

文章编号: 1000 0747(2007) 03 0354 05

极限含水条件下三元复合驱及聚合物驱 提高采收率效果分析

赵长久, 鹿守亮, 李新峰

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院)

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目“复合驱配方及先导性、工业性矿场试验研究”子课题(96 121 01)

摘要: 以大庆油田杏二西油层为例, 探讨长期含水 100%、地层中的原油以残余油为主条件下化学驱提高原油采收率的问题。在杏二西油层实施了三元复合驱试验, 中心井区提高采收率幅度达 19.46%, 表明对于水驱采出程度非常高、地层中的原油主要是残余油的油层, 采用三元复合驱可大规模驱动残余油、大幅度提高驱油效率。三元复合驱提高采收率机理是大幅度提高驱油效率及扩大波及体积, 而聚合物驱则仅通过扩大波及体积提高油田采收率, 无法提高驱油效率。油田大量实际资料和杏二西油层数值模拟研究表明, 对高含水、以残余油为主的油层采用聚合物驱不能提高驱油效率, 因而其提高采收率幅度低, 对类似杏二西油藏条件的油层不宜采用聚合物驱, 而宜采用三元复合驱提高采收率。图 4 参 24

关键词: 剩余油; 残余油; 三元复合驱; 聚合物驱; 驱油效率

中图分类号: TE357.46; TE327 文献标识码: A

On the effectiveness of increasing oil recovery factors with ASP flooding and polymer flooding under the limit water cut conditions

ZHAO Chang jiu, LU Shou liang, LI Xin feng

(Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China)

Abstract: Taking the Xing'erxi ASP flooding test as an example, the paper discusses the issue of increasing oil recovery factor by ASP flooding under the condition of residual oil being dominant in reservoirs with a long time 100% water cut. After the ASP flooding, the oil recovery factor in the central well area of the Xing'erxi reservoir is increased by 19.46%, indicating that the ASP flooding is suitable for reservoirs with a high water flooding oil recovery factor and the remaining oil dominated by residual oil. The mechanism of ASP flooding is to improve oil displacing efficiency by reducing interfacial tension and expanding its sweeping area. Whereas the polymer flooding can only increase oil recovery factor through enlarging the swept volume but cannot improve the oil displacement efficiency. Oilfield data and the numerical simulation of the Xing'erxi reservoir show that the polymer flooding can only enhance slightly the oil recovery in this type of reservoirs.

Key words: remaining oil; residual oil; ASP flooding; polymer flooding; oil displacement efficiency

为了大幅度提高原油采收率, 大庆油田进行了化学驱研究。经“七五”、“八五”科技攻关, 成功地研究出“聚合物驱油技术”, 并在“九五”期间投入工业应用, 其年产量达到上千万吨规模, 可比水驱提高采收率 10% OOIP 以上。但即使如此, 仍有 50% 左右的原油留在地下。为了更大幅度提高原油最终采收率, 大庆油田自“八五”以来进行了三元复合驱技术研究^[1-6]。三元复合驱是在碱驱和表面活性剂/聚合物驱的基础上发展起来的一项大幅度提高原油采收率的新技术。该技术综合了碱驱和表面活性剂/聚合物驱的优点, 不仅能

扩大波及体积、提高驱油效率^[7-12], 而且能大大降低表面活性剂的用量, 具有较强的技术经济可行性。在大量室内研究的基础上^[13, 14], 分别在大庆油田中区西部、杏五区中块、小井距试验区、北一区断西、杏二西开展了三元复合驱矿场试验^[15, 16], 获得了成功。但除杏二西试验区长期含水 100% 外, 其他试验区试验初始含水率都小于 98%, 不能充分从试验角度验证三元复合驱能够驱替残余油这一重要理论, 只有杏二西三元复合驱矿场试验能充分证明这一点。研究表明, 在类似杏二西这样的长期含水 100% 的油层采用聚合物驱不能

提高驱油效率, 因而认为对杏二西三元复合驱矿场试验区的油层不宜进行聚合物驱。

1 三元复合驱矿场试验

1.1 试验区简介

试验区位于大庆油田杏树岗二区西部(简称杏二西), 以4个反五点井网构成正方形井网。4口注入井9口采油井, 共有油水井13口, 中心井1口, 注采井距为200m, 生产井距为280m。试验目的层为葡I组3号层3小层(P I 3₃), 试验区面积为0.3km², 地质储量为240 100t; 中心井区面积为0.0665km², 地质储量为58 700t。

1.2 试验区水淹状况及采出程度

1.2.1 水淹状况

经过30多年注水开发后, 试验区P I 3₃层水淹特点主要表现为:

①纵向上水洗厚度大, 水洗程度高。据试验区8口新井水淹层测试资料统计(1996年), P I 3₃层水洗厚度比例高达93.0%, 强水洗厚度比例达42.9%, 中、强水洗厚度比例高达66.2%, 未水洗厚度比例仅为7.0%; 而中心井水洗厚度比例达100%, 强水洗厚度比例高达63.6%, 中、强水洗厚度比例高达87.9%。从邻区1992年(杏二西三元复合驱试验始于1996年底)打的密闭取心井杏1丁3检323井资料来看, 目的层的中、强水洗厚度比例在1992年就已经高达82.4%, 强水洗厚度比例高达70.4%。

②平面上水淹面积达到100%且呈现特高含水及强水洗特征。从试验区P I 3₃层水淹状况图(见图1)可以看出, 不仅在平面上100%水淹, 而且基本上都是

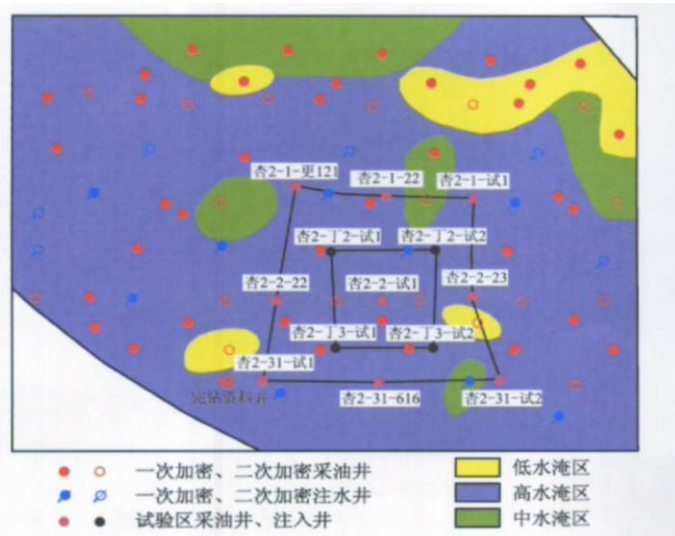


图1 杏二西三元复合驱PI 3₃层水淹状况图

高水淹, 仅有很小区域为中、低水淹。试验区中心井区全部为强水洗。根据强水洗(高水淹)定义可知水驱驱油效率超过55%, 水驱再提高驱油效率的可能性较小。因此认为油层剩余油主要是水驱残余油。事实上, 试验前试验区9口采油井中已有5口井含水率高达100%(包括中心井), 其他井含水率也都在95%以上, 全区综合含水率高达98.5%, 已处于水驱开发无经济效益阶段。

1.2.2 采出程度

①利用相对渗透率曲线法推算的采出程度。根据杏北地区油水相对渗透率曲线(见图2)推算, 当含水率为98%时, 水驱采出程度为54.2%, 含水99%时采出程度为58.8%, 而当含水100%时采出程度则高达67.5%。

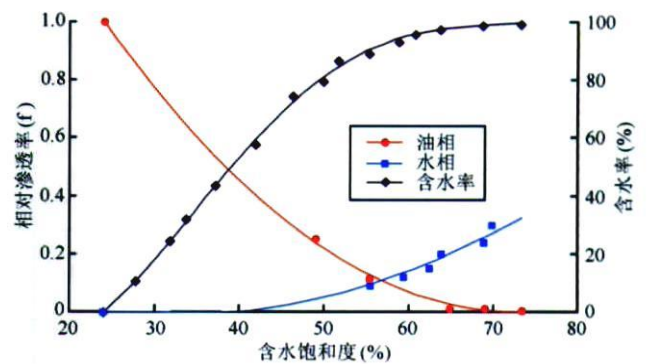


图2 杏北地区油水相对渗透率曲线

②利用单井化学示踪剂测残余油饱和度技术法推算的采出程度。利用该方法对本试验区中心井杏2 2试1井进行了含油饱和度测试, 其解释结果为(18 ± 3.0)%, 本试验区原始含油饱和度为72.3%, 则中心井水驱采出程度为70.95%至79.25%。

从上述两种方法可知, 杏二区中心井区采出程度应该在70%左右, 水驱提高采收率的余地很小。综合分析水淹状况及采出程度, 认为试验区剩余油主要是水驱残余油。

1.3 试验效果

试验区自1996年11月开始注入三元复合体系, 到1999年10月开始后续水驱, 到2002年3月试验结束, 全部按方案实施。

试验见到较好效果。含水率下降, 产油量增加。三元复合驱后, 试验区全面受效, 5口含水率为100%的井效果明显, 中心井杏2 2试1井的效果尤为显著。该井投产后含水率一直为100%(历时9month, 注水量折合0.23PV), 当注入0.291PV三元复合体系时, 含水率降至最低点(50.7%), 日产油量由0t上升到29t,

产油高峰时,日产量达 33~35t,而且在注入 0.22PV 至 0.42PV 三元复合体系期间,该井的含水率一直稳定在 50%~70%。试验结束时,该井累计增油 11 423t。在水驱无经济效益、含水率为 100%的条件下,中心井区三元复合驱提高采收率 19.46%。

据统计,与注入三元复合体系之前对比,全区综合含水率下降了 8.8%,日产量由 24t 增至 105t。试验结束时全区累计产油 76 585t,累计增油 45 066t。

2 三元复合驱及聚合物驱开发效果分析

2.1 三元复合驱开采残余油

实践证明,三元复合驱可大规模驱替残余油,大幅度提高驱油效率,在残余油为主的油层宜开展三元复合驱。

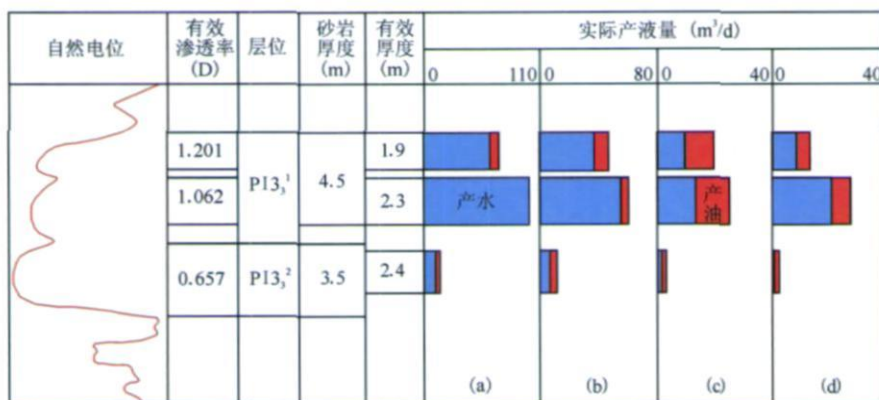
2.1.1 采出原油物性、族组分

水驱残余油是长期水驱后用水驱方法已无法采出的原油,其重质成分含量高、凝固点高、闪点低、动力黏度大。

杏 2 2 试 1 井产出原油的物性分析表明,在 50℃ 条件下,三元复合驱采出原油与水驱时相比物性发生较大变化:原油动力黏度由 13.7mPa·s 升至 17.8mPa·s,凝固点由 17℃ 升至 33℃,闪点由 64℃ 降至 52℃。原油族组分变化也较大:该井产出原油的总烃由 85.8% 降至 82.0%,非烃和沥青质含量由 14.2% 升至 18.1%。这说明三元复合驱采出了水驱难以采出的原油,提高了驱油效率。

2.1.2 产液剖面

从产液剖面看(见图 3),杏 2 2 试 1 井在注前置聚合物段塞时,各层含水率均在 90% 以上。注入三元复合体系后,各层含水率均大幅度下降:PI 3₃¹ 层上部含水率由 94.04% 下降到 53.9%,下部含水率由 99.9% 下降到 61.1%;PI 3₃² 层含水率由 94.1% 下降到 30.0%。水淹资料表明,试验区生产井强水洗段(残余油存在的位置)位于目的层的中、下部,PI 3₃¹ 层下部及 PI 3₃² 层含水率大幅度下降说明三元复合驱驱替了残余油,大大提高了驱油效率。



(a) 水驱测试结果; (b) 注入 0.195PV 三元复合体系测试结果; (c) 注入 0.335PV 三元复合体系测试结果; (d) 注入 0.443PV 三元复合体系测试结果

图 3 杏 2 2 试 1 井产液剖面对比图

以往开展的三元复合驱试验,油层的初始含水率均未超过 98%^[13-16](中区西部、小井距试验区、杏五区、北一区断西开展的三元复合驱初始含水率分别为 87%、95.8%、96.9%、95%),水驱还能采出很多油,根据杏北地区油水相对渗透率曲线(见图 2)推算,含水率为 100% 时的采出程度比含水率为 98% 时增加 13.3%。而文献资料表明,大庆油田主力油层这一数值为 15.86%~17.8%,平均为 16.78%^[17-19],因此尽管以前实施的三元复合驱试验采收率比水驱提高了 20%~23.24%,但所采出的大部分原油是水驱可动残余油,并未体现出三元复合驱可大规模驱替水驱残余油的特性。而杏二西三元复合驱试验在水驱无经济效

益(含水率长期达 100%),剩余油以残余油为主的条件下提高采收率达 19.46%。增产原油大部分来自提高驱油效率部分,这证明了三元复合驱的高驱油效率特性以及在水驱残余油条件下仍可开展三元复合驱的论断。

2.2 聚合物驱不宜开采残余油

2.2.1 理论分析

聚合物驱是通过提高注入液黏度、扩大波及体积、增加新的出油部位来提高采收率的,而不是提高原来水驱已经波及到的油层的驱油效率。

研究表明,在驱替过程中,毛管数是影响驱油效率的重要参数^[20,21],存在于不同孔隙中的不同大小的油

滴能否开始移动, 都直接和毛管数的大小有关。毛管数定义为:

$$N_c = \frac{\mu V}{\sigma} \quad (1)$$

式中 N_c ——毛管数, 无因次; μ ——注入相黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; V ——注入相流速, cm/s ; σ ——界面张力, mN/m 。

从(1)式可以看出, 毛管数与注入相黏度和注入相速度成正比, 与界面张力成反比。实验研究认为: 要降低残余油饱和度必须使毛管数增大3个以上数量级。众所周知, 三元复合驱能够使界面张力降低到原来的千分之一到万分之一, 因而可以使毛管数增大3~4个数量级, 从而大幅度提高驱油效率。而聚合物驱不降低界面张力, 只是增加注入相黏度, 这样会使注入相速度相应降低, 因此对毛管数大小的影响非常有限, 无法提高驱油效率。

2.2.2 实际资料分析^[19]

①从水洗厚度比例上看, 聚合物驱的驱油效率未超过水驱。北一断西聚合物驱工业性矿场试验是大庆油田第一个聚合物驱工业性矿场试验, 试验前后分别打了两口检查井, 即北16检27井(1991年钻)和北16检26井(1998年钻)。北16检26井位于注采井之间, 其聚合物驱油程度高于其邻近的采油井, 但其聚合物驱后水洗厚度比例(96.9%)与杏二区中心井水驱时的水洗厚度比例(100%)相差并不是很大。

②从取心井岩心最高驱替程度上看, 聚合物驱的驱油效率未超过水驱。从阶段驱油效率可以看出这一点: 北16检27井(该井周围油井含水97.5%)水驱时驱替程度最高的层段其阶段最高驱油效率为66.3%, 而聚合物驱后的北16检26井的该值为67.5%, 两者非常接近。

③杏二西的数值模拟研究表明, 该区油层不能实施聚合物驱。

杏二西三元复合驱试验油层中的剩余油主要为残余油, 这样的油层能否进行聚合物驱? 在试验实施前后进行了数值模拟研究。1998年前聚合物驱的聚合物用量为 $570 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}^{[14, 22]}$, 之后聚合物驱的聚合物用量在 $720 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$ 左右(目前使用抗盐高分子聚合物, 可节约大量聚合物), 杏二西三元复合驱试验中设计聚合物用量为 $1200 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$ (当时抗盐高分子聚合物技术不成熟, 杏二西三元复合驱没有使用抗盐高分子聚合物)。利用杏二西三元复合驱油层数据建立数值模型, 分别计算聚合物用量为 $570 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$ (方案1)、 $1200 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$ (方案2)两种情况下的聚合

物驱效果(见图4)。两个方案的含水率最低仅降至86.2%, 提高采收率分别为4.93%和6.88%。在试验结束后重新建立数值模型, 根据杏二西三元复合驱试验中实际聚合物用量($1098 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$)进行了计算, 其最低含水率为88.1%, 采收率提高了6.31%。可以看出, 在杏二西三元复合驱试验区油藏条件下实施聚合物驱提高采收率幅度不仅比三元复合驱提高采收率幅度(19.46%)小得多, 而且比工业化聚合物驱^[14]提高采收率幅度(10%~12%)也小得多, 甚至低于三类油层聚合物驱提高采收率幅度^[23], 表明在这种条件下进行相同聚合物用量的聚合物驱无论从经济还是技术角度讲都是不可行的, 而按常规聚合物驱用量进行聚合物驱则更不可行。这是因为聚合物驱不能提高驱油效率^[24], 而三元复合驱则能做到这一点^[10], 所以在剩余油以残余油为主的油层中宜开展三元复合驱, 不宜开展聚合物驱。

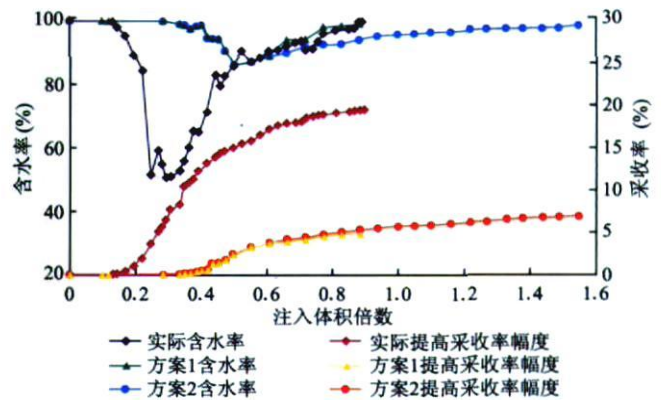


图4 不同聚合物用量条件下杏二西三元复合驱中心井区驱油效果数值模型预测曲线

3 结论

与以往先导性试验相比, 本研究试验区含水率超过经济极限, 中心井长期含水100%, 剩余油主要为残余油, 已处于水驱开发无经济效益阶段, 试验结果充分证明了三元复合驱可以大规模驱动残余油、提高驱油效率, 而聚合物驱则不能。因而认为目前在剩余油以残余油为主的油层中宜采用三元复合驱提高采收率, 而不宜采用聚合物驱。

参考文献:

- [1] 王志武, 刘恒, 高树棠, 等. 三次采油技术及矿场应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- [2] 巢华庆. 大庆油田开发实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.

- [3] 刘恒, 高树棠. 大庆油田开发先导性矿场试验[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [4] WANG De min, ZHANG Zhen hua, CHENG Jie cheng, et al. Pilot test of alkaline surfactant/polymer flooding in Daqing Oilfield[J]. SPE 36748, 1996.
- [5] WANG De min, CHENG Jie cheng, LI Qun, et al. An alkaline / bio-surfactant/polymer flooding pilot in Daqing Oilfield[J]. SPE 57304, 1999.
- [6] 张景存. 三次采油[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [7] 卡斯特 T P, 索默尔顿 W H. 化学驱提高采收率[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- [8] 康万利. 三次采油化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [9] 侯吉润. 化学驱原理应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [10] 姜继水, 宋吉水. 提高石油采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [11] 杨清彦, 廖广志, 宫文超, 等. 正韵律模型三元复合体系驱油实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊): 63-65.
- [12] 郭兰磊. 孤岛油田化学复合驱扩大试验[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 495-499.
- [13] WANG De min, CHENG Jie cheng, WU Jun zheng et al. Summary of ASP pilots in Daqing Oilfield[J]. SPE 57288, 1999.
- [14] 王德民, 廖广志. 大庆油田提高采收率技术综述[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 9-13.
- [15] 程杰成, 廖广志, 杨振宇, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 45-50.
- [16] 程杰成, 王德民, 李群, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 37-41.
- [17] 于盛鸿, 赵长久, 么世椿, 等. 水驱含水 98%以后采出程度的计算与讨论[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 149-150.
- [18] 常毓文, 袁士义, 曲德斌. 注水开发油田高含水期开发技术经济政策研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 97-100.
- [19] 李阳, 王端平, 刘建民. 陆相水驱油藏剩余油富集区研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 91-96.
- [20] 张博全, 王岫云. 油(气)层物理学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1989.
- [21] 王凤琴, 曲志浩, 孔令荣. 利用微观模型研究乳状液驱油机理[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 221-224.
- [22] 王克亮. 改善聚合物驱油技术研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [23] 张晓芹, 关恒, 王洪涛. 大庆油田三类油层聚合物驱开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 374-377.
- [24] 赵永胜, 魏国章, 陆会民, 等. 聚合物驱能否提高驱油效率的几点认识[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 43-46.

第一作者简介: 赵长久(1967), 男, 山东临沂人, 硕士, 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院高级工程师, 长期从事三次采油研究工作。地址: 黑龙江省大庆市, 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院采收率二室, 邮政编码: 163712。E-mail: zhaohj@petrochina.com.cn

收稿日期: 2006 09 20 修回日期: 2007 01 18

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)

(上接第 353 页)

- [5] 王小朵, 李宪文, 陈宝春, 等. 长庆气田碳酸盐岩储层加砂压裂试验研究[J]. 油气井测试, 2004, 13(2): 57-59, 62.
- [6] 陈志海, 戴勇, 郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 104-105.
- [7] 蔡正旗, 张荣义, 郑超, 等. 碳酸盐岩裂缝孔隙型储集层综合预测方法研究——以川东大池干井构造带 $T_{1j_2}^2$ 储集层预测为例[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 65-68.
- [8] 杨丙秀, 蒋廷学, 丁云宏, 等. 低孔低渗储集层探井低伤害压裂技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 119-122.
- [9] 王为民, 赵刚, 谷长春, 等. 核磁共振岩屑分析技术的实验及应用研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 56-59.
- [10] 李勇明, 郭建春, 赵金洲. 裂缝性油藏压裂井产能数值模拟模型研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 126-128.
- [11] 朱玉新, 谢兴礼, 宋文杰, 等. 克拉 205 井岩石变形对产能的影响[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 118-120, 129.
- [12] 蒋廷学, 郎兆新, 单文文, 等. 低渗透油藏压裂井动态预测的有限元方法[J]. 石油学报, 2002, 23(5): 53-58.

第一作者简介: 蒋廷学(1969), 男, 江苏东海人, 博士, 高级工程师, 主要从事水力压裂工艺技术研究与应用。地址: 河北省廊坊市, 中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化技术服务中心, 邮政编码: 065007。E-mail: lffy_jtx69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2005 08 08 修回日期: 2007 03 01

(编辑 郭海莉 绘图 李秀贤)