

文章编号: 1000-7393(2010)05-0069-05

## 裸眼系列完井方式对鱼骨井产量的影响

陈阳<sup>1</sup> 熊友明<sup>1</sup> 陈宗毅<sup>2</sup> 徐家年<sup>1</sup> 张林<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学完井技术中心, 四川成都 610500; 2. 胜利油田公司采油工艺研究院, 山东东营 257000)

**摘要:** 为了给分支水平井完井方案提供理论依据, 引进“完井方式”因素, 以鱼骨井为例, 以一种离散化方法为手段, 以裸眼系列完井方式为核心, 建立起相应的稳态耦合流动计算模型。通过实例计算绘制出流率分布剖面、流压分布剖面及全井流入动态曲线, 并对比了裸眼完井方式下不同完井方法对应的总产量。研究表明, 鱼骨井内部的渗流干扰对总产量有抑制作用, 渗流干扰的强烈程度取决于鱼骨井形态、渗流阻力和开采强度; 完井方式对鱼骨井的流率分布和流压分布都有影响, 其本质在于完井筛管影响了油藏渗流压降和井筒管流压降, 进而改变了模型的耦合结果。在进行方案设计时应综合技术和经济等各方面因素选择完井筛管及其下入模式。

**关键词:** 鱼骨井; 耦合模型; 渗流干扰; 产量; 完井方式

**中图分类号:** TE257      **文献标识码:** A

### A deliverability analysis of herringbone well under open hole series completion system

CHEN Yang<sup>1</sup>, XIONG Youming<sup>1</sup>, CHEN Zongyi<sup>2</sup>, XU Jianian<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>

(1. Well Completion Technology Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Research Institute of Oil Production Technology, Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China)

**Abstract:** In order to offer reference to completion decision making for horizontal multilateral wells, the open hole series completion system are considered as a main research object in a new deliverability forecasting model. This model, which takes herringbone well for an example, couples reservoir inflow with wellbore flow and is solved with a semi-analytical discretization theory. As a result of iterative operation, distribution profile of flow rate and flowing pressure as well as IPR curve of whole well are obtained. What's more, production under different completion methods is compared with each other. Through analysis and study, it's known that, firstly, seepage interference within multilateral well restrain total production, whose degree depends on herringbone well configuration, filtrational resistance and mining intensity. Secondly, completion system influences both flow rate distribution and flowing pressure distribution because completion screen pipe in the well bore affects drawdown of reservoir inflow and wellbore flow. Finally, well completion screen pipe and its running model should be selected based on technical and economic aspects.

**Key words:** herringbone well; coupling model; seepage interference; production; well completion method

为应对目前各种复杂地层条件, 分支水平井的完井方法呈多样化发展, 完井方法选择成为开发方案设计的重要环节, 而产量的高低是完井方法选择的重要依据。然而迄今为止, 分支水平井产量计算模型都主要针对未下入任何完井筛管的全井段裸眼

井筒, 难以达到开发方案设计要求。基于该现状, 笔者以鱼骨型分支水平井(下文简称“鱼骨井”)为例, 建立相应产量计算模型, 以完井方式为主要研究对象展开系统的探讨, 通过实例计算作出对比分析, 为分支水平井完井优选工作奠定基础。

基金项目: 中国海洋石油总公司国家重大专项子课题(编号: 2008ZX05024-03-01-05)资助。

作者简介: 陈阳, 1985年生。西南石油大学海洋油气工程博士生, 现从事海洋完井工程研究。电话: 028-83030558, E-mail: sichenyang@163.com。

## 1 完井筛管下入模式

### Running model of completion string

完井方式分为裸眼系列和射孔系列两种。本文所讨论的裸眼系列完井方式又可细分为许多完井方法,对于直井和水平井,可以是裸眼完井,也可以是在裸眼井筒内下入起支撑井壁和防砂作用的完井筛管的各种完井方法,比如打孔管完井、割缝衬管完井和裸眼井下自洁防砂筛管完井等。鱼骨井具有多个井筒,相比直井和水平井,鱼骨井的完井方法更加复杂,形式更加多样,不仅涉及筛管种类,还涉及筛管下入模式。具有实际工程意义的裸眼系列完井筛管下入模式有2种,第1种是只在主井筒内下入完井筛管,同时分支井筒是裸眼,第2种是在所有井筒内下入同种类型完井筛管。

第1种筛管下入模式具有较强的实用价值,一方面,由于分支水平井井身结构复杂,完井筛管不易下入分支井筒,分支井筒采用裸眼完井可节省完井费用;另一方面,如果生产过程中分支井筒发生砂堵或垮塌,原分支井筒位置地层仍具有较高渗透率,仍能保证主井筒有较高产量,此时分支水平井相当于经过分段压裂改造的水平井,只不过改造方法由压裂地层换成机械方法人为钻取分支井筒,这就是“钻井压裂”思想<sup>[1]</sup>。当然,砂堵和垮塌毕竟会使鱼骨井总产量大打折扣,因此在施工条件允许及成本合理的前提下,应考虑采用第2种筛管下入模式<sup>[2,3]</sup>。

下文为表述方便,与这2种模式对应的产量模型分别称为第1类鱼骨井产量模型和第2类鱼骨井产量模型。

## 2 第1类鱼骨井产量模型

### First class herringbone well deliverability model

#### 2.1 模型求解思想

##### Model establishment and resolution approach

模型研究单相油流,以完井方式为核心内容,同时考虑地层各向异性( $k_h \neq k_v$ )、渗流干扰、井筒流动压降(包括摩阻压降和加速压降)及钻完井污染带等因素对产量的影响。该模型包含油藏渗流和井筒管流,为综合了油藏渗流模型和井筒管流模型的稳态耦合流动计算模型。油藏渗流和井筒管流在流率和流压两个层面相互作用、相互影响,从而形成统一而稳定的耦合流动过程,该过程在数学上表现为对依据耦合条件建立的大型线性方程组的迭代求解,

最终达到平衡状态。

模型使用一种离散化方法<sup>[4]</sup>进行求解。在油藏渗流模型中,分支井被离散化为一个个线源,即将分支井看成是由许多线源首尾相接而成,在三维空间进行模型求解。在井筒管流模型中,分支井被离散化为一个个井筒段,即将分支井看成是由许多井筒段首尾相接而成,在一维空间进行模型求解。在求解过程中,各个井筒段(线源)相互之间独立性较强,不同的分支井形态和油藏边界条件本质上表现为不同的井筒段(线源)排列分布方式。这种特点决定离散化方法受分支井形态和油藏边界条件的约束程度较低,其使用范围较广。

完井方式对鱼骨井总产量影响的本质决定了模型的具体求解过程,它直接体现为完井筛管同时影响了油藏渗流过程和井筒管流过程。前者主要体现为完井筛管附加压降<sup>[5]</sup>,该附加压降有两个来源,一是由完井筛管流体流经自身结构(比如打孔管的预钻孔眼,割缝衬管的缝眼等)引起的附加压降,经实际计算得出该附加压降数值较小,可以忽略;二是由防砂类筛管和井壁所夹环形空间的储层砂堆积层引起的附加压降,油流在该堆积层中的渗流可视为油藏渗流的延伸。后者主要体现为下入完井筛管使得井筒管流的断面相对裸眼井筒时有所减小,从而增加了井筒管流压降。

#### 2.2 实例计算

##### Calculation of an example

将参数代入第1类鱼骨井产量模型进行实例计算,计算结果表明,对于不同完井方法,其操作过程相同,所得结果相似,因此不失一般性。本节以主井筒内下入割缝衬管同时分支井筒裸眼这种完井方法为例详细说明。

2.2.1 基本参数 某实例井有4个分支井筒,所有井筒处于同一水平面,井筒特征参数见表1。

表1 井筒特征参数  
Table 1 Wellbore characteristic parameters

井筒	井筒长度 /m	井筒半径 /mm	侧钻位置 /m	钻井污染半径 /m	与主井筒夹角 / (°)	污染带渗透率 /10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>
主井筒	750.0	107.95		0.60		50
1分支	400.0	74.6	150.0	0.30	60.0	50
2分支	400.0	74.6	300.0	0.35	-60.0	50
3分支	400.0	74.6	450.0	0.40	60.0	50
4分支	400.0	74.6	600.0	0.45	-60.0	50

该实例井主井筒内割缝衬管外径 127 mm,厚

度 10 mm,油藏压力 30.0 MPa,主井筒跟端流压 25.0 MPa,原油饱和压力 18.0 MPa,油藏厚度 15.0 m,鱼骨井偏心距 0 m,水平渗透率  $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,垂向渗透率  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,原油密度  $850.0 \text{ kg/m}^3$ ,原油黏度  $7.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,原油体积系数 1.073。

将以上参数输入到以大型线性方程组数模为核心的“鱼骨形分支水平井产能计算程序”中,可立即得到计算结果,计算结果以流率分布剖面、流压分布剖面及 IPR 曲线形式给出。

2.2.2 流率分布结果 流率分布剖面见图 1,横坐标为数据采集点与当前井筒跟端的距离,纵坐标为流率,即当前位置每米井筒段的壁面流入流量。

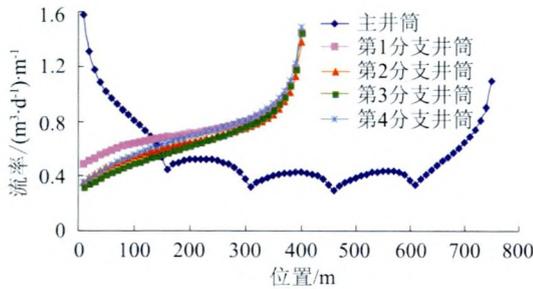


图 1 流率分布剖面  
Fig.1 Distribution profile of flow rate

由图 1 可看出,主井筒两端流率较高,中间段流率较低,侧钻点处主井筒流率分布剖面明显下凹,分支井筒跟端流率低于指端流率,表明这些位置存在渗流干扰作用,其强烈程度取决于鱼骨井形态<sup>[6,7]</sup>,本质上取决于各个线源相互之间的靠近程度。

2.2.3 流压分布结果 流压分布剖面见图 2,纵坐标为当前井筒段的流压。

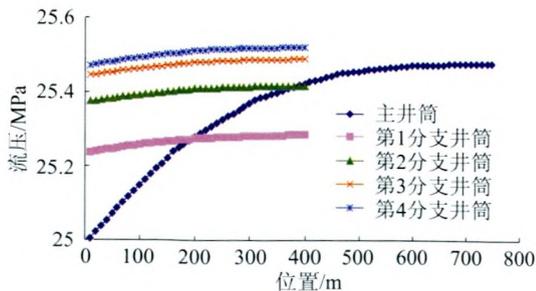


图 2 流压分布剖面  
Fig.2 Distribution profile of flowing pressure

由图 2 可看出,各个分支井筒流压分布相对平缓,而主井筒流压分布相对陡峭。原因是分支井筒未下入任何完井筛管,裸眼井筒过流断面较大,井筒内油流速度较慢,管流压降较小,而主井筒下入割缝衬管,其过流断面较小,同时汇集分支井筒油流,井

筒内油流速度较快,管流压降较大。

2.2.4 全井 IPR 曲线 全井 IPR 曲线(图 3 中实线)显示,虽然为单相油流,但其并非呈直线,而是呈类似两相流态势,原因是生产压差(定义为油藏压力与主井筒跟端流压之差)越大,渗流干扰越强烈,削弱了总产量的增幅。由此可见,对于鱼骨井,生产压差并非越大越好,而是存在合理范围。当生产压差较小时,IPR 曲线仍呈直线,如开头几个数据点所示,沿这几个数据点做外推直线(图 3 中虚线),实践证明,某一生产压差下,IPR 曲线对应总产量不小于外推直线对应总产量的 80% 时,该生产压差具备经济效益和开采工艺层面的合理性。

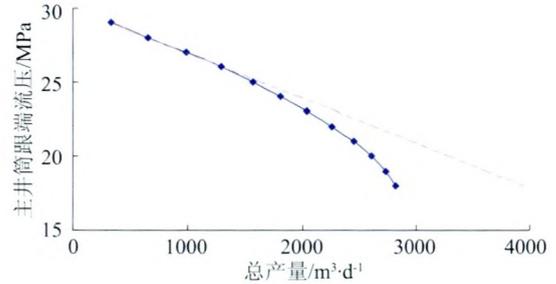


图 3 全井 IPR 曲线  
Fig.3 IPR curve of the whole well

### 3 第2类鱼骨井产量模型

#### Second class herringbone well deliverability model

与第 1 类鱼骨井产量模型相比,本节建立的第 2 类鱼骨井产量模型,其假设条件、求解思路基本相同,不再赘述,仅分析第 2 类鱼骨井产量模型求解结果的特点,表述如下。

(1) 流压分布剖面。分支井筒的流压分布曲线更加陡峭,原因是单相油流的过流断面由原先的裸眼井筒断面缩减至完井筛管断面,井筒管流压降增加。

(2) 流率分布剖面。分支井筒的各个井筒段流率降低,其中指端流率降幅较大,但曲线态势不变。原因是在主井筒跟端流压不变的前提下,分支井筒的流压分布曲线更加陡峭,导致分支井筒各个井筒段生产压差不同程度地减小。对于防砂类完井方式,由于储层砂堆积层的影响,会使分支井筒各个井筒段的流率进一步降低。

(3) 全井 IPR 曲线。由于各个生产压差下总产量都有所降低,渗流干扰的影响稍有减弱,但曲线态势不变。

#### 4 不同完井方式的总产量对比

##### Production comparison among different completion methods

在分支水平井完井方案设计中,最受关注的是基本参数相同时,分支水平井在不同完井方式下总

产量对比。本节针对两类完井筛管下入模式,以打孔管、割缝衬管及裸眼井下自洁防砂筛管为例,组合成6种完井方法,做出总产量对比分析(表2)。主井筒完井筛管外径127 mm,分支井筒完井筛管外径101.6 mm,壁厚10 mm,其他基本参数同前。

表2 相同生产压差下不同完井方式的总产量对比  
Table 2 Production contrast of different completion methods under the same drawdown

组合序号	主井筒完井方法	分支井筒完井方法	总产量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	与组合7总产量比	等效分段压裂水平井产量模型总产量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
1	打孔管	裸眼	1632.1	0.933	994.6
2	割缝衬管	裸眼	1576.6	0.901	939.7
3	裸眼自洁防砂筛管	裸眼	1534.0	0.887	851.4
4	打孔管	打孔管	1487.7	0.850	
5	割缝衬管	割缝衬管	1432.4	0.819	
6	裸眼自洁防砂筛管	裸眼自洁防砂筛管	1397.3	0.799	
7	裸眼	裸眼	1749.2	1.000	

注:1~3为第1种筛管下入模式,4~6为第2种筛管下入模式。

由表2可看出:(1)就同种筛管下入模式各个完井方法之间相比,打孔管完井的总产量最高,该完井方法施工工艺相对简单,在碳酸盐岩地层和无需防砂的砂岩地层中应用广泛;而对于需要防砂的砂岩地层,则需要下入起防砂作用的筛管(如割缝衬管、自洁防砂筛管),由于此类筛管与井壁所夹环形空间存在储层砂堆积层,使得渗流阻力增加,因此总产量受到一定抑制,影响程度主要取决于储层砂粒度中值和筛管挡砂精度;(2)就两种筛管下入模式之间相比,第2种筛管下入模式对应的鱼骨井总产量相比第1种有所下降,尤其是防砂类完井方法。然而值得注意的是,第1类鱼骨井产量模型的各种分析结果基于分支井筒未发生砂堵和垮塌的前提,但实际生产过程中往往会发生严重的砂堵或垮塌,从而使总产量打一定折扣。根据本文先前提及的“钻井压裂”思想,此种状态的鱼骨井可等效成经过分段压裂改造的水平井,其总产量可以通过王晓泉等<sup>[8]</sup>和吴晓东等<sup>[9]</sup>提出的分段水平井产量模型求解得到。代入实例井的基本参数,经计算可知其总产量比鱼骨井第2种筛管下入模式至少低30%。因此,在施工条件允许及成本合理的前提下,应考虑采用第2种筛管下入模式。

#### 5 结论

##### Conclusions

(1)以鱼骨井为例,针对两种完井筛管下入模式,建立了以裸眼系列完井方式为核心的产量计算模

型,为制定分支水平井完井方案提供理论依据。

(2)鱼骨井不同井筒及同一井筒不同部位之间存在渗流干扰,对鱼骨井总产量有抑制作用,渗流干扰的强烈程度取决于鱼骨井形态和施工参数,本质上取决于渗流阻力、开采强度和各个线源相互之间的靠近程度。

(3)完井方式从油藏渗流和井筒管流两方面影响鱼骨井的流率分布剖面、流压分布剖面及全井流入动态。非防砂类完井方法影响产量的本质在于井筒流动断面减小,管流压降增加,其影响程度取决于完井筛管尺寸。防砂类完井方法影响产量的本质除此之外,还有储层砂堆积层引起的附加压降,其影响程度主要取决于储层砂粒度中值和筛管防砂精度。

(4)在完井方案设计过程中,具体采用哪种筛管及哪种完井筛管下入模式,应根据地层条件、配产要求、施工条件及经济评价几个方面综合考虑。

##### 参考文献:

##### References:

- [1] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2007,29(5): 1-4.  
ZHOU Shouwei. The study and application of new mode of effective development of offshore heavy oil field [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2007, 29(5): 1-4.
- [2] 万仁涛. 现代完井工程(3版)[M]. 北京:石油工业出版社,2008.

- WAN Renpu. Advanced well completion engineering [M]. The third version. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [3] 易发新, 喻晨, 李松滨, 等. 鱼刺分支水平井在稠油油藏中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 487-491.
- YI Faxin, YU Chen, LI Songbin, et al. Application of herringbone multilateral horizontal well in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 487-491.
- [4] OUYANG L B, AZIZ K. A general single-phase wellbore/reservoir coupling model for multilateral wells [R]. SPE 72467, 2001.
- [5] 熊友明, 潘迎德. 裸眼系列完井方式下水平井产能预测研究 [J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(2): 42-46.
- XIONG Youming, PAN Yingde. Study on productivity prediction of the horizontal wells with open hole series of completion methods [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(2): 42-46.
- [6] SALAS J R, CLIFFORD P J, JENKINS D P. Multilateral well performance prediction [R]. SPE 35711, 1996.
- [7] 范玉平, 韩国庆, 杨长春. 鱼骨井产能预测及分支井形态优化 [J]. 石油学报, 2006, 27(4): 101-104.
- FAN Yuping, HAN Guoqing, YANG Changchun. Production forecast for herring bone well and optimum configuration of lateral holes [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 101-104.
- [8] 王晓东, 张守良, 吴奇, 等. 水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析 [J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 73-76.
- WANG Xiaoquan, ZHANG Shouliang, WU Qi, et al. Factors affecting the productivity of multi-section fractures in subsection fracturing of horizontal wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 73-76.
- [9] 吴晓东, 隋先富, 安永生, 等. 压裂水平井电模拟实验研究 [J]. 石油学报, 2009, 30(5): 740-743, 748.
- WU Xiaodong, SUI Xianfu, AN Yongsheng, et al. Electrolytic simulation experiment of fractured horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 740-743, 748.

(修改稿收到日期 2010-05-22)

[编辑 朱 伟]

## 西气东输金坛储气库项目顺利完工

2010年9月,金坛储气库JK7-4井顺利完井,该项目历时163 d,服务总进尺4808 m,施工全过程安全无事故、无复杂。

西气东输金坛地下储气库是西气东输管道工程的重要配套工程,对保障西气东输管线的供气安全有着重要意义。

项目4口井位于江苏省金坛市陈家庄盐矿陈家庄,完钻井深均在1200 m左右,以往施工的井在上部大井眼玄武岩地层易发生井塌或井漏等复杂情况;下部盐岩层易塌、漏、卡、溶蚀、缩径共存于同一裸眼井段,易造成起下钻遇阻、卡钻、电测遇阻、套管挤坏等问题,严重时会导致井眼报废。为攻克这一系列技术难题,确定使用能有效抑制盐岩层溶解的饱和盐水钻井液体系。在每口井的现场施工过程中,严格按照形成的技

术规范施工,积极与现场监督和井队进行技术措施沟通。通过加强钻井液的日常维护,采取“预防为主”的原则提前投入封堵材料,有效预防了玄武岩地层井漏、井塌复杂的发生。在进入盐岩层前,按照试验配方做好饱和盐水钻井液的转化工作,钻进中保持合适的钻井液密度和Cl<sup>-</sup>浓度,有效防止了盐岩层的蠕动缩径,4口井均顺利穿过了近200 m的盐岩层,井壁稳定效果好,尤其是JK7-4井的平均井径扩大率控制到0.81%。因此,饱和盐水钻井液在施工中表现出了良好的抑制防塌和抗污染性能,大幅度提高了机械钻速,保证了起钻、电测、下套管作业的顺利进行。

(供稿 刘 菲)