

文章编号:1009-9603(2022)05-0141-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202108049

大庆油田井网加密调整效果及其发展趋势

赵秀娟,吴家文,左松林,杨文武,戢红霞,孟妍,王贺军

(中国石油大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712)

摘要:为了明确大庆油田历次井网加密调整效果,以调整后5~10 a内的取心井资料为依据,分析各类油层见水厚度比例、水洗厚度比例及驱油效率变化规律。结果表明:基础井网使有效厚度大于2.0 m的油层得到有效动用,见水厚度比例达75.8%;一次加密井网调整使有效厚度为2.0 m及以下的各类油层见水厚度比例得到大幅度提高,有效厚度为0.5~2.0 m的油层见水厚度比例增幅为195.0%~264.4%,表外油层也得到了有效动用;二次加密井网调整使有效厚度为0~1.0 m的油层见水厚度比例进一步提高近50.0%;三次加密井网调整并未明显提高油层见水厚度比例,薄差油层的见水厚度比例增幅小于2.3%,井网加密调整效果逐渐变差。层间非均质性强、生产井段跨度大和层间含水率差异变小是薄差油层见水厚度比例低和历次井网加密调整效果变差的重要因素,进而提出了缩短生产井段与缩小井距并重的井网加密调整模式。

关键词:井网加密;动用程度;水洗厚度比例;驱油效率;大庆油田

中图分类号:TE32*4

文献标识码:A

Effect and trend of well pattern infillings in Daqing Oilfield

ZHAO Xiujuan, WU Jiawen, ZUO Songlin, YANG Wenwu, JI Hongxia, MENG Yan, WANG Hejun

(Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company Ltd.,
PetroChina, Daqing City, Heilongjiang Province, 163712, China)

Abstract: To clarify the effect of previous well pattern infillings of Daqing Oilfield, this paper analyzed changes in the water-breakthrough thickness ratio, water-washing thickness ratio, and oil displacement efficiency of various oil layers on the basis of cored well data obtained 5–10 years after the adjustments. The result shows that the basic well pattern enabled the effective producing of oil layers with an effective thickness above 2.0 m, and the water-breakthrough thickness ratio reached 75.8%. The primary well pattern infilling significantly improved the water-breakthrough thickness ratio of oil layers with effective thicknesses of 2.0 m or less, and the water-breakthrough thickness ratio with effective thicknesses of 0.5–2.0 m increased by 195.0%~264.4%, thus the untubulated oil layers effectively produced well too. The secondary infilling further improved the water-breakthrough thickness ratio of oil layers with effective thicknesses between 0–1.0 m by nearly 50.0%. The tertiary infilling did not improve the water-breakthrough thickness ratio of the oil layers considerably, the water-breakthrough thickness ratio of the thin and poor oil layers increased no more than 2.3%, which represented the gradually worsening effect of well pattern infilling. The high interlayer heterogeneity, the large producing zone, and the decreasing interlayer water cut difference are key factors for the low water-breakthrough thickness ratio of the thin and poor oil layers and the worsening effect of previous infillings. According to the analysis above, a well pattern infilling mode that equally emphasizes the reduction of producing section length and well spacing was proposed.

Key words: well pattern infilling; producing degree; water-washing thickness ratio; oil displacement efficiency; Daqing Oilfield

收稿日期:2021-08-08。

作者简介:赵秀娟(1976—),女,黑龙江肇东人,高级工程师,硕士,从事老油田开发调整及层系井网重构技术的工作。E-mail:zhaoxiuju@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油重大科技专项“高/特高含水油田改善水驱关键技术”(2019B-12)。

大庆油田自20世纪60年代投入开发以来,经历了基础井网的早期内部切割注水开发、以提高中-低渗透油层动用程度为目的的一次加密井网调整、以提高低渗透油层和表外油层动用程度为目的的二次加密井网调整和以进一步改善薄差油层开发效果为目的的三次加密井网调整。1995年大庆油田主力油层全面进入化学驱开发,2002年二类油层也开展了化学驱工业化应用。经过5次大规模调整后,油田采收率大幅度提高,产量保持在较高水平。

评价油田开发效果的方法较多,评价结果也千差万别,尤其是阶段调整的效果更是难以确定^[1-6]。目前常用的评价方法如动态分析法、水驱特征曲线法和童宪章曲线法等只能宏观评价井网加密调整后的整体开发效果,不能评价某类油层调整后的动用情况^[7-14]。截至2020年12月,大庆油田共有165口取心井,分布在不同区块且跨越油田开发的不同时期,能较好地反映油层动用特征。为此,笔者以取心井资料为基础,分析各套井网加密调整后不同有效厚度级别油层开发效果,研究不同加密井网对不同有效厚度级别油层的增产效果,进而作出针对性调整,以期对井网精准调整和改善油田开发效果提供技术支撑。

1 研究区概况

为了厘清大庆油田各套井网射孔情况,在油田北部、中部和南部分别选取各套井网齐全且具有代表性的A、B和C区块进行研究。A区块属于喇嘛甸油田,位于大庆油田北部,油层发育较好;B区块属于萨中开发区,位于大庆油田中部,油层发育厚度比A区块略小;C区块属于杏北开发区,位于大庆油田南部,油层发育较差。为分析井网加密调整推广应用的效果,选取D和E区块,均属于杏北开发区,与C区块位置相近。

大庆油田油层根据有效厚度分为表内油层和表外油层。其中表内油层按照有效厚度可分为0~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0 m和大于2.0 m共4个级别;表外油层是指有效厚度为0 m的油层,其与有效厚度为0~0.5 m的表内油层统称为薄差油层。

2 不同井网开采对象

大庆油田各区块油层发育特征不同,各套井网主要开采对象也存在差异(表1)。

表1 大庆油田各区块各套井网不同有效厚度级别油层射孔比例

区块	井网	不同有效厚度级别油层射孔比例					%
		0 m	0~0.5 m	0.5~1.0 m	1.0~2.0 m	>2.0 m	
A 区块	基础井网	10.6	22.5	19.7	26.9	30.9	
	一次加密井网	7.5	25.3	24.1	26.9	23.6	
	二次加密井网	22.8	29.4	26.2	24.1	20.4	
	三次加密井网	15.8	36.5	40.8	15.9	6.9	
B 区块	基础井网	4.7	22.6	25.2	24.6	27.6	
	一次加密井网	11.2	37.6	29.4	17.8	15.2	
	二次加密井网	18.9	41.6	30.7	18.2	9.5	
	三次加密井网	7.7	56.4	27.4	14.7	1.5	
C 区块	基础井网	15.2	37.3	25.4	19.5	17.9	
	一次加密井网	35.3	59.2	32.1	7	1.7	
	二次加密井网	56.5	72.2	25.3	2	0.5	
	三次加密井网	74.7	79.4	19.6	1	0	

基础井网 A 区块油层厚度较大,基础井网主要开采对象为有效厚度大于1.0 m的油层;B 区块基础井网主要开采对象为表内油层,其4个有效厚度级别油层的射孔比例基本相当,各约为25%;C 区块油层厚度较薄,基础井网主要开采对象为有效厚度为1.0 m及以下的油层。由此可见,基础井网几乎射开了所有钻遇油层。

一次加密井网 A 区块一次加密井网主要开采对象为表内油层,其4个有效厚度级别油层的射孔比例各约为25%;B 区块一次加密井网主要开采对象为有效厚度为1.0 m及以下的油层;C 区块一次加密井网开采对象主要为薄差油层。

二次加密井网 A 区块二次加密井网主要开采对象比一次加密井网的厚度略薄,但4个有效厚度级别油层的射孔比例基本相当;B 区块二次加密井网主要开采对象是薄差油层,其次是有效厚度为0.5~1.0 m的油层;C 区块二次加密井网主要开采对象也是薄差油层,但以表外油层为主。

三次加密井网 二次加密井网调整后,部分油层的动用程度得到了改善,但表外油层动用未达预期,因此对大庆油田部分区块进行了三次加密井网调整,其主要开采对象是薄差油层。A 区块三次加密井网主要开采对象为有效厚度为0.5~1.0 m的油层;B 区块三次加密井网主要开采对象为有效厚度为0~0.5 m的油层;C 区块三次加密井网主要开采对

象为表外油层。

3 井网加密调整后开发效果

基于大庆油田历次井网加密调整后5~10 a内51口取心井资料,分析各套井网加密调整后不同有效厚度级别油层见水厚度比例、水洗厚度比例和驱油效率的变化规律,研究油层的开发效果。

3.1 见水厚度比例

大庆油田各套井网的主要受效对象有所不同。由图1可以看出,基础井网的主要受效对象为有效厚度大于2.0 m的油层,基础井网投产后5~10 a内,这部分油层见水厚度比例达75.8%。一次加密井网的主要受效对象范围较广,有效厚度为2.0 m及以下的油层见水厚度比例与基础井网相比均得到了较大幅度提高,其中有效厚度为0.5~2.0 m的油层见水厚度比例增幅为195.0%~264.4%,表外油层也在一次加密井网调整后得到了有效动用;二次加密井网的主要受效对象是有效厚度为0~1.0 m的油层,见水厚度比例与一次加密井网相比提高幅度近50.0%,虽然从射孔情况看二次加密井网射开表外油层比例较高,但从效果上看二次加密井网调整并未使表外油层的见水厚度比例得到大幅度提升;三次加密井网的主要受效对象是薄差油层,但从提高波及体积来看,三次加密井网调整的效果并不明显,这部分油层在调整后的见水厚度比例与二次加密井网相比,增幅小于2.3%。

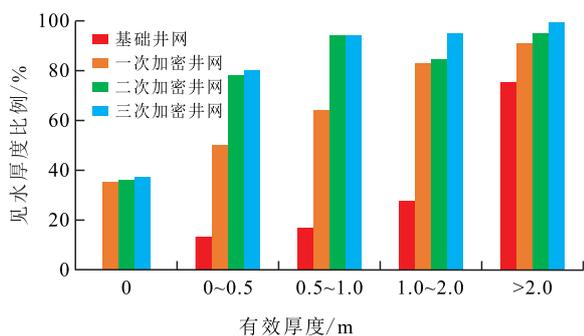


图1 大庆油田各套井网不同有效厚度级别油层见水厚度比例

Fig.1 Water-breakthrough thickness ratio of various oil layers with different effective thicknesses in Daqing Oilfield under different well patterns

3.2 水洗厚度比例

由图2可以看出,大庆油田各套井网不同有效厚度级别油层的水洗规律和见水规律基本相同。基础井网开发时,有效厚度大于2.0 m的油层水洗厚度比例为43.2%,一次加密井网调整后比基础井

网提高了49.8%,三次加密井网调整后与二次加密井网相比提高幅度减缓;有效厚度为1.0~2.0 m的油层在基础井网开发时,水洗厚度比例仅为20.7%,一次加密井网调整后比基础井网提高了152.7%,达到了52.3%,三次加密井网调整后与二次加密井网相比提高幅度减缓;有效厚度小于1.0 m的油层在基础井网开发时,水洗厚度比例仅为10%左右,二次加密井网调整后,提高至70.2%,三次加密井网调整后与二次加密井网相比提高幅度较小;有效厚度为0~0.5 m的油层在三次加密井网调整后水洗厚度比例与二次加密井网相比提高11.6%,幅度不大;表外油层一次加密井网调整后水洗厚度比例为12.3%,三次加密井网调整后为19.0%,与二次加密井网相比提高30.9%,这部分油层动用程度较差。

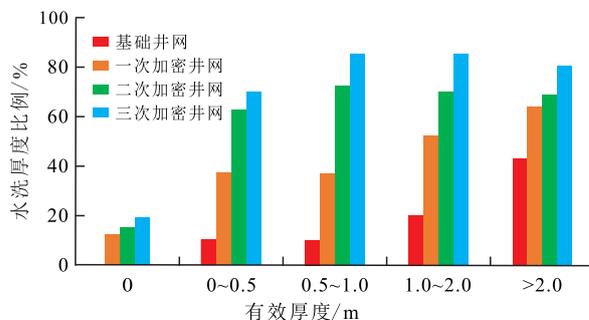


图2 大庆油田各套井网不同有效厚度级别油层水洗厚度比例

Fig.2 Water-washing thickness ratio of various oil layers with different effective thicknesses in Daqing Oilfield under different well patterns

3.3 驱油效率

由图3可以看出,大庆油田基础井网开发5~10 a,有效厚度大于2.0 m的油层平均驱油效率最高,达到28.8%,其次是有有效厚度为1.0~2.0 m的油层,而1.0 m以下的油层平均驱油效率小于7.1%;一次加密井网调整后,有效厚度为0.5~2.0 m的油层平均驱油效率比基础井网提高108.9%~254.9%,表外油层

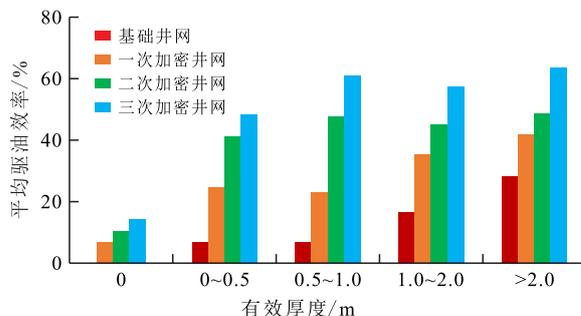


图3 大庆油田各套井网不同有效厚度级别油层平均驱油效率

Fig.3 Average oil displacement efficiency of various oil layers with different effective thicknesses in Daqing Oilfield under different well patterns

平均驱油效率仅为7%;三次加密井网调整后,有效厚度为0.5~1.0 m的油层平均驱油效率与二次加密井网相比提高28.6%,薄差油层平均驱油效率仅提高17.3%~24.8%。

3.4 效果分析

结合油层动用程度可以看出,有效厚度大于2.0 m的油层在三次加密井网调整后,见水厚度比例已达100%,水洗厚度比例为81%,平均驱油效率为63.5%,整体来看开发效果比有效厚度为2.0 m以下的油层好,进一步井网加密调整的潜力较小。有效厚度为1.0~2.0 m的油层,由于在历次井网加密调整过程中射孔比例不高,平均驱油效率仅为57.8%,比有效厚度大于2.0和0.5~1.0 m的油层低近9.0%,从而井网加密调整的潜力较大。有效厚度为0.5~1.0 m的油层无论是见水厚度比例、水洗厚度比例还是平均驱油效率,均高于有效厚度为1.0~2.0 m的油层及薄差油层,井网加密调整的潜力相对较小。有效厚度为0~0.5 m的油层,三次加密井网调整后,见水厚度比例、水洗厚度比例和驱油效率都明显比有效厚度为0.5 m以上的油层低,开发效果较差。而表外油层即使在二、三次加密井网中作为主要的调整对象,但其见水厚度比例、水洗厚度比例和驱油效率都未得到大幅度提高;从取心井分析资料来看,表外油层仍有60%以上的厚度未见水、80%的厚度未水洗,水洗后的岩心平均驱油效率小于15%,仍有较大的挖潜空间,但从整个开发历程来看,这部分表外油层的潜力在现有层系井网条件下,挖潜难度较大。

4 井网加密调整效果影响因素

4.1 层间非均质性

在历次井网加密调整过程中,虽然一套井网只开发一种开采对象,但层间非均质性仍较强,大庆油田各区块平均纵向渗透率变异系数均高于0.6。同时各区块井网生产井段跨度较大,大于100 m的占井网总数的50%以上,且部分井网生产井段跨度大于200 m。为此,应用物理模拟实验和数值模拟方法来研究层间非均质性对井网加密调整效果的影响。

物理模拟实验 设计3个渗透率油层,其中高渗透油层渗透率为800 mD,孔隙度为0.289;中渗透油层渗透率为300 mD,孔隙度为0.234;低渗透油层渗透率为100 mD,孔隙度为0.205。实验结果(图4)

表明高渗透油层含水率明显比中、低渗透油层高,说明低渗透油层未得到较好动用。分析认为这是由于低渗透油层渗流阻力比高渗透油层高,低渗透油层在高渗透油层干扰下见水慢、见水量小,从而开发效果相对较差,含水率上升慢。

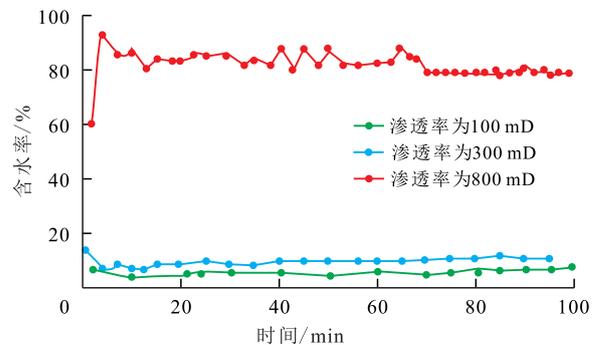


图4 不同渗透率油层含水率随时间的变化

Fig.4 Variation of water cut of oil layers with different permeability over time

数值模拟方法 设计渗透率分别为50, 100和300 mD的3个模拟层,分析单个模拟层产液量占有所有模拟层总产液量的比例,研究层间非均质性对井网加密调整效果的影响。数值模拟结果(图5,图6)表明,渗透率为300 mD的油层产液量最大,产液量占比为60%~80%,采收率最高达到49.1%;渗透率为50 mD的油层产液量最小,产液量占比为8%~15%,采收率最高仅为34.6%,比渗透率为300 mD的油层低29.5%,说明层间非均质性对井网加密调整

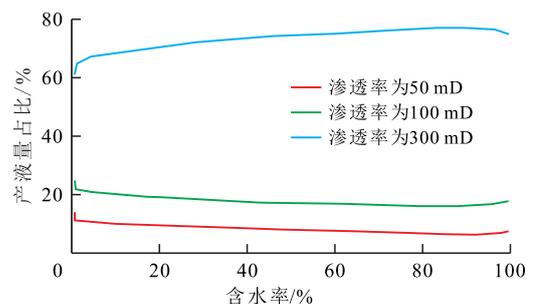


图5 不同渗透率油层产液量占比随含水率的变化

Fig.5 Variation of liquid production ratio of oil layers with different permeability with water cut

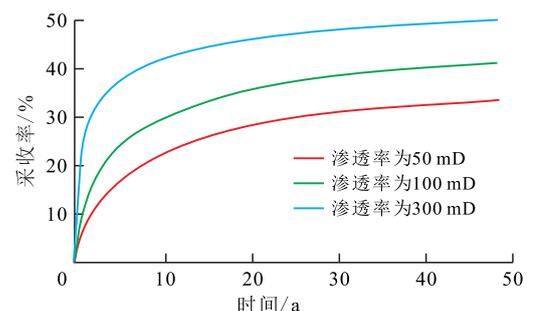


图6 不同渗透率油层采收率随时间的变化

Fig.6 Variation of recovery of oil layers with different permeability over time

效果有较大影响。当层间非均质性强时,注入水优先进入高渗透油层,造成低渗透油层产液量低、采收率低,开发效果相对较差。

4.2 生产井段跨度

矿场实践表明,生产井段跨度对油层动用程度有较大影响。选取大庆油田D区块中油层性质和层间非均质性相近的注入井,分析不同生产井段跨度对吸水厚度比例的影响。从图7可以看出,在相同层间非均质性条件下,随着生产井段跨度增大,吸水厚度比例减小,油层动用程度呈降低趋势。当生产井段跨度小于50 m时,吸水厚度比例可达91%;当生产井段跨度大于100 m时,吸水厚度比例仅为76%,二者相差15%。

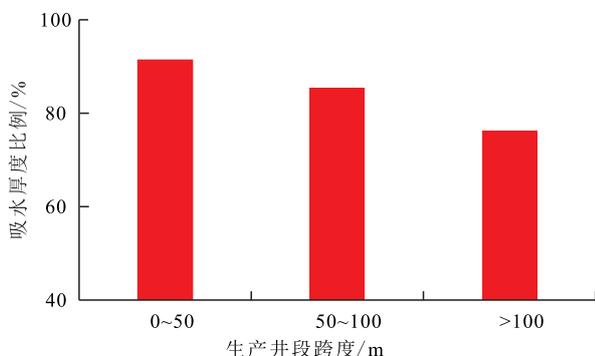


图7 大庆油田D区块不同生产井段跨度吸水厚度比例

Fig.7 Water intake thickness ratio versus producing zone in Block D of Daqing Oilfield

4.3 层间含水率差异

历次井网加密调整都有不同的开采对象。大庆油田开发初期,不同开采对象之间含水率差异较大。低渗透油层由于动用程度较低,含水率较低。历次井网加密调整过程中,始终有比上一次井网加密调整渗透率更低的油层投入开发,从而降低含水率,改善油田开发效果。例如,一次加密调整井网的开采对象含水率为30%左右,而基础井网的含水率为80%左右,一次加密井网调整后油田含水率降低明显,改善了开发效果。随着油田不断开发,层间含水率差异变小,低渗透和高渗透油层的含水率逐渐接近,井网加密调整效果变差。以三次加密调整井网为例,其开采对象含水率为80%左右,而此时其他几套井网的含水率为90%左右,三次加密井网调整后含水率与其他几套井网的含水率差别不大,三次加密井网调整后效果有限。因此,层间含水率差异也是影响井网加密调整效果的重要因素。

5 井网加密调整技术发展趋势

历次井网加密调整效果逐渐变差且薄差油层

始终未得到较好的动用,说明常规井网加密调整方法对薄差油层的作用有限,这主要是由于薄差油层纵向上受高渗透油层干扰造成的。

鉴于常规井网加密调整效果有限,笔者建立了一种井网加密调整的新方法。由以开采对象为中心,以缩小井距为目标的调整模式,转变为缩小井距和缩短生产井段并重的调整模式,有条件的区块将好、差油层分开,减小层间干扰。针对不同区块井网方式,结合细分对象和井网互补利用等方法进行个性化的调整。

按照以上调整思路,大庆油田已开展了9个试验区,取得了采收率提高1.7%~11.2%的好效果。以E区块为例,该区块层系井网存在生产井段跨度大、层系划分不清和薄差油层井距大等问题。针对这些问题,确定了纵向上细划层段以缩短生产井段跨度,同时细分开采对象以改善层间非均质性,平面上缩小井距以提高水驱控制程度的井网加密调整模式。该区块井网加密调整后,萨尔图层系生产井段跨度由204 m减至95 m,纵向渗透率变异系数由0.71降至0.54,多向连通比例由21.3%增至33.6%,吸水厚度比例提高了21.1%,采收率提高了11.2%^[15]。

展望未来大庆油田井网加密调整方式,考虑到低油价影响应尽量避免钻新井,同时在考虑特殊井型应用的基础上,应做好新老井综合利用,同时兼顾即将开展的薄差油层化学驱工业化应用,做到水驱、化学驱协同优化,达到经济效益最大化。

6 结论

大庆油田历次井网加密调整对薄差油层的效果越来越差,缩短生产井段与缩小井距并重的井网加密调整方法可有效减小纵向渗透率变异系数,提高多向连通比例和吸水厚度比例,从而改善开发效果。该方法在大庆油田9个试验区应用后取得了采收率提高1.7%~11.2%的较好效果,可在同类区块推广应用,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张意超,陈民锋,屈丹,等.X油田特低渗透油藏井网加密效果预测方法[J].岩性油气藏,2020,32(1):144-151.
ZHANG Yichao, CHEN Minfeng, QU Dan, et al. Prediction method of well pattern infilling effect for ultra-low permeability reservoir in X oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 144-151.

- [2] 陈元千,吕恒宇,傅礼兵,等.注水开发油田加密调整效果的评价方法[J].油气地质与采收率,2017,24(6):60-64.
CHEN Yuanqian, LÜ Hengyu, FU Libing, et al. Evaluation method of infilling adjustment effect for waterflooding development oilfields [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24 (6):60-64.
- [3] 吴忠臣.萨中油田特高含水期加密调整方法[J].大庆石油地质与开发,2013,32(3):79-82.
WU Zhongchen. Infilling and adjusting methods for ultra-high-water-cut Sazhong Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(3):79-82.
- [4] 董雪梅,徐怀民,马迪娜 马吾提汗,等.彩9井区西山窑组特低渗油藏高含水期加密调整试验[J].新疆石油地质,2014,35(5):558-561.
DONG Xuemei, XU Huaimin, MADINA Mawutihan, et al. Well infill adjustment test of Xishanyao ultra-low permeability reservoir in high water cut stage in wellblock Cai-9 of Cainan oilfield, Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5):558-561.
- [5] 陈元千,王小林,姚尚林,等.加密井提高注水开发油田采收率的评价方法[J].新疆石油地质,2009,30(6):705-709.
CHEN Yuanqian, WANG Xiaolin, YAO Shanglin, et al. A method for evaluation of EOR of waterflooding oilfield by infill well process [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(6):705-709.
- [6] 魏兆胜.萨中地区北一区断东二次加密后的开采特征[J].大庆石油学院学报,1998,22(1):14-16.
WEI Zhaosheng. Production characteristics of Duandong in Beiyi area after second infill drilling [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1998, 22(1):14-16.
- [7] 王莘楠.北三西密集取心井区单砂体精细解剖及剩余油研究[D].大庆:东北石油大学,2013.
WANG Xinnan. Fine anatomy of monosandbody and remaining oil research in North-three-West area [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [8] 王帅,孙国红.大庆油田三元复合驱前后密闭取心井水洗状况分析[J].长江大学学报:自科科学版,2016,13(35):61-65.
WANG Shuai, SUN Guohong. Analysis on the water flushing condition of sealed coring wells drilled before and after ASP flooding [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2016, 13(35):61-65.
- [9] 刘丽.基于密闭取心井和模糊评判分析埕岛油田水淹状况[J].西北大学学报:自然科学版,2012,42(6):995-999.
LIU Li. Water out behavior analysis of Chengdao Oilfield by sealing core drilling and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2012, 42(6):995-999.
- [10] 李伟强,尹太举,邓智浩,等.萨尔图油田北二西区密闭取心井水洗特征[J].油气地质与采收率,2016,23(1):101-106.
LI Weiqiang, YIN Taiju, DENG Zhihao, et al. Waterflooding characteristics of sealed coring wells in Beiexi area of Saertu oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1):101-106.
- [11] 屈亚光,阮迪,未志杰,等.海上S油田聚合物驱注采井网优化[J].油气地质与采收率,2020,27(2):112-117.
QU Yaguang, RUAN Di, WEI Zhijie, et al. Optimization of injection-production pattern for polymer flooding in S offshore Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2):112-117.
- [12] 熊钰,徐宏光,王玲,等.反九点井网加密前后流场变化及驱油效率实验研究[J].油气地质与采收率,2020,27(3):70-78.
XIONG Yu, XU Hongguang, WANG Ling, et al. Experimental research on variation of flow field and displacement efficiency before and after infilling of inverted nine-spot well pattern [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3):70-78.
- [13] 金艳鑫.X区块特高含水期层系井网优化调整技术及其应用[J].大庆石油地质与开发,2020,39(2):86-93.
JIN Yanxin. Optimizing and adjusting technologies and their applications of the stratigraphic-series well pattern in the extra-high watercut period in Block X [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2):86-93.
- [14] 吴浩,姜汉桥,乔岩,等.封闭油藏不同含水期的井网方案优化[J].断块油气田,2019,26(3):342-345.
WU Hao, JIANG Hanqiao, QIAO Yan, et al. Optimization of well pattern design at different water-cut stage of closed reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(3):342-345.
- [15] 赵秀娟,左松林,吴家文,等.大庆油田特高含水期层系井网重构技术研究与应用[J].油气地质与采收率,2019,26(4):82-87.
ZHAO Xiujuan, ZUO Songlin, WU Jiawen, et al. Study and application of strata & well pattern reconstruction technique at extra high water cut stage in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4):82-87.

编辑 何青芳