

海上油田聚合物驱后残留聚合物性质对再利用效果的影响

杨 帅¹ 戴彩丽^{1*} 张 健^{2,3} 姜维东^{2,3} 张艳辉¹ 闫立朋¹

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266555;2.海洋石油高效开发国家重点实验室,北京 100027;3.中海油研究总院,北京 100027)

摘要 针对渤海绥中36-1油田地层残留疏水缔合聚合物具有高水解度、低特性粘数的特点,开展了残留聚合物再利用室内实验研究。应用原子力显微镜探究了地层残留聚合物再利用剂提高采收率机理,并通过物理模拟实验测定了残余阻力系数和采收率增值,研究了残留聚合物水解度和特性粘数的变化对地层封堵性能和采收率增值的影响。结果表明,低特性粘数和高水解度的残留聚合物与再利用剂作用可使其对地层的封堵作用显著提高,残余阻力系数可达20以上,其中特性粘数越低,水解度越高,残余阻力系数越大,封堵作用越强。提高采收率增值实验结果表明,残留聚合物与再利用剂作用后比单纯聚合物驱的采收率提高了8.9%,可视化模拟结果也证实了此观点。

关键词 残留聚合物 特性粘数 水解度 再利用 提高采收率

中图分类号:TE357.431

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2012)05-0065-04

聚合物驱作为一项成熟的三次采油技术已在多个油田得到了广泛应用,可提高原油采收率8%~15%。但是聚合物驱后恢复水驱,滞留在地层中的聚合物封堵大孔道的能力大幅度降低,使得地层的非均质性不断加剧,产出液中聚合物的质量浓度不断升高;同时,在聚合物注入过程中,由于吸附和捕集作用,部分聚合物滞留在地层多孔介质中,因此,提出了残留聚合物再利用技术,即通过注入再利用剂,将地层残留的聚合物转变为絮凝体,从而控制聚合物驱产生的优势通道,起到调剖的作用^[1-5]。由于残留聚合物在地层渗流中存在严重的热降解、盐降解和金属离子降解以及水解等作用,聚合物的特性粘数和水解度发生了很大的变化。因此,研究了残留聚合物性质对其再利用效果的影响,以期在聚合物驱后进一步利用地层残留聚合物提高采收率^[6-9]提供理论基础和技术支持。

1 实验准备

1.1 实验药品与仪器

实验药品包括:相对分子质量为 1.2×10^7 、水解

度为26.65%、特性粘数为 $1\ 696.18\ \text{cm}^3/\text{g}$ 的疏水缔合水溶性聚合物AP-P4,工业级;NaCl,分析纯;浓度为0.1 mol/L的盐酸标准溶液;再利用剂为絮凝剂YG340-1;质量分数为0.1%的甲基橙溶液;质量分数为0.25%的靛蓝二磺酸钠溶液;渤海绥中36-1油田注入水,渤海绥中36-1油田地层模拟水,其总矿化度为 $8\ 460.64\ \text{mg/L}$,其中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- 质量浓度分别为345.40,2 795.84,55.60,595.19和4 668.51 mg/L;渤海绥中36-1油田地层模拟原油。

实验仪器包括乌氏粘度计、原子力显微镜、直径和长度分别为2.50和30.00 cm的填砂管、三维非均质岩心、岩心夹持器、数显恒温水浴、精度为0.000 1 g的电子分析天平及各种玻璃容器等。

1.2 实验方法

疏水缔合聚合物特性粘数和水解度测定 分别根据GB 12005.1 89^[10]和GB 12005.6 89^[11]测定疏水缔合聚合物的特性粘数和水解度。

残余阻力系数的测定 根据残余阻力系数来评价再利用剂与地层残留聚合物的相互作用对地层的封堵能力。实验步骤包括:①填制填砂管,水

收稿日期:2012-07-25。

作者简介:杨帅,男,在读硕士研究生,从事油田化学方面的研究。联系电话:18954835215,E-mail:yangshuai19871027@163.com。

*通讯作者:戴彩丽,女,教授,博士生导师,从事提高采收率方面的教学和研究。联系电话:15054815366,E-mail:zlai1306@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海化学驱油田整体调驱技术研究”(2011ZX05024),山东省杰出青年基金“提高采收率与采油化学”(JQ201013),山东省泰山学者建设工程(TS20070704)。

驱稳定后测渗透率(K_1) ;②先注入聚合物溶液 ,再注入再利用剂溶液 ;③在温度为 65 ℃ 的恒温水浴中稳定 12 h ,再水驱 ,稳定后测定渗透率(K_2) , K_1/K_2 即为残余阻力系数。

提高采收率实验 通过测定 3 层非均质岩心 (长度、宽度、高度分别为 30、4.5 和 4.5 cm ,3 层渗透率的比值为 6:4:1) 分别测定岩心注入再利用剂前后的采收率 ,研究采收率增值。实验步骤包括 :①取 1 号岩心 ,烘干并称干重 ,抽真空 ,饱和地层模拟水 ,称湿重 ,计算孔隙体积 ;岩心饱和油 ,并在 65 ℃ 下老化 8 h ;③水驱至产出液中含水率达 60% ,注入 0.3 倍孔隙体积的 AP-P4 聚合物溶液 ;④再水驱至产出液中含水率达 95% ,计算采收率 ;⑤取 2 号岩心 ,重复步骤①~③ ;⑥注入 0.1 倍孔隙体积的过顶替水段塞 ,注入 0.3 倍孔隙体积的再利用剂溶液 ;⑦转注水 ,水驱至产出液中含水率达 95% ,计算采收率。

可视化物理模拟实验 可视化模型的制作方法是在 2 块玻璃之间加入不同粒径的石英砂模拟地层非均质性 ,再用胶结剂胶结后烘干备用。通过具有一定放大倍数的物理模拟实验摄取台观察、录制实验过程 ,并用图像采集系统分析模型中的油、水在不同时刻的分布情况 ,通过面积分布计算不同实验方法的原油采收率和含水率 ,从而形象说明各种提高采收率方法在地层中的微观作用机理。实验过程为 :模型饱和水、饱和油、水驱油至含水率达 60% ,注入 0.3 倍孔隙体积的 AP-P4 聚合物溶液 ,注入 0.1 倍孔隙体积的过顶替水段塞 ,注入 0.3 倍孔隙体积的再利用剂溶液 ,再次水驱 ,计算水驱波及面积 ,计算采收率。

2 实验结果与讨论

2.1 再利用剂提高采收率机理

絮凝剂颗粒表面的羟基可与聚合物中的酰胺基和羧基结合为氢键 ,从而形成聚合物与絮凝剂颗粒间的桥接吸附 (图 1) ,即发生絮凝作用 ,形成絮凝体 ,起到调剖作用 ,使后续注入水进入中低渗透层 ,提高波及系数 ,从而达到聚合物驱后提高采收率的目的。

2.1 残留聚合物性质对再利用效果的影响

2.2.1 特性粘数

将质量浓度为 1 750 mg/L、水解度为 26.25% 的疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液放入混调器中 ,高速搅拌剪切不同时间 ,得到不同特性粘数^[12]的聚合物溶

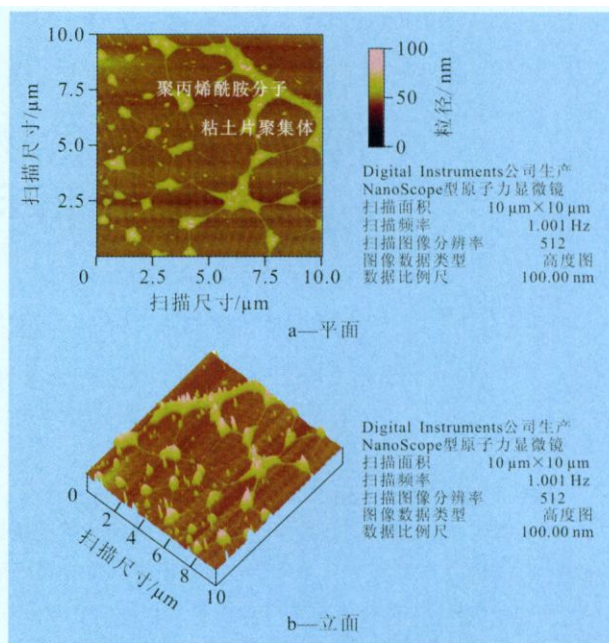


图 1 絮凝体的原子力显微镜照片
(100 mg/L AP-P4 + 2×10⁴ mg/L YG340-1)

液 ,然后稀释至 1 200 mg/L ,在地层温度 65 ℃ 下测定残余阻力系数 (表 1)。

表 1 残留聚合物特性粘数对絮凝作用的影响

特性粘数/ (cm ³ ·g ⁻¹)	孔隙体 积/mL	渗透率/μm ²		残余阻 力系数
		K_1	K_2	
1 696.18	52.1	7.34	0.27	27.2
1 450.64	51.9	7.27	0.34	21.4
989.35	51.2	7.18	0.39	18.4
820.15	50.9	7.09	0.45	15.6
613.75	51.6	7.23	0.62	11.7
436.47	50.8	7.30	0.99	7.4

由表 1 可以看出 ,在聚合物质量浓度和水解度不变的情况下 ,残余阻力系数随聚合物特性粘数的减小而减小 ,但是比单纯注入 0.3 倍孔隙体积的聚合物溶液 (特性粘数为 1 696.18 cm³/g ,水解度为 26.65%) 时的残余阻力系数 (4.1) 大 ,表明低特性粘数的聚合物同样具有较强的封堵作用 ,在低聚合物特性粘数下絮凝剂仍能发挥较好的再利用效果。

2.2.2 水解度

将特性粘数为 1 696.18 cm³/g ,质量浓度为 1 750 mg/L 的疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液中加入适量的氢氧化钠使其水解 ,制备不同水解度的聚合物溶液 ,然后稀释至 1 200 mg/L。在地层温度 65 ℃ 下测定相应的残余阻力系数 (表 2)。

由表 2 可以看出 ,随着地层残留聚合物水解度的增大 ,絮凝剂的封堵作用减弱 ,幅度较小 ,但仍比

表2 残留聚合物水解度对絮凝作用的影响

水解度, %	孔隙体积/mL	渗透率/ μm^2		残余阻力系数
		K_1	K_2	
26.55	52.1	7.34	0.27	27.2
39.81	51.5	7.29	0.29	25.1
46.35	52.1	7.31	0.30	24.4
51.42	51.7	7.24	0.31	23.4
58.75	51.5	7.22	0.32	22.6
65.96	50.9	7.26	0.33	22.0

单纯注入0.3倍孔隙体积的聚合物溶液(特性粘数为 $1\,696.18\text{ cm}^3/\text{g}$,水解度为26.65%)时的残余阻力系数(4.1)大得多,这是由于随着聚合物水解度的升高,聚合物中的酰胺基不断地水解成羧基,絮凝剂颗粒表面的羟基与聚合物中的酰胺基和羧基由于氢键的作用而吸附于表面,形成架桥,生成絮凝体,可以用来封堵地层,因此水解度的变化对絮凝剂桥接吸附的影响较大,其值越小,封堵性越好。

2.2.3 特性粘数和水解度同时变化

由于在渗流过程中,残留于地层中的聚合物具有不同的特性粘数和水解度的组合,因此,研究了絮凝剂对不同的特性粘数和水解度下聚合物再利用的效果。将质量浓度为 $1\,750\text{ mg/L}$ 的疏水缔合聚合物AP-P4溶液放入混调器中高速剪切不同时间,得到不同特性粘数的聚合物溶液,在一定特性粘数的聚合物溶液中加入适量氢氧化钠使其水解,得到不同特性粘数、不同水解度的AP-P4聚合物溶液,并稀释至 $1\,200\text{ mg/L}$,在地层温度 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 下,分别测定残余阻力系数,其结果见表3。

表3 残留聚合物特性粘数和水解度同时变化对絮凝作用的影响

特性粘数/ ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)	水解度, %	孔隙体积/mL	渗透率/ μm^2		残余阻力系数
			K_1	K_2	
1 696.18	26.55	52.2	7.34	0.27	27.2
1 450.64	39.81	51.5	7.27	0.34	20.6
989.35	46.35	50.4	7.18	0.39	17.5
820.15	51.42	50.9	7.09	0.45	15.2
613.75	58.75	52.1	7.23	0.62	11.1
436.47	65.96	51.6	7.30	0.99	6.4

从表3可以看出,聚合物在地层渗流过程中,其特性粘数降低,而水解度逐渐增大,但是通过注入再利用剂后形成不同强度的絮凝体,具有较强的封堵能力,其残余阻力系数可达27.2,与水驱后单纯注

入0.3倍孔隙体积的聚合物(特性粘数为 $989.35\text{ cm}^3/\text{g}$,水解度为46.35%)时的残余阻力系数(3.9)相比,提高幅度较大。

2.3 提高采收率实验

由表4可以看出,1号岩心注入聚合物转水驱后,含水率上升较快,当含水率达到95%时,采收率为47.1%。其原因是地层残留聚合物不能控制有效通道,不能起到很好的提高波及系数的作用。对于2号岩心,聚合物驱后注入再利用剂后,当含水率达到95%时,采收率达到56.0%左右,比聚合物驱时采收率提高了8.9%。絮凝剂与聚合物通过絮凝作用产生絮凝体,控制了聚合物驱产生的高渗透孔道,地层残留聚合物得到了有效再利用,采收率大幅提高。

表4 不同驱油体系提高采收率能力对比

岩心号	驱油体系	%	
		含水率为60%时的水驱采收率	注入驱油体系转水驱的采收率
1	$1\,750\text{ mg/L}$ AP-P4聚合物	17.3	47.1
2	$1\,200\text{ mg/L}$ AP-P4聚合物 + 5% YG340-1	16.8	56.0

2.4 可视化物理模拟

采用可视化平板模型,观察典型图像分析系统计算的含油面积分布及絮凝体图像(图2)。从图2

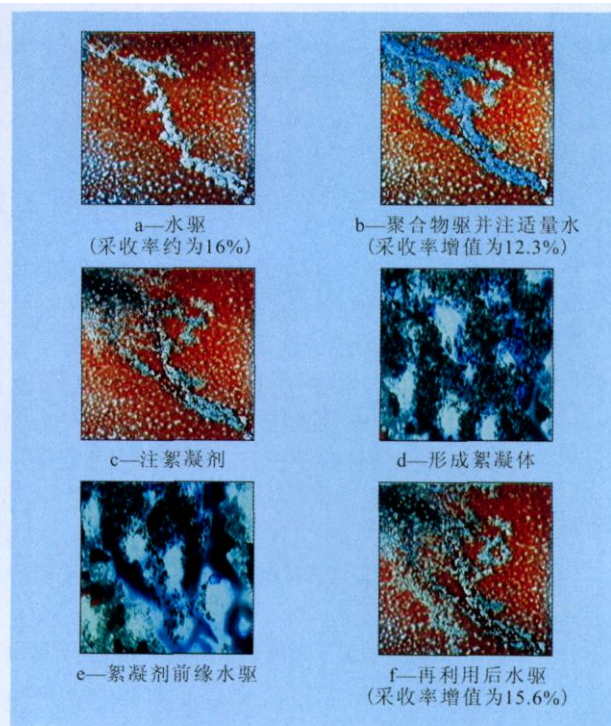


图2 注入絮凝剂可视化典型图像

可以看出,高渗透层附近的中、低渗透层被大量蓝色水体覆盖,这是由于再利用剂优先进入高渗透通道,与高渗透层中残留聚合物发生絮凝作用形成不同强度的絮凝体,在不同的深度形成了封堵,从而使后续水驱转向,启动了中、低渗透条带的剩余油,提高了水驱的波及系数,达到提高采收率的目的。模拟结果表明,絮凝剂能有效提高后续水驱的波及系数,形成的絮凝体能有效封堵高渗透层。

3 结论

疏水缔合聚合物在地层渗流过程中,其特性粘度逐渐降低,在聚合物质量浓度和水解度不变的情况下,其与再利用剂作用后,残余阻力系数随聚合物特性粘度的减小而减小,但是比单纯注入聚合物溶液时的残余阻力系数大。

在聚合物质量浓度和特性粘度不变的情况下,水解度不断增大,可使其与再利用剂作用后的残余阻力系数减小,但是仍比单纯注入聚合物溶液时的残余阻力系数大。虽然疏水缔合聚合物特性粘度和水解度发生变化,但与再利用剂作用后仍有较高的封堵能力,对海上油田有较高的再利用价值。

可视化物理模拟实验表明,通过注入再利用剂,可有效利用地层残留聚合物,驱油实验表明,其采收率提高了8.9%,达到提高波及系数和采收率的目的。

参考文献:

- [1] Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Junzheng, et al. Experiences learned after production more than 300 million barrels of oil by polymer flooding in Daqing Oil Field[R]. SPE 77693, 2002.
- [2] Chen Yizhe, Zhou Yanxia, He Fengyun, et al. Pilot test of utilizing residual polymer in formation to improve oil recovery: a successful case[R]. SPE 125346, 2009.
- [3] Dai Caili, You Qing, Wang Yefei, et al. Research on reutilization technology of residual polymer in formation after polymer flooding[R]. SPE 129227, 2010.
- [4] 赵福麟. 采油化学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994: 85-90.
- [5] 王业飞, 由庆, 赵福麟. 聚合物驱产出液中聚合物质量浓度测定新方法的研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(3): 47-49.
- [6] 唐恩高, 张贤松, 杨俊茹, 等. 不可及孔隙体积对聚合物溶液在多孔隙介质中流动的影响[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 80-82, 89.
- [7] 王正波, 叶银珠, 王继强. 聚合物驱后剩余油研究现状及发展方向[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 37-42.
- [8] 戴彩丽, 赵福麟, 肖建洪. 聚合物驱后地层残留聚合物再利用技术研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(6): 56-60.
- [9] 叶仲斌, 李晓南, 施雷庭, 等. 疏水缔合聚合物溶液的渗流特性[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(3): 63-65.
- [10] GB 12005.1-89 聚丙烯酰胺特性粘度测定方法[S].
- [11] GB 12005.6-89 部分水解聚丙烯酰胺水解度测定方法[S].
- [12] 任路, 严思明, 郭拥军, 等. 缔合聚合物特性粘度测试方法的研究[J]. 内蒙古石油化工, 2009, (1): 1-3.

编辑 刘北羿

欢迎订阅2013年《新疆石油地质》

《新疆石油地质》创刊于1980年,现由新疆石油学会主办,新疆油田公司、塔里木油田公司、吐哈油田公司和中石化西北分公司联办,与玉门油田公司、青海油田公司、西部钻探工程公司等协办,并与全国各石油系统、科研院校有着广泛的交流和联系。本刊主要介绍我国各含油气盆地的勘探、开发研究成果,同时也介绍全国各科研院所、大专院校在油气地质方面的研究成果,辟有油气勘探、油藏工程、应用技术、油气工程地质、讨论与争鸣、综述、国外油气地质、人物介绍、新闻报道等栏目。本刊兼营广告业务,收费低廉。

2005年本刊荣获第三届国家期刊奖百种重点期刊称号,2001—2012年连续六届获得新疆期刊奖(每2年评比一次)。2004年被收入《中文核心期刊要目总览》。

本刊国内外公开发行,每期国内定价人民币20元,逢双月出版。全国各地邮局均可征订,团体或个人也可直接向我部订阅。国外读者及港、澳、台同胞可向中国国际图书贸易总公司订阅(北京399信箱)。

联系地址 新疆克拉玛依市准噶尔路32号《新疆石油地质》编辑部

电话 0990-6886044

网址 <http://xjsydz.paperopen.com>

邮编 834000

联系人 易辉

E-mail xjpg@petrochina.com.cn

degree, 3 levels of single well's residual oil potential have been divided after polymer flooding, which can be classified as high, medium and low. According to planar distribution of residual oil geological reserves, 2 enrichment areas after polymer flooding, which are mainly located in prime sand body and weak well pattern controlling parts, are pointed out as well. The research process and results can provide certain methodological and theoretical references on the forecasting of residual oil and the rational adjustment and potential tapping after polymer flooding.

Key words: post-polymer flooding; residual oil; distribution law; area splitting and superposition; recovery degree

Wang Zhengbo, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China

Yao Chuanjin, Lei Guanglun, Gao Xuemei et al. Study on indepth profile control and flooding of pore-scale elastic microspheres under heterogeneous condition. *PGRE*, 2012, 19(5): 61–64.

Abstract: Due to the particularity of design principle for pore-scale elastic microspheres profile control and flooding technology, the particle-pore size matching factor was introduced and through heterogeneous parallel sandpack experiments, the plugging property of elastic microspheres under different particle-pore size matching relationship and the effect of permeability ratio on the ability of profile improvement were studied. Based on this, field test of pore-scale elastic microspheres under heterogeneous condition was carried out. Indoor experimental results show that in a better particle-pore size matching factor range, the residual resistance factor and plugging rate of sandpacks are the maximum as well as plugging effect; elastic microspheres can prefer to plug high permeability layer selectively so as to make the diversion rate of high and low permeability tube all tend to 50%, which indicates that elastic microspheres have significant selectivity on permeability; permeability ratio has an important effect on profile control and flooding performance of elastic microspheres and under condition of better particle-pore size matching factor range and lower permeability ratio, the profile improvement of elastic microspheres is better. Field test results show that when the particle-pore size matching factor is 1.52 and the permeability ratio is 3.1, the elastic microspheres can control the water injection profile effectively and the profile improvement ability of target layer 65 and 67 is up to 98%; it is scientific to guide the field test of elastic microspheres profile control and flooding using particle-pore size matching factor and permeability ratio.

Key words: heterogeneous; elastic microspheres; particle-pore size matching factor; sealing property; permeability ratio; field test

Yao Chuanjin, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

Yang Shuai, Dai Caili, Zhang Jian et al. Influence of polymer residue property on EOR after polymer injection for offshore oilfield. *PGRE*, 2012, 19(5): 65–68.

Abstract: As the hydrophobically associating polymer in Bohai Suizhong 36–1 reservoir has the character of high degree of hydrolysis and low intrinsic viscosity, laboratory has carried out the residual-recycled experiments to investigate the sealing characteristics with the changes in degree of hydrolysis and intrinsic viscosity. Residual resistance factor and recovery appreciation are determined by the physical simulation method, to study the effect of formation sealing performance and recovery evaluation by the change of polymer degree of hydrolysis and intrinsic viscosity. The results of laboratory experiments indicate that the sealing characteristics of the inter-acted production which originates from the reaction of residual polymer with high degree of hydrolysis and low intrinsic viscosity and recycled agent is much better than the single polymer with the residual resistance factor reaching more than 20, which lowers the intrinsic viscosity, that is, the higher the degree of hydrolysis, the better the sealing performance. The enhanced oil recovery experiments also indicate that the method can improve the recovery by 9.4%. The result of visualized simulation experiment also validates the viewpoint.

Key words: residual polymer; intrinsic viscosity; degree of hydrolysis; reutilization; enhance oil recovery

Yang Shuai, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

Li Caifeng, Guo Liaoyuan, Cao Gongze et al. Research and field application of activator formulas to endogenous microorganism, Gudao Zhongyi Ng3 block. *PGRE*, 2012, 19(5): 69–71.

Abstract: The activation of Zhongyi Ng3 of Gudao after polymer flooding by means of different activator formulas is studied herein. Screening results reveal that the optimal composition of the activator formula is as follows (g/L): glucose 4, peptone 0.4, yeast extract 0.2, NH_4NO_3 0.4, $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$ 0.2. The detailed results show that, at 65 °C and 10 MPa the endogenous microorganism can be activated evidently to 1.48×10^9 cfu/mL via the activator formula consisted of glucose and yeast extract powder. Simultaneously, the concentration of acetic acid is increased distinctly about 600 mg/L and the surface tension of water is reduced to 33.2 mN/m. Physical simulation experiment shows that the endogenous microorganism can enhance the oil recovery by 6.4 percent with the activator formula. Field test shows that the amount of this activator formula to Zhongyi Ng3 block is 405 t by the end of June 2011, and the cumulative oil yield increases by 1.0×10^4 t.

Key words: endogenous microorganism; stimulation agent; physical simulation; nutrient system; Gudao oilfield

Li Caifeng, Shengli Oilfield Oil Production Technology Research Institute, Dongying City, Shandong Province, 257000, China

Luo Qiang, Wu Yongfeng, Li Dongwen et al. Steam stimulation with air by low-temperature oxidation at presence of additives. *PGRE*, 2012, 19(5): 72–74.

Abstract: The objective of this study is to investigate parameters for low-temperature oxidation of heavy oil on the volume fraction of