

文章编号:1000-5870(2005)05-0054-04

水平注水井与直井联合井网见水时间研究

赵冬梅, 武兵厂, 姚 军, 吕爱民, 刘香山

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:为了寻求一种简单、有效的计算水平注水井与直井联合井网的见水时间的方法,将水平井简化为具有等效井筒半径的直井,考虑水平井与直井联合布井水驱油的非活塞性,运用等值渗流阻力法将渗流区划分为3个阻力区,推导出了五点法、七点法和九点法水平井与直井联合井网的油井见水时间的计算公式和修正公式。计算结果表明,井网的见水时间随水平井长度的增加而缩短;相同的井距和生产条件下,五点法井网的见水时间要长于九点法和七点法井网;随水平井与水平方向夹角的增大,五点法井网的见水时间缩短,七点法井网的见水时间先增加后缩短,九点法井网的见水时间增加;油藏和流体参数对井网见水时间影响不大。

关键词:见水时间;水平井;直井;渗流阻力;水驱;联合井网

中图分类号:TE 312 **文献标识码:**A

Water breakthrough time in combination well pattern of horizontal and vertical wells

ZHAO Dong-mei, WU Bing-chang, YAO Jun, LÜ Ai-min, LIU Xiang-shan

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

Abstract: In order to find out a simple and efficient method to calculate the water breakthrough time in combination well pattern of horizontal and vertical wells, simplifying a horizontal well into a vertical well with the same well-hole radius, and considering the unipiston-like displacement, the water breakthrough time formulas of five-spot, seven-spot and nine-spot pattern were derived and revised by equivalent percolating resistance method. In this method, the percolation region is divided into three resistance regions. The results show that the water breakthrough time shortens with the increase of the horizontal well length. Under the same well space and production conditions, the water breakthrough time of five-spot pattern is longer than that of seven-spot and nine-spot pattern. With the increase of angle between the horizontal well and the horizontal direction, the water breakthrough time shortens in five-spot well pattern, firstly increases and then decreases in seven-spot pattern, and increases in nine-spot pattern. The influence of reservoir and fluid parameters on the water breakthrough time is little.

Key words: water breakthrough time; horizontal well; vertical well; percolating resistance; water displacement; combination well pattern

随着水平井钻井技术的发展及钻井成本的大幅降低,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],还是水平井与直井的联合开采问题的研究^[2-4],大多局限于单相流体的流动。而在实际油田开发过程中,水平井与直井联合布井的水驱油方式是非活塞性的,一般各油田运用数值模拟来优化布井方式。为寻求一种

简单而有效的方法,笔者运用水驱油等值渗流阻力法,将水平井转化为具有等价产能的直井来处理,从理论上对联合井网的见水时间进行推导计算,以用于指导油气田开发。

1 水平井的有效井筒半径的计算

将1口水平井转化为具有等价产能的垂直井,就可以计算出这口水平井的有效井筒半径。水平井

收稿日期:2005-04-26

基金项目:国家"863"科学基金项目(2004AA616170)

作者简介:赵冬梅(1963-),女(汉族),山西太原人,高级工程师,博士研究生,从事油田开发工作。

有效井筒半径的定义^[1]为

$$r_w = r_{w\text{exp}}(-S).$$

式中, r_w 为垂直井的井筒半径, m; r_w 为水平井的有效井筒半径, m; S 为表皮系数。

为了计算出与水平井所对应的相同产量下的垂直井的井筒半径, 假设两者泄油体积和生产指数相等, 即

$$V_{\text{eh}} = V_{\text{ev}}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{q_h}{p} \right)_h = \left(\frac{q_v}{p} \right)_v. \quad (2)$$

式中, V_{eh} 和 V_{ev} 分别为水平井和相应直井的泄油体积, m^3 ; q_h 和 q_v 分别为水平井和垂直井产量, m^3/d ; p 为生产压差, MPa。

考虑油藏的非均质性, 则

$$q_h = \frac{2 k_h h p / (\mu_o B_o)}{\ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2L} \right] + \frac{h}{L} \ln \left[\frac{h}{2 r_w} \right]}, \quad (3)$$

$$q_v = \frac{2 k_v h p / (\mu_o B_o)}{\ln(r_{\text{ev}} / r_w)}. \quad (4)$$

其中

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

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

式中, k_h 和 k_v 分别为水平和垂向渗透率, μm^2 ; h 为油层厚度, m; r_{ev} 和 r_{eh} 分别为垂直井和水平井的泄油半径, m; μ_o 为原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B_o 为原油体积系数; L 为水平井长度, m; a 为水平井泄油椭圆半长轴, m; $\sqrt{k_v / k_h}$ 为渗透率各向异性系数, 无因次。

利用式(1) ~ (4) 可以得出水平井有效井筒半径为

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

2 联合网的渗流阻力计算

在面积注水的单元系统内, 以生产水平井为中心, 周围布置 $n - 1$ (n 点井网) 口直井作为注水井, 正五点法井网见图 1。假定油水粘度比为 μ_R , 油层均质等厚, 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, 将渗流区域划分为 3 个不同的渗流阻力区。

将长度为 L 的水平井筒简化为等效的有效井筒半径为 r_w 的直井, 则从水平井井底到油水接触前缘的两相渗流区, 其渗流阻力 R_1 ^[6,7] 可以表示为

$$R_1 = \frac{\mu_w}{2 kh} \left[1.7 \ln \frac{r_f}{r_w} + 12 Z_f + 25 Z_f^2 \right]. \quad (5)$$

其中

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

式中, μ_w 为地层水粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; 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; S_{or} 为残余油饱和度, 小数; S_{wi} 为束缚水饱和度, 小数。

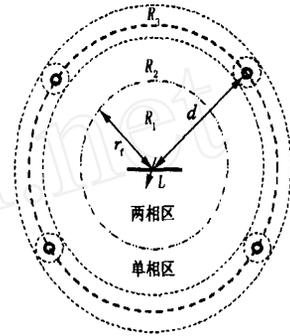


图 1 正五点法井网单元渗流阻力区划分示意图

Z_f 的具体计算也可以通过图解的方式, 求曲线

$f = 100 Z_f^2 / \mu_R$ 与 $f = \frac{1}{1.5(1 - S_{\text{or}} - S_{\text{wi}}) - Z_f}$ 的交点。

从油水接触前缘到“生产坑道”的单相渗流区的渗流阻力 R_2 可以表示为

$$R_2 = \frac{\mu_o}{2 kh} \ln \frac{d}{r_f}. \quad (6)$$

式中, d 为同一注采单元水平井中心到直井的距离, m。

从“生产坑道”到垂直注水井井底的渗流阻力 R_3 ^[5] 可以表示为

$$R_3 = \frac{\mu_o}{2 kh} \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w}. \quad (7)$$

式中, i 为不同面积注水的生产井与注水井的井数比。

通过以上分析, 根据水电相似原理, n 点井网的总渗流阻力 R 为

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (8)$$

将式(5) ~ (7) 代入式(8) 得

$$R = \frac{\mu_w}{2 kh} \left[1.7 \ln \frac{r_f}{r_w} + 12 Z_f + 25 Z_f^2 + \mu_R \ln \frac{d}{r_f} + \mu_R \frac{1}{i} \ln \left[\frac{d}{2(i+1)r_w} \right] \right].$$

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

$$q = \frac{p_{\text{wi}} - p_{\text{wp}}}{R} = \frac{-p}{R}. \quad (9)$$

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。

3 水平井见水时间的公式推导

根据文献[5],可以得到油井见水前确定的油水前缘的位置,从而可以得到以下方程:

$$r_f^2 h = Q(t) = \int_0^t q(t) dt.$$

其中

$$= 1 - S_{or} - S_{wi} - Z_f.$$

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

因为

$$q(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dr_f} \frac{dr_f}{dt} = 2 r_f h \frac{dr_f}{dt},$$

所以

$$dt = \frac{2 r_f h}{q(t)} dr_f, \quad t = \int_0^{r_f} \frac{2 r_f h}{q(t)} dr_f. \quad (10)$$

将式(9)代入到式(10)中,积分可得

$$t = \frac{\mu_w r_f^2}{2k p} \left\{ 12 Z_f + 25 Z_f^2 - 1.7 \ln r_w + \mu_R \left[\ln d + \frac{1}{i} \ln \frac{d}{2(i+1)r_w} \right] + (1.7 - \mu_R) \left[\ln r_f - \frac{1}{2} \right] \right\}. \quad (11)$$

当 $r_f = d$ 时,生产水平井见水,将 $r_f = d$ 代入式(11)即可得到见水时间 t 的表达式。对于五点井网, $i = 1$; 七点井网, $i = 2$; 九点井网, $i = 3$ 。将相应的 i 值代入式(11),即可得到各种井网的见水时间。

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。为了修正公式(11)所带来的计算误差,引入见水时间修正系数,则相应的修正公式变为

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

其中, μ 定义为同一水平井与直井联合井网见水时间的计算值与模拟值之比。将修正系数 μ 看作是水平井倾角 θ 和无因次水平井长度 L_D 的函数,经过回归得出了 μ 与水平井倾角 θ 和无因次水平井长度 L_D 的关系表达式。

对于五点法井网:

$$= -0.2164 L_D^3 + 0.7197 L_D^2 - 0.7233 L_D + 0.9115 L_D^3 - 1.3252 L_D^2 - 0.1823 L_D + 1.1304, \quad R^2 = 0.9742.$$

对于七点法井网:

$$= -0.2071 L_D^3 + 0.3206 L_D^2 + 0.0115 L_D - 0.5625 L_D^3 + 0.692 L_D^2 + 0.9658 L_D + 0.6618, \quad R^2 = 0.9785.$$

对于九点法井网:

$$= -0.1637 L_D^3 + 0.4037 L_D^2 - 0.0665 L_D - 0.5677 L_D^3 + 1.2199 L_D^2 - 1.287 L_D + 0.656, \quad R^2 = 0.9596.$$

为了验证上述公式的有效性,利用数值模拟方法对不同井网分别进行了模拟。计算所取的油藏参数为:水平井泄油半径 600 m,水平渗透率 $0.1 \mu m^2$,垂直渗透率 $0.01 \mu m^2$,原油粘度 $3.7 mPa \cdot s$,地层水粘度 $1 mPa \cdot s$,油藏厚度 6 m,残余油饱和度 0.25,束缚水饱和度 0.25,孔隙度 0.2,生产压差 7 MPa。计算所取水平井参数见表 1。不同井网见水时间的计算值和模拟值的对比见图 2~6。

表 1 水平井影响因素取值

井网	无因次水平井长度 L_D	水平井与水平方向夹角 $\theta / (^\circ)$
五点法	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	0, 15, 30, 45
七点法	0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0, 10, 20, 30, 45, 60, 90
九点法	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	0, 15, 30, 45

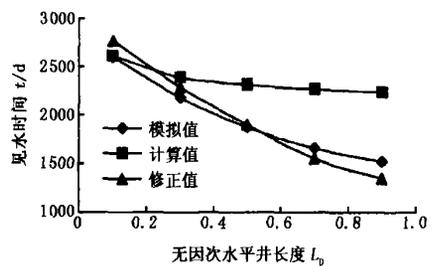


图 2 $\theta = 0^\circ$ 时五点法井网见水时间曲线

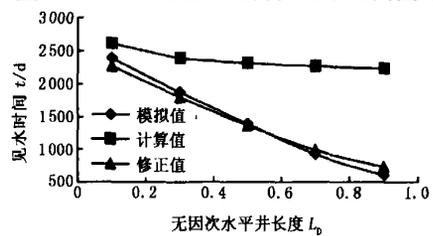


图 3 $\theta = 45^\circ$ 时五点法井网见水时间曲线

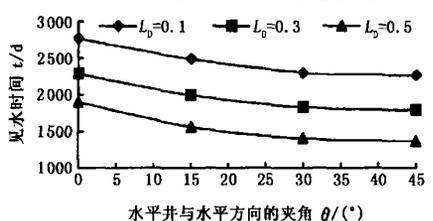


图 4 五点法井网见水时间对比曲线

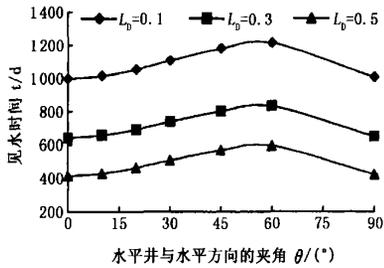


图 5 七点法井网见水时间对比曲线

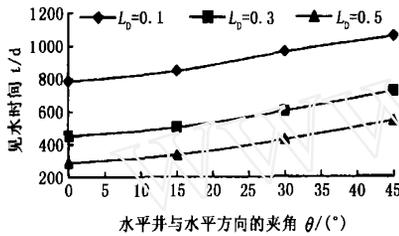


图 6 九点法井网见水时间对比曲线

从图 2 ~ 6 中可以看出:

(1) 无论水平井的倾角如何变化,不同井网的见水时间都随着水平井长度的增加而缩短。

(2) 在相同的井距和生产条件下,五点法井网的见水时间最长,九点法井网与七点法井网的见水时间相当。

(3) 水平井与水平方向的夹角对不同井网的见水时间有一定的影响,这主要是由于水平井与水平方向夹角的变化使得整个井网主流线的方向发生了改变。随着水平井与水平方向夹角的增大,五点法井网的见水时间缩短,七点法井网的见水时间先增加后缩短,在夹角为 55°左右时取得见水时间最大值,九点法井网的见水时间增加。

(4) 经修正后的见水时间的计算值与模拟值吻合较好,其精度能够满足油藏工程计算的需要。

4 其他参数对见水时间的影响

利用公式(12)研究了井距和油水流量比对井网见水时间的影响,并与数值模拟结果进行了对比。结果见图 7 和图 8。

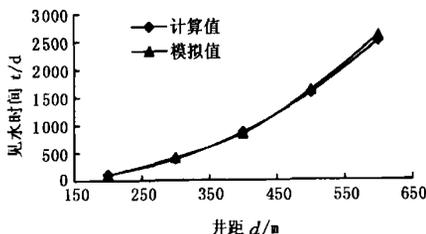


图 7 不同井距下的见水时间曲线

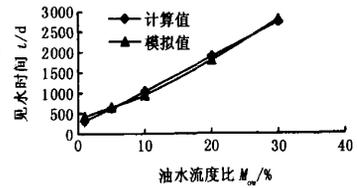


图 8 不同油水流量比下的见水时间曲线

从图中可以看出,利用公式(12)得到的见水时间的计算值与模拟值吻合较好,说明井距和油水流量比对不同井网的见水时间影响不大,即修正的计算公式受油藏和流体参数的影响不大。

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.
- [2] 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),1993,14(6):50-55.
LANG Zhao-xin, ZHANG Li-hua, CHENG Lin-song, et al. Combined production of vertical and horizontal wells—a 5-spot well pattern[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1993, 14(6):50-55.
- [3] 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——一般的五点井网(一)[J]. 石油勘探与开发,1995,22(1):35-38.
QU De-bin, GE Jia-li, WANG De-min. Combination production of vertical and horizontal wells—5-spot well pattern[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(1):35-38.
- [4] 葛家理,王德民,曲德斌. 水平井与直井联合面积分布的开发理论研究(二)——七点法面积井网[J]. 石油勘探与开发,1995,22(2):47-50.
GE Jia-li, WANG De-min, QU De-bin. A combination of vertical and horizontal wells, in a 7-spot well pattern [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(2):47-50.
- [5] 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [6] 阿库利申. 油气田开发预测[M]. 周成勋,孙志道,译. 北京:石油工业出版社,1993.
- [7] P T 法兹雷耶夫. 油田面积注水[M]. 杨寿山,译. 北京:石油工业出版社,1989.

(编辑 李志芬)