

文章编号: 1000-0747(2021)06-1218-06 DOI: 10.11698/PED.2021.06.13

化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法

刘卫东^{1,2}, 王高峰^{1,2}, 廖广志³, 王红庄^{1,2}, 王正茂³, 王强^{1,2}, 王正波^{1,2}

(1. 提高采收率国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油勘探与生产分公司, 北京 100007)

基金项目: 国家科技重大专项“化学驱提高采收率技术”(2016ZX05010)

摘要: 在剖析“二三结合”项目产量构成的基础上, 提出了化学复合驱“二三结合”项目整体产量与空白水驱阶段产量的关系; 根据“采收率等于波及系数乘以驱油效率”油藏工程原理, 推导了化学复合驱油藏采收率计算公式; 采用微分法对油藏进行剖分, 建立了剖分网格采收率和油藏采出程度之间的联系, 进而明确了化学复合驱油藏产量变化规律, 定义了化学复合驱增产倍数, 结合油田开发实际提出了化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法。研究表明: 化学复合驱增产效果随化学复合驱和水驱驱油效率之比的升高而均匀升高, 随转驱时采出程度和水驱油效率之比的增加而迅速增加, 在高采出程度油藏实施化学复合驱更有利于提高增油效果。经实际二元驱试验检验, 化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法预测结果相对误差约为 $\pm 10\%$, 预测精度满足油藏工程要求。图3表2参31

关键词: 化学复合驱; 二三结合项目; 驱油效率; 化学驱增产倍数; 产量计算

中图分类号: TE328 文献标识码: A

Production calculation of the second & tertiary recovery combination reservoirs under chemical flooding

LIU Weidong^{1,2}, WANG Gaofeng^{1,2}, LIAO Guangzhi³, WANG Hongzhuang^{1,2}, WANG Zhengmao³,
WANG Qiang^{1,2}, WANG Zhengbo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the analysis of the production composition of reservoirs developed by the second & tertiary recovery combination (STRC), the relationship between the overall output of the STRC project and the production level during the blank water flooding stage is proposed. According to the basic principle of reservoir engineering that the “recovery factor is equal to sweeping coefficient multiplied by oil displacement efficiency”, the formula for calculating the ultimate oil recovery factor of chemical combination flooding reservoir was established. By dividing the reservoir into a series of grids according to differential calculus thinking, the relationship between the ultimate recovery factor of a certain number of grids and the recovery degree of the reservoir was established, and then the variation law of oil production rate of the STRC reservoir was obtained. The concept of “oil rate enlargement factor of chemical combination flooding” was defined, and a production calculation method of reservoir developed by STRC was put forward based on practical oilfield development experience. The study shows that the oil production enhancing effect of STRC increases evenly with the increase of the ratio of STRC displacement efficiency to water displacement efficiency, and increases rapidly with the increase of the ratio of recovery degree at flooding mode conversion to the water displacement efficiency. STRC is more effective in increasing oil production of reservoir with high recovery degree. Through practical tests of the alkali free binary flooding (polymer/surfactant) projects, the relative error of the oil production calculation method of STRC reservoir is about $\pm 10\%$, which meets the requirements of reservoir engineering.

Key words: chemical combination flooding; second & tertiary recovery combination; oil displacement efficiency; oil rate enlargement factor of chemical flooding; oil production calculation

引用: 刘卫东, 王高峰, 廖广志, 等. 化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1218-1223.
LIU Weidong, WANG Gaofeng, LIAO Guangzhi, et al. Production calculation of the second & tertiary recovery combination reservoirs under chemical flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1218-1223.

0 引言

中国陆上老油田绝大多数已进入高含水后期, 单

井产量持续递减, 水驱后转变开发方式、大幅度提高采收率技术的应用效果逼近经济效益零点。“二三结合”开发模式将水驱井网整体加密为主的二次采油生

产调整、转换开发方式为主的三次采油井网部署统一考虑，协同优化，分步实施，实现油田最终采收率最高、全生命周期综合效益最大^[1-7]。目前，化学驱是中国最成熟的三次采油技术，水驱后转化学驱的中高渗油藏是“二三结合”项目的主要实施油藏类型^[8-13]。

基于化学复合驱的“二三结合”项目往往涉及井网加密调整^[4, 7]，以建立高效的注采压力系统，保障足够高的注采液量与采油速度。准确预测化学复合驱“二三结合”项目年产量变化对提高开发方案设计质量、确定产能建设投资和保障项目效益具有重要意义。

目前化学复合驱生产效果研究主要借助室内实验和油藏数值模拟^[5, 14]，采用油藏数值模拟方法可预测化学驱“二三结合”项目产量，但乳化、流体-岩石作用等复杂驱油机理很难准确量化表征，在一定程度上影响了其可靠性，尤其对渗透率较低的油藏影响更大；此外，数值模拟技术要求高，耗费时间长，不便于油田人员使用。预测化学复合驱“二三结合”项目产量的实用油藏工程方法大致分为 3 类：①结合实际区块物性参数，进行大量正交方案的数值模拟，再采用统计分析方法对模拟结果进行数理统计，确定计算合理注水量的实用公式，随后根据井组注采平衡和地层系数劈分计算出单井各层段产液量^[14-15]，该方法需进行大量的数值模拟计算，耗时长；②统计分析已实施化学驱项目产量变化特征并与油藏条件、转驱时机和化学驱技术类型等建立定量联系^[16]，该方法属经验参照法，应用于新区局限性明显；③首先采用油藏工程方法计算注入量，再根据注采平衡，综合考虑合理注入速度、注采关系、井网井距等因素，计算化学驱油井产液量，但不能预测产量^[17]。

本文根据油藏工程基本原理，结合化学复合驱提高采收率的主要机理和油田开发实际经验，借鉴改质水驱砂岩油藏生产动态预测方法^[18]，建立了化学驱“二三结合”项目整体产量预测方法框架，提出了空白水驱阶段结束后转化学复合驱并见效后“二三结合”产量指标预测油藏工程方法，并以辽河油田锦 16 和大港油田港西三区两个无碱二元驱项目为例验证了方法的可靠性。

1 “二三结合”项目产量构成

基于化学驱的“二三结合”项目往往涉及井网加密调整，如将井距 300 m 左右的水驱井网加密到 150 m 左右，以建立高效的注采压力系统，保证足够高的注采井液量。采用油藏工程方法预测化学驱“二三结合”

项目产量，须明确加密前水驱老井网的产量、加密后“二三结合”新井网在空白水驱阶段的产量、转化学驱后在空白水驱基础上提高的产量之间的关系。

加密前水驱老井网的年产量等于其油井数与水驱老井网单井年产量的乘积：

$$Q_{owold} = 365q_{owold}n_{oold} \tag{1}$$

加密后“二三结合”新井网空白水驱阶段的产量等于新井网的油井数与水驱单井年产量的乘积：

$$Q_{ow2+3} = 365q_{ow2+3}n_{o2+3} \tag{2}$$

将“二三结合”新井网和水驱老井网的生产井数之比记为 $r_{well3/2}$ ，即：

$$n_{o2+3} = r_{well3/2}n_{oold} \tag{3}$$

将新老井网的水驱单井产量之比记为 λ_o ，即：

$$q_{ow2+3} = \lambda_o q_{owold} \tag{4}$$

对于砂岩油藏，新井网水驱单井产量 q_{ow2+3} 往往低于老井网的单井产量 q_{owold} ；而对于砾岩油藏，新井网水驱单井产量往往高于老井网（见表 1）。

表 1 “二三结合”项目水驱阶段单井产量对比

试验区	储集层类型	不同井网水驱单井产量/(t·d ⁻¹)		新老井网单井产量比
		老井网	新井网	
吉林 H79 北	砂岩	1.20	0.80	0.67
大港 GX 二	砂岩	1.91	1.71	0.90
大港 KY	砂岩	3.45	2.64	0.76
大港 G109-1	砂岩	4.67	3.00	0.64
辽河 J16	砂岩	3.93	2.81	0.71
长庆 AS 扩大	砂岩	1.71	1.54	0.90
新疆 QZ	砾岩	2.50	3.39	1.35
新疆 QD1	砾岩	11.84	16.50	1.39

化学驱“二三结合”项目整体产量可表示为在空白水驱阶段产量基础上提高的倍数：

$$Q_{oChem2+3} = F_{ChemW}\lambda_o r_{well3/2}Q_{owold} \tag{5}$$

将（1）—（4）式代入（5）式，整理后得到：

$$Q_{oChem2+3} = F_{ChemW}\lambda_o r_{well3/2}Q_{owold} = 365F_{ChemW}\lambda_o q_{owold}r_{well3/2}n_{oold} \tag{6}$$

在上式中，老井网生产井数、老井网水驱单井产量、新老井网生产井数之比、新老井网水驱单井产量比为已知，只有化学驱增产倍数为未知，预测化学复合驱“二三结合”项目整体产量，首先需确定化学驱增产倍数。

2 化学复合驱产量预测方法

2.1 化学复合驱采收率计算方法

将转入化学复合驱开发时的油藏视为新油藏。该新油藏的地质储量等于转驱时的剩余地质储量。水驱

波及系数定义为水驱采收率与水驱油效率之比, 即:

$$E_{Vw} = \frac{E_{Rwn}}{E_{Dwn}} \quad (7)$$

将化学复合驱波及体积修正因子 η 定义为常规水驱波及系数与化学复合驱波及系数的比值:

$$\eta = \frac{E_{Vw}}{E_{VChem}} \quad (8)$$

对于该新油藏, 化学复合驱采收率等于化学复合体系的驱油效率乘以其波及系数, 即:

$$E_{RChemn} = E_{DChemn} E_{VChem} \quad (9)$$

基于转驱时剩余地质储量的化学复合驱采收率和基于原始地质储量的化学复合驱采收率之间存在关系:

$$E_{RChem} = \frac{S_o}{S_{oi}} E_{RChemn} \quad (10)$$

联立(7) — (10) 式, 整理得基于原始地质储量的化学复合驱采收率:

$$E_{RChem} = \eta \frac{S_o}{S_{oi}} \frac{E_{DChemn}}{E_{Dwn}} E_{Rwn} \quad (11)$$

从推导过程可知, 上式对于油藏任意部位的采收率计算都适用。虽然注入时机影响非均质油藏化学复合驱效果, 但相同体系驱替至极限含水率 98% 时的残余油饱和度或驱油效率受注入时机影响很小 (例如大港油田古近系孔店组一段岩心直接进行聚合物-表面活性剂二元驱的驱油效率为 66.5%, 含水率 80% 和含水率 95.8% 时转二元驱的驱油效率分别为 66.1% 和 67.2%, 3 种情况的差异甚小), 残余油饱和度可视为定值, 则基于转驱时剩余油饱和度的新油藏的化学体系驱油效率为:

$$E_{DChem} = \frac{S_{oi} E_{DChem} - S_{oi} R_{ews}}{S_o} \quad (12)$$

假设不进行化学复合驱而是继续水驱, 则基于剩余油饱和度的新油藏的水驱油效率为:

$$E_{Dwn} = \frac{S_{oi} E_{Dwi} - S_{oi} R_{ews}}{S_o} \quad (13)$$

2.2 化学复合驱产量变化规律

油藏可被剖分为一系列网格 G_i , 化学复合驱阶段亦可划分为一系列时间步 Δt_i ; 在 Δt_i 内注入流体能够完全波及网格 G_i , 则该时间内油藏采出程度增量近似等于相应网格 G_i 的采收率, 即:

$$\Delta R_{Chem} = R_{vChem} \Delta t_i = E_{RChem} (G_i) \quad (14)$$

若新井网不进行化学驱而是持续注水, Δt_i 内基于剩余地质储量的水驱阶段采出程度为:

$$\Delta R_{wn} = R_{vwn} \Delta t_i = E_{Rwn} (G_i) \quad (15)$$

联立(11) (14) 和(15) 式, 可得到:

$$R_{vChem} = \eta \frac{S_o}{S_{oi}} \frac{E_{DChemn}}{E_{Dwn}} R_{vwn} \quad (16)$$

根据前述采油速度的涵义, (16) 式两端同时乘以原始地质储量 N_o ($N_o = V_p S_{oi} B_o \rho_o$) 后整理可得:

$$Q_{oChem2+3} = \eta \frac{E_{DChemn}}{E_{Dwn}} Q_{ow2+3} \quad (17)$$

化学复合驱增产倍数 F_{ChemW} 可定义为化学复合驱产量与同期常规水驱产量之比 ((18) 式), 结合“二三结合”新井网的水驱递减规律和化学复合驱增产倍数可得化学复合驱产量。

$$F_{ChemW} = \frac{Q_{oChem2+3}}{Q_{ow2+3}} = \eta \frac{E_{DChemn}}{E_{Dwn}} \quad (18)$$

2.3 化学复合驱增产倍数工程算法

由于化学复合驱和水驱的残余油饱和度可视为定值。将(12) (13) 式带入(18) 式可得:

$$F_{ChemW} = \eta \frac{E_{DChem} - R_{ews}}{E_{Dwi} - R_{ews}} \quad (19)$$

对于水驱老油田, 在油田长期开发过程中, 存在分层注水、调剖调驱、周期注水、注采压力调整等水动力学时间累积效应。根据油田开发经验和理论研究, 中高渗透油藏常规井网水驱波及系数接近 0.900^[19-24], 例如港西三区水驱波及系数为 0.880, 而锦 16 高—特高渗透油藏水驱波及系数则高达 0.947。油田开发实践中, 投产时含水率和产量与油田开发初期井含水率和产量相近的加密井比例极低, 表明注入水几乎波及全油层。因此, 可将实际波及系数表示为:

$$E_{Vw} = E_{V0} + \omega(1 - E_{V0}) \quad (20)$$

权值 ω ($0 < \omega < 1.0$) 反映了剩余油分布均匀程度, 分布越均匀, ω 越大。

理论波及系数等于基于原始地质储量的常规水驱采收率与初始水驱油效率之比:

$$E_{V0} = \frac{E_{Rw}}{E_{Dwi}} \quad (21)$$

对于准备实施化学复合驱的水驱老油田, 剩余油分布整体呈现“高度分散, 相对富集”的格局^[19], 可认为剩余油分布总体均匀, 故推荐:

$$\omega = 1 \quad (22)$$

水驱波及区采出程度显然高于油层整体采出程度。实际波及区采出程度与油藏整体采出程度的关系可根据物质平衡得到:

$$R_{ews} = \frac{R_{e0}}{E_{Vw}} \quad (23)$$

“二三结合”新井网平均井距通常在 100~200 m，往往小于砂体展布宽度（见表 2）。不论对于水驱还是化学复合驱，这种小井距特点可保障新井网驱替的高效性，具有很高的储量动用程度和波及系数。

表 2 “二三结合”项目井距和砂体宽度数据

试验区	新井网井距/m	砂体宽度/m
北二西二类油层弱碱三元驱	125	200~900
锦 16 块二元驱	155	300~1 000
克拉玛依七中区二元驱	160	250~600
大港港西三区二元驱	150	200~700

“二三结合”密井网能够进一步强化砂体控制，井网整体加密通常可使水驱采收率提高 2%~6%，水驱油效率按 50%估计，水驱波及系数将提高 0.04~0.12，密井网下的水驱波及系数可高达 0.92~0.98^[25-31]，故认为新井网下的化学复合驱波及系数近似等于水驱情形，即波及体积修正因子：

$$\eta \approx 1$$

(24)

联立（20）—（24）式，整理后即得到化学复合驱增产倍数的工程计算公式：

$$\begin{cases} F_{\text{ChemW}} = \frac{R_1 - R_2}{1 - R_2} \\ R_1 = \frac{E_{\text{DChem}}}{E_{\text{Dwi}}} \\ R_2 = \frac{R_{e0}}{E_{\text{Dwi}}} \end{cases}$$

(25)

上式中有关参数的取值方法为：水驱初始驱油效率、化学复合驱初始驱油效率可通过原始含油饱和度下岩心驱替实验获得；转驱时采出程度为目标油藏累计产量与该油藏的原始地质储量之比。

根据（25）式绘制化学复合驱增产倍数随转驱时采出程度与水驱初始驱油效率之比的变化曲线（见图 1）。可以看出，化学复合驱增产倍数随化学复合驱和水驱初始驱油效率之比（ R_1 ）的升高而均匀升高，随转驱时采出程度与水驱初始驱油效率之比（ R_2 ）的增

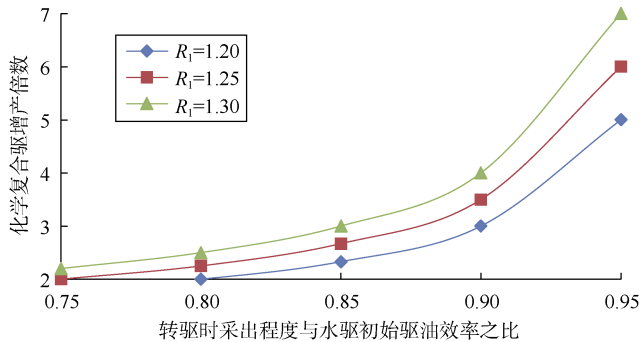


图 1 化学复合驱增产倍数变化情况

加而迅速增加，化学驱增产倍数最高超过 7.0，说明选区对提高化学复合驱增产效果非常重要。

3 应用示例

3.1 大港油田港西三区无碱二元复合驱试验

港西三区三断块西 8-9-3 井区块在重组层系井网和地面配注系统改造基础上开展聚合物-表面活性剂二元复合驱工业化试验，一期工程采用标准反五点井网（7 注 14 采），注入层位为 NmIII-2-1、NmIII-3-1（新近系明化镇组 III 油层组 2 小层 1 单砂层、新近系明化镇组 III 油层组 3 小层 1 单砂层），地质储量 80×10^4 t。设计注入段塞为 0.4 PV（孔隙体积），由前置段塞、主体段塞和保护段塞组成，注入速度 0.12 PV/a。自 2013 年 8 月开始实施，空白水驱阶段日产油为 20 t，二元驱阶段高峰期日产油达 74 t，效果好于方案设计，预计可提高采收率 17%。该试验区聚合物-表面活性剂二元驱油体系的驱油效率为 54.1%，水驱油效率 42.4%，转驱前的采出程度为 37.2%，“二三结合”新井网转驱前 1 年内水驱平均日产油约为 20.5 t，代入（25）式计算得港西三区化学复合驱增产倍数为 3.25，二元驱见效高峰期 1 年内平均产量为 70.6 t/d，开发方案预测值为 76.7 t/d，实际值为 77.2 t/d，本方法相对误差为 -8.52%（见图 2），预测结果基本可靠。

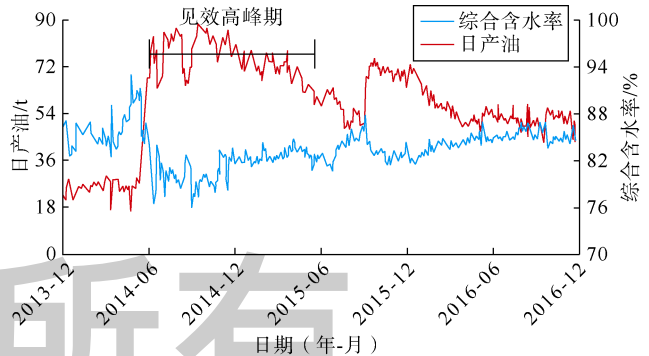


图 2 港西三区无碱二元驱试验区产量变化情况

3.2 辽河油田锦 16 区块无碱二元复合驱试验

锦 16 区块无碱二元驱试验采用反五点井网（24 注 35 采），注采井距 150 m，开采层位为兴隆台—特高渗透油层，优先实施兴 II₄₇₋₈（古近系沙河街组兴隆台油层 II 油层组 4 砂层组 7、8 小层），再接替上返兴 II₃₅₋₆（古近系沙河街组兴隆台油层 II 油层组 3 砂层组 5、6 小层），地质储量 298×10^4 t。设计采用前置段塞、主体段塞、副段塞和保护段塞等注入段塞组合，并根据实际生产动态对段塞浓度和尺寸进行过两次调整，目前配方设计总段塞尺寸为 1.3 PV，注入速度为 0.15 PV/a。

自 2011 年 4 月开始前置段塞注入, 2011 年 12 月注入主体段塞, 2018 年 5 月开始副段塞驱替, 日产油上升到峰值 353 t, 综合含水率大幅度下降, 实施效果好于方案设计, 预计可提高采收率 19%。

该油藏二元体系驱油效率为 56.7%, 水驱油效率 47.8%, 转驱前采出程度为 45.3%, “二三结合”新井网转驱前 1 年内水驱平均日产油约 76.1 t, 代入 (25) 式计算得锦 16 区块化学复合驱增产倍数为 4.56, 二元驱见效高峰期 1 年内平均产量为 367.8 t/d, 开发方案预测值为 413.0 t/d, 实际产量为 330.5 t/d, 本方法误差约 11.3% (见图 3), 精度优于开发方案。

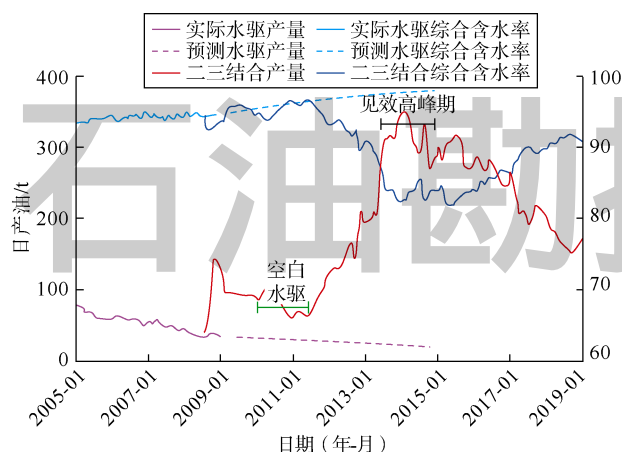


图 3 锦 16 区块无碱二元驱试验区产量变化情况

4 结论

化学复合驱见效高峰期产量水平取决于化学复合驱增产倍数和转驱时的水驱产量水平。化学复合驱增产倍数随化学复合驱和水驱初始驱油效率之比的升高而均匀升高, 随转驱时采出程度和水驱油效率之比的增加而迅速增加, 在高采出程度油藏实施化学复合驱更有利于提高增油效果。

经现场试验生产数据的检验, 采用化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法, 所得结果相对误差约为±10%左右, 预测精度满足油藏工程要求。

符号注释:

B_o ——原油体积系数, 无因次; E_{DChem} ——化学复合体系的初始驱油效率 (原始油藏直接进行化学驱), %; E_{DChemn} ——新油藏基于转驱时剩余油饱和度的化学体系驱油效率, %; E_{Dwi} ——水驱初始驱油效率 (原始油藏水驱), %; E_{Dwn} ——新油藏基于剩余油饱和度的水驱油效率, %; E_{RChem} ——基于原始地质储量的化学复合驱采收率, %; E_{RChemn} ——新油藏化学复合驱采收率, %; E_{Rw} ——基于原始地质储量的水驱采收率, %; E_{Rwn} ——基于新油藏地质储量的水驱采收率, %; E_{V0} ——理论波及系数, %; E_{VChem} ——化学复合驱波及系数, 无因次; E_{Vw} ——新油藏的水驱波及系数, 无

因次; F_{ChemW} ——化学复合驱增产倍数, 无因次; G_i ——网格; n_{o2+3} ——新井网的油井数, 口; n_{old} ——老井网的油井数, 口; N_o ——油藏原始地质储量, t; q_{ow2+3} ——新井网单井产量, t/d; q_{owold} ——老井网单井产量, t/d; Q_{ow2+3} ——“二三结合”新井网水驱年产量或同期的水驱产量 (即假设不转化学驱而继续注水时新井网水驱产量), t/a; Q_{owold} ——水驱老井网的年产量, t/a; $Q_{oChem2+3}$ ——化学驱“二三结合”项目产量水平 (即新井网化学复合驱产量水平), t/a; $r_{well3/2}$ ——“二三结合”新井网和水驱老井网的生产井数之比, 无因次; R_1 ——化学复合驱和水驱初始驱油效率之比, %; R_2 ——转驱时采出程度与水驱初始驱油效率之比, %; ΔR_{Chem} ——基于原始地质储量的化学复合驱阶段采出程度, %; ΔR_{wn} ——基于新油藏地质储量的水驱阶段采出程度, %; R_{e0} ——转驱时基于原始地质储量的油层整体采出程度, %; R_{ews} ——转驱前基于原始含油饱和度的采出程度, %; R_{vwn} ——基于转驱时剩余地质储量的水驱采油速度, %; R_{vChem} ——基于转驱时剩余地质储量的化学复合驱采油速度, %; S_{oi} ——原始含油饱和度, %; S_o ——转驱时的剩余油饱和度, %; V_p ——油藏孔隙体积, m³; Δt_i ——时间步长度, a; η ——化学复合驱波及体积修正因子, 无因次; λ_o ——新老井网的水驱单井产量水平之比, 无因次; ρ_o ——原油地面密度, 10³ kg/m³; ω ——反映剩余油分布均匀程度的权值, 无因次。

参考文献:

- [1] 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): 46-49.
CHENG Jiecheng, LIAO Guangzhi, YANG Zhenyu, et al. Pilot test of ASP flooding in Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 46-49.
- [2] 袁士义, 王强. 中国油田开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 657-668.
YUAN Shiyi, WANG Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 657-668.
- [3] 高晶霞. “二三结合”试验集输建设方案优化[J]. 油气田地面工程, 2007, 26(4): 17.
GAO Jingxia. Construction scheme optimization of gathering and transportation for the second & tertiary combination mode[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2007, 26(4): 17.
- [4] 廖广志, 王强, 王红庄, 等. 化学驱开发现状与前景展望[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 176-207.
LIAO Guangzhi, WANG Qiang, WANG Hongzhuang, et al. Chemical flooding development status and prospect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 176-207.
- [5] 刘义坤, 文华, 隋新光. 萨中开发区“二三结合”开发实验数值模拟[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(6): 36-39.
LIU Yikun, WEN Hua, SUI Xinguang. Numerical simulation of second tertiary combined development test in Sazhong development area[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(6): 36-39.
- [6] BERNARD G G. Effect of floodwater salinity on recovery of oil from cores containing clays[R]. SPE 1725, 1967.
- [7] 程杰成, 吴军政, 胡俊卿. 三元复合驱提高原油采收率关键理论与技术[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 310-318.
CHENG Jiecheng, WU Junzheng, HU Junqing. Key theories and technologies for enhanced oil recovery of alkaline/surfactant/polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 310-318.
- [8] 朱友益, 张翼, 牛佳玲, 等. 无碱表面活性剂-聚合物复合驱技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 346-351.

- ZHU Youyi, ZHANG Yi, NIU Jialing, et al. The progress in the alkali-free surfactant-polymer combination flooding technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 346-351.
- [9] 孙焕泉. 二元复合驱油体系配方研究及矿场应用[R]. 北京: 中国石油学会三次采油技术研讨会, 2006.
- SUN Huanquan. Study on the formulation of binary compound flooding system and its field application[R]. Beijing: The Technical Seminar on Tertiary Oil Recovery of CPS, 2006.
- [10] 刘卫东, 罗莉涛, 廖广志, 等. 聚合物-表面活性剂二元驱提高采收率机理实验[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 600-607.
- LIU Weidong, LUO Litao, LIAO Guangzhi, et al. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer-surfactant binary flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 600-607.
- [11] 刘哲宇, 李宜强, 冷润熙, 等. 孔隙结构对砾岩油藏聚表二元复合驱提高采收率的影响[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 129-139.
- LIU Zheyu, LI Yiqiang, LENG Runxi, et al. Effect of pore structure on surfactant/polymer flooding-based enhanced oil recovery in conglomerate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 129-139.
- [12] 王刚, 王德民, 夏惠芬, 等. 聚合物驱后用甜菜碱型表面活性剂提高驱油效率机理研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 86-90.
- WANG Gang, WANG Demin, XIA Huifen, et al. Mechanism for enhancing oil displacement efficiency with betaine surfactant after polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 86-90.
- [13] 卢祥国, 曹豹, 谢坤, 等. 非均质油藏聚合物驱提高采收率机理再认识[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 148-155.
- LU Xiangguo, CAO Bao, XIE Kun, et al. EOR mechanisms of polymer flooding in a heterogeneous oil reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 148-155.
- [14] 范海娇, 杨二龙. 二三结合模式下水驱与化学驱配产配注优化[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(5): 90-95.
- FAN Haijiao, YANG Erlong. Optimization of production and injection rate of water flooding and chemical flooding in second tertiary development mode[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2019, 32(5): 90-95.
- [15] 王强, 高明, 刘朝霞, 等. 化学驱提高采收率潜力评价方法研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 41-43.
- WANG Qiang, GAO Ming, LIU Zhaoxia, et al. Evaluation study on EOR potential of chemical flooding[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 41-43.
- [16] 张新英. 胜利油田化学驱增油量预测方法[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5): 584-585.
- ZHANG Xinying. Prediction methods for incremental oil by chemical flooding process in Shengli oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(5): 584-585.
- [17] 张舒琴. 化学驱合理配产配注方法研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 119-122.
- ZHANG Shuqin. Reasonable production and injection allocation methods of chemical flooding[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 119-122.
- [18] 王高峰, 张志升, 杨承伟, 等. 改质水驱砂岩油藏生产动态预测方法[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 66-70.
- WANG Gaofeng, ZHANG Zhisheng, YANG Chengwei, et al. Prediction method of production performance of modified water drive in sandstone reservoirs[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 66-70.
- [19] 韩匡. 深度开发高含水油田提高采收率问题的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 47-55.
- HAN Dakuang. An approach to deep development of high water-cut oilfield to improve oil recovery[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(5): 47-55.
- [20] 陈元千. 水驱体积波及系数变化关系的研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 49-51.
- CHEN Yuanqian. A study on the changing relation of the water flooding volumetric sweep factor[J]. Petroleum Geology and Recovery efficiency, 2001, 8(6): 49-51.
- [21] 王博, 左松林, 刘浪, 等. 预测水驱油田体积波及系数的新方法[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4): 387-389.
- WANG Bo, ZUO Songlin, LIU Lang, et al. A new method for prediction volumetric sweep efficiency of water-drive oilfields[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(4): 387-389.
- [22] 窦宏恩, 张虎俊, 沈思博. 对水驱特征曲线的正确理解与使用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 755-762.
- DOU Hongen, ZHANG Hujun, SHEN Sibao. Correct understanding and application of waterflooding characteristic curve[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 755-762.
- [23] 元福卿, 李振泉. 胜利油田化学驱扩大水驱波及系数预测方法研究[J]. 重庆科技学院学报, 2014, 16(2): 43-46.
- YUAN Fuqing, LI Zhenquan. A prediction method of expanding water flooding sweep coefficient by chemical flooding in Shengli oilfield[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2014, 16(2): 43-46.
- [24] HABERMANN B. The efficiencies of miscible displacement as a function of mobility ratio[J]. Transactions of the AIME, 1960, 219(1): 264-272.
- [25] 王强, 计秉玉, 聂俊. 聚合物驱油过程中不同粘度比情况下波及系数计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 551-555.
- WANG Qiang, JI Bingyu, NIE Jun. Calculation methods of sweep efficiency under different viscosity ratio for polymer flooding process[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 551-555.
- [26] 李宜强. 聚合物驱大平面模型物理模拟实验研究[D]. 廊坊: 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所), 2006.
- LI Yiqiang. Experimental study of physical simulation on polymer flooding in the large-scale areal model[D]. Langfang: Chinese Academy of Sciences (Institute of Porous Flow & Fluid Mechanics), 2006.
- [27] 杨清彦, 李斌会, 李宜强, 等. 聚合物驱波及系数和驱油效率的计算方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(1): 109-112.
- YANG Qingyan, LI Binhui, LI Yiqiang, et al. Calculation method research on sweep efficiency and displacement efficiency in polymer flooding[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(1): 109-112.
- [28] 郭兰磊. 聚驱后油藏化学驱提高采收率技术及先导试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(1): 122-126.
- GUO Lanlei. Chemical EOR technique and pilot test for the oil reservoirs after polymer flooded[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(1): 122-126.
- [29] 于倩男, 刘义坤, 梁爽, 等. 聚表剂驱提高采收率机理实验: 以大庆长垣油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1138-1147.
- YU Qianan, LIU Yikun, LIANG Shuang, et al. Experimental study on surface-active polymer flooding for enhanced oil recovery: A case study of Daqing placanticline oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1138-1147.
- [30] 陈小龙, 李宜强, 廖广志, 等. 减氧空气重力稳定驱驱替机理及与采收率的关系[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 780-788.
- CHEN Xiaolong, LI Yiqiang, LIAO Guangzhi, et al. Experimental investigation on stable displacement mechanism and oil recovery enhancement of oxygen-reduced air assisted gravity drainage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 780-788.
- [31] 雷群, 罗健辉, 彭宝亮, 等. 纳米驱油剂扩大水驱波及体积机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 937-942.
- LEI Qun, LUO Jianhui, PENG Baoliang, et al. Mechanism of expanding swept volume by nano-sized oil-displacement agent[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 937-942.

第一作者简介: 刘卫东 (1970-), 男, 博士, 河北唐山人, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事油田化学剂研发、化学驱提高采收率等方面的研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院油田化学研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: lwd69@petrochina.com.cn
收稿日期: 2020-12-04 修回日期: 2021-09-15

(编辑 唐俊伟)