

基于地质储量结构变化的采收率演变趋势

计秉玉^{1,2},王友启^{1,2},张莉^{1,2}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京100083; 2. 国家能源陆相砂岩老油田持续开采研发中心,北京100083)

摘要:不同类型油藏逐次投入开发,使油公司储量不断增长,储量结构发生变化,整体采收率也随之改变。建立以储量为自变量的常微分方程表征了整体采收率随储量增长的内在关系,并定量剖析了中国石化2011年后新投入储量、老区已开发储量与整体采收率的演变趋势。分析结果表明,整体采收率随储量增长是一个总量与增量、存量的关系,影响油公司整体采收率的主要因素是投入储量的品质及其储量比例,随新投储量品质变差及其储量占比的提高,油公司整体采收率呈逐渐降低的趋势。通过对中国石化不同类型油藏采收率状况及主控因素的分析,提出了“立足水驱、完善热采、拓展化学驱、加大注气和微生物采油力度、探索变革性EOR新技术”的提高采收率技术思路及攻关方向。

关键词:地质储量结构;水驱;热采;化学驱;整体采收率;油藏开发

中图分类号:TE327

文献标识码:A

Research on overall recovery rate variations of dynamically changing OOIP

Ji Bingyu^{1,2}, Wang Youqi^{1,2}, Zhang Li^{1,2}

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. R & D Center of Sustainable Development of Continental Sandstone Mature Oilfield, Beijing 100083, China)

Abstract: With different types of oil reservoirs being put into development in a proper order according to their respective characteristics, operators may be rewarded with more reserves in a given field. However, with reservoir combinations varying, the overall recovery rates of the field change as well. An ordinary differential equation with reserve as independent variable is established to characterize the changing trend of overall recovery rates with increasing reserves and to quantitatively analyze the overall recovery rate changes of Sinopec's reserves that had been successively put into development (or already under development) from 2011 to 2018. The results show that the relationship between the overall recovery rate and reserve increase can be simplified as the total versus the incremental or the remaining. The main factors influencing the overall recovery rate are the quality and proportion of reserve of a certain reservoir in the whole context. The overall recovery rate of a given field is generally decreasing as more and more hard-to-get reserves are put into development. Following the analysis of the recovery rates of various oil reservoir combinations operated by Sinopec and the factors that influence the rate changes, we propose that future EOR study should be focused on improving the efficiency of water flooding and thermal EOR, expanding the application of chemical flooding, gas injection and microbial recovery, and exploring the possibilities of developing innovative EOR technologies.

Key words: OOIP structure, water flooding, thermal EOR, chemical flooding, overall recovery rate, reservoir development

中国石化已投入开发的油藏依据构造特征、储层特征、原油物性以及地面条件等因素,概括为整装油藏、断块油藏、低渗致密油藏、稠油油藏、缝洞型碳酸盐岩油藏和海上油藏等6种类型。不同的油藏类型决定了不同的开发方式,具有不同的开发效果^[1-5]。目前的开发方式以水驱、热采、化学驱、天然能量和注N₂为

主,CO₂驱和微生物驱处于现场试验和小规模应用阶段^[6-20]。在投产顺序上一般表现为先易后难,即油藏地质条件与地面条件简单,认识比较清楚,储量规模较大的整装油藏、简单断块油藏投产时间较早(这类油藏一般发现也较早),低渗致密油藏、缝洞型碳酸盐岩油藏投产时间相对较晚。这种多种油藏类型并存、多种

收稿日期:2020-07-02;修订日期:2020-10-19。

第一作者简介:计秉玉(1963—),男,教授级高级工程师,油气田开发与提高采收率研究。E-mail:jby.syky@sinopec.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0702400);中国工程院重点咨询项目(2019-XZ-15)。

开发方式并存、不同的开发阶段并存状态下标定出来的采收率就是整体采收率。油田储量构成具有动态性和结构性,整体采收率随储量增长的内在关系就是一个总量与增量、存量的关系,呈一定的规律性变化。作者对此进行了研究,并通过对不同类型油藏采收率状况及主控因素的分析,提出了进一步提高采收率(EOR)的技术思路及攻关方向。

1 基于储量结构变化的整体采收率演变数学模型

逐次投入的储量品质不同,采收率不同,对整体采收率产生重大影响。一般情况下,早期投入储量油藏条件好,采收率较高,中晚期投入的储量采收率较低,对整体采收率产生负面影响。因此,整体采收率可视作投入储量的函数。

设已开发储量 N 对应的整体采收率为 $R(N)$,新投储量为 ΔN ,采收率为 $r_F(N)$,则总的可采储量的增量等于新投区块可采储量,有:

$$\frac{d[NR(N)]}{dN} \Delta N = r_F(N) \Delta N \quad (1)$$

进而有:

$$\frac{dR(N)}{dN} + \frac{R(N)}{N} = \frac{r_F(N)}{N} \quad (2)$$

上述常微分方程描述了整体采收率随地质储量和新增储量采收率的变化关系。

再设新储量投入前的储量为 N_0 ,对应的整体采收率 R_0 为初始条件,求解(2)式,有:

$$R(N) = \frac{N_0}{N} R_0 + \frac{1}{N} \int_{N_0}^N r_F(N) dN \quad (3)$$

根据积分中值定理,有:

$$R(N) = \frac{N_0}{N} R_0 + \frac{1}{N} (N - N_0) R_a \quad (4)$$

可以看出,整体采收率 $R(N)$ 是投入储量采收率按照储量比例为权重的加权平均值。

一般情况下,新投入储量采收率具有逐渐变低趋势,依此可考查整体采收率随储量的变化率。

对公式(4)求导,有:

$$\begin{aligned} \frac{dR(N)}{dN} &= -\frac{N_0 R_0}{N^2} + \frac{1}{N} R(N) - \frac{1}{N^2} \int_{N_0}^N r_F(N) dN \\ &= \frac{1}{N} \left[R(N) - \frac{N_0 R_0}{N} - \frac{1}{N} (N - N_0) R_a \right] \\ &= \frac{1}{N} \left[R(N) - R_a - \frac{(R_0 - R_a) N_0}{N} \right] < 0 \quad (5) \end{aligned}$$

因此,随着品质较差储量的投入,拉低整体采收率

是一个共性问题。

老区已开发储量提高采收率是增加可采储量、提高整体采收率的又一重要方面。在上述模型中,将实施采收率区块储量视为新投入储量,提高采收率值视为新投入储量采收率,但总的地质储量不变,则有:

$$R(N) = \frac{N_0}{N} R_0 + \frac{1}{N} \int_{N_0}^N r_F(N) dN + \frac{1}{N} \int_{N_0}^{N_1} R_f(N) dN \quad (6)$$

2 不同油藏类型储量投入开发后采收率变化趋势

笔者运用前述数学模型,定量剖析了中国石化2011年后新投入储量与整体采收率的演变趋势。

2.1 不同类型油藏采收率

2.1.1 整装油藏

整装油藏地质条件较好,井网比较完善,以注水开发方式为主^[21]。通过井网加密、注采系统调整、层系细分重组以及换层、调剖堵水等多种工艺措施改善水驱效果,采收率达到42.6%。但这类油藏主体部分早已投入开发,对油公司整体采收率的存量贡献较大,近年来动用储量比例较低,对整体采收率增量贡献较小。

整装油藏也是化学驱提高采收率的主要对象^[22-23]。胜利油田在油藏温度65~80℃、地层水矿化度10 000~30 000 mg/L、原油粘度40~150 mPa·s的油藏,采用常规注水井网未进行大规模井网加密情况下,实施小段塞聚合物驱提高采收率6%~12%(OOIP),平均7.6%,低浓度表面活性剂二元复合驱提高采收率7%~18%(原始地质储量),平均9.3%。已实施化学驱油藏储量占比为7.5%。

2.1.2 断块油藏

断块油藏,尤其是复杂断块油藏,断层发育,油层发育纵向跨度大,呈现多套油水系统,油水分布复杂,小层对比难度大,低序级断层识别难度大,油水层识别难度大。这类油藏采用滚动勘探开发模式,注采系统完善程度差,部分极复杂小断块无法实现注水,只能采用天然能量开发,水驱标定采收率为28.3%。简单断块油藏也开展了化学驱提高采收率技术,采收率一般提高4%~10%(OOIP)。

2.1.3 低渗致密油藏

低渗致密油藏储层孔隙度和渗透率低,储层流体可动性差,流体流动难度大,普遍存在“注不进、采不出”的矛盾,有效驱动体系难以建立,单井产量低,注水量低^[24-25]。这类油藏孔喉比较大(50 以上),贾敏现象突出,残余油饱和度高,标定采收率 21.7%,是进一步勘探发现和投入开发的主要油藏类型。

2.1.4 稠油油藏

中国石化以胜利油田和河南油田为代表的稠油热采油藏,蒸汽吞吐开采方式为主,标定采收率为 20.2%^[26]。油藏埋藏深(900 ~ 1 600 m)、油层厚度薄、储层非均质性强、具有活跃边底水、转驱压力高等条件制约,蒸汽驱储量规模小,仅占 3.4%。针对特超稠油,添加降粘剂、驱油剂、泡沫剂、CO₂、N₂ 等,探索形成了 H(水平井) + D(降粘剂) + C(CO₂) + S(蒸汽)、H(水平井) + D(降粘剂) + N(N₂) + S(蒸汽)技术,但储量占比仅为 1.5%。

2.1.5 缝洞型碳酸盐岩油藏

缝洞型碳酸盐岩油藏主要分布在塔里木盆地的塔河油田,储集空间主要为大型溶洞和裂缝,非均质性极其严重,埋藏深度超过 5 300 m。开采方式主要为天然能量、注水和注 N₂(吞吐为主,井组驱替为辅),标定采收率为 15.5%^[27]。采收率较低的主要影响因素:一是塔河油田碳酸盐岩油藏属于超深、超高温高压复杂储集体,储集介质分布不连续,储集体中存在多种流动状态,描述与表征的难度很大;二是注水注气驱油机理认识和优化设计难度大,提高采收率幅度相对较小,仅为 2% ~ 3%。

2.1.6 海上油藏

中国石化海上油藏主要分布在埕岛油田和新北油田,虽然油藏条件和陆上馆陶组油藏相似,但由于海上条件限制,陆地油田提高采收率措施实施难度大。埕岛油田主体油层馆陶组经过天然能量开发、合注合采开发和细分层系开发,整体处在低注水倍数、高含水初期阶段,平均采收率 25.8%。

总之,中国石化已投入开发的油藏中,采收率较高的高品位储量占比较低,例如采收率 42.6%的整装油藏,截至 2018 年累积动用储量仅占总储量的 19.1%,并且呈逐年降低之势。而采收率较低的低渗致密、稠油、缝洞型碳酸盐岩油藏等低品位累积动用储量占比达到 43.2%(表 1),却呈逐年增加态势。

2.2 2011 年以来整体采收率演变趋势

2011 年以来采收率变化可以划分为 3 个阶段:2012—2013 年,新投入储量中低品位储量占比达到 80%以上(图 1),采收率只有 11%左右,拉低了整体采收率,2012 年和 2013 年的整体采收率分别为 26.7%和 26.5%(图 2)。2014—2017 年,新投入储量规模缩

表 1 中国石化 2018 年度储量构成与标定采收率

Table 1 Reservoir types and calibrated recovery rates of Sinopec in 2018

油藏类型	动用储量占比/%	标定采收率/%
整装	19.1	42.6
断块	33.2	28.3
低渗致密	21.0	21.7
稠油	9.1	20.2
缝洞型碳酸盐岩	13.1	15.5
海上	4.5	25.8
合计	100	25.7

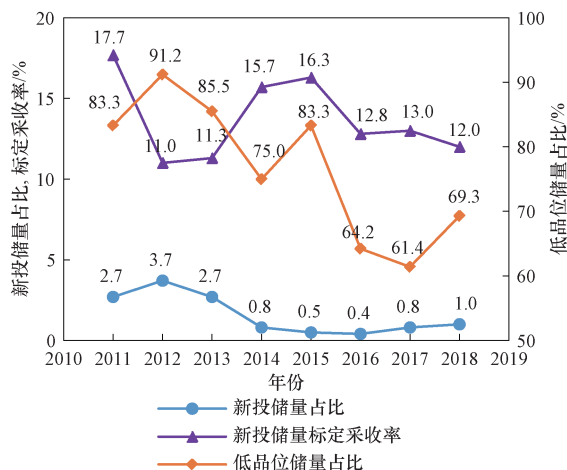


图 1 新投储量占比及标定采收率变化趋势

Fig. 1 Proportion of newly developed reserves and change trend of calibrated recovery rate

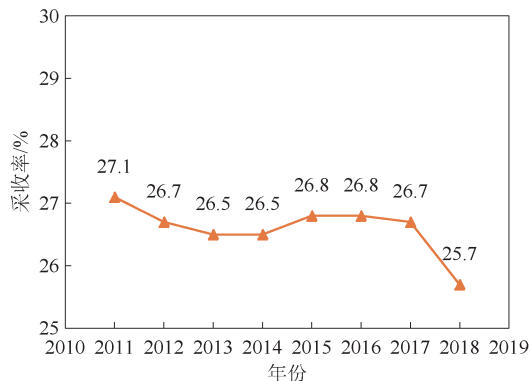


图 2 整体采收率变化趋势

Fig. 2 Overall recovery rate variation

小,储量占比不到1.0%,对整体采收率的影响变小,整体采收率稳定在26.5%~26.8%。2018年之后,低渗透致密、稠油油藏等低品位储量投入比例加大到70%左右,整体采收率降低至25.7%。

尽管老区针对不同类型油藏采用了层系重组、井网完善、堵水调剖、化学驱、热采等多种调整措施提高采收率,但由于覆盖储量比例较低,仅为4.5%~19.1%,年平均提高采收率仅为0.04%~0.23%(图3)。

总之,中国石化2011—2018年投入低采收率、低品位储量对整体采收率拉低起到主导地位,虽然在老区提高采收率方面做了大量工作,但覆盖储量规模小,在稳定整体采收率变化趋势上还没有起到根本性作用。

3 提高整体采收率技术及潜力方向

勘探发现优质储量难度越来越大,已开发区块大幅度提高采收率成为油田持续发展的重大举措。前述公式表明,依靠EOR技术提升油区整体采收率,主要体现在不同油藏类型采收率提升值和覆盖储量比例两个方面。据此,笔者认为提高整体采收率的主要技术思路是:立足水驱,完善热采,拓展化学驱,加大注气和微生物采油力度,探索变革性EOR新技术。

3.1 改进水驱技术

理论研究与实践表明,较高的原油粘度决定了大量可采储量在特高含水阶段采出^[28]。水驱储量占比高达65.9%,若水驱采收率提高2%,可使整体采收率提高1.3%,相当于新发现亿吨级大油田,因此改进水驱技术对整体采收率贡献潜力很大。针对普遍进入特高含水开发阶段的老油田,精细油藏描述要进一步朝细化与量化方向发展,大力开展基于流动单元的三维地质建模研究,精细刻画储层内部非均质性。开发调整深入到流动单元,利用储层非均质性控制含水上升

成为进一步提高水驱采收率的重要方面。推行油藏-井筒-地面管网一体化数值模拟技术,地下地面整体优化调整成为实现整体效果最大化、经济可采储量最大化的一个重要途径。

3.2 稠油热采技术

已实施蒸汽吞吐油藏,深化热连通半径认识,提高热采区加密的效果和应用规模。可转蒸气驱油藏,完善和推广热+化学方法,提高蒸汽驱技术经济效果和应用范围。水驱稠油油藏,积极转变开采方式,深入评价转热采条件、时机与潜力,扩大试验和应用规模。对难以转蒸汽驱的多轮次蒸汽吞吐油藏,探索转化学复合驱技术,通过乳化降粘等机理实现有效驱替。

3.3 化学驱技术

化学驱储量占比7.5%,如覆盖储量规模提高1倍,可使整体采收率提高1%。针对正注化学驱区块,推广加大用量、分层注聚、全过程调剖和完善注采系统等方法,进一步改善化学驱效果。针对海上油田重点攻关海上平台母液配制、产出水密闭配注、一泵多井、大规模混配工艺、防砂方式、分注、举升等海工工艺技术,加快推动化学驱技术试验与工业化应用。针对高温高盐油藏,加强驱油机理与驱油新体系攻关,一是加抗盐单体新型功能超高分路线,二是突破高钙镁油藏必须加大聚合物浓度和分子量的做法,利用钙镁离子,使部分钙镁离子形成微晶,悬浮在驱油体系中,降低钙镁离子对聚合物溶液粘度的不利影响,从而提高驱油体系的粘度。针对聚驱后油藏,进一步研究聚合物驱后剩余油分布特征与赋存状态,加大非均相化学复合驱的推广力度,并在应用中不断完善。

3.4 气驱技术

塔河缝洞型碳酸盐岩油藏,纵向跨度大,通过注 N_2 实现重力驱油,以吞吐方式为主。应进一步研究井与储集体配置关系,预测次生 N_2 顶形成时间与用量,进一步完善氮气辅助重力驱技术(GAGD技术),扩大应用规模和增大采收率提升幅度。

CO_2 驱具有较好的驱油效果已被大量研究与现场试验所证实,以 CO_2 -EOR为核心的CCUS(碳捕获、利用与封存)成为政府和工业界关注的问题。中国 CO_2 驱技术仍处于试验研究和小规模推广阶段,主要受以下3个方面因素的制约:一是气源受限,价格昂贵;二是储层非均质性强,裂缝发育,气窜严重;三是原油粘度大,重组分含量高,混相程度低。 CO_2 驱提高采

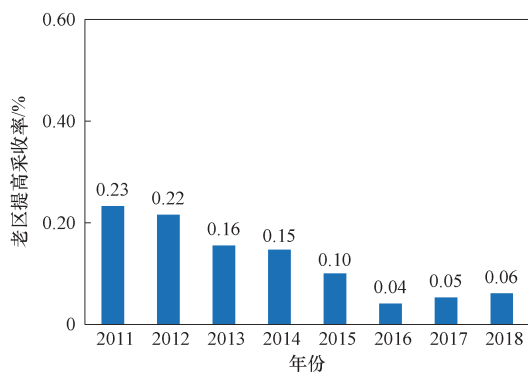


图3 老区年平均提高采收率统计

Fig.3 Annual EOR averages of mature blocks

收率幅度低于10%,但其注入能力是注水的3~5倍,有必要进一步扩大CO₂驱应用规模,通过应用完善CO₂捕集、运输、封存和提高采收率技术。

考虑到气源的廉价与广泛性,应积极探索减氧空气驱的可行性。

3.5 微生物采油技术

微生物采油(MEOR)具有多种驱油机理,成本低,绿色环保,是提高采收率的一个重要方向,在胜利油田中高温(60~85℃)油藏提高采收率5%左右。应该进一步扩大试验与应用规模,进一步应用多学科集成化手段完善菌种和营养液体系优化、油藏微生物作用过程控制和产出物检测方法。

3.6 提高采收率新技术

在完善现有成熟技术适应新领域的同时,需要不断发展新技术、新理论。针对常规驱油剂的局限性,探索新型的经济、高效、耐温、抗盐的驱油剂和驱油体系,攻关提高采收率接替技术和储备技术。

1) 低渗油藏溶膨法提高采收率技术

低渗透油藏储量占比大,但聚合物注入能力差,表面活性剂吸附强,损失大,化学驱技术经济效果差。如能找到油溶性较强且弹性能量大的廉价环保溶剂,可以避免上述问题,成为低渗透油藏提高采收率新技术。

2) 高含水油藏滞留气控水技术

如果在高含水油藏形成滞留气,可以大幅度降低水相渗透率,起到化学驱难以适应的高温高盐等油藏控水挖潜作用。

3) 纳米+表面活性剂技术

通过纳米材料的特殊功能,实现新的驱油机理,是提高采收率的一个重要方向。

4 结论与认识

1) 不同类型油藏的地质储量比例与采收率决定了油田或油区的整体采收率,并可由本文建立的数学模型定量表征。随着开发的不断深入,投入的储量品质逐渐变差,虽然已开发区块做了大量提高采收率工作,但覆盖储量比例较低,整体采收率仍呈下降趋势。

2) 在新发现储量逐渐变差情况下,提高老区采收率成为油公司增加可采储量的极其重要举措。水驱储量比例最大,仍是提高整体采收率的主要领域,同时大力推进化学驱、稠油热采和注气等技术的规模化应用,探索针对性的提高采收率新的变革性技术。

符号说明

N —投入开发的总地质储量,10⁴ t;
 N_0 —初始储量,10⁴ t;
 N_1 —提高采收率覆盖地质储量,10⁴ t;
 $r_F(N)$ —新投入储量采收率,%;
 R_0 —初始采收率,%;
 R_a —新投储量平均采收率,%;
 $R_i(N)$ —老区提高采收率,%;
 $R(N)$ —对应总地质储量的整体采收率,%;
 ΔN —新投入储量,10⁴ t。

参 考 文 献

- [1] 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):1-12.
Yuan Shiyi, Wang Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 1-12.
- [2] 李阳,杨勇. 老油田绿色低碳低成本开发探索与实践[J]. 油气地质与采收率,2019,26(2):1-6.
Li Yang, Yang Yong. Exploration and practice of green low-cost development in old oilfields[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 1-6.
- [3] 计秉玉,王友启,聂俊,等. 中国石化提高采收率技术研究进展与应用[J]. 石油与天然气地质,2016,37(4):572-576.
Ji Bingyu, Wang Youqi, Nie Jun, et al. Research progress and application of EOR techniques in SINOPEC[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 572-576.
- [4] 宫宝,李松源,田晓东,等. 评价水驱油田开发效果的系统工程方法[J]. 大庆石油地质与开发,2015,34(5):58-63.
Gong Bao, Li Songyuan, Tian Xiaodong, et al. System engineering method for evaluating waterflooded oilfield development effects[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(5): 58-63.
- [5] 张戈. 复杂断块油藏人工边水驱提高采收率机理分析[J]. 断块油气田,2014,21(4):476-479.
Zhang Ge. Analysis on IOR mechanism of artificial edge water flooding in complex fault-block reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 476-479.
- [6] 孙焕泉. 未来提高油田采收率的技术发展趋势[J]. 当代石油石化,2017,25(1):1-6.
Sun Huanquan. Future development trend of oil field oil recovery[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2017, 25(1): 1-6.
- [7] 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. Study on potential evaluation method of chemical flooding[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 41-43.
- [8] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 中国CO₂驱油与埋存技术及实践[J]. 石油勘探与开发,2019,46(4):716-727.
Hu Yongle, Hao Mingqiang, Chen Guoli, et al. Technologies and practice of CO₂ flooding and sequestration in China[J]. Petroleum Explo-

- ration and Development, 2019, 46(4): 716–727.
- [9] 程立. 水驱油藏采收率与井网密度对应关系研究[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(4): 61–64.
Cheng Li. Corresponding relationship between oil recovery and well spacing density for water flooding reservoirs[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(4): 61–64.
- [10] 李士伦, 汤勇, 侯承希. 注 CO₂ 提高采收率技术现状及发展趋势[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 1–8.
Li Shilun, Tang Yong, Hou Chengxi. Present situation and development trend of CO₂ injection enhanced oil recovery technology[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 1–8.
- [11] 孙新革, 赵长虹, 熊伟, 等. 风城浅层超稠油蒸汽吞吐后期提高采收率技术[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 72–76.
Sun Xinge, Zhao Changhong, Xiong Wei, et al. Enhanced oil recovery in the late stage of shallow super-heavy oil reservoir with steam huff-puff in Fengcheng Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 72–76.
- [12] 穆中奇, 代金友, 赵正军, 等. 低渗透气藏采收率预测研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 70–72.
Mu Zhongqi, Dai Jinyou, Zhao Zhengjun, et al. Study on predicting the recovery efficiency of low permeability gas reservoirs[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(6): 70–72.
- [13] 孙志刚, 杨海博, 杨勇, 等. 注采交替提高采收率物理模拟实验[J]. 断块油气田, 2019, 26(1): 88–92.
Yang Haibo, Sun Zhigang, Yang Yong, et al. Physical simulation experiment by alternation of injection and production to improve oil recovery[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(1): 88–92.
- [14] 刘毅, 程诗睿, 胡子龙, 等. 微生物复合降黏技术提高稠油底水油藏采收率研究及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(2): 70–73.
Liu Yi, Chen Shirui, Hu Zilong, et al. Research and application of the composite microbial viscosity reduction technology to improve the recovery of heavy oil reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(2): 70–73.
- [15] 孙焕泉. 薄储层超稠油热化学复合采油方法与技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1100–1106.
Sun Huanquan. Hybrid thermal chemical recovery of thin extra-heavy oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1100–1106.
- [16] 张建国. 低矿化度水/表面活性剂复合驱提高采收率技术[J]. 断块油气田, 2019, 26(5): 609–612, 637.
Zhang Jianguo. Alternative injection of low salinity water/surfactant to improve recovery[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(5): 609–612, 637.
- [17] 余文昌, 孔柏岭. 古城油田稠油油藏二元复合驱提高采收率研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(5): 70–72.
She Wenchang, Kong Boling. EOR study by SP flooding in heavy oil reservoirs of Gucheng oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(5): 70–72.
- [18] 李士伦, 汤勇, 侯承希. 注 CO₂ 提高采收率技术现状及发展趋势[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 1–8.
Li Shilun, Tang Yong, Hou Chengxi. Present situation and development trend of CO₂ injection enhanced oil recovery technology[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 1–8.
- [19] 梅海燕, 何浪, 张茂林, 等. 页岩油注气提高采收率现状及可行性分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(6): 77–82.
Mei Haiyan, He Lang, Zhang Maolin, et al. Status and feasibility analysis on improved shale-oil recovery by gas injection[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(6): 77–82.
- [20] 曲占庆, 雷锡岳, 郝彤, 等. 聚合物驱后复合相态调驱体系提高采收率技术[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 143–147.
Qu Zhanqing, Lei Xiyue, Hao Tong, et al. Composite profile-control flooding to enhance oil recovery after polymer flooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 143–147.
- [21] 王友启. 特高含水期油田“四点五类”剩余油分类方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 76–80.
Wang Youqi. Classification method of remaining oil with four points and five types in ultra-high water cut oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 76–80.
- [22] 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): 196–207.
Liao Guangzhi, Wang Qiang, Wang Hongzhuang, et al. Chemical flooding development status and prospect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 196–207.
- [23] 孙焕泉, 李振泉, 曹绪龙, 等. 驱油剂加合增效基础研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 182–188.
Sun Huanquan, Li Zhengquan, Cao Xulong, et al. Basic research progress on the synergistic effect of chemicals in enhanced oil recovery. Beijing: Science Press, 2016: 182–188.
- [24] 王文环, 彭缓缓, 李光泉, 等. 特低渗透油藏水驱规律及最佳驱替模式[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 182–189.
Wang Wenhuan, Peng Huanhuan, Li Guangquan, et al. Waterflooding and optimum displacement pattern for ultra-low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 182–189.
- [25] 康毅力, 田键, 罗平亚, 等. 致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 467–477.
Kang Yili, Tian Jian, Luo Pingya, et al. Technical bottlenecks and development strategies of enhancing recovery for tight oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 467–477.
- [26] 顾浩, 孙建芳, 秦学杰, 等. 稠油热采不同开发技术潜力评价[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(3): 112–116.
Gu Hao, Sun Jianfang, Qin Xuejie, et al. Potential evaluation of different thermal-recovery technologies for heavy oil[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3): 112–116.
- [27] 康志江, 李阳, 计秉玉, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 434–441.
Kang Zhijiang, Li Yang, Ji Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434–441.
- [28] 王友启. 陆相特高含水油田固水提高采收率机制研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 108–112.
Wang Youqi. Research on mechanism of enhanced oil recovery using immobilizing movable water in continental extra-high water cut oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(6): 108–112.