

文章编号:1673-5005(2008)03-0093-06

## 三次采油中泡沫的性能及矿场应用

王其伟<sup>1,2</sup>, 郑经堂<sup>1</sup>, 曹绪龙<sup>2</sup>, 郭平<sup>2</sup>, 李向良<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 化学化工学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:**在室内试验装置上考察了泡沫流体在多孔介质中的性能。结果表明:泡沫流体流动阻力较大,其视粘度超过各单一组分粘度;泡沫体系的视粘度随渗透率的增大而增大;在多孔介质中流动时,泡沫压差分布均匀,不会形成端面堵塞;泡沫对于油水具有选择性封堵能力,在残余油含量较低时,封堵能力强,流速低,残余油含量高时,泡沫不稳定,封堵性能差;泡沫流体良好的驱油效果,可以提高采收率20%以上。现场应用证明,泡沫能够显著提高注入压力,改善油层吸水剖面,提高油井产量,降低含水率。

**关键词:**泡沫;复合泡沫驱;封堵能力;封堵压差;三次采油

**中图分类号:**TE 357.29 **文献标识码:**A

### Foam capacity in tertiary oil recovery and application in pilot

WANG Qi-wei<sup>1,2</sup>, ZHENG Jing-tang<sup>1</sup>, CAO Xu-long<sup>2</sup>, GUO Ping<sup>2</sup>, LI Xiang-liang<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Branch Company, Dongying 257015, Shandong Province, China)

**Abstract:** The foam capacity in pore medium was investigated on in-house lab setup. The results show that foam has high flowing resistant, and its apparent viscosity is larger than any single component viscosity. The apparent viscosity of foam system increases with the permeability increasing. As a result of uniform distribution of foam pressure difference, end jam can't form. The block of foam has selectivity to oil and water. With low-content remaining oil, foam has strong block capacity and low flow velocity. With high-content remaining oil, foam has poor stability and weak block capacity. The foam system can enhance oil recovery by more than 20%. The pilot test results show that the foam can increase injection pressure enormously, improve the injection profile, enhance oil production and decrease water cut.

**Key words:** foam; combination foam flooding; block capacity; block pressure difference; tertiary oil recovery

泡沫驱是一种用泡沫作为驱油介质的三次采油方法,它能够极大地提高注入流体的视粘度,增加波及面积,在一些油田的矿场试验中取得了良好的效果<sup>[1,2]</sup>。泡沫是一种假塑性流体<sup>[3]</sup>,随着化学工业的发展和泡沫体系性能的增强,为其在三次采油的应用拓展了广阔的领域。

## 1 试验

### 1.1 主要仪器设备及材料

岩心驱替物理模拟装置:美国 Temco 公司生产,控温精度 $\pm 0.5$ ℃;气体质量流量控制计的控制

流量为0~30 mL/min;回压阀的控压为0~10 MPa;调压阀的控压精度为0.01 MPa;数字压力表精度为0.01 MPa。

ST700 混相仪:法国 VINCI 公司产,控温精度 $\pm 0.5$ ℃;气体质量流量控制计的控制流量为0~100 mL/min;回压阀的控压范围为0~35 MPa,控压精度为0.01 MPa;调压阀的调压范围为0~35 MPa,调压精度为0.01 MPa;数字传感器的精度为0.01 MPa。ST700 混相仪长细管模型为管式人工填充玻璃珠模型,长12 m,内径6 mm,渗透率 $16 \mu\text{m}^2$ ,带有7个测压点,每2 m分布一测压孔,与压力传感器相连,模

收稿日期:2007-12-17

基金项目:中国石油化工集团公司重大先导性项目(P03004)

作者简介:王其伟(1968-),男(汉族),山东济南人,高级工程师,博士研究生,从事三次采油化学驱和泡沫驱研究工作。

型孔隙度 35%，模型出口接可视观察窗及回压控制阀，自动采集数据。

泡沫剂：为自制 DP-4 产品，pH 值为 7~8，密度 1.0~1.01 kg/L，有效含量 36%。

模拟地层水：矿化度 8379 mg/L，Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> 含量 52 mg/L，Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> 含量 3061 mg/L，Cl<sup>-</sup> 含量 4086 mg/L，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量 1085 mg/L，CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量 95 mg/L。

聚合物 3530S：SNF 公司产品，固体含量 91%，分子量 1.5 × 10<sup>7</sup>，水解度 25%。

模拟油：孤岛中二区原油与过滤煤油按 9:1 配置，原油粘度为 102 mPa · s。

试验模型：采用石英砂填充模型，模型尺寸为 φ25 mm × 600 mm。

注入气为氮气。

### 1.2 试验方法

阻力因子测定。将岩心驱替流程连接、安装、调试，将石英砂填充模型抽空饱和水，注入模拟地层水测定水驱时的基础压差，注入聚合物或泡沫，待压力稳定后测定注入压差，计算阻力因子： $R = \Delta p / \Delta p_0$ 。式中， $\Delta p$  为起泡剂的流动压差，MPa； $\Delta p_0$  为对应流量下的基础压差，MPa。

驱油试验。将人工填制的不同渗透率的石英砂模型抽空饱和水、饱和油，并联接入流程，水驱至含水 98%；注入一定孔隙体积( $V_p$ )倍数的泡沫段塞后转水驱，至含水 98% 后，试验结束，记录各个试验阶段的注入压力、产出液含水率及采出程度变化情况。

### 1.3 试验条件

试验温度为 60 °C，回压为 6 MPa，注入速度 0.5 mL/min，若不特别注明，气液比均为 1，泡沫剂浓度为 0.5%。

## 2 结果分析

### 2.1 泡沫体系封堵性能

图 1 为聚合物及泡沫体系阻力因子曲线。石英砂填充模型空气渗透率为 1.50 μm<sup>2</sup>。曲线 1 为 2500 mg/L 3530S 聚合物的阻力因子曲线，聚合物体系最大阻力因子稳定值为 151；曲线 2 为泡沫体系的阻力因子曲线，驱替稳定时阻力因子最大值为 1560。泡沫体系的阻力因子比单纯聚合物的阻力因子大得多。在此温度压力下，模拟水的粘度为 0.5 mPa · s，若将体系的阻力因子折合成视粘度，泡沫体系的视粘度将远远大于聚合物的粘度，这是由于聚合物溶液虽然体系粘度大，但是溶液是均匀的流

体，在孔隙介质流动时，流动阻力只与溶液的粘度有关，而泡沫流体在孔隙介质中运动时，流动阻力一方面受流体的粘度影响，同时由于气泡在孔隙介质的孔喉处需要一定力的作用，发生变形才能通过，附加了额外的阻力，因此在微孔介质中，泡沫体系具有较大的流动阻力和较好的封堵能力，能够有效地提高注入流体的波及面积。泡沫的视粘度远远大于组成泡沫体系的单一的气体、活性剂溶液及聚合物溶液的粘度。

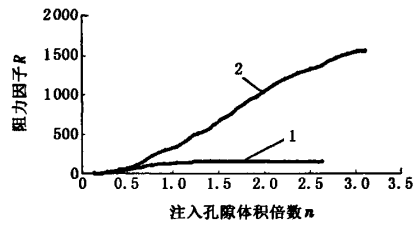


图 1 聚合物及泡沫体系阻力因子曲线

### 2.2 泡沫体系阻力因子与模型渗透率的关系

常规流体如水及高分子聚合物溶液在多孔介质中运移时，其粘度是相对稳定的，随着渗透率的增大，流动压差减小，符合流体的运动规律，可以用达西定律表示： $Q = kA\Delta p / (\mu L)$ ，对于一定尺寸的模型，面积  $A$  和长度  $L$  为确定值，同一条件下的流体粘度  $\mu$  也是固定的，压差  $\Delta p$  一定，流量  $Q$  与渗透率  $k$  呈线性关系。对于泡沫流体，其流动特征不符合达西定律，流量  $Q$  与渗透率  $k$  呈非线性关系。

泡沫阻力因子与渗透率的关系是泡沫所独有的特点，泡沫的封堵能力随渗透率的增大而增大，在油藏中表现为对高渗层封堵的选择性<sup>[4]</sup>。图 2 为泡沫阻力因子与渗透率关系曲线。

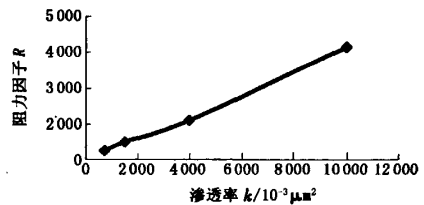


图 2 渗透率与阻力因子关系曲线

李和全等人<sup>[5]</sup>用数学模型的方式描述了泡沫流体的粘度特性，模型综合考虑了孔隙结构、泡沫结构、表面活性剂的浓度、液相和气相饱和度以及流速等的影响。结果表明，岩石绝对渗透率与泡沫表观粘度呈线性关系，并且表观粘度随渗透率增大而增大，这与试验中得出的阻力因子与渗透率呈正比的线性关系相吻合。

### 2.3 泡沫形成的压差与气液比的关系

将氮气和泡沫剂溶液按设计比例混合注入长细管模型,同时测定模型两端的注入压差及各测压点之间的压差,将4种气液比由模型两端形成的压差与模型注入孔隙体积倍数作图,结果见图3。

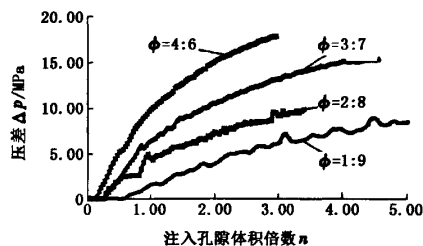


图3 不同气液比( $\phi$ )长细管模型两端压差随注入孔隙体积的变化曲线

从图3可以看出,模型两端的压差随注入量的增大而增大,气液比越大,注入相同孔隙体积倍数时形成的压差越大。这是由于在相同注入倍数时,气液比越大,单位时间内生成的泡沫越多,封堵能力越强。同时泡沫是一种流体,气泡受到外力作用会发生变形通过孔隙介质,在一定渗透率的孔隙介质中,气液比一定的泡沫体系随着注入量的增大,模型两端的压差逐渐增大。当增大到一个稳定值后,两端的压差不再随注入量的增大而增大,不同气液比的泡沫体系有不同的稳定值,随着气液比的增大,产生泡沫的速度变快,形成稳定泡沫的时间变短,泡沫的稳定性增大。

从图中不同气液比泡沫体系形成的压差可以看出,随着气液比的增大,初始起压时间缩短。由气液比1:9时注入 $0.61 V_p$ 泡沫开始起压,减少到气液比4:6时 $0.13 V_p$ 开始起压,开始起压时间由195 min缩减到60 min,在一定气液比范围内泡沫体系的气液比较大时,单位时间内产生的泡沫量较多,只有当泡沫在孔隙介质中累积到一定的孔隙体积倍数,在孔隙的横截面上形成一定稳定的泡沫层后,才能表现出有效的封堵能力。

### 2.4 泡沫体系在孔隙介质中的压力分布

泡沫体系在孔隙介质中如何分布,是否会在近井附近形成端面堵塞,在油藏深部能否形成有效的封堵调剖作用,是长期以来人们关心的问题,长细管试验重点解决泡沫在孔隙介质的分布及运移问题。试验证明,泡沫体系不会形成端面堵塞。图4为气液比4:6时泡沫体系相邻测压点之间的压差与注入量的关系曲线。从图4可以看出,泡沫进入孔隙介质,首先在模型的进口端形成封堵,随着注入量的增

大,不断向深部运移,孔隙介质前端的压差不再增大,封堵压差成均匀方式向后运动,与泡沫体系的运移方向相同,进口与第1测压点,第1与第2,第2与第3,第3与第4,第4与第5,第5与第6测压点之间的稳定压差分别为0.053,0.54,0.42,0.32,0.31,0.36 MPa,除进口与第一测压点压差低外,其他各点等距离之间的压差相差较小,说明泡沫体系在孔隙介质中分布较为均匀。泡沫的进口与第一个测压点的压差远远低于孔隙介质内部形成的压差,分析原因,是由于气液混合注入时,在进口端气液还没有完全混合均匀,不能形成均匀的泡沫,因此其封堵压力低于内部,随着气液向深部运移,气液逐渐混合形成泡沫,封堵压差达到稳定状态,泡沫在模型孔隙中封堵压力分布均匀,压力沿着流体的流动方向由高到低线性分布。

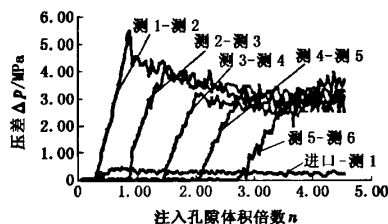


图4 长细管模型相邻测压点之间压差随注入体积的变化曲线

### 2.5 泡沫体系在孔隙介质中的稳定性

液膜强度是决定泡沫稳定性的主导因素,表面活性剂溶液形成的泡沫液膜厚度越大,强度越高,排液期越长,越能抵抗外部影响造成的形变,泡沫的稳定性越好。与处于平衡状态的泡沫相比,在多孔介质中流动或静止的泡沫所处的环境更为复杂。处于平衡状态的泡沫形成后,进行的是自然的排液过程,泡沫在排液过程中受到的外力影响小,液膜中的液体在重力作用下排出,使得液膜变薄,失去弹性,与同时发生的气体的扩散一起导致了泡沫的破裂。多孔介质中泡沫的稳定性因素要复杂得多,除了上述影响泡沫稳定性的因素外,泡沫在运动过程中受到的冲击、挤压、摩擦同样影响到泡沫的稳定性,研究泡沫在多孔介质的动态及静态稳定性,对于泡沫能否应用于油藏驱油具有重要意义。

将充满泡沫的长细管模型放置,继续测定不同测压点的压力,从长细管进出口两端的压差曲线可以看出,在长细管中放置3500 min,泡沫体系具有较好的稳定性,进出口两端的压差下降幅度不大,仍然具有较好的封堵能力,从图5长细管模型各测压

点的压力变化曲线可以看出,泡沫体系在孔隙介质中静止放置时,除进口与第一测压点的压力值很快重合外,各测压点压力基本稳定,呈缓慢减小趋势,并由前向后运移,压力缓慢下降。长细管模型中除进口与第一测压点之间的压差外,其他各测压点间的压差变化幅度较小,总体上,泡沫在没有残余油存在的长细管多孔介质模型中性能稳定,在没有外力作用下基本处于静止状态,泡沫破灭及运移速度缓慢。

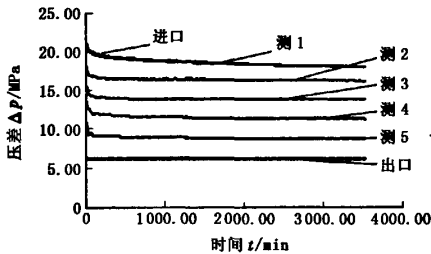


图5 长细管模型各测压点的压力变化

### 2.6 泡沫体系在孔隙介质中水驱时的变化规律

在长细管模型中静止放置 3 500 min 后,以注泡沫的速度注水,从长细管模型各测压点压力变化曲线(图 6)可以看出,泡沫从前向后均匀运移,长细管模型的前端压力减小,进口与第一测压点的压力线重合,后端测压点的压力值先上升后下降。泡沫段塞在后续水的压力驱动下呈波浪式向后运动。从图 6 可以看出,其进出口压差维持较长的时间,注入 10  $V_p$  水后,泡沫体系仍然具有较好的封堵压差,泡沫体系在孔隙介质中有良好的残余封堵能力。

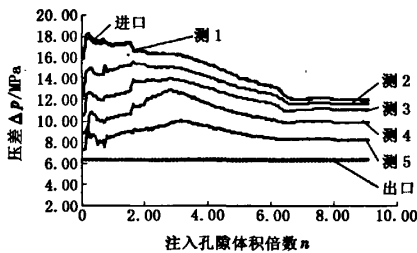


图6 后续水驱时泡沫体系各个测压点压力的变化

### 2.7 泡沫体系对于油水的选择性调剖能力

油藏中经过多年的注水开发,残余油饱和度分布很不均匀,相差很大<sup>[6]</sup>,室内试验无法真实地模拟现场条件,因此模拟了油藏驱油的极限条件,分别制作了两根渗透率不等的模型,高渗管渗透率 2.44  $\mu\text{m}^2$ ,低渗管渗透率 1.01  $\mu\text{m}^2$ ,将低渗管饱和模拟油,高渗管饱和模拟水,将高、低渗模型管并联,水驱

后注单一泡沫体系,图 7 为产出液随注入孔隙体积倍数的变化曲线。

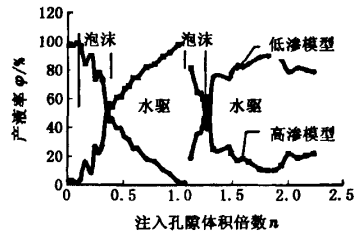


图7 不同含油模型泡沫驱产出液量曲线

从图 7 可以看出,双管模型注水后,水主要从高渗管产出,高渗管产液占总液量的 98%;注入 0.3  $V_p$  泡沫后,注入压差增大,压差从水驱时的 0.05 MPa 提高到注泡沫剂的 0.4 MPa,高渗管产出液减少,低渗管产出液增大,转注水后,压差下降到 0.02 MPa,高渗管产液量恢复,再注入 0.2  $V_p$  泡沫段塞后,压差迅速上升到 0.15 MPa,虽然压差上升的幅度较小,但注入泡沫后低渗管产液量增大到总液量的 90%,高渗管产液量减少至总液量的 10%,高、低渗管产出液百分数反转。转注水后,低渗管液量仍占总液量的 80%,在泡沫的作用下,低渗模型产液量远远高于高渗模型,这一试验有力地说明了泡沫体系对于油水的选择性封堵特性。产生这一特殊现象的主要原因是,高渗模型不含油,泡沫形成有效的封堵,而低渗模型由于残余油的影响,泡沫不稳定,不能形成有效的封堵<sup>[7]</sup>,因此,导致低渗模型的产液量高于高渗模型,从孤岛中二区 28-8 井单井注泡沫试验的吸水剖面,可以证明泡沫体系这一优良特性。注泡沫前 4<sup>2</sup> 层吸水 100%,4<sup>4</sup> 层吸水 0,注入泡沫体系后,4<sup>2</sup> 层吸水变为 44%,4<sup>4</sup> 层吸水 56%,说明泡沫体系具有良好的选择性封堵能力。

### 2.8 泡沫体系良好的驱油能力

泡沫体系良好的驱油特性也是泡沫驱的一大特点,但是单一泡沫体系由于受到残余油的影响,稳定性较差,驱油效果不理想<sup>[8]</sup>。强化泡沫体系是在泡沫体系中加入定量的聚合物,聚合物的加入可以提高泡沫体系粘度,增强泡沫的稳定性<sup>[9-10]</sup>,同时可以减少泡沫剂在油藏中的吸附损耗。强化泡沫体系具有泡沫体系及聚合物的双重优点。

试验模拟地层条件下油藏非均质的特点,制作不同渗透率的双管模型,高渗管渗透率 2.39  $\mu\text{m}^2$ ,低渗管渗透率 0.99  $\mu\text{m}^2$ ,双管并联,回压为 6 MPa,注入速度为 0.5 mL/min,水驱至综合含水 98%,注

入 $0.1V_p$ 强化泡沫溶液(1800 mg/L 3530S + 0.5% DP-4 泡沫剂)前置段塞,再注入 $0.3V_p$ 强化泡沫段塞(1800 mg/L 3530S + 0.5% DP-4 泡沫剂与氮气混合式注入),气液比为0.5:1,水驱至含水98%。图8为强化泡沫驱综合采收率曲线,图9为高低渗模型产液曲线,表1为高低渗模型不同阶段采出程度数据。

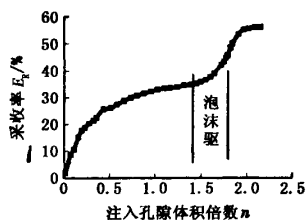


图8 强化泡沫体系综合采收率曲线

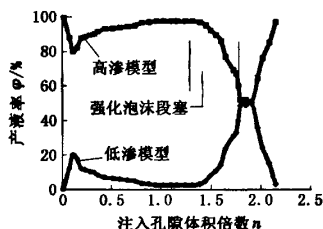


图9 强化泡沫高、低渗透率管产液曲线

表1 非均质模型强化泡沫驱采出程度数据

| 模型  | 水驱采收率<br>$E_{R1}/\%$ | 泡沫驱采收率<br>$E_{R2}/\%$ | 泡沫驱采收率提<br>高值 $\Delta E_R/\%$ |
|-----|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 低渗管 | 17.8                 | 40.63                 | 22.83                         |
| 高渗管 | 52.13                | 72.13                 | 20.0                          |

试验数据显示,水驱至综合含水98%时,高、低渗模型水驱综合采收率为34.8%,转注 $0.1V_p$ 的泡沫前置段塞及 $0.3V_p$ 强化泡沫段塞后继续水驱至综合含水98%时,综合采收率为56.3%,与水驱相比提高采收率21.5%。低渗模型泡沫驱最终采收率提高了22.83%,高渗模型提高采收率20.0%,低渗模型提高采收率高于高渗模型,这是因为低渗模型水驱后剩余油含量较高,高渗模型剩余油潜力较小<sup>[11]</sup>。试验证明泡沫体系对于低渗层的驱油能力优于其他方法。

从高低渗透率模型产液曲线上可以看出,注入泡沫段塞后,高渗管产液量减少,低渗管产液量增加,一度高、低渗管产液量相等,证明了泡沫体系良好的调剖能力<sup>[12]</sup>。转水驱后,高低渗管产液量逐渐恢复到原来的水平。

### 3 现场试验结果

在孤岛油田中二区中部28-8井,开展了注强化

泡沫试验研究,试验设计注入前置段塞10 d,0.18%聚合物+1.5%泡沫剂,主段塞170 d,0.18%聚合物+0.75%泡沫剂+氮气,气液比1:1,注入氮气 $130.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,聚合物28.5 t,泡沫剂118 t。由于试验过程中出现的气窜等问题,试验方案作了适当调整,气液比降为3:7。试验取得了较好的效果,注入井的注入压力由5.5 MPa提高到7.2 MPa,注水剖面得到了明显改善,主力吸水层 $4^2$ 层由试验前的吸水量100%下降到试验后的43%,而其他两个试验前不吸水的油层由吸水量接近0提高到57%。注入强化泡沫明显改善油藏的非均质性和吸水剖面。13口受效井,有10口不同程度见效,井组产油量由试验前的70 t/d提高到155 t/d,日增油85 t,综合含水率由试验前的93.8%下降到88.1%,下降5.7%,其中29-3井的含水率由95%下降到42.5%,下降52.5%,降水效果非常明显。单井试验说明,强化泡沫驱能够较好地改善油层非均质性,提高油井产量,改善水驱效果,是一种很有前途的三次采油方法。

### 4 结论

(1)泡沫体系在多孔介质中具有较高视粘度,其视粘度超过组成体系的气体、泡沫剂溶液粘度,甚至高于聚合物溶液粘度;泡沫体系的视粘度具有随渗透率的增大而增大的特性。

(2)在一定范围内泡沫封堵能力随气液比的增大而增大,气液比大时泡沫形成封堵的时间缩短。

(3)泡沫在多孔介质中形成的压差分布较为均匀,各测压点的压力从进口至出口逐渐下降;泡沫不会形成端面堵塞。

(4)泡沫体系在油藏运移时对于油水具有选择性的驱动特性,在残余油含量较低时,封堵能力强,流动度低,残余油含量高时,泡沫不稳定,封堵性差,甚至形不成有效的封堵。

(5)泡沫具有较好地提高采收率的能力,并且能够提高低渗层即残余油较多的区域的采收率。

#### 参考文献:

- [1] 廖广志,李立众,孔繁华,等. 常规泡沫驱油技术[M]. 北京:石油工业出版社,1999:126-130.
- [2] 张思富,廖广志,张彦庆,等. 大庆油田泡沫复合驱油先导性矿场试验[J]. 石油学报,2001,22(1):49-53. ZHANG Si-fu, LIAO Guang-zhi, ZHANG Yan-qing, et al. ASP-foam pilot test of Daqing oilfield[J]. Acta Petroleol

- Sinica, 2001, 22(1): 49-53.
- [3] 宋育贤. 泡沫流体在油田上的应用[J]. 国外油田工程, 1997, 13(1): 5-8.  
SONG Yu-xian. Foam liquid applying in oilfield [J]. Foreign Oilfield Engineering, 1997, 13(1): 5-8.
- [4] 王其伟, 郭平, 周国华, 等. 泡沫体系封堵性能影响因素研究[J]. 特种油气藏, 2003(3): 79-81.  
WANG Qi-wei, GUO Ping, ZHOU Guo-hua, et al. The research of effect factor of foam block ability [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003(3): 79-81.
- [5] 李和全, 李淑红, 吴波, 等. 一个气液两相泡沫驱模型[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(3): 15-18.  
LI He-quan, LI Shu-hong, WU Bo, et al. A model of gas-liquid foam flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(3): 15-18.
- [6] 赵福麟, 张贵才, 周洪涛, 等. 二次采油与三次采油的结合技术及其进展[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 38-42.  
ZHAO Fu-lin, ZHANG Gui-cai, ZHOU Hong-tao, et al. The combination technique of secondary oil recovery with tertiary oil recovery and its progress [J]. Acta Petroleol Sinica, 2001, 22(5): 38-42.
- [7] 王其伟, 周国华, 郭平, 等. 泡沫封堵能力试验研究[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(6): 40-42.  
WANG Qi-wei, ZHOU Guo-hua, GUO Ping, et al. Experimental study of foam blocking ability [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(6): 40-42.
- [8] 刘中春, 侯吉瑞, 岳湘安, 等. 泡沫复合驱微观驱油特性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 49-53.  
LIU Zhong-chun, HOU Ji-rui, YUE Xiang-an, et al. Micro-visual analysis on oil displacement in Alkaline-surfactant-polymer foam flooding [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(1): 49-53.
- [9] 赵晓东. 泡沫稳定性综述[J]. 钻井液与完井液, 1992, 9(1): 7-14.  
ZHAO Xiao-dong. Summarize of foam stability [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1992, 9(1): 7-14.
- [10] 佟曼玉. 油田化学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 236-240.
- [11] SUDARSHI T A Regismond, FRANCOISE M Winnik, GODDARD E Desmond. Stabilization of aqueous foams by polymer/surfactant systems: effect of surfactant chain length [J]. Colloids and Surfaces A, 1998, 141(12): 165-171.
- [12] PACELLIL J Zitha. Foam drainage in porous media [J]. Transport in Porous Media, 2003, 52: 1-16.
- [13] SCHWARTZ L W, ROY R V. A mathematical for an expanding foam [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 264(8): 237-249.

(编辑 刘为清)

(上接第92页)

- [6] 薛亮, 汪志明, 王小秋. 注入比对水平井筒压降影响规律的研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 71-74.  
XUE Liang, WANG Zhi-ming, WANG Xiao-qi. Effects of injection ratio on pressure drop in horizontal wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(4): 71-74.
- [7] BREKKE K, LIEN S C. New and simple completion methods for horizontal wells improve the production performance in high permeability, thin oil zones [R]. SPE 24762, 1992.
- [8] PERMADI P, WIBOWO W, ALAMSYAH Y, et al. Horizontal well completion with stringer for reducing water coning problems [R]. SPE 37464, 1997.
- [9] SINHA S, KUMAR R, VEGA L, et al. Flow equilibration towards horizontal wells using downhole valves [R]. SPE 68635, 2001.
- [10] JANSEN J D, WAGENVOORT A M, DALING R. Smart well solutions for thin oil rims: inflow switching and the smart stinger completion [R]. SPE 77942, 2002.
- [11] JANSEN J D. A semianalytical model for calculating pressure drop along horizontal wells with stinger completions [J]. SPE Journal, 2003, 8(2): 138-146.
- [12] SU Z E, GUDMUNDSSON J S. Pressure in perforated pipes: experiments and analysis [R]. SPE 28800, 1994.
- [13] 王小秋, 汪志明, 魏建光. 井筒与油藏耦合条件下水平井变质量流动规律研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(3): 326-331.  
WANG Xiao-qi, WANG Zhi-ming, WEI Jian-guang. Investigation of variable mass flow in horizontal well with perforation completion coupling reservoir [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(3): 326-331.

(编辑 李志芬)