

底水油藏水平井开发水脊规律研究

李立峰¹, 岳湘安¹, 李良川², 张立娟¹, 贺丰果³

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油冀东油田分公司
钻采工艺研究院, 河北 唐山 063604; 3. 广西北海市人民政府, 广西 北海 536000)

摘要: 针对局部底水脊进造成的水平井出水问题, 建立了底水油藏水平井开采三维物理模拟系统, 研究了底水脊进位置和发展特征, 考虑了井筒压降、井眼轨迹和储层非均质性等因素的影响。结果表明, 井筒压降使底水在水平井跟端脊进, 导致见水时间明显提前, 对水脊形成与发展有重要影响; 井眼轨迹变化与储层非均质性是底水脊进的敏感因素, 与井筒压降共同作用决定了底水脊进位置, 存在下凹型井段时, 底水易在下凹型井段处脊进; 下凹型井段靠近水平井跟端, 底水在跟端处脊进, 波及范围小; 下凹型井段远离跟端促使形成多处水脊, 扩大底水波及范围。在非均质性模型中, 高渗透区底水易形成水脊, 而跟端位于低渗透区时, 能促使水脊沿水平方向发展; 水脊发展速度影响见水后开发动态, 下凹型井段位于跟端会加快水脊发展, 见水时间最早, 含水率上升速度最快; 下凹型井段远离跟端能减缓水脊发展速度; 非均质性会加快水脊发展速度, 而将跟端布置在低渗透区能在一定程度推迟见水时间, 降低含水率上升速度。

关键词: 底水油藏 水平井 井筒压降 底水脊进位置 水脊发展速度

中图分类号: TE34

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)01-0089-03

利用水平井开发底水油藏时, 底水以水脊的形态向水平井推进^[1]。水平方向受储层物性、井眼轨迹等因素影响, 底水脊进速度不同。脊进速度较快的底水突破进入井筒后, 会形成优势通道, 屏蔽其他位置底水驱替, 从而使水平井含水率迅速上升, 造成严重的出水问题^[2]。针对底水油藏水平井开发中底水脊进问题, 中外学者研究了稳定渗流条件下水平井产能和底水突破时间^[3-6], 利用数值模拟方法研究了水平井水淹机理和水淹模式^[7-8]。而脊进规律研究需要物理模拟支持, 水平井物理模拟有静态电模拟^[9-10]、二维可视化模拟^[11-14]、三维物理模拟^[15]3类, 其中, 三维物理模型最接近真实油藏。笔者建立了底水油藏水平井开发三维物理模拟系统与水脊监测方法, 物理模型模拟了井筒压降、井眼轨迹与储层非均质性等因素, 利用该系统研究了底水脊进位置和水脊发展规律。

1 物理模拟系统

底水油藏水平井开发物理模拟系统主要由驱

替动力装置、模型本体与数据采集装置等构成(图1)。驱替动力装置包括恒压恒速泵和中间容器, 为底水提供动力。模型本体包括底水、油藏模型和水平井模型, 将这3部分用环氧树脂密封为一个整体。油藏模型为人工压制岩心, 可以模拟均质与非均质油藏, 模型尺寸为80 cm×10 cm×5 cm。在油藏模型顶部布置一根直径为2 mm的钢管模拟水平井, 在钢管上钻孔与油藏模型连通。实验中先将油藏模型饱和油, 然后底水恒压驱替, 由水平井开采油藏模型中的原油。实验中压力、电阻率由计算机终端自动记录。

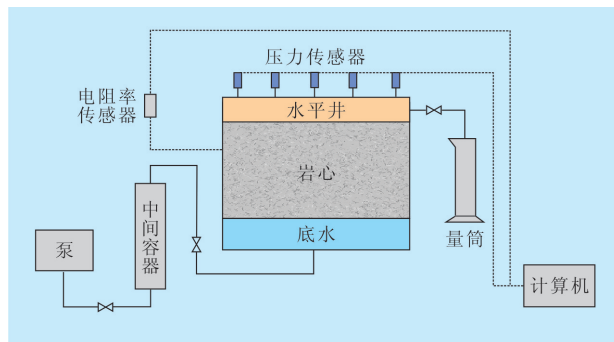


图1 物理模拟系统装置示意

收稿日期: 2012-11-27。

作者简介: 李立峰, 男, 在读博士研究生, 从事提高采收率与采油化学、油气田开发理论等方面的研究。联系电话: (010)89733691, E-mail: fffeng1985@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“复杂油气田地质与提高采收率技术”(2011ZX05009-004)。

在油藏模型上均匀设置21对电极测点,模拟中通过测定模型电阻率,监测模型内含水饱和度变化。根据阿尔奇公式,将测得的电阻率转换为含水饱和度。在测点饱和度基础上,利用克里金法进行数值插值,得到整个模型的饱和度,根据含水饱和度变化可分析底水脊进位置与特征。

2 底水脊进位置

在不考虑水平井井筒压降的物理模拟中,底水向水平井均匀推进^[11];考虑井筒压降时,底水在水平井跟端脊进^[12]。这是因为井筒内压力损失使跟端垂向压力梯度最大,流体运动速度最快。井筒压降影响水脊形成及其位置,水平井找水需要考虑井筒压降的影响。实验中当无其他影响因素时,底水在水平井跟端脊进,随着开采的进行,水脊不断向上推进,同时水脊体积增大。这表明模型模拟出了水平井压降及其对水脊的影响,可将其用于底水脊进研究。

2.1 井眼轨迹影响

在钻井过程中,不可避免地会出现井眼轨迹的变化。其中,下凹型井段降低井筒避水高度,会对底水运动特征产生影响。井眼轨迹模型中,在水平井不同位置处设置下凹型井段,下凹型井段距跟端距离(d_h)分别为10,35,60 cm,下凹深度为3 cm。

由井眼轨迹模型水脊位置(图2)可以看出,下凹型井段距跟端10 cm的模型有1处底水脊进,位于跟端,水脊体积较小,水脊边缘坡度很陡;下凹型井段距跟端35 cm的模型有2处底水脊进,分别位于水

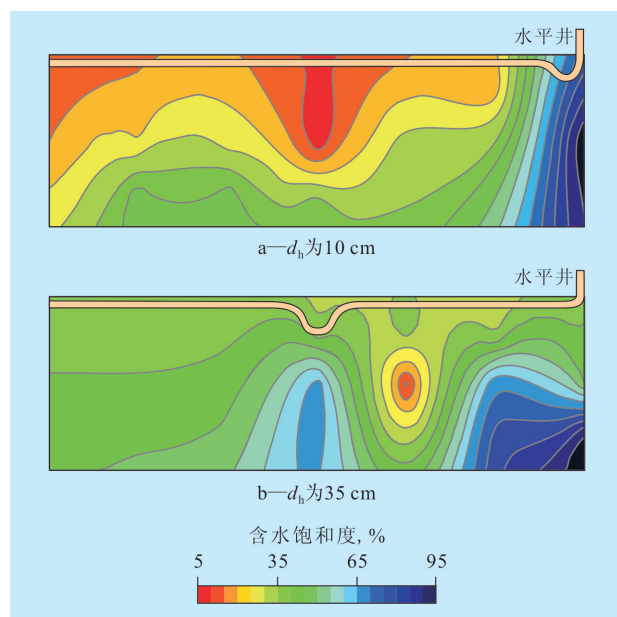


图2 井眼轨迹模型水脊位置

平井跟端和模型中部,水脊体积较大,边缘坡度较缓。

下凹型井段降低了避水高度,增大了模型内垂向压力梯度,有利于底水脊进。在井眼轨迹模型中,下凹型井段与井筒压降综合影响底水脊进规律。下凹型井段位于跟端时,与井筒压降叠加作用,使跟端底水脊进,并且脊进速度更快;下凹型井段远离跟端时,与井筒压降分别作用,形成2处水脊,从而降低了底水脊进速度,扩大了底水波及范围。

2.2 非均质性影响

油藏中普遍存在平面非均质性,这也是导致水平井出水的重要因素。非均质模型由高渗透区和低渗透区2部分组成,渗透率级差为5,平均渗透率为 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实验中分别将水平井跟端置于高渗透区和低渗透区开采。由非均质模型水脊位置(图3)可以看出,跟端位于高渗透区时有1处底水脊进,位于跟端,水脊体积较大,边缘很陡;跟端位于低渗透区时有1处底水脊进,位于模型中部,随开采进行,水脊除向上发展外,还沿井筒流动方向推进,水脊进入低渗透区,呈倾斜状。

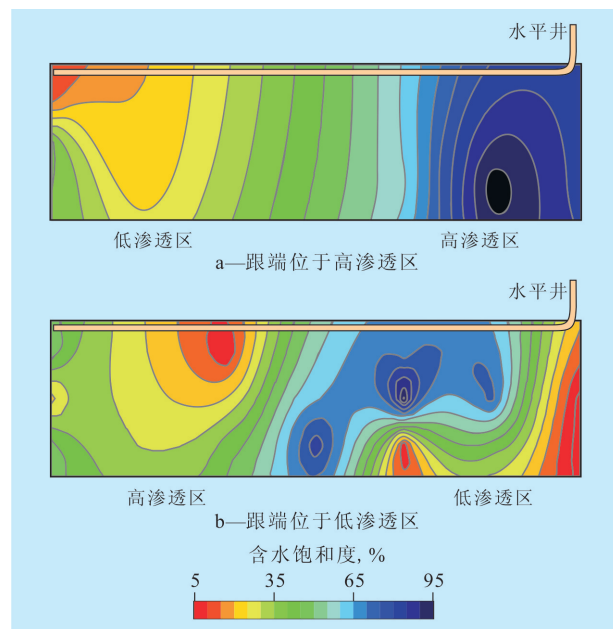


图3 非均质模型水脊位置

由于存在渗透率差异,非均质模型有利于局部底水脊进。在非均质模型中,非均质性与井筒压降综合影响底水脊进位置。跟端位于高渗透区时,渗透率差异与井筒压降叠加作用,底水在跟端脊进。跟端位于低渗透区时,底水在高渗透区脊进,同时受井筒压降影响,水脊形成于高渗透区的最右端。受井筒压降影响,油藏内流体沿流动方向有一定的

压力梯度,在其驱动下,形成的水脊沿水平方向推进,扩大了波及范围。

3 水脊发展速度

水脊形成后,其发展速度影响水平井开采动态和效果,水脊发展速度越快,水平井见水时间越早,含水率上升越快。根据见水时间和含水动态可以判断水脊发展特征。根据文献[3]中的方法,计算实验模型不考虑井筒压降时的见水时间,结果是实验中见水时间的4倍。表明底水在跟端脊进后,与均匀推进相比发展速度明显加快,使见水时间大幅提前。可见井筒压降对水平井出水规律有重要影响。产量较高、井筒较长的水平井内压力损失明显,在这类水平井开发中,忽略井筒压降会造成较大误差。

3.1 井眼轨迹影响

将各模型见水时间无因次化,并计算含水率上升速度。由井眼轨迹模型无因次见水时间和含水率上升速度(图4)可以看出,下凹型井段距离跟端10 cm模型的无因次见水时间最早,含水率上升速度最快;与之相比,下凹型井段距离跟端60 cm模型无因次见水时间推迟约1.5倍,含水率上升速度下降2/3;下凹型井段距离跟端35 cm模型的无因次见水时间最晚,含水率上升速度最慢。这表明下凹型井段远离跟端能延缓底水脊进,推迟见水时间,降低含水率上升速度,但二者距离并非越远越好,下

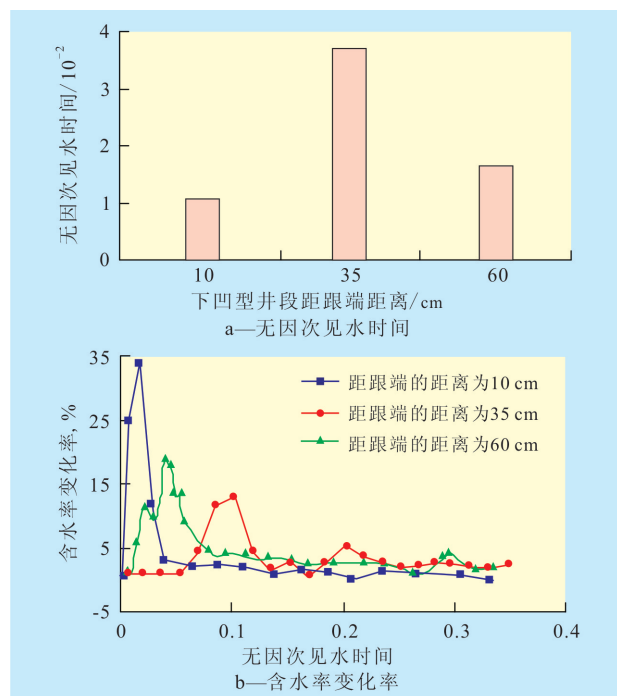


图4 井眼轨迹模型无因次见水时间和含水率变化率

凹型井段位于模型中部效果最好。下凹型井段远离跟端时,使底水在多处脊进,从而延缓了水脊发展速度,扩大了波及范围。所以钻井时应尽量避免在跟端附近出现下凹型井段。

3.2 非均质性影响

由非均质模型无因次见水时间和含水率上升速度(图5)可见,与均质模型相比,2种非均质模型无因次见水时间均早于均质模型,这说明非均质性加剧了水脊的发展速度。在非均质模型中,跟端位于低渗透区无因次见水时间较晚,含水率上升速度也较慢。表明在非均质油藏中,跟端位于低渗透区在一定程度上抵消了非均质性的不利影响,改善了开发效果。因此在开发中应尽量将水平井跟端布置在低渗透区。

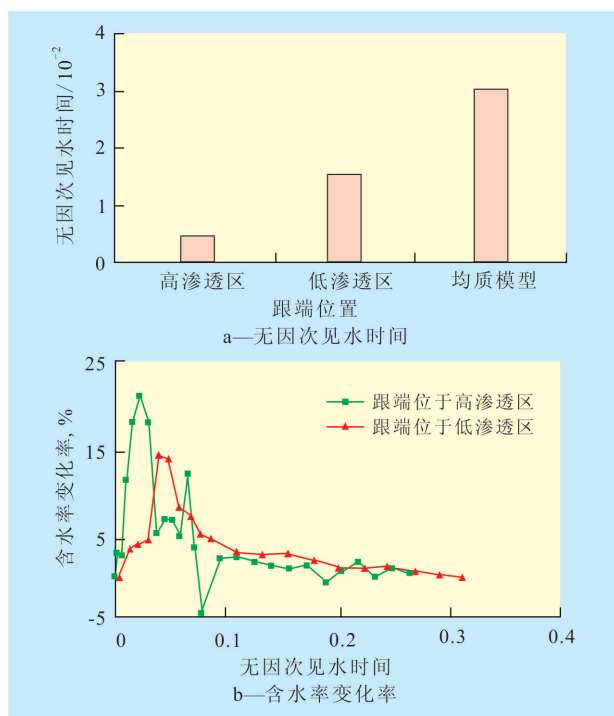


图5 非均质模型无因次见水时间和含水率变化率

4 结论

受井筒压降影响,底水在水平井跟端处脊进,无因次见水时间明显提前。井眼轨迹变化与非均质性是导致局部底水脊进的敏感因素,与井筒压降共同影响水脊位置。底水易在下凹型井段处脊进,下凹型井段远离跟端有利于多处底水脊进,进而扩大底水波及范围;底水易在高渗透处脊进,跟端位于低渗透区时能促进水脊水平方向延展,扩大底水波及范围。

(下转第95页)