

复杂断块油藏水平井水淹后差异化治理技术

张顺康¹ 李立峰² 金 勇³ 孙东升¹ 张 毅³

1. 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009;
2. 中国石化江苏油田分公司采油二厂, 江苏 淮安 211600;
3. 中国石化江苏油田分公司开发管理部, 江苏 扬州 225009

摘 要:针对江苏复杂断块油藏水平井在开发过程中暴露的水淹严重问题,以水平井水淹动态曲线的形态为判断依据,将水平井划分为局部水淹型、整体水淹型和低液低效型三种类型。根据每一种类型水平井在开发过程中的生产特点及剩余油分布规律,结合物理模拟、油藏工程方法、数值模拟等研究手段,开展了水平井差异化治理提高采收率的技术研究,形成了不同类型水平井提高采收率技术对策。研究成果在现场得到了推广和应用,取得了较好的治理效果,可为国内其他油田水平井治理提供技术借鉴,具有重要的指导意义。

关键词:复杂断块;水平井;水淹;差异化;治理

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.05.012

Differential treatment technology for water flooded horizontal wells in complex fault block reservoirs

ZHANG Shunkang¹, LI Lifeng², JIN Yong³, SUN Dongsheng¹, ZHANG Yi³

1. Geosciences Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Yangzhou, Jiangsu, 225009, China;
2. No. 2 Oil Production Company of Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Huai'an, Jiangsu, 211600, China;
3. Development Management Department of Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Yangzhou, Jiangsu, 225009, China

Abstract: In view of the issue of water flooding in the development process of horizontal wells in complex fault block reservoirs in Jiangsu oilfield, horizontal wells were divided into three types: local water flooded type, overall water flooded type and low liquid low efficiency type, based on the shape of horizontal well water flooding performance curve. According to the production characteristics and remaining oil distribution law for each type of horizontal well in the development process, incorporating methods such as physical simulation, reservoir engineering and numerical simulation, the differential treatment for enhanced oil recovery technology of horizontal well was studied. Technical countermeasures for EOR of different types of horizontal wells were formed, which has been widely applied in the field and achieves good effect. The results can provide technical reference for horizontal well treatment in other oil fields, and has important guiding significance.

Keywords: Complex fault block; Horizontal well; Water flooded; Differentiate; Treatment

收稿日期:2021-02-09

基金项目:中国石化集团公司科技攻关项目“高含水期水平井流场预测及调整技术研究”(P16050)

作者简介:张顺康(1979-),男,江苏扬州人,高级工程师,博士,从事油藏工程研究。E-mail:23020932@qq.com

0 前言

江苏油田自 1996 年开始试验应用水平井,经过二十多年的不断探索和实践,水平井在江苏油田得到了广泛的推广应用。随着开发的不断深入,水平井含水上升快、水淹严重、部分水平井能量不足等矛盾越来越突出。水平井日产油水平占全油田的比例已由 2011 年高峰期的 18.0% 下降到 2016 年底的 11.9%,含水率由 77.7% 上升到 86.3%。

对于水平井进入高含水阶段以后的治理,周代余等人^[1-8]通过分析实际油田水平井生产动态,将水平井分为不同水淹模式,进一步分析了剩余油分布规律。王敬等人^[9-10]研究了储层非均质对水淹的影响规律。何逸凡等人^[11]运用油藏应用类比方法评价了水平井水平段动用不均的程度。崔文昊等人^[12-14]针对水平井水淹严重的问题,研究了水平井找水堵水工艺。

总体来说,现有水平井水淹后治理方面的难点主要集中在水平井含水上升规律、水平井找水堵水工艺研究等方面。特别是对于水平井水淹后应该采用什么样的技术对策,目前开展的研究还比较少。本文针对江苏油田水平井的水淹状况,结合江苏油田复杂断块油藏地质条件,开展了水平井差异化治理的现场实践,同时也可以为国内其他油田的水平井治理提供决策依据和技术借鉴。

1 水平井水淹类型划分

1.1 水平井水淹程度确定

关于水平井的水淹程度,李立峰等人^[15]曾提出一种定量评价方法,该方法以两相渗流理论为基础,通过推导得到了水平井含水率与水淹程度之间的定量表征方法,具体公式如下:

$$f_w(1-f_w)B = W_f \left(\frac{1}{t_D} \right) \quad (1)$$

式中: f_w 为含水率; B 为与相渗曲线有关的常数; W_f 为水淹程度; t_D 为油藏注入孔隙体积倍数。

根据式(1),可以绘制水淹动态曲线,见图 1。对于均质油藏来说,水淹动态曲线是一条过原点的直线,直线的斜率就是油藏水淹程度。然而,由于受到储层非均质的影响,加上油井生产过程中会实施各种各样的调整措施,这就使得水平井实际的水淹动态曲线往往不是一条过原点的直线,见图 2。

根据图 1 水淹动态曲线,可以将水平井的水淹类型分成:直线型、上翘型和下翘型。直线型表示水平井目前已经形成了固定的水淹范围;上翘型表示水平井实施调整措施后,水淹范围再度扩大,水驱波及增加而形成新的直线段,新直线特征段斜率即是水淹程度;下翘型

表示水平井目前由于水驱导致窜流,波及变差。

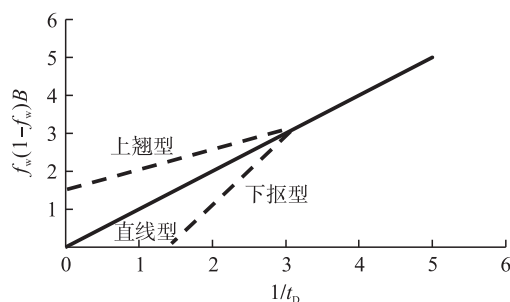


图 1 水淹动态曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flooding dynamic curve

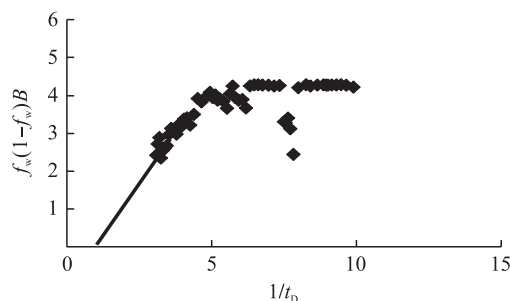


图 2 实际水淹动态曲线图

Fig. 2 Actual flooding dynamic curve

1.2 水平井水淹类型

利用前文方法,结合江苏油田复杂断块油藏已投入开发水平井的生产动态,将水平井分成局部水淹型(84口)、整体水淹型(53口)和低液低效型(44口)三种类型。各种类型水平井呈现如下特征。

1) 局部水淹型水平井:水淹动态曲线呈现下翘型特征,主要是由于这种类型水平井水平段非均质性较强,由于水线非均匀推进,水平井部分井点或者井段率先出水,使得水平井投产后不久便进入中高含水阶段。

2) 整体水淹型水平井:水淹动态曲线呈现直线型特征,主要是由于这种类型水平井水平段相对较为均质,由于水线均匀推进,水平井水平段几乎同时见水,使得水平井见水以后含水上升较慢,目前已经进入高含水阶段,累产较高。

3) 低液低效型水平井:水淹动态曲线呈现上翘型特征,处于扩大水淹范围,这种类型水平井水平段物性较差,注水受效不明显,能量不足,处于中低含水阶段,累产较低。

2 水平井差异化治理方法

2.1 局部水淹型水平井

局部水淹型水平井在治理过程中的重点是判断出水位置^[16-17],并需要结合水动力学以及水平井找水、卡堵水、解堵等工艺技术来调整水平井产液剖面,改善水

平井开发效果。

2.1.1 水平井出水位置判断

2.1.1.1 水平井出水主控因素分析

数模结果表明:水平井位置轨迹、水平井段非均质性、注采井网配置,与油水界面的关系、生产压差是影响水平井水淹程度的主要控制因素。

2.1.1.2 多参数同一平台显示

综合构造、轨迹、渗透率描述储层、匹配关系,渗透率与轨迹、储层状况在同一平台显示。从而实现精细表征水平段物性非均质、水平段与夹层关系的非均质、水平段与构造关系的非均质、水平段距边底水距离的非均质等信息,C3P16 井多参数统一平台显示见图 3。

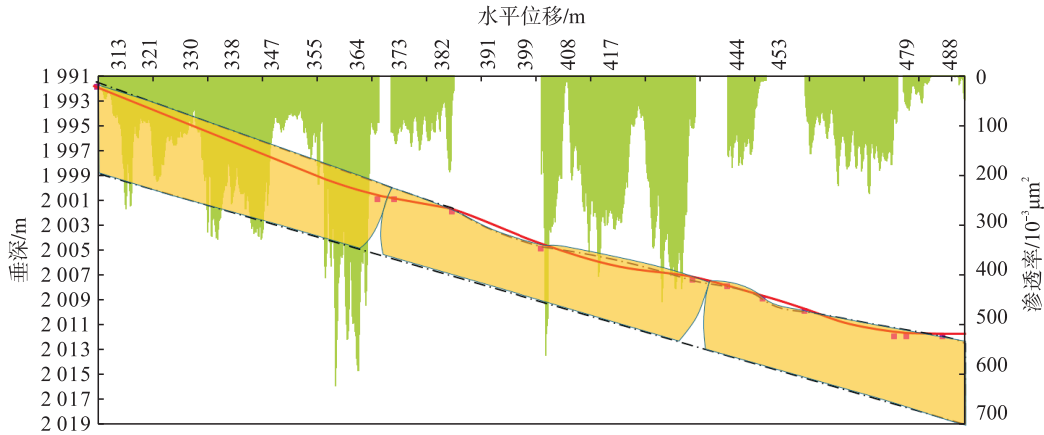


图3 C3P16 井水平井段的非均质性表征示意图

Fig.3 Heterogeneity characterization of horizontal well section for C3P16

2.1.1.3 井区描述

通过描述地质特征、井网配置等信息来确定注采连通关系。以 C3P16 为例,该井区受构型界面渗流屏障影响,水平井段分属于两个微相内,连通关系较差,跟端有注水井 C3-94 井对应;趾端受构型界面影响,注水井 C3-95 井注水对应关系差,见图 4~5。

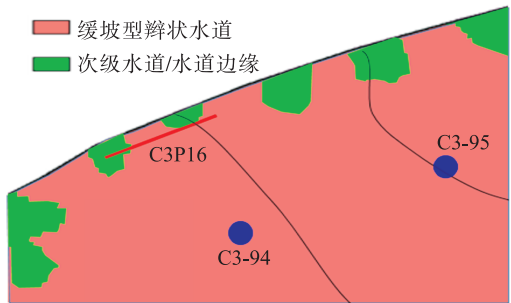


图4 C3P16 井区地质特征、井网示意图

Fig.4 Geological characteristics and well pattern for C3P16

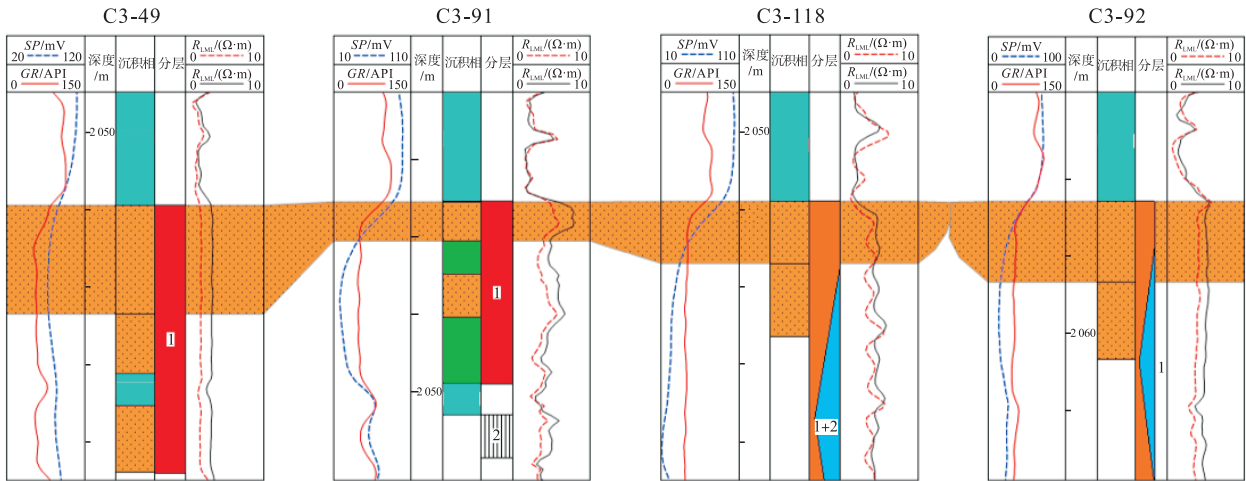


图5 C3P16 井区储层构型及邻井连接剖面图

Fig.5 Reservoir architecture and well logs for C3P16

2.1.1.4 判别出水层段

C3P16 井为局部水淹井,结合该井区非均质的状况以及注采井网对应状况,分析认为跟端物性较好,且有注水井对应,水淹强;而趾端物性较差,注水对应差,为水淹较弱的井段,这与该井的饱和度测试结果一致。

2.1.2 水井注水量优化

借助水动力学调整水平井开发效果时,需要通过调整水井注水量来优化注采。根据数值模拟结果,将水平井段离散化,根据油水井之间的渗流阻力系数,求取井组配注量。

$$Q_i = Q_{\text{BI}} \frac{\frac{1}{R_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (2)$$

式中: Q_i 为第 i 口水井注水量, m^3/d ; Q_{BI} 为油藏总注水量, m^3/d ; R_i 为水井到油井(包括水平井)的渗流阻力系数。

考虑油藏静态的储层物性以及动态的含水饱和度的变化,根据达西定律,平面上网格 (i, j, k) 在 x 和 y 两个方向的渗流阻力系数 R_x 、 R_y 可以表示为:

$$R_x = \frac{\mu_o \mu_w L}{K(k_{ro} \mu_w + k_{rw} \mu_o) h b}, R_y = \frac{\mu_o \mu_w b}{K(k_{ro} \mu_w + k_{rw} \mu_o) h L} \quad (3)$$

式中: μ_o 、 μ_w 分别为油水的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; k_{ro} 、 k_{rw} 分别为油相、水相相对渗透率, 无因次; K 为网格渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; L 、 b 、 h 分别为网格在 x 、 y 、 z 方向上的大小, m 。

平面上,网格与直井或水平段所在网格的连线形成真正的渗流阻力,见图 6,图中夹角分别为 α 和 β ,由此形成该网格沿渗流方向的渗流阻力系数可以表示为:

$$R_{xy} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 - 2R_x R_y \cos(180 - \alpha - \beta)} \quad (4)$$

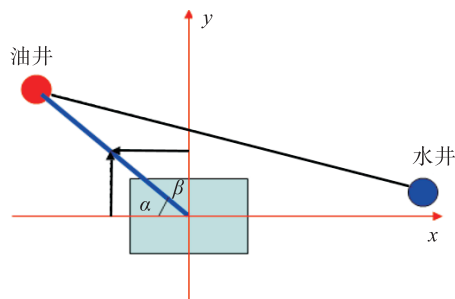


图 6 井间渗流阻力系数表征示意图(平面)

Fig. 6 Well flowing resistance coefficient(horizontal)

纵向上,网格 (i, j, k) 与 z 轴(向下)的夹角为 γ ,具体见图 7,考虑垂向的渗流阻力系数 R_z ,网格在三维空间沿渗流方向的渗流阻力系数可以表示为

$$R_{xyz} = R_{xy} \cos(1 - \gamma) + R_z \cos(\gamma) \quad (5)$$

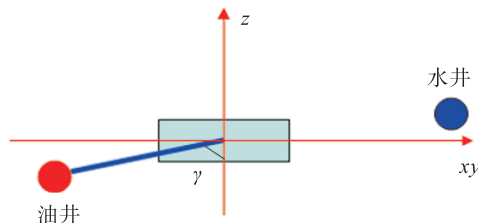


图 7 井间渗流阻力系数表征示意图(纵向)

Fig. 7 Well flowing resistance coefficient(vertival)

2.2 整体水淹型水平井

整体水淹型水平井靠近断层附近的区域往往是剩余油富集的位置(即阁楼油),治理的技术对策是研究 CO_2 气顶驱来动用这部分剩余油。

通过物理模拟,认为 CO_2 气顶驱动用阁楼油的机理表现在以下三方面:重力分异作用,即油气之间存在密度差,注入气向上移动,地层油向下移动;气顶膨胀作用,即人工注 CO_2 形成的气顶不断膨胀,推动高部位剩余油向低部位移动;对原油抽提作用,即 CO_2 抽提原油中的轻质烃类,降低残余油饱和度。

在明确驱替机理的基础上,结合油藏数值模拟手段确定了 CO_2 气顶驱动用阁楼油筛选标准:断层为封闭边界,无因次含油饱和度大于 0.5,储层倾角大于 10° ,油水黏度比小于 50,渗透率大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$,水体倍数小于 80 PV。

在此基础上,结合具体的目标区块,进一步开展 CO_2 气顶驱注入参数及注入方案的优化设计研究^[18],从而为现场实施 CO_2 气顶驱动用阁楼油提供了技术支持。

2.3 低液低效型水平井

低液低效型水平井的主要问题在于地层能量不足,注水不见效,动用程度相对较低,为此开展了水平井 CO_2 吞吐补充地层能量的适应性研究,建立了低液低效型水平井 CO_2 吞吐评价指标体系及评价标准,见表 1;进一步结合模糊数学方法对该类型水平井注 CO_2 吞吐适应性进行评价,结果见表 2。

在开展适应性评价的基础上,通过对不同吞吐方式的关键参数进行优化,可以确定最佳的注入速度、注入量等参数^[19-20]。

表 1 CO₂ 吞吐评价指标体系表Tab. 1 CO₂ huff and puff evaluation index system

一级评价指标	二级评价指标	等级				
		好	较好	中等	较差	差
流体特征	原油密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	<0.80	0.80 ~ 0.83	0.83 ~ 0.86	0.86 ~ 0.89	>0.89
	原油黏度 /($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	<5	5 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	>300
	固相沉积	—	—	井中	地层中	地层中
	地层水矿化度 /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	>150	100 ~ 150	50 ~ 100	30 ~ 50	<30
油藏特征	油藏温度 / $^{\circ}\text{C}$	60 ~ 70	70 ~ 80 或 50 ~ 60	80 ~ 90 或 40 ~ 50	90 ~ 100 或 30 ~ 40	>100 <30
	油藏压力 /MPa	8 ~ 10	10 ~ 12 6 ~ 8	12 ~ 14 4 ~ 6	14 ~ 16 2 ~ 4	>16 <2
	油藏深度 /m	900 ~ 1 500	1 500 ~ 2 000 或 800 ~ 900	2 000 ~ 2 500 或 700 ~ 800	2 500 ~ 3 000 或 600 ~ 700	>3 000 <600
	油藏倾角 /($^{\circ}$)	>25	20 ~ 25	15 ~ 20	10 ~ 15	<10
储层特征	渗透率 /($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	10 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	>400 或 <10
	有效孔隙度	>25%	20% ~ 25%	15% ~ 20%	10% ~ 15%	<10%
	油层厚度 /m	>10	10 ~ 7	7 ~ 4	4 ~ 1	<1
	渗透率变异系数	<0.50	0.50 ~ 0.55	0.55 ~ 0.60	0.60 ~ 0.65	>0.65
其他参数	油润湿性	0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0
	原油饱和度	>60	50 ~ 60	40 ~ 50	30 ~ 40	<30
	含水率	40% ~ 60%	60% ~ 70% 或 30% ~ 40%	70% ~ 80% 或 20% ~ 30%	80% ~ 90% 或 10% ~ 20%	>90% 或 <10%
	水平井长度 /m	110 ~ 130	130 ~ 150 或 90 ~ 110	150 ~ 170 或 70 ~ 90	170 ~ 190 或 50 ~ 70	>190 <50
	水体能量	充足	微弱 较强	微弱 较强	— 强	— 强

表 2 CO₂ 吞吐适应性评价指标体系权重汇总表Tab. 2 Weight for CO₂ huff and puff adaptability evaluation index system

一级参数	权重	二级参数	权重	一级参数	权重	二级参数	权重
流体特征	0.128	原油密度	0.351	储层特征	0.265	渗透率	0.244
		原油黏度	0.351			有效孔隙度	0.244
		固相沉积	0.189			油层厚度	0.129
		地层水矿化度	0.109			渗透率变异系数	0.074
油藏特征	0.333	油藏温度	0.412	其他参数	0.275	油润湿性	0.064
		油藏压力	0.293			原油饱和度	0.244
		油藏深度	0.187			含水率	0.091
		油藏倾角	0.108			水平井长度	0.416
						水体能量	0.332

3 水平井差异化治理效果

针对江苏油田复杂断块油藏水平井水淹特点,开展了水平井差异化治理技术的现场应用。先后在14个油田开展了水平井流场调整优化、CO₂气驱及CO₂吞吐的现场实践。

对于局部水淹型水平井,主要采用强化趾端注水、转变注水方向、注采耦合、井网优化结合卡水堵水、调剖等技术手段开展了以水动力学为主的综合治理,累积增油 5.37×10^4 t。如C3P2井通过强化趾端对应水井注水,降低腰部对应水井注水,实现控水增油,调整以后含水率从78.6%下降到68.3%,日增油5 t。

对于整体水淹型水平井,开展了CO₂气驱动用阁楼油现场试验,累计增油5 860 t。如对因整体水淹而关停的Sha49P1井实施注CO₂试验,复产后含水率由100%降到82.3%,日增油2.1 t。

对于低液低效型水平井,开展了CO₂吞吐试验,累计增油2 068 t。如对Qiao7P1井通过实施CO₂吞吐,含水由86.7%下降到47.5%,日增油达5.8 t。

截至2019年底,江苏油田实施水平井差异化治理共计74井次,实现增油 6.12×10^4 t,取得了较好的治理效果。

4 结论

1)以江苏油田复杂断块油藏水平井水淹动态曲线的形态为判断依据,将水平井划分为局部水淹型、整体水淹型和低液低效型三种类型,进一步明确了各种类型水平井的水淹规律和开发特征。

2)研究形成了不同类型水平井水淹后的治理方法:局部水淹型水平井以判断出水位置为治理重点,并需要结合水动力学以及工艺技术来调整水平井产液剖面;整体水淹型水平井治理的技术对策是通过实施CO₂气顶驱来动用水水平井靠近近层附近的剩余油;低液低效型水平井由于地层能量不足,需要开展CO₂吞吐补充地层能量。

3)针对不同类型水平井剩余油分布特征,开展了不同类型水平井水淹后治理的现场实践,取得了较好的治理效果。截至2019年底,江苏油田实施水平井差异化治理共计74井次,实现增油 6.12×10^4 t。

参考文献:

- [1] 周代余,江同文,冯积累,等.底水油藏水平井水淹动态和水淹模式研究[J].石油学报,2004,25(6):73-77.
- ZHOU Daiyu, JIANG Tongwen, FENG Jilei, et al. Water

flooding performance and pattern in horizontal well with bottom water reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25 (6): 73-77.

- [2] 郑俊德,高朝阳,石成方,等.水平井水淹机理数值模拟研究[J].石油学报,2006,27(5):99-107.
- ZHENG Junde, GAO Chaoyang, SHI Chengfang, et al. Numerical simulation of watered out mechanism in horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (5): 99-107.
- [3] 王家禄,刘玉章,江如意,等.水平井开采底水油藏水脊脊进规律的模拟[J].石油勘探与开发,2007,34(5):590-593.
- WANG Jialu, LIU Yuzhang, JIANG Ruyi, et al. 2-D physical modeling of water coning of horizontal well production in bottom water driving reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (5): 590-593.
- [4] 肖彦英,涂学万,王百,等.元284区水淹水平井见水方向判识新技术试验[J].石油化工应用,2017,36(2):111-113.
- XIAO Yanying, TU Xuewan, WANG Bai, et al. A new technique for detecting the direction of water in horizontal wells in Yuan 284 area [J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36 (2): 111-113.
- [5] 齐银,郑刚,姬振宁,等.注水开发水平井水淹类型识别及堵水技术研究[J].天然气与石油,2013,31(2):47-50.
- QI Yin, ZHENG Gang, JI Zhenning, et al. Identification of water flooding type in horizontal well water injection development and study on water plugging technology [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (2): 47-50.
- [6] 王雨,陈存良,杨明,等.边水油藏水平井见水规律研究[J].复杂油气藏,2020,13(2):56-59.
- WANG Yu, CHEN Cunliang, YANG Ming, et al. Study on water breakthrough law of horizontal wells in edge water reservoir [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2020, 13 (2): 56-59.
- [7] 苗彦平,唐林,高遵美,等.边水油藏水平井含水上升规律影响因素研究[J].油气藏评价与开发,2013(5):41-46.
- MIAO Yanping, TANG Lin, GAO Zunmei, et al. Study on affecting factors of water cut rising rules of horizontal wells in edge water reservoir [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013 (5): 41-46.
- [8] 孙亮,李保柱,李勇,等.中东地区孔隙型碳酸盐岩油藏水平井水淹模式[J].科学技术与工程,2019,19(14):136-145.
- SUN Liang, LI Baozhu, LI Yong, et al. Waterflooding model of horizontal wells for porous carbonate reservoirs in Middle East [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (14): 136-145.

- [9] 王 敬,刘慧卿,刘松原,等. 非均质油藏水平井水淹规律研究[J]. 石油学报,2010,31(6):970-974.
WANG Jing, LIU Huiqing, LIU Songyuan, et al. A flooding law in horizontal wells of heterogeneous reservoirs with bottom water [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (6): 970-974.
- [10] 姜汉桥,李俊健,李 杰. 底水油藏水平井水淹规律数值模拟研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(6):172-176.
JIANG Hanqiao, LI Junjian, LI Jie. Investigation on water out mechanism of bottom water driven reservoir in horizontal wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31 (6): 172-176.
- [11] 何逸凡,石洪福,张吉磊,等. 底水油藏水平井层内干扰定量表征及挖潜策略[J]. 特种油气藏,2018,25(2):85-89.
HE Yifan, SHI Hongfu, ZHANG Jilei, et al. Quantitative characterization and recovery measures of horizontal-well in-layer interference in bottom-aquifer oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25 (2): 85-89.
- [12] 崔文昊,高 榕,陈 柯,等. 低渗透油田水平井快速找水技术研究与应[用]. 长江大学学报(自科版),2015,12(5):76-78.
CUI Wenhao, GAO Rong, CHEN Ke, et al. Research of fast water detection technology in horizontal wells of low permeability oilfields and its application [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12 (5): 76-78.
- [13] 刘广燕,秦 飞,吴文明,等. 塔河砂岩油藏水平井出水分析及配套堵水工艺[J]. 断块油气田,2013,20(2):248-251.
LIU Guangyan, QIN Fei, WU Wenming, et al. Watering analysis and matching water plugging technology for horizontal wells in sandstone reservoir of Tahe oilfield [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2013, 20 (2): 248-251.
- [14] 陈志刚. 水平井找水测试技术在姬塬油田的研究及应用[J]. 石油化工应用,2019,38(4):72-76.
CHEN Zhigang. Research and application of horizontal well water seeking testing technology in Jiyuan oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38 (4): 72-76.
- [15] 李立峰,周方喜,熊建华,等. 水平井开发油藏水淹程度定量评价方法及其应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2015,30(5):59-63.
LI Lifeng, ZHOU Fangxi, XIONG Jianhua, et al. Quantitative evaluation method of water flooded degree of oil reservoirs developed by horizontal wells and its application [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 30 (5): 59-63.
- [16] 孙彦春,王群会,张 雷,等. 底水油藏水平井出水位置识别方法[J]. 特种油气藏,2014,21(6):109-111.
SUN Yanchun, WANG Qunhui, ZHANG Lei, et al. Water-break through interval identification in bottom-water oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21 (6): 109-111.
- [17] 高超利,梁 锋,李 洋,等. 吴起油田水平井找水工艺技术研究及堵水工艺工作建议[J]. 非常规油气,2019,6(1):44-50.
GAO Chaoli, LIANG Feng, LI Yang, et al. Research on water-seeking technology of horizontal wells and suggestions for water plugging technology of Wuqi oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6 (1): 44-50.
- [18] 王智林. 断块油藏类型划分探讨及注CO₂分类开发对策[J]. 天然气与石油,2020,38(4):65-70.
WANG Zhilin. Discussion on classification of complex fault block reservoir and optimisation of CO₂ injection development countermeasures [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (4): 65-70.
- [19] 王智林,林 波,葛永涛,等. 低渗油藏水驱后注CO₂补充能量机理及方式优化[J]. 断块油气田,2019,26(2):231-235.
WANG Zhilin, LIN Bo, GE Yongtao, et al. Mechanisms and optimization of supplementing in-situ energy by CO₂ injection after water flooding in low permeability reservoirs [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26 (2): 231-235.
- [20] 金 勇,王智林,金忠康. 基于改进体积法的高含水水平井CO₂吞吐注入量计算模型[J]. 油气藏评价与开发,2019,9(3):19-24.
JIN Yong, WANG Zhilin, JIN Zhongkang. A new calculation model of CO₂ huff and puff injection volume in high water-cut horizontal wells based on improved volume method [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9 (3): 19-24.