

文章编号:0253-9993(2013)04-0617-07

# 分支参数对煤层气羽状水平井产能的影响规律

姜婷婷<sup>1</sup>,杨秀娟<sup>1</sup>,闫相祯<sup>1</sup>,丁云宏<sup>2</sup>,王 欣<sup>2</sup>,杨恒林<sup>3</sup>,王同涛<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580;2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007;3. 中国石油集团 钻井工程技术研究院,北京 100195)

**摘 要:**根据煤储层中三维气-水两相流动特性,考虑主井眼与分支井眼井眼内变质量管流,建立了煤层气羽状水平井产能预测模型,利用 C++ 计算机语言编制相应计算软件,并通过与现场监测值进行对比验证本文模型计算结果的正确性。分析了分支对称性、分支点位置、分支与主井眼夹角、分支长度与数量等参数对煤层气羽状水平井单位长度产能分布的影响规律。计算结果表明:笔者建立的计算模型具有较高精度,可以满足现场实际工程需要。主井眼单位长度产能整体呈现两端高、中间低的特征;在主支与分支交汇点处,主井眼单位长度产能出现局部下降。分支井单位长度产能沿程分布呈现跟端低、指端高,中间逐渐增大的特点。分支沿主井眼对称分布时,分支位置处主井眼单位长度产能与非对称分布时相比下降的更快;分支节点由主支跟端向指端移动,主井眼单位长度产能峰值点从指端向跟端发生转变;分支与主支夹角对主井眼单位长度产能影响较小;主井眼单位长度产能随着分支长度与数量的增加而降低。分支节点距离主井眼跟端越远,分支井单位长度产能越大;分支井单位长度产能随着分支与主井眼夹角角度、分支长度的增加而增加,随着分支数量的增加而逐渐降低。

**关键词:**煤层气;羽状水平井;分支参数;数学模型;径向入流剖面

**中图分类号:**P618.11 **文献标志码:**A

## Influences of branch parameters on productivity of CBM pinnate horizontal well

JIANG Ting-ting<sup>1</sup>, YANG Xiu-juan<sup>1</sup>, YAN Xiang-zhen<sup>1</sup>, DING Yun-hong<sup>2</sup>,  
WANG Xin<sup>2</sup>, YANG Heng-lin<sup>3</sup>, WANG Tong-tao<sup>1</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China; 3. Institute of Drilling and Technology, China National Petroleum Corporation, Beijing 100195, China)

**Abstract:** Considering the variable mass pipe flow of the main and branch boreholes, the CBM pinnate horizontal well productivity prediction model was proposed based on 3D gas-water two-phase flow characteristics in the coal seam. The corresponding calculation program is written based on C++ programming language. At the same time, an actual CBM well is simulated as an example. The simulated results are verified by the monitoring data from the actual site. This paper studies the effects of branch symmetry, the locations of branch points, the angle between main and branch boreholes, branch length, and branch number on gas production per unit length of the CBM well. The comprehensive results demonstrate the high accuracy of the computation model, and its ability to meet the actual needs of the project. The characteristics of gas production per unit length along the main borehole is high on both ends and low in the middle, with local decline at the branch point locations, while the characteristic of gas production per unit length along the branch borehole is high at heel, low at toe and increases gradually in the middle. Gas production per unit length at

收稿日期:2012-03-26 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”资助项目(2011ZX05037;2011ZX05036)

作者简介:姜婷婷(1985—),女,江西南昌人,博士研究生。Tel:0546-8391820, E-mail:jiangtingting104@163.com

branch locations along main borehole declines faster when branches are symmetrical than asymmetrical. As branch node moves from heel to toe along the main borehole, peak gas production per unit length also transforms from toe to heel. The angles of the main and branch boreholes have no effect on gas production. At the same time, gas production per unit length reduces as the branch length along main borehole increases. Gas production per unit length increases with the distance from branch node to heel end. Gas production per unit length increases with the increase of branch length and the angle between main and branch boreholes. However, it declines as the number of branches increase.

**Key words:** coalbed methane; pinnate horizontal well; branch parameter; mathematical model; radial inflow profile

煤层气羽状水平井是在常规水平井与分支井基础上发展起来的一种新井型。采用羽状水平井技术开采煤层气具有极大的优越性,突破了直井与水平井的点或线范围排水采气的局限,具有控制面积大、导流能力强的特点,能大范围地沟通煤层裂隙系统,从而大幅度地提高单井产能与采收率<sup>[1-3]</sup>。在煤层气羽状水平井开采过程中,会抽排出大量煤层中的承压水,存在气-水两相渗流问题<sup>[4-6]</sup>。同时,除了在井眼指端较高的压力驱动下流体流向跟端外,煤层流体也不断通过壁面流入井眼,造成了沿井眼指端至跟端流体质量不断增加的变质量流动<sup>[7-8]</sup>。正确反映煤层气羽状水平井的剖面入流动态是准确预测其产能的重要依据,国内外很多学者对该问题进行了研究。韩国庆等<sup>[9]</sup>提出了多分支井半解析产能预测模型,但模型中没有考虑分支井眼内流体汇流对产能的影响,导致计算得到的煤层气井产能偏低。黄世军等<sup>[10]</sup>假定鱼骨状分支井眼不存在沿程压力损失,仅考虑了分支井眼与主井眼间的干扰,对近井渗流特征进行了研究。Retnanto 等<sup>[11]</sup>首次在羽状水平井产能预测中引入了“形状因子”的概念。Penmatcha 等<sup>[12]</sup>将水平井水平段分成若干个小微元段,利用势叠加原理与物质平衡原理建立了油藏与多分支水平井耦合模型,但没有考虑分支井眼间的干扰。Yeten 等<sup>[13]</sup>考虑近井渗透率非均质性,以累计产能与经济净现值为目标函数,运用遗传算法、人工神经网络建立了多分支井井型优化模型,较为精确地描述了分支参数对产能的影响,但是该模型求解复杂、计算工作量大。

本文根据煤储层中三维气-水两相流动特性,考虑主井眼与分支井眼内变质量管流,建立了煤层气羽状水平井产能预测的数学模型,采用有限差分法对其进行求解并编制相应的计算程序,分析了煤层气羽状水平井沿程单位长度的产能分布规律。同时,以沁水盆地某煤层气羽状水平井为例分析了其增产机理,研究了分支对称性、分支点位置、分支与主井眼夹角、分支长度和数量等参数对煤层气羽状水平井主井眼与分支井眼单位长度产能的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 煤储层中三维气-水流动模型

考虑到煤岩是由煤岩基质和割理构成的特殊介质,且孔隙系统构成较为复杂,主要由基质微孔隙系统、基质孔隙系统与割理孔隙系统组成。因此,笔者在数学模型建立过程中引入以下假设条件<sup>[14-15]</sup>:①煤层可压缩并具有各向异性;②煤岩基质内的煤层气为非平衡拟稳态扩散且服从 Fick 第一定律;③水为不可压缩流体,不考虑煤层气在水中的溶解;④水、气在割理系统内的流动服从达西定律。

煤储层中三维气-水两相运移方程<sup>[16-18]</sup>为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\rho_w k_{ox} k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_w - \rho_w g H) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\rho_w k_{oy} k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_w - \rho_w g H) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\rho_w k_{oz} k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial}{\partial z} (p_w - \rho_w g H) \right] + q_{yw} = q_{hw} + \frac{\partial(\rho_w \varphi S_w)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\rho_g k_{ox} k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial}{\partial x} (p_g - \rho_g g H) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\rho_g k_{oy} k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial}{\partial y} (p_g - \rho_g g H) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\rho_g k_{oz} k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial}{\partial z} (p_g - \rho_g g H) \right] + q_{yg} = q_{hg} + \frac{\partial(\rho_g \varphi S_g)}{\partial t} \quad (2)$$

式中, $k_{ox}, k_{oy}, k_{oz}$ 为初始状态下的裂隙绝对渗透率分别在  $x, y, z$  方向的分量,  $m^2$ ;  $k_{rg}, k_{rw}$ 为裂隙系统中气相与水相的相对渗透率;  $p_g, p_w$ 为裂隙系统中气相、水相的绝对压力, Pa;  $\rho_g, \rho_w$ 分别为气、水相的流体密度,  $kg/m^3$ ;  $g$ 为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $H$ 为标高, m;  $q_{yg}, q_{yw}$ 分别为由基质孔隙系统窜入煤岩裂隙系统中的气相与水相的流量,  $m^3/d$ ;  $q_{hg}, q_{hw}$ 分别为煤储层内气、水的产量,  $m^3/d$ ;  $\varphi$ 为煤岩裂隙孔隙度;  $S_g, S_w$ 为裂隙系统中气、水相饱和度;  $\mu_g, \mu_w$ 为裂隙系统中气相与水相的黏度,  $Pa \cdot s$ 。

### 1.2 井眼变质量流动模型

如图 1 所示,假定羽状水平井具有  $T$  个分支,主支与分支均由若干个小微元段组成,主井眼跟端坐标点

为  $A(x_a, y_a, z_a)$ 。将主井眼沿跟端至指端分成  $n$  个微元段,各微元井段长度为  $\Delta x_i (1 \leq i \leq n)$ ;将第  $j$  分支井眼由跟端至指端分为  $m_j$  段,第  $k$  微元段的长度为  $\Delta x_{j,k} (1 \leq j \leq T, 1 \leq k \leq m_j)$ ,第  $j$  分支井眼与主井眼的夹角为  $\theta_{j,i}$ 。

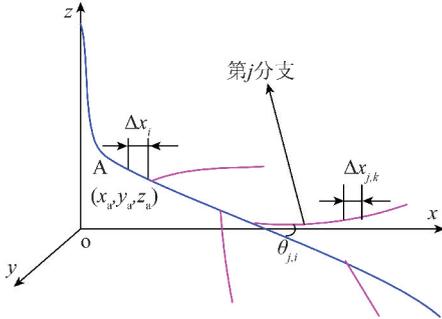


图1 煤层气羽状水平井三维井眼轨迹示意

Fig.1 3D borehole trajectory schematic of CBM pinnate horizontal well

### (1) 主井眼沿程流动模型。

井段内无分支情况下,主井眼变质量流压降计算公式为

$$\Delta p_{r,i} = \frac{\rho_i f_i \Delta x_i (2Q_i + Q_{Ri})^2}{1.6\pi D^5} + \frac{2\rho_i g Q_{Ri} (2Q_i + Q_{Ri})}{\pi^2 D^4} \quad (3)$$

井眼内有分支情况下,主井眼变质量流压降计算公式为

$$\Delta p_{r,i} = \frac{\rho_i f_i \Delta x_i (2Q_i + Q_{Ri} + Q_{Hi})^2}{1.6\pi D^5} + \frac{0.5\rho_i \sin \theta_{j,i} (Q_i + Q_{Ri} + Q_{Hi})^2}{\pi^2 D^4} + \frac{\rho_i g \cos \theta_{j,i} (Q_{Ri} + Q_{Hi}) (2Q_i + Q_{Ri} + Q_{Hi})}{\pi^2 D^4} \quad (4)$$

主支井眼相邻上游流入第  $i$  微元段的流量为从煤层流入该井段的上游所有主支与分支流量之和,则有

$$Q_i = \sum_{j=i+1}^n Q_{Rj} + \sum_{j=w+1}^T \sum_{k=1}^{m_j} Q_{Rj,k} \quad (5)$$

羽状水平井主井眼沿程流压满足以下关系式

$$p_{r,i} = p_{r,i-1} + 0.5(\Delta p_{r,i} + \Delta p_{r,i-1}) \quad (6)$$

式中,  $p_{r,i}$  为主井眼第  $i$  微元段流压, Pa;  $\Delta p_{r,i}$  为主井眼第  $i$  微元段压降, Pa;  $\rho_i$  为主井眼第  $i$  微元段内混合流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $f_i$  为主井眼第  $i$  微元段内流体与管壁间的摩擦因数;  $D$  为主井眼直径, m;  $Q_i$  为由主井段相邻上游流入第  $i$  微元段的流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{Ri}$  为由煤层流入第  $i$  微元井段的流量,  $Q_{Ri} = q_{gi} + q_{wi}$ ,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{Hi}$  为第  $i$  微元井段内由分支流入的流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{Rj,k}$

为由煤层流入第  $j$  分支的第  $k$  微元井段的流量,  $Q_{Rj,k} = q_{gj,k} + q_{wj,k}$ ,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $w$  为主井眼第  $i$  微元井段至跟端范围内分支井的数量。

### (2) 分支井眼沿程流动模型。

羽状水平井第  $j$  分支变质量流压降计算公式为

$$\Delta p_{fj,k} = \frac{\rho_{j,k} f_{j,k} \Delta x_{j,k} (2Q_{j,k} + Q_{Rj,k})^2}{1.6\pi d_j^5} + \frac{2\rho_{j,k} g Q_{Rj,k} \sin \theta_{j,i} (2Q_{j,k} + Q_{Rj,k})}{\pi^2 d_j^4} \quad (7)$$

羽状水平井第  $j$  分支由相邻上游流入第  $k$  微元段的流量为该微元段上游所有井段的入流量之和:

$$Q_{j,k} = \sum_{a=k+1}^{m_j} Q_{Rj,a} \quad (8)$$

羽状水平井第  $j$  分支沿程流压满足:

$$p_{fj,k} = p_{fj,k-1} + 0.5(\Delta p_{fj,k} + \Delta p_{fj,k-1}) \quad (9)$$

式中,  $p_{fj,k}$  为第  $j$  分支的第  $k$  微元段流压, Pa;  $\Delta p_{fj,k}$  为第  $j$  分支的第  $k$  微元段压降, Pa;  $\rho_{j,k}$  为第  $j$  分支的第  $k$  微元段内混合流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $f_{j,k}$  为第  $j$  分支的第  $k$  微元段流体与管壁间摩擦因数;  $d_j$  为第  $j$  分支井眼直径, m;  $Q_{j,k}$  为由第  $j$  分支的第  $k$  微元段相邻上游流入该井段的流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

煤层气羽状水平井在煤层气开采过程中,由于压力连续原理可知储层内流体流动在井壁的压力应等于井眼内流体在井壁处的流动压力。则可以通过利用该边界条件建立煤层气多分支水平井主井眼和分支井眼间流压和产能计算的耦合方程组。

## 2 结果分析

### 2.1 计算结果验证

利用有限差分法对上述模型进行求解,并采用 C++ 计算机语言编制了相应计算程序。为了验证本文计算模型的正确性和精度,对沁水盆地 ZP1 煤层气羽状水平井产能进行了模拟计算,并与现场监测值进行了对比。ZP1 井主井眼长为 400 m,两个分支井眼长均为 200 m,与主井眼夹角为  $30^\circ$ ;两分支井位于主井眼的两侧,分支节点 1,2 分别距主井眼跟端 130,270 m (图 2)。表 1 给出了本文计算中用到的参数。

图 3 为数值模拟计算结果与现场监测值的对比,由图 3 可知,本文模型的计算结果与监测值吻合较好,平均误差为 9% 左右,可以满足工程计算精度要求。

### 2.2 影响因素分析

为了得到分支对称性、分支点位置、分支与主井眼夹角、分支长度和数量等参数对羽状水平井井眼单

位长度产能的影响规律,笔者对上述参数分别进行了模拟计算,在模拟计算中仍以 ZP1 井(图 2)的实际参数为依据,说明分支参数对羽状水平井单位长度产能的影响。

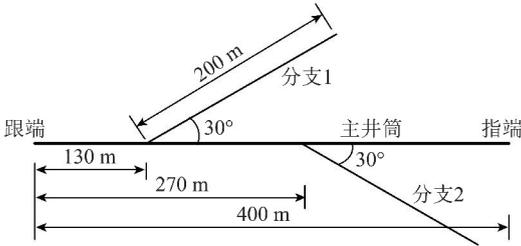


图 2 ZP1 羽状水平井分支及尺寸

Fig. 2 Branch distribution and size of ZP1 pinnate horizontal well in coal seam

表 1 煤岩参数

Table 1 Parameters of coal seam

参数	值	参数	值
煤层压力/MPa	4.26	煤层渗透率/( $10^{-15} \text{ m}^2$ )	0.82
煤层孔隙度/%	2.4	井眼内壁相对粗糙度	0.01
主井眼半径/m	0.12	分支井眼半径/m	0.1
解吸时间/d	4	含气饱和度/%	86.32

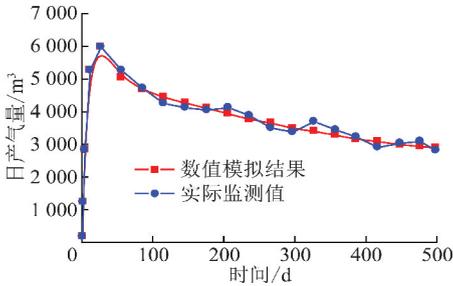
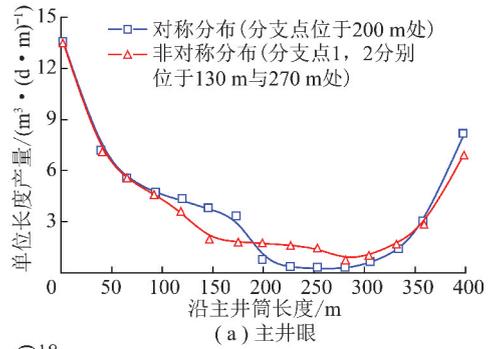


图 3 煤层气羽状水平井日产气量曲线

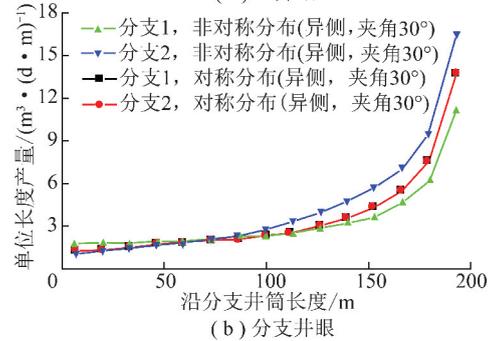
Fig. 3 Curves of daily gas production of CBM pinnate horizontal well

2.2.1 分支对称性

为了研究分支分布形式对羽状水平井单位长度产能的影响,笔者讨论了分支对称分布和非对称分布时(图 2)的主支与分支沿程产能(图 4),其中当分支对称分布时两分支均位于距离主井眼跟端 200 m 处。由图 4 中的计算结果可知,主井眼单位长度产能最大值出现在跟端,其次为指端,中间水平段单位长度产能较小。当分支非对称分布时,主井眼单位长度产能在分支位置处均出现了降低,而两分支对称分布时主井眼单位长度产能在分支位置处显著降低,最小值基本接近于 0(图 4(a))。说明分支对称分布时,不利于分支附近主井眼的利用效率,降低了羽状水平井控制区域的煤层气抽采速率和采收率。因此,不建议分支按照对称方式分布。



(a) 主井眼



(b) 分支井眼

图 4 分支对称分布和非对称分布时羽状水平井沿程单位长度产能分布

Fig. 4 Production distributions per unit length of pinnate horizontal wells when symmetric or asymmetric distribution of branches

由图 4(b)可以看出,由于受到主井眼的干扰,分支井眼跟端的单位长度产能最低,中间段产能逐渐增加,在指端流量达到峰值。无论分支井眼对称或非对称分布,分支井单位长度产能的分布规律大体相同,且分支点越远离主井眼跟端,单位长度产能越大。

2.2.2 分支点位置

图 5 给出了两分支对称分布于主井眼两侧时,仅改变分支节点位置对羽状水平井主井眼和分支井眼单位长度产能分布的影响。分支节点位置对主井眼沿程单位长度产能影响较大,随着分支节点由主井眼跟端不断向指端移动,峰值产能从指端向跟端逐渐发生转变(图 5(a));同时,分支井单位长度产能也随着距离主井眼跟端距离的增加而逐渐增加。说明科学合理地确定分支节点与主井眼跟端距离可以有效改善主井眼和分支井眼单位长度产能,提高多分支水平井整体利用效率和煤层气采收率。

2.2.3 分支与主井眼夹角

通过改变两个分支与主井眼夹角得到羽状水平井主井眼与分支井眼单位长度产能的变化规律(图 6)。在主井眼跟端至分支节点 1 的范围内,主井眼单位长度产能随着夹角角度的增加而有所降低;夹角大小对分支节点 1 至节点 2 之间区域的主井眼单位长度产能无明显影响;在分支节点 2 至主井眼指端范

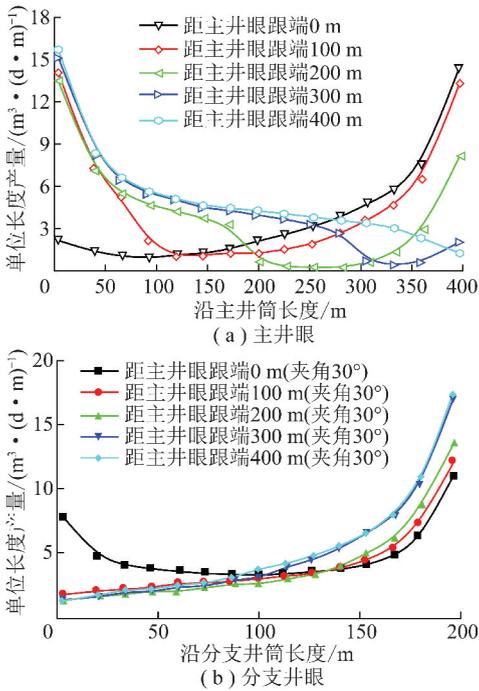


图5 分支点位置不同时羽状水平井沿程单位长度产能分布  
Fig. 5 Production distributions of per unit length of pinnate horizontal wells when branches locate at different locations of main wellbore

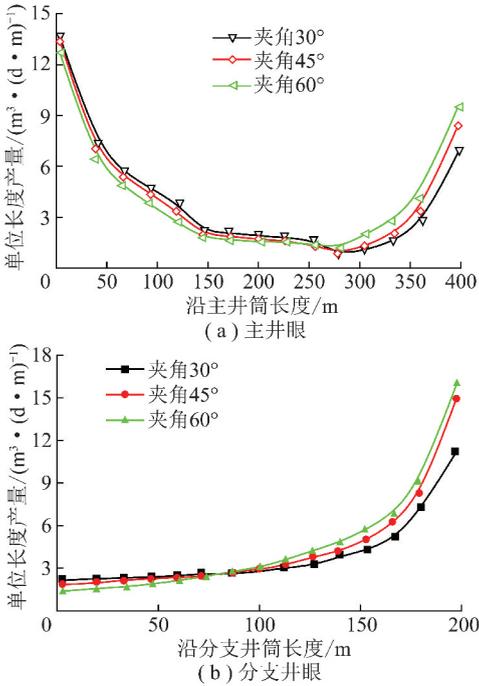


图6 分支与主井眼夹角不同时羽状水平井沿程单位长度产能分布  
Fig. 6 Production distributions of per unit length of pinnate horizontal wells with different angles between main and branch boreholes

度产能的变化规律基本相同,以分支井眼1为例,随着夹角角度的增加,分支井眼受主井眼的影响逐渐减弱,使得分支井单位长度产能逐渐增大,可知提高分支与主井眼的夹角能适当提高分支井产气量。通过理论分析可知,当分支井与主井眼夹角达到 $90^\circ$ 时,煤层气羽状水平井泄气控制面积最大,对提高产气量最为有利,但是在实际设计过程中还需要考虑钻井、完井工具最小许可弯曲半径的影响。因此,在钻井和完井工具许可的条件下,增加分支井与主井眼间的夹角可以提高煤层气羽状水平井产能。

2.2.4 分支长度

图7给出了分支井眼长度对羽状水平井主井眼和分支井眼单位长度产能影响的计算结果。在主井眼跟端至分支节点1范围之内,分支井长度对主井眼径向入流量的影响不大;在分支节点1至分支节点2范围内,主井眼单位长度产能随着分支长度的增加而降低;在分支节点2到主井眼指端范围内,随着分支井长度的增加,主井眼受到分支井的干扰逐渐加剧,主井眼单位长度产能随着分支长度的增加而不断下降。随着分支井长度的增加,分支井眼单位长度产气量逐渐提高。

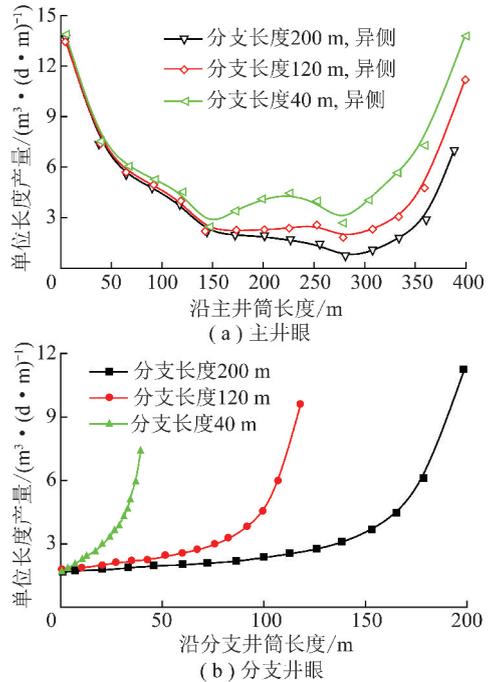


图7 分支长度不同时羽状水平井沿程单位长度产能分布  
Fig. 7 Production distributions of per unit length of pinnate horizontal wells with different branch lengths

2.2.5 分支数量

在讨论分支数目对羽状水平井单位长度产能的影响时,以图2中羽状水平井计算参数为基础,分别增加为3分支和4分支(图8),计算结果如图9所示。

围内,随着夹角角度的增加主井眼单位长度产能逐渐提高(图6(a))。分支井眼1与井眼2的沿程单位长

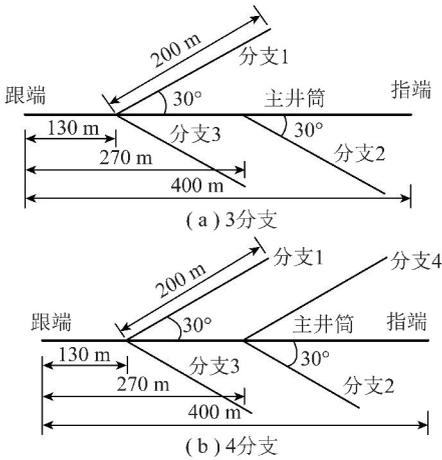


图 8 多分支羽状水平井结构和尺寸

Fig. 8 Structure and size of multi-branch pinnate horizontal wells

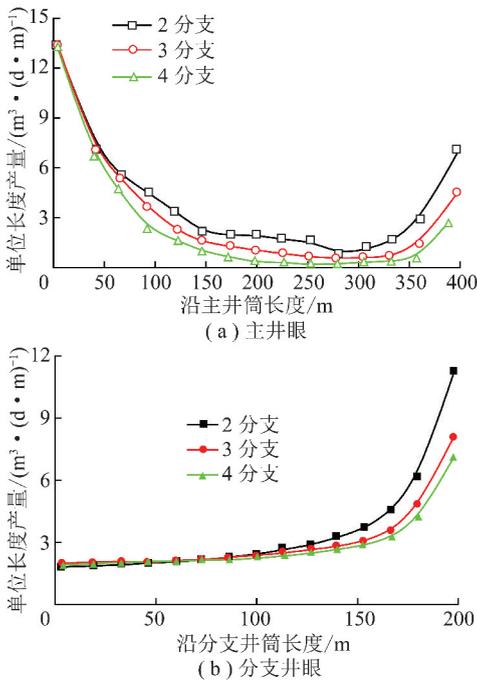


图 9 分支数量不同时羽状水平井沿程单位长度产能分布

Fig. 9 Production of per unit length of pinnate horizontal wells with different branch numbers

由图 9 可知:随着分支数量的增加,主井眼受到分支井眼的干扰逐渐加强,主井眼单位长度的产能不断降低,并且分支节点位置处受到分支的影响逐渐降低,因为整个羽状水平井产能主要由分支贡献,主井眼贡献量较少。以分支井眼 1 为例分析分支井数量对其沿程单位长度产能分布的影响(图 9(b)),可知随着分支井数量的增加,沿程单位长度产能的变化规律大体相同,但单位长度的产能整体呈下降趋势;由 2 分支增加到 3 分支时,单位长度产能下降明显,然而由 3 分支增加至 4 分支时,单位长度产能下降幅度显著降低。

根据上述计算结果建议在煤层气羽状水平井设计过程中遵循以下原则:分支井应非对称异侧分布;分支点均匀分布在主井段上;在钻井和完井工具许可的条件下尽量增大分支井与主井眼间的夹角;分支长度越长越好,一般取为 1/2 井排间距,以保持井排间煤层连通;分支数量越多越有利于提高整体产量和采收率,实际设计中还需要考虑时间和经济成本等因素的影响,最终确定出合理的分支个数。

### 3 结 论

(1) 根据煤储层中三维气-水两相流动特性,考虑主井眼与分支井眼内变质量管流,建立了煤层气羽状水平井产能预测模型。分析了分支对称性、分支点位置、分支与主井眼夹角、分支长度与数量等参数对煤层气羽状水平井单位长度产能分布的影响规律。计算结果表明:笔者建立的计算模型具有较高精度,可以满足实际工程需要。

(2) 煤层气羽状水平井单位长度产能沿主井眼整体呈现两端高、中间低的特征;由于主井眼与分支井眼之间的相互干扰,在分支与主井眼交汇点处,主井眼单位长度产能出现局部下降。分支井跟端的单位长度产能最低,中间段产能逐渐增加,在指端产能达到峰值。

(3) 两分支非对称分布时,主井眼单位长度产能在分支位置处均出现了降低,而两分支对称分布时主井眼单位长度产能在分支位置处显著降低,最小值基本接近于 0。分支节点位置对主井眼沿程单位长度产能影响较大,随着分支节点由主井眼跟端向指端移动,峰值产能从指端向跟端逐渐发生转变。分支节点将主井眼沿跟端至指端分为 3 个区域,随着分支与主井眼夹角角度的增加,3 个区域内主井眼单位长度产能分别降低、保持不变、增加。随着分支长度与数量的增加,主井眼受到分支井的干扰逐渐加剧,主井眼单位长度产能不断降低。

(4) 无论分支井眼对称或非对称分布,分支井的单位长度产能分布规律大体相同,且分支点越远离主井眼跟端单位长度产能越大。随着分支与主井眼夹角角度、分支长度的增加,分支单位长度产能逐渐增大。单位长度产能随着分支数量的增加整体呈下降趋势,但下降幅度逐渐降低。

### 参考文献:

[1] 闫相祺,张衍涛,王同涛,等. 煤层气多分支水平井完井管柱许可造斜率设计[J]. 煤炭学报,2010,35(5):787-791.

Yan Xiangzhen, Zhang Yantao, Wang Tongtao, et al. Permitted build-

- up rate of completion strings in multi-branch CBM well[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 787-791.
- [2] 王同涛, 闫相祯, 杨秀娟. 基于塑性铰模型的煤层气完井筛管抗挤强度分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 273-277.  
Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan. Collapse pressure of perforated liner casing in CBM exploration based on plastic hinge model [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 273-277.
- [3] Clarkson C R, Rahmanian M, Kantzas A, et al. Relative permeability of CBM reservoirs; controls on curve shape[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 88(4): 204-217.
- [4] Thararoop Prob, Karpyn Zuleima T, Ertekin Turgay. Numerical studies on the effects of water presence in the coal matrix and coal shrinkage and swelling phenomena on CO<sub>2</sub> enhanced coalbed methane recovery process[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2012, 5(1): 47-65.
- [5] Jiang Tingting, Yang Xiujuan, Yan Xiangzhen, et al. Prediction of coalbed methane well production by analytical method[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(16): 2824-2830.
- [6] Keim Steven A, Luxbacher Kramer D, Karmis Michael. A numerical study on optimization of multilateral horizontal wellbore patterns for coalbed methane production in Southern Shanxi Province, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(4): 306-317.
- [7] Maricic Nikola, Mohaghegh Shahab D, Artun Emre. A parametric study on the benefits of drilling horizontal and multilateral wells in coalbed methane reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(6): 976-983.
- [8] 王同涛, 闫相祯, 杨恒林, 等. 多夹层盐穴储气库群间矿柱稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 790-795.  
Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Henglin, et al. Stability analysis of pillars between bedded salt cavern gas storages[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 790-795.
- [9] 韩国庆, 吴晓东, 陈昊, 等. 多层非均质油藏双分支井产能影响因素分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(4): 81-85.  
Han Guoqing, Wu Xiaodong, Chen Hao, et al. Influence factors for production of dual-lateral well in multilayer heterogeneous reservoirs [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Natural Science Edition), 2004, 28(4): 81-85.
- [10] 黄世军, 程林松, 赵凤兰, 等. 平面多分支井产能评价新模型研究[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 1-5.  
Huang Shijun, Cheng Linsong, Zhao Fenglan, et al. Study on productivity evaluation model of plane multi-lateral well[J]. Well Testing, 2009, 18(4): 1-5.
- [11] Retnanto A, Frick T P, Brand C W, et al. Optimal configurations of multiple-lateral horizontal wells[J]. SPE 35712, 1996.
- [12] Penmatcha V R, Aziz K. Comprehensive reservoir/wellbore model for horizontal wells[J]. SPE Journal, 1999, 4(3): 224-234.
- [13] Yeten B, Durlafsky Louis J, Aziz K. Optimization of nonconventional well type, location and trajectory [J]. SPE Journal, 2003, 8(3): 200-210.
- [14] Gorucu F B, Jikich Sinisha A, Bromhal Grant S, et al. Effects of matrix shrinkage and swelling on the economics of enhanced-coalbed-methane production and CO<sub>2</sub> sequestration in coal[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(4): 382-392.
- [15] 刘新福, 綦耀光, 胡爱梅, 等. 单相水流动煤层气井流入动态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 960-966.  
Liu Xinfu, Qi Yaoguang, Hu Aimei, et al. Inflow performance analysis of single-phase water flow in coalbed methane wells [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 960-966.
- [16] 张先敏, 同登科. 沁水盆地产层组合对煤层气井产能的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 272-275.  
Zhang Xianmin, Tong Dengke. The effects of pay formation combination on productivity of coalbed methane well in Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 272-275.
- [17] Jiang Tingting, Yang Xiujuan, Yan Xiangzhen, et al. Numerical simulation of coalbed methane seepage in pinnate horizontal well based on multi-flow coupling model[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(16): 2881-2889.
- [18] Jiang Tingting, Yang Xiujuan, Yan Xiangzhen, et al. A study on numerical simulation of CBM pinnate horizontal well for near-wellbore seepage[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(22): 4791-4797.