

# 边水油藏水平井见水规律研究

王 雨, 陈存良, 杨 明, 吴晓慧, 江 聪

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

**摘要:**水平井由于采油速度快,井控面积大而得到广泛应用,但在开采后期易发生水淹且难以治理,所以对其水窜规律的研究尤为重要。前人对底水油藏水平井的水淹规律进行了详细研究,但有关边水油藏的研究很少。采用数值模拟方法,通过水油比和水油比增量与生产时间的双对数曲线特征来识别水平井水窜类型,总结出点状局部见水、线性见水和多点见水水淹规律。实践证明,该识别方法对于油田水平井控水具有一定的指导意义。

**关键词:**水平井;水油比;水油比增量;点状局部见水;线状见水;多点见水

**中图分类号:**TE341 **文献标志码:**A

## Study on water breakthrough law of horizontal wells in edge water reservoir

WANG Yu, CHEN Cunliang, YANG Ming, WU Xiaohui, JIANG Cong

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** Horizontal wells are widely used due to their higher oil production rate and larger well control area, but it is easy to be flooded and difficult to control in the later stage of production. So, it is especially important to study the law of water channeling. The predecessors have conducted detailed studies on waterflooding law of horizontal wells in the bottom water reservoir, but there are few studies on edge water reservoirs. By the means of numerical simulation, the type of horizontal well flow is identified through the characteristics of double logarithmic curves of water-oil ratio and water-oil ratio increment with production time. On this basis, it is summarized the rules of spot-like local, linear, and multi-point water breakthroughs. Through practice, it is proved that the identification method has a certain guiding significance for the water control of horizontal wells in oilfields.

**Key words:** horizontal well; water-oil ratio; water-oil ratio increment; spot-like local water breakthrough; linear water breakthrough; multi-point water breakthrough.

水平井因为能扩大油藏渗流面积,降低井筒周围压降,延长无水采油期,增大无水采油量而广泛应用于边底水油藏<sup>[1-3]</sup>,但在开发后期水平井见水后含水快速上升<sup>[4-6]</sup>,见水规律难以把握。前人对底水油藏水平井见水规律进行了详细研究,喻高明<sup>[7]</sup>等利用数值模拟研究了影响底水油藏开发效果的因素,姜汉桥<sup>[8]</sup>等针对底水油藏水平井水淹动态及影响因素提出了相应的水淹模式,但对边水油藏水淹规律的研究却很少。为了有效控制边水油藏水平井出水,有必要对其油藏水平井见水规律进行分析,以提出相应的稳油控水对策。

## 1 油田地质及开发特征

油田为复杂断块油藏,主力含油层系为明化镇

组下段Ⅱ、Ⅲ油组。油田范围内明化镇组下段属浅水三角洲沉积,储层物性好,具有高孔、高渗储集物性特征。油藏类型为具有边水的岩性-构造和岩性油气藏。油田天然能量较弱,主要驱动类型为边水驱动复合人工水驱。

油田以水平井开发为主,生产初期产油量较高,含水较低,生产一段时间后含水呈阶梯式上升(见图1),可能因为边水中的水沿着高渗通道到

收稿日期:2019-10-15;改回日期:2020-02-11。

第一作者简介:王雨(1988—),工程师,现主要从事油气田开发研究。E-mail:wangyu67@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范(2016ZX05058001)。

达油井,使得含水急剧上升,甚至水淹。为了保证油田持续稳产,控制油井含水,减缓油井递减,需要对水平井的水窜类型进行总结,从而寻找治理油井出水的方法。

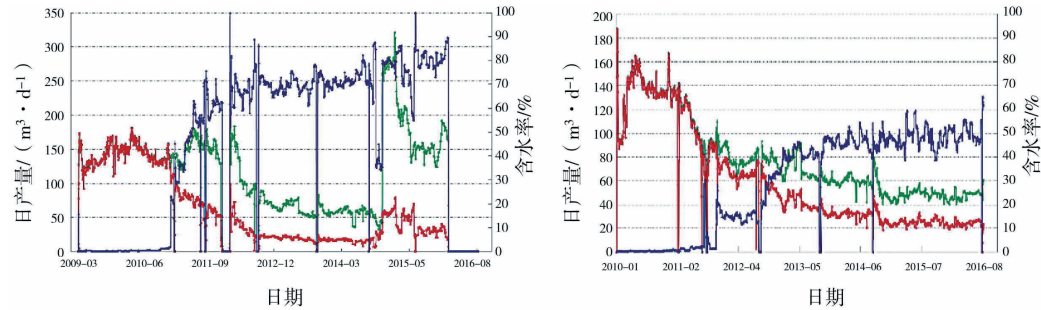


图1 油田含水率曲线

本文利用油藏数值模拟方法建立边水油藏模型,得到水平井不同水窜类型的水油比和水油比增量与生产时间的双对数曲线,利用双对数曲线的不同形态特征迅速识别水平井水窜类型。水油比 $WOR$ 和水油比增量 $WOR'$ 可由实际生产数据点,根据以下公式计算得到:

$$WOR=\frac{Q_w(t)}{Q_o(t)}\tag{1}$$

$$WOR'=\frac{WOR(t_1)-WOR(t_2)}{t_1-t_2}\tag{2}$$

2 边水驱油藏水平井水淹规律

基于油田特征,建立30×20×10的边水油藏机理模型,xy方向网格步长平均50 m,z方向网格步长平均1 m,模型基本参数和相渗曲线见表1和图2。

表1 模型参数

模型基本参数	参数值	模型基本参数	参数值
孔隙度	0.3	原始气油比/(m³·m⁻³)	52
含油饱和度	0.68	地层压实压缩系数	0.000 4
原油密度/(g·cm³)	0.875 3	地层原油体积系数	1.342
地层原油黏度/(mPa·s)	3.05	水平方向渗透率/10⁻³ μm²	800
垂直方向渗透率/10⁻³ μm²	80	水平井水平段长度/m	400
原始地层压力/MPa	14.5	水体倍数	2

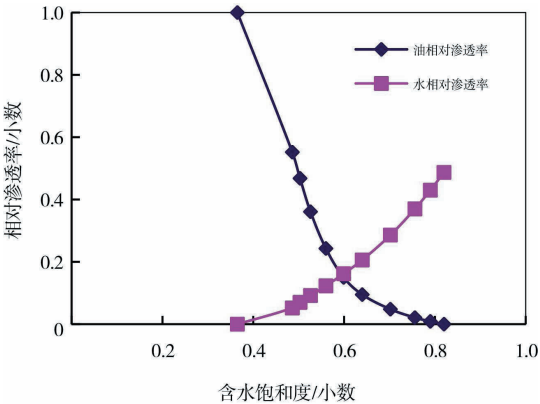


图 2 模型相渗曲线

模型设置一注一采进行研究,生产井为水平井,位于油藏上部第4层,注水井为定向井,位于油藏边水区域(见图3)。

边水驱油藏水平井水淹规律研究主要从3个方面进行:1)点状局部见水水淹规律,考虑高渗条带位于跟部和中部所有小层的影响;2)多点见水水淹规律,考虑水平井井段中存在多条高渗带;3)线状见水水淹规律,考虑水平井全井段在所有小层均位于高渗条带(见图3)。

2.1 点状局部见水水淹规律(跟部、中部见水)

边水油藏水平井点状见水规律主要研究跟部见水和中部见水两种情况,水油比及水油比导数如图4所示。从图4a可以看出,对于跟部单点见水,随着生产时间增加,水平井水油比逐渐上升,表现出一个明显的台阶,从水油比增量曲线可以看到2个峰值,第1个峰值代表水平井根部见水,第2个峰值代表全井段见水。因为高渗条带位于跟部,所以跟部的水率先突进。对于中部单点见水,随着生产时间增加,水油比表现出一个稳定的台阶,从水油比增量曲线可以看到2个峰值(见图4b),第1个峰值代表水平井中部高渗条带见水,第2个峰值代表全井段见水,第2个峰值高于第1个峰值。

本节研究为高渗条带处于不同位置时,其水油比和水油比导数所表现出的规律。由于水平段存在流动压降,水平井跟端压力变化较大,越靠近趾端,水平井压力变化越小<sup>[9]</sup>,所以水油比增量峰值从跟端到趾端逐渐减小。单点见水水油比曲线一般表现出阶梯式上涨趋势,中部单点见水的坡度小于跟部单点见水,可见跟部见水比中部见水更容易使油井水淹,当高渗条带从趾端向跟端移动时,水平井见水时间不断缩短,水油比曲线坡度也不断变小。

因此,对于单点见水油井,水沿着高渗条带窜

至油井,注采井间可能存在剩余油,水淹前期可优 先考虑机械卡堵水的治理方式。

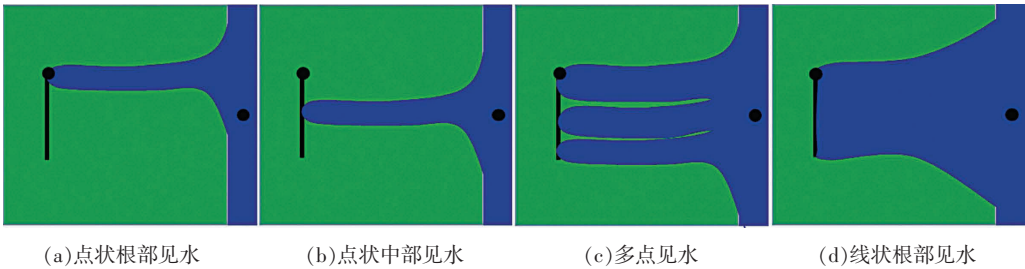


图 3 见水模式示意

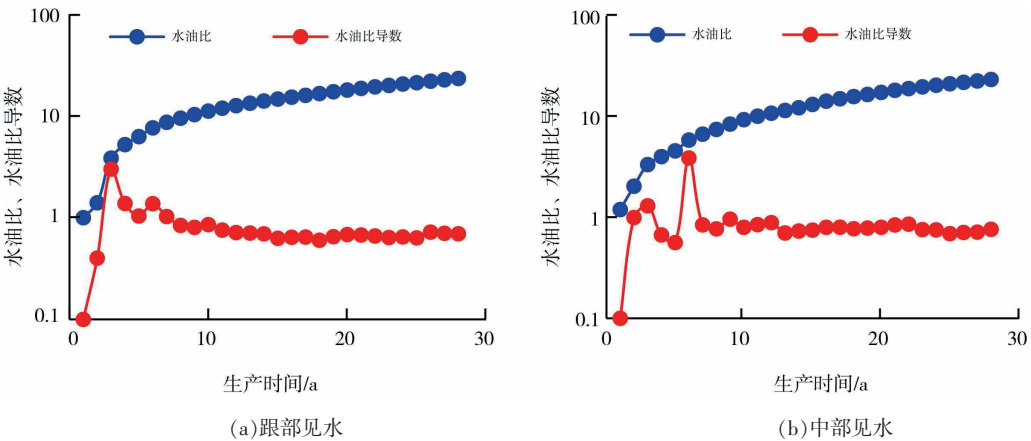


图4 点状局部见水水油比及其导数曲线

2.2 多点见水水淹规律

对于多点见水,水油比曲线会出现多个台阶,水油比增量曲线也会出现多个峰值(见图5)。主要是因为水平井段内存在多个高渗条带,而井筒内存在压降的影响,距离跟部最近的高渗条带最先见水,然后随距跟部的远近依次见水,之后为跟部及全井见水,所以水油比曲线表现出多级台阶式上涨。多点见水剩余油的分布类似单点见水,在油井高含水应考虑封堵多段。

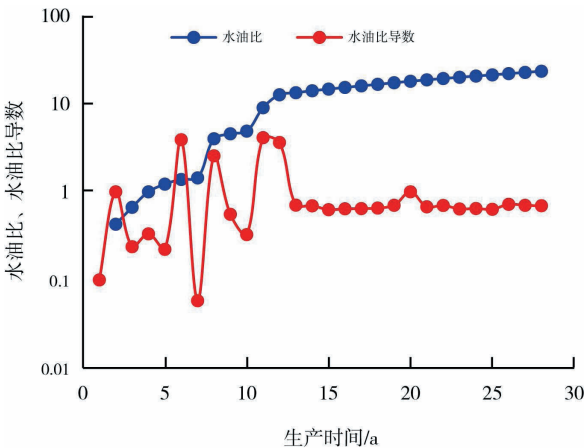


图5 多点见水水油比及其导数曲线

2.3 线状见水水淹规律

线状水侵初始线状见水水油比上升较快(见图

6),呈现出明显的台阶状,之后逐渐保持稳定,水油比增量也呈直线上升,出现峰值后逐渐下降。油井生产一段时间后,因为注入水及边水沿着高渗条带快速推进,使得油井迅速水侵,水侵后油井与注水井在平面上形成优势通道,水油比增量增加幅度逐渐变缓。线性见水剩余油一般分布在井间,可采用注水井调驱或考虑实施新井完善注采井网。

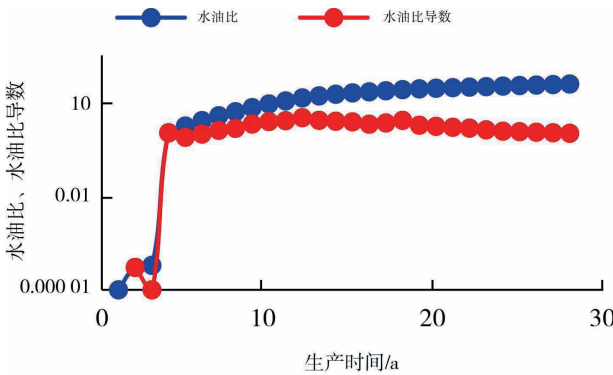


图6 线性见水水油比及其导数曲线

3 实例分析

利用研究结果,对B油田水平井见水特征进行分析,并根据见水特征制定具体的治理措施。

3.1 跟部见水井特征分析

A4H井生产B油田2-1507砂体,由于该砂体边

水能量较弱,储层较厚,A4H井无水采油期长,开采到某一阶段含水突然上升,油井水油比及水油比增量散点图出现峰值(见图7),判断油井跟部与注水井间存在高渗条带,注入水沿高渗条带突破至油井跟部,之后水油比增量曲线又出现第二个峰值,说明跟部见水后水沿着水平段移动,点状见水最终带动全井段见水。结合该井水平段测井解释认为跟部物性较好(见图8),所以判断砂体西北侧存在未波及区域,2016年7月对注水井A7井实施调驱,调驱后

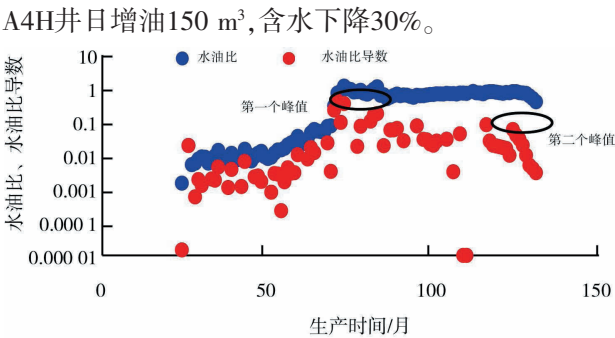


图7 A4H井水油比及水油比增量曲线

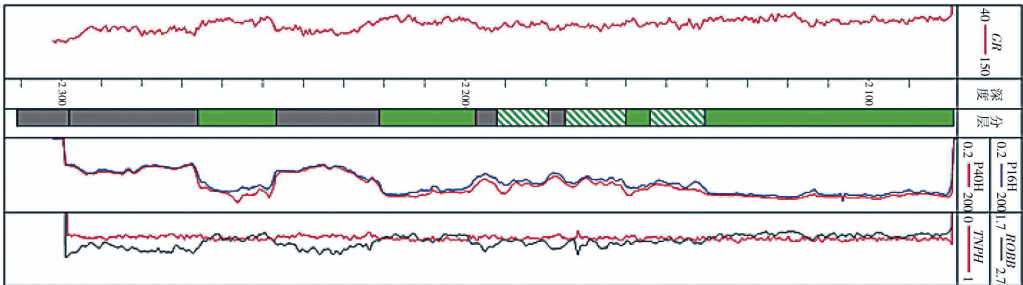


图8 A4H井水平段测井解释曲线

3.2 中部见水井特征分析

A8H井投产初期未见水,开采到某一阶段含水突然上升,同时产油量下降。化验氯根含量为522 mg/L,与地层水氯根接近,2018年再次化验氯根含量为2 296 mg/L,水类型为注入水与地层水的混合物。A8H井水油比及水油比增量散点图出现第1个峰值并且小于第2个峰值(见图9),判断油井投产早期主要受油藏边部的水体作用,水油比增量出现峰值,

之后随着边水能量的减弱水油比增量降低,当A20井注入水波及到油井后,水油比增量出现第2个峰值,说明该井全井段见水,该认识与氯根测试结果基本一致。推测砂体边部及靠近断层附近还有剩余油,为了扩大注入水波及面积,对A13井实施上返注水,并且对生产井A8H井实施大泵提液,实施后A8H井日增油50 m<sup>3</sup>。

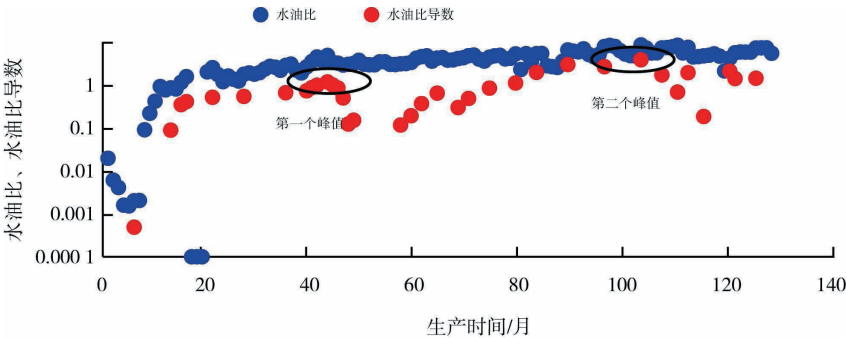


图9 A8H井水油比及水油比增量曲线

4 结论

(1)点状局部见水后水油比曲线会出现一个台阶,水油比增量曲线也会出现两个明显的峰值。对于点状跟部见水井,第1个峰值会明显高于第2个峰值;对于中部见水水平井,第1个峰值会明显低于第

2个峰值。  
(2)线状见水后水油比曲线会出现一个明显台阶,水油比增量也呈直线上升趋势,出现峰值后逐渐下降。  
(3)多点见水后水油比曲线会出现多个台阶,水油比增量曲线也会出现多个峰值。(下转第 65 页)



## 参考文献:

- [1] 邓森,贾忠伟,赵宇.垂直断层附近水平井产能的计算[J].大庆石油地质与开发,2019,38(1):100-103.
- [2] 邓森,王怒涛,饶庆锋,等.考虑摩阻损失的水平井长度优化[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):61-64.
- [3] 罗伟,林永茂,李海涛,等.非均质底水油藏水平井ICD完井优化设计[J].石油学报,2017,38(10):1200-1209.
- [4] 陈元千,郭二鹏,彭子璇,等.各向异性断块油藏水平井产能公式的推导[J].石油学报,2017,38(12):1420-1424.
- [5] 陈会娟,李明忠,狄勤丰,等.多点注汽水平井井筒出流规律数值模拟[J].石油学报,2017,38(6):696-704.
- [6] 杨正明,张仲宏,刘学伟,等.低渗/致密油藏分段压裂水平井渗流特征的物理模拟及数值模拟[J].石油学报,2014,35(1):85-92.
- [7] 陈阳,彭志刚,王绍先,等.底水油藏水平井控流完井数值模拟耦合模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):110-117.
- [8] 胡平,卞德智,范子菲,等.底水油藏水平井水淹动态的数值模拟研究[J].科学技术与工程,2017,17(31):60-65.
- [9] 唐林.底水油藏水平井产能及其合理参数研究[D].西南石油大学,2014.
- [10] 朱志强,李云鹏,葛丽珍,等.气顶底水油藏水平井垂向位置确定模型及应用[J].石油钻探技术,2016,44(5):104-108.
- [11] 汪益宁,李洪,曹淑慧,等.各向异性底水油藏长水平井产能公式[J].油气地质与采收率,2016,23(4):108-111,116.
- [12] 程晓军,易斌,邓勇,等.底水油藏水平井临界产量计算新方法[J].新疆石油地质,2011,32(1):60-62.
- [13] 郎兆新.油气地下渗流力学[M].东营:石油大学出版社,2001:10-26.
- [14] 范子菲.气顶底水油藏水平井产能公式和见水时间研究[J].中国海上油气(地质),1995,9(6):406-413.
- [15] 范子菲.底水驱动油藏水平井产能公式研究[J].石油勘探与开发,1993,20(1):71-75.
- [16] CHAPERON I. Theoretical study of coning toward horizontal and vertical wells in anisotropic formations: subcritical and critical-rates[R]. SPE 15377.
- [17] GIGER M. Analytic two-dimension models of water cresting before breakthrough for horizontal wells[J]. SPE Journal.
- [18] 陈元千.预测水锥和气锥水平井临界产量的新方法[J].中国海上油气,2010,22(1):22-26.
- [19] 袁淋,李晓平,刘盼盼.气顶底水油藏水平井临界产量计算方法[J].岩性油气藏,2015,27(1):122-126.
- [20] 刘美佳,陈存良,黄琴,等.注水开发气顶油藏水平井临界产量计算新方法[J].特种油气藏,2017,24(2):131-135.
- [21] 吕爱民.气顶油藏水平井最优垂向位置研究[J].石油钻采工艺,2007,29(1):98-99.
- [22] 王德龙,凌建军,郑双进.气顶底水油藏水平井最优垂向位置研究[J].断块油气田,2008,15(4):76-79.

(编辑 谢 葵)

(上接第 59 页)

## 参考文献:

- [1] 万仁溥.中国不同类型油藏水平井开采技术[M].北京:石油工业出版社,1997:1-57.
- [2] 王家宏.中国水平井应用实例分析[M].北京:石油工业出版社,2003:22-48.
- [3] 林毅,王铭宝,雷平.水平井在草古1潜山裂缝性稠油油藏开发中的应用[J].特种油气藏,2000,7(4):24-26.
- [4] 朱怀将,徐占东,罗健辉,等.水平井调堵技术最新进展[J].油田化学,2004,21(1):85-90.
- [5] 李宜坤,胡频,冯积累,等.水平井堵水的背景现状及发展趋势[J].石油天然气学报,2005,27(5):757-760.
- [6] 姜瑞忠,杜建辉,王海江,等.雷公油田水窜问题研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(5):46-47.
- [7] 喻高明,凌建军,蒋明煊,等.砂岩底水油藏开采机理及开发策略[J].石油学报,1997,18(2):61-65.
- [8] 姜汉桥,李俊键,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.
- [9] 曹立迎,刘慧卿,张宗元,等.边水油藏水平井见水规律及控水措施研究[J].断块油气田,2010,17(4):449.

(编辑 谢 葵)