

复杂断块油藏高含水期合理井距 确定方法及其影响因素

崔传智¹,杨赤宸¹,牛栓文²,路智勇²,张莹³

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580; 2.中国石化胜利油田分公司,
山东 东营 257000; 3.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

摘要: 井网加密调整是复杂断块油藏高含水期改善开发效果的重要措施,合理注采井距的确定是决定井网加密调整效果的关键。以一注两采井组为例,以均衡驱替为目标,以油水两相不稳定渗流理论为基础,考虑断块油藏储层物性、剩余油分布和地层倾角等因素,建立了复杂断块油藏高含水期合理井距确定方法,并采用油藏数值模拟进行了验证分析。结果表明,对于水驱方向垂直构造线方向的一注两采井网,在其他储层条件和剩余油饱和度相同的条件下,地层倾角越大,达到均衡驱替所需的注采井距比越大;注采井间储层渗透率、油井含水率差异越大,达到均衡驱替时所需的注采井距比越大。数值模拟验证结果表明,在地层倾角为 10° 、油井含水率均为90%时,该方法计算出注水井左右两侧注采井距的比值为1.264,按此结果进行井网部署,10 a末注水井左右两侧油井含水率分别为96.85%和97.13%,2口油井含水率相差0.28%,总采出程度为38.37%,比均匀布井可提高采出程度5.81%。

关键词: 复杂断块油藏 均衡驱替 合理井距 地层倾角 剩余油分布

中图分类号: TE347

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0053-04

复杂断块油藏由于断层发育、构造复杂、含油面积小、形状各异,难以形成规则井网。随着注水开发的不断进行,油田进入高含水期后油水井井况日益恶化,井网完善程度降低,严重制约了水驱控制程度及水驱动用程度的提高。井网加密调整是复杂断块油藏高含水期改善开发效果的重要措施^[1-2]。

合理注采井距是井网加密调整效果的关键,中外学者对非均质油藏井距的确定研究较多^[3-8]。闫宝珍等针对非均质渗透率油藏建立并求解出具有方向渗透率条件下的流体流动基本微分方程^[3],为非均质油藏优选合理井距提供了理论依据;李传亮等针对各向异性地层采用坐标变换法和流管法推导了基于均衡驱替的井距调整理论公式^[5];刘德华等提出矢量井网的概念,分析了影响井网部署和水驱效果的主要因素,并以此为基础提出了非均质油藏井网优化部署方法及开发后期的井网优化调整步骤^[6];周涌沂等推导了平面非均质油藏矢量井网实现油井相同见水时间的井距设计公式^[9-12]。研究主要针对油田开发初期,仅考虑了渗透率、地层厚度、孔隙度等储层物性对井距的影响,未考虑高含

水期剩余油分布的影响,且在断块油藏中,地层倾角对井距的影响也不容忽视。为了实现均衡驱替,笔者基于复杂断块油藏的井网特征,综合考虑了储层物性、剩余油分布和地层倾角的影响,建立了该类油藏高含水期井距确定方法。

1 井网特征

复杂断块油藏含油面积较小,井网形式主要为一注两采和两注一采;对于面积相对较大的断块油藏,其井网也可分解为多个一注两采或两注一采井组。因此,笔者以一注两采或两注一采为主要的井组类型,确定合理井距。根据复杂断块油藏地层倾角大的特征,确定了4种一注两采井组模型:①垂直构造线方向上一注两采井组,1口油井在构造高部位,1口油井在构造低部位,注水井位于2口油井之间,注入水的流动方向与构造线垂直;②平行构造线方向上一注两采井组,3口井在相同的构造部位;③上倾方向一注两采井组,2口油井在构造高部位,注水井在构造低部位;④下倾方向一注两采井组,2

收稿日期:2013-05-24。

作者简介:崔传智,男,教授,博士,从事油气渗流理论、油气田开发技术研究。联系电话:13705469592, E-mail:ccz2008@126.com。

基金项目:长江学者和创新团队发展计划“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(IRT1294),国家科技重大专项“断块油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2011ZX05011-003)。

口油井在构造低部位,注水井在构造高部位。

在上述井组中,若已知任意2口井的井距,确定另一口井的井距时,须考虑注采井间的储层厚度、渗透率、孔隙度、含水饱和度和地层倾角等参数的影响。尤其是垂直构造线方向上一注两采井组,重力对注水井左右两侧注采单元内油水渗流过程将产生不同作用,地层倾角对井距的影响尤为突出。

实际油藏由于断层遮挡、断块形态等影响无法实现完全均衡驱替,因此结合现场实际,对同一注采井组而言,当各油井的含水率相同或者差值符合精度要求时即达到均衡驱替。由于一注两采井组与两注一采井组只是井别不同,计算方法大致相同,所以仅以一注两采井组为例进行合理井距的推导。

2 合理井距确定方法

首先给定井组中注采井距,根据井点的剩余油饱和度及储层物性得到油井的含水率和注采井间的累积注水量。把设定的达到均衡驱替所需的调控时间分成若干段,计算每个时间段的产液量、含水率等,通过比较油井的最终含水率来判断是否达到均衡驱替,若不满足要求,则调整注采井距,重新进行计算。在计算过程中,注采井间的储层物性参数取平均值,或者取2井点储层物性参数的平均值。

2.1 初始油井含水率和注采井间累积注水量的计算

首先按一定的规则给定初始注采井距,确定各

$$Q_1 = \frac{p_{inj} - p_1 + \Delta\rho g \sin \alpha}{\frac{\mu_w}{\bar{K}_1 A} \left(A + BS_{om1} \frac{b-1}{b} + CS_{om1} \frac{2b-1}{b+1} + DS_{om1} \frac{3b-1}{b+2} + ES_{om1} \frac{4b-1}{b+3} \right) L_1} \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{p_{inj} - p_2 - \Delta\rho g \sin \alpha}{\frac{\mu_w}{\bar{K}_2 A} \left(A + BS_{om2} \frac{b-1}{b} + CS_{om2} \frac{2b-1}{b+1} + DS_{om2} \frac{3b-1}{b+2} + ES_{om2} \frac{4b-1}{b+3} \right) L_2} \quad (5)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为注水井左右两侧油井的产液量, m^3/d ; p_{inj} 为注水井井底流压, MPa; p_1 和 p_2 分别为注水井左右两侧油井的井底流压, MPa; $\Delta\rho$ 为水油密度差, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 , 其值为 9.8; α 为地层倾角, ($^\circ$); \bar{K}_1 和 \bar{K}_2 分别为注水井左右两侧注采井间的平均渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; A, B, C, D, E 和 b 均为系数; S_{om1} 和 S_{om2} 分别为注水井左右两侧油井的可动油饱和度。

须说明的是, 不同类型井组, 重力作用项 ($\Delta\rho g \sin \alpha$) 前符号不同, 上倾方向一注两采井组中符号均为负, 下倾方向符号均为正, 平行构造线方向不考虑重力作用的影响。

井点的位置, 根据油井处的含油饱和度和达西方程, 得到油井含水率, 即

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}(S_w)}{K_{rw}(S_w)} \times \frac{\mu_w}{\mu_o}} \quad (1)$$

式中: f_w 为油井含水率; $K_{ro}(S_w)$ 和 $K_{rw}(S_w)$ 分别为油相和水相的相对渗透率; S_w 为含水饱和度; μ_w 和 μ_o 分别为地层水和油的粘度, $mPa \cdot s$ 。

将注采井间流体的渗流看作一维油水两相不稳定渗流, 根据贝克莱-列维尔特方程^[13], 可得到2个注采井间的累积注水量分别为

$$Q_{c1} = \frac{L_1 \phi_1 A_1}{f_w'(S_{w1})} \quad (2)$$

$$Q_{c2} = \frac{L_2 \phi_2 A_2}{f_w'(S_{w2})} \quad (3)$$

式中: Q_{c1} 和 Q_{c2} 分别为注水井左右两侧注采井间的累积注水量, m^3 ; L_1 和 L_2 分别为注水井左右两侧注采井间的井距, m ; ϕ_1 和 ϕ_2 分别为注水井左右两侧注采井间的地层孔隙度; A_1 和 A_2 分别为注水井左右两侧注采井间的渗流面积, m^2 ; $f_w'(S_{w1})$ 和 $f_w'(S_{w2})$ 分别为注水井左右两侧油井的含水率导数; S_{w1} 和 S_{w2} 分别为注水井左右两侧油井的含水饱和度。

2.2 产液量的计算

根据油水两相渗流理论和等值渗流阻力法^[14], 并考虑重力作用, 可求得任意时刻油井产液量, 注水井左右两侧油井的产液量分别为

2.3 注采井距优化计算

假定每个时间步内油井产液量不变, 根据式(2)和式(3)求出的第 i 个时间步注水井左右两侧油井处含水率导数分别为

$$f_w'(S_{w1}) = \frac{L_1 \phi_1 A_1}{Q_{c1} + \sum_{j=0}^i Q_{1j} \Delta t} \quad (6)$$

$$f_w'(S_{w2}) = \frac{L_2 \phi_2 A_2}{Q_{c2} + \sum_{j=0}^i Q_{2j} \Delta t} \quad (7)$$

式中: Q_{1j} 和 Q_{2j} 分别为注水井左右两侧油井对应时间步的产液量, m^3/d ; Δt 为时间步长, d 。

根据 $f_w' - S_w$ 和 $f_w - S_w$ 关系曲线以及式(6)

和式(7)分别求得注水井左右两侧油井对应的含水饱和度和含水率,再分别将其代入式(4)和式(5)计算下一时间步的产液量,由式(6)和式(7)进一步算出该时间步油井含水饱和度和含水率。如此循环计算,直到调控时间结束,求得各油井最终含水率。比较注水井左右两侧油井的最终含水率,若其差值小于精度要求,则此时的井距符合要求,为最优井距;否则,按一定规则调整井距,重新计算。

3 影响因素

复杂断块油藏高含水期影响井距的主要因素有地层倾角、储层物性以及剩余油分布等,以垂直构造线方向一注两采井组为例进行影响因素分析。油藏规模为 $600\text{ m}\times 200\text{ m}\times 5\text{ m}$,孔隙度为0.25,渗透率为 $350\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,地层原油粘度为 $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$,注水井左右两侧地层倾角均为 10° ,平均剩余油饱和度为0.46,油井含水率为90%。设定两侧注采压差均为 1.5 MPa ,要求部署油水井后10 a达到均衡驱替。

3.1 地层倾角

地层倾角主要通过重力作用对油水渗流过程产生影响。假设注采井间储层物性相同,分析注水井两侧地层倾角相同和不同时,地层倾角对均衡驱替时井距的影响。

地层倾角相同 对于垂直构造线方向上一注两采井组,重力作用对注水井左右两侧注采井间油水渗流过程的影响不同,左侧注采单元重力为动力,右侧注采单元重力为阻力,导致左侧的有效驱动压差增加,右侧的有效驱动压差降低;在两侧注采井距相同的情况下,左侧油井的产液量大于右侧油井的产液量,使得驱替程度产生差异,达不到均衡驱替的目标。因此须减小右侧的注采井距,增大其压力梯度,提高产液量,从而达到均衡驱替。由不同地层倾角下达到均衡驱替时的左右两侧注采井距的比值(图1)可以看出,随着地层倾角的增大,达到均衡驱替时注水井左右两侧注采井距比值增大,当地层倾角为 0° 时,注水井左右两侧注采井距相等即可,当地层倾角增至 20° 时,注水井左右两侧的注采井距比值增至1.61,才能使得注水井左右两侧的驱替程度相同。

地层倾角不同 注水井左侧地层倾角保持 25° 不变,改变右侧地层倾角,计算达到均衡驱替时注水井左右两侧注采井距的比值。结果表明,随着右侧地层倾角的增大,右侧注采单元内重力所起的阻

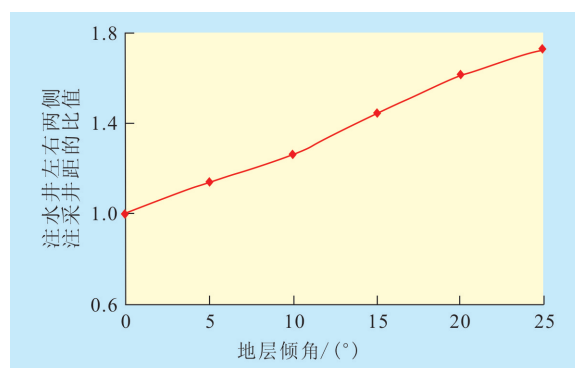


图1 均衡驱替时地层倾角对注采井距的影响

力作用越来越大,导致注水井左右两侧的有效驱动压差差异增大,在相同井距情况下右侧油井的产液量减小,为达到均衡驱替,须减小注水井右侧的注采井距,提高右侧油井的产液量。当右侧地层倾角为 5° ,达到均衡驱替时,注水井左右两侧注采井距的比值为1.429;当右侧地层倾角为 25° ,该比值增至1.752才能达到均衡驱替(表1)。

表1 不同地层倾角对注采井距的影响

地层倾角 / (°)		注水井左右两侧注采井距的比值
注水井左侧	注水井右侧	
25	5	1.429
25	10	1.510
25	15	1.597
25	20	1.679
25	25	1.752

3.2 储层渗透率

假设注水井左右两侧油井的含水饱和度均为0.9,地层倾角为 10° ,改变地层中渗透率的分布,计算注水井左右两侧平均渗透率不同时,达到均衡驱替时的井距。结果(表2)表明,在均质储层(平均渗透率比值为1)情况下,由于受到重力作用影响,达到均衡驱替所需要的注水井左右两侧注采井距的比值为1.19。随着注水井右侧地层平均渗透率的降低,流体在注水井右侧流动受到的阻力增加,其流动速度降低;为了在给定的调控时间内达到均衡驱

表2 储层渗透率对注采井距的影响

地层平均渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$		注水井左右两侧平均地层渗透率比值	注水井左右两侧注采井距的比值
注水井左侧	注水井右侧		
800	500	1.60	2.17
800	600	1.33	1.71
800	700	1.14	1.41
800	800	1.00	1.19

替的目标,须减小注水井右侧的注采井距,增加其压力梯度,提高渗流速度。从计算结果可以看出,当注水井右侧平均渗透率为 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,注水井左右两侧注采井距的比值从均质储层时的1.19增至2.17才能达到均衡驱替。

3.3 油井含水率

假设注水井左侧油井的含水率为95%,计算右侧油井的含水率分别为75%,80%,85%,90%和95%时达到均衡驱替时的注采井距。结果(表3)表明,当油井含水率相同时,受重力作用影响,达到均衡驱替时,注水井左右两侧注采井距的比值为1.521;注水井右侧油井含水率降低,其对应地层的剩余油饱和度增高,流体流动难度增大,从式(4)可以看出,随着注水井右侧地层中可动油饱和度的增加,注水井右侧油井的产液量降低,为达到均衡驱替,须进一步减小注采井距,提高压力梯度,增加产液量;右侧油井含水率为75%时,注水井左右两侧注采井距的比值增加到2.974才能达到均衡驱替。

表3 油井含水率对注采井距的影响

油井含水率,%		注水井左右两侧 油井含水率比值	注水井左右两侧 注采井距的比值
注水井左侧	注水井右侧		
95	75	1.27	2.974
95	80	1.19	2.896
95	85	1.12	2.750
95	90	1.06	2.468
95	95	1.00	1.521

4 数值模拟验证

以所建模型为基础,采用油藏数值模拟方法对计算出的井距进行验证。假设油藏长度为600 m,2口油井的含水率均为90%,当均匀布井时计算到10 a末,2口油井含水率分别为98.76%和92.82%,总的采出程度为32.56%。根据笔者提出的方法计算注水井左右两侧注采井距的比值为1.264,即左侧注采井距为335 m,右侧注采井距为265 m。按此井距设置模型计算10 a末注水井左侧油井与右侧油井含水率分别为96.85%和97.13%,2口油井含水率相差0.28%,总的采出程度为38.37%。与均匀布井相比采出程度增加了5.81%,通过井距优化实现了均衡驱替,改善了开发效果。

5 结束语

复杂断块油藏地层倾角、渗透率、地层厚度、孔隙度、剩余油饱和度等参数的非均质性影响高含水期合理井距的确定。对于垂直构造线方向的一注两采井组,地层倾角越大,注采井间储层渗透率、油井含水率差异越大,达到均衡驱替所需的注采井距比越大。从均衡驱替的角度出发,综合考虑上述因素,基于一维油水两相不稳定渗流理论确定的合理井距能够改善油田的开发效果。

一注两采井组情况下,合理井距的确定方法可以进一步推广到一注多采或者一采多注井组。在井距的确定过程中,忽略了井间干扰,对于一注多采井组,可在考虑井间干扰的情况下进行深入研究。

参考文献:

- [1] 周方喜.中低渗透复杂断块油藏水平井优化部署——以江苏油区为例[J].油气地质与采收率,2012,19(3):104-107.
- [2] 赵雅慧,邓君,石维民.濮城油田多油层强非均质油藏水驱开发研究[J].断块油气田,2003,10(1):53-55.
- [3] 闫宝珍,许卫,陈莉,等.非均质渗透率油藏井网模型选择[J].石油勘探与开发,1998,25(6):51-53.
- [4] 张贤松,谢晓庆,陈民锋.低渗透断块油藏合理注采井距研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):94-96.
- [5] 李传亮,李炼民.各向异性地层的井距设计研究[J].新疆石油地质,2003,24(6):559-561.
- [6] 刘德华,李士伦,吴军.矢量化井网的概念及布井方法初探[J].江汉石油学院学报,2004,26(4):110-111.
- [7] 廉黎明,姜汉桥,牛佳玲,等.水平井注采井网多目标优化方法[J].油气地质与采收率,2012,19(1):85-90.
- [8] 谷维成,莫小国,朱学谦,等.文留油田低渗透油藏合理注采井距研究[J].油气地质与采收率,2004,11(5):54-56.
- [9] 周涌沂,汪勇,程燕虎,等.渗透率各向异性油藏的开发对策研究[J].西南石油学院学报,2005,27(6):42-45.
- [10] 李阳,王端平,李传亮.各向异性油藏的矢量井网[J].石油勘探与开发,2006,33(2):225-227,245.
- [11] 周涌沂,汪勇,田同辉,等.改善平面非均质油藏水驱效果方法研究[J].西南石油大学学报,2007,29(4):82-85.
- [12] 周涌沂,李阳,王端平.矢量井网改善平面非均质油藏水驱开发效果研究[J].岩土力学,2008,29(1):135-139.
- [13] 张建国,杜殿发,侯健,等.油气渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2009.
- [14] 葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2003.

编辑 武云云