



Advances in Enhanced Oil Recovery



提高原油采收率新进展

Advances in Enhanced Oil Recovery

侯吉瑞 主 编

康万利 赵凤兰 副主编

白宝君 主 审



化学工业出版社



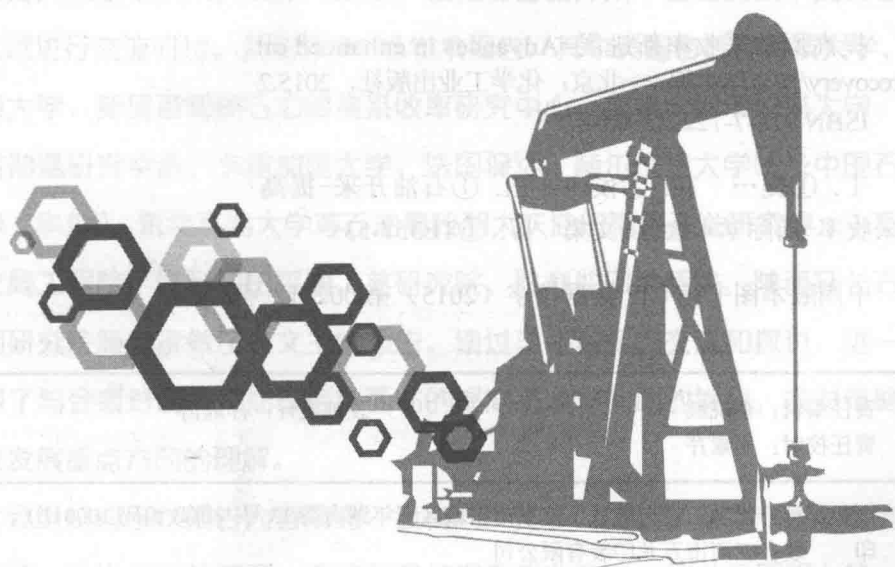
提高原油采收率新进展

Advances in Enhanced Oil Recovery

侯吉瑞 主 编

康万利 赵凤兰 副主编

白宝君 主 审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是中国石油大学(北京)于2014年承办的EOR国际会议精选论文集。书中选录了来自石油企业、科研院所及大专院校的优秀研究论文共47篇,充分体现了油田提高采收率相关技术的新进展及应用、化学驱油技术、堵水调剖技术、稠油开采等EOR技术中面临的技术挑战等重大议题与研究成果。

本书适合从事石油开采相关领域的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

提高原油采收率新进展=Advances in enhanced oil recovery/侯吉瑞主编. —北京:化学工业出版社,2015.2
ISBN 978-7-122-22705-8

I. ①提… II. ①侯… III. ①石油开采-提高采收率-国际学术会议-文集 IV. ①TE357-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第002212号

责任编辑:李晓红
责任校对:王素芹

装帧设计:孙远博

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张22³/₄ 字数416千字 2015年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

2014年6月18日至20日,在北京市昌平区中国石油大学(北京)翠宫报告厅隆重召开了2014年EOR国际会议(EOR 2014),中国石油大学(北京)提高采收率研究院首次承办这样大型EOR国际会议。会议由中国石油大学(北京)、美国密苏里科技大学、东北石油大学及延长油田有限责任公司研究院共同主办。来自美国、英国、法国、加拿大等国以及12家国内石油企业、科研院所及大专院校的180多位专家学者参加了大会,收到国内外中英文论文105篇。本书精选了其中的52篇论文。

围绕本次大会主题,与会专家学者就油田提高采收率相关技术的新进展、聚合物提高采收率技术的研究与应用、三元复合驱开采中面临的技术挑战等重大议题进行交流研讨。共安排27场学术报告,其中美国密苏里科技大学、休斯顿大学、新墨西哥州石油提高采收率研究中心,加拿大阿尔伯塔大学、萨斯喀彻温研究中心、卡尔加里大学,法国保达,赫尔瓦特大学以及中国石油大学(华东)、东北石油大学等石油高校和大庆油田勘探开发研究院、中石化西北局工程院、胜利油田采油工艺研究院、胜利油田地质院、陕西延长石油集团研究院等专家做了英文主题报告。通过与会期间的交流和探讨,进一步加深了与会者对国内外油田当前面临的提高采收率问题的挑战、应对策略和未来发展重点方向的理解。

大会组织有序,报告内容前瞻,设有同声传译,得到了与会专家学者的一致好评。此次会议的召开,不仅是我校提高采收率研究院发展历程上的一个里程碑,也是提高采收率研究院开放式发展的又一良好契机。

大会设有论文墙展和博士生论坛专题,评选了9篇优秀论文。博士生论坛专题有来自主办单位等6所高校共40余名博士生参加了会议,邀请了美国密苏里科技大学的白宝君、加拿大萨斯喀彻温省研究中心的罗鹏、美国休

斯敦大学的秦观、美国路易斯安那大学郭柏云，以及我校教授和油田专家担任评委，对 19 人作的论坛主题发言进行了点评和评比，评选出优秀博士生报告一、二等奖各 6 名奖。

通过主办 EOR 国际会议，增强我校与海内外科研院所、高校和技术公司的合作，为推动提高采收率技术研究的发展，促进国内外提高采收率工作者合作交流作出了积极贡献。

本书的出版旨在进一步传播会议成果，为 EOR 技术人员提供有益素材。

编者

2014 年 12 月

三元复合驱体系化学驱压差对驱替过程的影响	1
黏附性细菌对原油的作用机制及其采油调控研究	6
强碱三元复合体系与原油多次作用分析	12
三元复合体系界面张力、乳化性能与驱油效率相关性定量研究	17
Study on Formula of New Urea-formaldehyde Resin Water Shutoff Agent and its Performance Evaluation	23
聚合物色谱指纹识别技术及浓度检测方法研究	30
原油组分对表面活性剂界面性质影响研究	37
二元驱配方体系评价优化技术研究与应用	45
无碱二元驱用表面活性剂筛选与评价	52
普通稠油油藏深部调驱提高采收率技术研究及应用	58
Research and Application of Active Polymer EOR Technology	64
Research and Application of Water Swelling Microsphere Profile Control Agents	71
Progress and Problems in EOR Method of Carbonate Reservoir in Tahe Oilfield	77
The Influence of ASP Flooding on Reservoir Formation Sensitivity	85
Study on Different Fracturing Fluids' Damage to Permeability of Coal Bed in Liuling Area	91
Mechanism Research of Oil Reservoir In-depth Location Profile Control and Water Plugging Using X-ray CT	98
Review of ASP Flooding in China	107
特稠油大井距水平井 SAGP 预热启动方式优化研究	116
塔河油田多井缝洞单元泡沫驱可视化物理模拟研究	123
聚合物分子尺寸与砾岩油藏孔喉匹配关系	130
泡沫在不同渗透率组合岩心中的驱油效果研究	137
低渗透油藏水-气分散体系提高采收率实验研究	142
Rheological Properties of Welan, Xanthan, Gellan and Their Mixtures: Effects of Inorganic Salts	151
Swelling and Plugging Performance of a Fluorescent Polyacrylamide Microsphere	159
基于 CO ₂ 敏感性凝胶体系的封堵气窜实验	165
致密砂岩模拟双重介质的径向流动实验	172

页岩岩心中气体流动的稳态法实验研究	178
非均相黏弹体复合体系微观驱油机理研究	185
疏水缔合两亲聚合物 B III 流变性及其乳化性能研究	192
预交联凝胶颗粒与地层的配伍性研究	198
Laboratory Research of CAGD for Super-heavy Oil Reservoir	204
One-dimensional Displacement Theory of CO ₂ Immiscible Flooding and Application	213
EOR Progress of Ultralow Permeability Reservoirs in Yanchang Oilfield	219
Experimental Technology and Application of Diversified Thermal Recovery in Heavy Oil Reservoir	226
考虑低渗透岩心裂缝的调堵剂优选方法	234
Study on Effect of Surfactants to Viscoelastic Microspheres Dispersed System	241
Synthesis and Evaluation of High-performance VRS	248
Emulsion Forming Rules of Multi-System Seepage Flow in Porous Media	256
The Evaluation of one O/W Viscosity Degradation by Emulsification System	264
Similarity Theory and Adaptability Analysis of In-Situ Combustion	270
The cooperation evaluation of binary system with reservoir in Jilin Honggang Oilfield	277
非均相黏弹微球驱油体系的稳定性研究	285
Control and Monitor Technology of CCS-EOR Wellbore Risks in Jilin Oil Field	291
Physical Modeling Experimental Study for Vertical Well-Dual Horizontal Well Gravity Water Drainage Assisted Steam Flooding	299
The Applicability Evaluation of Composite Profile System in Low Permeability and Fracture Oil Reservoir	307
The Effect of O/W Emulsion on Oil Recovery of Binary Flooding	313
特低渗透油藏 CO ₂ 驱水气交替注入参数优选的实验研究	320
微生物采油技术在大庆朝阳沟低渗透油田的应用	327
Laboratory Study of Solution Characteristics of a New Type of Polymer for Oil Recovery	334
聚表剂组分分离前后的乳化性能研究	339
Adsorption Procedure of Daqing Vacuum Residua Fractions on Oil/Water Interface as Studied by Means of Wilhelmy Plate Method	344
两种驱油聚合物溶液在多孔介质中的剪切降黏特性	352

三元复合驱体系化学驱压差对驱替过程的影响

李建路, 李安军, 王昊宇, 倪洪涛

大庆油田勘探开发研究院, 大庆, 中国, 163712

摘要: 在三元复合驱体系室内物理模拟实验过程中, 由于化学驱阶段表面活性剂的乳化作用, 造成驱替压力升高, 化学驱压力最高值与水驱压力平衡值之差, 称之为“化学驱压差”。乳化压差对驱替过程中注入压力、采收率、含水率的影响很大。本文利用实验室自制的弱碱烷基苯磺酸盐表面活性剂, 与大庆油田正在使用的石油磺酸盐表面活性剂三元复合驱油体系作对比, 可以看出驱替过程中, 两种表面活性剂三元体系均发生乳化, 但是弱碱表面活性剂三元体系的乳化能力较强, 形成的乳化压差更大, 因此含水率上升较慢, 采收率更高。

关键词: 烷基苯磺酸盐; 石油磺酸盐; 乳化性能; 物理模拟

The Effect of Pressure Difference of ASP Flooding on Displacement Process

Jianlu Li, Anjun Li, Haoyu Wang, Hongtao Ni

Daqing Oilfield Exploration and Development Research Institute, Daqing 163712, China

Abstract: In the laboratory physical simulation experiment of ASP flooding, displacement pressure increases due to surfactant emulsification in the chemical flooding stage. The difference between the peak pressure of chemical flooding and the stabilized pressure of water flooding is called “pressure difference of the emulsion”. The pressure difference of the emulsion has a great effect on injection pressure, recovery factor and water cut. By using laboratory self-made weak alkali alkylbenzene sulfonate surfactants and the petroleum sulfonate surfactant that is being used in Daqing Oilfield, it can be seen in the process of displacement, ASP system of two kinds of surfactant were emulsified, but emulsifying ability of weak alkali surfactant ASP system is stronger. The pressure difference of the emulsion is bigger, so the water cut increases slowly, and recovery factor is higher.

Keywords: alkylbenzene sulfonate; petroleum sulfonate; emulsifying behavior; Physical Simulation

1 引言

大庆油田已进入特高含水开发中后期,三元复合驱技术可以大幅度提高原油采收率^[1]。三元复合驱在“控水稳油”中已成为了最具应用前景的提高采收率技术之一。国内外对三元复合体系的性质已做了大量室内研究^[2-4],尤其是油藏中的乳化对提高采收率所起的作用是近年来研究的焦点^[5,6],人们对这一现象已经进行了一定的研究,但是对于驱替过程中乳化作用所产生的乳化压差、对采出液含水及提高原油采收率的影响,分析较少。本文主要从室内物理模拟方面,开展了相关的研究,这对于油田现场注入过程分析,具有一定的指导意义。

2 实验条件

2.1 实验材料

实验用油为大庆油田采油一厂低酸值脱气脱水原油;聚合物为部分水解聚丙烯酰胺 HPAM,平均相对分子质量分别为 2500×10^4 ;表面活性剂包括弱碱烷基苯磺酸盐(活性组分为 50%)和石油磺酸盐(活性组分为 50%),实验用水为大庆油田采油一厂的注入污水,碱剂(NaOH)是实验室常用的分析纯试剂。

实验装置与仪器包括 TEX-500C 全自动界面张力仪、IKA-WERKE 型电动调速搅拌机、SONY DSC-H50 数码相机和物理模拟驱替试验装置。

所有实验温度均为 45℃。

2.2 实验方法

将岩心测孔隙体积、抽空、饱和地层水、饱和油。先水驱至含水 98%以上,计算水驱采收率,然后根据实验方案进行化学驱,最后水驱至含水 98%以上结束,计算化学驱采收率。

2.3 实验方案

选择渗透率相近的贝雷岩心,在三元复合体系界面张力相近的情况下,按照注入方案:0.3PV 三元(0.3%Sa+1.2%NaOH, 40mPa·s)+0.2PV 后续聚合物段塞(42mPa·s),进行物理模拟实验。

3 实验结果与分析

3.1 物理模拟实验结果

从表 1 贝雷岩心驱油实验可以看出,在三元体系界面张力和岩心渗透率相近的情况下,弱碱烷基苯磺酸盐三元体系具有较高的驱油效率,化学驱提高采收率较石油磺酸盐三元体系平均高 3.55 个百分点。

表 1 贝雷岩心驱油实验

样品名称	岩心编号	孔隙度/%	气测渗透率 /md	含油饱和度/%	水驱采收率 /%	化学驱采收率/%	总采收率/%	化学驱平均采收率/%
弱碱烷基苯磺酸盐	4-4	22.30	309	70.03	35.87	26.63	62.50	29.24
	4-9	22.21	316	70.00	38.44	30.56	69.00	
	4-8	22.26	317	70.85	36.53	30.53	67.06	
石油磺酸盐	4-13	22.71	305	67.80	34.14	26.98	61.12	25.69
	4-18	22.10	317	73.00	37.12	24.93	62.05	
	4-24	22.03	313	72.95	35.63	25.16	60.79	

3.2 两种表面活性剂三元体系采出液对比

从图 1 两种表面活性剂三元体系后续水驱采出液对比可以看出，弱碱烷基苯磺酸盐三元体系的采出液明显比石油磺酸盐三元体系采出液颜色较深，采出液乳化比较严重。这主要是由于弱碱烷基苯磺酸盐三元体系的乳化能力较强，与原油形成的乳化油稳定性强，颜色相对较深。从两种表面活性剂物化性能分析来看，这主要是由于弱碱烷基苯磺酸盐中未磺化油含量低，增溶能力强，因此采出液乳化能力强，而石油磺酸盐中未磺化油含量高，增溶能力弱，采出液乳化能力较弱。

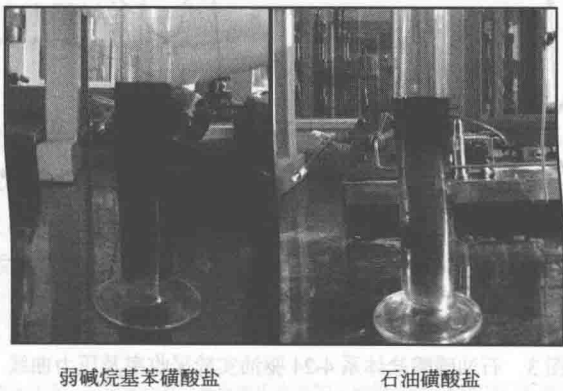


图 1 两种表面活性剂三元体系后续水驱采出液

3.3 两种表面活性剂三元体系采收率及压力曲线

图 2 和图 3 是两种表面活性剂体系驱油实验的采收率、含水率及注入压力曲线。

3.3.1 乳化压差对注入压力的影响

从图 2 和图 3 两种表面活性剂三元体系注入压力曲线可以看出，两种驱油体系化学驱阶段都比水驱阶段注入压力有较大的升高幅度，这是因为两种表面活性剂三元体系均有一定的乳化能力，在转注化学剂段塞后，在岩心中与原油形成乳化，产生乳化压差。

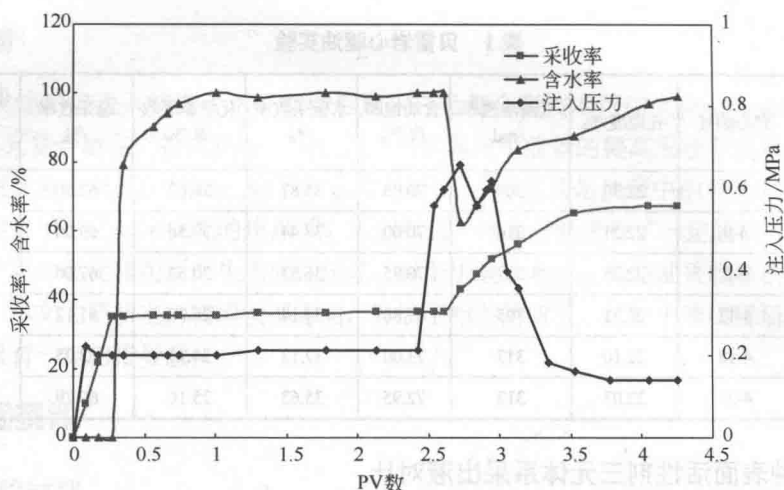


图2 弱碱烷基苯磺酸盐体系4-8驱油实验采收率及压力曲线

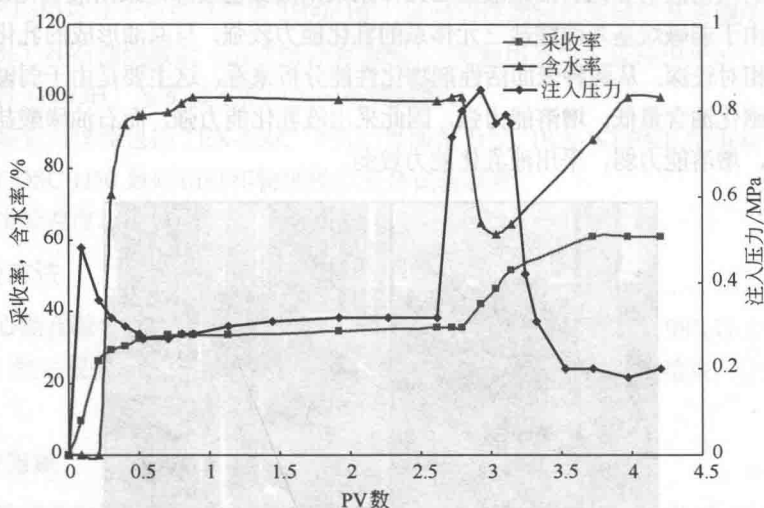


图3 石油磺酸盐体系4-24驱油实验采收率及压力曲线

另外图 2、图 3 对比看出，弱碱烷基苯磺酸盐三元体系化学驱压力最高点达到了 0.66MPa，比水驱平衡压力 0.21MPa 提高了 3.14 倍，而石油磺酸盐化学驱压力最高点为 0.856MPa，比其水驱平衡压力 0.32 提高了 2.66 倍，也就是说在三元体系黏度都相近的情况下，弱碱烷基苯磺酸盐三元体系压力升高幅度比石油磺酸盐三元体系压力升高幅度要大。这是因为弱碱烷基苯磺酸盐三元体系的乳化能力较强，乳化程度较高，形成的乳化压差较大。

3.3.2 乳化压差对采收率的影响

三元驱油体系对原油乳化能力的强弱对采收率有较大的影响，乳化越明显，采收率

相对就越高^[7,8],因此弱碱烷基苯磺酸盐三元体系采收率要高于石油酸盐三元体系。

另外,从图2弱碱烷基苯磺酸盐三元体系采收率曲线可以看出,切换化学驱后,采收率曲线逐步上升,直到注入体积为4.05PV时采收率曲线趋于平稳,不再升高,化学驱阶段整个出油过程持续时间为1.62PV(2.43~4.05PV),也就是说在弱碱烷基苯磺酸盐三元体系在岩心中的作用时间达到了1.62PV。从图3石油磺酸盐三元体系采收率曲线可以看出,切换化学驱后,至采收率曲线不再变化时,化学驱整个出油过程持续时间为1.10PV(2.62~3.72PV)。这就是说,两种三元体系在化学剂注入段塞相同时,在岩心中的作用时间却有很大的不同,很明显弱碱烷基苯磺酸盐三元体系在岩心中作用时间远远长于石油磺酸盐三元体系。这是由于弱碱烷基苯磺酸盐三元体系的乳化能力较强,在岩心中乳化作用较大,乳化程度较高,乳化压差较大,扩大了三元体系的波及体积,提高了洗油效率,因此采收率相对较高。

3.3.3 乳化压差对含水率的影响

从图2和图3两种三元体系含水率曲线变化可以看出,从水驱结束时含水最高点到后续水驱至含水最高点时,弱碱烷基苯磺酸盐用时为1.44PV(2.60~4.04PV),石油磺酸盐为1.17PV(2.80~3.97PV),两种表面活性剂三元体系作用时间也有较大的差别。这主要是弱碱烷基苯磺酸盐乳化压差较大,一方面三元体系的波及体积较大;另一方面三元体系作用时间较长,更多的原油被驱出,驱替前缘的油墙更大,在1.44PV时间里原油被持续驱出,稳油控水的能力较强,而石油磺酸盐乳化能力相对较弱,携带能力较差,驱替突破后,含水即刻上升。

4 结论

- (1) 新型弱碱烷基苯磺酸盐的乳化能力要强于石油磺酸盐,因此形成的乳化压差较大。
- (2) 三元体系的乳化作用形成的乳化压差,延长了化学剂在岩心中的作用时间,对采收率的影响较大。
- (3) 三元体系的乳化压差越大,驱替过程中稳油控水的能力越强。

参考文献

- [1] 王家禄,沈平平,陈永忠等.三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究[J].石油学报,2005,26(5):61-66.
- [2] 刘奕,张子涵,廖广志等.三元复合驱乳化作用对提高采收率影响研究[J].日用化学品科学,2000,23(增刊):124-127.
- [3] 赵长久,赵群,么世椿.弱碱三元复合驱与强碱三元复合驱的对比[J].新疆石油地质,2006,27(6):728-730.
- [4] 张可,秦积舜,王舰等.弱碱ASP体系驱油效果实验研究[J].特种油气藏,2010,17(1):94-97.
- [5] 赵凤兰,岳湘安,侯吉瑞等.ASP体系与大庆原油的乳化作用及影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(3):66-69.
- [6] 李世军,杨振宇,宋考平等.三元复合驱中乳化作用对提高采收率的影[J].石油学报,2003,24(5):71-73.
- [7] 贾忠伟,杨清彦,袁敏等.大庆油田三元复合驱驱油效果影响因素实验研究[J].石油学报,2006,27(增刊):101-105.
- [8] 张立娟,岳湘安,郭振杰.ASP体系与大港和大庆原油的乳化特性研究[J].油气地质与采收率,2010,17(3):74-76.

黏附性细菌对原油的作用机制及其采油调控研究

李蔚¹, 罗庆¹, 李宜强²

¹大庆油田勘探开发研究院, 大庆, 中国, 163712

²中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京, 中国, 102249

Email: liweidq1@petrochina.com.cn; 5508342@sina.com

摘要: 对原油具有黏附作用的采油菌种, 通过细胞外疏水性物质或其他细胞表面组分以及鞭毛的作用在原油/水界面附近黏附聚集, 这种黏附作用对于微生物降解油层中的原油, 进一步产生有利于微生物驱油的机理并提高原油采收率非常重要。从大庆油田采出液样品中进行分离筛选, 得到能以原油为唯一碳源生长的菌株, 对菌种原油趋化性运动进行显微观察和炔黏附实验, 结果表明: 对于原油黏附性菌株, 可通过提高细胞表面疏水性对其进行调控激活; 同时, 外加一定浓度的有机物对菌种趋油性起到明显的促进作用。

关键词: 微生物提高原油采收率 (MEOR); 细菌; 黏附作用; 表面疏水性; 原油趋化性

Studies on Mechanism and Regulation of Adhesive Bacteria to Crude Oil in the Course of MEOR

Wei Li¹, Qing Luo¹, Yiqiang Li²

¹ Exploration and Development Institute of Daqing Oil Field, Daqing, China

² EOR Research Institute of China University of Petroleum (Beijing), Beijing, China

Email: liweidq1@petrochina.com.cn; 5508342@sina.com

Abstract: The bacteria can adhere to the surface of crude oil through physical attributes such as cell-surface hydrophobicity and other cell surface components, as well as the role of flagellum which is of most importance to create the mechanism of microbial flooding and to improve the crude oil recovery. Strains that could grow with crude oil as the sole carbon source was isolated and purified from the production water in Daqing oilfield. The microscopic

observation of chemotactic movement of bacteria and the experiments of hydrocarbon adhesion were investigated in the paper. The results showed that strains of adhesion could be regulated and activated by increasing its cell-surface hydrophobicity. Meanwhile, addition of a certain concentration of organic matter to the bacteria culture played an significant role on the microbial chemotaxis to crude oil.

Keywords: microbial enhanced oil recovery (MEOR); bacteria; adhesive effect; surface hydrophobicity; chemotaxis

1 引言

目前的研究认为,细菌摄取石油烃分为三种方式:一是主动接触摄取比菌体大得多的烃分子;二是靠菌体表面疏水性黏附在石油烃分子/水界面;三是靠自身分泌的生物表面活性物质,将石油烃乳化分散成小液滴供细菌摄取利用。无论是哪种机理,从宏观上看细菌必须大量聚集在石油烃附近,以增加摄取底物的概率,宏观上表现为细菌对原油的趋向性^[1~8]。

本文通过研究黏附作用菌株的原油趋化运动特点及其表面特征对原油趋向性的影响,对黏附作用菌株的趋向性进行调控,从而对微生物细菌降解原油的过程进行调控。

2 材料与方法

2.1 菌株

1507(耐盐短杆菌)、12-J(基内苍白杆菌)、PR-1(红球菌)均分离自大庆油田油水样。

2.2 培养基

LB 液体培养基、无机盐溶液 [KH_2PO_4 0.34%、 Na_2HPO_4 0.15%、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.4%、 MgSO_4 0.007%、pH7.2~7.6]。

2.3 试剂及仪器

PUM 缓冲液、二甲苯、十六烷、十二烷、环己烷、原油(脱水脱气)、分光光度计、莱卡倒置显微镜、恒温培养箱。

2.4 黏附性菌株趋化运动显微观察

选用 LB 液体培养基,菌株 37℃ 恒温培养至对数生长期。取菌液,4000r/min 条件下离心 10min,去除上清液,用无机盐溶液洗涤 2 次,稀释使细胞浓度达到 109CFU/ml。制作微观油水观察片,显微镜下观察并连续摄像记录细菌运动情况。在所滴加的菌液中分别添加不同浓度、不同类型的有机物,观察细菌的运动情况。

2.5 细菌对烃的黏附性实验

待测菌振荡培养至对数期后，离心收集菌体，用 PUM 缓冲液洗涤细胞两次后悬于该缓冲液中。以 PUM 缓冲液为空白，从已调好菌体浓度的菌悬液中取 1.0ml 至 1.5ml 的离心管中，加入 0.20ml 的各种烃（二甲苯、十六烷、十二烷、环己烷）于 25℃ 下温育 5min，剧烈振荡 60s，室温静置分层 15min，用移液器从下层水相中快速取 0.8ml 水溶液到另一支 1.5ml 离心管，以 PUM 缓冲液为空白，测其 400nm 下的 OD 值，测定三次取平均值。细菌的疏水性用 CSH% 来表示， $CSH\% = (AB_i - AB_t) / AB_i \times 100\%$ ，其中 AB_i 为初始菌液的 A 值， AB_t 为终末的 A 值。

3 实验结果与讨论

3.1 黏附作用菌株的原油趋向性特点

实验表明，部分细菌能够黏附在油膜附近，但短时间内在油/水界面附近不容易形成明显的细菌密集带。分析其原因，主要是细菌黏附作用依赖的是细菌与疏水界面间的疏水相互作用力，而这个界面只能容纳一小部分细菌与其疏水性连接，这部分与疏水界面连接的细菌能够更好的生长繁殖，增加了细菌对疏水物质的利用率（图 1）。

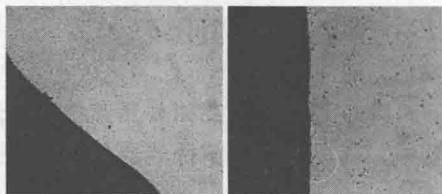


图 1 细菌 PR-1 对原油的黏附作用

3.2 黏附作用菌株的表面疏水性

由图 2 可以看出，菌株 1507 和 PR-1 对各种烃类疏水性很强，其中 PR-1 对四种烃类的 CSH 值都高于 70%，最高可达 90%。实验表明，细菌表面疏水性越强，其对烃的黏附性也越强。

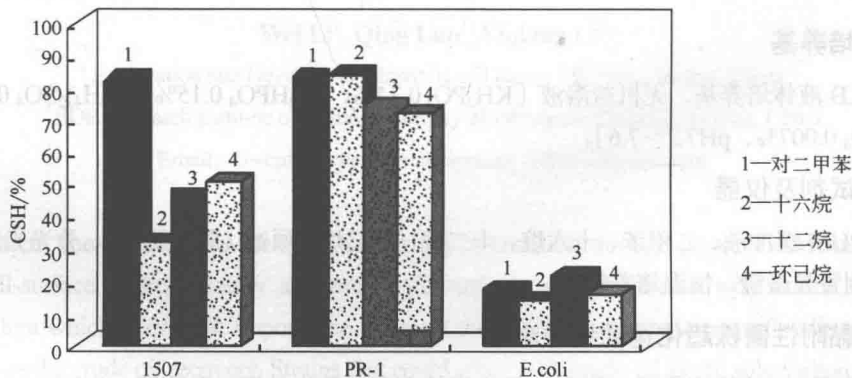


图 2 细菌对原油的表面疏水性实验

3.3 黏附作用菌株的表面特征对细菌原油趋化性的影响

红球菌 PR-1 菌体表面有很强的疏水性，通过提取其表面物质发现，菌体表面被大

量的枝菌酸覆盖，约占抽提物总量的 46%。枝菌酸类物质是保持菌体细胞完整性和疏水性的关键，红球菌本身不运动，它与原油的接触主要依靠外力的作用，细菌表面疏水性物质枝菌酸与原油的黏附能力很强，使红球菌能够近距离接触、乳化、降解原油。

表 1 采油菌疏水性物质-枝菌酸对趋油性的影响

培养时间	趋油速率/(μm/s)	趋向性系数	疏水性(CSH%)/%	枝菌酸种类	枝菌酸含量/%
6h	5~10	0.055	75	C21~C34	23
12h	5~10	0.043	82	C29~C47	29
24h	8~30	0.047	79	C27~C48	38
36h (对数期)	10~45	0.031	82	C26~C55	45
48h (稳定期)	10~50	0.034	84	C27~C54	46
去除枝菌酸	1~5	0.28	16	—	—

将红球菌 PR-1 在 LB 培养基中培养不同时间，分别取出发酵液离心得到菌体细胞，观察不同培养时期趋油性与细胞表面特征变化，结果见表 1。

结果表明，菌体在不同时间、不同趋化性速率条件下，细胞表面枝菌酸种类和含量不同。菌体在生长初期，细胞表面枝菌酸含量少，未形成成熟的长链；进入稳定期后，细胞表面疏水性最大，趋油速率也最大，枝菌酸含量最高。这表明在生长不同时期细胞表面疏水性不同，疏水性越强，越易发生趋化。

3.4 黏附作用菌株趋油性的调控研究

实验研究了添加不同类型、不同浓度有机物对菌种趋油性的影响程度。结果表明，外加有机物对菌种趋油性起到明显的促进作用（表 2）。

黏附率测定实验结果（图 3）表明，经有机物 D 处理的细菌与十六烷作用后，细菌对十六烷的黏附率发生变化，1507 表面疏水性随有机物浓度增加而增强，继续提高有机物 D 浓度至 10mg/L 时，作用效果开始减弱；12-J 在同等浓度有机物 D 下，黏附率随着浓度的增加而降低，其表面疏水性减弱。

表 2 不同有机物对菌株趋油性速率的影响（24 小时）

趋化速度/(μm/s) 浓度/(μmol/L)	对照	有机物 A	有机物 B	有机物 C	有机物 D
0	2~5	—	—	—	—
10	—	10~15	5~10	2~5	2~3
100	—	15~20	10~15	8~10	8~10
1	—	15~20	15~20	10~15	8~10
10	—	3~5	5~10	8~10	5~10
100	—	无运动	无运动	2~5	原地转动

当细菌混匀在含有机物 D 溶液的十六烷中时, 细菌的黏附率变化却与以上结果不同: 有机物 D 浓度在 0~10mg/L 范围内使 1507 与 12-J 对烃的黏附率分别增加 67%、52% (图 4)。这与图 3 中的结果明显不同, 分析其原因, 主要是由于前者的烃黏附由细菌细胞表面性质与烃之间的相互作用而引起; 后者除了这种作用外, 更重要的是有机物 D 对十六烷发生了乳化作用, 形成更小直径的十六烷乳化液滴, 增强了细菌与烃的接触面积。因此, 可以推测低浓度有机物 D 的加入能够增强细菌对烃的黏附性。

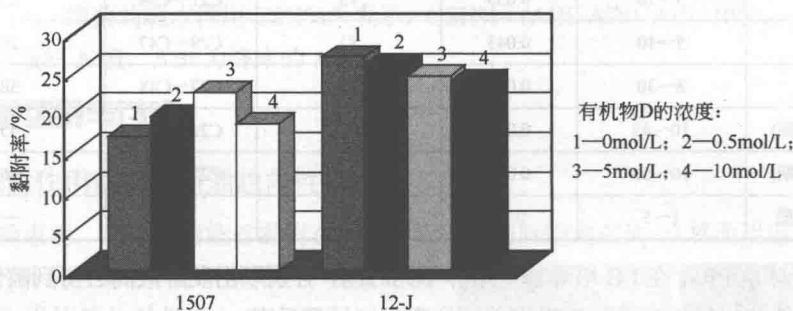


图 3 由不同浓度的有机物 D 的细菌对十六烷的黏附率

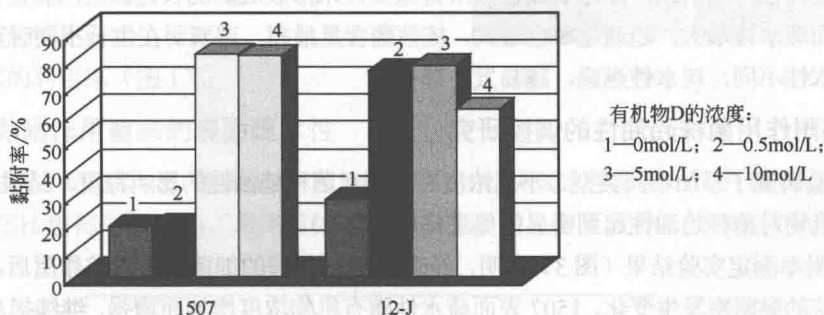


图 4 不同浓度的有机物 D 对细菌黏附率的影响

4 结论

(1) 采油菌在短时间内不容易在油水界面附近形成明显的细菌密集带, 细菌对原油的趋化性和黏附作用最终能够帮助细菌更好地接近并利用原油, 二者是协同的作用。

(2) 细菌本身的疏水性并不能够促进细菌自身的主动迁移, 但是有利于细菌在疏水性物质表面的黏附聚集, 这种聚集有利于细菌协同利用营养物质并繁殖。

(3) 原油黏附性菌株靠细胞表面疏水性黏附作用体现菌株的趋油能力, 可通过提高细胞疏水性对其进行调控激活。实验表明, 外加一定浓度的有机物对菌种趋油性起到明显的促进作用。