

底水油藏多分支井见水时间影响因素

高盛恩¹, 吴晓东², 韩国庆², 岑学齐²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要:在多分支井开发底水油藏的过程中,油井见水是不可避免的,而见水后对含水率的控制十分困难,因此延长见水时间极其重要。但目前针对多分支井见水规律的研究却是空白。利用数值模拟方法,得到见水时间与相关参数之间的关系,为调整参数延长见水时间提供理论依据。实验结果表明,见水时间与多分支井避水高度、单井控制面积、井下夹层、油藏水平渗透率及多分支井的分支长度、分支角度和分支数目等参数成正相关性;而与生产压差、产液量、油藏垂向渗透率和油水粘度比等参数之间成负相关性。对鱼骨井与辐射式多分支井开发的底水油藏水脊形态的研究表明:鱼骨井主要见水点为主井筒与分支交会处,水体呈与分支形态相关的山脊状向上推进,因此分支与主井筒的交会处是须重点防范底水突进的位置;而辐射式多分支井的井跟比井趾处见水要早,第1见水点为分支的交会点,而且是点状见水,然后迅速变为面状见水,水体呈与分支形态相关的山脊状向上推进,因此与鱼骨井不同,井跟处是须重点防范底水突进的位置。

关键词:底水油藏 多分支井 鱼骨井 见水时间 数值模拟

中图分类号: TE341

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)03-0116-04

Influencing factors of water breakthrough time for multilateral wells in bottom water reservoirs

Gao Sheng'en¹, Wu Xiaodong², Han Guoqing², Cen Xueqi²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China;

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: The occurrence of water breakthrough is inevitable in the development process of bottom water reservoirs, and it is difficult to control the water cut after water breakthrough for the multilateral wells. Therefore, it has great importance to prolong the water breakthrough time. There are a few studies on the water breakthrough laws for the horizontal wells, but no studies for the multilateral wells. Relationship between the water breakthrough time and related parameters was obtained by numerical simulation so as to provide theoretical foundation for parameter adjustment and longer water breakthrough time. Experiment results indicate that the water breakthrough time has positive correlation with the water avoidance height, the control area for single well, the area and position of interlayer, the horizontal permeability and the three multilateral well parameters including branch length, branch angle and branch number. On the other hand, the water breakthrough time has negative correlation with the pressure difference, the fluid production rate, the vertical permeability and the ratio of oil and water. The observation of the water ridge morphology of the bottom water reservoir developed by herringbone wells and radial multilateral wells indicates that the main water breakthrough point of the herringbone well is at the intersection of the main wellbore and the branches, and the shape of the water ridge is related to the shape of the branch. So the intersection may be the position of bottom water breakthrough. The heel of the radial multilateral well may have earlier water breakthrough than the toe. While the first water breakthrough point for the radial multilateral well is the intersection of the branches, and punctiform water breakthrough occurs at first, followed by the planar water breakthrough. The shape of the water ridge is related to the shape of the branch. Therefore, the position of water breakthrough is at the heel of the radial

收稿日期: 2016-01-05。

作者简介: 高盛恩(1986—), 男, 山东蓬莱人, 在读博士研究生, 从事油气开发工程技术方面的研究。联系电话: 18612561586, E-mail: gse567@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“复杂结构井优化设计与控制关键技术”(2011ZX05009-005)。

multilateral well, which is different from that in the herringbone well.

Key words: bottom water reservoir; multilateral well; herringbone well; water breakthrough time; numerical simulation

随着多分支井钻井技术的进步,多分支井在油田,尤其是海上油田得到越来越广泛的应用^[1-5]。多分支井可以提高油田产能,最大效率地开发油藏,降低经济风险和成本,还可用于致密砂岩、稠油和阁楼油等油藏。然而,如果多分支井出现见水,则难以控制水侵,进一步有效开采将变得十分困难,因此,准确预测并尽量延长底水油藏多分支井的见水时间是多分支井开采底水油藏的关键问题之一。

从目前多分支井的研究现状可以看出,现在的研究重点多针对多分支井在稳定单相渗流油藏中的产能分析和形态优化,而针对两相流动,也仅限于在主井筒和分支井筒中的流动规律,而在油藏尺度的油水两相流的流动规律和见水规律研究很少,且多为针对水平井的研究^[6-10]。为此,笔者运用数值模拟方法,针对底水油藏两相流,总结出多分支井开采条件以及油藏自身条件对多分支井见水时间的影响规律,以期为底水油藏的多分支井开发提供理论依据。

1 鱼骨井见水时间的影响因素

选用油藏长度、宽度和高度分别为41,41和10的网格系统,水平和垂直方向步长分别为20和10 m。数值模拟的基本参数包括:地层顶深为2 000 m,孔隙度为0.2%,平均有效厚度(H_0)为90 m,地面原油密度为0.830 7 g/cm³,地层原油粘度为1.2 mPa·s,渗透率各向同性,其值为 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原始含油饱和度为66.8%,岩石压缩系数为 $3.77 \times 10^{-7} \text{kPa}^{-1}$,原始地层压力为20 MPa。

1.1 油藏地质及生产参数

避水高度 由于底水的存在,为延缓鱼骨井的水淹时间,鱼骨井井筒以及分支与底水之间需要有一定的避水距离,即合理避水高度。模型所用井型为鱼骨状3分支水平井,主井段长度为500 m,分支井段长度为141.4 m,分支井段与主井段的夹角为45°。在产液量为100 m³/d的条件下,不同避水高度下的模拟结果显示,当无因次避水高度(避水高度与油藏厚度之比)为0.11 H_0 、0.22 H_0 、0.44 H_0 、0.67 H_0 和0.89 H_0 时,见水时间分别为3,32,130,270和380 d。说明鱼骨井的见水时间与无因次避水高度成正比。但从见水时间随无因次避水高度的变化趋势可以看出,当鱼骨井水平段逐渐靠近油藏顶部时,

见水时间的增幅也逐渐降低。另外,随着底水油藏中无因次避水高度的增加,鱼骨井受油藏底水能量的影响减弱,产能降低,因此,在底水油藏中鱼骨井避水高度存在最佳值,并非越高越好。在实际油藏中,兼顾到多分支井钻井的复杂性,建议鱼骨井避水高度为0.7~0.8 H_0 。

生产压差 分析不同生产压差下的见水时间可知:当生产压差为0.5,0.7,1.0,1.2,2.0,3.0和5.0 MPa时,见水时间分别为4 000,2 280,480,310,300,299和299 d。可见随着生产压差的增大,鱼骨井见水时间越早;且当生产压差减小到一定程度时,见水时间延长非常明显,说明较低的生产压差有利于延长见水时间,但这会导致采油速度过低,因此存在最优生产压差,需要根据油藏具体情况而定。

产液量 当产液量为100,150,200,300,400和500 m³/d时,见水时间分别为300,200,150,100,60和59 d,说明产液量越大,见水越快。王庆等研究发现,水平井见水时间与产液量呈线性变化关系^[11],而数值模拟计算结果表明鱼骨井的变化趋势并非线性关系,而是随着产液量的增大,见水时间减幅变缓。

单井控制面积 当鱼骨井单井控制面积为820 m×410 m,820 m×820 m,820 m×1 230 m,820 m×1 640 m和1 640 m×1 640 m时,见水时间分别为200,300,365,480和900 d,表明鱼骨井单井控制面积越大,见水时间越晚,且见水时间与鱼骨井单井控制面积之间基本为线性关系。

井下夹层 设计规格分别为400 m×400 m和100 m×100 m的2种夹层,其与油水界面的距离分别为0.01 H_0 、0.17 H_0 和0.33 H_0 。模拟结果表明:只要夹层位于鱼骨井的下方,就可不同程度上控制底水脊进,且夹层面积越大见水时间越晚;夹层在垂向上的位置也可以影响底水脊进,垂向上越靠近鱼骨井,见水时间越晚。

渗透率 不同垂向与水平渗透率下的数值模拟结果显示:在底水油藏中,垂向渗透率越小,则见水时间越晚,且见水时间与垂向渗透率之间的关系是非线性的,当垂向渗透率低于某临界值时,无水采油期显著增加,本油藏条件下,该值为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;随着水平渗透率的增加,见水时间延长,且与垂直渗透率的影响规律不同,两者之间基本成线性

关系。这说明底水在脊进过程中,水平渗透率的增加降低了底水在垂直方向上的流动性,水脊上升速度降低,故见水时间延长。

油水粘度比 当油水粘度比为1,5,10,20和50时,见水时间分别为2700,1690,1080,840和660d。结果说明油水粘度比越大,见水时间越早,但两者为非线性关系,当油水粘度比低于50时,随着油水粘度比的进一步减小,见水时间变长的趋势迅速增加。鱼骨井是稠油油藏开发生产的重要手段之一,由于稠油的低流动性,故须重点关注底水水侵的风险。

1.2 鱼骨井分支参数

分支长度 在主井段长度为500m、分支角度为90°的条件下,假设分支长度分别为0,50,100,150,200m,对应的无因次分支长度分别为0,0.06,0.12,0.18和0.24,模拟结果(图1)表明:鱼骨井的见水时间与无因次分支长度成正相关性,但两者为非线性关系;当无因次分支长度低于0.05时,见水时间与分支长度之间关系并不敏感,而当无因次分支长度超过0.05之后,随着分支长度的增加,见水时间明显延长。然而,增加鱼骨井分支长度会增加开采费用,而且随着鱼骨井水平井段长度的增加,井筒摩擦阻力加大,压力损耗增加,对分支末端产能产生不利影响,使得分支井产能的整体增幅减小,因此并非分支井段越长越好,优化分支长度十分必要。计算结果表明,无因次分支长度为0.05~0.20效果较为理想。

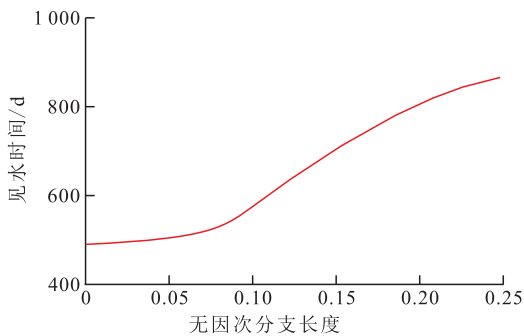


图1 鱼骨井无因次分支长度对见水时间的影响

Fig.1 Influence of dimensionless branch length on water breakthrough time for herringbone wells

分支角度 由不同分支角度下的数值模拟结果(图2)可以看出:随着鱼骨井分支角度的增大,见水时间逐渐延长;当分支角度小于30°时,随着分支角度的增大,见水时间增幅较大,而当分支角度超过30°时,见水时间增幅变缓。这是由于在分支井接近主井筒时,井间干扰严重,此时分支角度为见水时间的敏感因素,因此见水时间随分支角度的增

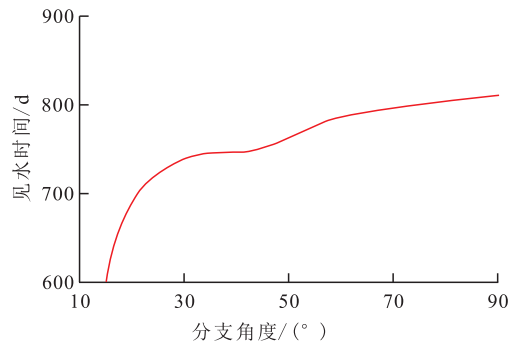


图2 鱼骨井分支角度对见水时间的影响

Fig.2 Influence of branch angle on water breakthrough time for herringbone wells

大而显著变化,同时考虑产能因素,建议分支角度为30°~45°。

分支数目 不同分支数目下的数值模拟结果(图3)表明:随着鱼骨井分支数目的增加,见水时间逐渐延长,且两者基本成线性关系。原因是定产量情况下,分支总长度增加,降低了驱使底水上升的势差,使见水时间推迟。

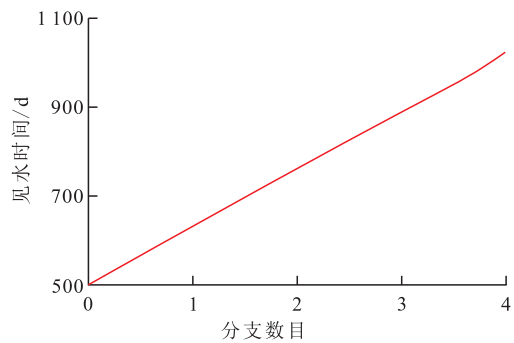


图3 鱼骨井分支数目对见水时间的影响

Fig.3 Influence of branch number on water breakthrough time for herringbone wells

1.3 鱼骨井见水位置

选取典型的底水油藏3分支鱼骨井采油模型,观察其见水位置。通过数值模拟结果可知,向上推进的水脊形状与分支形态相关,而先见水的位置为主井筒与分支段交会点。因此若要延缓水侵以及减小水侵的影响,鱼骨井主井筒与分支段的交会点是须重点关注的位置。

2 辐射式多分支井见水时间影响因素

2.1 分支参数

分支长度 选择辐射式4分支井型,井跟处在油藏中央,无因次分支长度分别为0.06,0.12,0.18,0.24和0.29,计算结果(图4)表明:分支段越长,则见水时间越晚,且见水时间与分支长度基本呈线性变

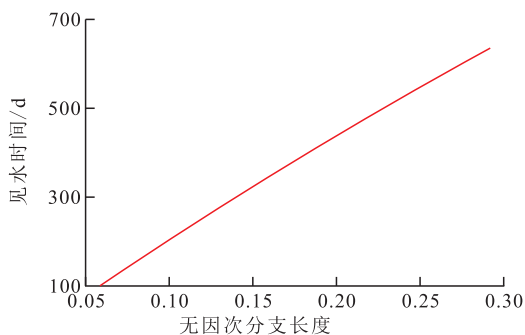


图4 辐射式分支井无因次分支长度对见水时间的影响

Fig.4 Influence of dimensionless branch length on water breakthrough time for radial horizontal lateral wells

化。然而与鱼骨井类似,增加分支长度会增加井筒摩擦阻力和压力损耗,对分支末端产能有不利影响,因此辐射式多分支井也并非分支段越长越好。

分支数目 对水平井段长度为200 m的水平井、辐射式2分支井、辐射式3分支井和辐射式4分支井4种井型进行数值模拟。计算结果(图5)显示:随着辐射式分支井分支数目的增加,见水时间明显推迟;随着分支数目的增多,见水时间增幅减小,见水时间与分支数目之间为非线性关系,这点与鱼骨井不同。

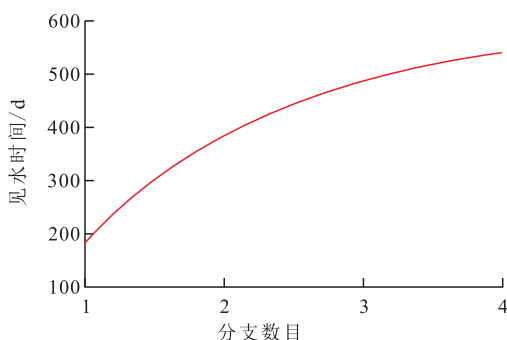


图5 辐射式分支井分支数目对见水时间的影响

Fig.5 Influence of branch number on water breakthrough time for radial horizontal lateral wells

2.2 辐射式分支井见水位置

选取辐射式4分支井进行数值模拟,油井见水时,观察见水位置分布。结果表明,井跟比井趾处见水要早,第1见水点为分支的交会点,而且是点状见水,然后迅速变为面状见水,水体呈与分支形态相关的山脊状向上推进。因此与鱼骨井不同,若要做好防止底水突进的措施,井跟处是首先需要考虑的位置。

3 结论

数值模拟结果表明,见水时间与多分支井避水高度、单井控制面积、井下夹层、油藏水平渗透率、

多分支井分支长度、多分支井角度和分支数目等参数成正相关性;而与生产压差、产液量、油藏垂向渗透率和油水粘度比等参数成负相关性。

采用多分支井开发底水油藏,各参数的选取原则,并不是见水时间越晚越好,也要考虑采油速度降低或钻井风险、采油成本的增加,因此须结合油藏实际情况进行合理设计。

针对底水油藏中鱼骨井与辐射式多分支井开发过程的水脊形态进行研究,结果表明,均质油藏中,鱼骨井在分支与主井筒交会处是底水最先突破位置,而在辐射式分支井中,井跟处为首先见水的位置。

参考文献:

- [1] 孙宝江,张振楠.南海深水钻井完井主要挑战与对策[J].石油钻探技术,2015,43(4):1-7.
Sun Baojiang, Zhang Zhennan. Challenges and countermeasures for the drilling and completion of deepwater wells in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 1-7.
- [2] 张世明,许强,周英杰,等.鱼骨状分支水平井注采井网研究[J].新疆石油地质,2009,30(1):92-95.
Zhang Shiming, Xu Qiang, Zhou Yingjie, et al. Study of injection-production well patterns for herringbone branch horizontal well [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(1): 92-95.
- [3] Retnanto A, Frick T P, Brand C W, et al. Optimal configurations of multiple-lateral horizontal wells[C]//SPE Western Regional Meeting. Anchorage: Alaska Publication, 1996.
- [4] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等.鱼骨型多分支井向井流动态关系[J].石油学报,2000,21(6):57-60.
Liu Xiangping, Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang, et al. Inflow performance relationship of a herringbone multilateral well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 57-60.
- [5] 陈元千.辐射状分支水平井产能公式研究进展[J].特种油气藏,2014,21(1):1-6.
Chen Yuanqian. Progress of research on productivity forecasting formula for radial multi-lateral horizontal wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 1-6.
- [6] 党胜国,冯鑫,闫建丽,等.夹层研究在水平井开发厚层底水油藏中的应用——以曹妃甸11-6油田 Massive 砂体为例[J].油气地质与采收率,2015,22(1):63-67.
Dang Shengguo, Feng Xin, Yan Jianli, et al. Interlayer research application in horizontal well development of thick bottom water reservoir—a case of Massive sand in Caofeidian 11-6 oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 63-67.
- [7] 宋文广,江琼琴,李疾翎,等.水平井同倾斜角度产液剖面计算模型[J].石油与天然气地质,2015,36(4):688-694.
Song Wenguang, Jiang Qiongqin, Li Jiling, et al. Equal-tilt-angle production profile calculation model of horizontal wells [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 688-694.

(下转第126页)