

文章编号: 1000 0747(2006) 01 0087 04

蛇曲井稳态产能计算模型

戚志林^{1,2}, 杜志敏³, 汤勇³, 邓瑞健², 严文德¹

(1. 西南石油学院研究生院; 2. 中原油田勘探开发科学研究院; 3. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室)

基金项目: 国家自然科学基金项目“高含硫裂缝性气藏流体相变与气液固耦合综合模型研究”(50474039) 资助

摘要: 蛇曲井是一种新的复杂结构井, 其生产井段起伏较大, 不能直接用常规水平井产能公式计算其产能。以1口蛇曲井在无界地层中生产时引起的势分布为基础, 根据镜像反映和势叠加原理, 建立了底水油藏、气顶底水油藏及边水油藏中1口蛇曲井生产时的势分布和压力分布方程。考虑井筒流动和地层渗流的耦合作用, 建立了蛇曲井的稳态产能计算模型, 给出了模型的求解方法。实例计算表明: 当井的水平段起伏较大时, 不能将其处理为水平井, 而应根据蛇曲井产能计算模型计算其产能, 否则将导致产能预测出现较大偏差。图4表1参11

关键词: 蛇曲井; 产能模型; 势分布; 井筒压降

中图分类号: TE34

文献标识码: A

Steady state productivity model of snaky wells

QI Zhi lin^{1,2}, DU Zhi min³, TANG Yong³, DENG Rui jian², YAN Wen de¹

(1. Graduate College, Southwest Petroleum Institute, Sichuan 610500, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield Company, Sinopec, Henan 457001, China; 3. State Key Lab. of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Sichuan 610500, China)

Abstract: Snaky well is a new type of complex well. The wellbore pressure drop of snaky well can't be neglected for its producing interval has large fluctuation, and the conventional productivity calculation methods for horizontal wells could not be applied directly for snaky wells. It is necessary to set up a model for calculating steady state productivity of snaky wells. On the basis of a snaky well's distribution of potential produced in an infinite reservoir, this paper uses the mirror image and the principle of superposition to obtain the velocity potential and pressure distribution for bottom water reservoirs with and without gas cap and edge water reservoir. Coupling wellbore flow with fluid flow in the formation, a steady state productivity model for the snaky well is developed and solved. Example calculation shows that the steady state productivity model of snaky well should be used in calculating the productivity of a horizontal well with large fluctuation; otherwise, big errors would be produced.

Key words: snaky well; productivity model; potential distribution; wellbore pressure drop

0 引言

很多水平井的水平段并非是平直的, 而目前的水平井产能计算公式均未考虑该问题^[1-5]。若水平段起伏较小, 工程计算时允许将其简化为平直的水平段; 但若水平段起伏较大, 对井筒内流体的流动和地层流体的流入动态有不容忽视的影响时, 该井就不再是常规的水平井, 而是一种新的复杂结构井——蛇曲井。通常在下列情况下钻蛇曲井: ①开发纵向连通性较差的叠加层状油藏、不在同一平面的多个小断块油藏或孤立小储油砂体时, 用直井或水平井开采可能会因单井控制储量太低或钻井太多而经济效益较差, 而用蛇曲井开发则可节约油田开发综合成本; ②开发陡峭构造的薄层油藏时, 用直井或水平井难以设计出较长的生产井段, 而用蛇曲井则有可能获得经济产能; ③对油藏地质认识偏差较大, 在钻井时为了追踪储集层, 将设计

的水平井改为蛇曲井; ④当钻井技术无法达到要求或钻井出现较大失误时, 也会将设计的水平井钻成蛇曲井。目前国内外已有蛇曲井应用实例报道^[6-10], 但还没有其产能理论研究的相关报道。本文以蛇曲井在无界地层中的三维稳态势分布为基础, 根据镜像反映和势叠加原理, 得到了几种常见油藏中1口蛇曲井生产时的势分布及压力分布, 然后考虑井筒流动与地层渗流的耦合作用, 建立蛇曲井的稳态产能计算模型。

1 无界地层中的势分布

假设在均质、等厚、各向同性、无限大水平储集层中, 1口蛇曲井以恒定产量 Q 生产, 水平段长为 L , 裸眼完井, 流体不可压缩, 流动为稳定渗流且满足达西定律。将蛇曲井的生产井段从指端到跟端分为 n 个小段, 当 n 取值足够大时, 各小段的长度很小, 可将其处理为均匀入流直线汇(见图1)。第 i 段的长度和产量

分别为 L_i 和 Q_i ($i=1, 2, \dots, n$), i 段的两端点分别为 A_i (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) 和 B_i (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})。先求出第 i 段生产时在地层中产生的势, 然后根据叠加原理, 即可得到整口蛇曲井生产时在无界地层中引起的势。

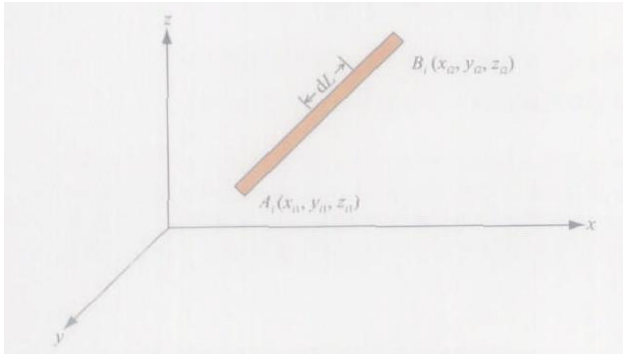


图1 无界地层中蛇曲井第 i 小段生产示意图

文献[3]给出了各向同性均质地层中1口水平井生产时, 在无界地层空间任意点 M 处引起的势:

$$\Phi = \frac{q}{4\pi L} \ln \frac{R-L}{R+L} + C \quad (1)$$

由(1)式可知, 水平井生产时, 在地层中任意点 M 处引起的势只与井筒的长度、产量及点 M 与井筒两端的距离有关。由于速度势是标量, 其大小与坐标轴的选取无关, 因此蛇曲井 i 段生产时在三维空间产生的势可表示为:

$$\Phi_i = \frac{Q_i}{4\pi L_i} \ln \frac{R_i - L_i}{R_i + L_i} + C \quad (2)$$

根据势叠加原理, 整个蛇曲井生产时, 在无界地层中任意点 M 处产生的势为:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i + C \quad (3)$$

2 几种常见油藏中的势分布

2.1 底水油藏

底水油藏的顶部为封闭边界, 底部油水界面为恒压边界, 油层厚度为 h (见图2)。

根据镜像反映原理, 可将底水油藏中的有限区域问题转换为便于求解的无界空间问题。通过油层顶面、底面镜像反映, 得到两类生产井上 i 小段两端点的 z 坐标分别为 $(4Nh + z_{i1}, 4Nh + z_{i2})$ 和 $(4Nh + 2h - z_{i1}, 4Nh + 2h - z_{i2})$, 两类注水井上 i 小段两端点的 z 坐标分别为 $(4Nh - z_{i1}, 4Nh - z_{i2})$ 和 $(4Nh - 2h + z_{i1}, 4Nh - 2h + z_{i2})$, 其中, $N=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm\infty$ 。根据势叠加原理, 可得底水驱油藏中1口蛇曲井生产时第 i 小段在地层中任意一点 M 处引起的势:

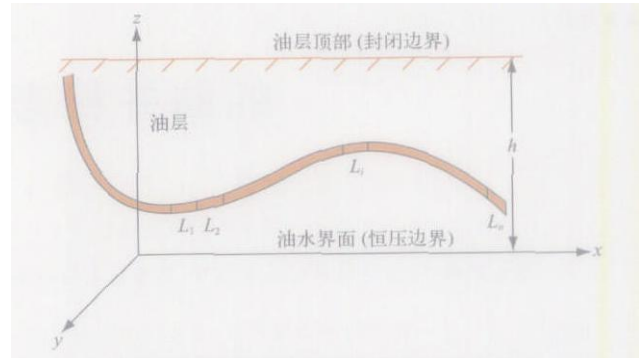


图2 底水油藏中蛇曲井生产示意图

$$\Phi_i = -\frac{Q_i}{4\pi L_i} \left\{ \sum_{N=-\infty}^{\infty} [\eta(z_{i1}, z_{i2}) + \eta(2h - z_{i1}, 2h - z_{i2}) - \eta_i(-z_{i1}, -z_{i2}) - \eta_i(-2h + z_{i1}, -2h + z_{i2})] \right\} + C \quad (4)$$

其中,

$$\eta_i(\alpha, \beta) = \xi_i(4Nh + \alpha, 4Nh + \beta, x, y, z) \quad (5)$$

$$\xi_i(\zeta_{iN}, \zeta_{iRN}, x, y, z) = \ln \left[\frac{R_N + L_i}{R_N - L_i} \right] \quad (6)$$

$$R_N = \sqrt{(x - x_{i1})^2 + (y - y_{i1})^2 + (z - \zeta_{i1})^2} + \sqrt{(x - x_{i2})^2 + (y - y_{i2})^2 + (z - \zeta_{i2})^2} \quad (7)$$

2.2 气顶底水油藏

若图2中油层顶部为油气界面(恒压边界), 则油藏变为气顶底水油藏。通过油层顶、底面镜像反映得到生产井上 i 小段两端点的 z 坐标为 $(2Nh + z_{i1}, 2Nh + z_{i2})$, 注水井上 i 小段两端点的 z 坐标为 $(2Nh - z_{i1}, 2Nh - z_{i2})$, 其中, $N=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm\infty$ 。根据势叠加原理, 可得气顶底水驱油藏中1口蛇曲井生产时, 第 i 小段在地层中任意一点 M 处引起的势:

$$\Phi_i = -\frac{Q_i}{4\pi L_i} \left\{ \sum_{N=-\infty}^{\infty} [\kappa(z_{i1}, z_{i2}, 0) - \kappa_i(-z_{i1}, -z_{i2}, 0)] \right\} + C \quad (8)$$

其中,

$$\kappa_i(\alpha, \beta, \gamma) = \xi_i(2Nh + \alpha, 2Nh + \beta, x, y + \gamma, z) \quad (9)$$

2.3 边水油藏

若图2中油藏顶、底部均为封闭边界, 而 $y \pm b$ 处为两油水界面(恒压边界), 则油藏为一边水油藏。根据镜像反映原理, 通过油层顶、底面镜像反映, 可得两类生产井 i 小段两端点的 z 坐标分别为 $(2Nh + z_{i1}, 2Nh + z_{i2})$ 和 $(2Nh - z_{i1}, 2Nh - z_{i2})$, 其中, $N=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm\infty$ 。通过油层两端油水界面反映的注水井 i 小段两端点的 x 坐标和 z 坐标与对应的生产井 i

小段两端点的 x 坐标和 z 坐标相同, 而 y 坐标为 $y \pm 2b$, 且注水井 i 小段的注入量为 $-Q_i/2$ 。根据势叠加原理, 可得边水油藏中 1 口蛇曲井生产时, 其第 i 小段在地层中任意一点 M 处引起的势为:

$$\Phi_i = \frac{Q_i}{4\pi L_i} \left\{ \sum_{N=-\infty}^{\infty} [\kappa_i(z_{i1}, z_{i2}, 0) + \kappa_i(-z_{i1}, -z_{i2}, 0) - \frac{1}{2}\kappa_i(z_{i1}, z_{i2}, 2b) - \frac{1}{2}\kappa_i(-z_{i1}, -z_{i2}, 2b) - \frac{1}{2}\kappa_i(z_{i1}, z_{i2}, -2b) - \frac{1}{2}\kappa_i(-z_{i1}, -z_{i2}, -2b)] \right\} + C \quad (10)$$

可根据叠加原理, 由(3)式计算得到蛇曲井在底水油藏、气顶底水油藏和边水油藏中生产时引起的势。

若油层为各向异性, 则令 $\beta = \sqrt{K_h/K_v}$, 用 $\sqrt{K_h K_v}$ 、 βh 和 βz 代替(3)式中的 K 、 h 和 z , 即可得到各向异性油藏中蛇曲井生产时的势分布。

由(3)式可得恒压边界或泄油边界处的势函数:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^n \Phi_i + C \quad (11)$$

根据势函数的定义, 有:

$$p = \mu \Phi / K - \rho g z \quad (12)$$

由(3)式、(11)式、(12)式可得:

$$p = p_e + \frac{\mu}{K} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \Phi_{ei}) - \rho g(z - z_e) \quad (13)$$

由(13)式, 可计算蛇曲井整个生产井段生产时地层中的任意点压力。

3 蛇曲井产能计算模型

考虑蛇曲井的井筒流动与地层渗流的耦合作用, 可得到蛇曲井的产能计算模型, 该模型包括以下 3 类方程。

3.1 井筒流动压降方程

蛇曲井第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 小段的压降^[10] 为:

$$\Delta p_i = f(Q, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n) \quad (14)$$

该小段两端点的压力分别为 p^{i1} 、 p^{i2} , 二者之间存在如下关系:

$$p^{i2} = p^{i1} + \Delta p_i \quad (15)$$

各小段端点的压力之间还存在如下关系:

$$p^{i1} = p^{(i-1)2} \quad (16)$$

蛇曲井第 i 小段中点的压力为:

$$p^{wfi} = (p^{i1} + p^{i2}) / 2 = p^{i1} + 0.5\Delta p_i \quad (17)$$

3.2 井筒流入动态控制方程

根据(13)式, 可得蛇曲井第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 小段的流入动态控制方程:

$$p_e - p^{wfi} = \frac{\mu}{K} \sum_{j=1}^n (\Phi_{ej} - \Phi_{ji}) - \rho g(z_{wi} - z_e) \quad (18)$$

于是可得到 n 个井筒流入动态控制方程。

3.3 物质平衡方程

根据物质平衡原理, 整个蛇曲井生产井段的流入量等于各个小段流入量之和, 因此有:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (19)$$

产能计算模型中共有 $2n+1$ 个方程, 需要求解的变量($Q, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, p^{w1}, p^{w2}, \dots, p^{wn}$)也是 $2n+1$ 个, 因而方程组是封闭的。

模型可采用迭代法求解, 即先假设一组 p^{wfi} , 根据(18)式解出 Q_i , 然后将其代入(17)式中更新 p^{wfi} , 再由(18)式更新 Q_i ; 如此反复, 直到 p^{wfi} 和 Q_i 均满足计算精度要求为止, 最后由(19)式即可求得全井产量。

4 实例计算与分析

蛇曲井起伏程度的大小可用起伏度来表征。起伏度的定义如下:

$$\varphi = (L - L_v) / L_v \quad (20)$$

由起伏度的定义可知, 平直水平井的起伏度为 0, 若井筒存在一定波状起伏, 则起伏度大于 0, 且起伏度越大井筒的起伏就越大。

在中国某底水油藏中对比研究蛇曲井和水平井的产能, 油藏的有关参数为^[11]: $K_h = 569\text{mD}$, $K_v = 280\text{mD}$, $h = 63\text{m}$, $z_w = 56.86\text{m}$, $\mu = 65\text{mPa}\cdot\text{s}$, $B_o = 1.031$ 。各井的井径均为 0.1098m , 水平段长度及起伏度见表 1。

表 1 设计各井的基本参数

井名	L (m)	L_v (m)	φ (f)
H1	599.5	599.5	0.000
S1	599.5	571.3	0.049
S2	599.5	563.6	0.064
S3	599.5	522.8	0.147
S4	599.5	495.5	0.210
S5	599.5	471.1	0.273
S6	599.5	453.2	0.323

H1 井的产能用文献[11]中的公式计算, 其余各井的产能用本文产能计算模型计算。图 3 为生产压差为 5.90MPa 时表 1 中各井产能与起伏度的关系。

保持油藏其他参数不变, 改变垂向渗透率, 计算可得 H1 井和 S6 井的产能与垂向渗透率关系(见图 4)。

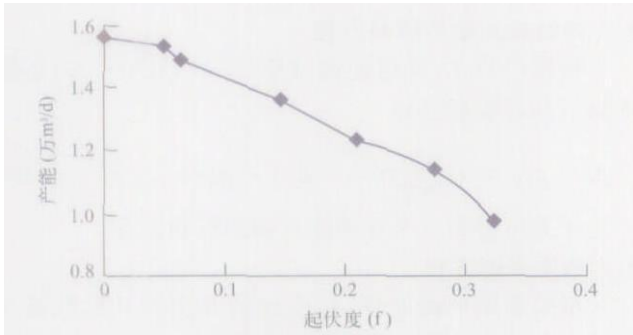


图3 各井产能与起伏度关系

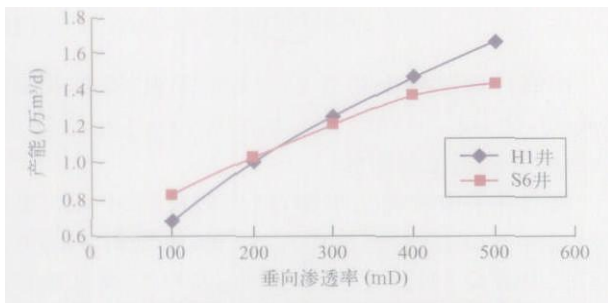


图4 H1井和S6井产能与垂向渗透率的关系

由图4可见, 尽管各井生产井段长度相同, 但产能差异较大。这表明当水平生产段起伏较大时, 不能将其处理为水平井, 而应根据蛇曲井的产能计算模型计算其产能, 否则产能预测将出现较大偏差。

计算结果还表明, 虽然渗透率各向异性对水平井和蛇曲井的产能都存在影响, 但对水平井的影响更大。对于垂向渗透率很低的油藏, 用蛇曲井开发可能获得较好的开发效果, 这对优化井眼轨迹有重要意义。

5 结语

本文建立了蛇曲井产能计算模型。模型计算结果表明, 用常规水平井产能公式计算蛇曲井的产能可能导致产能预测偏差较大。渗透率各向异性对蛇曲井产能的影响要小于对水平井产能的影响, 对于垂向渗透率很低的油藏, 用蛇曲井的开发效果可能较好。

符号注释:

Φ ——势函数, m^2/s ; q ——水平井的产量, m^3/s ; L ——水平井或蛇曲井水平生产段的实钻长度, m ; R ——空间点 M 到水平井两端点的距离之和, m ; C ——积分常数; Q_i ——蛇曲井 i 小段的产量, m^3/s ; L_i ——水平井或蛇曲井水平生产段第 i 小段的实钻长度, m ; R_i ——空间点 M 到蛇曲井 i 小段两端点的距离之和, m ; h ——油层厚度, m ; ζ_{LN} ——蛇曲井 i 小段的镜像反映井段的端点中与端点 (x_{i1}, y, z_{i1}) 相对应的端点的 z 坐标, m ; ζ_{RN} ——蛇曲井 i 小段的镜像反映井段的端点中与端点 (x_{i2}, y, z_{i2}) 相对应的端点的 z 坐标, m ; K_h ——油层水平渗透率, mD ; K_v ——油层垂直渗透率, mD ; Φ_e ——油藏边界处的势, m^2/s ; Φ_{ei} ——蛇曲井第 i 段在边界处产生的势, m^2/s ; p ——油层中任

意点的压力, MPa ; p_e ——恒压边界或泄油边界处的压力, MPa ; p_{wi} ——蛇曲井第 i 小段中点处的压力, MPa ; μ ——流体黏度, $mPa \cdot s$; K ——油层渗透率, mD ; ρ ——流体密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; z_e ——恒压边界或泄油边界处的纵坐标, m ; Φ_i ——蛇曲井第 i 小段生产时在地层中引起的势, m^2/s ; Φ_{ji} ——蛇曲井第 j 小段在第 i 小段线汇中点处引起的势, m^2/s ; z_{wi} ——蛇曲井第 i 小段中点处的 z 坐标, m ; Q ——蛇曲井产量, m^3/s ; φ ——起伏度, f ; L_w ——水平井或蛇曲井水平生产段的水平投影长度, m ; z_w ——水平段到油水界面距离, m ; μ_o ——原油黏度, $mPa \cdot s$; B_o ——原油体积系数, f ; b ——边水油水界面位置, m 。

参考文献:

- [1] Giger F M. The reservoir engineering aspects of horizontal drilling [A]. SPE 15024, 1984.
- [2] Joshi S D. Augmentation of well production with slant and horizontal wells [A]. SPE 155375, 1988.
- [3] 吕劲. 水平井稳态产油量解析公式及讨论 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(增刊): 135-139. (LÜ Jin. An analytical solution of steady state flow equation for the productivity of a horizontal well [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(Supp.): 135-139.)
- [4] LU J. New productivity formulae of horizontal wells [J]. JCPT, 2001, 40(10): 55-67.
- [5] 刘月田, 张吉昌. 各向异性油藏水平井网稳定渗流与产能分析 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 94-96. (LIU Yue tian, ZHANG Ji chang. Stable permeating flow and productivity analysis for anisotropic reservoirs in horizontal well networks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 94-96.)
- [6] Aidradiman Haji Johan, Kirby Schrader. Combination of snake well design & smart completions: Key enablers for champion west development [A]. SPE 88524, 2004.
- [7] Corlay P, Bossie codeanu D, Sabathier J C, et al. Improving reservoir management with complex well architecture [J]. World Oil, 1997, 1: 45-54.
- [8] Morita N, Singh S P, Chen H S, et al. Three dimensional well model pre processors for reservoir simulation with horizontal and curved inclined wells [A]. SPE 20718, 1990.
- [9] Harald Blikra, Drevdal K E, Aarrestad T V, et al. Extended reach, horizontal, and complex design wells: challenges, achievements and cost benefits [A]. SPE 28005, 1994.
- [10] 戚志林, 杜志敏, 疏壮志, 等. 蛇曲井水平段两相流压力梯度模型 [J]. 天然气工业, 2004, 24(6): 95-97. (QI Zhi lin, DU Zhi min, SHU Zhuang zhi, et al. Pressure gradient model of two phase flow in horizontal section of snake bending wells [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(6): 95-97.)
- [11] 刘想平. 底水驱油藏水平井三维稳态解产能公式 [J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(1): 54-57. (LIU Xiang ping. A new productivity formula for 3D steady state solution of a horizontal well in a reservoir with bottom water drive [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1998, 20(1): 54-57.)

第一作者简介: 戚志林(1969), 男, 四川营山人, 现为中原油田分公司博士后, 主要从事油藏数值模拟及油气藏工程方面的研究。地址: 河南省濮阳市中原路, 中原油田勘探开发研究院天然气室, 邮政编码: 457001; 电话: (0393) 4823653。E-mail: qizhili@sina.com

收稿日期: 2005 06 07 修回日期: 2005 12 10

(编辑 郭海莉 绘图 李秀贤)