

碳酸盐岩油藏水平井生产段水淹规律研究

蒋 珍¹ 姜汉桥² 陈民锋² 王长江² 叶双江² 郑 伟²

(1. 中国石油大港油田公司 勘探开发研究院,天津 300280;2. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学),北京 102249)

摘 要:采用水平井注水开发碳酸盐岩油藏的过程中,裂缝的存在会导致注入水突进,引起水平生产井暴性水淹。以国外 A 油田 B 区块为例,采用数值模拟方法建立了典型模型,分析了水平井注水开发碳酸盐岩油藏时不同水淹模式下的含水变化规律:若为点状见水,当裂缝位于跟部和中部时含水变化率曲线出现三个峰值,当裂缝位于趾部时含水变化率曲线出现两个明显峰值;若为多点见水,含水变化率曲线出现的峰值数和见水点数呈正相关关系,含水变化率曲线出现的峰值数为见水点数加 2,但当裂缝位于趾部时,则峰值数为见水点数加 1。结合 A 油田的生产动态资料,将利用小波除噪方法处理生产数据得到的含水变化率曲线与水淹测井解释结果进行了对比,结果表明,数值模拟结果是正确的、可靠的,可为调剖堵水目标井的筛选及水淹段数的判别提供依据。

关键词:碳酸盐岩油气藏;水平井;注水;水淹;裂缝;数值模拟

中图分类号:TE344 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)02-0100-04

Water Flooding Mechanism Study on Horizontal Well in Carbonate Reservoir

Jiang Zhen¹ Jiang Hanqiao² Chen Minfeng² Wang Changjiang² Ye Shuangjiang² Zheng Wei²

(1. Exploration and Development Research Institute, Dagang Oilfield, CNPC, Tianjin, 300280, China; 2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum), Beijing, 102249, China)

Abstract: When carbonate reservoir is developed with horizontal wells, fractures will lead to water breakthrough and cause severe waterflooding. Using a foreign oilfield A as an example, the variation of horizontal well's water cut in different waterflooding patterns was studied using numerical simulations; in single point water breakthrough pattern, three peak values appear in water cut curve when fracture is in heel or central part of horizontal production well. Two peak values appear in the water cut curve when fracture is in toe of horizontal production well. In multi-point water breakthrough pattern, the peak value appearing in water cut curve is proportional to the number of waterflooded well segments. The peak number equals to waterflooded well segments plus 2. When fracture is located in the toe of horizontal production well, the peak number equals waterflooded well segments plus 1. With the production data of oilfield A, well log interpretation result is compared with water cut curves. The reasonable numerical simulation results provide a basis for selection of profile control, plugging well and the determination of waterflooded horizontal well segments.

Key words: carbonate reservoir; horizontal well; water injection; waterflooding; fracture; numerical simulation

水平井因其具有泄油面积大、相同液量下压差远小于直井、能有效延缓水锥和气锥、能提高采油速度和采收率等优点而被广泛应用^[1]。采用水平井开发碳酸盐岩油藏时,裂缝作为渗流通道与井连通,改善了储层的渗流能力,但裂缝的存在又会导致注入水突进,引起水平生产段暴性水淹,大大影响水平井的开发效果^[2]。因此,在分析不同水淹模式下的含

水变化规律的基础上,结合油田实际生产动态资料

收稿日期:2010-01-27;**改回日期:**2011-01-14

作者简介:蒋珍(1985—),女,安徽池州人,2007年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,2010年获中国石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位,助理工程师,主要从事油气田开发理论与系统工程方面的研究工作。

联系方式:(022)63962276,jiangzhen0566@163.com

判别油井的水淹模式,对开发后期调堵目标井的筛选及其开发效果的改善具有重要意义。笔者以国外 A 油田 B 区块为研究对象,采用数值模拟方法建立典型模型对水平井生产段水淹规律进行了分析,并结合该油田油井生产动态资料,筛选了调堵目标井并判别了水淹段数。

1 模型的建立

B 区块是国外 A 油田投产最早的主力区块,根据该区块物性,采用数值模拟方法建立了典型模型。B 区块的物性参数为:油层深度 1 621 m,油层厚度 25 m,地层压力 11.7 MPa,平均孔隙度 0.23,平均含油饱和度 0.76,地层原油黏度 1.37 mPa·s,岩石压缩系数 $3.45 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,平均渗透率 $12.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

该模型 x 方向网格数为 100,网格步长为 50 m,总长 5 000 m; y 方向网格数为 80,网格步长为 25 m,总长 2 000 m; z 方向划分为 7 个模拟小层,各层厚度根据 B 区块实际数据统计所得。

A 油田 B 区块储层为反韵律储层,主要采用以水平井平行正对下注上采的模式开发,因此水平生产井布置在模型上部第 2 层,水平注水井为中下部第 6 层,平面井距 175 m,生产井和注水井跟趾相对。油藏边部或底部没有解析水体。

2 水淹规律的分析

A 油田属高孔低渗碳酸盐岩油藏,开发初期地层能量亏空严重,后采用水平井注采模式进行开发,取得了较好的开发效果。随着注水开发的进行,部分井含水上升快,局部发生了水窜。前人根据水平井水淹动态差异影响因素和数值模拟结果,提出了底水油藏水平井的 3 种水淹模式,即线状见水整体水淹、点状见水整体水淹和点状见水局部水淹^[3]。A 油田采用的水平井下注上采开发模式和采用水平井开发底水油藏的模式具有相似性,同时又因为裂缝是导致碳酸盐岩油藏水平井开发水淹的主要因素,因此笔者对单点见水和多点见水两种水淹模式进行分析,并就水平井跟部、中部及趾部不同位置见水的情况分别进行探讨。

为了分析裂缝对油井水淹的影响规律,在上述模型里布置高渗条带来模拟裂缝。ECLIPSE 100 软件采用了多段井模块,该模块考虑了水平井筒内

部降压^[4],还可以输出水平井各射开井段的压力、产水量和产油量,有利于辨别水平井注入水突进和水淹的部位。

2.1 单点见水水淹规律分析

水平生产井单点见水主要有生产井跟部突进、中部突进和趾部突进 3 种情况,即裂缝位于生产井跟部、中部和趾部。油井见水必然导致其含水的突变,因此选取油井含水变化率作为研究对象。水平生产井含水变化率曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出:对于跟部和中部单点见水,可以看到三个峰值;而对于趾部单点见水,含水变化率曲线则出现两个明显峰值。

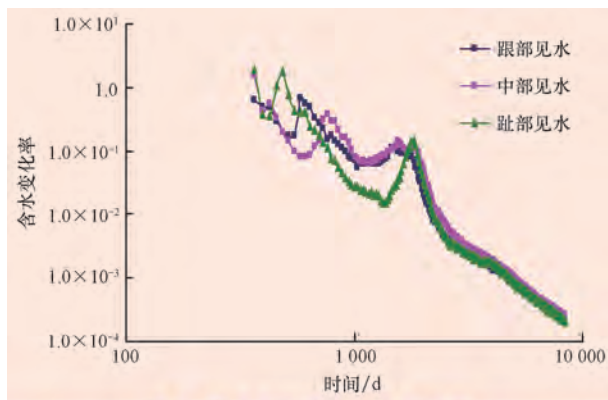


图1 单点见水含水变化率曲线
Fig.1 Water cut change rate in single point breakthrough pattern

图 2~4 分别为水平井跟部、中部和趾部见水后的水平井段含水分布曲线。从图 2~4 可以看出产生峰值的原因(图中峰值 n 代表图 1 中含水变化率曲线第 n 个峰值出现时对应的水平井段产水率的分布曲线):对于跟部突进和中部突进的情况,第一个峰值代表水平井裂缝首先见水;第二个峰值是由于

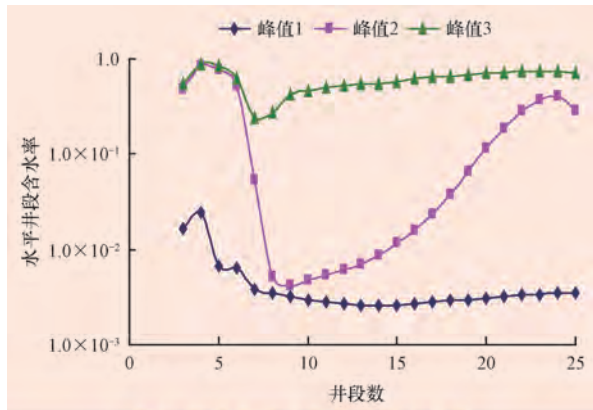


图2 跟部突进水平井段产水分布
Fig.2 Water cut in horizontal well segments in heel-breakthrough pattern

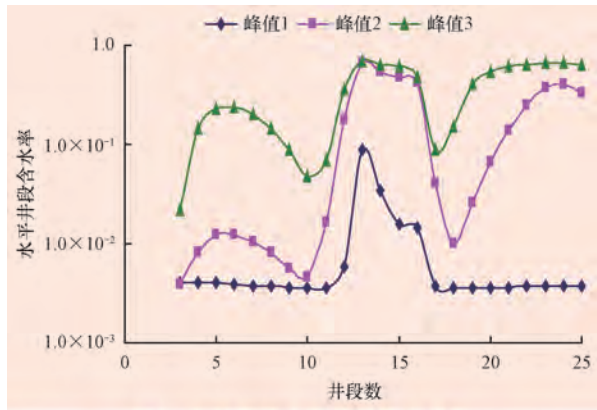


图3 中部突进水平井段产水分布
Fig.3 Water cut in horizontal well segments in middle-breakthrough pattern

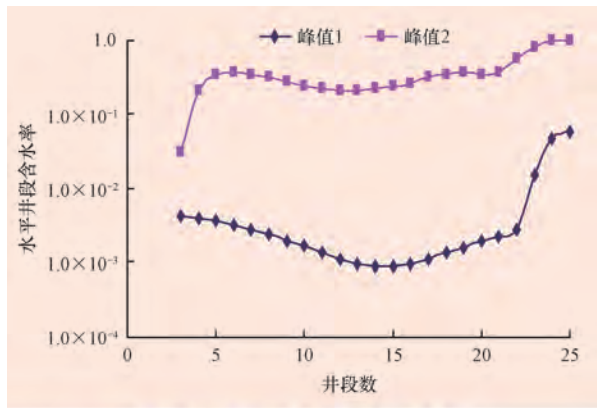


图4 趾部突进水平井段产水分布
Fig.4 Water cut in horizontal well segments in toe-breakthrough pattern

水平井筒压降引起的生产井趾部和注水井跟部注采压差较大导致的趾部见水;第三个峰值代表全井见水;对于趾部突进的情况存在两个峰值,第一个峰值代表趾部裂缝首先见水,第二个峰值则表示水平井段全部见水。

2.2 多点见水水淹规律分析

水平生产井多点见水主要有跟部+中部、中部+趾部、跟部+趾部、中部两点和三点见水 5 种情况,5 种见水情况的水平井含水变化率曲线如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 可以看出:当跟部+趾部、中部+趾部见水时,含水变化率曲线出现了 3 个峰值;当跟部+中部和中部两点见水时,出现了 4 个峰值;中部三点突进时,出现 5 个峰值。

同理,由于裂缝和水平段注采压差的影响,在跟部+中部、中部两点和三点突进时,首先是各个位置的裂缝见水,之后趾部见水,最后为全井见水;而跟部+趾部或者中部+趾部突进时,首先是趾部裂缝见水,然后是跟部或者中部裂缝见水,最后是全井见水。

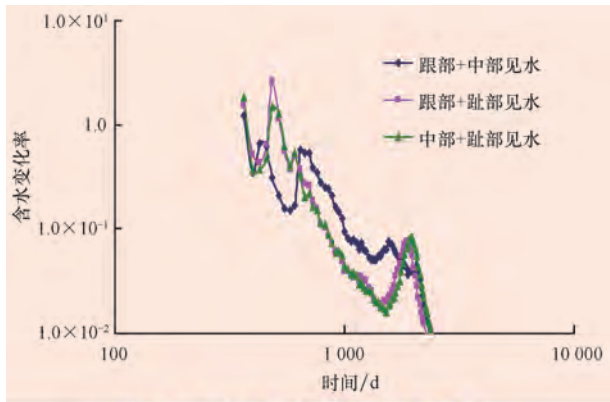


图5 多点突进含水变化率曲线
Fig.5 Water cut change rate in multi-point water breakthrough pattern

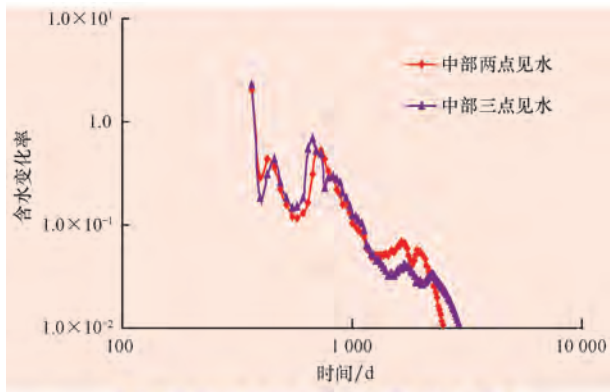


图6 中部多点突进含水变化率曲线
Fig.6 Water cut change rate in middle multi-point water breakthrough pattern

对于多点见水,含水变化率曲线出现的峰值数和见水点数呈正相关关系。峰值数为高渗条带数加 2,此规律排除裂缝位于水平井趾部的情况,若裂缝位于水平井趾部,则峰值数为高渗条带数加 1。

综合单点见水和多点见水分析结果可得,油井水平井段见水导致其含水变化率曲线出现峰值,并且峰值数和水淹井段数呈正相关关系。

3 应用实例

在 A 油田 B 区块若干井采集了水淹层测井资料,笔者以其中的 DL-70H 井为例进行分析,该井位于 B 区块的东南靠近中部区域,水平段长 1 120 m。对应的注水井为 2004 年 2 月投注的 DL-61H 井和 2006 年 8 月投注的 DL-113H 井,如图 7 所示。DL-70H 井多段水淹时,水淹段衰减和相移电阻率明显降低,且不同部位降低的程度不同。水淹层测井解释资料如图 8 所示。

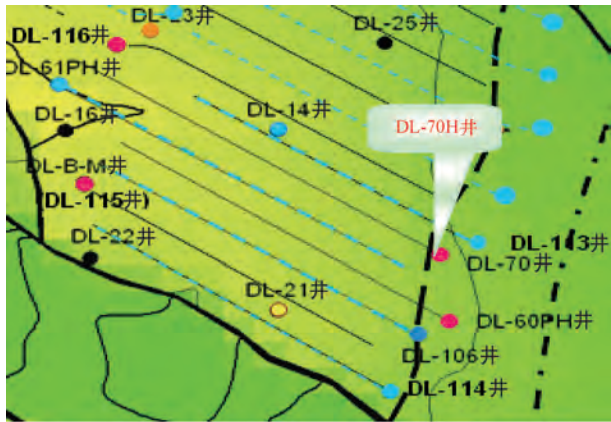


图7 DL-70H 井的井位图
Fig.7 Well DL-70H location

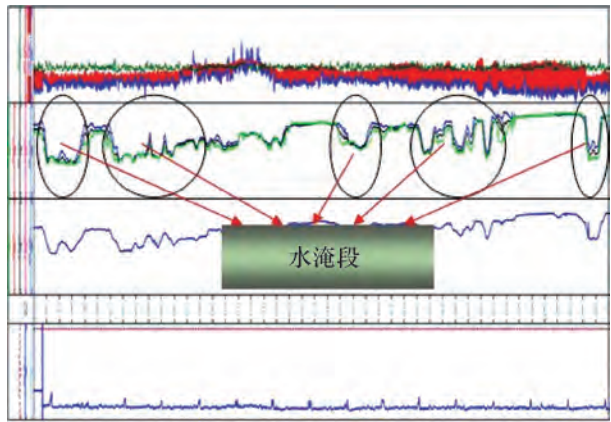


图8 DL-70H 井水淹层测井解释结果
Fig.8 Well log interpretation result of waterflooded layer of Well DL-70H

根据 DL-70H 井实际生产资料,做出含水变化率曲线。由于实际生产数据受到多种复杂因素影响,因此要对实际含水率数据进行小波除噪^[5],然后做出含水变化率曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,含水变化率曲线有 5 个峰值,说明 DL-70H 井存在 5 个水淹段,这与水淹层测井解释结果相符。A

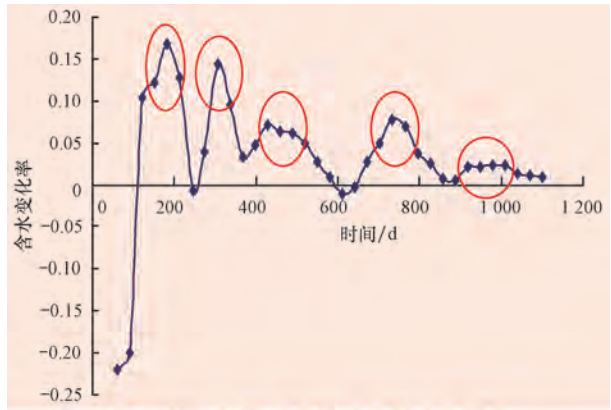


图9 除噪后DL-70H井含水变化率曲线
Fig.9 Water cut change rate of Well DL-70H after denoising

油田其他水淹层测试井的含水变化率曲线峰值数和测井资料显示的水淹段数也是一致的。这一结果证明,由数值模拟结果所得的结论具有一定的合理性,据此即可由油井生产数据判断其水淹段数,为调堵目标井的筛选提供依据。

4 结 论

- 1) 考虑裂缝和水平井筒压降,分别模拟了水平井注水开发碳酸盐岩油藏时水平井段单点见水和多点见水两种情况。当油井水平井段见水时,其含水变化率曲线出现峰值,并且峰值数和水淹井段数呈正相关关系。
- 2) 水平井注水开发碳酸盐岩油藏点状见水时,当裂缝位于跟部和中部,含水变化率曲线出现三个峰值,分别是由裂缝、趾部和全井见水引起油井含水突变形成的;当裂缝位于趾部,含水变化率曲线则出现两个明显的峰值,是由趾部裂缝和全井见水造成的。
- 3) 水平井注水开采碳酸盐岩油藏多点见水时,含水变化率曲线出现的峰值数为见水点数加 2,此规律排除裂缝位于水平井趾部的情况,若裂缝位于水平井趾部,则峰值数为见水点数加 1。
- 4) A 油田水淹层测试井的含水变化率曲线峰值数和测井资料显示的水淹段数一致。这一结果证明,由数值模拟结果所得的结论具有一定的合理性,因此,根据油井生产动态数据可判断其水淹段数,为调堵目标井的筛选提供依据。

参 考 文 献

[1] 万仁溥. 水平井开采技术[M]. 北京:石油工业出版社,1995:1-5.
Wan Renpu. Exploiting technique of horizontal well[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1995:1-5.

[2] 柏松章. 碳酸盐岩潜山油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1996:2-8.
Bai Songzhang. Development of carbonate buried hill reservoir [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1996:2-8.

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

[4] Dikken B J. Pressure drop in horizontal well and its effect on production performance[J]. JPT,1990,42(11):1426-1433.

[5] 谢建林,杜鹃,袁小平,等. 基于 MATLAB 的小波去噪方法研究[J]. 能源技术与管理,2005(2):71-72.
Xie Jianlin, Du Juan, Yuan Xiaoping, et al. Study of wavelet denosing method based on MATLAB environment[J]. Energy Technology and Management,2005(2):71-72.