

文章编号: 1008-2336 (2024) 03-0071-06

不同岩石多裂缝扩展规律研究

杜林雅¹, 王家航¹, 李基伟¹, 陈进程¹, 张祯祥²

(1. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司石油工程技术研究院, 上海 200120;

2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102200)

摘要: 为了研究不同岩石力学性能下多裂缝扩展规律, 考虑流体流动对裂缝扩展以及岩石变形的影响, 基于扩展有限元方法, 建立水力压裂裂缝垂向扩展的数学模型, 得到了多裂缝在不同力学性质岩石扩展过程中注入压力、注入点宽度、裂缝偏转角度的变化规律, 以及裂缝间距在不同岩石中的影响规律。结果表明, 随着岩石弹性模量和抗拉强度的增强, 相同压裂时间下的裂缝扩展长度增加, 孔隙压力增加; 岩石等效位移随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低而增加, 与裂缝数量呈正相关, 并且随着裂缝数量的增加, 岩石等效位移增加的趋势更明显; 随着岩石弹性模量和抗拉强度的增强, 裂缝间距对注入点孔隙压力的影响并不明显。当裂缝之间的间距增大到一定程度, 裂缝间应力干扰作用减小, 裂缝不发生偏转。该研究对不同岩性下水力压裂施工工艺簇间距的优选具有一定的借鉴意义。

关键词: 水力压裂; 扩展有限元; 多裂缝扩展; 岩石力学性能

中图分类号: TE52 文献标识码: A DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2024.03.071

Research on the Propagation Law of Multiple Cracks Under Different Lithology

DU Linya¹, WANG Jiahang¹, LI Jiwei¹, CHEN Jincheng¹, ZHANG Zhenxiang²

(1. Institute of Offshore Petroleum Engineering, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China; 2. SINOPEC Petroleum Engineering Technology Research Institute Co. Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: In order to study the propagation law of multiple cracks under different rock mechanical properties, considering the influence of fluid flow on crack propagation and rock deformation, a mathematical model for vertical propagation of hydraulic fracturing cracks was established based on the extended finite element method. The effects of rocks with different mechanical properties on the injection pressure, injection point width, crack deflection, and crack spacing of multiple cracks were obtained. The results show that with the enhancement of elastic modulus and tensile strength, the crack propagation length and pore pressure increases under the same fracturing time. The equivalent displacement of rocks increases with the decrease of rock elastic modulus and tensile strength, and is positively correlated with the number of cracks. Moreover, as the number of cracks increases, the trend of the increase in equivalent displacement of rocks becomes more pronounced. With the enhancement of elastic modulus and tensile strength, the effect of crack spacing on pore pressure at the injection point is not significant. When the spacing between cracks increases to a certain extent, the stress interference between cracks decreases, and cracks do not deflect. This study has certain reference significance for optimizing the cluster spacing of hydraulic fracturing construction process under different lithology.

Keywords: hydraulic fracturing; propagation finite element; multiple crack propagation; rock mechanics performance

水力压裂工艺能够有效增加油气的开采量, 其中裂缝扩展方向和形态对井增产效果有着很大的影响。扩展有限元理论中不连续场的描述完全独立于网格边界, 这也使得裂缝可以独立于网格, 实现裂缝扩展的有限元模拟。张骞^[1]等基于双孔双渗模型分析了压裂缝参数对水平井累计产量的影响, 提出“多分段, 造

长缝”的压裂原则。王小龙^[2]利用XFEM方法建立二维非线性流固耦合水力压裂数值模型, 模拟了裂缝在各项异性岩石中扩展过程以及与天然裂缝的相交过程。陈军斌^[3]等人基于扩展有限元的方式模拟多裂缝同时扩展的转向规律; 李浩哲^[4]等基于裂缝尖端应力强度因子理论研究了岩石性质对裂缝穿层问题的影响。张

收稿日期: 2023-05-25; 改回日期: 2024-03-08

基金项目: “十三五”国家重大科技专项“东海深层低渗-致密天然气钻井测试及储层改造关键技术”(2016ZX05027-003)。

第一作者简介: 杜林雅, 女, 1996年生, 硕士, 助理工程师, 2022年毕业于中国石油大学(北京)海洋油气工程专业, 主要从事钻完井、压裂工艺方面研究。E-mail: dully.shhy@sinopec.com。

滨海^[5]等考虑主应力、裂缝倾角等因素建立东海低渗透层压裂高起裂压力数学模型,研究表明在压裂设计过程中应尽可能将方位角及井斜角靠近起裂压力最小区域。Tian W^[6]等利用扩展有限元的方法模拟了水平井多段压裂中的顺序压裂、交替压裂和拉链式压裂,研究表明地应力差可以抵消应力干扰对裂缝偏斜的影响,减小裂缝偏斜的程度。Zeng QD^[7]等基于扩展有限元法模拟了一种具有塑性变形的多孔岩石水力压裂过程。Dontsov EV^[8]等探讨了在保证流体均匀分布的有限条件下近间距裂缝同步压裂问题,研究结果显示,水力压裂裂缝扩展区域与流体黏度和岩石抗冲击性有关。

综上,国内外学者对水力压裂裂缝扩展模拟已有相关研究,但是对不同力学性能岩石的多裂缝扩展规律的研究较少,依托已有的岩性数据,建立水力压裂二维模型,基于扩展有限元方法对多裂缝在不同岩性中扩展情况进行了模拟,研究了多条裂缝以及不同裂缝间距下裂缝及孔隙压力的变化规律。

1 水力压裂控制方程及其离散形式

1.1 岩石变形平衡方程

为了使模型更加简化,方便分析与计算,做出如下假设:(1)地层为各向同性孔隙材料,并且岩石具有不可压缩性;(2)被流体侵入的岩层呈现完全饱和的状态;(3)孔隙中的流体具有不可压缩性。在此基础上建立一个均质、各向同性的二维水力压裂模型(图1)。

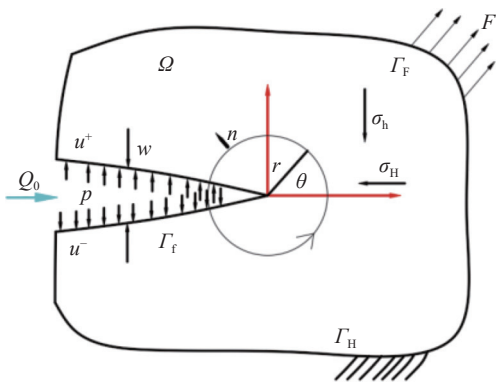


图1 二维水力压裂模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a two-dimensional hydraulic fracturing model

图1为二维模型,表示岩石基质中存在一条任意方向的裂缝,模型边界上 Γ_F 作用力 F ,缝内压力为 P ,体积力作用于整个模型区域上,在包含裂缝的任意区域 Ω 内岩石变形的平衡方程以及边界条件可以表示为:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad \text{on } \Omega$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \cdot n = F, \\ \sigma \cdot n^- = -\sigma \cdot n^+ = -pn^+ = pn^-, \\ u = 0, \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{on } \Gamma_F \\ \text{on } \Gamma_f \\ \text{on } \Gamma_H \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为应力张量; f 为体积力, N ; n^- 和 n^+ 分别为裂缝两边边界的单位外法线,由于裂缝宽度远小于裂缝高度,设 $n^- = n^+ = n$; p^- 和 p^+ 为裂缝面上的水压, Pa ; u 为位移张量, Γ_F 、 Γ_f 、 Γ_H 分别表示岩体的外力边界、裂缝边界和位移边界; Ω 表示岩体区域; F 表示作用在模型边界上 Γ_F 的外力, N 。

利用虚功原理将方程(1)表示为等效积分弱形式为:

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon \sigma d\Omega - \int_{\Omega} \delta u^T f d\Omega - \int_{\Gamma_F} \delta u^T F d\Gamma_F - \int_{\Gamma_f} \delta w^T p d\Gamma_f = 0 \quad (2)$$

式中: $\delta \varepsilon$ 表示应变, δu 表示虚位移, δw 表示虚位移在两条裂缝边界法线 n^- 和 n^+ 上的变化量 $\delta w = \delta u^+ - \delta u^-$ 。

1.2 裂缝内流体流动方程

流体在裂缝中流动满足 Reynolds 方程^[9-10]:

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{12\mu} \left(w^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中: q 表示流量, m^3/s ; w 表示裂缝宽度, m ; μ 为压裂液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, p 表示流体压力, Pa ; x 表示沿裂缝扩展路径定义的曲线坐标。在压裂液注入口的流体流量为 Q ,在裂缝尖端,满足 $q(L/2) = 0$,缝宽 $d(L/2) = 0$ 。

1.3 水力压裂方程顺序耦合离散形式

对于裂缝问题,扩展有限元的位移插值函数可以表示为^[2]:

$$u_{xfem} = \sum_{m=1}^m N_m(x) u_m + \sum_{h=1}^{nh} N_h(x) H(x) a_h + \sum_{k=1}^{nk} N_k(x) \sum_{l=1}^4 F_l(x) b_k^l \quad (5)$$

式中: u_{xfem} 为单元内任意点 x 的位移, m 为有限元节点数, nh 和 nk 为缝面节点数和裂尖处节点数, u_m 为有限元节点自由度向量, a_h 为裂缝面节点自由度向量, b_k^l 为裂缝尖端节点自由度向量, $N_{m,h,k}$ 为对应的节点的形函数, $H(x)$ 是点 x 处的 Heaviside 函数值, $F_l(x)$ 是裂尖增强函数在点 x 处的值, l 为单元格的节点数。

将式(5)方程带入到岩石固体平衡方程等效积分弱形式式(2)得到平衡方程离散形式:

$$\mathbf{K}\mathbf{U} - \mathbf{Q}\mathbf{P} - \mathbf{F}^{\text{ext}} = 0 \quad (6)$$

\mathbf{K} 表示总体刚度矩阵, \mathbf{F}^{ext} 为外力向量; \mathbf{U} 和 $\dot{\mathbf{U}}$

节点位移自由度向量; \mathbf{P} 和 $\dot{\mathbf{P}}$ 为节点流体压力自由度向量; 下文同。 \mathbf{Q} 为耦合矩阵, 即将流体节点压力转化为固体节点的等效力。

流体压力 p 的插值形式为:

$$p(s) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(s) p_i \quad (7)$$

式中: p_i 为节点 i 处的流体压力, Pa; $\varphi_i(s)$ 为节点 i 处的形函数; n 为流体单元的个数。将该式带入到式 (4) 中得到流体裂缝内流体压力的离散矩阵形式为:

$$\mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{H} \mathbf{P} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (8)$$

\mathbf{H} 表示流体流动矩阵, \mathbf{P} 为节点压力自由度向量, \mathbf{S} 为源项。

裂缝内流体流动和岩石变形是相互耦合的过程, 将式 (6) 和式 (8) 采用 Newton-Raphson 联立求解得到全耦合方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{Q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^{\text{ext}} \\ -\mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.4 裂缝起裂准则

考虑采用最大正应力损伤准则来作为 XFEM 的裂缝扩展准则, 见式 (10)。

最大正应力准则为:

$$\text{MAX} \left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{N_{\text{max}}}, \frac{\sigma_s}{S_{\text{max}}}, \frac{\sigma_t}{T_{\text{max}}} \right\} = 1 \quad (10)$$

2 数值模拟裂缝扩展变化

2.1 模型建立

建立扩展有限元水力压裂简化模型 (图 2)。

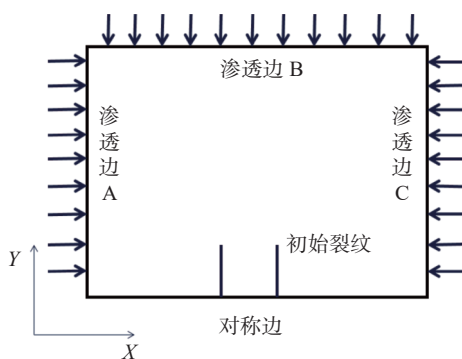


图 2 扩展有限元水力压裂简化模型

Fig. 2 Simplified model of extended finite element hydraulic fracturing

岩石力学参数是描述岩石力学性质的参数, 包括弹性模量、泊松比、抗拉强度、切变模量等。为了便于进行分析, 选择文献^[11]中三种不同岩石的基本力学参数来进行数值模拟。研究基于岩石为各项同性材料的假设, 设置相同的渗透系数和孔隙比。研究表明泊松比对水力压裂裂缝扩展的影响较小, 本文只改变三

种岩石的弹性模量和泊松比进行研究。

设置等长度、等间隔的压裂裂缝, 相同的压裂液密度, 采用最大主应力的损伤原则, 其中损伤演化位移设置为 0.5 m。利用 XFEM 的方法观察在不同的岩石介质当中多条裂缝扩展的位移变化。

在 ABAUQS 软件“弹性”界面中输入岩石的杨氏模量和泊松比, 在“载荷”模块添加地应力, 分别设置最大水平地应力、最小水平地应力以及垂向地应力, 约束模型四周位移, 在“编辑关键字”中设置注入点位置, 流体流速为 0.002 m³/s, 具体参数见表 1。

表 1 岩石基本力学及数值模拟参数

Table 1 Basic rock mechanics and numerical simulation parameters

岩石	玄武岩	巨砾石	泥灰岩
弹性模量 E/GPa	27.45	20.05	7.87
泊松比	0.236	0.184	0.197
抗拉强度/MPa	6.08	5.68	4.15
垂向地应力 σ_v /MPa	16	16	16
最大水平地应力 σ_H /MPa	12	12	12
最小水平地应力 σ_h /MPa	19	19	19
预制裂缝长度/m	1		
压裂液密度/(kg/m ³)	9800		
孔隙比	1.5		
渗透系数	1 × 10 ⁹		
流体黏度 μ /(Pa·s)	0.001		

2.2 模型验证

水力压裂是流体压力对岩石产生的持续性的作用, 模型需要考虑流体和岩石之间的耦合作用, 且耦合方程式已经在上文中给出。为了验证模型的准确性, 将利用上述简化模型与经典二维水力压裂 KGD (Khristinaoric-Geertsma-de klerk) 模型^[12]进行对比。

提取两种模型裂缝扩展长度随压裂时间的变化曲线 (图 3)。结果显示两条曲线重合度较高, 验证了模型的正确性。

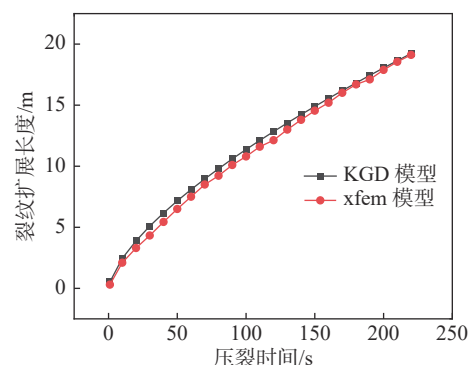


图 3 本文模型与 KGD 模型对比

Fig. 3 Comparison between the model in this article and the KGD model

为了排除网格和模型尺寸因素对结果的影响，分别设置不同的模型尺寸和网格尺寸观察裂缝扩展长度变化（图4）。随着设置的网格密度增加，计算结果的收敛性变差，优选最小网格尺寸0.2 m；同时，改变裂缝与模型边界的距离，观察裂缝扩展中模型相对位移的变化，优选模型尺寸50 m×50 m。

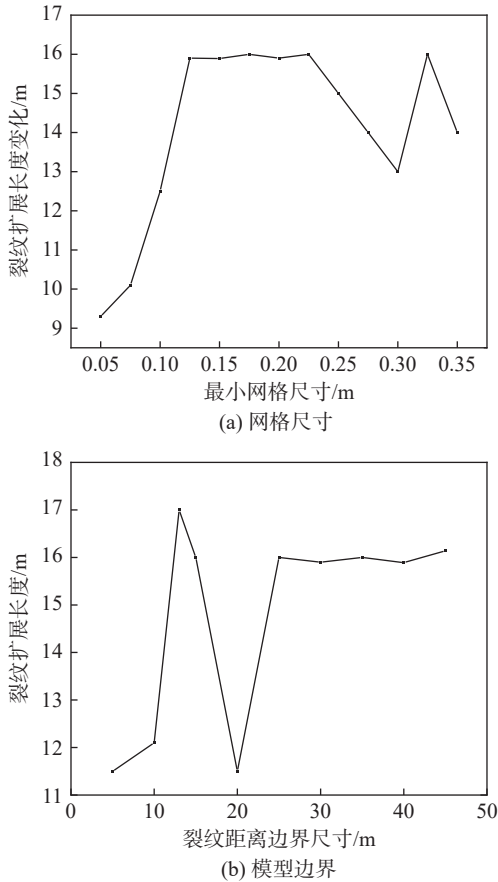


图4 网格尺寸和模型尺寸对模拟结果的影响

Fig. 4 The influence of grid size and model size on simulation results

3 不同岩性下多裂缝扩展的影响

3.1 双裂缝扩展

在玄武岩、巨砾岩、泥灰岩三种不同岩石性质下，两条裂缝扩展的位移见图5。由图5可以看出两条裂缝分别向相反的方向发生了偏转，这是由于两条同时扩展的裂缝之间存在应力干扰作用，会对周围岩石以及相邻裂缝施加额外的力，改变最大水平主应力的方向，促使裂缝发生相斥转向。

为了确保单一的变量准则，设定相同的分析步的步长。位移云图中显示的是三个方向上的等效位移，玄武岩、巨砾岩和泥灰岩三种岩石最大等效变形量分别为9.93、11.75、16.27 mm，对应的最大孔隙压力为20.46、19.5、14.7 MPa（图6）。由图6可知，在

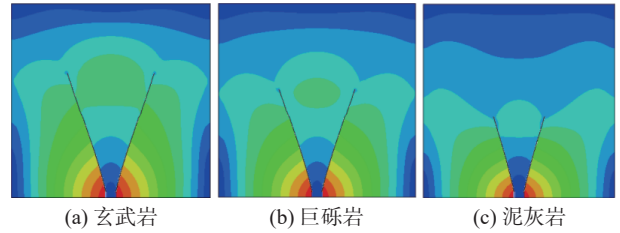


图5 三种不同岩性的裂缝扩展长度

Fig. 5 Crack propagation length of three different lithology types

相同的压裂时间下，裂缝的扩展程度是玄武岩>巨砾岩>泥灰岩，即随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低，裂缝扩展程度降低。由图6可知，在相同的压裂时间下，三种岩石的孔隙压力逐次降低，泥灰岩裂缝尖端受到的孔隙压力最小，裂缝扩展受到了抑制。

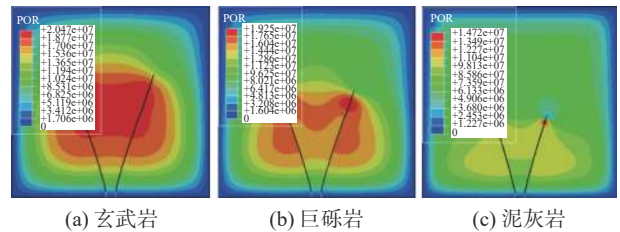


图6 三种不同岩性的孔隙压力

Fig. 6 Pore pressure of three different lithology types

提取注入点（即在关键字中设置的点位坐标）的孔隙压力变化（图7）。三种岩石在压裂初始阶段压力增大到最大值，随着裂缝进一步扩展，注入压力下降，在压力降低到一定程度后，裂缝之间的应力干扰作用成为主要影响因素，注入压力缓慢增加。受岩石力学性能影响，泥灰岩相较于其他两种岩石孔隙压力小，裂缝长度增加缓慢，这也证实了上述描述。

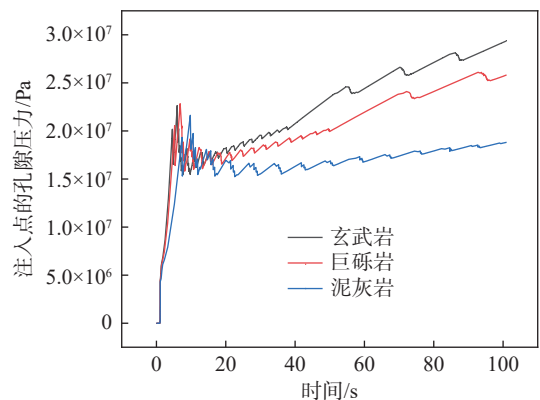


图7 注入点孔隙压力

Fig. 7 Variation of pore pressure at injection point

3.2 多裂缝扩展

在不同的岩石性质下，三条裂缝扩展的位移云图见图8，图8显示三种情况下的岩石变形最大等效位移为14.01、14.77、19.14 mm。计算出三种岩性下水力压裂的最大孔隙压力为52.84、36.8、23.89 MPa。

与双裂纹在三种岩石中扩展相似, 在相同的压裂时间内, 玄武岩裂缝更易扩展, 巨砾岩和泥灰岩次之。不同的是, 三条裂缝同时压裂时, 两侧裂缝受应力场影响分别向两侧偏转, 中间裂缝受两侧裂缝应力场作用, 裂缝扩展程度较两侧裂缝小, 同时两侧裂缝应力场的干扰作用相互抵消, 抑制了中间裂缝的扩展。

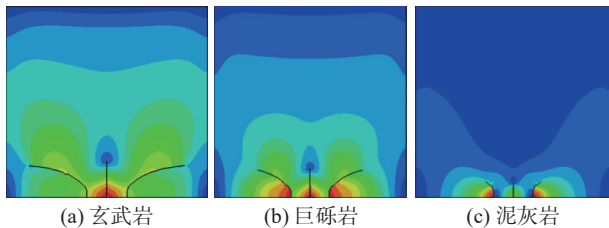


图 8 不同岩石三条裂缝扩展的位移云图

Fig. 8 Displacement nephogram of three cracks propagation of different rock types

设置相同的裂缝间距模拟水力压裂四条裂缝扩展过程 (图 9)。图 9 显示三种不同岩石性质下的岩石最大等效变形量分别为 35.52、43.05、43.97 mm。模拟四条裂缝在不同岩性下的裂缝扩展, 裂缝出现分支现象, 三种岩石发生分支现象的程度为玄武岩>巨砾岩>泥灰岩, 即随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低, 岩石发生分支现象程度降低。相比于三条裂缝的扩展, 四条裂缝转折角度增加, 中间两条裂缝扩展受抑制, 但受到应力干扰的作用也向两侧发生了偏转。

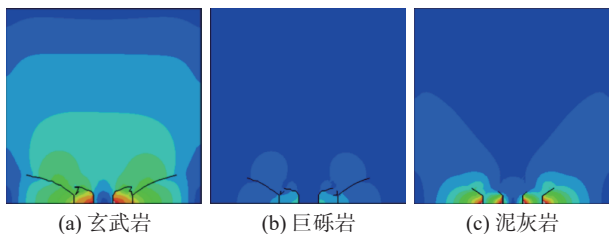


图 9 不同岩石性质下四条裂缝扩展的位移云图

Fig. 9 Displacement nephogram of four cracks propagation under different rock properties

以岩石等效最大位移量作为多裂缝扩展对岩石的影响程度, 绘制不同岩性下多裂缝水力压裂扩展下岩石最大等效位移 (图 10)。由图 10 可知随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低, 岩石的等效位移增加, 与裂缝数量呈正相关, 并且随着裂缝数量的增加, 岩石等效位移增加的趋势更明显。绘制不同岩石水力压裂多裂缝扩展注入点的孔隙压力 (图 11)。图 11 可知相同数量裂缝, 随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低, 注入点孔隙压力降低, 虽然与裂缝数量呈正相关, 但影响较小。

3.3 不同裂缝间距下的双裂缝扩展情况

不同间距下双裂缝扩展应力云图见图 12, 两条裂

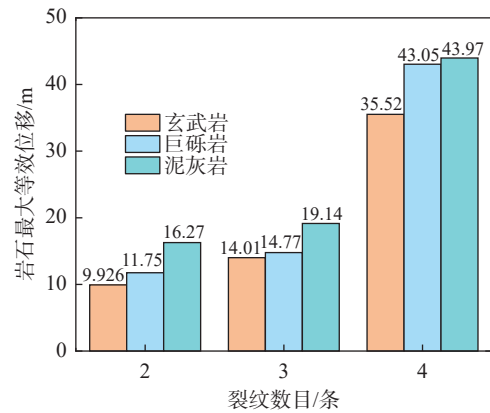


图 10 岩石最大等效位移

Fig. 10 Maximum equivalent displacement of rocks

缝同时压裂下, 受应力场作用, 裂缝由初始状态开始向两侧偏转, 随着泵入压裂液的增加, 裂缝间干扰进一步加大, 裂缝偏转程度增加, 当裂缝之间的间距增大到一定程度, 裂缝间应力干扰作用减小, 裂缝不发生偏转。

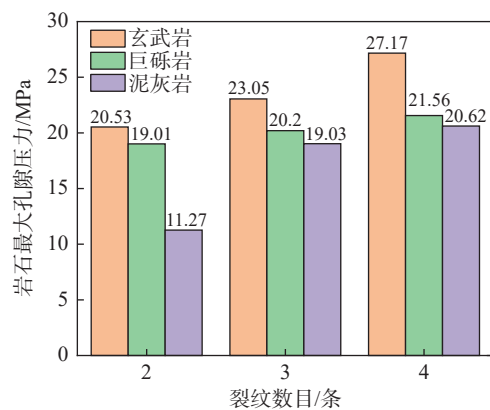


图 11 注入点孔隙压力

Fig. 11 Pore pressure at injection points

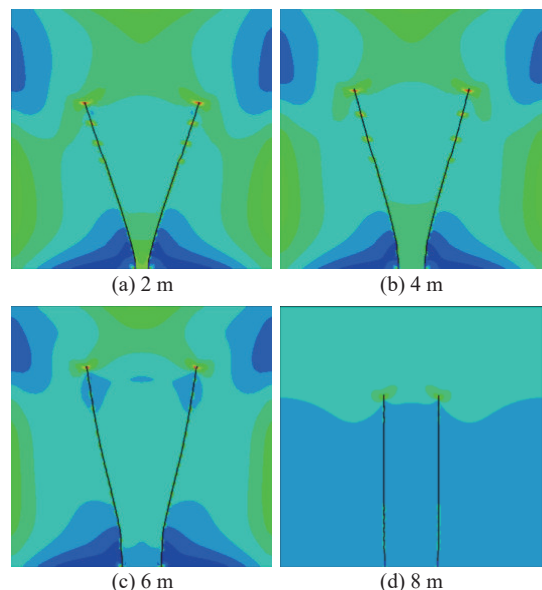


图 12 不同间距下双裂缝扩展应力云图

Fig. 12 Cloud diagram of stress distribution for double cracks propagation with different spacing

对三种岩石分别进行不同裂缝间距下双裂缝水力压裂模拟（图13），发现随着岩石弹性模量和抗拉强度的增强，裂缝间距对注入点孔隙压力的影响并不明显。

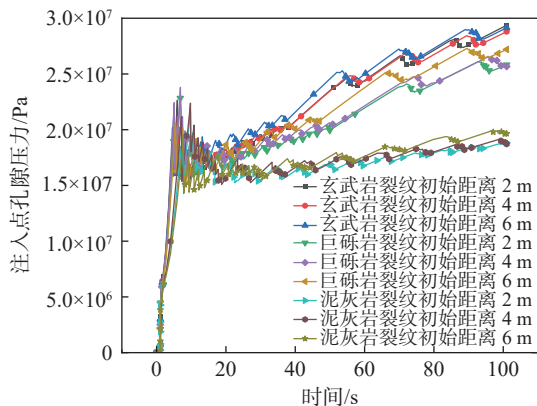


图13 注入点孔隙压力

Fig. 13 Pore pressure at injection points

4 结论

(1) 随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低，裂缝扩展程度降低，玄武岩裂缝更易扩展，巨砾岩和泥灰岩次之；在相同的压裂时间下，三种岩石的孔隙压力逐次降低，受岩石力学性能影响，泥灰岩相较于其他两种岩石孔隙压力小，裂缝长度增加缓慢。

(2) 岩石等效位移随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低而增加，与裂缝数量呈正相关，并且随着裂缝数量的增加，岩石等效位移增加的趋势更明显。注入点孔隙压力随着岩石弹性模量和抗拉强度的降低而降低，虽然与裂缝数量呈正相关，但影响较小。

(3) 随着岩石弹性模量和抗拉强度的增强，裂

缝间距对注入点孔隙压力的影响并不明显。当裂缝之间的间距增大到一定程度，裂缝间应力干扰作用减小，裂缝不发生偏转。

参考文献：

- [1] 张骞, 黄冬梅, 李正健, 等. 压裂缝参数对页岩气藏水平井累产影响分析[J]. 海洋石油, 2017, 37(2): 38-40
- [2] 王小龙. 扩展有限元法应用于页岩气藏水力压裂数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [3] 陈军斌, 魏波, 谢青, 等. 基于扩展有限元的页岩水平井多裂缝模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(1): 73-83.
- [4] 李浩哲, 姜在炳, 范耀. 基于裂缝尖端应力强度因子的裂缝穿层行为分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 76-82, 126.
- [5] 张滨海, 张朝举, 陈峥嵘, 等. 东海低渗储层压裂高起裂压力规律分析[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 403-408.
- [6] Tian W, Li P C, Dong Y, et al. Numerical Simulation of Sequential, Alternate and Modified Zipper Hydraulic Fracturing in Horizontal Wells Using XFEM[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 183: 106251.
- [7] Zeng Q D, Yao J, Shao J F. Effect of Plastic Deformation on Hydraulic Fracturing with Extended Element Method[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(6): 2083-2101.
- [8] Dontsov E V, Suarez-Rivera R. Propagation of Multiple Hydraulic Fractures in Different Regimes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104270.
- [9] 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
- [10] Batchelor G K. An Introduction to Fluid Dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
- [11] 赵益忠, 曲连忠, 王幸尊, 等. 不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(3): 63-66.
- [12] 徐峰阳. KGD、PKN和修改的P3D水力压裂设计模型的计算与对比[J]. 能源与环保, 2017, 39(9): 220-225.



本刊加入数据库的声明

为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊已许可《中国知网——中国期刊全文数据库》、《万方数据——中国数字化期刊群》、《维普资讯——中文科技期刊数据库》和《华艺数位——华艺线上图书馆》等数据库全文收录，凡被本刊录用发表的文章，将由本刊编辑部统一纳入相关数据库，其作者著作权使用费由本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部此声明。

《海洋石油》编辑部

2024年9月