

Ahdeb 油田水平井控水完井及一体化耦合模型

薛衡^{1,2,3}, 黄祖熹¹, 王贺华^{1,3}, 安永生⁴, 刘樞^{1,3}, 成一^{1,3}, 何冰¹, 刘卡⁵

[1. 振华石油控股有限公司, 北京 100031; 2. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 3. 成都北方石油勘探开发技术有限公司, 四川 成都 610000; 4. 中国石油大学(北京) 石油工程教育部重点实验室, 北京, 102249; 5. 中国石化 中原石油工程有限公司 佛山三水分公司, 广东 佛山 528000]

摘要: Ahdeb 油田上部主力层系采用水平井注采井网开发, 前期取得了较好开发效果, 但开发过程中部分井组稳产与高含水矛盾日益突出, 亟需开展水平井调流控水研究。针对 Ahdeb 油田这类边水或注入水在高渗层或断层裂缝带突窜引起的水平井见水, 基于不同钻遇储层特征, 形成了水平井控水完井分类治理方案, 并建立了一套同时适用于盲筛分段组合、中心管和 ICD 控水完井工艺的井筒-油藏一体化耦合数值模型。该模型重点考虑了水平井筒受多种作用力下的变质量流动过程, 提高了单井的模拟和实际含水率匹配度。研究表明: 对于根部见水的水平井, ICD 完井及中心管完井均有较好控水效果, 含水率从 49.8% 分别下降至 37.8% 和 35.0%。完井控水装置的限流范围应略大于出水井段, 才能有效控制含水率。调流控水装置下入时机应选择在水平井见水前, 能够最大程度降低整个生产过程中的含水率, 从而提高单井累产油量。

关键词: 调流控水; 控水完井; 数值模拟; 水平井; 碳酸盐岩; 非均质储层; Ahdeb 油田

中图分类号: TE355.6 **文献标识码:** A

Water control completion of horizontal wells in Ahdeb oilfield and an integrated coupling model

Xue Heng^{1,2,3}, Huang Zuxi¹, Wang Hehua^{1,3}, An Yongsheng⁴, Liu Fei^{1,3}, Cheng Yi^{1,3}, He Bing¹, Liu Ka⁵

[1. China Zhenhua Oil Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Chengdu North Petroleum Exploration and Development Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China; 4. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 5. Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Foshan, Guangdong 528000, China]

Abstract: The major beds in upper Ahdeb oilfield are developed with success through an early stage horizontal well flooding-production method. However in the current stage, the observed high water cut in many producers has affected the stable production seriously. Therefore, it is urgent to study the water control of horizontal wells. In observing that the horizontal well water breakthrough is caused by active edge or injected water in high-permeability layers or fault fissures, we set up a series of completion schemes to achieve water control of horizontal wells based on an integrated analysis of encountered reservoirs in drilling, and a newly established numerical model of integrated wellbore-reservoir coupling suitable for simulating screen, central tube, and ICD water control completion. In the modeling, the variable mass flows in horizontal wellbores under multiple forces have been considered to increase the match between the single-well simulation results and the real water cut performance. The results show that the ICD and central tube completion measures are more effective in water control when the water breaks through in the heel section, with the water cut decreasing from 49.8% to 37.8% and 35.0% respectively. In order to achieve efficient water control, the flow-limiting range of the water control completion devices should be slightly longer than that of water breakthrough section. The application of water control devices before water breakthrough of horizontal wells will lower the cumulative water cut during the whole production life to the maximal degree, and in turn this will increase the cumulative production for single wells.

收稿日期: 2018-02-09; 修订日期: 2018-12-03。

第一作者简介: 薛衡(1988—), 男, 博士, 采油工程技术。E-mail: xueheng@zhenhuaoil.com。

基金项目: 四川省国际科技合作与交流研发项目(2017HH0014); 博士后基金项目(2018M633404)。

Key words: water control, water control completion, numerical modeling, horizontal well, carbonate rock, heterogeneous reservoir, Ahdeb oilfield

与直井相比,水平井具有与地层接触面积大、产量高、无水采油期时间长等优点,所以水平井已大量应用在各种油气藏。但水平井的开发同样遇到许多问题,最严重的就是边底水或注入水的突破,从而导致油井含水迅速上升,产量急剧下降,甚至造成暴性水淹^[1]。Ahdeb 油田上部主力层系全部采用水平井排状开发的注采模式,取得了较好的开发效果,但开发过程中部分井组产量递减快、含水上升快已成为影响水平井稳产的关键因素,亟需开展水平井调流控水研究。

国内外针对水平井的调流控水完井方式及完井工艺开展了大量研究,并从最初的常规分段完井、恒流控水防砂筛管半智能完井发展到了智能完井,并在现场成功进行了大量试验,取得了明显效果^[2]。同时还发展了一些特殊的控水完井方法,比如 DWS 双管完井方法、化学堵水技术和智能完井系统^[3-5]。在水平井见水机理及调流控水效果预测方面,国内外同样开展了大量研究工作。其中,基于分段完井建立的解析模型被广泛用来分析水平井生产过程中的油水界面分布及油藏瞬时压力分布。但是,所有解析模型中均未考虑沿程流体流入对井筒内压降影响,从而未实现油藏渗流与井筒管流的耦合^[6-7]。为了解决以上问题,基于井筒模拟和油藏模拟的耦合数值方法相继被提出^[8-9]。目前绝大部分数值模拟均是基于底水油藏开展的研究,针对伊拉克 Ahdeb 油田这类边水及注入水导致的水体突破问题报道较少。针对不同水平井控水完井工艺下的控水效果预测还有待进一步加强。因此,本文重点结合 Ahdeb 油田的地质、油藏、动态及钻完井资料,分析其水平井见水机理,同时根据不同的钻遇储层特征优选老井及新井完井工艺,建立与之对应的井筒-油藏耦合数学模型,最终针对单井控水完井参数进行优化研究。

1 水平井见水机理

Ahdeb 油田采用下注上采的水平井网开发,全直径岩心分析及试井解释结果均表明,上部层系纵向连通性较好,其中纵向渗透率与横向渗透率之比(K_v/K_h)平均值达 0.584。纵向连通性越好,下部注入水在纵向上的流动速度会越快^[10]。其次,油田全区发育高渗层,该层渗透率与上部层系最小渗透率薄层之间的

极差达 32 倍,根据最小渗流阻力原理^[11],下部注入水会向上流动并沟通高渗层;当注入水到达高渗层后,快速在高渗层中形成窜流通道,导致含水开始上升^[12]。根据钻井轨迹统计分析,绝大部分生产井穿过高渗层,加之生产井主要采用裸眼及筛管完井,不具备调流控水能力,致使注入水沿高渗层突窜后直接进入水平井段,导致局部井段提前见水,Ahdeb 油田水平井见水机理如图 1 所示。因此有必要针对该油田上部层系的老井二次完井及新钻水平井完井调流控水开展完井工艺优选及工艺参数优化研究。

2 水平井控水完井工艺优选

2.1 水平井见水特征

分析表明,上部层系含水率 $\geq 50\%$ 的生产井中,不同程度穿过高渗层的井占 88%,7%的生产井轨迹靠近高渗层,同时 5%的生产井钻遇断层裂缝带。根据这些井的钻遇储层特征和生产动态特征,将水平井分为 3 类:单点穿高渗层、多点穿高渗层和钻遇断层裂缝带的水平井。对于单点穿高渗层生产井,总体上含水上升较慢,含水上升率较小(图 2a);对于多点穿高渗层生产井,含水变化曲线波动较大,含水上升速度快(图 2b);而对于钻遇断层裂缝带的高含水井,该类井投产即见水或油井见水后,含水快速上升(图 2c)。因此,根据高含水水平井的不同储层钻遇特征,需要实施调流控水分类治理。

2.2 水平井控水完井工艺的优选

水平井控水完井的基本思路是调整流入剖面 and 分段控制,改善水平井的水淹模式。目前国内外主要的控水方法可以大致分为以下几类:常规完井控水、半智能 ICD 分段完井控水、半智能 AICD 分段完井控水、智

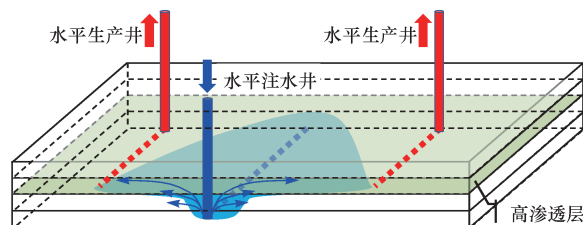


图 1 Ahdeb 油田上部层系水平井见水机理示意图

Fig. 1 The water breakthrough mechanism of horizontal wells in upper beds of Ahdeb oilfield

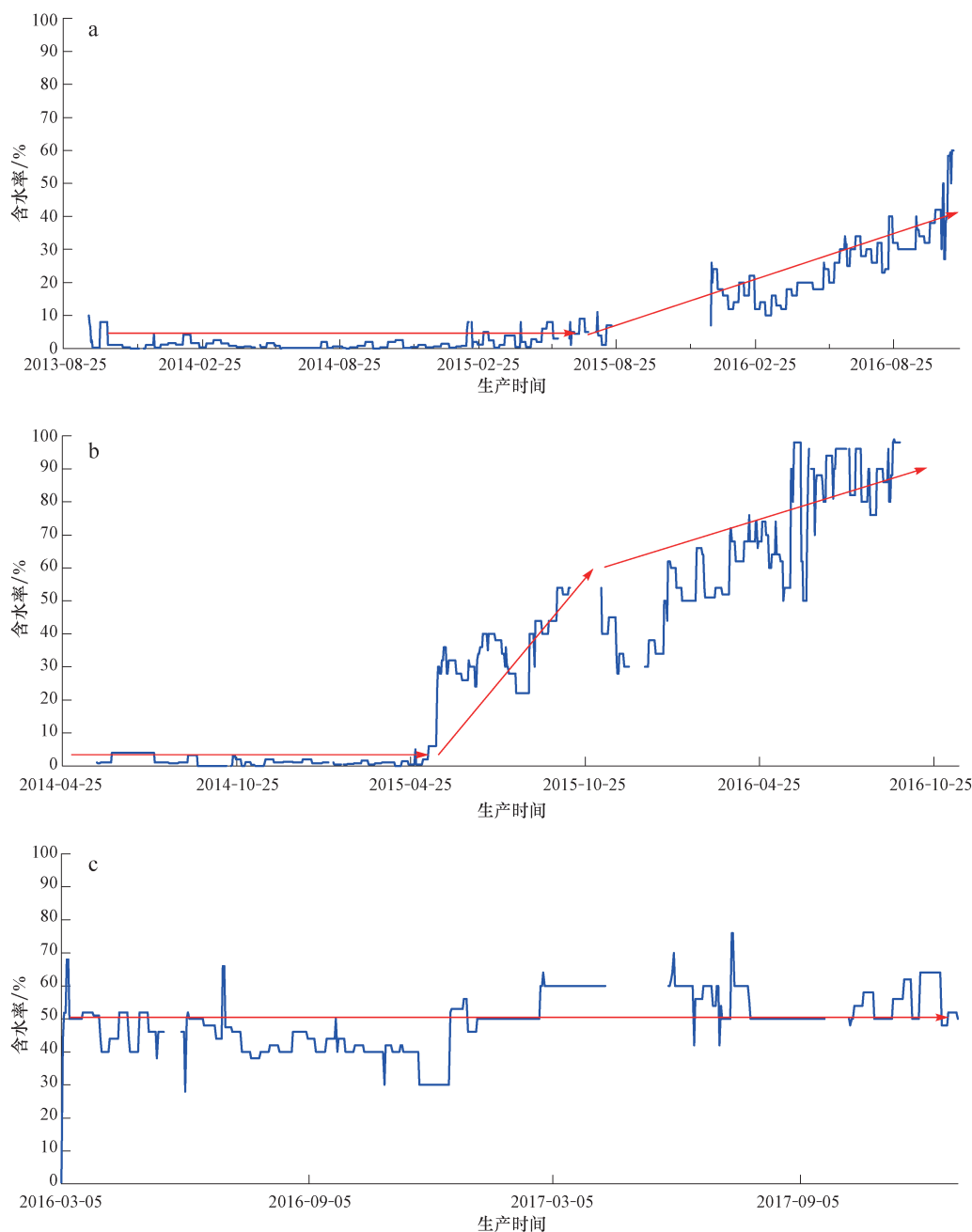


图2 Ahdeb 油田不同钻遇储层特征下的油井见水特征

fig. 2 Water breakthrough characteristics of oil producers with various reservoir characters in Ahdeb oilfield

a. 单点穿高渗层典型井含水率曲线; b. 多点穿高渗层典型井含水率曲线; c. 钻遇断层裂缝带典型井含水率曲线

能完井控水、双管完井控水和特殊控水法^[1-2,4,13]。根据综合分析对比,结合目前国内外成熟的控水技术,推荐目标油田采用盲筛管+ECP分段完井、中心管完井及ICD完井控水技术。其中,盲筛管+ECP分段完井的控水原理是在分段完井的基础上,通过改变水平井各段的完井参数,达到控制水平井产液剖面、延缓水锥、提高油藏采收率的目的。但是常规打孔或割缝筛管的节流压差调节能力较小(约为kPa级),因此可与盲管配合下入,达到有效封隔断层裂缝带(出水层段),并且一定程度上均衡水平井产液剖面的目的。中

心管完井的控水原理是在水平段悬挂小直径油管,通过改变水平井跟端的液体流向,增加液体环空流动摩擦阻,从而改善水平井流入剖面,均衡水平井跟端-趾端的生产压差;该工艺技术压差调节能力最高可达MPa级,实施成本相对低,适用于根部出水或均质油藏控水。ICD完井的控水原理是根据油藏渗透率变化特征,在不同水平井段分别下入ICD流入控制装置,通过增大流体摩擦阻力或者引入一个额外的限流压力降(可达MPa级)来平衡油藏与井筒之间的压力不均匀性,实现各井段均衡流量的控制。综合考虑以上3种

表1 水平井控水完井分类治理方案
Table 1 Categorized treatment scheme for water control completion of horizontal wells

类型	钻遇储层特征	完井方式	控水工艺
老井	轨迹跟部穿过或靠近高渗层	裸眼	中心管
	轨迹多点穿过高渗层,或储层非均质性较强	筛管	ICD 完井
	钻遇裂缝带的高含水井	筛管 + ECP	盲管 + ECP
新井	储层非均质性较强或靠近边底水	ICD 或变密度筛管 + ECP 分段完井	
	断层裂缝带导致见水	盲管 + ECP 分段完井	

完井方式的技术原理,基于不同的储层钻遇特征及生产类型,形成了 Ahdeb 油田水平井完井控水分类治理方案,如表1所示。

3 水平井控水完井耦合数学模型建立

3.1 3种完井方式下的流动过程假设

基于前面推荐的3种完井工艺技术,建立了与之对应的物理模型。不同完井方式在水平井控水限流过程中所涉及的流动过程如图3所示。在筛管完井条件下,流体在筛管与井眼环空的流动所产生的压降被视为当量直径的水平管流所产生的压降^[14],因此与裸眼条件下的计算方法一致。最终,盲筛管 + ECP 分段完井及中心管完井可以简化为油藏流动及井筒流动的两重流动过程,而 ICD 完井主要是在以上两种流动过程中,额外引入一个过 ICD 的流动过程。

3.2 油藏流动模型

假设油藏为边水油藏边界(由于注入水上窜至高渗层,从而流入水平井,因此同样考虑为边水),油藏为油水两相渗流,不存在自由气体,整个流动过程为等温过程;考虑重力和毛管压力影响,地层岩石及流体微可压缩^[15]。

通过对油水两相流^[16]在三维笛卡尔坐标系中的展开,可以得到油相及水相方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\Phi_r S_{rw}}{B_{rw}} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{rw} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{rw} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{rw} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - Q_{rfw} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\Phi_r S_{ro}}{B_{ro}} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{ro} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{ro} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{ro} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - Q_{rfo} \quad (2)$$

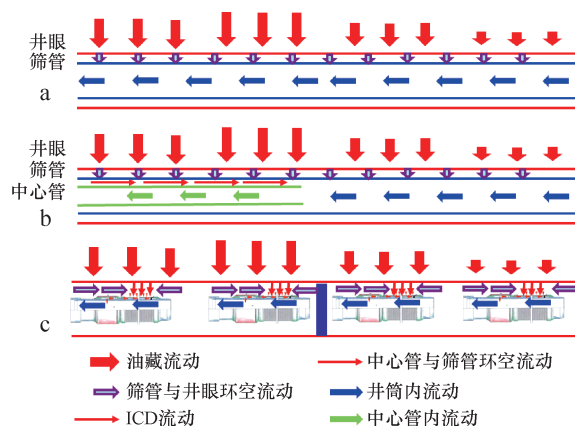


图3 3种完井方式下的流动过程

Fig. 3 Comparison of flow process for the three completion patterns

a. 盲筛管 + ECP 分段完井技术; b. 中心管完井技术; c. ICD 完井技术

式中: Φ_r 为油藏孔隙度, %; B_{ro} 和 B_{rw} 分别为油藏中水相、油相体积系数, 无因次; S_{rw} 和 S_{ro} 分别为油藏中水相、油相饱和度, %; p_{rw} 和 p_{ro} 分别为油藏内水相和油相的压力, MPa; x, y 和 z 分别为三维空间位置坐标; Q_{rfw} 和 Q_{rfo} 分别为单位时间从油藏流出到井筒的水相、油相体积流量, m^3/s ; T_{rw} 和 T_{ro} 分别为油藏内水相和油相在单位压差下从油藏网格 i 流动到相邻油藏网格 j 的体积流量, $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{MPa}$ 。

其中, 源汇项 Q_{rfw} 和 Q_{rfo} 根据达西定律有:

$$Q_{rfw} = \lambda_w I_w (p_i - p_{wf}) \quad (3)$$

$$Q_{rfo} = \lambda_o I_w (p_i - p_{wf}) \quad (4)$$

式中: λ_w 和 λ_o 分别是水相和油相的流量, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; I_w 为井指数, m^3 ; p_i 为 i 网格压, MPa; p_{wf} 为水平井筒中压力, MPa。

其中, 水相和油相的流量函数分别为:

$$\lambda_w = \frac{K_{rw}}{\mu_{rw} B_{rw}} \quad (5)$$

$$\lambda_o = \frac{K_{ro}}{\mu_{ro} B_{ro}} \quad (6)$$

式中: K_{rw} 和 K_{ro} 分别为水相和油相的相对渗透率, 无因次; μ_{rw} 和 μ_{ro} 分别为油藏水相、油相粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B_{rw} 和 B_{ro} 分别为油藏水相、油相体积系数, 无因次。

其次, 水相和油相在单位压差下的体积流量分别为:

$$T_{rw} = \frac{A_r}{L_r} \frac{2K_{ri} K_{rj}}{K_{ri} + K_{rj}} \lambda_w \quad (7)$$

$$T_{ro} = \frac{A_r}{L_r} \frac{2K_{ri} K_{rj}}{K_{ri} + K_{rj}} \lambda_o \quad (8)$$

式中: A_r 为油藏网格 i 与相邻网格 j 交界面的面积,

m^2 ; L_r 为油藏网格 i 与相邻油藏网格 j 之间的长度, m ;
 K_{ri} 和 K_{rj} 分别为油藏网格 i 和 j 的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ 。

3.3 水平井筒变质量流动模型

流体在井筒中流动时,一方面流体从水平井趾部不断向根部流动,另一方面油藏中的流体又不断向井筒中汇集,如图4所示。

由于相比于常规直井而言,水平井段较长,流体从井趾流到井跟的过程中受到摩擦压降和加速度压降影响,会对水平井的产能产生较大的影响。忽略重力压降,因此井筒压力与长度的关系可以表达为:

$$p_{wf(i+1,t)} - p_{wf(i,t)} = \left[\frac{f \rho \Delta x [Q_{wf}(i,t)]^2}{4 \pi^2 r_w^5} + \frac{\rho [Q_{wf}(i+1,t) - Q_{wf}(i,t)]^2}{2 \pi^2 r_w^4} \right] \quad (9)$$

其中,等式右边第一项为摩擦阻力压降,第二项为加速度压降。式中: f 为流体在井筒内的摩擦系数,无因次; Δx 为井筒网格 i 和网格 $i+1$ 之间的距离, m ; ρ 为井筒内流体密度, kg/m^3 ; r_w 为井筒半径, m ; $Q_{wf}(i,t)$ 为 t 时刻井筒网格 i 处的体积流量, m^3/s 。

考虑井筒内液体的变质量流动,建立油藏与井筒间的耦合关系式:

$$Q_w(i + \frac{1}{2}, t) - Q_w(i - \frac{1}{2}, t) = Q_{rfw}(i, t) + Q_{rfo}(i, t) \quad (10)$$

3.4 水平井控水完井模型耦合求解

公式(1),(2),(9)和(10)构成了不同水平井控水完井方式下的综合控制方程。但是,这里需要求解的未知数有6个:油相压力、水相压力、油相饱和度、水相饱和度、井筒压力及井筒流量(ICD完井方式下,可以根据不同ICD类型引入不同的压降模型,因此其未知数仍然为6个。不同ICD类型对于压降模型已有文献报道较多^[17],此处不再赘述)。为了求解以上6个未知数,需要引入两个辅助方程:

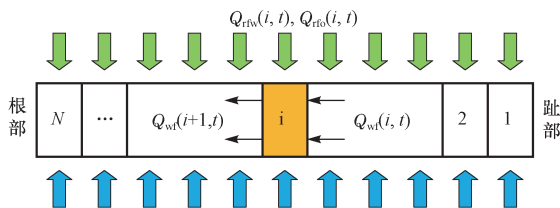


图4 生产过程中水平井变质量流动示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing variable mass flows in horizontal wells in production

饱和度方程:

$$S_{ro} + S_{rw} = 1 \quad (11)$$

毛管压力方程:

$$p_{rcow} = p_{ro} + p_{rw} \quad (12)$$

采用有限差分方法对以上控制方程进行离散,建立与之对应的线性方程组,将系数矩阵存入大型稀疏矩阵中,利用牛顿-拉夫森迭代方法进行计算。为了简化计算过程,水平井筒中的变质量流动按照显式处理。油藏流动按全隐式方法求解,从而最大程度上提高计算的稳定性和收敛性。

4 水平井控水完井参数优化

以 Ahdeb 油田某水平井为例,该井钻井轨迹 A 点垂深 2 621 m, B 点垂深 2 641 m,采用 5-1/2" 筛管完井。水平段长 830 m,该井跟部穿过高渗层,测井解释结果进一步落实该井根部有 175 m 井段穿过高渗层,占全井段的 21%。该段储层平均渗透率为 $140 \times 10^{-3} \mu m^2$,而剩余井段平均渗透率为 $15 \times 10^{-3} \mu m^2$,渗透率极差达 9.3 倍。根据前面地质油藏及开发动态分析结果,其产水贡献主要来源于根部高渗层段。参照建立的水平井控水完井分类治理方案,拟采用中心管控水完井工艺对产水井段实施调流控水,但需结合数模进一步验证控水有效性。

4.1 控水完井工艺优选

利用已建立的3种不同完井控水工艺耦合模型,通过导入该井真实历史配产数据,模拟计算了不同完井工艺下的含水率随生产时间的变化关系,如图5所示。其中,假设该井在生产 900 d 时,实施老井二次完井控水(包括:变密度筛管、中心管及 ICD 控水完井)。图中,直线为不同情况下的含水率模拟结果,点为该井实际历史含水率变化情况。从图中可知,在未实施控水完井时的模拟含水率与真实含水率匹配度很好,说

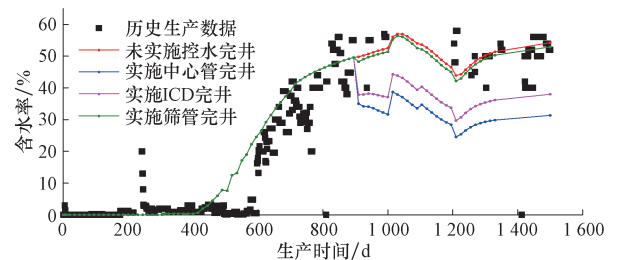


图5 不同完井方式下的控水效果对比

Fig. 5 Comparison of water control results with different completion patterns

明该模型具有较高可靠度,基于该模型开展3种完井工艺下的控水效果模拟具有较高的参考价值。模拟结果显示,在实施变密度筛管控水完井后,含水率仅从49.8%下降到48.2%。这主要是因为变密度筛管的孔径较大,节流压差调节的能力有限,约为kPa级^[18],无法达到均衡生产压差需求。而实施ICD和中心管控水完井后,含水率分别下降至37.8%和35.0%,二者控水能力相当。但是,采用中心管完井的成本仅为ICD完井的30%~40%,考虑经济性,推荐该井采用中心管完井。

4.2 中心管下入比例优化

基于中心管控水完井工艺,需进一步分析中心管下入深度和下入时机对水平井控水效果的影响,从而优选完井工艺参数。图6是中心管在不同下入比例时的含水率。从图中可以看出,随着下入比例逐渐增大,含水率逐渐降低。当下入比例达0.3时,含水率从49.8%下降到了35.0%,达到最小值。当下入比例超过0.3后,含水率基本保持不变,因此优化下入比例为0.3。这主要是因为出水位置主要分布在根部21%井段,如果中心管下入比例小于该值,则无法实现有效控水。同时,下入比例应略大于该值,因为高渗层段会对周围储层产生压力干扰,从而加快附近井段见水速度。

4.3 控水装置下入时机优化

图7是在不同时间下入中心管后,含水率随生产时间变化曲线。模拟发现,6种方案均能有效控制含水,含水率从未实施控水完井的54.2%下降至约30.5%(时间节点为1500d)。但是,在见水初期实施控水完井能够更有效地降低整个生产过程中的含水率,从而利于提高累计产油量。因为在配产相同情况下,含水率越低,整个生产过程中的累产油量越高。同时,见水初期实施控水完井能够减缓局部流体突进现象,使渗流剖面更为均衡。例如,在初期投产和250d时入中心管后的含水率在整个生产过程中均小于其他方案,因此其控水效果最好。

5 结论与建议

1) 根据Ahdeb油田水平井钻遇储层特征和见水特征,优选3种不同完井控水工艺,形成了老井二次完井和新投产井调流控水分类治理方案;

2) 建立了盲筛分段组合完井、中心管完井及ICD

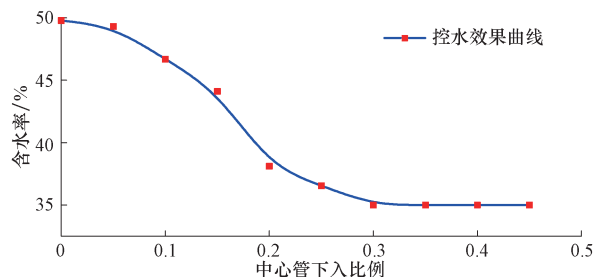


图6 中心管下入比例优化(900 d时入中心管)

Fig. 6 Optimization of the central pipe implement location (working time: 900 days)

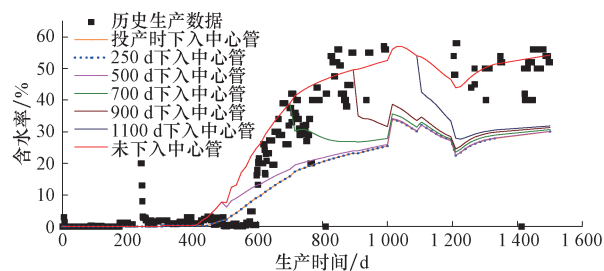


图7 中心管下入时机优化(下入比例为0.3)

Fig. 7 Optimization of the central pipe implement time (setting ratio: 0.3)

完井方式下的井筒-油藏一体化耦合模型。其中,井筒模型考虑了流体变质量流动过程,提高了模拟结果的准确性,模型为水平井完井控水效果预测及参数优化提供了技术手段;

3) 研究表明,对于根部见水的水平井,ICD完井及中心管完井均有较好控水效果。其中,中心管下入比例应略大于出水井段,才能有效降低水平井含水率。变密度筛管完井节流压差调节的能力有限,无法达到均衡生产压差需求;

4) 模拟发现,在水平井见水前实施控水完井能够更有效地降低整个生产过程中的含水率,从而利于提高单井累产油量,因此建议新钻水平井在完井时即考虑下入调流控水装置。

参 考 文 献

- [1] 曾保全,程林松,李春兰,等. 特低渗透油藏压裂水平井开发效果评价[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 791-796.
Zeng Baoquan, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Development evaluation of fractured horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 791-796.
- [2] 张瑞霞,王继飞,董社霞,等. 水平井控水完井技术现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 35-37.
Zhang Ruixia, Wang Jifei, Dong Shexia, et al. Status quo and development trends of the water-controlling completion technology of horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(4): 35-

- 37.
- [3] Ju B, Dai S, Fan T, et al. An effective method to improve recovery of heavy oil reservoir with bottom water drive [C] // International Petroleum Technology Conference, 2005.
- [4] 熊春明, 唐孝芬. 国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 2-0.
- Xiong Chunming, Tang Xiaofen. Technologies of water shut-off and profile control: An overview [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 2-0.
- [5] 曲从锋, 王兆会, 袁进平. 智能完井的发展现状和趋势 [J]. 国外油田工程, 2010(7): 28-31.
- Qu Congfeng, Wang Zhaohui, Yuan Jinping. The development status and trend of intelligent completion [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010(7): 28-31.
- [6] Kuchuk F J, Goode P A, Wilkinson D J, et al. Pressure-transient behavior of horizontal wells with and without gas cap or aquifer [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(01): 86-94.
- [7] Yildiz T. Productivity of selectively perforated horizontal wells [J]. SPE Production & Operations, 2006, 21(01): 75-80.
- [8] Ouyang L B, Huang W S. A comprehensive evaluation of well-completion impacts on the performance of horizontal and multilateral wells [C] // SPE annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [9] Kabir A H, Vargas J A. Accurate inflow profile prediction of horizontal wells using a newly developed coupled reservoir and wellbore analytical models [C] // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [10] 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.
- Yu Gaomin, Ling Jianjun, Jiang Mingxuan, et al. Production mechanism and development tactics on sandstone reservoirs with bottom water [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 61-65.
- [11] 王静. 机械式防砂管原油渗流试验及数值模拟 [D]. 江苏大学, 2009.
- Wang Jing. Experimental and numerical simulation research on crude oil seepage of mechanical sand screen [D]. Jiangsu University, 2009.
- [12] 卢川, 刘慧卿, 卢克勤, 等. 非均质底水油藏水平井合理生产压差实验研究 [J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 117-121.
- Lu Chuan, Liu Huiqing, Lu Keqin, et al. Experimental study on reasonable drawdown pressure in horizontal wells in heterogeneous reservoir with bottom water [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 117-121.
- [13] Least B, Bonner A J, Regulacion R E, et al. Autonomous icd installation success in ecuador heavy oil [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [14] 安永生, 张宁, 张恒. 水平井 ICD 控水完井一体化耦合数值模拟研究 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 109-113.
- An Yongsheng, Zhang Ning, Zhang Heng. Numerical simulation study on the coupling of horizontal wells with ICD water control completion [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 109-113.
- [15] Garcia G A, Coronado M P, Gavioli P. Identifying well completion applications for passive inflow-control devices [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [16] 谢海兵, 马远乐, 桓冠仁, 等. 非结构网格油藏数值模拟方法研究 [J]. 石油学报, 2001, 22(1): 63-66.
- Xie Haibing, Ma Yuanle, Huan Guanren, et al. Study of unstructured grids in reservoir numerical simulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 63-66.
- [17] 陈献铭. 水平井 ICD 完井控水增油效果数值模拟研究 [D]. 西南石油大学, 2014.
- Chen Xianming. Numerical simulation of water control and stimulation effect of ICD completion in horizontal well [D]. Southwest Petroleum University, 2014.
- [18] 陈会娟, 李明忠, 王一平, 等. 割缝筛管水平井注蒸汽热力参数分布规律数值模拟研究 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 109-115.
- Chen Huijuan, Li Mingzhong, Wang Yiping, et al. Numerical simulation in steam injection wells for optimizing the distribution of thermal parameters in horizontal wells with slotted liners [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 109-115.

(编辑 张玉银)