

石油技术

低渗透油田水平井产能公式改进

臧 伟

(中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712)

摘要 在前人研究的基础上, 对水平井的产能公式进行了分析。应用数理统计方法对低渗透油藏水平井产能公式进行了改进, 使水平井的产能公式更加完善。将改进的公式应用到大庆外围低渗透油田。其计算结果与水平井实际的生产数据比较接近, 对大庆外围低渗透油田水平井的设计具有一定的指导意义。

关键词 水平井 产能 数理统计 低渗透

中图法分类号 TE355.6 **文献标志码** A

我国的低渗透石油资源储量丰富, 其储量大于总探明储量的 50%。根据国内外水平钻井的生产实践, 水平井在低渗透率油藏开采实践中^[1]可以取得比直井更好的开发效果。水平井技术于 1928 年提出, 1937 年开始用于采油, 20 世纪 80 年代中期以来, 水平井钻井技术在世界范围内取得了突飞猛进的发展。现已成为新油田开发、老油田挖潜、提高采收率的重要手段。20 世纪 40 年代起, 国内外对水平井的产能已经做了大量的研究。如水平井产能的描述主要有稳态解和拟稳态解两种。而稳态解只能用于投采前的产能估算, 拟稳态适用于开采的后期, 这些方法用于低渗透油藏都受到一定的限制。因此, 研究低渗透油藏水平井的产能计算是十分必要的工作^[2]。

1 计算水平井产能的基本方法

1.1 稳态解

水平井产能计算是通过渗流稳态解析解得到的, 稳态解析解是水平井解中最简单的形式。Joshi、Giger、Borisov 等许多学者给出了水平井的稳态

解^[3]。这里给出最典型的 Joshi 预测的产能公式。

Joshi 运用拟三维的求解思想: 1986 年, 美国 Joshi 利用电场流理论, 假定水平井的泄油体是以水平井两端点为焦点的椭圆体, 将三维渗流问题简化为垂直及水平面内的二维问题, 利用势能理论推导出了单相流体稳定流动时各向同性油藏水平井产能公式^[4]

$$J_h = \frac{\frac{2\pi K_h h}{\mu_0 B_0}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2r_w}} \quad (1)$$

式(1)中: a 表示泄油椭圆主轴的一半, 其表达式为

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

式(2)中 J_h —水平井的采油指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$;

K_h —水平方向的渗透率, mD ;

h —油藏有效厚度, m ;

μ_0 —原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

B_0 —地层体积系数;

r_w —井筒半径, m ;

L —水平井长度, m ;

r_{eh} —泄油半径, m 。

若考虑油藏的非均质性, 公式(1)变为

2010 年 8 月 25 日收到

作者简介: 臧 伟(1982—), 女, 黑龙江人, 硕士生, 助理工程师, 研究方向: 油藏工程, E-mail: zangw@petrochina.com.cn。

$$J_h = \frac{\frac{2\pi K_h h}{\mu_0 B_0}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{\beta^2 h}{L} \ln \frac{h}{2r_w}} \quad (3)$$

式(3)中

$$\beta = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \circ$$

式中 K_v —垂直方向的渗透率, mD。

1.2 拟稳态解

当生产井所产生的压力扰动传到该井的泄油面积边界时, 拟稳态开始。在拟稳态情况下, 油藏的边缘压力及平均压力将随采出流体的增加而减小, 它可以被描述为半稳定状态或衰竭状态。大多数油藏在大部分时间内都是在拟稳态条件下进行生产的, 低渗透油藏表现尤为突出。拟稳态假设油藏边界是封闭的。对于单相流动来讲, 计算水平井的拟稳态解有三种方法^[5], 即 Mutualik 法, Badu 和 Odeh 法, Kuchuk 法。通常 Badu 和 Odeh 法给出最低的产量, 而 Kuchuk 法给出最高的产量。这里给出 Mutualik 法。

Mutualik 法:

对于 $\frac{2X_e}{2Y_e} = 1 \sim 20$ 的矩形泄油面积, Mutualik 等人

发表了水平井泄油体积中不同位置的形状因子和对应的相关表皮因子。其产能计算公式为

$$J_h = \frac{\frac{2\pi K_h}{\mu_0 B_0}}{\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - A + S_f + S_m + S_{ca,h} - c' + D_q} \quad (4)$$

式(4)中:

$$r_e' = \sqrt{\frac{A}{\pi}},$$

S_m —机械表皮系数, 无因次;

S_f —长度为 L 的在厚度上完全穿透的无限导流裂缝的表皮因子;

$$S_f = -\ln \left[\frac{L}{(4r_w)} \right] \circ$$

$S_{ca,h}$ —形状相关表皮系数;

c' —形状因子转换常数 = 1.386。

对于圆形泄油面积系数 $A = 0.750$; 而对正方形和矩形泄油面积系数 $A = 0.738$ 。

2 低渗透油藏水平井产能公式修正

利用稳态解计算的水平井产能存在一定的局限性, 在低渗透油田中, 利用拟稳态更为广泛^[3], 但是在实际生产中拟稳态方法也不能准确地计算水平井的产能。因此, 进行适当的公式改进是必要的。

在万仁溥先生的水平井开采技术书中, 给出了美国矿场单位中的 2π 可以用 0.007 078 代换, 本文的目的是通过统计大庆外围已经投产的几口井数据, 利用概率的随机变量分布规律来修正 Joshi 的稳态产能公式中的 2π 。找到更适合于低渗透油藏的参数, 使其产量计算值更加精确。

从大庆外围低渗透油藏中取 10 口井的动态数据, 见表 1。

$$\text{令 } \frac{\frac{K_h h}{\mu_0 B_0}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{\beta^2 h}{L} \ln \frac{h}{2r_w}} = A_i, 2\pi = X_i$$

($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 通过公式可以计算出 X_i 的值, 如表 1。通过表 1 可以看出, X_i 服从连续型随机变量的近似均匀分布, 设 $X \sim U[a, b]$, 即 X 有密度

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

由定义 $E(x) = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = 0.540$, X_i 的数学期望为 0.540。

反映随机变量总体大小特征的统计量是数学期望^[6], 从而得出 X_i 的稳定值为 0.540, 改进后的 Joshi 公式为

表 1 10 口水平井生产数据表

区块	井号	水平段 长度/m	水平渗透 率/mD	体积 系数	泄油 半径/m	A_i	实际产量 $/(t \cdot d^{-1})$	X_i
肇州	1	300	13.32	1.097	332	19.132	10.4	0.543
	2	400	13.32	1.097	355	21.434	11.1	0.519
	3	500	13.32	1.097	376	23.262	12.4	0.533
	4	600	13.32	1.097	397	24.778	13.2	0.532
	5	300	13.32	1.097	383	18.608	10.4	0.558
熬南	6	700	2.7	1.124	359	5.570	3.0	0.538
	7	400	2.7	1.124	355	4.502	2.5	0.555
	8	500	2.7	1.124	376	4.836	2.6	0.537
	9	600	2.7	1.124	397	5.114	2.8	0.547
	10	700	2.7	1.124	417	5.351	3.0	0.560

$$J_h = \frac{\frac{0.540K_h h}{\mu_0 B_0}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{\beta h}{L} \ln \frac{\beta h}{2r_w}} \quad (5)$$

渗透油田的特殊性,因此可以利用此公式来计算大庆油田肇州、熬南等外围低渗透油田的水平井产能。

4 结论

(1) 利用稳态解计算的水平井产能存在一定的局限性,在低渗透油田中,利用拟稳态更为广泛,但是在实际生产中拟稳态方法也不能准确地计算水平井的产能。

(2) 反映随机变量总体大小特征的统计量是数学期望,从而得出 X_i 的最合理值为其数学期望的值。

(3) 通过结果分析表明,本文推导的低渗透的水平井的产能计算公式比较准确,可以广泛应用到水平井产能计算中。

参 考 文 献

- 李道品. 低渗透砂岩油田开发. 北京:石油工业出版社,1997
- 才博,段瑶瑶,赵峰. 部分射开水平井产能计算公式的改进. 天然气开发与开采,2007;3:46—50
- 万仁溥. 水平井开采技术. 北京:石油工业出版社,1995
- 高海红,王新民,王志伟. 水平井产能公式研究综述. 新疆石油地质,2005;26 (6):723—726
- 郑俊德,魏兆胜,陈家琅. 低渗透油田水平井产能预测方法研究. 大庆石油地质与开发,1995;14(4):46—50
- 王林书,鲍兰平,赵瑞清. 概率论与数理统计. 北京:科学出版社,1999

3 实例分析

3.1 实例计算

从外围水平井中选取大量的井数据对公式进行验证,从中选取肇 60—平 33 井进行详细的产能分析。表 2 为该井的基础参数。

表 2 肇 60—平 33 井的基础数据

水平段长/m	680
有效厚度/m	1.8
压差/MPa	5
黏度/(mPa·s)	6
实际产量/ $(t \cdot d^{-1})$	4.50
改进公式计算产量/ $(t \cdot d^{-1})$	4.51

用公式(5)计算肇 60—平 33 井的产能为 4.511 6 t/d ,误差在 5% 以内,可见改进后的产能公式非常接近生产实际。

3.2 结果分析

从表 2 可以看到,改进后的产能公式计算误差已经很小了,虽然存在差距,但是此方法考虑了低

(下转第 7720 页)

The Optimization of Reverse Emulsion Drilling Fluid Base Recipe and Temperature Resistance Evaluation

HE Jun-cai, FAN Zhen-zhong¹, ZHAO Heng¹, WANG Bo-tong², FAN Ying³, HE Meng-qi⁴, WANG Ling⁵

(Daqing Exploratory Drilling Engineering Corporation No. 2 Drilling Company, Daqing 163413, P. R. China;

Northeast Petroleum University, Petroleum Engineering Institute¹, Daqing 163318, P. R. China;

The university of Texas At Austin², Texas 77072;

U. S. ;Daqing Oilfield Limited-liabitify company No. 7 Oil Extration Factory³, Daqing 163517, P. R. China;

Drilling and Production Technology Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company⁴, Panjin 124010, P. R. China;

Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company⁵, Panjin 124010, P. R. China)

[Abstract] The reverse emulsion drilling fluid has been manufactured interior, the base recipe is 40% water + 60% diesel + 0.75% emulsifier + 2% stabilizer + 1% antifoaming agent. Then the high temperature ageing experiment has been done in 100°C、130°C、160°C. The result indicates that: the reverse emulsion drilling fluid rheological property has a little change at different temperatures aging, stability is good.

[Key words] reverse emulsion drilling fluid emulsifier stability

(上接第 7716 页)

Horizontal Well Productivity Formulae Improvement in Low Permeability Oilfield

ZANG Wei

(Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd , Daqing 163712, P. R. China)

[Abstract] On the basis of former studies, the productivity formula of horizontal wells is analyzed. Using mathematical statistics method, the productivity formula of horizontal wells in low permeability reservoir is modified, which makes the productivity formula of horizontal wells more perfect. The modified formula is applied in the low permeability outside reservoir of Daqing oil field. The computational solution is very close to the production data of horizontal wells. The design of horizontal wells in the low permeability outside reservoir of Daqing oil field is guided by the modified formula.

[Key words] horizontal well productivity mathematical statistics low permeability