析结果可知,经过微生物-CMC无固相钻井液作用后,试样内生成物的主要成分是碳酸钙晶体,其晶体晶型包括球霏石和方解石,球霏石占比为93%左右,方解石占比在3%左右,生成的碳酸钙晶体均匀分布于岩心松散土颗粒之间,在颗粒之间形成网状结构,以填充颗粒孔隙空间。

微生物无固相钻井液固壁的作用机理如图6所示,其中图中褐色部分代表试样的松散砂土颗粒,绿色部分代表微生物-CMC无固相钻井液中的巴氏芽孢杆菌,蓝色部分代表微生物-CMC无固相钻井液作用后生成的碳酸钙。图6(a)是微生物-CMC无固相钻井液作用之前孔隙发育的松散岩心试样,图

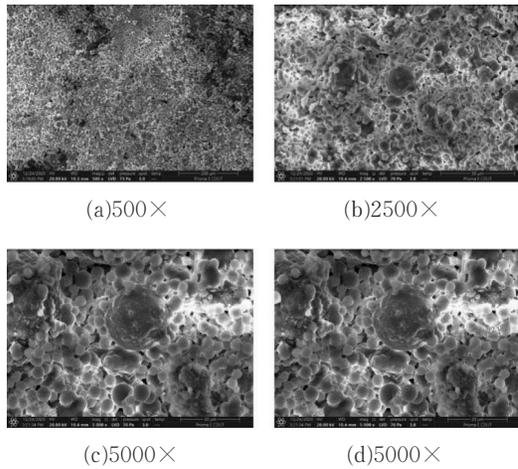


图5 试样中生成碳酸钙的微观形貌

6(b)是作用开始时微生物-CMC无固相钻井液渗流进入岩心试样内部后,微生物在孔隙之间分布和生长,图6(c)是经过微生物-CMC无固相钻井液作用完成后,微生物在岩心孔隙之间生成碳酸钙晶体并填充孔隙空间,将松散岩心胶结为一个整体,从而达到固壁的作用。

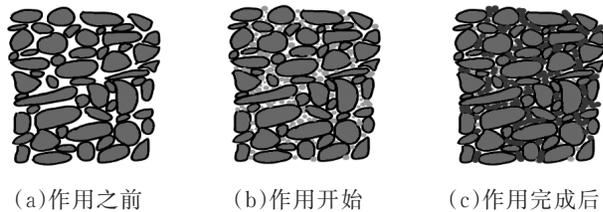


图6 微生物-CMC无固相钻井液固壁作用机理示意

微生物-CMC无固相钻井液固壁的作用机理,本质上是基于微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)作用,在松散破碎地层的钻探过程中,微生物在钻井液在循环过程中进入松散土体间隙中,借助钻井液提供的生长环境和营养源、钙源,在孔隙间形成具有胶结性质的碳酸钙晶体,将破碎地层中的松散土体胶结为一个整体并提高整体力学性能,达到加固松散破碎性地层孔壁围岩的目的。

#### 4 结论

本文将微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术与

CMC无固相钻井液相结合,构建微生物-CMC无固相钻井液体系,并对其固壁作用与机理进行了初探,取得了如下几点结论:

(1)通过检测微生物在CMC无固相钻井液中的生长情况,优选出适合微生物生长的CMC加量为0.4%,由此构建微生物-CMC无固相钻井液体系,该体系在15 d内保持基本性能稳定。

(2)微生物-CMC无固相钻井液体系对松散破碎性地层具有较明显的固壁作用,且作用时间越长,初始菌种浓度越高,钙源浓度越大,其固壁作用越好。

(3)微生物-CMC无固相钻井液的固壁作用的本质是微生物随钻井液在进入松散土颗粒孔隙后,在颗粒孔隙内生成具有胶结性质的碳酸钙晶体,填充孔隙空间,并松散土体胶结成为一个整体,提高土体物理力学性能,从而达到固壁作用的目的。

#### 参考文献:

- [1] 牛军辉. 松散软及破碎地层绳索取心钻具的研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [2] 朱祥富. 钻探工程中的复杂地层钻进技术探讨[J]. 科技与企业, 2012, (18): 160.
- [3] 张健松, 刘永升, 李之军, 等. 地质钻探复杂地层固壁堵漏新工艺[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 819-825.
- [4] 张伟. 科学深孔复杂地层钻进技术难题与对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 7-12.
- [5] 王稳石, 张恒春, 闫家. 科学超深井硬岩取心关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 9-12.
- [6] 杜兴隆. 煤层气井壁稳定与防塌钻井液研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [7] 胡继良, 陶士先, 纪卫军. 破碎地层孔壁稳定技术的探讨与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(9): 30-32.
- [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(北京), 2014.
- [9] 郝小虎, 张家广, 李珠, 等. 基于巴氏芽孢杆菌矿化沉积的再生骨料改性试验研究[J]. 混凝土, 2018, 10: 70-73.
- [10] Ahmed Al Qabany, Kenichi Soga, Carlos Santamarina. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992-1001.