

考虑应力干扰的多簇压裂水平井产能分布规律

曾青冬¹, 佟颖², 姚军¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:为探究考虑应力干扰作用下多簇压裂水平井产能分布规律,有机结合多簇裂缝扩展与产能计算模型开展数值模拟研究。首先基于位移不连续法建立多簇裂缝同步扩展数学模型,采用牛顿迭代法构建求解算法;其次应用位势理论和叠加原理,通过划分裂缝单元的方法,考虑裂缝无限导流和有限导流能力两种情形,构建产能计算方法。结果表明:多簇裂缝同步扩展时,应力干扰作用不仅影响裂缝扩展路径,而且还影响裂缝几何参数,然而此应力干扰作用有利于提高井产量;产量与裂缝间距、半长有关,且裂缝间距对产量的影响程度高于裂缝半长的影响程度;考虑裂缝变导流能力时产量低于考虑裂缝恒定导流能力时产量;提出的计算方法可用于计算任意裂缝形态下产能分布,与实际情况更加相符。

关键词:水平井;多簇压裂;应力干扰;裂缝扩展;产能计算

中图分类号:TE 315 **文献标志码:**A

引用格式:曾青冬,佟颖,姚军.考虑应力干扰的多簇压裂水平井产能分布规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):99-107.

ZENG Qingdong, TONG Ying, YAO Jun. Production distribution in multi-cluster fractured horizontal wells accounting for stress interference[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 99-107.

Production distribution in multi-cluster fractured horizontal wells accounting for stress interference

ZENG Qingdong¹, TONG Ying², YAO Jun¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to investigate the production distribution in multi-cluster fractured horizontal wells in consideration of stress interference, numerical simulation has been conducted in combination of multi-cluster fracture propagation and production calculation models. Firstly, a mathematical model of multi-cluster fracture propagation was established based on a displacement discontinuity method and the algorithm of the model was solved by the Newton iteration method. Secondly, based on the potential theory and superposition principle, the calculation method of productivity was proposed by discretizing the fractures into elements under two scenarios with infinite fracture conductivity and finite conductivity. The results of a case study show that, when multi-cluster fractures propagate simultaneously, the effect of the stress interference not only affect the path of the fracture propagation but also influences the fracture's geometry. However, the effect of the stress interference is beneficial for improving the well production. The well production is related to the fracture spacing and fracture half length, and the effect of the former is stronger than that of the latter. The predicted production with consideration of a variable conductivity of fractures is lower than that when considering a constant conductivity. The results show that the proposed method can be used to calculate the productivity distribution with any fracture configuration, which is more consistent with the actual situation.

收稿日期:2018-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51234007,51490654,51404291)

作者简介:曾青冬(1987-),男,博士,研究方向为非常规储层压裂与数值模拟。E-mail: upc_zengqd@163.com。

通信作者:姚军(1964-),男,教授,博士,博士生导师,泰山学者攀登计划专家,研究方向为油气渗流与开发。E-mail: RCOGFR_UPC@126.com。

Keywords: horizontal wells; multi-cluster fracturing; stress interference; fracture propagation; productivity prediction

水平井分段压裂多簇射孔是低渗透油气藏和非常规油气藏开采的关键技术^[1]。裂缝扩展模型求解方法包括有限元方法^[2]、扩展有限元方法^[3-5]、位移不连续法^[6-8]、离散元方法^[9]等,较之于有限元类方法,位移不连续法求解速度更快。压裂水平井产能计算主要采用解析/半解析方法以及数值模拟方法^[10-15]。上述产能计算方法中裂缝为平行直线裂缝,然而多簇裂缝同步扩展时为非平行弯曲裂缝,因此有必要考虑缝间应力干扰对多簇压裂水平井产能分布的影响。笔者首先基于位移不连续法建立水平

井多簇裂缝同步扩展数值模型,基于此由位势理论和叠加原理构建多簇压裂水平井产量计算方法,并分析产量影响因素。

1 裂缝扩展模型

1.1 模型建立

建立如图1所示的水平井多簇裂缝同步扩展物理模型。假设岩体变形为线弹性,裂缝延伸符合线弹性断裂准则,考虑压裂液井筒摩阻和射孔摩阻,各个裂缝分流量动态变化。

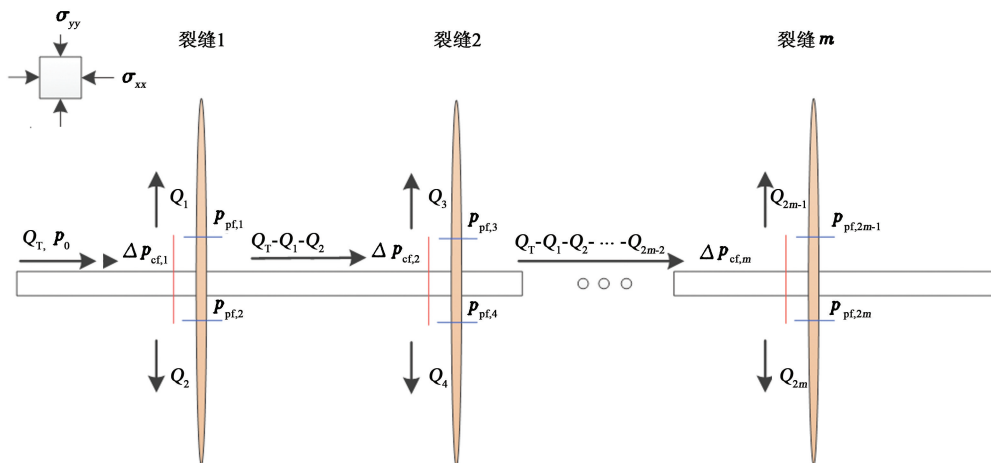


图1 水平井多簇裂缝同步扩展物理模型

Fig.1 Physical model of multi-cluster fractures propagation in horizontal well

1.1.1 压裂液流动

压裂液包括在井筒和裂缝中流动,考虑井筒中流动须满足流量和压力关系。其中注入量须满足

$$Q_T = \sum_{i=1}^{2m} Q_i \quad (1)$$

式中, Q_T 为总注入速率, m^3/s ; Q_i 为裂缝半翼 i 的注入速率, m^3/s ; m 为裂缝条数。

考虑井筒摩阻和射孔摩阻,流体压力须满足

$$p_0 = p_{w,i} + \Delta p_{pf,i} + \Delta p_{cf,i} \quad (2)$$

式中, p_0 为井筒跟部流压, Pa; $p_{w,i}$ 为裂缝半翼 i 入口处流压, Pa; $\Delta p_{pf,i}$ 为裂缝半翼 i 射孔摩阻压降, Pa; $\Delta p_{cf,i}$ 为裂缝半翼 i 井筒摩阻压降, Pa。

假设裂缝等高,忽略流体在纵向上的流动,裂缝宽度与裂缝长度相比较小,因此流体在每条裂缝上可以假设为一维流动,其运动方程为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{12\mu q}{hw^3} \quad (3)$$

式中, q 为截面流量, m^3/s ; w 为裂缝宽度, m; μ 为压裂液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t 为注入时间, s; x 为沿裂缝扩展

方向的位移, m; h 为裂缝高度, m。

压裂液流动满足连续性方程:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial w}{\partial t} + q_1 = 0 \quad (4)$$

式中, q_1 为流体滤失速度, m/s 。

方程(4)是局部守恒方程,建立全局守恒方程为

$$\int_0^t Q(t) dt = \int_{-L(t)}^{L(t)} H \bar{w} ds + \int_{-L(t)}^{L(t)} \int_0^t q_L dt ds \quad (5)$$

1.1.2 裂缝延伸

基于 Olson^[16]提出的三维修正系数,考虑有限高度对二维不连续方程的影响,其表达式为

$$\sigma_n^i = \sum_{j=1}^N G^{ij} C_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N G^{ij} C_{nn}^{ij} D_n^j, \quad (6)$$

$$\sigma_s^i = \sum_{j=1}^N G^{ij} C_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N G^{ij} C_{sn}^{ij} D_n^j \quad (7)$$

式中, σ_n 为法向应力, Pa; σ_s 为切向应力, Pa; D_n 为法向位移不连续量, m; D_s 为切向位移不连续量, m; C 为弹性系数矩阵; G 为三维修正系数。

裂缝扩展采用最大周向应力准则,当裂缝尖端综合应力强度因子超过岩石韧度时裂缝发生扩展,

且裂缝扩展方向为

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{K_I \pm \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right). \quad (8)$$

式中, θ 为裂缝尖端偏转角; K_I 为第一类应力强度因子, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$; K_{II} 为第二类应力强度因子, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。应力强度因子可采用尖端单元位移不连续量进行求解^[16]。

1.2 数值求解

对压裂液连续性方程(4)在单元 i 上关于 t 在 $[t, dt]$ 上积分, 得到流体离散形式为

$$-\sum_j q_{ij}' dt = h l_i (w_i^t - w_i^{t-dt}) + 4 C_l h l_i (\sqrt{t - \tau_0(i)} - \sqrt{t - dt - \tau_0(i)}). \quad (9)$$

对流体运动方程(3)采用有限差分方法进行离散, 得到裂缝单元间流量的表达式为

$$q_{ij} = \frac{1}{12\mu} \frac{h}{2} (w_i + w_j)^3 \frac{p_i - p_j}{(l_i + l_j)/2} = \frac{1}{48\mu} \frac{h}{2} (w_i + w_j)^3 \frac{(p_i - p_j)}{l_i + l_j}. \quad (10)$$

由于流动方程的非线性, 须采用迭代方法进行求解。选择流体压力 $p_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$, 裂缝分流量 $Q_k (k=1, 2, 3, \dots, 2m)$, 井筒跟部压力 p_0 , 时间步长 dt 为未知量。迭代求解思路为: 假设未知量迭代初值, 基于流体压力值 p_i 利用位移不连续方程求解位移不连续量, 即可得到裂缝宽度, 由方程(9)可得 N 个方程, 由方程(1)和(2)可得 $2m+1$ 个方程, 加上全局守恒方程(5)构成待求量的方程组, 未知量个数与方程个数相等, 采用牛顿迭代法即可求解上述方程组。

2 产能计算方法

当水平井多簇裂缝同步扩展时, 裂缝不再相互平行, 裂缝呈现弯曲延伸形态。基于裂缝扩展模型结果, 裂缝由有限个直线段单元组成, 通过叠加所有直线段单元上的位势得到势函数, 分为裂缝无限导流能力和有限导流能力两种情形, 构建了产能计算方法。

当裂缝与 x 轴平行时, 根据位势理论, 该裂缝所产生的势分布^[17]为

$$\Phi(x, y) - C = \frac{q_l B}{2\pi h} \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x^2}{L_f^2} + \left(\frac{y_0 - y}{L_f} \right)^2 \right\} + \sqrt{\left[1 + \frac{x^2}{L_f^2} + \left(\frac{y_0 - y}{L_f} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x^2}{L_f^2}}^{1/2}. \quad (11)$$

式中, Φ 为裂缝产生的势, m^2/s ; C 为常数; q_l 为裂缝产量, m^3/s ; L_f 为裂缝半长, m ; h 为裂缝高度, m ; B 为体积系数; y_0 为裂缝中点纵坐标, m 。

当裂缝倾斜时, 如图 2(a) 所示, 根据坐标变换公式, 整体坐标系下势分布为

$$\Phi(x, y) = \frac{q_l B}{2\pi h} \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x'^2}{L_f'^2} + \left(\frac{y'_0 - y'}{L_f'} \right)^2 \right\} + \sqrt{\left[1 + \frac{x'^2}{L_f'^2} + \left(\frac{y'_0 - y'}{L_f'} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x'^2}{L_f'^2}}^{1/2} + C. \quad (12)$$

其中坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - c_x \\ y - c_y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

式中, (x', y') 为局部坐标, m ; (c_x, c_y) 为裂缝中点坐标, m ; θ 为裂缝倾斜角, $(^\circ)$ 。

对于任意形态的裂缝, 如图 2(b) 所示, 图 2 中裂缝仅为示意图, 将其划分成 N 个单元, 基于坐标变换公式和叠加原理可得储层势函数为

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{q_{l,i} B}{2\pi h} \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - y'}{L_{f,i}} \right)^2 \right\} + \sqrt{\left[1 + \frac{x'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - y'}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x'^2}{L_{f,i}^2}}^{1/2} + C. \quad (14)$$

式中, $q_{l,i}$ 为裂缝单元 i 产量, m^3/s ; $L_{f,i}$ 为裂缝单元 i 半长, m 。

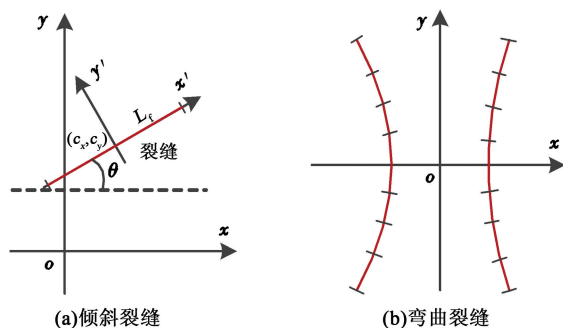


图2 裂缝示意图

Fig.2 Schematic diagram of fractures

在供给边界 (x_e, y_e) , 所有裂缝单元产生的势函数可表示为

$$\Phi(x_e, y_e) = \sum_{i=1}^N \frac{q_{l,i} B}{2\pi h} \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - x'_e}{L_{f,i}} \right)^2 \right\} + \sqrt{\left[1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - x'_e}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2}}^{1/2} + C. \quad (15)$$

对于每一裂缝单元, 其中点势函数可表示为

$$\Phi(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N \frac{q_{l,i} B}{2\pi h} \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - x'_m}{L_{f,i}} \right)^2 \right\} + \sqrt{\left[1 + \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y'_i - x'_m}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2}}^{1/2} + C,$$

$m = 1, 2, \dots, N$. (16)

势与压力的关系式为

$$\Phi = kp/\mu. \quad (17)$$

2.1 裂缝无限导流能力

考虑裂缝无限导流能力时,所有裂缝单元压力

$$\frac{k(p_e - p_w)}{\mu} = \sum_{i=1}^N \frac{q_{f,i} B}{2\pi h} \left\{ \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_e'}{L_{f,i}} \right)^2 + \sqrt{\left[1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_e'}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2}} \right\}^{1/2} - \right. \\ \left. \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_m'}{L_{f,i}} \right)^2 + \sqrt{\left[1 + \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_m'}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_m'^2}{L_{f,i}^2}} \right\}^{1/2} \right\}. \quad (18)$$

当井底流压和供给边界压力已知时,求解线性方程组,可求得各裂缝单元产量,将所有单元产量求和即为井产量。

2.2 裂缝有限导流能力

如图3所示,对于任一裂缝单元 j ,裂缝单元节点坐标分别为 (x_{j1}, y_{j1}) 和 (x_{j2}, y_{j2}) ,流体由 (x_{j1}, y_{j1}) 流向 (x_{j2}, y_{j2}) 。考虑裂缝有限导流能力时,采用达西公式表征裂缝单元节点压力和流量之间的关系^[18],可表示为

$$p_{j1} - p_{j2} = \int_{(x_{j1}, y_{j1})}^{(x_{j2}, y_{j2})} \left(\frac{\mu}{k_f b_f h} \right) (q_j' + q_{f,j}) ds, j = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

式中, k_f 为裂缝单元的渗透率, m^2 ; b_f 为裂缝单元的宽度, m 。

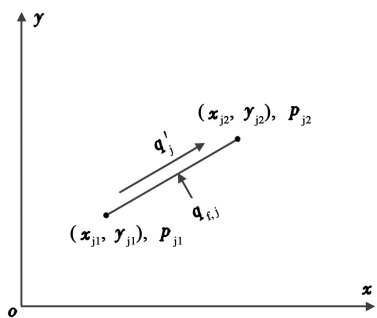


图3 裂缝单元流体流动示意图

Fig.3 Schematic diagram of fluid flow in fracture element

方程(19)中 q_j' 是由相邻单元流入单元 j 的流量,即可认为是节点 j_1 的流出流量,可表示为

$$q_j' = q_{j1} |_{\text{outflow}}. \quad (20)$$

$$\frac{k(p_e - p_{ej})}{\mu} = \sum_{i=1}^N \frac{q_{f,i} B}{2\pi h} \left\{ \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_e'}{L_{f,i}} \right)^2 + \sqrt{\left[1 + \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_e'}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_e'^2}{L_{f,i}^2}} \right\}^{1/2} - \right. \\ \left. \operatorname{arch} \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{x_j'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_j'}{L_{f,i}} \right)^2 + \sqrt{\left[1 + \frac{x_j'^2}{L_{f,i}^2} + \left(\frac{y_i' - x_j'}{L_{f,i}} \right)^2 \right]^2 - 4 \frac{x_j'^2}{L_{f,i}^2}} \right\}^{1/2} \right\}. \quad (23)$$

将方程(22)和(23)裂缝单元中点压力消除,可

都为井底流压,方程(14)与(15)相减消除常数 C ,并将方程(17)代入左端,可得到 N 个方程:

$$q_m = q_m |_{\text{inflow}} = q_m |_{\text{outflow}}, m = 1, 2, \dots, N_v. \quad (21)$$

式中, N_v 为裂缝单元节点总数。

以一条裂缝为例说明产量计算方法。如图4所示,水平井沿着 x 轴方向,裂缝与 x 轴交点为裂缝单元的节点。假设裂缝单元个数为 N ,则单元节点数 N_v 等于 $N+1$ 。已知井底压力和供给压力,则未知量包括:单元产量 $q_{f,j}$ (N 个)、单元节点流量 q_m ($N+1$ 个)以及单元节点压力 p_j ($N+1$ 个)。

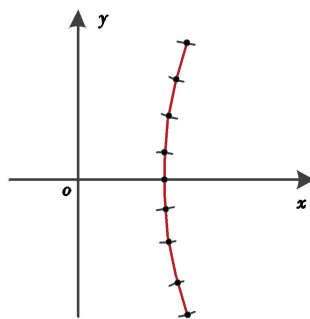


图4 一条裂缝产量计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of production calculation for one fracture

根据方程(19)可求出裂缝单元流入节点和中点的降压方程为

$$p_{j1} - p_{ej} = \int_{(x_{j1}, y_{j1})}^{(x_{ej}, y_{ej})} \left(\frac{\mu}{k_f b_f h} \right) \left(q_j' + \frac{q_{f,j}}{2} \right) ds, j = 1, 2, \dots, N. \quad (22)$$

方程(14)与(15)相减消除常数 C ,并将方程(17)代入左端,可得到 N 个方程为

得到 N 个方程。根据裂缝单元压降式(19)可得到

N 个方程。

此外,针对裂缝单元节点流量,如图 5 所示裂缝单元 i_1 和 i_2 ,裂缝节点为 j_1 、 j_2 和 j_3 ,节点 j_2 的流量计算方程为

$$q_{j_2} = q_{j_1} + q_{f,i_1} \tag{24}$$

裂缝尖端节点流量为 0,因此基于式(24)可得到 $N_v(N+1)$ 个方程。

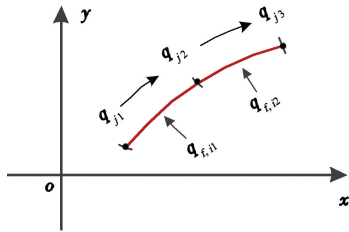


图 5 裂缝单元节点流量计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of flux calculation for fracture node

当井底流压和供给压力已知时,与水平井相交的裂缝单元节点压力即为井底流压,因此综合上述 $3N+2$ 个方程,与未知量个数相等,且为线性方程组,求解该方程组,即可求解裂缝单元产量,累加得到单条裂缝产量。采用相同方法可用于求解多簇裂缝产量,且根据井筒摩阻方程建立各裂缝入口节点压力之间的关系,可求解得到各簇裂缝产量。

3 算例结果分析

3.1 模型验证

为了验证裂缝扩展模型和算法的正确性,将滤失系数设为 0,裂缝条数为 1,比较数值解与 KGD 模型解析解。模型其他参数取值:弹性模量 E 为 20 GPa,泊松比 ν 为 0.25,注入速度 Q_0 为 $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$,裂缝高度 h_f 为 15 m,压裂液黏度 μ 为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。KGD 模型解析解详见参考文献[19]和[20],裂缝半长对比结果如图 6 所示。由图 6 可知,数值解与解析解相差很小,验证了裂缝扩展模型的正确性。

为验证产能计算方法的收敛性,计算对比了单一裂缝产量的解析解和数值解。模型参数取值:裂缝半长 L_f 为 100 m,裂缝高度 h_f 为 15 m,基岩渗透率 k 为 $0.02 \text{ } \mu\text{m}^2$,流体黏度 μ 为 $6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,体积系数 B 为 1.2,供给半径 r_e 为 800 m,供给压力 p_e 为 30 MPa,井底流压 p_w 为 23 MPa。

单一裂缝产量数值解与解析解对比结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着裂缝单元数目增加,数值解快速收敛于解析解,且当单元数大于 10 时,数值解与解析解之间的相对误差为 0.04%,说明本文中计算方

法正确有效。本文中数值解可用于求解多簇弯曲裂缝产量,此种情形下并无解析解,因此本文中的数值方法使裂缝产能计算更加完善,有必要进行研究。

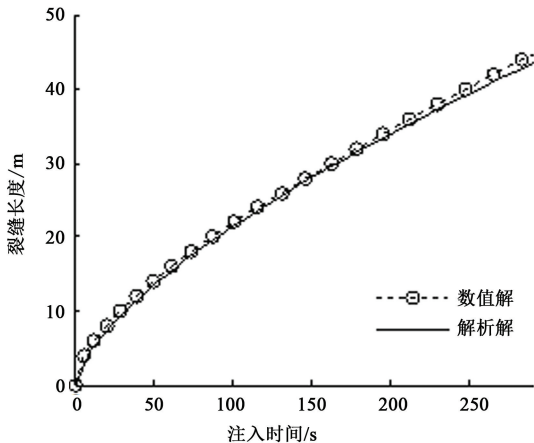


图 6 裂缝半长数值解与解析解对比

Fig.6 Contrast of numerical and analytical solution for fracture half length

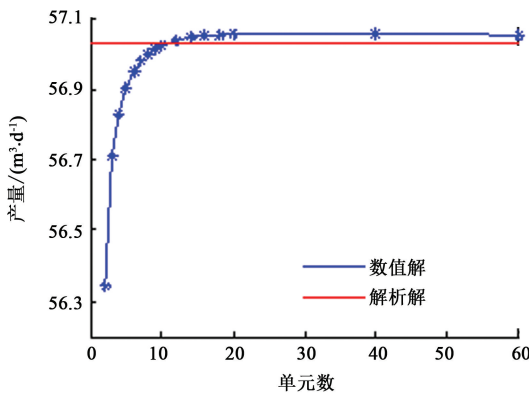


图 7 单一裂缝产量数值解与解析解对比

Fig.7 Comparison of numerical and analytical solution for single fracture production

3.2 产能影响因素

多簇裂缝同步扩展时,由于应力干扰的作用,裂缝沿非平面扩展,为此模拟不同间距时裂缝扩展结果并计算对比了应力干扰作用对产能的影响。通过裂缝扩展模型计算得到两簇射孔时裂缝扩展形态,结果如图 8 所示。模型参数取值:压裂液黏度 μ 为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,其他参数同前文。由图 8 可知,在应力干扰作用下,两簇裂缝相背离地扩展,且裂缝间距越小,扩展路径越弯曲。不考虑应力干扰作用是指裂缝扩展之间不存在任何互相影响,即裂缝扩展之间也不存在竞争,扩展的结果是所有裂缝都具有相同的几何参数(裂缝长度和宽度),且裂缝之间互相平行,不发生弯曲扩展,实际条件下是不可能发生这种情况的。

基于本文中的产能计算方法,仅计算一段内两

簇裂缝产量,假设裂缝为无限导流能力,应力干扰作用对该段裂缝产量的影响结果如图 9 所示。模型参数取值:裂缝高度 h_f 为 15 m,基岩渗透率 k 为 $0.02\ \mu\text{m}^2$,流体黏度 μ 为 $6\ \text{mPa}\cdot\text{s}$,体积系数 B 为 1.2,供给半径 r_e 为 800 m,供给压力 p_e 为 30 MPa,井底

流压 p_w 为 23 MPa。由图 9 可知,考虑应力干扰时产量高于不考虑应力干扰时产量,这主要是因为考虑应力干扰时裂缝之间相距更远,流体流动面积更大,说明裂缝扩展过程中的应力干扰作用有利于井产量的提高。

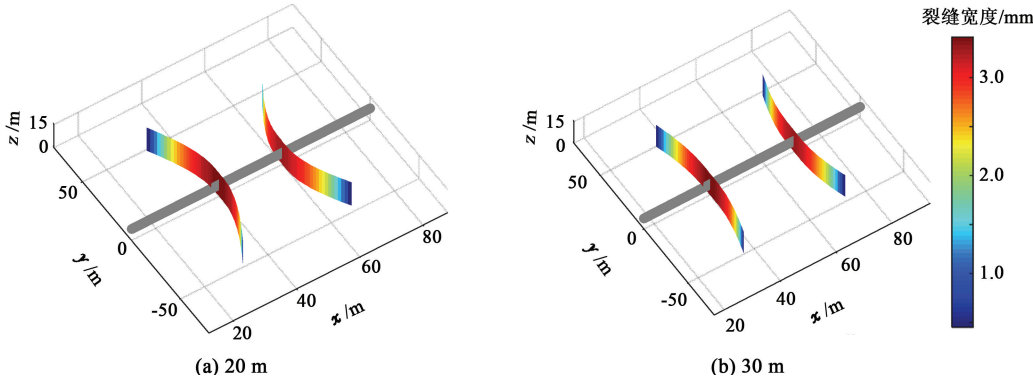


图 8 不同间距时两簇射孔裂缝扩展结果

Fig. 8 Results of two-cluster fractures propagation for different spacing

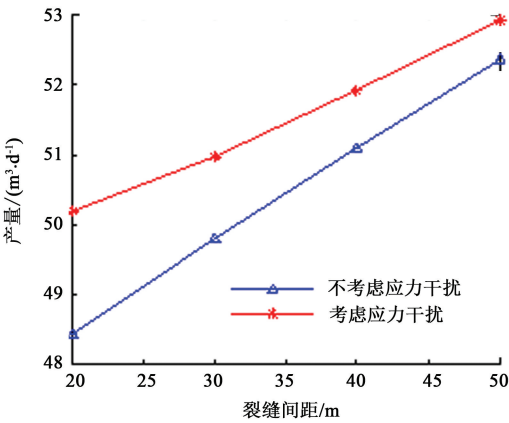


图 9 两簇射孔应力干扰对产量的影响

Fig. 9 Effect of stress shadow on production of two-cluster perforation

同理,分析 3 簇射孔时裂缝扩展结果以及应力干扰作用对产量的影响,裂缝扩展模型与产能计算模型参数取值与前文相同,结果分别如图 10 和 11 所示。由图 10 可知,当间距较小时,中间裂缝长度和宽度将小于两端裂缝长度和宽度,说明应力干扰作用不仅影响裂缝扩展路径,同时影响裂缝几何长度。图 11 得到结果与图 9 相同,与此同时绘制了间距为 20 m 时 3 条裂缝贡献产量,如图 12 所示。考虑应力干扰对产量的影响主要作用在中间裂缝,这是因为考虑应力干扰时两端裂缝往外扩展,中间裂缝作用的流体流动面积增大,从而产量增加。

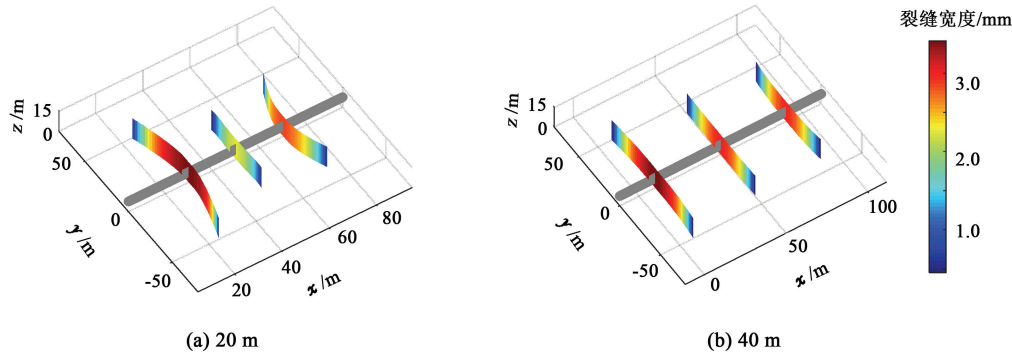


图 10 不同间距时 3 簇射孔裂缝扩展结果

Fig. 10 Results of three-cluster fractures propagation for different spacing

计算分析裂缝间距和裂缝半长对产量的影响,结果如图 13 所示。由图 13 可知:裂缝间距越大,产量越大;裂缝半长越大,产量越大。此外,当增大裂

缝间距时,3 簇射孔时产量增加幅度大于两簇射孔产量增加幅度。而对于裂缝半长,3 簇射孔时产量增加幅度与两簇射孔产量增加幅度相差较小。裂缝

间距对产量的影响程度高于裂缝半长的影响程度。

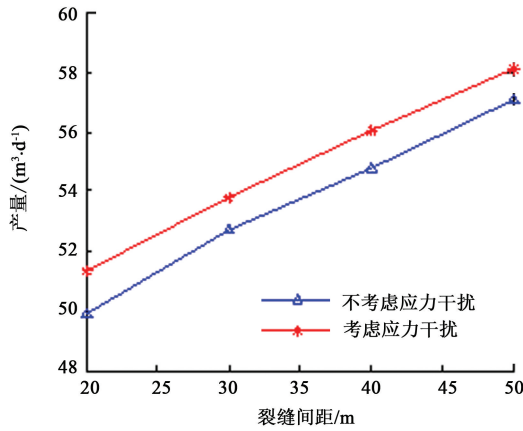


图 11 3 簇射孔应力干扰对产量的影响

Fig. 11 Effect of stress shadow on production of three-cluster perforation

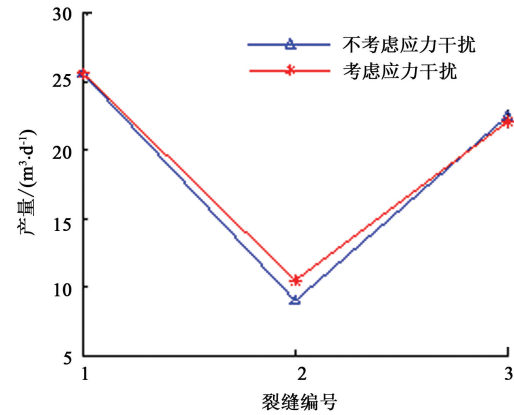


图 12 各条裂缝产量结果

Fig. 12 Result of production for each fracture

根据裂缝扩展模型,还可以得到裂缝宽度分布,从而得到裂缝导流能力。基于此计算对比了 3 簇射孔时裂缝无限导流能力和有限导流能力情况下产量结果,如图 14 所示。由图 14 可知,考虑裂缝有限导流能力时产量略低于考虑裂缝无限导流能力时产量。

在实际生产过程中,裂缝闭合应力增大,导致裂缝导流能力降低,有学者对此开展了实验并拟合了曲线^[21],得出表达式为

$$F_c = 10^{-2.758(\sigma_h - p) + 0.2191} F_{C_i} \quad (25)$$

式中, F_c 为当前裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$; F_{C_i} 为初始裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$; σ_h 为水平最小主应力, Pa; p 为流体压力, Pa。

基于裂缝扩展模型求解得到的裂缝宽度,裂缝单元的导流能力可由立方定律计算得到,其渗透率计算公式为

$$k_f = \frac{w_f^2}{12} \quad (26)$$

式中, k_f 为裂缝渗透率, m^2 ; w_f 为裂缝宽度, m。

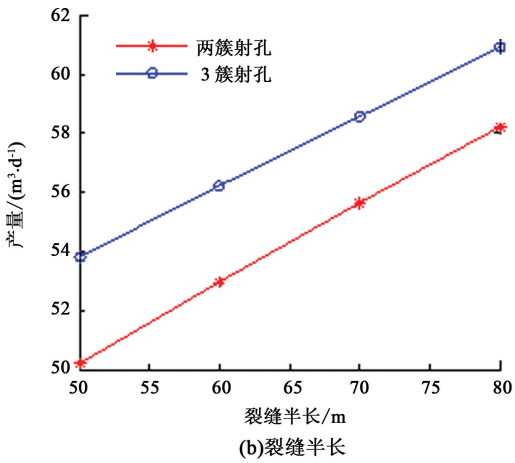
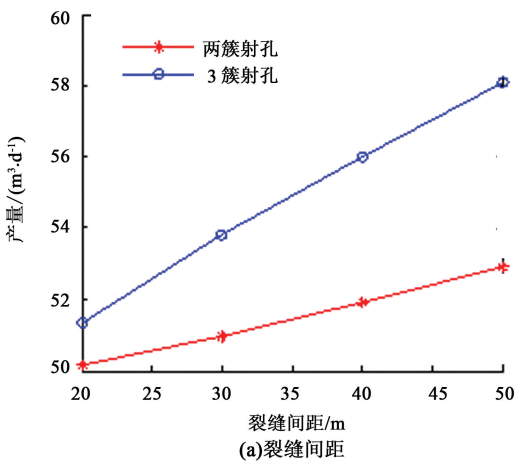


图 13 裂缝间距和裂缝半长对产量的影响

Fig. 13 Effects of fracture spacing and fracture half-length on production

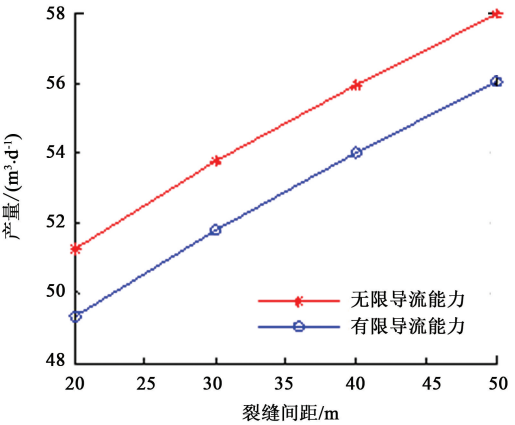


图 14 裂缝导流能力对产量的影响

Fig. 14 Effect of fracture conductivity on production

储层水平最小主应力为 38.6 MPa, 计算对比了裂缝恒定导流能力和变导流能力情形下产量变化, 如图 15 所示。由图 15 可知, 考虑裂缝变导流能力时产量降低, 而且随着生产压差增大, 产量降低幅度

增大,这是因为生产压差增大时,裂缝导流能力快速下降,但总体上产量相差不太明显,主要是由于基岩渗透率与裂缝渗透率相比很小,基岩往裂缝窜流量小,产量很大程度也取决于基岩渗透性。

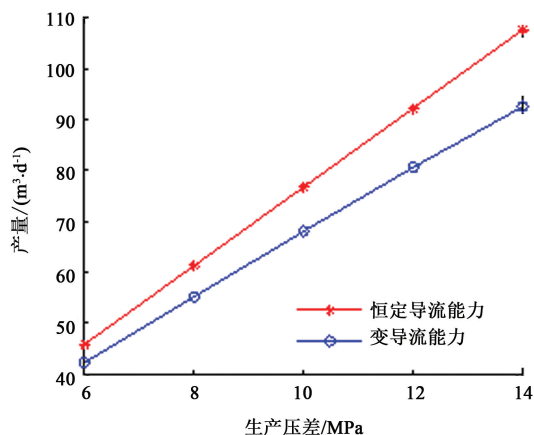


图 15 裂缝变导流能力对产量的影响

Fig. 15 Effect of variable fracture conductivity on production

4 结 论

(1)多簇裂缝同步扩展时,应力干扰作用不仅影响裂缝扩展路径,而且还影响裂缝几何参数,导致裂缝扩展之间存在竞争性。

(2)裂缝扩展过程中的应力干扰作用有利于提高产量,主要原因在于应力干扰作用可使裂缝间距更大,获得更大的流动面积。

(3)随着裂缝间距和裂缝半长增大,产量增大,且裂缝间距对产量的影响程度高于裂缝半长的影响程度。

(4)考虑裂缝有限导流能力时产量低于考虑裂缝无限导流能力时产量,且考虑裂缝变导流能力时产量低于考虑裂缝恒定导流能力时产量。

参考文献:

[1] 姚军,孙海,黄朝琴,等.页岩气藏开发中的关键力学问题[J].中国科学(物理学,力学,天文学),2013,43(12):1527-1547.
YAO Jun, SUN Hai, HUANG Zhaoqin, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs[J]. Scientia Sinica Physica (Mechanica & Astronomica), 2013, 43(12): 1527-1547.

[2] FU P, JOHNSON S M, CARRIGAN C R. An explicitly coupled hydro-geomechanical model for simulating hydraulic fracturing in arbitrary discrete fracture networks [J]. International Journal for Numerical and Analytical

Methods in Geomechanics, 2013, 37(14): 2278-2300.

[3] TALEGHANI A D. Modeling simultaneous growth of multi-branch hydraulic fractures[R]. ARMA-11-436, 2011.

[4] 曾青冬,姚军.基于扩展有限元的页岩水力压裂数值模拟[J].应用数学和力学,2014,35(11):1239-1248.
ZENG Qingdong, YAO Jun. Numerical simulation of shale hydraulic fracturing based on the extended finite element method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(11): 1239-1248.

[5] 曲占庆,田雨,李建雄,等.水平井多段分簇压裂裂缝扩展形态数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):102-109.
QU Zhanqing, TIAN Yu, LI Jianxiong, et al. Numerical simulation study on fracture extension and morphology of multi-cluster staged fracturing for horizontal wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 102-109.

[6] 曾青冬,姚军,孙致学.页岩气藏压裂缝网扩展数值模拟[J].力学学报,2015,47(6):994-999.
ZENG Qingdong, YAO Jun, SUN Zhixue. Numerical modeling of fracture network propagation in shale gas reservoirs [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 994-999.

[7] ZENG Q, YAO J. Numerical simulation of fracture network generation in naturally fractured reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 430-443.

[8] WU K, OLSON J E. Simultaneous multifracture treatments: fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells[J]. SPE Journal, 2015, 20(2): 337-346.

[9] PATER C J D, BEUGELSDIJK L J L. Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock [R]. ARMA-05-780, 2005.

[10] 李廷礼,李春兰,吴英,等.低渗透油藏压裂水平井产能计算新方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(2):48-52.
LI Tingli, LI Chunlan, WU Ying, et al. A new way to calculate fractured horizontal wells productivity in low permeability oil reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(2): 48-52.

[11] 郝明强,王晓冬,胡永乐.压敏性特低渗透油藏压裂水平井产能计算[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(6):99-104.
HAO Mingqiang, WANG Xiaodong, HU Yongle. Productivity calculation of multi-fractured horizontal well in ultra-low permeability pressure-sensitive reservoirs [J].

- Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(6): 99-104.
- [12] 王军磊,贾爱林,位云生,等. 有限导流压裂水平气井拟稳态产能计算及优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 100-107.
- WANG Junlei, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Pseudo steady productivity evaluation and optimization for horizontal well with multiple finite conductivity fractures in gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 100-107.
- [13] 李龙龙,姚军,李阳,等. 分段多簇压裂水平井产能计算及其分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 457-461.
- LI Longlong, YAO Jun, LI Yang, et al. Productivity calculation and distribution of staged multi-cluster fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 457-461.
- [14] 徐严波,齐桃,杨凤波,等. 压裂后水平井产能预测新模型[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 89-91.
- XU Yanbo, QI Tao, YANG Fengbo, et al. New model for productivity test of horizontal well after hydraulic fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 89-91.
- [15] 任龙,苏玉亮,王文东,等. 分段多簇压裂水平井渗流特征及产能分布规律[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(4): 55-59.
- REN Long, SU Yuliang, WANG Wendong, et al. Seepage characteristics and productivity distribution of segmented multi-cluster fractured horizontal wells[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(4): 55-59.
- [16] OLSON J E. Predicting fracture swarms-the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock[J]. Geological Society London Special Publications, 2004, 231(1): 73-88.
- [17] 郎兆新,张丽华,程林松. 压裂水平井产能研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(2): 43-46.
- LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua, CHENG Linsong. Investigation on productivity of fractured horizontal well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994, 18(2): 43-46.
- [18] ZHOU W, BANERJEE R, POE B D, et al. Semianalytical production simulation of complex hydraulic-fracture networks[J]. SPE Journal, 2014, 19(1): 6-18.
- [19] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601-620.
- [20] TANG C, THAM L, LEE P, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 477-489.
- [21] YU W, SEPEHRNOORI K. Optimization of well spacing for baken tight oil reservoirs[R]. SPE 1922108-MS, 2014.

(编辑 李志芬)