

引用格式: 候梦如, 梁冰, 孙维吉, 等. 矿物界面刚度对页岩水力压裂裂缝扩展规律的影响研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 100-107.
HOU Mengru, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Influence of mineral interface stiffness on fracture propagation law of shale hydraulic fracturing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 100-107.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.011

矿物界面刚度对页岩水力压裂裂缝扩展规律的影响研究

候梦如, 梁冰, 孙维吉, 刘奇, 赵航

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了探究矿物界面作用对页岩水力压裂裂缝起裂和扩展的影响, 建立了页岩微观结构模型, 并将零厚度 cohesive 单元嵌入实体单元内, 运用数值模拟方法研究矿物边界界面刚度对水力裂缝扩展的影响, 得到矿物界面作用影响下页岩水力压裂裂缝扩展规律。结果表明, 页岩水力压裂裂缝破坏形式以拉伸破坏为主, 裂缝扩展路径包括两种方式: 一是沿着矿物边界扩展, 二是穿过矿物边界进入矿物内部扩展。随着矿物边界界面刚度的增大, 裂缝起裂压力和孔隙压力逐渐增大, 裂缝长度、数目和面积逐渐减小, 裂缝宽度逐渐增大, 容易形成短而宽的裂缝。页岩储层开展水力压裂作业应该优先选择矿物边界界面刚度较小的位置。研究成果有助于揭示矿物界面作用对页岩水力裂缝扩展的作用机理, 为合理选择页岩气储层水力压裂作业层位提供理论依据。

关键词: 页岩; 水力压裂; 裂缝扩展; 零厚度 cohesive 单元; 界面刚度; 数值模拟

中图分类号: TE377

文献标识码: A

Influence of mineral interface stiffness on fracture propagation law of shale hydraulic fracturing

HOU Mengru, LIANG Bing, SUN Weiji, LIU Qi, ZHAO Hang

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to study the influence of mineral interface action on the initiation and propagation of shale hydraulic fracturing fractures, a shale microstructure model was established. In the model, the zero-thickness cohesive element was embedded in the solid element. A numerical simulation of the effect of mineral boundary interface stiffness on hydraulic fracture propagation was carried out to reveal the law of shale hydraulic fracturing crack propagation under the influence of mineral interface action. The results show that the tensile destruction is the main form of fracture failure of shale hydraulic fracturing. The crack propagation path consists of two ways, one is to extend along the mineral boundary, and the other is to cross the mineral boundary and enter the mineral to expand. With the increase of the mineral boundary interface stiffness, the crack initiation pressure and pore pressure gradually increase, the length, number and area of the cracks gradually decrease, and the width of the cracks gradually increases, so that it is easy to form short and wide cracks. When carrying out shale hydraulic fracturing operations, the location where the stiffness of the mineral boundary interface is lower should be selected first. The research results help to reveal the action mechanism of the mineral interface action on the expansion of the shale hydraulic fracture, and provide a theoretical basis for the reasonable selection of the hydraulic fracturing layer position of the shale gas reservoir.

Keywords: shale; hydraulic fracturing; crack propagation; zero thickness cohesive element; interface stiffness; numerical simulation

收稿日期: 2021-10-26。

第一作者简介: 候梦如(1997—), 女, 在读硕士研究生, 从事页岩水力压裂等研究。地址: 辽宁省阜新市中华路47号辽宁工程技术大学, 邮政编码: 123000。E-mail: hmr2022114@163.com

通信作者简介: 孙维吉(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事页岩水力压裂等研究。地址: 辽宁省阜新市中华路47号辽宁工程技术大学, 邮政编码: 123000。E-mail: hmr2022114@163.com

基金项目: 国家科技重大专项“页岩储层缝网扩展的力学机制及定量表征”(2017ZX05037-001)。

页岩气是中国重要的能源战略储备,实现页岩气的高效开采和利用,能够弥补我国常规油气资源的不足^[1]。目前,利用水力压裂^[2]形成复杂缝网提高页岩气产量是一种比较成熟的页岩气开采技术。水力压裂复杂缝网的形成受到多种因素的制约^[3],而矿物界面作用是非常重要的因素之一,矿物界面作用是一种普遍存在的自然现象^[4-5],它的存在影响着岩体的力学强度。其中,矿物界面刚度是指矿物界面在受力时抵抗弹性变形的能力,是对矿物界面弹性变形难易程度的表征。

国内外对岩体矿物及矿物界面水力压裂裂缝扩展规律开展了大量的研究,取得了丰硕的成果。梁冰等^[6]基于XFEM方法研究了矿物组分对页岩水力压裂裂缝扩展的影响。POTYONDY等^[7]采用尺寸非均匀的圆形或球形颗粒在接触点相互黏结的致密堆积体表示岩石,其中岩石的微观特性包括粒子、键的刚度和强度参数。刘泉声等^[8]采用零厚度 cohesive 单元研究了多种因素对页岩水力压裂裂隙空间分布特征的影响。WU等^[9]在微观尺度上研究了水力压裂过程中多条裂隙同时压裂的裂隙扩展规律。李勇华等^[10]采用弯矩贡献因子模拟了岩石矿物颗粒之间的相互作用力的强弱。

基于前人的研究成果,在微观尺度上建立页岩气储层矿物分布几何模型,对矿物几何模型划分离散实体网格,并在离散实体网格内嵌入零厚度 cohesive 单元模拟页岩水力压裂过程,根据多孔介质模型和流固耦合理论建立数值模型,采用数值模拟方法探究矿物边界界面刚度对页岩气储层水力压裂裂缝扩展规律的影响。

1 页岩水力压裂流固耦合理论

1.1 岩体流固耦合模型

多孔介质中固体骨架在当前构型下的平衡方程^[11-12]为:

$$\int_V (\bar{\sigma} - p_w \mathbf{I}) \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV = \int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{v} dV \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为有效应力矩阵,Pa; p_w 为孔隙压力,Pa; $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 为虚应变率矩阵, s^{-1} ; \mathbf{t} 为表面力矩阵, N/m^2 ; \mathbf{f} 为体力矩阵, N/m^3 ; $\delta \mathbf{v}$ 为虚速度矩阵, m/s ; V 为体积, m^3 ; S 为表面积, m^2 。

渗流流体的连续性方程为^[13]:

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} (J \rho_w n_w) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot (\rho_w n_w \mathbf{v}_w) = 0 \quad (2)$$

式中: J 为多孔介质体积变化比率; ρ_w 为流体密度, kg/m^3 ; n_w 为孔隙比; \mathbf{x} 为空间向量, m ; \mathbf{v}_w 为流体渗流速度, m/s ; t 为时间, s 。

流体在多孔介质中的流动服从Darcy定律^[14]:

$$\mathbf{v}_w = -\frac{1}{n_w g \rho_w} \mathbf{k} \cdot \left(\frac{\partial p_w}{\partial \mathbf{x}} - \rho_w \mathbf{g} \right) \quad (3)$$

式中: \mathbf{k} 为渗透率矩阵, m/s ; \mathbf{g} 为重力加速度向量, m/s^2 。

1.2 零厚度 cohesive 单元

采用单元刚度退化的牵引—分离 (Traction-Separation) 准则和最大名义应力准则为损伤判据,模拟水力压裂过程中裂缝的起裂和扩展,且压裂液的流动遵循流体流动准则^[15-16]。

1.2.1 牵引—分离准则

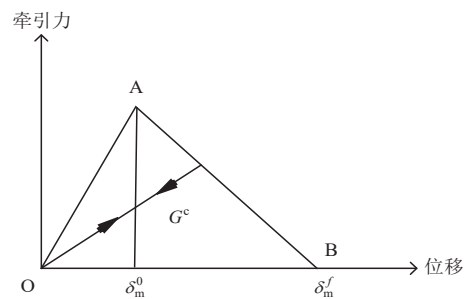
如图1所示,在损伤出现之前(OA段),cohesive 单元的本构关系一直是线弹性的,当单元承受的应力达到最大应力准则时(AB段),单元的刚度逐渐退化,直至单元完全失去承载能力。

1.2.2 最大名义应力准则

最大名义应力准则认为,只要任何一个方向承受的应力达到其临界应力,cohesive 单元就会出现损伤,表述为:

$$\max \left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^0}, \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}, \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right\} = 1 \quad (4)$$

式中: σ_n^0 为 cohesive 单元的法向应力的临界值,即岩石储层的抗拉强度; σ_s^0 和 σ_t^0 表示两个剪切方向的临



注: δ_m^f 为完全破坏时的有效位移; δ_m^0 为相对于损伤开始时的有效位移; G^c 由于破坏而消耗的总能量。

图1 Traction-Separation 本构关系

Fig. 1 Traction-Separation constitutive relationship

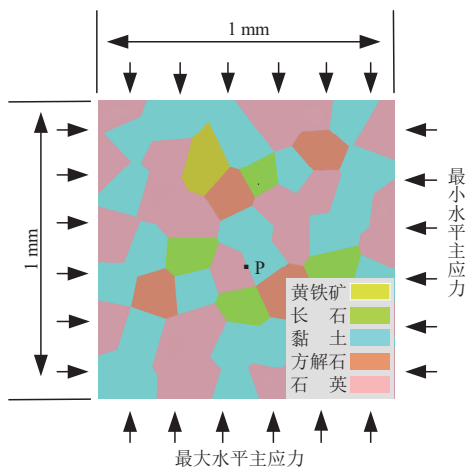
界应力,即岩石的剪切强度对于各向异性材料,不同切向的剪切强度可能不同;〈〉表示 cohesive 单元承压应力不会出现损伤。

2 数值模型建立

2.1 页岩微观模型

根据现有研究结果^[17-18],建立四川盆地龙马溪组露头页岩矿物组分分布几何模型。基于蒙特卡罗随机分布和泰森多边形思想随机生成多边形矿物颗粒,几何模型的生成过程如下:1)确定矿物组分的生成区域;2)确定矿物组分所占百分比,并作为判断多边形结构停止生成的条件;3)产生随机数,确定矿物颗粒形状和矿物颗粒尺寸,Voronoi图分割空间的原理为:①在需要进行分割的空间内随机分布离散点;②相邻离散点连线的垂直平分线的交点形成了围绕在离散点周围的多边形顶点;③每3个相邻顶点形成1个Delaunay三角形,连接每个离散点所有相邻三角形的外接圆圆心,即得到泰森多边形;4)确定边界条件及多边形之间的距离,确保生成的多边形矿物颗粒在限定的区域内,且相邻多边形矿物颗粒间相连。

图2为1 mm×1 mm的页岩储层微观结构的二维平面应变模型,其中石英含量为45.57%,黏土含量为39.27%,方解石含量为7.02%,黄铁矿含量为1.43%,长石含量为6.71%。对矿物几何模型划分离散实体网格,利用Python程序在实体离散网格间批量插入零厚度 cohesive 单元。



注:P为压裂液注入的初始位置。

图2 二维平面应变模型

Fig. 2 Two-dimensional plane strain model

岩体水力压裂是一个流固耦合过程,数值模拟包括初始地应力平衡阶段和压裂液注入阶段。数值模型边界条件为 x 和 y 方向的位移为0,初始孔隙压力为0。选择靠近中心边界处一点作为水力压裂的射孔,射孔方向沿着矿物边界,图中P为压裂液注入的初始位置。

2.2 模型参数

模型参数的选取对数值模拟工作至关重要,在开展数值模拟工作之前,通过标准试件的单轴压缩实验和巴西劈裂实验测得页岩的应力—应变曲线以及抗拉强度,在此基础上不断调整各个参数进行试算,当单轴压缩数值试验的应力—应变曲线与单轴压缩物理实验的结果^[19]相吻合(图3)时,即获得数值模型的计算参数。其中,数值模型的最小水平主应力为8 MPa,最大水平主应力为10 MPa,孔隙度为4.8%,刚度为6 GPa,压裂液排量为0.001 m³/s,压裂液黏度为0.001 Pa·s,渗透率为 $1 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$,抗拉强度为5.96 MPa。

初始时间增量步为0.01 s,压裂液注入时间为60 s,页岩储层矿物的材料参数^[17]见表1:

表1 矿物的材料参数
Table 1 Material parameters of minerals

矿物	弹性模量(GPa)	泊松比
石英	95.89	0.07
黏土	14.68	0.30
方解石	79.23	0.31
长石	69.05	0.36
黄铁矿	306.17	0.14

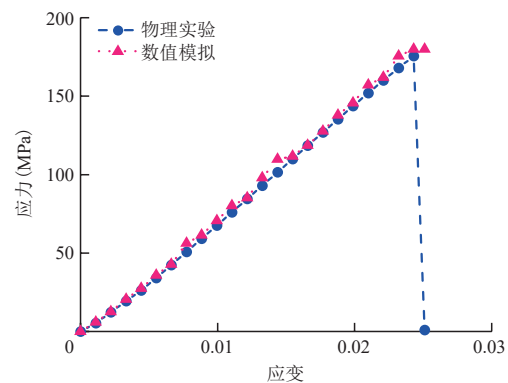


图3 物理实验与数值试验应力—应变曲线对比

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves between physical experiment and numerical experiment

3 界面刚度作用下水力裂缝扩展规律分析

3.1 裂缝起裂与扩展过程分析

图4为压裂液注入60 s,矿物边界界面刚度分别为2 GPa、4 GPa、6 GPa、8 GPa、10 GPa时,水力压裂参数及拉伸破坏占比变化规律。矿物边界界面刚度为2~10 GPa时,均在压裂液注入4 s后,裂缝开始起裂,

射孔压力突然增大,之后随着裂缝的扩展射孔压力变化趋势基本一致。孔隙压力总体趋势为随裂缝的起裂和扩展不断增大。但矿物边界界面刚度为8 GPa时,如图4d所示,孔隙压力随裂缝的起裂和扩展先缓慢增大后逐渐稳定,最后快速增长。拉伸破坏占比比较大,破坏形式以拉伸破坏为主。矿物边界界面刚度为2 GPa时,如图4a所示,有效应力随裂缝的起裂和扩展不断增大,矿物边界界面刚度为4~6 GPa时,有效应力随裂缝的扩展总体趋势为先增大后减小,

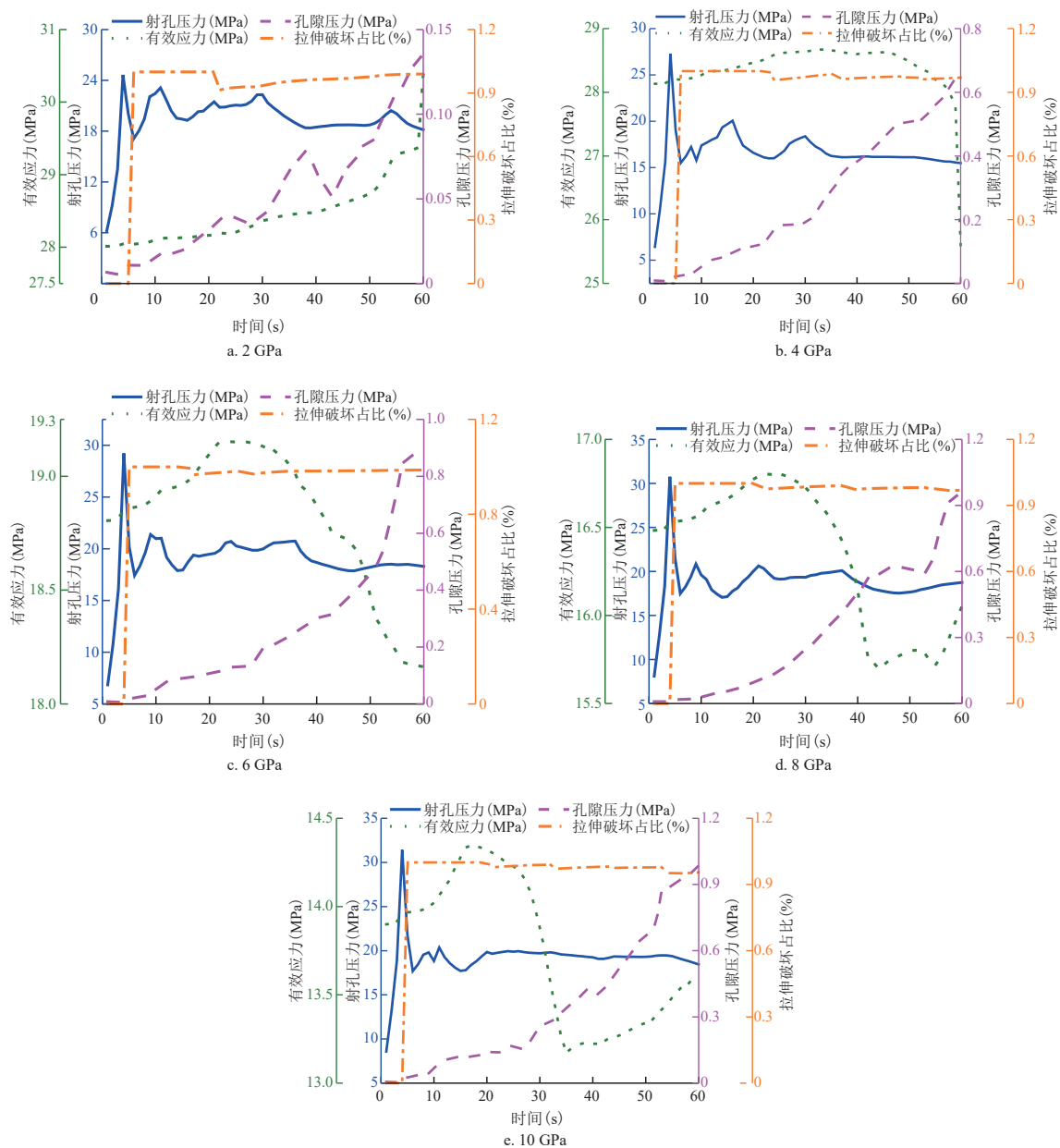


图4 水力压裂参数及拉伸破坏占比变化规律

Fig. 4 Variation law of fracturing parameters and tensile failure percentage under different interface stiffness

但矿物边界界面刚度为8~10 GPa时,有效应力随裂缝的扩展总体趋势为先增大后减小,最后逐渐增大。

图5展示了压裂液注入60 s时,有效应力和孔隙压力随界面刚度的变化规律。随矿物边界界面刚度的增大,矿物内部分子之间的作用力相应增大,矿物界面作用随之增强,进而导致黏聚力不断增大,页岩脆性降低。因此,起裂压力由24.64 MPa逐渐增大至31.42 MPa,裂缝的起裂越来越困难,即裂缝起裂需要克服更大的阻力。由于岩层不容易起裂,压裂液集中在裂缝内部,引起裂缝内部的孔隙压力不断增大,由0.14 MPa增大至0.99 MPa,进而导致裂缝的有效应力不断减小,由30.38 MPa逐渐减小至13.62 MPa。裂缝扩展准则为最大应力准则,当应力达到抗拉强度时,裂缝开始起裂,裂缝破坏形式以拉伸破坏为主,主要形成了张开型裂纹。

3.2 裂缝扩展形态分析

图6为压裂液注入60 s,矿物边界界面刚度分别为2 GPa,4 GPa,6 GPa,8 GPa,10 GPa时,水力压裂的裂缝形态变化规律。矿物边界界面刚度为2~10 GPa时,裂缝长度、数目、面积以及最大裂缝宽度变化趋势基本一致,均随着裂缝的起裂和扩展不断增大,且最大裂缝宽度均在初始位置处(图8)。但在矿物边界界面刚度为8~10 GPa时,裂缝面积波动较大一些(图6d、图6e)。矿物边界界面刚度为2~10 GPa时,最大裂缝宽度整体上随着压裂液的注入波动较大,但矿物边界界面刚度为8 GPa时,最大裂缝宽度变化较为平缓。

如图7所示,压裂液注入60 s时,裂缝长度、数目、

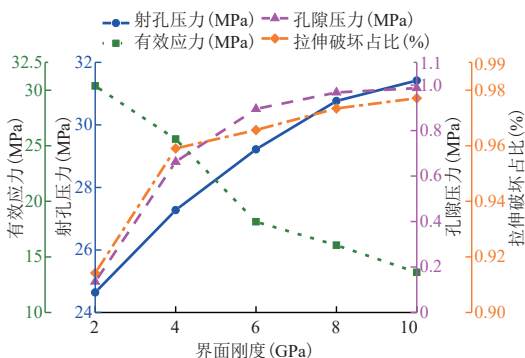


图5 不同界面刚度下压裂参数及拉伸破坏占比变化规律

Fig. 5 Variation law of fracturing parameters and tensile failure percentage under different interface stiffness

面积以及最大裂缝宽度随矿物界面刚度变化。随矿物边界界面刚度的增大,最大裂缝宽度较为接近,由2.053 μm 增大至2.069 μm ;裂缝数目、长度以及面积变化趋势一致,变化量逐渐减小;界面刚度由4 GPa增大至8 GPa时,裂缝数目和长度的变化量较小。主要是因为相同时间内,注入的压裂液体积相同,除去少量滤失进入地层的压裂液,裂缝内的压裂液体积基本相同,对于二维裂缝,压裂液体积是由裂缝的长度和宽度共同决定的,裂缝的面积逐渐减小,且裂缝宽度变化较小时,裂缝的长度和数目逐渐减小。

图8为压裂液注入60 s,矿物边界界面刚度分别为2 GPa,4 GPa,6 GPa,8 GPa,10 GPa时,水力压裂裂缝的最终扩展形态。矿物边界界面刚度为2 GPa时,裂缝的上翼与下翼先是沿着矿物边界扩展,上翼裂缝扩展停在矿物边界处,下翼裂缝扩展停在矿物中;矿物边界界面刚度为4 GPa时,裂缝的上翼穿过黏土矿物和方解石矿物,裂缝扩展停在矿物中,下翼沿着矿物边界扩展,最终停在矿物边界处;矿物边界界面刚度为6~8 GPa时,上翼裂缝和下翼裂缝扩展均停在矿物中,矿物边界界面刚度为10 GPa时,裂缝扩展与矿物边界界面刚度为4 GPa时类似。

图8结果表明,裂缝扩展包括两种方式:一是沿着矿物边界扩展;二是穿过矿物边界,进入矿物内扩展。主要是因为裂缝扩展过程中周边的应力场时刻在变化,且随矿物边界界面刚度的增大,裂缝起裂和扩展越来越困难,但裂缝整体上偏向平行最大主应力方向扩展。

3.3 界面刚度对压裂效果分析

综上所述,随矿物边界界面刚度的增大,裂缝长度逐渐减小,裂缝宽度逐渐增大,更易形成短而宽的裂缝,且裂缝长度的变化量明显大于裂缝宽度的变化量。虽然裂缝宽度变化量较小,但由于在微观尺度上建立的模型,尺寸效应作用下裂缝宽度对压裂效果的影响不可忽略。采用水力压裂技术提高页岩气产能时,水力裂缝的长度和宽度是影响页岩气产能的重要因素,裂缝长度越长,宽度越宽,可以增大储层水力压裂面积,有效改善储层的渗流通道,降低现场压裂施工难度,有利于提高页岩储层产气量。

矿物边界界面刚度为2 GPa时,裂缝长度最长,裂缝宽度最小,裂缝数目最多,裂缝长度和数目的尺寸效应远大于裂缝宽度的尺寸效应,压裂效果最佳;

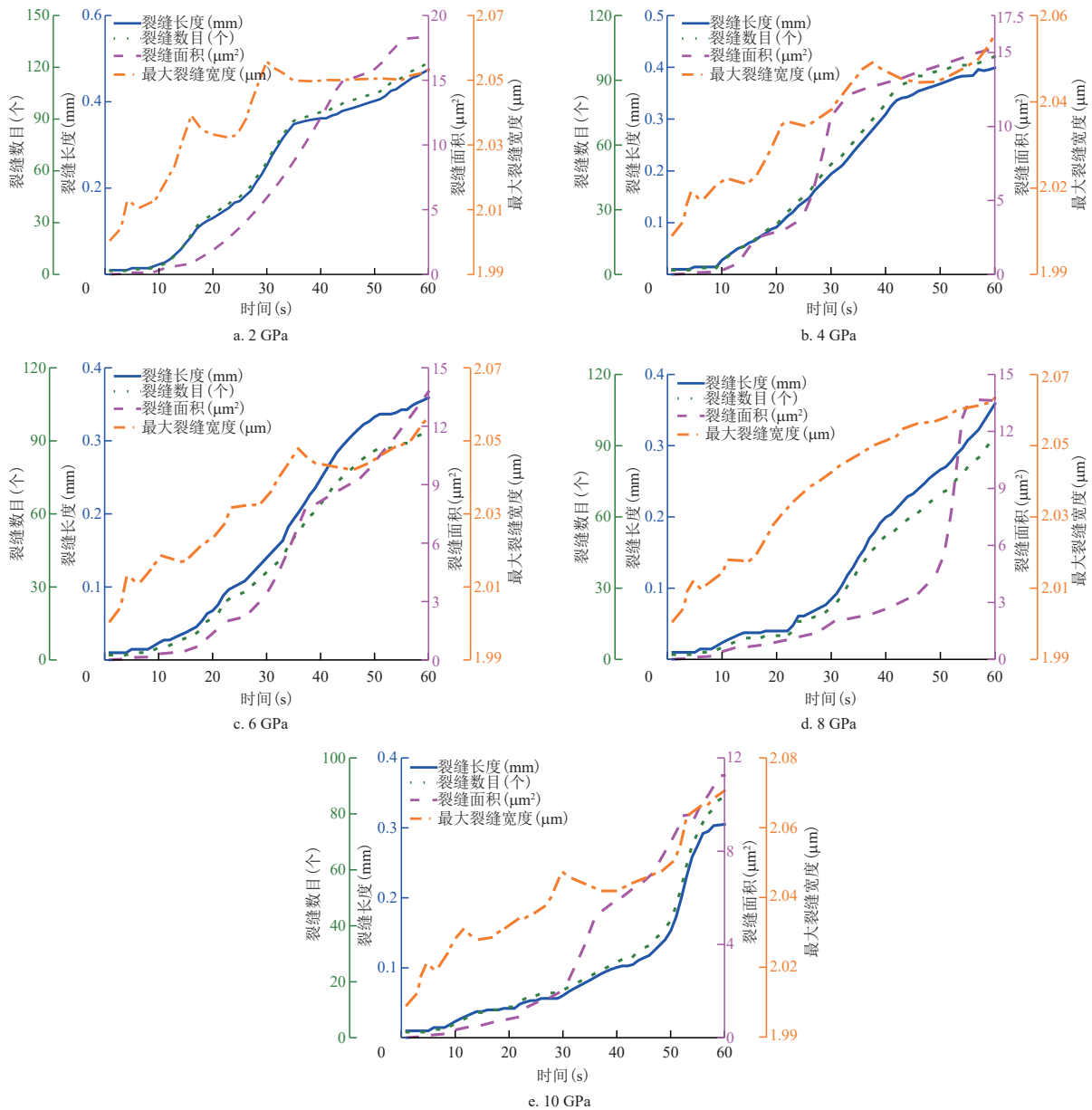


图6 水力压裂的裂缝形态参数变化规律

Fig. 6 Variation law of fracture morphological parameters under different interface stiffness

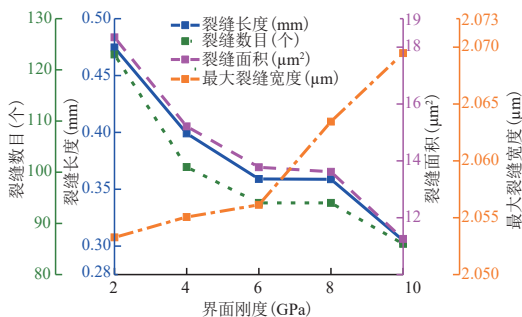


图7 不同界面刚度下裂缝形态参数变化规律

Fig. 7 Variation law of fracture morphological parameters under different interface stiffness

矿物边界界面刚度为4~8 GPa时,裂缝长度和数目相近,裂缝宽度变化量较小,裂缝扩展状态较稳定,裂缝长度、宽度和数目的尺寸效应差异不明显,压裂效果较好;矿物边界界面刚度为10 GPa时,裂缝长度最短,裂缝宽度最大,裂缝数目最少,由于裂缝宽度整体上变化量较小,故裂缝宽度增大的尺寸效应远小于裂缝长度和数目减小的尺寸效应,压裂效果较差。因此,页岩气储层进行水力压裂作业时应该优先选择矿物边界界面刚度为2 GPa的位置,其次选择矿物边界界面刚度为4~8 GPa的位置。

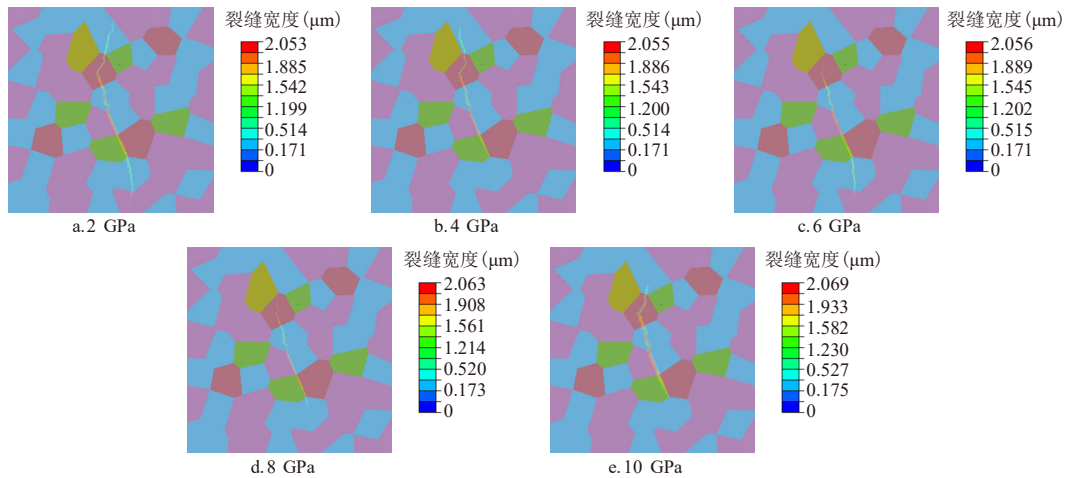


图8 不同矿物界面刚度下的水力压裂裂缝的最终扩展形态

Fig. 8 Fracture propagation morphology under different mineral interface stiffness

4 讨论

矿物边界的界面刚度为2 GPa时,裂缝起裂压力最小,有效应力最大,孔隙压力最小,裂缝长度最长、数目最多;矿物边界的界面刚度为4~8 GPa时,裂缝的扩展形态相似,裂缝长度和数目的变化量较小;矿物边界的界面刚度为10 GPa时,水力裂缝的起裂压力最大,有效应力最小,裂缝的长度最短、数目最少。这表明矿物边界界面刚度显著影响了页岩水力压裂的裂缝起裂与扩展。

微观层面上,随矿物边界界面刚度的增大,不同矿物边界内部分子之间的作用力相应增大,不同矿物之间界面作用随之增强;宏观层面上,高分子间作用力导致矿物组间黏聚力增大,降低了页岩脆性。而较低脆性代表分子间黏聚力不易被破坏^[20],进而导致水力裂缝起裂更困难,裂缝起裂压力较大,裂缝扩展速度慢,与文献[21-22]的分析结果一致。这表明界面刚度越高越不利于页岩气储层的压裂改造。在本研究结果中界面刚度增大直观表现为裂缝长度、数目以及面积大幅度减小。在现场实际中,由于尺寸效应以及页岩非均质性、天然裂缝等因素的影响,现场压裂效果可能会更差。因此,页岩气储层进行水力压裂作业时应该优先选择矿物界面刚度较小的位置。

研究结果为合理选择页岩气储层水力压裂作业层位提供理论依据和技术指导。现场选取四川盆地长宁县双河剖面龙马溪组的露头页岩试样,通过纳米压痕法和原子力显微镜法^[23-24]测量矿物界面刚度,纳米压痕技术是通过计算机控制载荷连续变化,在

线监测压深量,可以获得小到纳米级的压深。原子力显微镜法是基于原子间相互作用力的测定,当一根十分尖锐的微探针在纵向充分逼近样品表面至数纳米更小间距时,微探针的原子和样品表面的原子之间将产生相互作用的原子力。纳米压痕法和原子力显微镜法均可在微纳尺度上测量页岩力学性质。

综上所述,优先选择矿物界面刚度较小的位置,可有效改善储层的渗流通道,降低现场压裂施工难度,有利于提高页岩储层产气量。页岩矿物界面复杂,矿物界面作用机理不明确,通过实验室实验探索矿物界面刚度对页岩储层压裂设计改造的影响需要开展进一步研究。

5 结论

1) 在微观尺度上建立了页岩矿物分布几何模型,并在实体单元内嵌入零厚度 cohesive 单元,构建了考虑矿物边界界面作用的页岩微观结构模型。

2) 随矿物边界界面刚度的增大,起裂压力和孔隙压力逐渐增大,有效应力不断减小;裂缝长度、数目以及面积逐渐减小,裂缝宽度逐渐增大,更易形成短而宽的裂缝;裂缝破坏形式以拉伸破坏为主。

3) 页岩水力压裂作业应该优先选择矿物边界界面刚度较小的层位压裂,有利于页岩储层渗流通道的构建,提高页岩储层运输的能力。

参考文献

- [1] 何晓,吴建发,雍锐,等. 四川盆地长宁——威远区块海相页岩气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 259-272.

HE Xiao, WU Jianfa, YONG Rui, et al. Accumulation

- conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in changning-Weiyuan block, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 259-272.
- [2] 李庆辉, 李少轩, 刘伟洲. 深层页岩气储层岩石力学特性及对压裂改造的影响[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(3): 130-138.
LI Qinghui, LI Shaoxuan, LIU Weizhou. Rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs and their influence on fracturing reformation[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(3): 130-138.
- [3] 张树翠, 孙可明. 储层非均质性和各向异性对水力压裂裂纹扩展的影响[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(2): 96-100.
ZHANG Shucui, SUN Keming. The influence of reservoir heterogeneity and anisotropy on hydraulic fracture propagation [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(2): 96-100.
- [4] 程万里, 邓政斌, 刘志红, 等. 煤泥浮选中矿物颗粒间相互作用力的研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2020(3): 48-55.
CHENG Wanli, DENG Zhengbin, LIU Zhihong, et al. Research progress in interaction force between mineral particles in coal slurry flotation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3): 48-55.
- [5] CHU L, LUO L, FWA T F. Effects of aggregate mineral surface anisotropy on asphalt-aggregate interfacial bonding using molecular dynamics (MD) simulation[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 1-12.
- [6] 梁冰, 岳鹭飞, 孙维吉. 页岩矿物组分对裂缝扩展影响的数值模拟分析[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 97-101.
LIANG Bing, YUE Lufei, SUN Weiji. The influence of shale mineral composition on crack growth: numerical simulation[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 97-101.
- [7] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [8] 刘泉声, 甘亮, 吴志军, 等. 基于零厚度黏聚力单元的水力压裂裂隙空间分布影响分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 393-402.
LIU Quansheng, GAN Liang, WU Zhijun, et al. Analysis of spatial distribution of cracks caused by hydraulic fracturing based on zero-thickness cohesive elements[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2): 393-402.
- [9] WU Z J, SUN H, WONG L N Y. A cohesive element-based numerical manifold method for hydraulic fracturing modelling with Voronoi Grains[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2335-2359.
- [10] 李勇华. 矿物相互作用对岩石单轴抗压强度的影响研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(6): 198-202.
LI Yonghua. Effect of mineral interaction on uniaxial compressive strength of rock[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(6): 198-202.
- [11] 薛炳, 张广明, 吴恒安, 等. 油井水力压裂的三维数值模拟[J]. *中国科学技术大学学报*, 2008, 44(11): 1322-1325.
XUE Bing, ZHANG Guangming, WU Heng'an, et al. Three-dimensional numerical simulation of hydraulic fracture in oil wells[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, 44(11): 1322-1325.
- [12] 连志龙, 张劲, 王秀喜, 等. 水力压裂扩展特性的数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 169-174.
LIAN Zhilong, ZHANG Jing, WANG Xiuxi, et al. Simulation study of characteristics of hydraulic fracturing propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 169-174.
- [13] 张广明, 刘合, 张劲, 等. 油井水力压裂流-固耦合非线性有限元数值模拟[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 113-116.
ZHANG Guangming, LIU He, ZHANG Jing, et al. Simulation of hydraulic of oil well based on fluid-solid coupling equation and non-linear finite element[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 113-116.
- [14] 董平川, 徐小荷. 储层流固耦合的数学模型及其有限元方程[J]. *石油学报*, 1998, 19(1): 74-80.
DONG Pingchuan, XU Xiaohu. The fully coupled mathematical of the fluid-solid in an oil reservoir and its finite element equations[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(1): 74-80.
- [15] DEAN R H, SCHMIDT J H. Hydraulic-fracture predictions with a fully coupled geomechanical reservoir simulator[J]. *SPE Journal*, 2009, 14(4): 707-714.
- [16] HAGOORT J, WEATHERILL B D, SETTARI A. Modeling the propagation of waterflood-induced hydraulic fractures[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1980, 20(4): 293-303.
- [17] 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等. 川南长宁地区五峰组-龙马溪组页岩脆性特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(9): 1629-1639.
ZHANG Chenchen, WANG Yuman, DONG Dazhong, et al. Brittleness characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in Changning region, Southern Sichuan, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1629-1639.
- [18] 李文浩, 卢双舫, 王民, 等. 基于扫描电镜大视域拼接技术定量表征致密储层微观非均质性[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1497-1504.
Li Wenhao, Lu Shuangfang, Wang Min, et al. Quantitative characterization of micro heterogeneity of tight reservoirs by large-view FE-SEM splicing technology[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1497-1504.
- [19] LIU Q, LIANG B, SUN W J, et al. Experimental study on the difference of shale mechanical properties[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- [20] RAMSAY J G. *Folding and fracturing of rocks*[M]. London: Mc-Graw-Hill, 1967.
- [21] 卞康, 陈彦安, 刘建, 等. 不同吸水时间下页岩卸荷破坏特征的颗粒离散元研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 355-367.
BIAN Kang, CHEN Yan'an, LIU Jian, et al. Particle discrete element study of shale unloading damage characteristics under different water absorption times[J]. *Geotechnics*, 2020, 41(S1): 355-367.
- [22] 隋丽丽, 杨永明, 杨文光, 等. 胜利油田东营凹陷区页岩可压裂性评价[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1588-1594.
SUI Lili, YANG Yongming, YANG Wenguang, et al. Evaluation of shale fracturing ability in Dongying Sag of Shengli Oilfield[J]. *Acta China Coal Society*, 2015, 40(7): 1588-1594.
- [23] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [24] ELIYAHU M, EMMANUEL S, DAY-STIRRAT R J, et al. Mechanical properties of organic matter in shales mapped at the nanometer scale[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 294-304.

(编辑 徐佩)