

泡沫驱前调剖提高采收率室内实验

吕春阳^{1,2,3}, 赵凤兰^{1,2,3}, 侯吉瑞^{1,2,3}, 张云宝⁴, 苏伟^{1,2,3}, 任涛^{1,2,3}

(1. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249; 2. 中国石油三次采油重点实验室
低渗油田提高采收率应用基础理论研究室, 北京 102249; 3. 石油工程教育部重点实验室,
北京 102249; 4. 中海油田服务股份有限公司生产事业部, 天津 300450)

摘要:海上油气藏疏松砂岩地层经过长期注水开发后,其高渗透层易形成大型窜流通道,非均质性进一步增强,单独实施泡沫驱会导致泡沫在窜流通道中突进,造成无效驱替,因此有必要在泡沫驱前进行调剖。通过室内实验研究,利用3层非均质岩心模拟高渗透强非均质性油藏,进行单独泡沫驱和调剖后泡沫驱。实验结果表明:一次水驱后先进行调剖再进行泡沫驱的最终采收率比一次水驱后直接进行泡沫驱提高了18.0%,最终采收率达50%以上;增大泡沫注入量,有利于提高采收率,最优泡沫注入量约为0.4倍孔隙体积;对于层间非均质模型来说,选用高强度改性淀粉强凝胶作为调剖剂,会优先选择性封堵高渗透层,迫使后续泡沫进入中、低渗透层,从而有效改善吸液剖面,大幅度提高采收率,相对于一次水驱采出程度可提高36.0%。

关键词:泡沫驱 调剖段塞 非均质 含水率 采收率

中图分类号:TE357.42

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)05-0069-05

Laboratory experiment of EOR through profile control before foam flooding

Lü Chunyang^{1,2,3}, Zhao Fenglan^{1,2,3}, Hou Jirui^{1,2,3}, Zhang Yunbao⁴, Su Wei^{1,2,3}, Ren Tao^{1,2,3}

(1. Research Institute of Enhanced Oil Recovery, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Basic Theory Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Low Permeability Oilfield, Key Laboratory of Tertiary Oil Recovery, PetroChina, Beijing City, 102249, China; 3. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, Beijing City, 102249, China; 4. Production Department, China Oilfield Services Limited, Tianjin City, 300450, China)

Abstract: After long-term waterflooding development erosion, large-scale channel is easy to form in the high permeability layers of the unconsolidated sandstone formations in offshore oil reservoirs and the heterogeneity of the layers would be stronger. In this case, foam flooding process alone will lead to the rushing of the foam in the channel, which results in invalid displacement. So it is necessary to take profile control before foam flooding. Through laboratory research, a three-layer heterogeneous core was applied to simulate oil reservoir of high permeability and strong heterogeneity. Foam flooding alone and foam flooding after profile control were implemented. The experimental results show that the ultimate recovery efficiency of the foam flooding after profile control is 18 percent higher than that of the foam flooding alone, and it can reach above 50 percent. More injection volume of the foam slug is better for enhancing oil recovery, and the best injection volume is 0.4 times of the pore volume; for the interlayer heterogeneous core, high strength modified starch gel will plug the high permeability formations, forcing subsequent foam slug to enter the middle-low permeability formations, thus the suction profile will be improved effectively and the recovery efficiency will be greatly improved. The final recovery degree could be increased by 36 percent compared with that after the first time water flooding.

Key words: foam flooding; profile controlled slug; heterogeneity; water cut; recovery efficiency

收稿日期:2015-07-31。

作者简介:吕春阳(1990—),男,山东聊城人,在读硕士研究生,从事提高采收率方面的研究。联系电话:18800124270, E-mail: 303097805@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“油田开采后期提高采收率技术”(2011ZX05009-004)。

调剖堵水技术在油田应用较为广泛,其作为一种有效的增产措施能有效地封堵高渗透层,是改善油藏非均质性的重要手段之一^[1]。经过多年研究和探索,目前已形成了近百种调剖堵水化学剂及相应的施工工艺技术和配套优化决策^[2]。

中国海上油田多为渗透率高、非均质性强的疏松砂岩油藏^[3],由于注入水的长期冲刷以及油层温度和压力的变化,使得地层孔喉半径增大,在油藏中形成大型窜流通道^[4-5],从而导致采出液含水率上升快、水窜严重等问题。

泡沫流体具有粘度高、封堵能力随渗透率增大而增大、堵水不堵油等特点^[6],在非均质地层中泡沫首先进入高渗透层,随着注入量的增加,泡沫进入高渗透层的阻力越来越大,当阻力增大到与低渗透层的注入压力相等时,泡沫开始进入低渗透层,并在地层中均匀推进,提高波及效率^[7]。泡沫驱作为三次采油中的一项重要的提高采收率技术,在当前世界各国油田后期开发阶段中已经成为一项重要的技术手段^[8-10]。泡沫在非均质油藏中具有良好的调堵效果,但其对油藏非均质的适应性不是无限制的,对于渗透率过高、非均质性较强的油藏,泡沫在高渗透层中易发生窜流,不能形成有效堆积来封堵高渗透层,在高渗透层中的渗流阻力达不到低渗透层的注入压力,导致泡沫无法进入低渗透层,泡沫驱油效果变差,提高采收率的能力受到限制^[11-12]。为此,笔者从改善油藏非均质性来提高泡沫驱油效率的角度出发,在泡沫驱前首先封堵高渗透层,从而减小地层渗透率级差,使泡沫在地层中能够最大限度地发挥提高采收率的作用。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验采用由恒温箱、平流泵、中间容器、压力传感器、真空泵和手摇泵等构成的岩心驱替实验装置,由北京昆仑通态自动化软件科技有限公司提供的压力采集系统,电子天平,搅拌器及MCR301流变仪等。

实验用水采用矿化度为5 863.27 mg/L的BZ19-4模拟地层水,实验用油由SZ36-1油田脱气脱水原油与航空煤油按体积比为2:1配制而成,其粘度为57 mPa·s。

实验岩心选用人工压制环氧树脂胶结的3层层内非均质砂岩岩心,长度为30 cm,截面为正方形,边长为4.5 cm,各层气测渗透率分别为 $4\ 000\times 10^{-3}$ 、

$2\ 000\times 10^{-3}$ 和 $200\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,整体水测渗透率约为 $2\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

填砂模型为由60~100目普通河砂填制的砂管模型,长度为100 cm,直径为2.5 cm,水测渗透率分别为 $5\ 318\times 10^{-3}$ 、 $1\ 391\times 10^{-3}$ 和 $450\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,采用三管并联方式,模拟层间非均质地层。

调剖剂选用改性淀粉强凝胶^[13-14],该调剖剂以丙烯酰胺和羟丙基淀粉为主剂,通过接枝共聚反应形成高强度凝胶,利用MCR301流变仪测定其粘度与粘弹性,成胶前溶液的粘度为140 mPa·s,成胶后胶体储能模量大于240 Pa,损耗模量约为20 Pa,封堵率可达98%,具有强度高、良好的选择注入性和深部运移性能,可有效封堵大孔道。

实验用表面活性剂为有效成分为 α -烯基磺酸盐的SD-1表面活性剂,稳泡剂为抗盐型疏水缔合聚合物HPAM。实验中形成泡沫的起泡剂为由质量分数为0.5%的表面活性剂和0.2%的稳泡剂组成的混合溶液。实验气体为高纯度氮气,活性水是质量分数为0.5%的表面活性剂溶液。

1.2 实验方法

不同段塞组合对比实验、不同泡沫注入量对比实验均采用3块人工压制砂岩岩心分别进行实验,调剖与泡沫驱结合技术分层增产效果实验采用3根填砂管进行实验。3个实验的第1步相同,即首先将岩心或模型抽真空,饱和地层水,测定孔隙体积,饱和油,计算初始含油饱和度,放入65℃恒温箱中老化24 h,以0.2 mL/min的流速进行一次水驱至出口端含水率达90%;然后再分别按各自实验步骤进行下步实验。

不同段塞组合对比实验 在第1步的基础上,3块岩心分别按照方案1—3进行实验,方案1,首先以0.2 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的泡沫,再以0.5 mL/min的流速进行后续水驱至出口端含水率达98%;方案2,首先以0.2 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的调剖剂,待调剖剂成胶后,以0.5 mL/min的流速进行后续水驱至出口端含水率达到98%;方案3,首先以0.2 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的调剖剂,待调剖剂成胶后,再以1 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的泡沫,最终以0.5 mL/min的流速进行后续水驱至出口端含水率达98%。

不同泡沫注入量对比实验 在第1步的基础上,将3块岩心均首先以0.2 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的调剖剂,待调剖剂成胶后,再以1 mL/min的流速分别注入0.4和0.6倍孔隙体积的泡沫,最终以0.5 mL/min的流速进行后续水驱至出口端含

水率达98%,计算采收率。方案编号分别为4和5。

调剖与泡沫驱结合技术分层增产效果实验在第1步的基础上,首先以0.2 mL/min的流速注入0.2倍孔隙体积的调剖剂,待调剖剂成胶后,再以1 mL/min的流速依次注入0.3倍孔隙体积的泡沫、0.2倍孔隙体积的活性水及0.3倍孔隙体积的泡沫,最终以0.5 mL/min的流速进行后续水驱至出口端含水率达98%,计算采收率。方案编号为6。

各方案所使用的模型实验参数(表1)如下。

表1 所用模型的实验参数
Table1 Parameters of experimental models

方案	模型	水测渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	孔隙体积/ mL	饱和油体积/ mL	初始含油饱和度, %
1	砂岩岩心	2 038	177	150	84.75
2	砂岩岩心	2 046	180	150	83.33
3	砂岩岩心	1 983	168	121	73.02
4	砂岩岩心	2 027	182	145	79.67
5	砂岩岩心	1 990	169	129	76.33
6	填砂管 高渗透层	5 318	212	139	65.57
	中渗透层	1 391	203	135	66.50
	低渗透层	450	203	136	66.99

2 实验结果与分析

2.1 段塞组合对含水率与采出程度的影响

由于岩心的强非均质性,在一次水驱阶段经过短暂的无水采油期后,注入水沿高渗透层形成渗流优势通道,采出液的含水率迅速达90%。此时的高渗透层成为注入水的主要流动通道,若再进行注水开发,注入水会在高渗透层的入口和出口之间无效循环,采收率低,此时应实施调剖或泡沫驱替等措施。

含水率是评价调剖剂是否见效和增产措施是否有效的重要指标。由方案1和方案2的含水率与采出程度变化(图1a,图1b)可以看出:一次水驱后进行泡沫驱与一次水驱后进行调剖的含水率下降程度基本相同,最低点分别为63.0%和65.0%;但对于单独泡沫驱来说,由于岩心渗透率级差过大,泡沫在高渗透层中产生的流动阻力达不到低渗透层的启动压力,无法启动低渗透层,并且只有少部分泡沫进入中渗透层,中渗透层启动程度较低,泡沫依旧在高渗透层中的大孔道中窜流,故单纯泡沫驱含水率下降后回升较快;而在一次水驱后进行调剖,调剖剂进入高渗透层中形成封堵,迫使后续水进入中、低渗透层进行驱替,很大程度上启动了中渗透层,因此,其含水率回升比单独泡沫驱缓慢,但

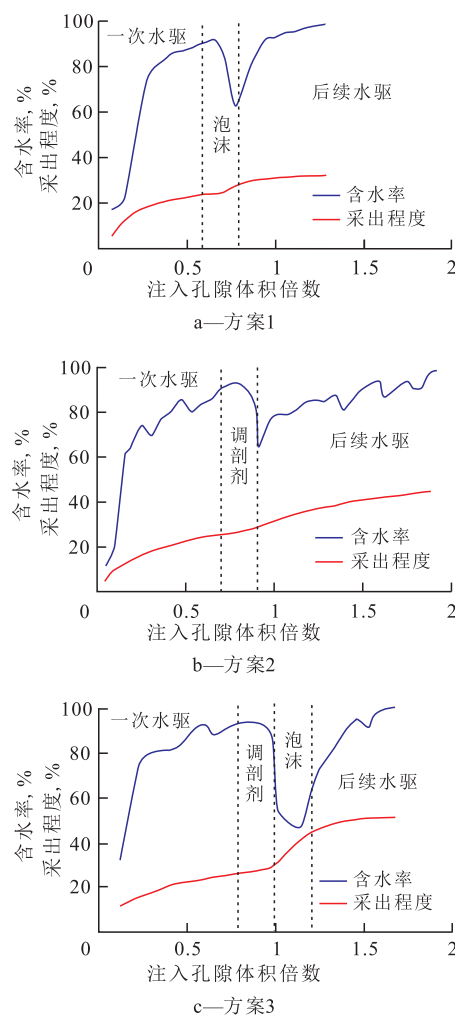


图1 不同段塞组合的驱油动态曲线

Fig.1 Dynamic displacement curves of different injected slug combinations

由于注入水粘度小,后续水驱时流度比较大,注入水会绕流到高渗透层的大孔道中,从而形成新的窜流通道。方案3的实验结果(图1c)表明,进行调剖后再注入0.2倍孔隙体积的泡沫,含水率可降至45.3%。

分析不同段塞组合的驱油动态曲线(图1)可知:方案1的最终采收率为32.3%,比一次水驱的采出程度(23.9%)提高了8.4%;方案2的最终采收率为44.6%,比一次水驱的采出程度(25.9%)提高了18.7%;方案3的最终采收率为50.3%,比一次水驱的采出程度(25.7%)提高了24.6%,比方案1的最终采收率提高了18.0%。对于方案1来说,一次水驱后直接进行泡沫驱提高采收率效果差是因为模型的非均质性较强,而泡沫的调剖能力有限,大部分泡沫在高渗透层中的大孔道窜流,无法发挥其应有的调剖作用。对于方案2来说,一次水驱后先进行调剖再后续水驱,注入的调剖剂主要封堵高渗透层,中、低渗透层依然存在较大的渗透率级差,调剖

后水驱使注入水优先在中渗透层中渗流,低渗透层启动程度低;比较来看,方案3中一次水驱后先进行调剖后再注泡沫采出程度增幅最高,这是由于泡沫具有调整吸液剖面的作用,调剖后泡沫进入中渗透层进行驱替并在其中堆积产生附加阻力,当注入压力达到低渗透层的启动压力时,泡沫开始进入低渗透层,使泡沫在中、低渗透层中均匀推进,中、低渗透层的启动程度得以提高,同时由于泡沫中含有的表面活性剂有利于洗油,因此,调剖后注入泡沫段塞再进行后续水驱可取得较好的提高采收率效果。

2.2 泡沫注入量对采出程度增幅的影响

由于选用的泡沫体系中含有稳泡剂,体系稳定性较强,在地层中可稳定存在一段时间,因此在调剖后可采用先注泡沫段塞,再进行后续水驱的方式来提高采收率。

当泡沫注入量为0.2倍孔隙体积时,含水率最低点为45.3%(图1c),当注入量增大到0.4和0.6倍孔隙体积时,含水率最低点分别下降至25.6%和32.7%(图2)。这是由于泡沫具有耐油性差的特点,在与剩余油接触后,泡沫液膜破裂加快,由于一次水驱阶段注入水主要启动高渗透层,中、低渗透层的启动程度低,剩余油饱和度高,调剖后泡沫进入中、低渗透层与大量的剩余油接触,导致驱替前缘泡沫消泡,泡沫注入量过少会导致泡沫段塞消泡速度加快,驱油效率降低,含水率下降幅度减小。

从图2中亦可看出,随着泡沫注入量的增大,注泡沫阶段采出程度增幅逐渐增大,泡沫注入量为0.4

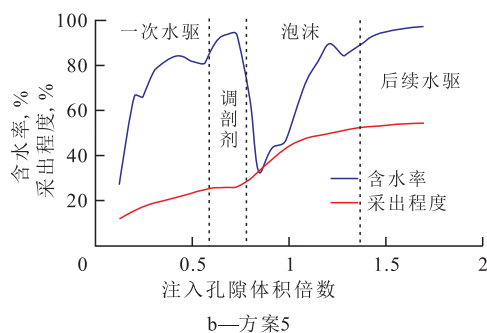
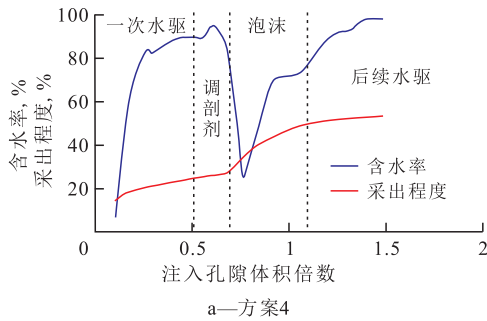


图2 不同泡沫注入量的驱油动态曲线

Fig.2 Dynamic displacement curves with different injected foam volumes

和0.6倍孔隙体积时,最终采收率分别为52.7%和54.4%,采出程度比一次水驱分别提高了27.6%和28.8%,二者相差不大;而泡沫注入量为0.2倍孔隙体积时的最终采收率比一次水驱提高了24.6%,增幅相对于0.4和0.6倍孔隙体积的泡沫注入量来说较小。分析认为,当泡沫注入量为0.2倍孔隙体积时,泡沫量过少,在后续水驱阶段,泡沫与地层原油接触消泡过快,相对于大注入量泡沫采出程度增幅较低。由于泡沫注入量为0.4和0.6倍孔隙体积的调剖后采出程度增幅相近,综合考虑经济因素,可将泡沫注入量定为0.4倍孔隙体积。

2.3 调剖与泡沫驱结合技术的分层增产效果

分析各层分流率(图3a)可以看出:整个一次水驱阶段及注调剖剂阶段高渗透层分流率较高,中、低渗透层产液量较少,分流率较低;第1次泡沫注入阶段,高渗透层分流率迅速下降,最终接近于0,中

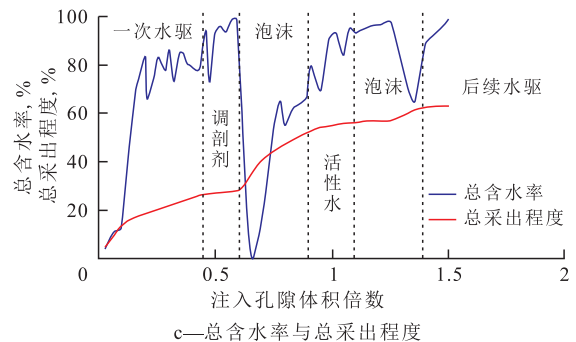
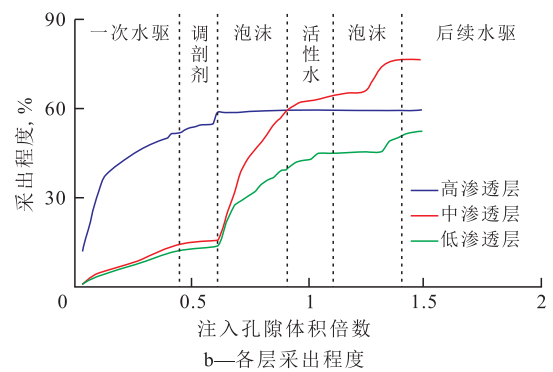
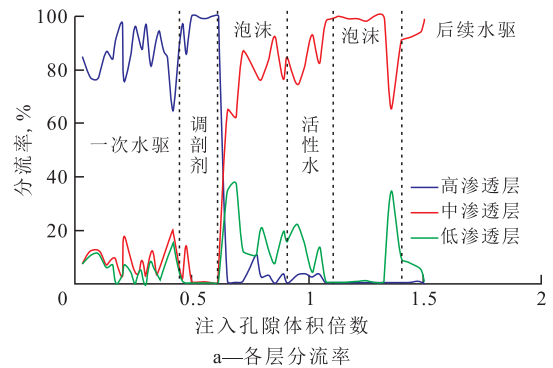


图3 调剖与泡沫驱结合的驱油动态曲线

Fig.3 Dynamic displacement curves of profile control and foam flooding

渗透层分流率则迅速上升,由于泡沫的调剖作用,泡沫在中渗透层中形成的阻力超过低渗透层的注入压力,泡沫进入低渗透层,在中、低渗透层中同时向前推进,中渗透层分流率上升幅度较大,低渗透层分流率上升幅度较小,最高上升至37.6%;注活性水阶段,中渗透层分流率上升,最终接近100%,高、低渗透层产液量减少;第2次泡沫注入阶段,中渗透层依旧维持在较高水平,但在注入末期中渗透层分流率急剧下降,而低渗透层分流率迅速上升,说明泡沫在中渗透层中形成了封堵并进入低渗透层进行驱替,从而进一步启动了低渗透层。

通过分析各层采出程度变化曲线(图3b)和总含水率与总采出程度曲线(图3c)发现,由于模型的非均质性较强,一次水驱阶段总含水率迅速上升,一次水驱结束时总采出程度为26.4%,其中,高渗透层的水驱采出程度达51.9%,而中、低渗透层的水驱采出程度仅分别为12.5%和11.7%;进行调剖之后,高渗透层采出程度基本不再变化,最终采收率仅提高了0.7%,中、低渗透层的采出程度明显提高,由于渗透率级差的存在,中渗透层的采出程度增幅高于低渗透层;第1次泡沫注入阶段初期,含水率迅速下降,瞬时含水率最低点甚至接近0,中、低渗透层采出程度明显提高,增幅分别为44.3%和24.7%,而高渗透层的采出程度增幅较小,说明调剖剂封堵效果良好,泡沫顺利进入中、低渗透层,由于模型为层间非均质,泡沫在各层之间不会发生窜流,调驱效果比层内非均质好;注活性水阶段,中、低渗透层采出程度增幅分别为7.5%和5.7%,活性水段塞主要用来保护泡沫段塞,在模型中与泡沫消泡后分离出来的气体混合重新生成泡沫,同时作为顶替段塞使泡沫向前推进;第2次泡沫注入阶段,含水率再次明显降低,由97.6%降至64.9%,而中、低渗透层的采出程度增幅分别为11.1%和5.8%;模型的最终采收率为63.0%,相对于一次水驱采出程度提高了36.0%。在模拟的层间非均质模型中,泡沫驱前进行调剖能够有效封堵高渗透层,从而启动中、低渗透层,且与泡沫驱剖面调整和驱油效率的提高作用相结合,可以同时提高波及效率和驱油效率,很大程度上保证提高采收率的效果。

3 结论

由于泡沫驱油具有一定的条件限制,对于强非均质性油藏,为防止泡沫在窜流通道中突进,可先

对地层进行调剖,实验结果表明,一次水驱后,先进行调剖再注入0.2倍孔隙体积泡沫比直接注入0.2倍孔隙体积泡沫的最终采收率高18.0%。

由于泡沫遇油消泡,所以若想使泡沫在地层中以段塞形式向前推进,应保证泡沫注入段塞的长度。综合考虑经济因素,泡沫注入量为0.4倍孔隙体积时的提高采收率效果最佳,最终采收率相对于一次水驱提高了27.6%。

对于层间非均质地层来说,水驱后采用调剖与泡沫调驱结合的技术能够大幅度提高采收率,为中、高渗透砂岩油藏调驱方案设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 武海燕,罗宪波,张廷山,等.深部调剖剂研究新进展[J].特种油气藏,2005,12(3):1-3,7.
Wu Haiyan, Luo Xianbo, Zhang Tingshan, et al. New development of deep profile control agent [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(3): 1-3, 7.
- [2] 唐孝芬.海上油田深部调剖改善水驱技术与机理研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
Tang Xiaofen. Study on technique and mechanism of in-depth profile modification for improving water-flooding in offshore oilfields [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [3] 芦文生.绥中36-1油田储层驱替特征研究[J].中国海上油气:地质,2003,17(3):181-184.
Lu Wensheng. A study on displacement characteristics of SZ36-1 oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2003, 17(3): 181-184.
- [4] 胡书勇,张烈辉,余华洁,等.油层大孔道调堵技术的发展及其展望[J].钻采工艺,2006,29(6):117-120.
Hu Shuyong, Zhang Liehui, Yu Huajie, et al. Development and prospect of the profile control/water shutoff technology in reservoir high-capacity channels [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(6): 117-120.
- [5] 丁乐芳,朱维耀,王鸣川,等.高含水油田大孔道参数计算新方法[J].油气地质与采收率,2013,20(5):92-95.
Ding Lefang, Zhu Weiyao, Wang Mingchuan, et al. A new method of calculating the big channel parameters in high water cut oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 92-95.
- [6] 赵刚,王本,陈国,等.泡沫复合驱三维多相多组分数学模型的应用[J].大庆石油学院学报,2004,28(4):33-35.
Zhao Gang, Wang Ben, Chen Guo, et al. Application of 3-D multi-phase multi-component mathematical model to ASP-foam flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(4): 33-35.
- [7] 王其伟,郭平,李雪松,等.泡沫体系在不同渗透率级差双管模型中的驱油效果[J].大庆石油学院学报,2008,32(6):39-42.
Wang Qiwei, Guo Ping, Li Xuesong, et al. Different permeability grade double-tube model on foam flooding effect [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(6): 39-42.

(下转第78页)