

文章编号: 1000-0747(2008)01-097-04

裂缝性碳酸盐岩底水油藏合理打开程度与合理井距

吕爱民, 姚军

(中国石油大学(华东)石油工程学院)

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA616170)

摘要: 针对塔河油田 S48 单元油藏特征, 应用油气渗流理论推导出了裂缝性碳酸盐岩底水油藏打开程度与井网密度的匹配关系式。用此关系式可确定该类油藏给定打开程度下的合理井距及给定井网密度下油井的合理打开厚度。研究认为: 该类油藏的合理打开程度不宜超过 50%, 且在打开程度为 50% 时合理井距最大。开发过程中, 随着含水饱和度的增加, 合理打开厚度减小; 随着垂向渗透率与水平渗透率比值的增加, 合理打开厚度增大, 合理井距减小。鉴于此, 实际生产中应逐段封堵打开井段; 实际布井中应根据不同区域的裂缝发育情况, 采取不均匀布井方式; 在井网的后期加密中应根据已有井的实际参数来确定与之匹配的新井位置和打开厚度。图 5 表 1 参 15

关键词: 裂缝性油藏; 碳酸盐岩底水油藏; 合理打开程度; 合理井距

中图分类号: TE324

文献标识码: A

Rational perforating level and well spacing for fractured carbonate reservoirs with bottom water

L Ü Ai-min, YAO Jun

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: For the rational development of Block S48, Tahe Oilfield, which is a fractured carbonate reservoir with bottom water, a correlation equation of its perforating level and well density is derived based on the oil and gas fluid flow mechanics and the oilfield performance. The rational well spacing under certain perforating level and the rational open thickness under certain well density can be determined by this equation. The rational perforating level should be less than 50% and at this value the well spacing is largest. The rational open thickness decreases with the increase of water saturation during the development, and the open well sections should thus be closed gradually in oilfield production. Since the rational open thickness will increase and the rational well spacing will decline correspondingly as the ratio between vertical permeability and horizontal permeability increases, unevenly distributed well pattern should be adopted according to the fracture developments in different areas. In the later period of well pattern thickening, the location of new wells and their perforating thickness should be determined by the actual parameters of existing wells.

Key words: fractured reservoir; carbonate reservoir with bottom water; rational perforating level; rational well spacing

1 问题的提出

目前对于裂缝性碳酸盐岩油藏的研究多集中在储集层特性的描述和预测^[1-7]、生产中的产量变化特征^[8-10]及水淹后的治理^[11],对合理打开程度和合理井距的研究相对较少^[12,13],而这些技术参数直接关系到油藏的开发水平和开采效果。关于底水油藏的打开(或射开)程度,一般认为碳酸盐岩底水油藏的打开程度以油气层厚度的 1/3 为宜,最大不超过 1/2。但上述经验性的原则对具体油藏而言则未免疏于宽泛,具体操作中难以把握,因此急需进行相关的理论研究,以便为现场实践提供有效的指导。

2 油藏模型及流体运动方程

正投入开发的塔河 4 区 S48 单元油藏为典型的裂

缝性碳酸盐岩底水油藏,底水活跃,裂缝系统由近于垂直的高角度缝和近于水平的低角度缝组成,基岩系统不具有渗透性,目前以底水为驱动能量进行开发。基于该油藏特点,可将单井模型抽象为如图 1 所示部分打开的圆形底水油藏。油藏顶部及四周封闭,打开厚度为 b ,油井井筒半径为 R_w ,泄油半径为 R_e ,油藏避水高度为 H 。在油井以产量 Q 生产时,该油藏内的流动可视为图中所示两种流动的组合,即:油藏底部到井底的垂向线性流动和井底以上部位由油藏边界到井壁的平面径向流动(沿水平缝)。

对于裂缝性油藏而言,毛细管力的作用较小,一般可忽略。而对于块状底水油藏,重力的作用则必须加以考虑。在忽略毛细管力而考虑重力作用的条件下,对流体不可压缩、黏度不变和垂直一维流动的情况,油水两相的运动方程^[14]可简化为:

$$v_w = - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left\{ \frac{-p}{H} - w \right\} \quad (1)$$

$$v_o = - \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left\{ \frac{-p}{H} - o \right\} \quad (2)$$

其中 $o = o \cdot g$ $w = w \cdot g$
 式中 v_w, v_o ——油、水的流速, m/s; K_v ——油藏垂向渗透率, m^2 ; K_{rw}, K_{ro} ——水相和油相的相对渗透率, 无量纲; μ_w, μ_o ——地层条件下水和油的黏度, Pa·s; p ——底水油藏避水段内垂向生产压差, Pa; o, w ——油藏条件下油、水的密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 。

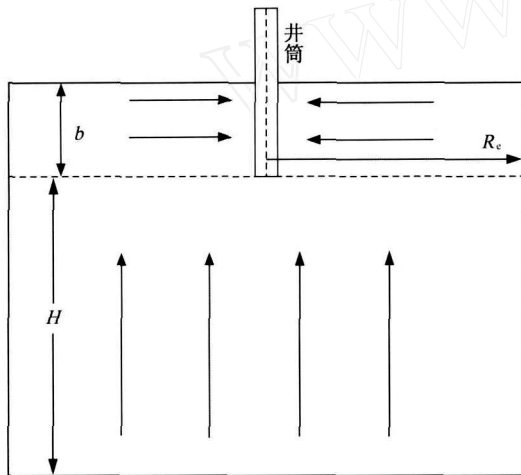


图1 部分打开的底水油藏流动示意图

3 合理井网密度与合理打开厚度公式的推导

由于生产过程中压力在径向上的差异,井底压差最大,流速最高,所以,要有效控制含水,井底油相的有效驱动压差应为 H ,此时水相的有效驱动压差为0。

根据圆形封闭地层平面径向流的压力分布规律^[15],结合(2)式,取与油井同心的环形微元,积分得可有效控制含水的垂向流动总流量为:

$$Q_o = \frac{R_w^2 K_v K_{ro}}{\mu_o} + \frac{R_w}{\mu_o} \left[\frac{K_v K_{ro}}{R_w} - \frac{\ln \frac{r}{R_w} - \frac{r^2}{2R_w^2}}{\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2}} \right] 2 \pi r dr \quad (3)$$

其中 r ——地层中某点到井筒的距离, m。

完成积分并注意 $R_c^2 \gg R_w^2$, 简化得:

$$Q_o = \frac{R_c^2 K_v K_{ro}}{4\mu_o \left[\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2} \right]} \quad (4)$$

若上、下两部分流动之间不能很好地协调(即上、下两部分流动的流量不一致),则可通过优化打开程度或井距来使之协调,此时径向有效驱动压差为 $w \cdot H$, 上、下两部分流动间应满足:

$$Q_o = \frac{R_c^2 K_v K_{ro}}{4\mu_o \left[\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2} \right]} = \frac{2 K_h K_{ro} (S_{wc}) b_w H}{\mu_o \left[\ln \frac{R_c}{R_w} - \frac{1}{2} \right]} \quad (5)$$

式中 $K_{ro}(S_{wc})$ ——束缚水饱和度下的油相相对渗透率,无量纲; K_h ——油藏的水平渗透率, m^2 ; S_{wc} ——束缚水饱和度, f 。

由(5)式可解得 R_c , 考虑到 $H = h - b$, 则井网密度为:

$$n = \frac{10^6}{R_c^2} = \frac{10^6 K_v K_{ro}}{8 K_h K_{ro} (S_{wc}) w (hb - b^2)} \quad (6)$$

式中 n ——井网密度, $\text{口}/\text{km}^2$; h ——油层厚度, m 。

当井网密度 n 为确定值时,由(6)式可得该井网密度下的合理打开厚度:

$$b = \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{h^2 - \frac{10^6 K_v K_{ro}}{2 n K_h K_{ro} (S_{wc}) w}} \quad (7)$$

由(6)式、(7)式可见,对于底水油藏,合理的打开程度和井网密度受垂向渗透率与水平渗透率比值 (K_v/K_h) 的影响,且合理打开程度不超过 50%。式中 K_{ro} 随含水饱和度变化,随着原油不断被采出,含水饱和度不断增加, K_{ro} 不断减小,因此在井网密度不变的情况下,最佳的打开程度随含水饱和度增加而变小,这便为底水油藏开发中的逐段封堵提供了依据。

在开发初期,可不考虑油藏上、下两部分因含水饱和度不同引起的相对渗透率的差异,此时(6)式可简化为(8)式,(7)式可简化为(9)式。

$$n = \frac{10^6 K_v}{8 K_h w (hb - b^2)} \quad (8)$$

$$b = \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{h^2 - \frac{10^6 K_v}{2 n K_h w}} \quad (9)$$

由(8)式可见,在特定的油藏区域,除打开厚度以外,其他参数均可视为常数,且当 $b = h/2$ (即打开程度为 50%) 时,井网密度可取得最小值。

$$n_{\min} = \frac{10^6 K_v}{2 K_h w h^2} \quad (10)$$

当 $n > n_{\min}$ 时,可由(9)式求得开发初期的合理打开厚度。当然在打开厚度一定时,可由(8)式确定合理的井网密度。考虑到实际井网的非均匀性,合理井距显得更为实用。根据(8)式可写出开发初期合理井距的表达式为:

$$a = \frac{\sqrt{10^6}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{8 K_h w (hb - b^2)}}{K_v} \quad (11)$$

式中 a ——开发初期合理井距, m。

4 计算实例

塔河4区 S48 单元为下奥陶统裂缝性碳酸盐岩块状底水油藏, 油藏面积 14.9 km², 有开发井 15 口, 井网密度 1.007 口/km²。原油密度 0.860 4 g/cm³, 地层水密度 1.154 g/cm³, 地层水矿化度高。油层顶界海拔为 -5363m, 原始油水界面海拔为 -5600m, 油层总厚度 237m, 目前油井打开厚度为 7.0~237m, 平均打开厚度 124m, K_v/K_h 值为 1.5。油水相对渗透率关系见表 1。

表 1 塔河 4 区 S48 单元油水相对渗透率统计表

S_w/f	K_{rw}	K_{rw}
0.119 309	0.969 735	0.006 107
0.163 949	0.880 875	0.031 537
0.208 589	0.794 987	0.061 183
0.253 229	0.712 167	0.093 34
0.297 869	0.632 524	0.127 35
0.342 509	0.556 179	0.162 851
0.387 149	0.483 269	0.199 605
0.431 789	0.413 949	0.237 449
0.476 429	0.348 399	0.276 258
0.521 069	0.286 83	0.315 937
0.565 709	0.229 494	0.356 408
0.610 349	0.176 701	0.397 608
0.654 989	0.128 844	0.439 484
0.699 629	0.086 444	0.481 991
0.744 269	0.050 246	0.525 089
0.788 909	0.021 448	0.568 746
0.833 549	0.002 603	0.612 931

注: S_w 为含水饱和度

应用 (7) 式进行计算, 得到井网密度分别为 1.0 口/km²、1.5 口/km² 和 2.0 口/km² 时 S48 单元合理打开厚度与含水饱和度关系曲线 (见图 2)。由图 2 可见, 随着含水饱和度的增加, 合理打开厚度减小; 在相同的含水饱和度下, 井网密度越大, 合理打开厚度越小, 且含水饱和度越低, 不同井网密度下合理打开厚度的差

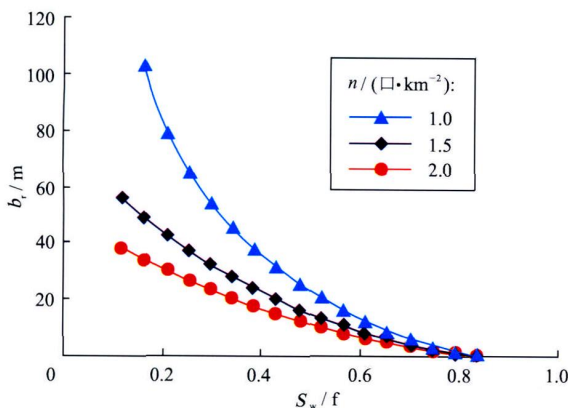


图 2 不同井网密度下 S48 单元 b_i 与 S_w 关系曲线

异越大。以含水饱和度为 0.3 为例, 井网密度为 1.0 口/km² 时的合理打开厚度为 52.21m, 井网密度为 1.5 口/km² 时的合理打开厚度为 32.27m, 井网密度为 2.0 口/km² 时的合理打开厚度为 23.17m, 三者之间存在较大差异。鉴于上述规律, 在实际开发中应根据不同开发阶段的具体井网情况, 确定相应的合理打开程度。

由于裂缝性油藏一般非均质性较强, 油藏的不同部位裂缝发育程度往往不同, 因此油藏不同区域 K_v/K_h 值可能存在较大差异。根据 (9) 式进行计算, 得到 S48 单元 b_i 与 K_v/K_h 的关系曲线 (见图 3)。由图 3 可见, 随着 K_v/K_h 值的增加, 合理打开厚度增大; 在相同的 K_v/K_h 下, 井网密度越大, 合理打开厚度越小, 且 K_v/K_h 越高, 不同井网密度下合理打开厚度的差异越大。以 $K_v/K_h = 2$ 和 $K_v/K_h = 0.25$ 两种情况为例, 井网密度分别为 1.5 口/km²、2.0 口/km² 和 2.5 口/km² 时, 前者的合理打开厚度差别很大, 分别为 95.3 m、55.94 m 和 41.35 m; 而后的合理打开厚度差别极小, 分别为 7.35 m、5.47 m 和 4.35 m。鉴于此, 开发中应根据不同区域的裂缝发育情况确定相应的合理打开厚度。

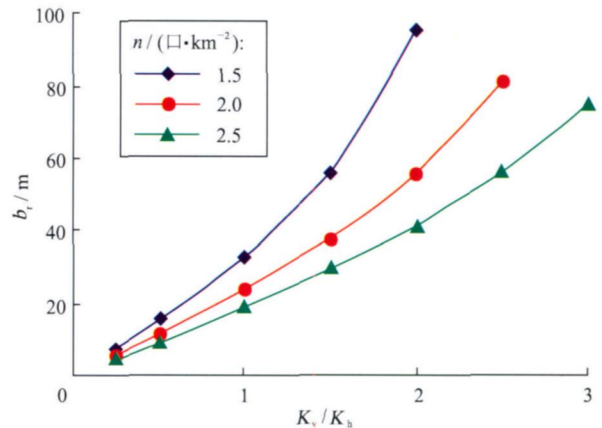


图 3 S48 单元不同井网密度下 b_i 与 K_v/K_h 关系曲线

由 (11) 式, 得到 S48 单元 a 与 K_v/K_h 关系曲线 (见图 4)。由图 4 可见, 随着 K_v/K_h 值的增加, 合理井距减小; 在相同的 K_v/K_h 下, 若打开程度小于 50%, 则打开程度越大, 合理井距越大, 且随着 K_v/K_h 增大, 不同打开程度下合理井距的差异略有减小, 但总体变化不大。实际上, 在相同的 K_v/K_h 下, 若打开程度超过 50%, 则合理井距随打开程度的变化规律刚好与上述趋势相反。鉴于此, 开发中应根据不同区域的裂缝发育情况和老井的打开程度, 确定新井的位置。

由 (10) 式可计算出该区开发初期合理井网密度最小值为 1.082 口/km², 略大于现有的井网密度 1.007 口/km², 表明目前的井网应当适当加密。打开厚度为 7m 时, 合理井网密度为 9.436 口/km²; 而在目前平均打开厚度 (124m) 下, 合理井网密度应为 1.084 口/km², 与

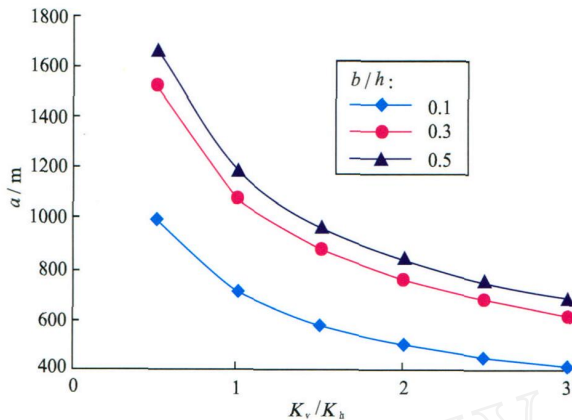


图4 不同打开程度下 S48 单元 a 与 K_v/K_h 关系曲线

开发初期合理井网密度最小值及目前井网密度接近,但目前的开发效果并非尽如人意,这既与油藏的非均质性有关,又与各油井的打开厚度差异较大、各井泄油面积与打开厚度不匹配等情况密不可分。

由于油藏的非均质性和各井打开厚度的差异,宜采取不均匀的布井方式,因此合理井网密度对实际井网布置的指导意义不大,合理井距则更为贴近实际。图5为 S48 单元合理井距、合理井网密度与打开厚度关系曲线。由图5可见,当打开厚度为油层厚度的 1/2 (即打开厚度为 118.5m,打开程度为 50%)时,合理井网密度最小,合理井距最大;当打开厚度小于油层厚度的 1/2 时,随着打开程度的增加,合理井距增大;当打开厚度大于油层厚度的 1/2 时,随着打开程度的增加,合理井距减小。由于受到钻井前对油藏认识程度和钻井中具体情况(如严重的井漏、井喷等)的限制,打开程度往往难于精确把握,因此在开发初期可由(11)式根据已完钻井的打开厚度等资料计算合理井距,为下一口井的部署提供依据。在开发中后期对井网加密时则可由(6)式计算合理井网密度(经简单换算,亦可得到相应的合理井距),以确定加密井的具体位置,并可在在此基础上根据(7)式计算与之匹配的合理打开厚度。

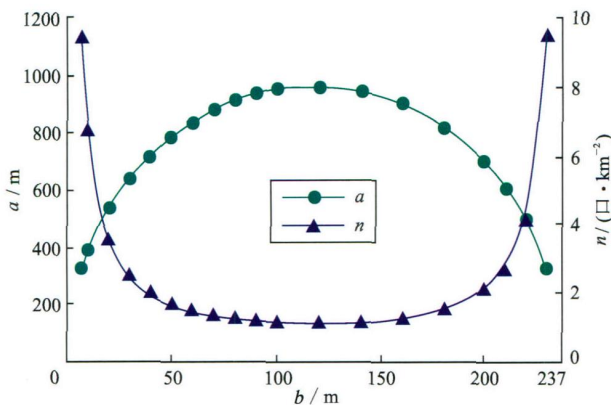


图5 S48 单元 a 、 n 与 b 关系曲线

5 结论与建议

裂缝性碳酸盐岩底水油藏的合理打开程度和合理井网密度受 K_v/K_h 值的影响,合理打开程度不宜超过 50%。当打开厚度为油层厚度的 1/2 (即打开程度为 50%)时,合理井网密度最小,合理井距最大。

开发过程中,随着含水饱和度的增加,最佳打开厚度减小,实际生产中应逐段封堵打开井段。随着 K_v/K_h 值的增加,合理井距减小。实际布井过程中,应根据不同区域的裂缝发育情况,采取不均匀布井方式。

对于裂缝性碳酸盐岩底水油藏,在布井过程中应根据已有井的资料计算合理井距(或合理的泄油半径),确定新井位置,进而计算与之匹配的合理打开厚度。

参考文献:

- [1] 闫伟鹏,朱筱敏,古莉,等. 酒西坳陷青西油田下白垩统储集层裂缝研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 54-56.
- [2] 张抗,王大锐, Bryan G Huff. 塔里木盆地塔河油田奥陶系油气藏储集层特征(英文)[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 123-126.
- [3] 蔡正旗,张荣义,郑超,等. 碳酸盐岩裂缝-孔隙型储集层综合预测方法研究——以川东大池干井构造带 T_{1j2}^2 储集层预测为例[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 65-68.
- [4] 林忠民,李正芬,罗传容. 塔河油田奥陶系岩溶发育及受控因素[A]. 塔里木盆地北部油气田勘探与开发论文集[C]. 北京:地质出版社, 2000. 24-35.
- [5] 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 262-266.
- [6] 谭承军,周英杰,杜玉山,等. 塔河油田 4 区奥陶系储层非均质性[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(6): 509-510.
- [7] 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 508-509.
- [8] 谭承军,吕景英,李国蓉. 塔河油田碳酸盐岩油藏产能特征与储集层类型的相关性[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(3): 43-45.
- [9] 陈志海,戴勇,郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 101-105.
- [10] 陈志海,戴勇,郎兆新. 缝洞性油藏油井产量变化分形特征及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 95-98.
- [11] 朱怀江,何帆,王容军,等. 高温裂缝性油藏超深井堵水现场试验成败因素分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 129-132.
- [12] 李传亮. 底水油藏油井最佳打开程度研究[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(1): 57.
- [13] 韦建伟,罗峰,唐人选. 关于开采底水油藏几个重要参数的确定[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(5): 25-27.
- [14] 陈忠祥,陈于果. 重力场下裂缝—孔隙地层中的二相驱替[A]. 碳酸盐岩油气田开发文集[C]. 北京:石油工业出版社, 1988. 31.
- [15] 张建国,雷光伦,张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营:石油大学出版社, 1998. 101-102.

第一作者简介:吕爱民(1970-),男,河北乐亭人,博士,现为中国石油大学(华东)讲师,主要从事油气田开发方面的教学和研究工作。地址:山东省东营市,中国石油大学(华东)石油工程学院,邮政编码:257061。E-mail: hdpulam@163.com

收稿日期:2006-06-26 修回日期:2007-10-25

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)