

高温产乳化剂菌原位生长下的微观驱油机理

宋永亭,李彩凤*,冯云,刘涛,曹嫣嫔

(中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院,山东东营257000)

摘要:以高温产乳化剂菌嗜热脂肪地芽孢杆菌SL-1为对象,研究该菌株的生长和界面趋向性,同时利用微观仿真可视模型,研究SL-1菌对水驱后残余油的驱替作用和机理。结果表明:该菌具有嗜烃性能,在高温(65℃)和高压(10MPa)复合极端环境中,SL-1菌能够以原油为唯一碳源进行繁殖代谢,降解原油;代谢产生的生物表面活性剂具有乳化原油和改变岩石润湿性的作用,残余油被乳化分散成油滴;此外,该菌可降低油水界面张力和原油粘度,改善残余油的流变性。膜状残余油、柱状残余油以及盲端残余油等不同类型的残余油都能被有效驱替,最终提高原油采收率为12.84%。

关键词:产乳化剂菌 烃降解 生长代谢 界面特性 微观驱油 提高采收率

中图分类号:TE357.9

文献标识码:A

Microscopic oil displacement mechanism of thermophilic bioemulsifier-producing bacteria in-situ growing

SONG Yongting, LI Caifeng, FENG Yun, LIU Tao, CAO Yanbin

(Institute of Petroleum Engineering, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: The thermophilic bioemulsifier-producing bacteria, *Geobacillus stearothermophilus* SL-1, was chosen as target species to study growth characteristics and tendency on interface. Simultaneously, the experiment of the displacement effect and mechanism of residual oil after water flooding with strain SL-1 were carried out by microscopic simulation visual model. The results reveal that *Geobacillus stearothermophilus* SL-1 has hydrocarbon degradation activity using crude oil as sole carbon source. Under compound extreme environment of high temperature (65 °C) and high pressure (10 MPa), SL-1 bacteria can multiply and metabolize with crude oil so as to degrade oil; biosurfactants produced from the bacteria can emulsify crude oil, change rock surface wettability and disperse residual oil emulsion to oil drops; the oil-water interfacial tension and viscosity of crude oil can be reduced effectively, and the rheology of residual oil may be improved. All kinds of residual oil such as membrane residual oil, columnar residual oil and blind end residual oil have been displaced effectively. At last the oil recovery rate was increased by 12.84%.

Key words: bioemulsifier-producing bacteria; hydrocarbon degradation; growth metabolism; interface behavior; microscopic oil displacement; enhance oil recovery

微生物采油技术主要是利用微生物自身在油藏中的活动、微生物的代谢作用以及代谢产物与油藏中岩石、流体的作用来提高原油采收率^[1-6]。中国各油区发育的油藏类型多样,油藏温度主要为50~100℃,高温油藏分布广泛。胜利油区微生物采油技术资源潜力分析结果表明,适合微生物采油的地质

储量为 $10.7 \times 10^8 \text{ t}^{[7]}$,其中55℃以上的中高温油藏的原油地质储量占88.5%。前期室内实验和矿场试验表明,微生物乳化原油是微生物采油的一个重要机理^[8-13],因此高温产乳化剂微生物成为中高温油藏环境中一类重要的驱油功能菌,在驱油过程中具有举足轻重的作用^[14-18]。随着微生物被激活,注入油

收稿日期:2017-12-26。

作者简介:宋永亭(1976—),男,山东济南人,高级工程师,博士,从事石油微生物技术研究与应用工作。联系电话:(0546)8558999, E-mail: songyongting.slyt@sinopec.com。

*通讯作者:李彩凤(1981—),女,山东寿光人,副研究员,博士。联系电话:(0546)8557248, E-mail: fengr66@163.com。

基金项目:国家“863”计划“中高温油藏微生物驱油技术研究”(2013AA064401)。

藏中的营养体系不断被消耗,葡萄糖、蔗糖等速效碳源很快被代谢利用,其中能以原油为唯一碳源生长代谢的嗜烃微生物在激活中后期占主导地位,该菌是微生物驱替水驱后残余油的一个研究重点^[19-23]。目前,中国关于高温产乳化剂菌的微观驱油机理研究较少,其中以原油为唯一碳源原位生长的高温产乳化剂菌的微观驱油机理研究还未见报道。

笔者前期从胜利油区油水样品中分离得到一株高温产乳化剂菌——嗜热脂肪地芽孢杆菌 SL-1。研究显示,该菌最适宜的生长温度为 65~70℃,具有优良的乳化原油能力和驱油性能^[24]。在该菌嗜烃特性研究的基础上,利用微观仿真可视模型,对以原油为唯一碳源原位生长的 SL-1 菌的驱油过程进行研究,同时将该菌对不同残余油的作用过程及效果进行追踪研究,揭示嗜烃微生物在高温、高压油藏环境中的驱油机理,为乳化功能菌在中高温油藏的现场应用进而提高原油采收率提供指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验器材

原油来源于胜利油区沾3区块,该区块油藏埋深为 1 240~1 360 m,原始油藏温度为 63℃,地层水总矿化度为 7 000~10 000 mg/L。菌种来源于胜利油田石油工程技术研究院微生物中心保存的 *Geobacillus stearothermophilus* SL-1 菌。微观实验中驱替水采用过滤后的地层水,原油为沾3区块脱水脱气原油添加适当比例煤油配制成的模拟油。无机营养体系由质量浓度为 1 g/L 的 NH_4Cl 、质量浓度为 2.7 g/L 的 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和质量浓度为 1 g/L 的 KH_2PO_4 组成,pH 值约为 7.16。

实验所用的微观仿真可视模型是一种透明的二维平面模型,其长和宽皆为 6.5 cm(图1)。孔隙结构特征符合胜利油区岩心薄片的真实孔隙系统,在

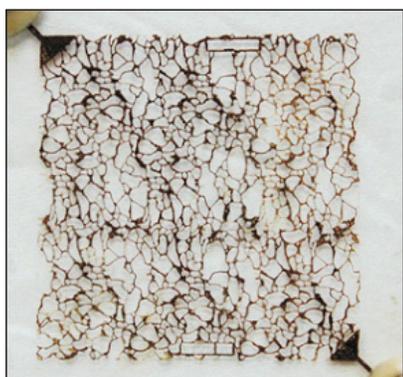


图1 微观仿真可视模型

Fig.1 Microscopic simulation visual model

模型的2个对角处分别打一小孔,模拟注入井和采出井。高温高压微观驱油实验装置(图2)由驱替泵、温度控制系统、微观仿真可视模型(图1)、图像显示器等组成。应用该装置,可进行压力在 25 MPa 以下、温度在 150℃ 以下的各种微观实验,研究高温高压条件下微生物对水驱后残余油的作用机理。

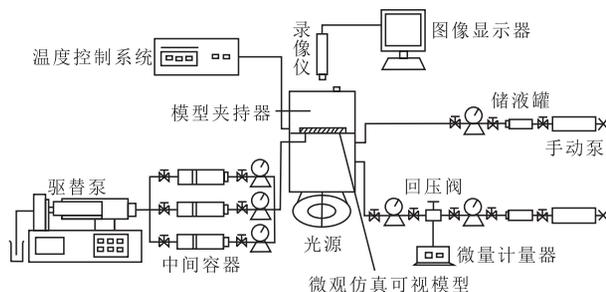


图2 高温高压微观驱油实验装置

Fig.2 Microscopic oil displacement experiment device under high temperature and high pressure

1.2 实验方法

1.2.1 细菌培养

将 *Geobacillus stearothermophilus* SL-1 菌接种于无机营养体系中,并添加质量分数为 2% 的沾3区块脱水脱气原油,以原油为唯一碳源进行生长,高温(65℃)下震荡培养不同时间,取样进行细菌浓度检测。

1.2.2 界面趋向性测试

将沾3区块原油滴于灭菌双凹载玻片的左端凹槽,SL-1 菌发酵液滴于右端凹槽,使载玻片的剩余空间充满。在室温下放置一段时间后,显微镜下观察油水界面处的微生物运移和富集情况。

1.2.3 高温高压微观驱油实验

高温高压微观驱油实验步骤包括:①确定微观仿真可视模型的重点观察区域,安装模型。②加热至 65℃,将地层水注入模型。③注入模拟油,直到模型饱和模拟油。④以 0.08 mL/min 的速度进行一次水驱,至约 1.3 PV 后停止注入水。⑤注入 0.8 PV 无机营养体系制备的 SL-1 菌体悬浮液,缓慢增加回压,直到压力升高至 10 MPa 时,出入口压力、环压和回压值达到一致。⑥关闭模型出入口阀门,将模型在 65℃ 和 10 MPa 的环境下封闭培养 14 d,期间观察孔道内残余油状态的变化。⑦进行后续二次水驱,拍摄照片,采用图像处理技术对图片进行分析,根据像素灰度值得到油像素所占图像像素的比值,计算驱替效率。

空白对照实验步骤同上,所不同的是进行到步骤④一次水驱后,不注入无机营养体系制备的 SL-1 菌体悬浮液,直接将压力升高到 10 MPa。

2 实验结果与讨论

2.1 嗜烃特性

2.1.1 细菌以原油为唯一碳源生长

将SL-1菌接种于以原油为唯一碳源的无机营养体系中,高温培养不同时间后取样进行镜检。由细菌浓度(图3)可以看出,细菌发酵培养5 d后,细菌浓度达到 3×10^8 个/mL,SL-1菌可以原油为唯一碳源较好地生长繁殖,由此可见该菌具有一定的嗜烃特性。

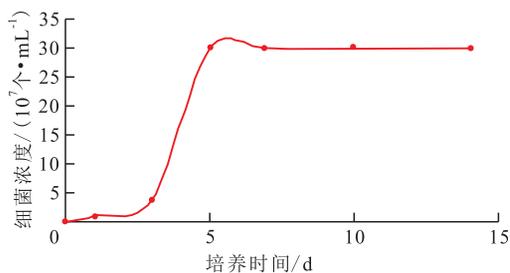
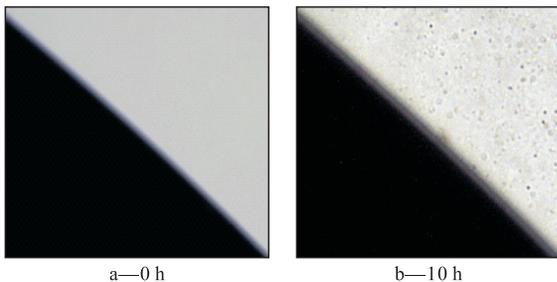


图3 以原油为唯一碳源生长的SL-1菌浓度

Fig.3 Concentration of SL-1 strain using oil as sole carbon source

2.1.2 细菌的界面趋向性

由图4可知,初始油水界面处基本没有微生物的存在,但是随着时间延长,在油水界面处SL-1菌浓度增大,10 h后达到 2.6×10^8 个/mL左右,推测左端凹槽的原油对右端凹槽中的微生物形成了一定的诱导作用,使得右端凹槽中的微生物通过中间的通道向左端的油水界面处定向缓慢移动,表明SL-1菌具有在油水界面富集的特点,这有利于具有乳化功能的微生物更好地与油藏残余油进行接触,充分发挥嗜烃特性,提高微生物与残余油的作用效果。



a—0 h b—10 h

图4 SL-1菌的油水界面运移

Fig.4 Migration of SL-1 strain on oil-water interface

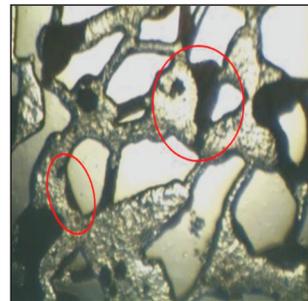
2.2 不同残余油的微观驱油机理

微观仿真可视模型饱和原油后进行一次水驱,空白对照水驱结束后模型内滞留大量的残余油,孔隙内以膜状残余油和簇状残余油为主,垂直于水流方向的喉道上滞留较多的柱状残余油。二次水驱后,部分柱状残余油和簇状残余油被驱替出来,但

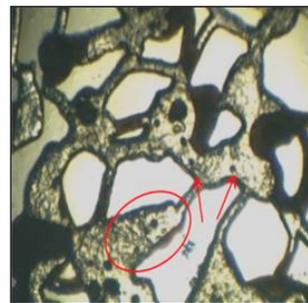
在水波及不到的区域,这2种形态的残余油仍然大量存在,同时,膜状残余油和盲端残余油几乎没有变化。

2.2.1 膜状残余油

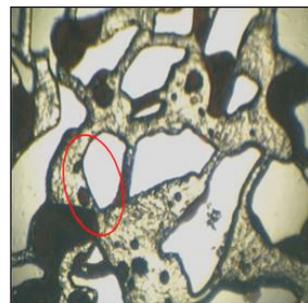
膜状残余油位于孔隙、喉道的内壁,是油湿孔隙介质中最常见的一种残余油形式,具有很高的流动阻力。由图5可以看出,在高温、高压环境下SL-1菌可以利用原油为唯一碳源进行生长,部分原油被分解,培养5 d后,孔道出现了小油滴。随着培养时间的延长,乳化油滴增多,推测细菌的油水界面趋向性使其分泌的生物乳化剂产物在油水界面处不断积累,形成了界面张力梯度,引起Marangoni对流,从而使残余油剥离,因乳化产生油滴^[25-26]。原油在细菌代谢作用后可以被乳化成粒径较小的水包油滴,提高了洗油效率。



a—初始状态



b—培养第5天



c—培养第12天

图5 膜状残余油变化过程

Fig.5 Process of change in the membrane residual oil

2.2.2 柱状残余油

柱状残余油是指被封闭在细喉道中的残余油。培养初期,喉道内的原油形态未发生明显变

化,随着培养期延长,以原油为唯一碳源的SL-1菌进行繁殖代谢,喉道内的细菌代谢产物逐渐积累。培养第10天,细喉道内的原油断裂。在生物乳化剂的作用下,孔隙内的油水界面张力降低,致使残余油内聚力降低,因此残余油容易变形,被拉长、拉丝,并且在孔隙壁的剪切作用下逐渐断裂(图6)。

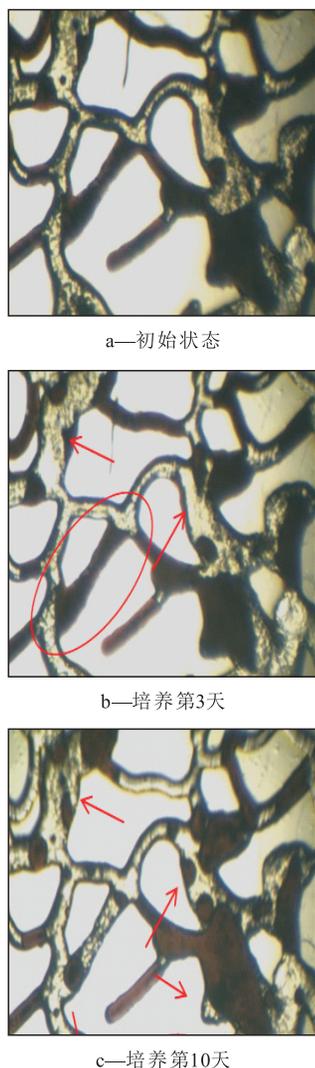


图6 柱状残余油变化过程

Fig.6 Process of change in the columnar residual oil

2.2.3 盲端残余油

由于盲端不具备流动条件,水驱时对其波及范围很小,因此盲端中将留有一定量的角状残余油。由图7可见,SL-1菌在培养阶段对盲端残余油有较好的剥离效果。注入微生物后,由于微生物嗜烃特性,油水界面处聚集较多的微生物,微生物向原油内部扩散、增殖。在微生物和代谢产物共同作用下,孔隙壁湿润反转,致使壁上的盲端残余油脱离,粘滞在孔隙介质表面的油膜产生卷起现象,残余油逐渐从盲端孔隙中剥离开。随着培养时间的延长,原油与孔隙壁的接触角变大,盲端残余油最终被剥离。



图7 盲端残余油变化过程

Fig.7 Process of change in the blind end residual oil

2.3 微观驱油效果定量分析

采用图像处理软件对以原油为唯一碳源生长的SL-1菌的驱油效果进行定量分析。SL-1菌提高采收率幅度达12.84%(表1),说明该菌能够在油藏条件下生长代谢并发挥驱油作用,以原油为唯一碳源原位生长可以较大幅度地提高原油采收率。

表1 以原油为唯一碳源原位生长的SL-1菌的提高采收率值

实验类型	残余油占原始油比例		提高采收率	
	一次水驱	二次水驱	二次水驱	微生物
空白对照	51.54	35.99	15.55	
实验组	52.07	23.68	28.39	12.84

3 结论

对SL-1菌的嗜烃特性及高温高压微观驱油机

理研究表明:SL-1菌为高温产乳化剂菌,可以在以原油为唯一碳源的情况下较好地生长代谢,细菌生长旺盛,发酵培养5 d后其浓度可达 3×10^8 个/mL,具有显著的界面趋向性,有利于该菌与残余油的充分接触,并发生驱替作用。该菌对残余油具有“啃噬”、降解作用,使得膜状残余油减少、变薄;微生物及其代谢产物具有降低油水界面张力、降粘等作用,柱状残余油被有效驱替;由于微生物的界面趋向性和生物乳化剂产物的润湿作用,增大喉道表面与油滴的接触角,促进较难驱替的盲端残余油被剥离。

总之,高温产乳化剂菌SL-1以原油为唯一碳源下能够很好地原位生长繁殖代谢,作用于各种形态的残余油,原油物性得到改善,驱替效率增强,提高采收率幅度达12.84%。研究成果为中高温实际油藏环境中应用乳化功能菌群进行驱油提供了重要指导作用。

参考文献:

- [1] 李蔚,石梅,侯兆伟,等.大庆头台油田微生物驱油先导性矿场试验室内评价研究[J].油田化学,2003,20(2):180-182.
LI Wei, SHI Mei, HOU Zhaowei, et al. Preparatory laboratory researches to pilot trial project on MEOR at Toutai, Daqing[J]. Oil-field Chemistry, 2003, 20(2): 180-182.
- [2] 冯庆贤,杨怀军,NAZINA T N,等.孔店油田本源微生物驱油先导试验研究[J].石油勘探与开发,2005,32(5):125-129.
FENG Qingxian, YANG Huaijun, NAZINA T N, et al. Pilot test of indigenous microorganism flooding in Kongdian Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 125-129.
- [3] LIU J, MA L, MU B, et al. The field pilot of microbial enhanced oil recovery in a high temperature petroleum reservoir [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2005, 48(3): 265-271.
- [4] GAO C H, ZEKRI A. Applications of microbial-enhanced oil recovery technology in the past decade [J]. Energy Sources Part A Recovery Utilization & Environmental Effects, 2011, 33 (10): 972-989.
- [5] 袁志华,冯永杰,余家朝.金昌油子洼地区微生物评价应用研究[J].特种油气藏,2014,21(6):6-9.
YUAN Zhihua, FENG Yongjie, SHE Jiachao. Microbiology evaluation and application in Jinchang Youziwa area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 6-9.
- [6] 曹功泽,徐登霆,张绍东,等.胜利油田沾3断块内源微生物现场激活试验及分析[J].石油天然气学报,2012,34(7):136-140.
CAO Gongze, XU Dengting, ZHANG Shaodong, et al. Experiment and analysis of indigenous microbe activation in Block Zhan3 in Shengli Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 136-140.
- [7] 孙磬磬.胜利油田微生物驱油现场实践及分析[J].石油天然气学报,2014,36(2):149-152.
SUN Sangdun. Field practice and analysis of MEOR in Shengli Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(2): 149-152.
- [8] 曹功泽,巴燕,刘涛,等.沾3区块内源微生物驱油现场试验[J].特种油气藏,2014,21(1):145-147.
CAO Gongze, BA Yan, LIU Tao, et al. Field pilot test of indigenous microbial flooding in Block Zhan-3 [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 145-147.
- [9] 李彩凤,徐闯,冯云,等.以稠油为唯一碳源的降解菌株的筛选与评价[J].河北大学学报:自然科学版,2014,34(4):405-409.
LI Caifeng, XU Chuang, FENG Yun, et al. Screening and evaluation of degrading bacteria using heavy oil as sole carbon source [J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2014, 34(4): 405-409.
- [10] 李彩凤,高光军,张绍东,等.高温产生物表面活性剂菌种的筛选及性能评价[J].湖南师范大学自然科学学报,2013,36(2):73-77.
LI Caifeng, GAO Guangjun, ZHANG Shaodong, et al. Screening and evaluation of a thermophilic biosurfactant-producing bacteria [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2013, 36(2): 73-77.
- [11] 陈星宏,王磊,刘彩青,等.微生物驱油复合菌性能评价及其应用[J].大庆石油地质与开发,2016,35(2):92-96.
CHEN Xinghong, WANG Lei, LIU Caiqing, et al. Performances evaluation and application of the more complex bacteria [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 92-96.
- [12] YOUSSEF N, SIMPSON D R, MCINERNEY M J, et al. In-situ lipopeptide biosurfactant production by *Bacillus* strains correlates with improved oil recovery in two oil wells approaching their economic limit of production [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 81(5): 127-132.
- [13] 崔庆锋.新疆典型油藏内源微生物激活及驱油机理研究[D].廊坊:中国科学院大学(渗流流体力学研究所),2014.
CUI Qingfeng. Activation on indigenous microorganism and its displacement mechanism of typical reservoir in Xinjiang Oilfield [D]. Langfang: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics), 2014.
- [14] 王崇阳,蒲万芬,赵田红,等.高温高盐油藏新型表面活性剂微球复配体系调驱实验[J].油气地质与采收率,2015,22(6):107-111.
WANG Chongyang, PU Wanfen, ZHAO Tianhong, et al. Flooding experiment of new surfactant-microspheres system in high temperature and high salinity reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 107-111.
- [15] 冯庆贤,向廷生,NAZINA T N,等.高温油藏内源微生物及其提高采收率潜力研究[J].微生物学通报,2008,35(4):496-501.
FENG Qingxian, XIANG Tingsheng, NAZINA T N, et al. Potential investigations of indigenous microbiological properties and its enhanced oil recovery high-temperature horizons [J]. Microbiology, 2008, 35(4): 496-501.
- [16] 薛峰,刘瑾.喜热嗜油芽胞杆菌产生的生物乳化剂的组成与性

- 质[J].微生物学杂志,2009,29(1):50-54.
- XUE Feng, LIU Jin.Components and properties of a bioemulsifier from *Geobacillus thermoleovorans* [J].Journal of Microbiology, 2009,29(1):50-54.
- [17] 徐爽,黄志勇,路福平,等.高温产生物乳化剂菌的筛选及其功能分析[J].科技导报,2011,29(15):52-57.
- XU Shuang, HUANG Zhiyong, LU Fuping, et al.Screening bioemulsifier-produced microorganisms and its function analysis[J]. Science & Technology Review, 2011,29(15):52-57.
- [18] WANG L, TANG Y, WANG S, et al.Isolation and characterization of a novel thermophilic *Bacillus* strain degrading long-chain *n*-alkanes[J].Extremophiles Life Under Extreme Conditions, 2006,10(4):347-356.
- [19] 王凤兰,王晓东.喜热嗜油芽胞杆菌代谢产生表面活性剂的研究[J].微生物学杂志,2007,27(5):23-28.
- WANG Fenglan, WANG Xiaodong.Study on physico-chemical properties of the biosurfactant produced by *Geobacillus thermoleovorans*[J].Journal of Microbiology, 2007,27(5):23-28.
- [20] 杨勇,胡罡,田选华.水驱油藏剩余油再富集成藏机理[J].油气地质与采收率,2015,22(4):79-86.
- YANG Yong, HU Gang, TIAN Xuanhua.Reservoir forming mechanism of remaining oil re-enrichment in water flooding reservoir [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4):79-86.
- [21] 唐赟,冯露,刘沐之,等.嗜热解烃菌 NG80-2 的鉴定及其特性[J].南开大学学报:自然科学版,2006,39(2):46-50.
- TANG Yun, FENG Lu, LIU Muzhi, et al.Identification and characters of thermophilic desmolysing bacteria NG80-2[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2006, 39(2):46-50.
- [22] CHAMKHA M, MNIF S, SAYADI S.Isolation of a thermophilic and halophilic tyrosol-degrading *Geobacillus* from a Tunisian high-temperature oil field [J].Fems Microbiology Letters, 2008, 283(1):23-29.
- [23] 夏文杰,董汉平,俞理,等.一株耐温耐盐烃降解菌 *Geobacillus* sp.XDF-4 性能[J].化工学报,2010,61(11):2951-2959.
- XIA Wenjie, DONG Hanping, YU Li, et al.Characterization of a thermophilic and halotolerant strain *Geobacillus* sp. XDF-4[J].CI-ESC Journal, 2010,61(11):2951-2959.
- [24] 曹嫣缤,刘涛,李彩凤,等.一株嗜热脂肪地芽孢杆菌的驱油性能及机理[J].应用与环境生物学报,2015,21(6):1060-1064.
- CAO Yanbin, LIU Tao, LI Caifeng, et al.Efficiency and mechanism of oil displacement by a strain of *Geobacillus stearothermophilus* [J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015,21(6):1060-1064.
- [25] 汪洋,陈杰,王智慧,等.多相传质过程中的 Marangoni 效应[J].化工学报,2013,64(1):124-132.
- WANG Yang, CHEN Jie, WANG Zhihui, et al.Marangoni effect accompanying mass transfer processes in multiphase systems [J].CIESC Journal, 2013,64(1):124-132.
- [26] 朱维耀,夏小雪,郭省学,等.高温高压条件下油藏内源微生物微观驱油机理[J].石油学报,2014,35(3):528-535.
- ZHU Weiyao, XIA Xiaoxue, GUO Shengxue, et al.Microscopic oil displacement mechanism of indigenous microorganisms under high-temperature and high-pressure conditions in reservoirs [J].Acta Petrolei Sinica, 2014,35(3):528-535.

编辑 刘北羿

(上接第89页)

- [19] 乐园,李秀清,白蓉,等.川中公山庙油田大安寨段致密储层特征研究[J].天然气勘探与开发,2014,37(4):7-9,13.
- LE Yuan, LI Xiuqing, BAI Rong, et al.Characteristics of tight reservoir in Daanzhai member, Gongshanmiao oilfield, central Sichuan basin [J].Natural Gas Exploration & Development, 2014, 37(4):7-9,13.
- [20] 何冰,胡明,罗玉宏,等.川中李渡—白庙地区大安寨段湖相碳酸盐岩油藏裂缝发育特征分析[J].复杂油气藏,2010,3(1):23-27.
- HE Bing, HU Ming, LUO Yuhong, et al.Analysis of the fracture characteristics of lacustrine carbonates-reservoir of Da'anzhai segment in Lidu-Baimiao area, middle Sichuan [J].Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010,3(1):23-27.
- [21] 陈薇,郝毅,倪超,等.川中下侏罗统大安寨组储层特征及控制因素[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(5):7-14.
- CHEN Wei, HAO Yi, NI Chao, et al.Reservoir characteristics and controlling factors of Da'anzhai Member in Lower Jurassic, Central Sichuan [J].Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013,35(5):7-14.
- [22] 陈世加,张焕旭,路俊刚,等.四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素[J].石油勘探与开发,2015,42(2):186-193.
- CHEN Shijia, ZHANG Huanxu, LU Jungang, et al.Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China [J].Petroleum Exploration and Development, 2015,42(2):186-193.
- [23] 田泽普,宋新民,王拥军,等.考虑基质孔隙特征的湖相致密灰岩类型划分——以四川盆地中部侏罗系自流井组大安寨段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(2):213-224.
- TIAN Zepu, SONG Xinmin, WANG Yongjun, et al.Classification of lacustrine tight limestone considering matrix pores or fractures: A case study of Da'anzhai Member of Jurassic Ziliujing Formation in central Sichuan Basin, SW China [J].Petroleum Exploration and Development, 2017,44(2):213-224.

编辑 常迎梅