

断层对复杂断块油藏水驱开发效果的影响

屈亚光^{1,2}

(1.长江大学石油工程学院,湖北武汉 430100; 2.长江大学油气钻采工程湖北省重点实验室,湖北武汉 430100)

摘要:复杂断块油藏中断层多且分布复杂,特别是对于断块内部发育较多低级别小断层的断块油藏,小断层会影响注采井网的水驱开发效果,需要对其影响规律展开研究,以指导注采井网部署和调整。根据复杂断块油藏中小断层的分布特点,设计3种注采井网,建立理想化的断层分布模型,分别采用油藏物理模拟和数值模拟方法研究各注采井网的水驱开发效果;采用物理模拟方法进一步研究小断层长度对注采单元水驱开发效果的影响。研究分析表明:当断块内部发育小断层时,在低注采压差条件下,注采井网3水驱开发效果最好,在高注采压差下,注采井网1水驱开发效果最好;断块内部小断层长度会影响注入水的波及体积,断层相对越长,断块内部注入水未波及到的油藏体积越大,水驱开发效果越差。

关键词:复杂断块油藏 断层 注采井网 物理模拟 数值模拟 开发效果

中图分类号:TE347

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)04-0083-05

Impact of fault on the development effect of water flooding in complicated fault block reservoir

Qu Yaguang

(1.School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2.Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production of Hubei Province, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China)

Abstract: There are lots of faults in complicated fault block reservoir. And their distributions are quite complicated. Especially in the fault block reservoir with many sub-order faults developed in the fault block, the sub-order faults will influence the water flooding development effect. And the influence rule should be studied to guide flooding pattern deployment and adjustment. According to the distributions and characteristics of the sub-order faults in the complicated fault block reservoir, three flooding patterns were designed and an idealized model of fault distribution was built. Water flooding development effect of different flooding patterns was studied by physical simulation and reservoir numerical simulation. The research results show that development effect of No.3 flooding patterns was the best under the condition of low injection-production pressure drawdown, and No.2 flooding pattern was the best under the condition of high injection-production pressure drawdown. The length of sub-order faults in the fault block will affect the swept volume of the injected water. The longer the fault length is, the larger the unswept reservoir volume of the injected water in the fault block is, and the lower the development efficiency is.

Key words: complicated fault block reservoir; fault; flooding pattern; physical simulation; numerical simulation; development effect

断层是断裂面两侧岩块发生明显相对移动的断裂构造^[1]。复杂断块油藏构造极为复杂,主要表现在断块油藏内常常发育不同级别、不同方向、不

同时期和不同力学性质的众多断层,将构造切割破碎,形成规模较小的断块,组成形态和成因各异的断块群,从而控制油气藏的形成和分布^[2-4]。断层根

收稿日期:2017-03-17。

作者简介:屈亚光(1984—),男,湖北荆州人,高级工程师,博士,从事油气田开发方面的教学和科研工作。联系电话:(027)69110169, E-mail: qyg52122@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“高含水油田提高采收率新技术”(2011ZX05010-002)。

据发育规模可以划分为多个级别,不同级别的断层对油藏开发效果的影响作用也不同^[5-7]。

复杂断块油藏中断层较多且分布规律复杂,对断层的认识和描述是油藏开发过程中的关键问题之一,同时也是难点之一^[8-10]。断层的存在将影响该油藏的开发单元划分、注采井网部署、水驱开发效果和油水井生产动态分析等方面^[11-15]。如高尚堡深层油藏有很多生产井均位于断层边缘,在投入注水开发后,注水井也位于断层边缘,油水井连线方向与断层方向平行或者夹角很小,注入水因受到断层阻挡作用使得油井单向受效,导致含水率急剧上升。为此,笔者根据复杂断块油藏中低级别小断层的分布特点,建立理想化的断层分布模型,分别采用油藏物理模拟和数值模拟方法研究了不同注采井网的水驱开发效果以及断层长度对其影响程度,最优的注采井网和断层延伸长度对水驱开发效果的影响规律,以期对复杂断块油藏的注采井网部署和调整提供有力的理论指导。

1 断层对注采井位部署的影响

1.1 断层模型的制作

根据断层对构造、沉积的控制作用以及构造发育史,通常将断层分为几个级别,本次研究对象为低级别小断层,该类断层仅能控制局部构造,剖面特征上断距不是很大,延伸较短,断层的分布与油水井位部署直接影响着断块的水驱开发效果。实际油藏中断层的分布即断层的延伸方向大部分是弯曲的,不是直线向前延伸,不利于开展理论研究(图1a)。为此,基于油藏中断层分布特点,建立理想化的断层分布模型时,假定断层的走向是直线向前延伸的。模型设计为一个均质的正方体油藏单元,单元内部仅发育1条断层(图1b),未断穿整个油藏单元,且断层是封闭不渗透的,即流体不能通过断层渗流,平面渗透率为0。

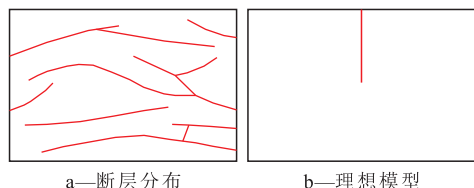


图1 复杂断块油藏断层分布与理想模型

Fig.1 Fault distribution map of complicated fault block reservoirs and idealized model of fault distribution

基于断层分布理想模型,在室内采用物理模拟方法研究断层对注采井网的影响。首先建立实验

模型,采用天然岩石加工成正方体岩块,为保证模型的均质性,将渗透率大小相近的岩块以网状形式粘接组合在一起,模型尺寸为40 cm×40 cm。在模型上部中间模拟断层的位置,左、右2块岩块粘接过程中粘接面用环氧树脂胶完全封堵,保证左、右岩块间不渗透。通过控制环氧树脂胶封堵岩块的位置可以控制断层分布的位置与长度,断层的长度可实现定量控制,断层分布位置也可任意控制。

1.2 井网设计

假设一个正方体复杂断块油藏内部仅发育1条小断层,其延伸长度是断块边长的一半,模型中有1注1采2口井,制作3种注采井网的实验模型(图2)。

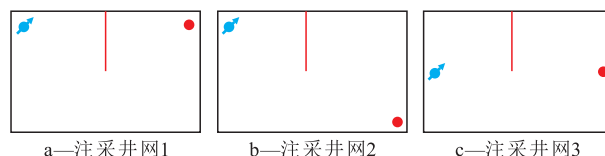


图2 3种注采井网的实验模型

Fig.2 Three types of flooding pattern

1.3 实验过程

实验流体 实验流体主要包括:①饱和模型以及水驱均采用纯净水;②采用标准0#柴油(密度为850 kg/m³,粘度为3.66 mPa·s)作为模拟用油。

实验条件 选取25℃作为实验温度;控制出口压力,采用恒压方法进行实验。

实验步骤 实验步骤主要包括:①依据实验设计方案,基于前面提出的断层模型制作方法建立物理实验模型;②对模型采取抽真空饱和水,当模型完全饱和水后,将模型接入测试系统;③采用恒压法驱替,计量单位时间内单相驱替条件下模型产水量;④在单相驱替实验完成后,将模型连接到装有模拟油的中间容器上,启动平流泵向模型内注入模拟油,直至模型出口端只出油不出水为止,饱和过程结束后,将模型接入测试系统;⑤以恒压方法进行水驱油实验;⑥分别计量实验过程中产液量、产油量、含水率、测试时间等数据;⑦依次对每种注采井网采取相同的实验方法,测试不同注采井网条件下模型水驱采出程度,研究断层对水驱油的影响。

1.4 实验结果与分析

根据实验步骤可知,在水驱油之前首先在模型饱和水后注水进行单相驱替,其目的主要是检测实验模型的制作效果,测试模型中注水井和生产井的井筒是否通畅,模型外部环氧树脂胶粘接是否严密、均匀,是否能承受一定的驱替压力,能够较好地保证实验的精度和提高实验效率。

首先在单相注采条件下,各个方案的工作制度

均为定注采压差,其注采压差为0.1 MPa,可以得出不同注采井网在稳定状态时生产井的流量,注采井网1、注采井网2和注采井网3的流量分别为1.2,1.7和2.1 mL/min,其中注采井网3单相驱替时生产井流量最高,说明在同样注采压差下,注采井网3模型内部渗流阻力最小,断层对流体阻挡作用最小,初步表现出注采井网3的优势。

在各注采井网单相驱替实验结束后饱和油所进行的水驱油两相驱替实验,可以得到两相驱替条件下的累积产油量和累积注入量(表1)。统计不同注采井网的生产指标可知,注采井网3在同样生产时间内累积产油量最高,注采井网2次之,注采井网1最少。从3个注采井网的累积注入量可以看出,相同注采压差条件下,注采井网3的注入量最多,注采井网1的注水量最少,其原因主要是受断块内部封闭断层的影响,当注入水流动到断层附近时,由于断层是不渗透的,流动过程受阻,压力波不能传到模型右部,在注水井附近区域,模型压力不断升高,当注入压力一定时,注入量越来越少。

表1 不同注采井网的累积产油量和累积注入量
Table1 Cumulative oil production and water injection of three types of flooding pattern

井网形式	累积产油量/mL	累积注入量/mL
注采井网1	279.6	280.1
注采井网2	323.9	335.5
注采井网3	345.3	481.4

同时,由3个注采井网的产油速度(图3)可以看出,在模型生产初期,注采井网3初期产油速度最高,生产中后期由于见水后含水率上升快导致注采井网3产油速度下降。综合分析可知,对于注采单元物理模型,注采井网3的驱油效率最高,水驱开发效果最好。

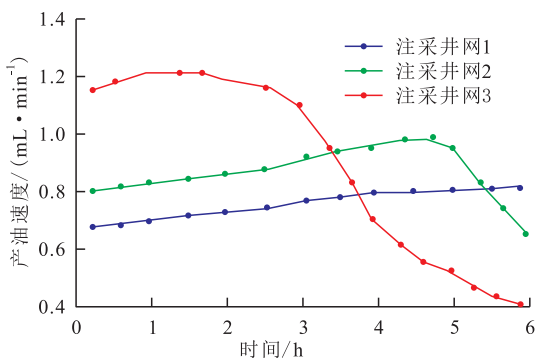


图3 不同注采井网的产油速度

Fig.3 Oil production rate of three types of flooding pattern

1.5 油藏数值模拟方法

采用油藏数值模拟方法进一步研究复杂断块油藏注采井位优化部署原则,模型采用黑油模型,

包括油、气、水3相。为保证数值模型计算的收敛性,模型主要物性参数选用某油藏物性与流体参数。

首先建立与物理模型类似的概念化油藏模型,模型仅有1层,厚度为5 m,单元平面大小为350 m×350 m,方案设计与物理实验类似,共设计3种实验方案。工作制度为定注采压差,注采压差分为高、低2种注采条件,分别为8和3 MPa。通过数值模拟方法计算得到各方案的累积产油量,从累积产油量变化曲线分析可知,在不同注采压差条件下,各实验方案累积产油量变化规律是不同的。低注采压差条件下,注采井网3的累积产油量最高,而在高注采压差条件下,注采井网1的累积产油量最高。

通过物理模拟和油藏数值模拟结果对比分析可知,在低注采压差条件下,物理模拟结果与数值模拟结果一致,都可得出注采井网3的累积产油量最高,水驱开发效果最好。但在高注采条件下,油藏数值模拟研究所得的认识有所不同,在高注采压差条件下,油藏开发初期时注采井网3累积产油速度最高,但随着生产时间的延长,油藏开发末期时注采井网1的累积产油量高于其他2种注采井网。

从各方案流线分布(图4a)可以看出,方案3注采井距最小,在开发初期,断层对油水流动影响最小,注水见效快,油井初期产能高,但是含水率上升速度也最快。而当增高注采压差后,注入水通过下部边界作用可以快速流向生产井,并且从流线形态看,注采井网1波及面积最大,当提高注采压差后,注采井网1的开发效果最好。

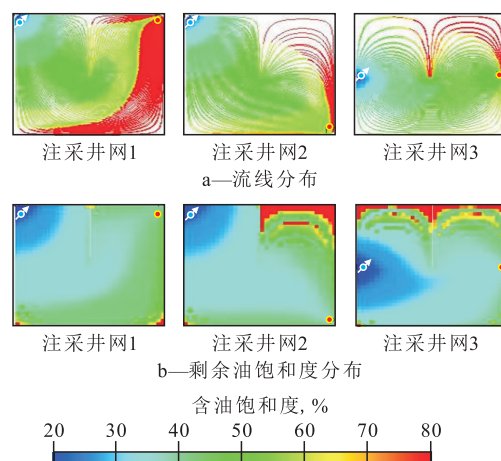


图4 不同注采井网的流线和剩余油饱和度分布

Fig.4 Streamline and remaining oil saturation distribution of three types of flooding pattern

从各方案的开发末期剩余油饱和度分布(图4b)可以看出,注采井网1剩余油少,由于断层的影响,注采井网2和注采井网3在断层附近区域剩余油饱和度高,剩余储量大,水驱波及面积小,开发效

果差。同时,通过数值模拟研究可得,断层对油藏开发中、后期油水分布影响较大,断层附近大多是剩余油富集区,与实际油藏开发过程相符合,并得以验证。综合分析可知,复杂断块油藏的水驱开发效果与其物性、地饱压差有关。当油藏渗透率低且地饱压差小、不能采用高注采压差时,注采井网3水驱开发效果优于其他2种注采井网。而对于中、高渗透油藏,注采压差大,注采井网1的驱油效率最高,水驱开发效果最好。

2 断层长度对复杂断块油藏水驱开发效果的影响

2.1 实验方案设计及实验步骤

小断层中油水流动过程受不渗透断层的影响,油藏的波及体积减小,油藏水驱开发效果变差,需进一步研究断块内部断层延伸长度对水驱开发效果的影响。断块内部小断层长度会影响注入水的波及体积,断层相对越长,断块内部注入水未波及到的油藏体积越大,水驱开发效果越差,若断层断穿整个断块,则断块被切割成2个相互独立的小断块,断块之间、流体之间不受影响,断块左部无效注水,右部天然能量开发,油藏开发效果更差。

基于建立的断层分布理想模型(图2),选择注采井网2作为进一步研究的井网。注采井网位置固定不变,断层延伸长度发生变化。每1种注采井网设计5个实验方案,断层长度与断块边长比值分别为0, 1/8, 1/4, 1/2 和 3/4。根据断层分布理想模型建立实验模型,模拟断层面的岩块之间完全用环氧树脂胶粘接,随着断层长度变长,更多的岩块之间相互不渗透,实验步骤和详细操作过程与1.3中相同。

2.2 实验结果与分析

单相驱替时,测出各方案在稳定状态下生产井流量。将断层延伸长度与断块边长的比值定义为无因次断层长度。绘制出单相驱替时无因次断层长度与稳定状态下生产井流量的关系(图5)。

随着断层长度的增加,稳定状态下生产井流量下降速度较明显,是由于注入水受断层阻挡作用,注采之间的平面渗流区域变窄,压力波传播速度受影响,断层越长,模型内部压力分布越不均匀,流动过程受断层影响较大。

单相驱替实验结束后,饱和油进行水驱油两相驱替实验,得到各个方案的实验结果。从初期产油量与无因次断层长度的关系(图6)可以看出,与单

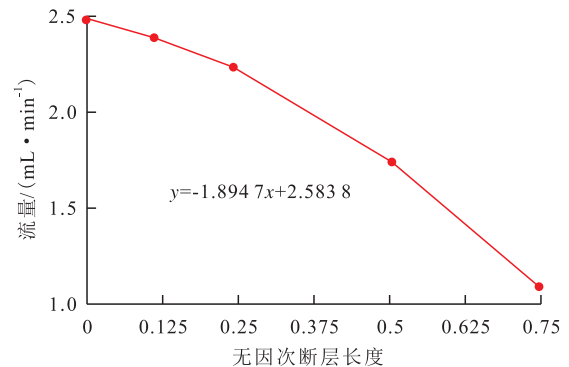


图5 无因次断层长度与稳定状态下生产井流量的关系

Fig.5 Relationship between dimensionless length of fault and flow rate of producer at stable state

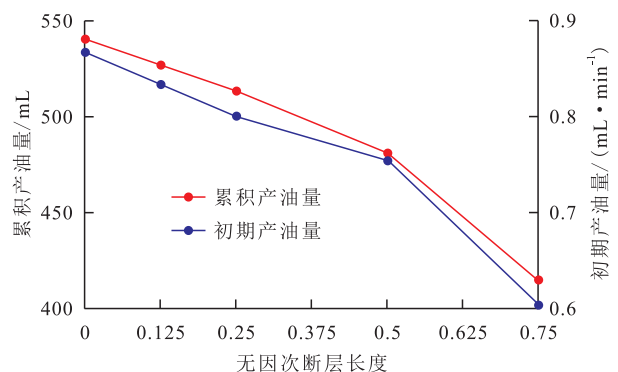


图6 无因次断层长度与累积和初期产油量的关系

Fig.6 Relationship between dimensionless length of fault, cumulative and initial oil production

相驱替时不同,两者之间不符合线性关系,当断层延伸长度与断块边长之比小于0.5时,油井初期产油量相差不大;当比值大于0.5时,初期产油量下降速度加快。由各方案的累积产油量变化曲线(图6)可以看出,断层延伸长度对水驱开发效果影响较大,特别是当无因次断层延伸长度大于等于0.5时,各个方案的累积产油量差别较明显,无因次断层长度为0.75时的累积产油量比无断层时的少123.4 mL;从累积注水量变化曲线上可以看出,无断层的累积注入量最高,相同注入压力条件下注水效率最高,地层能量补充最及时。

3 结论

根据复杂断块油藏断层的分布特点,建立理想化的断层分布模型,设计了3种注采井网,分别采用油藏物理模拟和数值模拟方法研究了不同注采井网的水驱开发效果,同时基于注采井网2研究了断层延伸长度对注采单元水驱开发效果的影响规律;对于断块内部发育断层的油藏单元,在低注采压差条件下注采井网3的水驱开发效果最好,在高注采压差下注采井网1的水驱开发效果最好;同时,断块

内部断层长度影响注入水的波及体积,断层长度越长,断块内部注入水未波及到的油藏体积越大,水驱开发效果越差。

参考文献:

- [1] 章惠,孙思敏,季汉成,等.南堡凹陷边界断层分段特征及其对沉积体系的控制作用[J].油气地质与采收率,2016,23(3):20-25.
Zhang Hui, Sun Simin, Ji Hancheng, et al. Segmentation characteristic of boundary fault in Nanpu sag and its control on sedimentary system [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 20-25.
- [2] 束宁凯,汪新文.砂砾岩储层层次划分及连通模式——以东辛油田永1断块砂砾岩油藏为例[J].油气地质与采收率,2016,23(4):59-63.
Shu Ningkai, Wang Xinwen. Sedimentary sequence classification and connectivity pattern of conglomerate reservoir: A case study of Yong1 conglomerate reservoir in Dongxing oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 59-63.
- [3] 张文彪,陈志海,许华明,等.断层封闭性定量评价——以安哥拉Sangos油田为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):21-26.
Zhang Wenbiao, Chen Zhihai, Xu Huaming, et al. Quantitative evaluation of fault seal: a case study of Sangos oilfield in Angola [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 21-26.
- [4] 李志鹏,林承焰,史全党,等.高浅南区边水断块油藏类型及剩余油特征[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(1):135-141.
Li Zhipeng, Lin Chengyan, Shi Quandang, et al. Types of edge-water fault block reservoirs and features of residual oil in the Gaoqianan area [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 135-141.
- [5] 孙波,陶文芳,张善文,等.济阳拗陷断层活动差异性与油气富集关系[J].特种油气藏,2015,22(3):18-21.
Sun Bo, Tao Wenfang, Zhang Shanwen, et al. Relationship between fault activity difference and hydrocarbon enrichment in Jiyang Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3): 18-21.
- [6] 付广,史集建,吕延防.断层侧向封闭性定量研究方法的改进[J].石油学报,2012,33(3):414-418.
Fu Guang, Shi Jijian, Lü Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 414-418.
- [7] 张戈,王端平,孙国,等.复杂断块油藏人工边水驱影响因素敏感性[J].油气地质与采收率,2015,22(2):103-106,111.
Zhang Ge, Wang Duanping, Sun Guo, et al. Sensibility study on influencing factors of artificial edge water flooding in complex fault-block reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 103-106, 111.
- [8] 屈亚光,刘月田,涂彬.复杂断块油藏水平井开发应用效果研究[J].钻采工艺,2011,34(2):33-35,45.
Qu Yaguang, Liu Yuetian, Tu Bin. Study on efficiency of horizontal well development in complex fault-block oil reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(2): 33-35, 45.
- [9] 陈明强,袁昭,郭宏,等.鄯善油田东区注水开发中断层对剩余油分布的控制作用[J].西安石油大学学报:自然科学版,2013,28(6):55-58.
Chen Mingqiang, Yuan Zhao, Guo Hong, et al. Control effects of faults on residual oil distribution in water flooding development of the east area of Shanshan Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2013, 28(6): 55-58.
- [10] 吴琼.新立油田断层附近高效调整井部署方式研究[J].特种油气藏,2012,19(4):73-76.
Wu Qiong. Research on placement of efficient adjustment wells near faults in Xinli oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4): 73-76.
- [11] 屈亚光,刘月田,胥小伟.高尚堡多层系复杂断块油藏含水率变化影响因素研究[J].石油天然气学报,2010,32(2):120-124,128.
Qu Yaguang, Liu Yuetian, Xu Xiaowei. Influential factors of water-cut variation in multi-layer and complicated fault-block reservoirs in Gaoshangbao oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 120-124, 128.
- [12] 刘海龙,王冠,吴淑红.条带状断块油藏不稳定渗流压力传播规律研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2016,38(5):135-141.
Liu Hailong, Wang Guan, Wu Shuhong. A study on pressure transmission of unsteady fluid flow in banded fault block reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2016, 38(5): 135-141.
- [13] 齐亚东,雷群,杨正明,等.条带状特低渗透断块油藏布井方案评价与优选[J].石油钻采工艺,2011,33(4):66-70.
Qi Yadong, Lei Qun, Yang Zhengming, et al. Evaluation and optimization of well patterns designed for banding faulted block reservoirs with extremely low permeability [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(4): 66-70.
- [14] 褚庆忠,陈小哲,时培兵,等.秦家屯复杂断块油田开发效果分析及定量评价方法[J].大庆石油地质与开发,2016,35(3):58-63.
Chu Qingzhong, Chen Xiaozhe, Shi Peibing, et al. Developed effects analyses and quantitative evaluating method for Qinjiatun complex fault-block oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(3): 58-63.
- [15] 金勇,刘红.小断块边底水油藏开发实践与认识[J].大庆石油地质与开发,2006,25(6):53-55.
Jin Yong, Liu Hong. Development practice and understanding in small fault block reservoir with edge and bottom water [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 53-55.