

文章编号: 0253-2697(2005)04-0111-04

水平井与直井联合井网见水时间的确定方法

武兵厂¹ 姚 军¹ 张继宏² 吕爱民¹

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061; 2. 胜利油田采油工艺研究院 山东东营 257000)

摘要: 将水平井简化为具有等效井筒半径的直井,考虑了水平井与直井联合布井水驱油的非活塞特性,运用等值渗流阻力法将渗流区划分为 3 个阻力区,推导出了 5 种典型的水平井与直井联合井网的油井见水时间计算公式。并研究了水平井长度对不同井网见水时间的影响。引入见水系数对计算公式进行了修正,理论计算值与模拟值基本一致,能够满足油藏工程计算的需要。

关键词: 水平井;直井;渗流阻力;水驱;井网;见水时间;计算公式

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

Determination of water breakthrough time in horizontal-vertical well pattern

WU Bing-chang¹ YAO Jun¹ ZHANG Ji-hong² L ÜAi-min¹

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

2. Oil Production Technological Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract: A horizontal well was simplified into a vertical well with equivalent well bore radius. The seepage flow region was divided into three resistance regions by the equivalent seepage flow resistance method, in consideration of the nonpiston-like displacement in the horizontal-vertical well pattern. The formulas for determining water breakthrough time of five typical combined well patterns were derived. The influence of the length of horizontal well on water breakthrough time was analyzed. The theoretical formula was amended by introducing a correction coefficient. The theoretical calculation value is consistent with the numerical result basically. It is shown that the corrected theoretical formula can meet the requirements of reservoir engineering calculation.

Key words: horizontal well; vertical well; seepage flow resistance; water flooding; well pattern; water breakthrough time; calculation formula

随着水平井钻井技术的发展及钻井成本的大幅度降低,水平井与直井联合布井方式越来越受到人们的重视,并已应用到油田的实际生产过程中。目前无论是对于水平井单井渗流问题^[1,2],还是水平井与直井的联合开采问题的研究^[3~5],大多数局限于单相流体的流动。而在实际油田开发中,水平井与直井联合布井的水驱油方式是非活塞性的,各油田主要运用数值模拟来优化布井方式^[6]。为寻求一种简单而有效的方法,笔者提出利用水驱油渗流阻力的研究方法,将水平井转化为等效的直井来处理。根据等值渗流阻力法将渗流区域分成 3 个阻力区进行研究,对联合井网的见水时间进行了理论推导,并得出了相关的计算公式。

1 水平井与直井联合井网有效半径计算公式

本次研究选定了 5 种水平井与直井的联合井网(图 1)。各井网均是以中心直井为注水井,周围水平

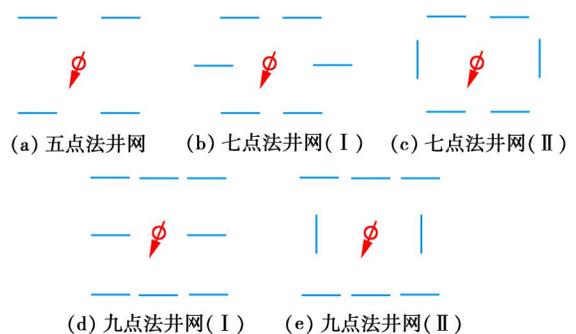


图 1 5 种水平井与直井联合井网示意图

Fig. 1 Five typical horizontal-vertical combined well patterns

井为采油井。

利用将一口水平井的产能转化成一口等价垂直井的方法,可以计算出一口水平井的有效井筒半径。水平井有效井筒半径的定义式为^[1]

$$r_w = r_w \exp(-s) \quad (1)$$

式中 r_w 为垂直井的井筒半径, m; s 为表皮系数。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA616170)部分研究成果。

作者简介:武兵厂,男,1975年3月生,1997年毕业于石油大学(华东)采油工程专业,现为中国石油大学(华东)硕士研究生,主要从事水平井油藏工程研究。E-mail:wbc750303@sina.com

假设两者泄油体积和生产指数相等,考虑油藏的非均质性,则可以推导出与水平井相同产量下所要求的垂直井的井筒半径,其计算式为^[1]

$$r_w = r_{eh} L \left\{ 2 \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \right] \left(\frac{h}{2 r_w} \right)^{h/L} \right\} \quad (2)$$

式中 r_{eh} 为水平井的泄油半径, m; h 为油层厚度, m; L 为水平井长度, m; r_w 为水平井泄油椭圆长轴的半径, m; 其计算公式为

$$= (L/2) \left[0.5 + \sqrt{0.25 + (2 r_{eh}/L)^4} \right]^{1/2}$$

为渗透率各向异性系数,其计算公式为

$$= \sqrt{k_v/k_h}$$

式中 k_v 为垂向渗透率, μm^2 ; k_h 为水平渗透率, μm^2 。

2 水平井与直井联合布井渗流阻力的计算

在面积注水的“单元”系统内,以注水直井为中心,周围布置 $n-1$ 口水平生产井。假定油层均质等厚,油、水井保持注采平衡,忽略油层和流体的弹性及水平井筒内的压力损失,根据等值渗流阻力法,将渗流区域分成 3 个不同的渗流阻力区。正五点法井网单元渗流阻力区的划分示意图如图 2 所示。

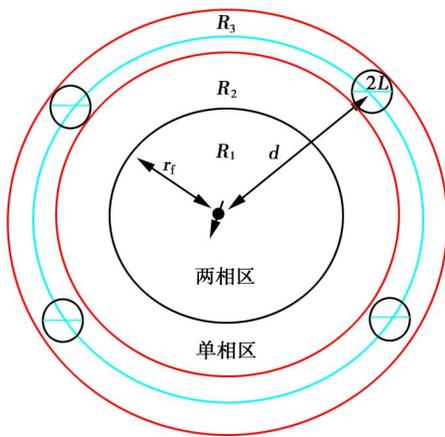


图 2 正五点法井网单元渗流阻力区的划分

Fig. 2 Division of seepage flow resistance regions in five-spot well pattern

从注水井井底到油、水接触前缘的两相渗流区,其渗流阻力 R_1 可以表示为^[7]

$$R_1 = \frac{\mu_w}{2 k_h h} \left[1.71 \ln \frac{r_f}{r_w} + 12 Z_f + 25 Z_f^2 \right] \quad (3)$$

式中 μ_w 为地层水粘度, mPa·s; r_f 为油水前缘半径, m; Z_f 为油、水接触前缘的可流动含油饱和度,其计算公式为

$$Z_f = 0.1 \sqrt{\mu_R / [1.5(1 - S_{or} - S_{wi}) - Z_f]}$$

式中 μ_R 为地层油水粘度比, 无因次; S_{or} 为残余油饱和度; S_{wi} 为束缚水饱和度。

从油水接触前缘到“生产坑道”的单相原油渗流区的渗流阻力 R_2 可以表示为

$$R_2 = \frac{\mu_o}{2 k_h h} \ln \frac{d}{r_f} \quad (4)$$

式中 d 为同一注采单元水平井中心到直井的距离, m; μ_o 为原油粘度, mPa·s。

将长度为 L 的水平井简化为有效井筒半径为 r_w 的直井,则从“生产坑道”到水平生产井井底的渗流阻力 R_3 可以表示为^[8]

$$R_3 = \frac{\mu_o}{2 k_h h} \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \quad (5)$$

式中 i 为不同面积注水方式的生产井与注水井的井数比。

根据水电相似原理, n 点井网的总阻力 R 为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (6)$$

将式(3)~式(5)代入式(6)得

$$R = \frac{\mu_w}{2 k_h h} \left[1.71 \ln \frac{r_f}{r_w} + 12 Z_f + 25 Z_f^2 + \mu_R \ln \frac{d}{r_f} + \mu_R \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] \quad (7)$$

求出了总的渗流阻力 R 后,相应的生产水平井的产量可以表示为

$$q_h = \frac{p_{wi} - p_{wp}}{R} = p \left\{ \frac{\mu_w}{2 k_h h} \left[1.71 \ln \frac{r_f}{r_w} + 12 Z_f + 25 Z_f^2 + \mu_R \ln \frac{d}{r_f} + \mu_R \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

式中 p_{wi} 和 p_{wp} 分别为注水井注入压力和生产井的井底流压, MPa; p 为生产压差, MPa。

3 水平井见水时间计算公式的推导

根据文献[8],在油井见水前可以确定油水前缘的位置,从而可以得到以下方程

$$r_f^2 h \phi = Q(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (9)$$

式中 $Q(t)$ 为 t 时刻的累积注水量, m^3 ; ϕ 为孔隙利用系数 ($0 < \phi < 1$)。

将式(8)与式(9)联合,积分可得

$$t = \frac{\mu_w \phi r_f^2}{2 k_h p} \left\{ 12 Z_f + 25 Z_f^2 - 1.71 \ln r_w + \mu_R \left[\ln d + \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] + (1.7 \cdot \mu_R) (\ln r_f - 0.5) \right\} \quad (10)$$

当 $r_f = d - r_w$ 时,生产水平井见水,将 $r_f = d - r_w$ 代入式(10)即可得到见水时间 t 的表达式为

$$t = \frac{\mu_w \phi (d - r_w)^2}{2k_h p} \left\{ 12Z_i + 25Z_i^2 - 1.7 \ln r_w + \mu_R \left[\ln d + \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] + (1.7 - \mu_R) \cdot \ln(d - r_w) - \frac{1}{2} \right\} \quad (11)$$

对于五点井网, $i = 1$; 七点井网, $i = 2$; 九点井网, $i = 3$; 将其代入式(11), 即可得到各种井网的见水时间。

为了验证上述公式的有效性, 利用数值模拟方法对不同的井网分别进行了模拟。所取的油藏参数如下: 水平井泻油长度为 600m, 油藏厚度为 6m, 水平渗透率为 $0.1 \mu\text{m}^2$, 垂直渗透率为 $0.01 \mu\text{m}^2$, 原油粘度为 $3.7 \text{mPa} \cdot \text{s}$, 地层水粘度为 $1.0 \text{mPa} \cdot \text{s}$, 残余油饱和度为 0.25, 束缚水饱和度为 0.25, 孔隙度为 0.2, 生产压差为 7MPa。水平井无因次长度取值见表 1。

表 1 水平井无因次长度

Table 1 Dimensionless length of horizontal well

联合井网	水平井无因次长度				
五点法	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
七点法	0.1	0.3	0.5	0.7	
九点法	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

由于计算模型的简化处理, 计算得到的见水时间与数值模拟得到的见水时间有一定的误差。为了修正式(11)所带来的计算误差, 引入见水系数。见水系数定义为同一联合井网见水时间的计算值与模拟值的比值。将见水系数看作是无因次水平井长度 L_d (水平井长度与泄油长度之比) 的函数, 经过回归可以得出见水系数与无因次水平井长度 L_d 的关系表达式。

对于五点法井网

$$= 1.285L_d^3 - 2.392L_d^2 + 1.117L_d + 0.927$$

对于七点法井网()

$$= 5.664L_d^3 - 5.469L_d^2 + 0.4L_d + 0.716$$

对于七点法井网()

$$= 3.562L_d^3 - 3.799L_d^2 + 1.236L_d + 0.705$$

对于九点法井网()

$$= 4.531L_d^3 - 4.005L_d^2 + 0.305L_d + 0.852$$

对于九点法井网()

$$= 1.169L_d^3 - 2.725L_d^2 + 1.761L_d + 0.773$$

其相关系数 R 分别为 0.9932、0.9994、0.9698、0.9998 和 0.9994。

将相应的见水系数代入式(11), 则相应的修正公式变为

$$t = \frac{\mu_w \phi (d - r_w)^2}{2k_h p} \left\{ 12Z_i + 25Z_i^2 - 1.7 \ln r_w + \mu_R \left[\ln d + \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] + (1.7 - \mu_R) \ln(d - r_w) - \frac{1}{2} \right\} \quad (12)$$

不同井网见水时间的计算值和模拟值的对比分别见图 3 至图 7。

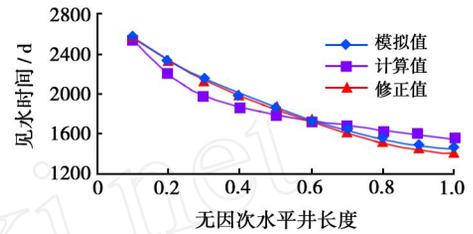


图 3 五点法井网见水时间对比曲线

Fig. 3 Comparative curves of water breakthrough time for five-spot well pattern

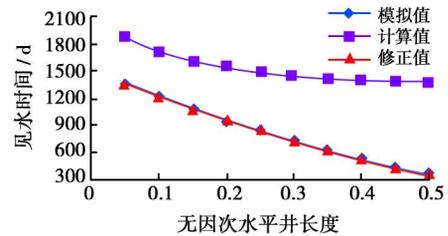


图 4 七点法井网() 见水时间对比曲线

Fig. 4 Comparative curves of water breakthrough time for seven-spot well pattern()

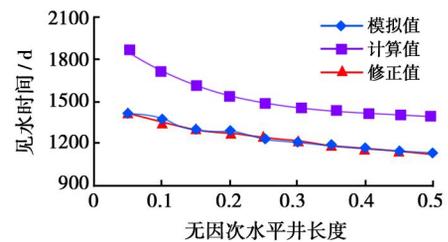


图 5 七点法井网() 见水时间对比

Fig. 5 Comparative curves of water breakthrough time for seven-spot well pattern()

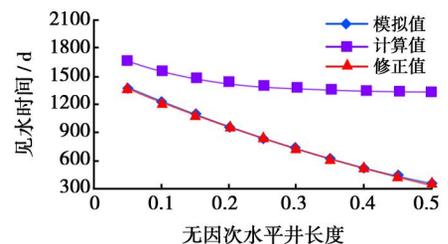


图 6 九点法井网() 见水时间对比

Fig. 6 Comparative curves of water breakthrough time for nine-spot well pattern()

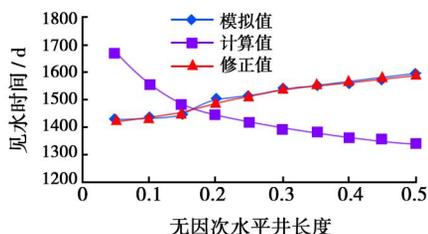


图7 九点法井网()见水时间对比

Fig.7 Comparative curves of water breakthrough time for nine-spot well pattern()

从图3至图7中可以看出:水平井长度对联合井网的见水时间有较大影响。对于五点法井网、七点法井网和九点法井网(),联合井网的见水时间都随着水平井长度的增加而减小。这主要是由于随着水平井长度的增加,井网主流线的长度不断减小。九点法井网()的见水时间是随着水平井长度的增加而增加,这主要是由于随着水平井长度的增加,其对井网主流线的方向产生了影响,使得井网主流线的长度增大。

在相同井距和生产条件下,五点法井网的见水时间最长,七点法井网与九点法井网的见水时间相当。这主要是由于五点法井网的主流线长度要大于相应的七点法和九点法井网的主流线长度。经修正后的见水时间的计算值能较好地拟合见水时间的模拟值。

4 结论

(1) 将水平井简化为具有等效井筒半径的直井,

利用等值渗流阻力法将井网单元划分为3个渗流阻力区,求出了各渗流区的阻力,并在此基础上得到了联合井网的见水时间计算式及修正式。修正式的计算结果与数值模拟结果基本一致,能够满足油藏工程的计算要求。

(2) 水平井长度对井网的见水时间有较大影响。

(3) 在相同的井距和生产条件下,五点法井网的见水时间比九点法井网与七点法井网的见水时间长。

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,1995:115-160.
- [2] 姚军,李爱芬,陈月明,等. 盒状砂岩油藏中水平井试井分析方法[J]. 石油学报,1997,18(3):105-109.
- [3] 朗兆新,张丽华,程林松,等. 水平井与直井联合开采问题—五点法面积井网[J]. 石油大学学报(自然科学版),1993,17(6):50-55.
- [4] 曲德斌,葛家理,王德民. 水平井与直井联合面积分布的开发理论研究(一)[J]. 石油勘探与开发,1995,22(1):35-40.
- [5] 曲德斌,葛家理,王德民. 水平井与直井联合面积分布的开发理论研究(二)[J]. 石油勘探与开发,1995,22(2):47-51.
- [6] 刘尚奇. 水平井热采油藏数值模型[J]. 石油学报,1995,16(2):63-70.
- [7] 阿库利申 A N. 油气田开发预测[M]. 北京:石油工业出版社,1993:68-88.
- [8] 法兹雷耶夫 P T. 油田面积注水[M]. 北京:石油工业出版社,1989:51-83.

(收稿日期 2004-10-14 改回日期 2005-01-26 编辑 黄小娟)

(上接第110页)

(2) 根据油井产能协调条件,建立了油井参数调整后的系统效率仿真模型。若进一步考虑设备的承载能力、产液量等约束条件,该模型也是抽汲参数优化设计的数学模型。

(3) 通过大量仿真计算,总结出了一套提高抽油机井系统效率的有效途径:应用节能型技术装备;优化设计机杆泵系统;加强抽油机井的科学管理。

(4) 提高抽油机井系统效率是一项系统工程,在推广应用节能设备的同时,优化机杆泵系统、加强抽油机井的科学管理,确保抽油机井在最优参数与最佳状态下工作,才能充分发挥系统的节能潜力,达到理想的节能效果。

参考文献

- [1] 董世民. 抽油机井动态参数的计算机仿真与系统优化[M]. 北京:

石油工业出版社,2003:50-70.

- [2] Gibbs S G. Predicting the behavior of sucker rod pumping systems[J]. JPT, 1963,14(7):116-121.
- [3] 余国安. 有杆泵抽油井的三维振动[J]. 石油学报,1989,10(2):16-21.
- [4] 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5793-93《机械采油系统效率测试计算方法》[S]. 北京:石油工业出版社,1994:1-10.
- [5] 张琪,主编. 采油工程原理与设计[M]. 东营:石油大学出版社,1989:138-143.
- [6] 郑海金,邓吉彬,唐东月. 提高机械采油系统效率的理论研究及应用[J]. 石油学报,2004,25(1):93-96.
- [7] 董世民. 抽油机设计计算与计算机实现[M]. 北京:石油工业出版社,1994:17-19.

(收稿日期 2004-09-09 改回日期 2005-01-07 编辑 黄小娟)