

多分支水平气井产能预测方法及其应用

安永生^{1,2} 吴晓东¹ 孙婵¹

1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院

安永生等. 多分支水平气井产能预测方法及其应用. 天然气工业, 2010, 30(4): 58-60.

摘 要 多分支水平井能控制更大的储量面积, 大幅度地提高油气藏采收率。为此, 提出了考虑储层各向异性、断层和实际钻井轨迹影响的多分支水平气井产能预测方法。利用该模型分析了气藏中多分支水平井井型参数(分支长度、分支角度、分支数目)对单井产能的影响。结论表明: 分支井筒与主井筒间的干扰以及分支井筒之间的互相干扰是影响多分支水平气井产能的主要因素; 在实际应用中应采取4分支以上的分支数目, 分支角度应不小于30°, 应根据气藏需求选用尽可能大的分支长度。

关键词 分支井 储集层 生产能力 各向异性 井型 参数 优化

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.04.013

0 引言

多分支水平井是近些年迅速发展起来的新井型, 能够大幅度提高油气藏采收率^[1-3]。但是, 由于多分支水平井多底、多分支的特点, 其钻完井技术比常规井要复杂得多, 初期投入大, 钻井风险大。因此需进行井型优化研究。近些年, 李春兰^[4]、刘想平^[5]、陈要辉^[6]、杨小松^[7]等人对多分支水平井的压力分布特点和产能预测解析方法进行了理论方面的研究。由于油气田实际情况较为复杂, 地层各向异性、断层的存在、钻井轨迹的实际变化都会影响到多分支水平井产能预测模型的使用, 笔者首先结合气藏、钻井实际情况对已有多分支水平气井理论模型进行补充、修正, 然后将其应用于实际气藏, 以产能为目标对多分支水平井进行了井型优化研究。

1 多分支水平气井产能预测模型

厚度为 h 的圆形地层, 四周边界定压, 上、下边界平板型封闭, 多分支水平井可在气藏范围内任意展布。假设全井有 N_b 个分支, 每一分支由 N_{pi} 个小井段组成, 根据每一小井段在气层中产生的势以及势叠加原理可得到全井在气层中任意一点产生的势为^[8-9]:

$$p_{wf}^2(M) = p_e^2 - \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_{pi}} \frac{p_{sc} T_{\mu Z}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{q_{ij,sc}}{2\pi K L} \times [\varphi_i(M) - \varphi_j(e)] \quad (1)$$

式中: q_{ij} 为气体从气藏流入第 i 分支第 j 井段的流量; $\varphi_i(M)$ 为第 i 分支的第 j 井段在气藏中任意点 M 处产生的势。

将所有小井段的相关等式联立在一起进行求解, 可以得到1口多分支水平气井任意井段的产量以及多分支水平气井的总产量。

2 影响多分支水平井产能预测的因素

2.1 气藏各向异性影响

各向异性是影响水平井应用效果的重要因素, 垂向渗透率(K_v)越大, 水平井相比于直井越具有优势。类似的, 多分支水平井的生产效果也受到气藏各向异性的显著影响, 故在应用产能预测模型前, 首先把各向异性气藏转换到各项同性气藏进行求解。根据各向异性渗流理论^[8], 引入转换矩阵 D 进行空间变换, 将各向异性渗透率空间转换为等价的各向同性空间。即

$$D = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (2)$$

基金项目 国家重大专项“复杂结构井优化设计与控制关键技术”(编号: 2009ZX05009-005)。

作者简介 安永生, 1979年生, 讲师, 博士, 在站博士后; 从事复杂结构井技术研究与应用研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路18号中国石油大学石油天然气工程学院。电话: 13810184058。E-mail: an_yongsheng@126.com

$$\begin{aligned} \text{其中: } a &= \sqrt{K_y K_z} / \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \\ b &= \sqrt{K_x K_z} / \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \\ c &= \sqrt{K_x K_y} / \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \end{aligned}$$

这样,在转换后的各向同性气藏中各方向渗透率均相等, $K = (K_x, K_y, K_z)^{1/3}$ 。转换前后空间中的几何参数发生如下改变:

$$x' = ax$$

$$y' = by$$

$$z' = cz$$

$$h' = ch$$

$$l' = l \sqrt{c^2 \cos^2 \theta + (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \theta}$$

$$r'_w = \frac{r_w}{\alpha^{1/3}} \frac{1}{2\beta} \times \sqrt{\left(1 + \frac{\beta^2}{\gamma}\right)^2 + \left[\left(\sqrt{\frac{K_x}{K_y}} - \sqrt{\frac{K_x}{K_z}}\right) \frac{\cos \theta \cos \varphi \sin \varphi}{\gamma}\right]^2}$$

式中: θ 为分支井的井斜角; φ 为分支井的方位角; l' 、 l 为各向同性、各向异性气藏中的分支井井段长度; r'_w 、 r_w 分别为各向同性、各向异性气藏中分支井井段的半径; h' 、 h 分别为各向同性、各向异性气藏的储层厚度。

经过空间转换处理后的气藏与分支井形态均发生了一定改变,将改变后的参数输入产能预测模型,可以得到相应的压力分布以及产能情况。以 3 组不同程度各向异性的气藏为例,对 1 口 3 分支水平井的压力分布进行分析(图 1),3 个方向渗透率($K_x : K_y : K_z$)分别为:1:1:1(图 1-a)、1:0.6:0.4(图 1-b)、1:0.3:0.2(图 1-c)、1:0.2:0.1(图 1-d)。

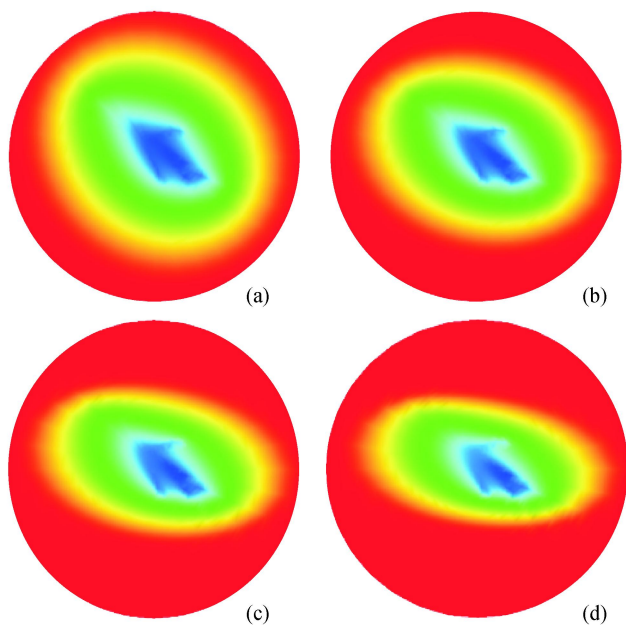


图 1 各向异性对多分支水平气井压力分布影响图

从图 1 中可以看出,考虑气藏各向异性后,多分支水平井近井地带压力分布发生了一定的偏转,各方向渗透率差异越大,压力分布图偏转的越严重。

2.2 断层影响

假设气藏中存在一条不渗透边界(图 2-a),根据渗流力学镜像反映原理,可将断层存在情况下 1 口生产井的情况等效为无限大地层沿断面对称的 2 口生产井共同生产的情况。考虑断层影响后多分支水平井压力分布图如图 2-b 所示。

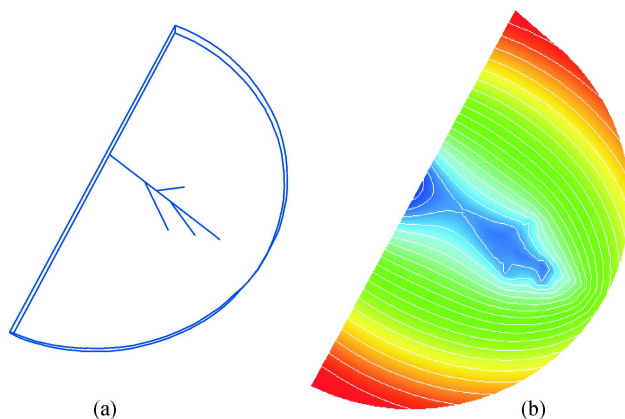


图 2 含断层气藏多分支水平气井压力分布图

2.3 井筒轨迹影响

在对多分支水平气井进行产能预测或数值模拟的过程中,大部分研究人员都选用斜直井段对分支井筒进行描述,但实际钻井过程中,由于安全因素和钻井因素,实际分支轨迹是弯曲的,从开分支点向外分支角度逐步增大。这种由于钻井实际轨迹造成的弯曲分支与常规模拟所采用的斜直分支是有区别的。

如图 3 所示(以一分支井为例),弯曲分支对主井筒的产出剖面影响更大(图中汇合点处),而分支井筒的产出剖面两者也有很大区别。因此,在实际产能预测过程中,必须选用根据实际钻井轨迹来划分分支井段,从而实现对弯曲井筒的模拟,达到更好的预测效果。

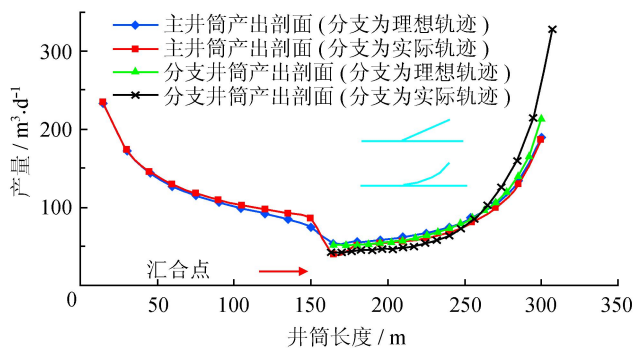


图 3 多分支水平气井产出剖面图

3 井型优化应用研究

选取某气藏 1 口 4 分支水平井进行井型优化应用研究。气藏水平渗透率 $5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,垂向渗透率 $0.5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,储层厚度 10 m,体积系数 1.32,气体黏度 0.017 7 mPa·s,压缩因子为 0.923,生产压差 1 MPa,供给半径 1 000 m,井筒半径 0.05 m,主井筒长 500 m,分支井筒长 100 m,分支角度 30° ,分支数目 4 支,如图 4 所示。

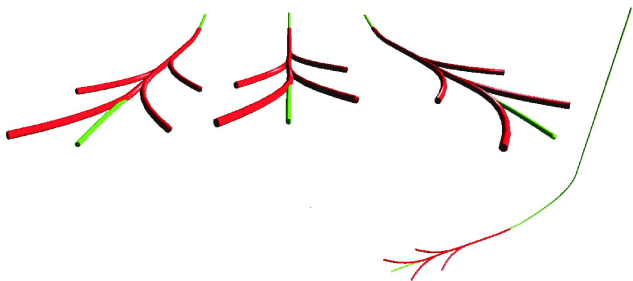


图 4 多分支水平气井井型示意图

分支数目、分支长度、分支角度是影响多分支水平井产能的重要因素,也是进行井型优化的主要目标参数。下面以产能为目标,分别选取不同分支参数(表 1)进行优化分析研究,其优化结果如图 5 所示。图 5 中等值线为分支井产能比(分支井产能与主井筒单独生产时的产能之比)。

表 1 多分支水平气井井型参数表

分支数目/支	2、4、6
分支长度/m	50、100、150、200、250、300
分支角度/ $^\circ$	15、30、45、60、75、90

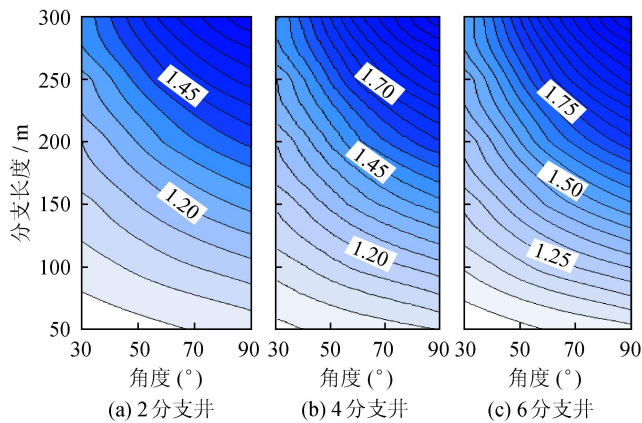


图 5 多分支水平气井井型优化结果图

从图 5 中可以看出,分支数目较小时(2 分支井),如保持分支角度不变,随着分支长度的增加,产能比增

加,等值线变密集,说明产能比增幅变大,分支角度越大,增加分支长度带来的产能比增幅越明显。

如保持分支长度不变,随着分支角度的增加,产能比增加,等值线略微变稀疏,说明产能比增幅逐渐减小,分支长度越大,增加分支角度带来的产能比增幅越小。

随着分支数目的增加,等值线变密集,分支井产能比增大,分支长度与分支角度对产能比影响的规律不变,但变化幅度变小。

分析其原因,主要是由于分支间存在严重干扰造成的,分支长度变大,分支角度变大,分支数目增多,都会增加分支井筒与主井筒之间的干扰以及分支井筒互相之间的干扰。

综合来看,应有如下优化结论:①应采取 4 分支以上的分支数目;②分支角度应不小于 30° ;③分支长度根据气藏需求选用尽可能大的长度。

4 结论

1)针对实际气藏应用多分支水平井产能预测模型中可能出现的问题,提出了考虑气藏各向异性影响、断层影响、钻井轨迹影响的综合产能预测方法。

2)分别对多分支水平气井的分支数目、分支角度、分支长度进行了井型优化研究,提出了多分支水平气井的井型应为 4 分支以上,角度不小于 30° 、分支长度尽量长。

参 考 文 献

[1] 吴晓东,安永生,席长丰.煤层气羽状分支井数值模拟新方法[J].天然气工业,2007,27(7):76-78.
[2] 陈志海,马新仿,郎兆新.气藏水平井产能预测方法[J].天然气工业,2006,26(2):98-99.
[3] 韩国庆,吴晓东,李相方,等.国内外非常规井模型研究进展[J].石油钻采工艺,2004,26(1):47-51.
[4] 李春兰,程林松,孙福街.鱼骨型水平井产能计算公式推导[J].西南石油大学学报,2005,27(6):36-38.
[5] 刘想平,张兆顺,崔贵香,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.
[6] 陈要辉,阎铁,毕雪亮.油藏斜井三维势分布理论研究[J].石油学报,2003,24(3):90-93.
[7] 杨小松,刘传喜,严谨,等.鱼骨型多分支水平气井产能规律研究[J].石油学报,2008,29(5):727-733.
[8] 葛家理,宁正福,刘月田,等.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001:521-531.
[9] 石书灿,李玉魁,倪小明.煤层气竖直压裂井与多分支水平井生产特征[J].西南石油大学学报,2009,31(1):48-52.