

## 聚合物-降粘剂复合驱原油粘度界限确定方法

李宗阳<sup>1,2</sup>,王业飞<sup>1</sup>,张娜<sup>2</sup>,夏晞冉<sup>2</sup>,赵方剑<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580; 2.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

**摘要:** 聚合物-降粘剂复合驱已越来越广泛地应用于各大油田,并取得了良好的开发效果,但随着原油粘度的增大,增油量不断减少,开发效益不断降低,目前尚没有明确方法来确定所适用的原油粘度界限,严重制约了该技术的推广应用。为此,从财务净现值入手,以吨剂增油值作为筛选指标,建立聚合物-降粘剂复合驱的原油粘度界限确定方法,以孤岛油田东区Ng4<sup>1</sup>-5<sup>1</sup>单元为例,利用所建方法得到该区块的原油粘度界限筛选图版。研究表明,聚合物-降粘剂复合驱原油粘度界限随油价上升不断增大,当油价为40美元/bbl时,原油粘度界限仅为854 mPa·s,但当油价升至70美元/bbl时,原油粘度界限提高至4 471 mPa·s。

**关键词:** 聚合物-降粘剂复合驱 原油粘度界限 财务净现值 极限吨剂增油值 油价 稠油油藏

中图分类号:TE357.46<sup>3</sup>

文献标识码:A

## Determination method of the upper limit of oil viscosity suitable for polymer/viscosity reducer combination flooding

LI Zongyang<sup>1,2</sup>, WANG Yefei<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>2</sup>, XIA Xiran<sup>2</sup>, ZHAO Fangjian<sup>2</sup>

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Polymer/viscosity reducer combination flooding has been widely used in many oil fields and has obtained very good performance. However, as the increase of oil viscosity, the incremental oil production decreases. By far, there is no determination method of the upper limit of oil viscosity suitable for the polymer/viscosity reducer combination flooding, which severely restricts the wide application of this chemical flooding. Taking the oil increment value for a ton of agent as the standard, a determination method of the upper limit of the oil viscosity for the polymer/viscosity reducer combination flooding was built based on the financial net present value. Taking the Ng4<sup>1</sup>-5<sup>1</sup> unit in eastern area of Gudao Oilfield for example, a chart was obtained to determine the upper limit of oil viscosity. The results show that the upper limit of oil viscosity increases along with the increase of oil price. If the oil price is 40 \$/bbl, the upper limit of oil viscosity is only 854 mPa·s. However, if the oil price is 70 \$/bbl, the upper limit of oil viscosity increases to 4 471 mPa·s.

**Key words:** polymer/viscosity reducer combination flooding; upper limit of oil viscosity; net present value; limit value of oil increment value for a ton of agent; oil price; heavy oil reservoir

在当今低油价形势下,常规的稠油热采技术由于成本高、技术复杂,面临着越来越多的挑战<sup>[1-4]</sup>,而聚合物-降粘剂复合驱成本较低,易于实施且具有良好的提高采收率效果,目前正越来越广泛地被应用于油田开发中<sup>[5-9]</sup>。然而,聚合物-降粘剂复合驱的矿场实施效果与原油粘度关系紧密,但目前却没

有明确的方法可确定聚合物-降粘剂复合驱的原油粘度界限,严重制约了其在油田的推广应用<sup>[10-12]</sup>。为此,首先提出了一种聚合物-降粘剂复合驱原油粘度界限的确定方法,然后以孤岛油田东区Ng4<sup>1</sup>-5<sup>1</sup>单元为例,利用数值模拟方法,得到了聚合物和降粘剂在不同浓度时复合驱的原油粘度界限筛选图

收稿日期:2018-07-09。

作者简介:李宗阳(1986—),男,山东临沂人,工程师,在读博士研究生,从事化学驱提高采收率技术攻关和推广工作。联系电话:15005468258, E-mail: lizongyang177.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

版,以期为稠油油藏聚合物-降粘剂复合驱的应用提供依据。

## 1 原油粘度界限确定标准

随着原油粘度的增大,聚合物-降粘剂复合驱的增油量下降,经济效益变差,故将经济效益为0时的原油粘度视为聚合物-降粘剂复合驱所适用的原油粘度界限,也称极限原油粘度。为此,首先采用财务净现值法得到不同油价下财务净现值为0时的极限吨剂增油值,再利用数值模拟结果计算不同聚合物质量浓度、降粘剂质量分数以及原油粘度组合时的吨剂增油值并绘制成图版,最后以极限吨剂增油值作为筛选指标,得到不同油价下聚合物-降粘剂复合驱所适用的原油粘度界限。

### 1.1 极限吨剂增油值计算模型

根据财务净现值法,化学驱结束时的财务净现值应等于收入与支出之差,而收入主要为原油销售所带来的收益,支出则主要包括吨油的增量成本、注入的化学剂成本和资源税等,其计算式为

$$NPV = \sum_{i=1}^t \left\{ Q_{oi} P_o \alpha - [Q_{oi} C_m + Q_{pi} P_p + Q_{ji} P_j + (R_s + RP_o) Q_{oi} \alpha] \right\} \times \frac{1 - (1 + i_c)^{-t}}{i_c} - n(I_s - V_r) \quad (1)$$

式中:  $NPV$  为累积财务净现值,元;  $i$  为序数;  $t$  为开采时间,a;  $Q_{oi}$  为第  $i$  年增油量,t;  $P_o$  为原油价格,元/t;  $\alpha$  为原油商品率,%;  $C_m$  为吨油增量成本,元/t;  $Q_{pi}$  为第  $i$  年聚合物注入量,t;  $P_p$  为聚合物价格,元/t;  $Q_{ji}$  为第  $i$  年降粘剂注入量,t;  $P_j$  为降粘剂价格,元/t;  $R_s$  为资源税,元/t;  $R$  为综合税率,%;  $i_c$  为基准收益率,%;  $n$  为区块注入井数,口;  $I_s$  为单井地面建设投资,元/口;  $V_r$  为开采期末单井地面设备残值的折现值,元/口。

在聚合物和降粘剂用量保持不变的条件下,聚合物-降粘剂复合驱的增油量越少,则累积财务净现值越低,累积财务净现值为0时所对应的原油产量为最低原油产量,该值与所消耗的化学剂量之比为极限吨剂增油值,其物理意义为消耗单位质量化学剂需要增加的最低原油产量。由于聚合物-降粘剂复合驱涉及2种化学剂,因而在计算极限吨剂增油值时,需根据2种化学剂的价格进行折算。极限吨剂增油值的计算式为

$$F_c = \frac{Q_m - Q_w}{M_p + \frac{P_j}{P_p} M_j} \quad (2)$$

式中:  $F_c$  为极限吨剂增油值,t/t;  $Q_m$  为二元复合驱原油产量,t;  $Q_w$  为水驱原油产量,t;  $M_p$  为聚合物质量,t;  $M_j$  为降粘剂质量,t。

### 1.2 原油粘度界限确定方法

当聚合物质量浓度较低时,聚合物-降粘剂复合驱注入液粘度较低,因而聚合物扩大波及效果有限,开发效果较差,吨剂增油值相应也较低;但当聚合物质量浓度过高时,注入液粘度过大,难以通过注入井注入,同时消耗的聚合物量过大,经济效益较差,吨剂增油值也较低。同理,当降粘剂质量分数较低时,注采井间的原油降粘幅度小,很难起到较好的增油效果,吨剂增油值较低;而当降粘剂质量分数过高时,注入化学剂的成本过高,吨剂增油值也较低。一般情况下,吨剂增油值曲面为一个上凸的曲面(图1a),聚合物质量浓度和降粘剂质量分数存在最佳配比,最佳配比时的吨剂增油值为最大值。随着原油粘度的增大,聚合物-降粘剂复合驱增油效果变差,吨剂增油值变化曲面随原油粘度的增加整体下移,因而若绘制吨剂增油值曲面最大值与原油粘度的关系曲线,则可见最大吨剂增油值随原油粘度的增加而减小(图1b)。以某一油价下的极限吨剂增油值为筛选指标,则可得到对应于该极限吨剂增油值的原油粘度。由于图1b中曲线为不同原油粘度时所对应的吨剂增油值曲面的最大值,因而当储层原油粘度大于该值时,任意聚合物质量浓度和降粘剂质量分数的组合均不具有经济效益,

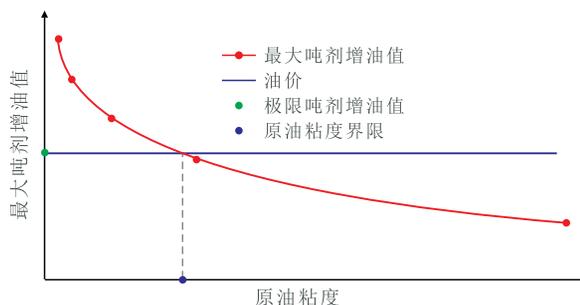
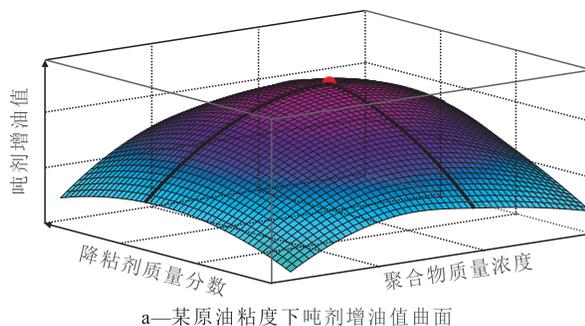


图1 原油粘度界限的确定方法示意

Fig.1 Schematic diagram of determination of crude oil viscosity limit

该原油粘度可视为聚合物-降粘剂复合驱的原油粘度界限。

## 2 应用实例

### 2.1 模型的建立

选取孤岛油田东区 Ng4<sup>1</sup>-5<sup>1</sup> 单元中的部分井组作为目标区块建立数值模拟模型(图2)。目标区块含油面积为 0.49 km<sup>2</sup>, 石油地质储量为 382.6×10<sup>4</sup> t, 共有 9 口注入井, 23 口生产井, 模型划分为 42×40×20 共 33 600 个网格, 平面和纵向 3 个方向的网格步长分别为 11.74, 25.00 和 2.0 m。目标区块的基本地质参数包括: 原始地层压力为 12.71 MPa, 顶面埋深为 1 200 m, 底面埋深为 1 240 m, 原始含油饱和度为 65%, 残余油饱和度为 20%, 地层渗透率为 862.5 mD, 地层原油粘度为 104 mPa·s。首先对目标区块进行水驱, 当含水率达到 95% 时进行聚合物-降粘剂复合驱, 化学剂注入速度为 0.1 PV/a, 当注入化学剂的段塞尺寸为 0.4 PV 时转后续水驱开发, 化学驱和后续水驱阶段开发年限共计 15 a。

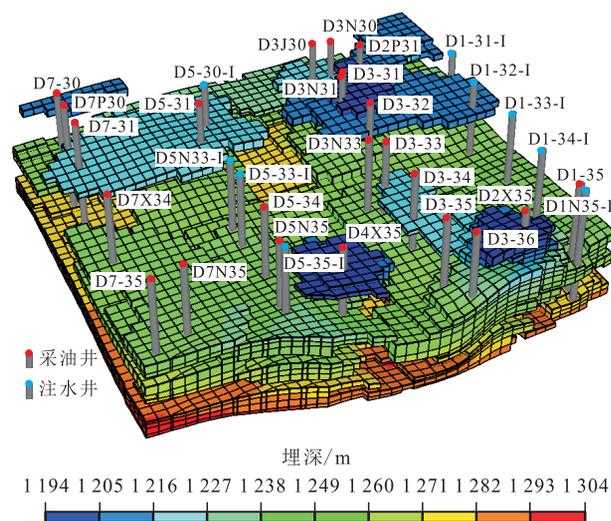


图2 目标区块数值模拟模型

Fig.2 Numerical simulation model for target block

### 2.2 极限吨剂增油值的确定

模拟复合驱及其后续水驱开发年限为 15 a, 原油商品率取 0.97, 基准收益率取 12%, 资源税取 14 元/t, 综合税率取 13.2%, 单井地面建设投资取 25×10<sup>4</sup> 元/口, 开采期末单井地面设备残值的折现值取 5×10<sup>4</sup> 元/口, 吨油增量成本取 600 元/t, 聚合物价格取 1.3×10<sup>4</sup> 元/t, 降粘剂价格取 1.3×10<sup>4</sup> 元/t。将上述参数代入式(1), 得到低油价(40 美元/bbl)、中等油价(55 美元/bbl)和较高油价(70 美元/bbl)下的极限吨剂增油值分别为 21.0, 13.2 和 9.6 t/t。说明随着油价

的上升, 其极限吨剂增油值不断下降。

### 2.3 原油粘度界限的确定

根据油田常用的聚合物和降粘剂浓度范围以及化学驱油藏的原油粘度范围, 确定模拟所用的聚合物质量浓度分别为 1 500, 2 000, 2 500 和 3 000 mg/L, 降粘剂质量分数分别为 0.1%, 0.2%, 0.3% 和 0.4%, 原油粘度分别为 100, 200, 500, 1 000, 3 000 和 4 500 mPa·s, 设计 4×4×6 共 96 套模拟方案, 其中所用聚合物溶液的粘度与质量浓度关系曲线如图 3 所示, 降粘剂的降粘率为 90%, 不同原油粘度时的各方案数值模拟结果见图 4。如前所述, 聚合物和降粘剂浓度过低或过高均会对开发效果产生影响, 存在一个最佳的聚合物质量浓度和降粘剂质量分数组合, 因而图 4 中不同原油粘度时的吨剂增油曲面在整体上均表现为四周低中间高的特点, 曲面顶点即为该原油粘度下的最大吨剂增油值。

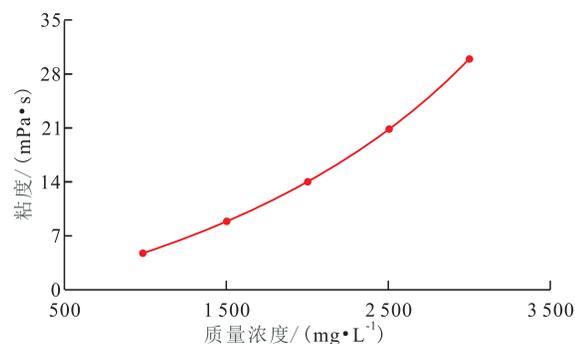


图3 聚合物溶液质量浓度与粘度的关系

Fig.3 Relationship between viscosity and mass concentration of polymer solution

以原油粘度为横坐标, 以最大吨剂增油值为纵坐标, 即可得到最大吨剂增油值随原油粘度的变化曲线。从图 5 可以看出, 最大吨剂增油值与原油粘度近似呈对数关系, 随着原油粘度的增大, 最大吨剂增油值不断降低。以计算出的低油价、中等油价和较高油价时的极限吨剂增油值为标准, 得到 3 个油价下的原油粘度界限分别为 854, 2 923 和 4 471 mPa·s。因此, 只有当原油粘度低于相应油价下的界限值时, 油田的开发效益才可能大于其投入成本, 才适合利用聚合物-降粘剂复合驱进行开发。

### 2.4 原油粘度筛选界限图版

在油田实际开发过程中, 由于所用的聚合物和降粘剂类型不一, 因此, 聚合物增加水相粘度和降粘剂降低油相粘度的能力也不同<sup>[11-12]</sup>。为了得到不同性能化学剂的原油粘度界限, 分别改变聚合物粘度和降粘剂的降粘率, 采用新方法计算得到不同聚合物粘度和降粘剂降粘率时的原油粘度界限, 再以极限吨剂增油值作为筛选指标, 即可得到相对应的

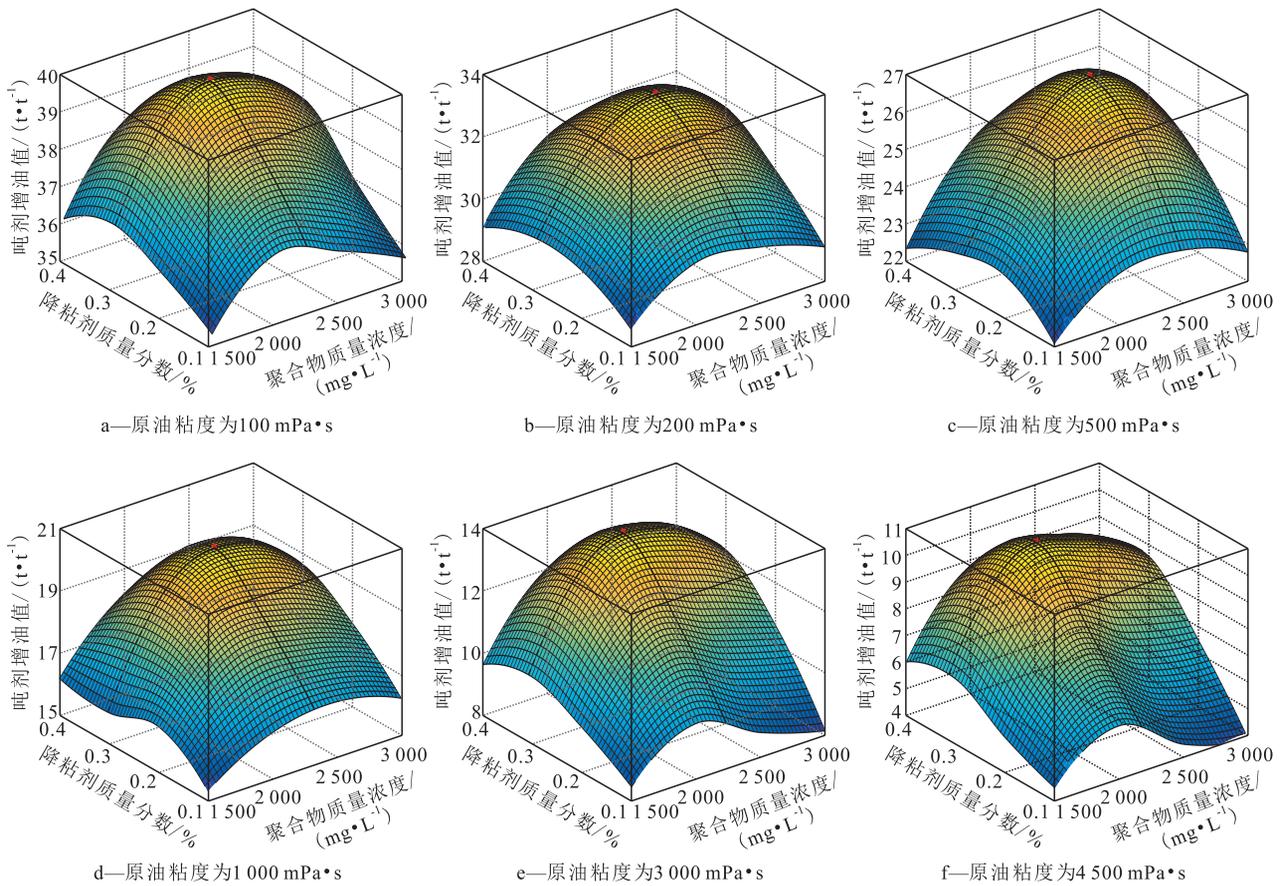


图4 原油粘度与吨剂增油值的关系

Fig.4 Relationship between oil viscosity and oil increment value for a ton of agent

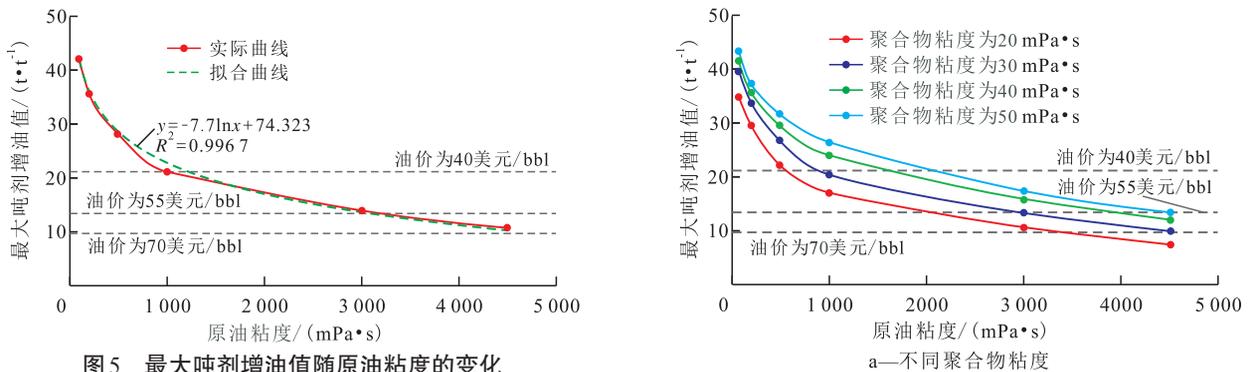


图5 最大吨剂增油值随原油粘度的变化

Fig.5 Variation of the maximum oil increment value for a ton of agent with crude oil viscosity

原油粘度界限。由图6可以看出,当聚合物质量浓度为3000 mg/L时,不同聚合物粘度时的最大吨剂增油值与原油粘度的关系曲线变化趋势大体一致,但随着聚合物粘度和降粘剂降粘率的增大,相应粘度下的最大吨剂增油值都逐渐增大,曲线整体上移,化学驱效果变好,各油价所对应的原油粘度界限不断增大。因此,在油田开发过程中,应在经济合理的范围内选用增粘效果较好的聚合物和降粘率较高的降粘剂,同时施工时应尽量避免化学剂由于机械剪切等造成性能下降,从而扩大聚合物-降

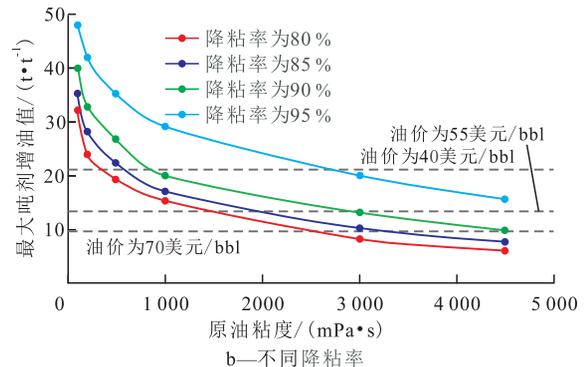


图6 原油粘度界限筛选图版

Fig.6 Screening chart for crude oil viscosity limit

粘剂复合驱所适用的油藏范围。

### 3 结论

基于财务净现值法,建立了聚合物-降粘剂复合驱原油粘度界限的确定方法,该方法首先计算得到不同油价下财务净现值为0时的极限吨剂增油值,然后利用数值模拟得到不同聚合物质量浓度、降粘剂质量分数以及原油粘度组合时的吨剂增油值并绘制成图版,最后以极限吨剂增油值作为筛选指标,得到不同油价下聚合物-降粘剂复合驱所适用的原油粘度界限。

原油粘度界限随着油价的上升而增大。对于孤岛油田东区 Ng4<sup>1</sup>-5<sup>1</sup>单元,油价为40美元/bbl时,原油粘度界限仅为854 mPa·s;油价为55美元/bbl时,原油粘度界限为2 923 mPa·s;而当油价为70美元/bbl时,原油粘度界限可提高至4 471 mPa·s。

通过不同聚合物粘度和降粘剂降粘率时的原油粘度界限筛选图版可以看出,随着聚合物粘度和降粘剂降粘率的升高,化学驱效果变好,最大吨剂增油值曲线整体上移,各油价所对应的原油粘度界限不断增大,因而在油田的实际开发中,应在经济合理的范围内选用增粘效果较好的聚合物和降粘率较高的降粘剂。

#### 参考文献:

- [1] 吴明录,赵高龙,姚军,等.稠油热采三区复合油藏水平井试井解释模型及压力响应特征[J].大庆石油地质与开发,2016,35(6):117-122.  
WU Minglu, ZHAO Gaolong, YAO Jun, et al. Well test interpreting model and pressure response characteristics of the horizontal well in thermally recovered three-block composite heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35 (6): 117-122.
- [2] 赵燕,吴光焕,孙业恒.泡沫辅助蒸汽驱矿场试验及效果[J].油气地质与采收率,2017,24(5):106-110.  
ZHAO Yan, WU Guanghuan, SUN Yeheng. Field test and effect analysis of foam-assisted steam flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 106-110.
- [3] 李锦超,王磊,丁保东,等.稠油热/化学驱油技术现状及发展趋势[J].西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(4):36-40.  
LI Jinchao, WANG Lei, DING Baodong, et al. present situation and development trend of the thermal/chemical flooding technology of heavy oil [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(4): 36-40.
- [4] 王福顺,牟珍宝,刘鹏程,等.超稠油油藏CO<sub>2</sub>辅助开采用机理实验与数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2017,24(6):86-91.  
WANG Fushun, MOU Zhenbao, LIU Pengcheng, et al. Experiment and numerical simulation on mechanism of CO<sub>2</sub> assisted mining in super heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 86-91.
- [5] 宋鸿斌.二元复合驱见效特征及影响因素研究——以孤东油田为例[J].天然气地球科学,2014,25(增刊1):98-106.  
SONG Hongbin. Research of surfactant-polymer flooding response characteristics and influencing factors—case of Gudong Oilfield [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25 (Supplement 1): 98-106.
- [6] 朱友益,侯庆锋,简国庆,等.化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J].石油勘探与开发,2013,40(1):90-96.  
ZHU Youyi, HOU Qingfeng, JIAN Guoqing, et al. Current development and application of chemical combination flooding technique [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 90-96.
- [7] 王振川,陈大友,任江丽,等.鄂尔多斯盆地南梁西区长4+5油层组微观渗流特征及影响因素[J].石油实验地质,2017,39(6):805-811.  
WANG Zhenchuan, CHEN Dayou, REN Jiangli, et al. Micro-flow characteristics and controls of Chang4+5 reservoirs in the western Nanliang oil field, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6): 805-811.
- [8] 汤明亮,裴海华,张贵才,等.普通稠油化学驱油技术现状及发展趋势[J].断块油气田,2012,19(增刊1):44-48.  
TANG Mingguang, PEI Haihuan, ZHANG Guicai, et al. Present situation and development trend on chemical flooding of conventional heavy oil [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(Supplement 1): 44-48.
- [9] 张宁宁,王青,王建君,等.近20年世界油气新发现特征与勘探趋势展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):44-53.  
ZHANG Ningning, WANG Qing, WANG Jianjun, et al. Characteristics of oil and gas discoveries in recent 20 years and future exploration in the world [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23 (1): 44-53.
- [10] 王增林,张民,杨勇,等.稠油热化学驱过程中影响因素及其交互作用对采收率的影响[J].油气地质与采收率,2017,24(1):64-68.  
WANG Zenglin, ZHANG Min, YANG Yong, et al. Effect of influencing factors and their interaction on thermo-chemical recovery of heavy oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 64-68.
- [11] 李强,梁守成,吕鑫,等.交联聚合物溶液成胶动态特征及其机理[J].大庆石油地质与开发,2017,36(4):87-94.  
LI Qiang, LIANG Shoucheng, LÜ Xin, et al. Gelling dynamic characteristics and their mechanisms of the crosslinking polymer solution [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(4): 87-94.
- [12] 赵方剑.特高温低渗透油藏乳液表面活性剂驱现场试验[J].特种油气藏,2017,24(6):125-128.  
ZHAO Fangjian. Field tests for emulsion surfactant flooding in reservoirs with ultra-high temperatures and low permeability [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 125-128.