

# 分支井产能预测模型及分支形态优化

姚志良<sup>1,2</sup>, 曹飞<sup>3</sup>, 丁士东<sup>1</sup>, 蒋庞露<sup>1,2</sup>, 毛军<sup>1</sup>

(1.中国石化石油工程技术研究院,北京 100101; 2.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 3.中国石化胜利油田分公司石油开发中心,山东 东营 257061)

**摘要:**海上油田开发受平台空间限制,应用多分支井开发具有明显的技术与经济优势,但是,随着分支数量的增加,准确预测多分支井产能,降低其在油田开发中的风险是非常必要的。由格林函数和源函数,应用叠加原理和镜像反映法,推导了盒状封闭油藏中任意井眼轨迹的油藏渗流模型;根据质量守恒定律和动量守恒定律建立了井筒变质量流动压降模型,并由连续性方程将油藏渗流模型与井筒变质量流动压降模型耦合求解,从而建立了任意井眼轨迹油井产能预测模型,通过该模型分析了分支井分支位置、分支角度和分支对称性对产能的影响,在此基础上对分支形态进行了优化。结果表明,增加分支与主井筒之间的夹角,能够有效降低分支与主井筒间的干扰,但当分支夹角受钻井技术限制时,增加分支长度可提高产能;分支布置在主井筒根部,并采用非对称分布可有效提高产能。

**关键词:**分支井 产能 预测模型 耦合模型 形态优化

**中图分类号:** TE319

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)03-0056-04

采用多分支井开发油藏可大幅度提高单井控制储量,随着钻井和完井技术的发展,钻任意井眼轨迹或多分支井等非常规井成为可能<sup>[1]</sup>,海上油田开发受平台空间限制,应用该技术可降低开发成本,有明显的技术与经济优势。因此,分支井技术在中外油田得到了广泛应用,并取得了较好的开发效果。但由于分支井钻井和完井技术复杂,使其在开发油田时存在一定风险,因此建立准确的产能预测模型,为多分支井钻井和完井进行技术和经济可行性评价提供依据是非常必要的<sup>[2-4]</sup>。中外学者建立了分支水平井的产能预测模型<sup>[5-9]</sup>,但这些模型均未考虑井筒内流体流动对产能的影响,对计算精度有一定影响。另外,分支井的分支形态对产能影响非常大,为提高单井产能并获得较高的采收率,需根据地层条件优化分支形态,以充分发挥分支井的优势<sup>[10-12]</sup>。为此,笔者建立了任意井眼轨迹油井产能预测模型,通过该模型对分支井分支形态进行优化,以期对多分支井开发油藏提供参考。

## 1 分支井产能预测模型

假设盒状封闭油藏均质各向异性,其长度、宽度和高度分别为  $L_x$ ,  $L_y$  和  $L_z$ ,将分支井分成  $n_l$  个分

支,每个分支分成  $n_s$  个单元段(图1),每个单元段在长度方向上流量均匀,但各单元段的流量不相等。

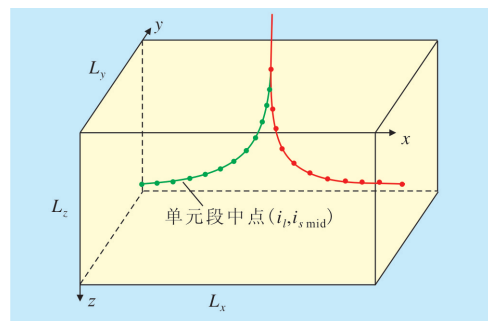


图1 盒状封闭油藏分支井示意

$L_x$ ,  $L_y$  和  $L_z$  分别为油藏的长度、宽度和高度; $m$ ;  $x$  和  $y$  为与主井筒垂直的水平坐标; $m$ ;  $z$  为与主井筒平行的垂向坐标; $m$ ;  $i_l$  为分支井任意分支,  $i_l=1, 2, \dots, n_l$ ;  $n_l$  为分支总数;  $i_s$  为任意分支上任意单元段,  $i_s=1, 2, \dots, n_s$ ;  $n_s$  为任意分支的单元段数;  $(i_l, i_{s, \text{mid}})$  为单元段  $(i_l, i_s)$  中点

### 1.1 油藏渗流模型

微可压缩流体在油藏中流动的控制方程<sup>[13]</sup>为

$$K_x \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \phi \mu C_t \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

其中

$$\Phi = p + \rho g h \quad (2)$$

式中:  $K_x$ ,  $K_y$  和  $K_z$  分别为油藏  $x$ ,  $y$  和  $z$  方

收稿日期: 2013-03-01。

作者简介:姚志良,男,工程师,在站博士后,从事复杂结构井技术研究。联系电话:18610633913, E-mail: yaozhiliang\_2004@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“海相碳酸盐岩油气井井筒关键技术”(2011ZX05005-006-004)。

向的渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\Phi$  为油藏中流体的势, Pa;  $\phi$  为孔隙度;  $\mu$  为地层流体粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $C_t$  为总压缩系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $t$  为时间, s;  $p$  为地层压力, Pa;  $\rho$  为地层流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $h$  为油藏任意位置处的高度, m。

式(1)很难直接求解, 可通过 Besson 坐标变换, 转化为等价的各向同性油藏流体流动控制方程<sup>[14]</sup>, 再利用格林函数和源函数, 通过镜像反映法、叠加原理和纽曼乘积法, 可得井筒任意单元段的无因次势降, 即

$$\Phi_{\text{wD}}(j_l, j_s, i_l, i_s) = \int_{j_{s,0}}^{j_{s,1}} \left[ \Phi_{\text{D}}(i_l, i_s, \text{mid}, j_{s,d}, t_{\text{D}}) - \frac{1}{4\pi r_{\text{wD}}} \right] dj_{s,d} + \int_{j_{s,0}}^{j_{s,1}} \frac{1}{4\pi r_{\text{wD}}} dj_{s,d} \quad (3)$$

式中:  $\Phi_{\text{wD}}(j_l, j_s, i_l, i_s)$  为井筒任意单元段  $(j_l, j_s)$  在单元段  $(i_l, i_s)$  处的无因次势降;  $\Phi_{\text{D}}$  为井筒单元段  $(i_l, i_s)$  中点在单元段  $(j_l, j_s)$  上任意一点处的无因次势函数;  $j_{s,d}$  为单元段  $(j_l, j_s)$  从  $j_{s,0}$  到  $j_{s,1}$  的任意点;  $j_{s,0}$  为单元段  $(j_l, j_s)$  起点;  $j_{s,1}$  为单元段  $(j_l, j_s)$  终点;  $t_{\text{D}}$  为无因次时间;  $r_{\text{wD}}$  为坐标变换后等价各向同性油藏中无因次井筒半径。

取单元段中点井筒半径处为该单元段势的计算点, 由势的叠加原理可得油藏中井筒第  $i_l$  分支第  $i_s$  单元段无因次势降为

$$\Phi_{\text{wD}}(i_l, i_s) = \sum_{j_l=1}^{n_l} \sum_{j_s=1}^{n_s} q_{\text{ID}}(i_l, i_s) \Phi_{\text{wD}}(j_l, j_s, i_l, i_s) \quad (4)$$

式中:  $\Phi_{\text{wD}}(i_l, i_s)$  为井筒第  $i_l$  分支第  $i_s$  单元段中点等效井筒处无因次势降;  $q_{\text{ID}}(i_l, i_s)$  为第  $i_l$  分支第  $i_s$  单元段的无因次流量。

## 1.2 变质量流动压降模型

井筒单元段间压力通过井筒水动力学相互联系, 由质量守恒定律和动量守恒定律可得相邻单元段中点间井段的变质量流动压降控制方程为

$$\frac{\partial p_{\text{w}}}{\partial x} = -32\rho \frac{q_{\text{w}} q_1}{\pi^2 D^4} - \frac{8f\rho q_{\text{w}}^2}{\pi^2 D^5} - \rho g \sin \theta \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{w}}$  为井筒内的压力, Pa;  $q_{\text{w}}$  为井筒内流体轴向流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_1$  为单位长度井筒流量,  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ;  $D$  为井筒内径, m;  $f$  为井筒有径向流的摩擦系数, 其计算式参照文献[15];  $\theta$  为井筒与水平方向的夹角, rad。

## 1.3 模型的求解

该分支井模型共分成  $n_l \times n_s$  个单元段, 每个单

元段单位长度井筒流量和每个单元段的势降为未知变量, 故该耦合模型共有  $2 \times n_l \times n_s$  个未知量。对每个分支应用质量守恒方程可得

$$q(i_l) = \sum_{i_s=1}^{n_s} q_1(i_l, i_s) \quad (6)$$

式中:  $q(i_l)$  为分支井第  $i_l$  分支的总流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

井筒相邻单元段之间的压降为

$$p_{\text{w}}(i_l, i_s + 1) - p_{\text{w}}(i_l, i_s) = \Delta p_{\text{wa}}(i_l, i_s) + \Delta p_{\text{wg}}(i_l, i_s) + \Delta p_{\text{wf}}(i_l, i_s) \quad (7)$$

式中:  $p_{\text{w}}(i_l, i_s)$  为分支井任意井筒单元段  $(i_l, i_s)$  中点处的压力, Pa;  $\Delta p_{\text{wa}}(i_l, i_s)$ ,  $\Delta p_{\text{wg}}(i_l, i_s)$  和  $\Delta p_{\text{wf}}(i_l, i_s)$  分别为井筒单元段  $(i_l, i_s)$  中点到井筒单元段  $(i_l, i_s + 1)$  中点间的加速度压降、重力压降和摩擦压降, Pa。

由式(4)可得  $n_l \times n_s$  个方程, 由式(6)可得  $n_l$  个方程, 由式(7)可得  $n_l \times n_s - n_l$  个方程, 此时, 方程总数为  $2 \times n_l \times n_s$  个, 与未知量个数相等, 该耦合模型有惟一解。由于方程系数是其本身的函数, 该方程组是非线性的, 故采用 Newton-Raphson 方法求解。

## 2 分支形态优化

根据所建模型, 用 MatLab 软件编制了相应的计算程序, 并对分支井形态进行了计算分析。主要计算参数为: 油藏尺寸为  $400 \text{ m} \times 400 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ , 初始压力为  $22 \text{ MPa}$ , 水平和垂直渗透率分别为  $150 \times 10^{-3}$  和  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔隙度为  $30\%$ , 地层原油密度为  $980 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 地层原油粘度为  $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 地层原油压缩系数为  $4.35 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ , 地层体积系数为  $1.05$ , 井筒内径为  $0.1016 \text{ m}$ , 井壁粗糙度为  $9 \times 10^{-6} \text{ m}$ , 水平主井筒长度为  $320 \text{ m}$ , 位于油藏中部, 生产压差为  $1 \text{ MPa}$ 。

### 2.1 分支位置优化

假设水平主井筒有 1 个分支, 其分支长度为  $100 \text{ m}$ , 与主井筒的夹角为  $30^\circ$ , 分支与主井筒交汇点距主井筒跟端距离分别为  $20, 90, 160$  和  $230 \text{ m}$ 。由 4 种分支不同位置处产量的计算结果(表 1)可知: 随着分支与主井筒交汇点距跟端距离的增加, 主井筒的产量和贡献率增加, 分支产量贡献率减小, 但总产量随着分支与主井筒交汇点距跟端距离的增加而减少, 所以分支布置在主井筒跟部有利于提高单井产能。然而, 由分支不同位置处主井筒流入剖面(图 2)可知, 由于井筒变质量流动压降影响, 沿水

表1 不同分支位置时主井筒和分支井的产量

交汇点距 主井筒跟 端距离/m	主井筒		分支		总产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	
20	706.93	69.72	306.95	30.28	1 013.88
90	715.79	77.64	206.12	22.36	921.91
160	726.43	81.03	170.02	18.97	896.45
230	730.79	82.06	159.72	17.94	890.51

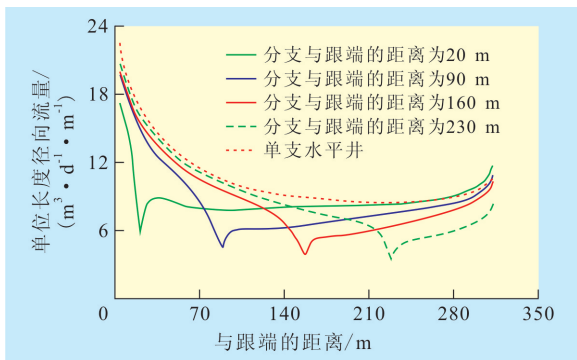


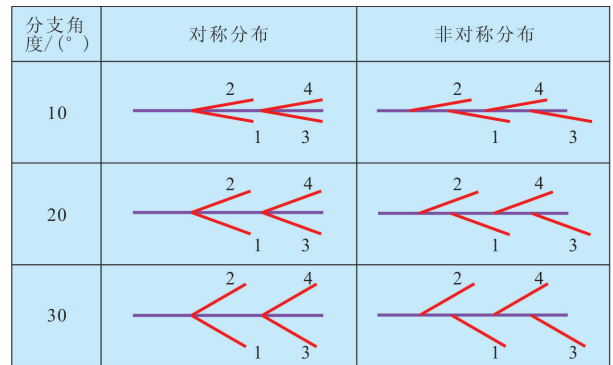
图2 不同分支位置时主井筒流入剖面

平井主井筒,由跟端到趾端单位长度流体径向流量不断下降,在趾端附近由于趾端效应稍微上翘,主井筒的大部分产量来自于跟端井段,所以,分支位于主井筒中部有利于提高最终采收率。对分支井进行优化的依据不同,分支井位置优化的结果也不同,在对实际分支井进行形态优化时,应根据油藏

的特点选择适当的优化依据。

### 2.2 分支角度及对称性优化

分支井各分支角度和对称性是影响其产量的主要因素,假设4个分支在主井筒上等距均匀分布,各分支长度为100 m,分别计算3种不同分支角度(10°, 20°和30°)和6种对称性(图3)的分支井产量。由计算结果可知,相同对称类型条件下,随着分支角度增加,总产量稍有增加(表2);由于受钻井技术限制,分支角度不能超过20°,此时,增加分支的长度增产效果明显。受分支影响,主井筒段产量减小(图4);与均匀对称分布相比,分支井均匀非对称分布时,受干扰的主井筒井段增加,各分支产量增加,且其增加量大于主井筒产量的减少量,故分支井采用非对称分布可增加产能。



2 分支编号

图3 对称性和分支角度不同时分支井示意

表2 不同分支对称性和角度时主井筒和分支井产量

分支 角度/ (°)	对称性	主井筒		分支 1		分支 2		分支 3		分支 4		总产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
		产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贡献 率,%	
10	非对称	414.97	42.21	128.67	13.09	206.62	21.02	122.53	12.46	110.39	11.23	983.19
	对称	484.68	50.63	125.34	13.09	143.76	15.02	96.66	10.1	106.78	11.16	957.22
20	非对称	436.70	42.97	136.74	13.46	209.26	20.59	118.77	11.69	114.74	11.29	1 016.20
	对称	482.5	48.75	143.08	14.46	148.15	14.97	106.54	10.76	109.45	11.06	989.72
30	非对称	462.97	45.24	134.18	13.11	200.18	19.56	114.10	11.15	112.03	10.95	1 023.46
	对称	498.08	49.93	141.92	14.23	144.99	14.53	105.32	10.56	107.27	10.75	997.58

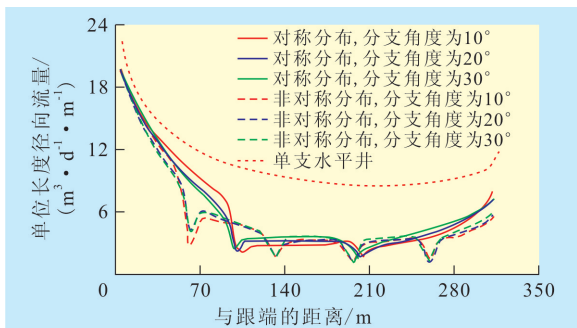


图4 对称性和分支角度不同时主井筒流入剖面

## 3 结束语

由格林函数和源函数推导出盒状封闭油藏中任意井眼轨迹的油藏渗流模型,并与井筒变质量流动模型耦合,建立了任意井眼轨迹的油井产能预测模型,不仅可以预测任意井眼轨迹油井产能及井筒流入剖面和压力剖面,还可利用该模型对多分支水平井的分支形态进行优化。

由于主井筒与分支间以及分支与分支间存在相互干扰,为了减小干扰,应尽量增大分支与主井筒之间的夹角;在其夹角受钻井技术限制时,可增加各分支的长度;分支布置在主井筒根部,且采用非对称分布形态有利于提高单井产能。

优化分支形态的依据为油井总产能最大化,但对于某些油藏,产能却不能作为优化的依据,比如对于底水油藏,为减缓底水锥进,应通过优化分支井形态尽可能使底水均匀抬升,因此优化依据不同,分支形态优化的结果也不同。

#### 参考文献:

- [1] 张绍槐.多分支井钻井完井技术新进展[J].石油钻采工艺,2001,23(2):1-4.
- [2] Sugiyama H, Tochikawa T, Peden J M, et al.The optimal application of multi-lateral/multi-branch completions [R].SPE 38033, 1997.
- [3] Yeten B, Durlofsky L J, Aziz K.Optimization of smart well of control[R].SPE 79031, 2002.
- [4] Valvatne P H, Durlofsky L J, Aziz K.Semi-analytical modeling of the performance of intelligent well completions[R]. SPE 66368, 2001: 1-10.
- [5] 何逸凡,廖新维,徐梦雅,等.低渗透气藏压裂水平井产能预测模型及其应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):93-96.
- [6] 王晓冬,于国栋,李治平.复杂分支水平井产能研究[J].石油勘探与开发,2006,33(6):729-733.
- [7] 程林松,李春兰,郎兆新,等.分支水平井产能的研究[J].石油学报,1995,16(2):49-55.
- [8] 张世明,周英杰,戴涛,等.鱼骨状分支水平井注采配置优化[J].油气地质与采收率,2011,18(1):54-57.
- [9] 王卫红,李玺.分支水平井产能研究[J].石油钻采工艺,1997,19(4):53-57.
- [10] 郭迎春,黄世军.多分支井近井油藏地带渗流的电模拟实验研究[J].油气地质与采收率,2009,16(5):95-96,99.
- [11] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等.鱼骨型多分支井向井流动态关系[J].石油学报,2000,21(6):57-60.
- [12] 安永生,李振泉,张世明,等.鱼骨状分支井井型参数优化理论与方法[J].油气地质与采收率,2011,18(4):82-85.
- [13] Ouyang L P, Thomas L K, Evans C E, et al.Simple but accurate equations for wellbore pressure drawdown calculation [R].SPE 38314, 1997.
- [14] Besson J.Performance of slanted and horizontal wells on an anisotropic medium[R].SPE 20965, 1990.
- [15] Ouyang L B, Arbabi S, Aziz K.General wellbore flow model for horizontal, vertical and slanted well completions[R].SPE 36608, 1998: 124-133.

编辑 武云云

(上接第55页)

#### 参考文献:

- [1] 邹存友,韩大匡,盛海波,等.建立采收率与井网密度关系的方法探讨[J].油气地质与采收率,2010,17(4):43-47.
- [2] 耿站立,安桂荣,周文胜,等.海上稠油油田井网密度与采收率关系研究[J].中国海上油气,2012,24(3):35-37.
- [3] 凌建军,黄鹏,张学友,等.将来值法确定极限井网密度[J].河南石油,1997,11(6):12-14.
- [4] 于乐香.特高含水期油田合理经济极限井网密度研究[J].断块油气田,2000,7(5):31-32.
- [5] 廉黎明,姜汉桥,牛佳玲,等.水平井注采井网多目标优化方法[J].油气地质与采收率,2012,19(1):85-90.
- [6] 朱文娟,喻高明,严维峰,等.油田经济极限井网密度的确定[J].断块油气田,2008,15(4):66-67.
- [7] 张树林,黄耀琴.净现值法:一种计算经济极限井网密度的新方法[J].地质科技情报,2004,23(1):78-80.
- [8] 叶继根,吴向红,刘合年,等.Greater Unity 多层复杂断块油田低压注水开发调整研究[J].石油勘探与开发,2006,33(6):766-771.
- [9] 孙致学,姚军,唐永亮,等.低渗透油藏水平井联合井网型式研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):74-77.
- [10] 闫萍.确定水平井经济技术政策界限的一种方法——以孤岛油田Ng3~6砂层组为例[J].油气地质与采收率,2008,15(4):84-87.
- [11] 才汝成,李阳,孙焕泉.油气藏工程方法与应用[M].东营:石油大学出版社,2002.
- [12] 管纪昂,武若霞,韩东.用生产资料确定谢卡尔乔夫公式参数的方法[J].西安石油学院学报:自然科学版,2003,18(2):26-27.
- [13] 冉启佑,胡向阳,赵庆飞,等.新区经济可采储量计算方法[J].石油勘探与开发,2004,31(5):77-80.

编辑 裴磊