

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.005

天然裂缝角度对水力压裂的影响数值分析

张 健^{1,2}, 王金意^{1,2}, 荆铁亚^{1,2}, 张国祥^{1,2}, 马海春³

(1.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 2.二氧化碳捕集与处理北京市重点实验室, 北京 102209; 3.合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了分析天然裂缝对水力压裂的裂纹发育影响情况,开展了页岩水力压裂模型试验,实验结果显示天然裂缝对裂纹有多种不同的影响效果。通过 cohesive 单元设置不同的天然裂缝角度分析天然裂缝角度对水力压裂的影响,得到当岩层处于均匀的地应力状态下,天然裂缝角度会影响水力裂缝的扩展路径以及裂缝宽度。水力裂缝沿着天然裂缝延伸时,天然裂缝角度不同会影响水力裂缝的裂缝宽度。天然裂缝的角度 θ 会影响压裂液向周围岩体的渗流方向以及渗流速度,随着角度的增加,渗流速度降低。天然裂缝角度 θ 会影响孔压的大小,孔压的影响范围以及应力分布。

关键词:水力压裂;数值分析;天然裂缝角度;裂缝

中图分类号:TV 131;O 241

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)03-0034-06

Numerical Analysis of the Influence of Natural Fracture Angle on Hydraulic Fracturing

ZHANG Jian^{1,2}, WANG Jinyi^{1,2}, JING Tieya^{1,2}, ZHANG Guoxiang^{1,2}, MA Haichun³

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Beijing Key Laboratory of Carbon Dioxide Capture and Treatment, Beijing 102209, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to analyze the structure plane effects on the development of crack face for hydraulic fracturing, hydraulic fracturing of shale model tests were carried out. The effect of the natural fracture angle on the hydraulic fracturing is analyzed by setting different natural fracture angles through the cohesive unit, and the natural fracture angle can affect the expansion path and the crack width of the hydraulic fracture when the rock formation is in a uniform ground stress state. The natural fracture angle can affect the crack width of the hydraulic fracture when the hydraulic fracture extends along the natural crack. The angle of the natural fracture can affect the seepage direction and the seepage velocity of

收稿日期:2019-12-08。

基金项目:中国华能集团资助项目(CERI/TY-19-HJK03)。

作者简介:张健(1984—),男,湖北随州人,硕士,高级工程师。E-mail:j_zhang@qny.chng.com.cn

引用本文:张健,王金意,荆铁亚,等.天然裂缝角度对水力压裂的影响数值分析[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(3):34-39.

the fracturing fluid to the surrounding rock mass. The seepage velocity decreases with the increase of the angle. The angle of natural fracture can affect the size of the pore pressure, the influence scope of the pore pressure, and the stress distribution of shale.

Key words: hydrofracture; numerical analysis; natural fracture angle; crack

中国能源短缺问题突出,虽然在页岩气开发方面还处于前期阶段,但是中国页岩气开发技术正在高速发展。其中,水力压裂-页岩气开发的关键技术之一,也在快速发展。页岩是一种沉积岩,存在大量的天然裂缝。它主要是由黏土沉积经压力和温度作用而形成的岩石,但其中混杂有石英、长石的碎屑以及其他化学物质^[1]。试验研究表明天然裂缝会对水力压裂裂缝延伸有重要的影响,裂缝发育至天然裂缝会产生转向、穿过和停止等现象^[2-5],但天然裂缝的参数较难测定,难以说明人工裂缝延伸和天然裂缝角度之间的规律。部分文献^[6-10]通过数值计算分析了水力压裂裂缝形态的影响因素,但关于天然裂缝对人工裂缝延伸的影响规律尚不明确^[11-14],试验难以研究裂缝发育过程中的应力分布、裂缝宽度等变化过程。本文通过数值模拟研究天然裂缝对裂缝延伸的影响情况,研究了天然裂缝角度对裂缝发育的影响规律,得出了天然裂缝角度对裂缝宽度、渗流速度、孔隙压力和有效应力的影响规律,从而揭示了水力裂缝与天然裂缝相互作用机理,以及天然裂缝对裂缝网形成过程不同作用机理。

1 计算模型

采用 abaqus 数值模拟软件,利用 cohesive 单元模拟页岩岩中天然裂缝角度对于水力压裂裂缝的扩展,延伸方向、宽度、孔压以及压裂液的流动方向的影响。建立 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的二维数值分析模型(如图1所示),与三维分析有一定距离,但能有效反映出裂纹发育情况。利用 cohesive 单元预制天然裂缝以及水力裂缝,天然裂缝的长度为 6 m ,天然裂缝的角度分别为 30° , 45° , 60° (如图2所示)。将模型在距离天然裂缝以及水力裂缝 1 m 内划分为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的网格,边界划分为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的单元向裂缝附近过渡,约束 X 方向边界 $U_1=0$, Y 方向边界 $U_2=0$,设置边界孔压

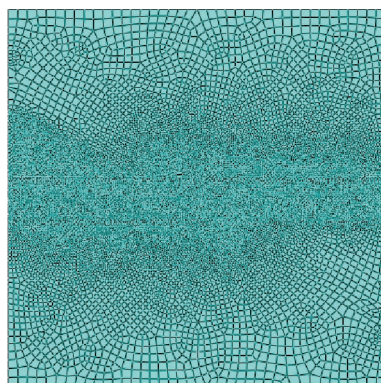


图1 二维数值分析模型

Fig.1 Two-dimensional analysis model

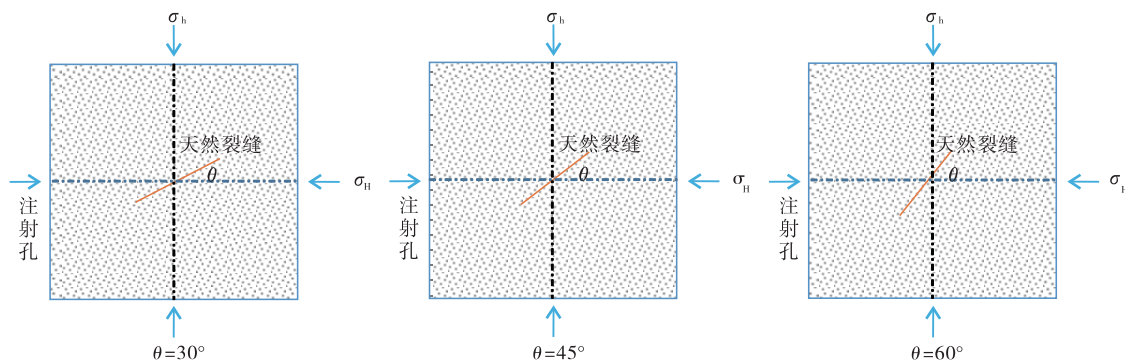


图2 模型示意图

Fig.2 Model schematic

为 0。模型的具体参数见表 1。第一步计算在主地应力作用下天然应力的分布,第二步计算在注水条件下裂纹发育情况,并记录对应的应力、裂纹宽度和水压等物理量。

表 1 模型中的基础参数

Table 1 Basic parameters in the model

弹性模量/GPa	泊松比	岩石抗拉强度/MPa	天然裂缝抗拉强度/MPa	渗透系数/(m·s ⁻¹)
15	0.25	6	2	1×10 ⁻⁷
滤失系数/(m·(Pa·s) ⁻¹)	模拟时间/s	初试孔隙比	水平最大主应力/MPa	水平最小主应力/MPa
1×10 ⁻¹⁴	200	0.1	8	8
初始孔隙压力/MPa	初始饱和度/%	排量/(m ² ·s ⁻¹)	模型尺寸/m	压裂液黏度/(Pa·s)
1	100	0.002	20×20	0.001

2 结果分析

通过控制天然裂缝与水平最大主应力 σ_H 的夹角 θ 依次为 30°,45°,60°时,分析 θ 大小对于水力裂缝扩展的影响规律,模拟结果如图 3 所示。根据模拟结果分析得到当岩石处于均匀的地应力场时,由于天然裂缝的抗拉强度低于岩石本身,所以天然裂缝会影响水力裂缝的延伸方向,水力裂缝的延伸方向会沿着天然裂缝的方向延伸,这应证了文献[15-16]得到的结论,说明天然裂缝(含层理面)对水力裂缝的拓展延伸有重要的影响,结构面强弱度将改变裂缝的发展路径,并沿结构面方向发育。

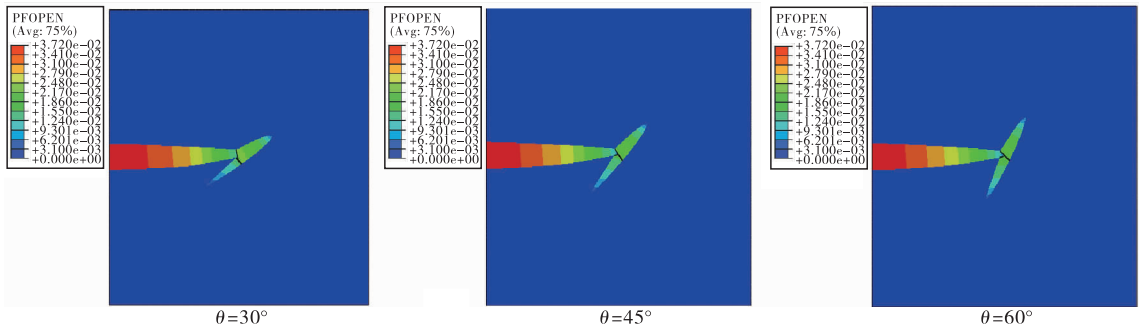


图 3 水力裂缝随着天然裂缝角度变化的延伸方向

Fig.3 The extension direction of hydraulic fracture with natural fracture angle

2.1 注入点裂缝宽度及孔压分析

对模拟结果进行后处理得到注入点的裂缝宽度及孔隙压力随时间变化图(如图 4 所示),对其进行分析可发现,注入点的裂缝宽度与孔隙压力成正相关的关系,且这种关系不受天然裂缝角度的影响,随着注入时间的增加,裂缝宽度与孔隙压力的增张速率有较小的减少,裂缝宽度的变化速度大于孔隙压力的变化速度,且这种规律与天然裂缝的角度没有明显的关系。将 3 个角度的孔隙压力放置于同一坐标系(如图 5 所示),由于天然裂缝的抗拉强度低于岩石本身,所以当天然裂缝起裂时,注入点的孔隙压力会有突然性的下降,据此由图 5 分析可得出:当天然裂缝与 σ_H 成小角度起裂(裂纹上端),角度分别为 30°,45°,60°时注入点孔隙压力分别约为 14.2,15,15.8 MPa,由此可知角度 θ 越大,天然裂缝的起裂压力越大。而当天然裂缝与 σ_H 成大角度起裂(裂纹下端),角度分别为 30°,45°,60°时,注入点的孔隙压力分别约为 31,21,17 MPa。由此可知,随着天然裂缝与 σ_H 之间角度 θ 越大,起裂压力越小。

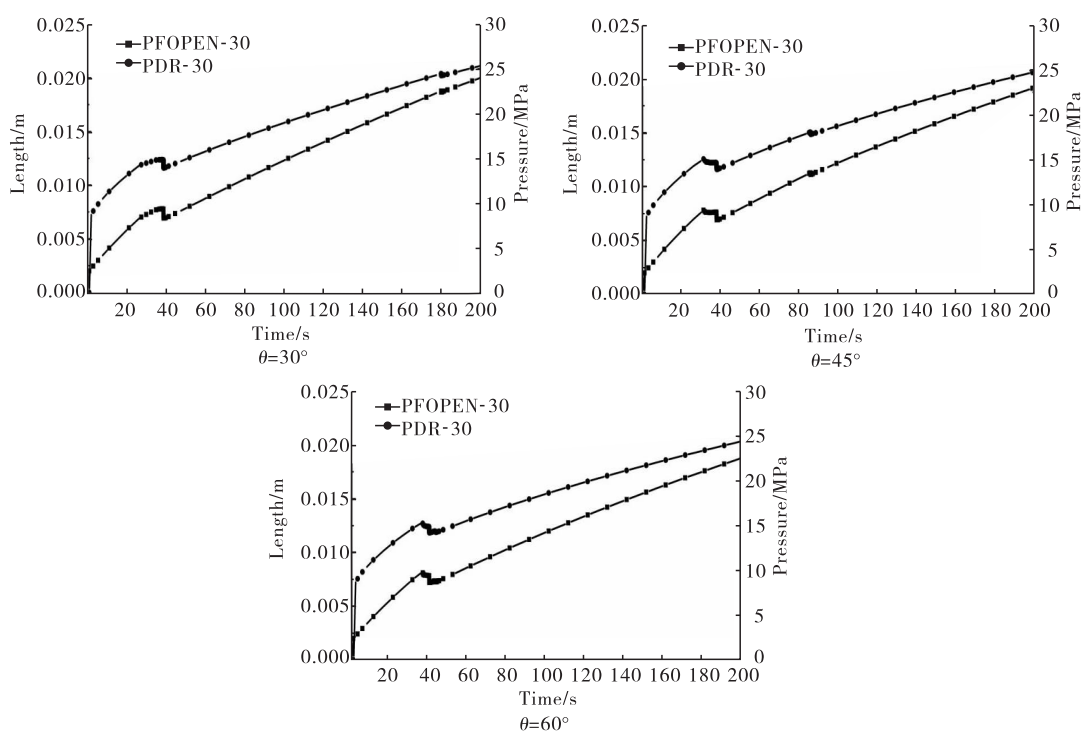


图 4 注入点孔压及裂缝宽度随时间变化图

Fig.4 The variation of pore pressure and crack width with time at injection point

2.2 压裂液的流动方向及速度随天然裂缝角度 θ 变化

由模拟结果得到压裂液的流动方向及速度云图(如图 6 所示),由图 6 分析得出当天然裂缝与 σ_H 之间夹角 θ 为 30° 时,压裂液沿裂缝向周围岩体的流动主要集中于上裂缝的尖端,速度最大方向为 Y 轴的下方,压裂液排量最大值为 $1.430 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,当天然裂缝与 σ_H 之间的角度 θ 为 45° 时,压裂液沿裂缝向周围岩体的流动由集中于上尖端向下裂缝尖端转移,下裂缝尖端压裂液流动速度逐渐增大,速度最大方向为 Y 轴及 X 轴,压裂液排量最大值为 $1.340 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,当天然裂缝与 σ_H 之间的角度 θ 增加至 60° 时,下裂缝尖端处压裂渗流速度继续增大,速度最大方向为与 X 轴成 30° 及 120° 方向,压裂液排量最

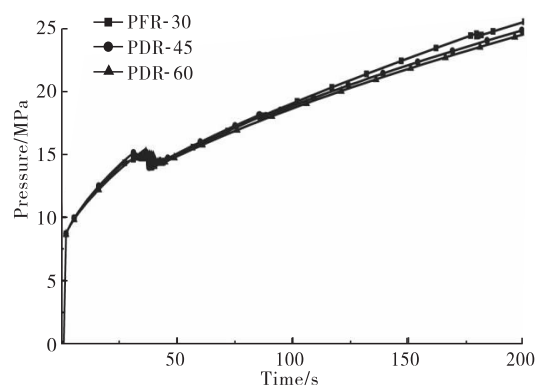


图 5 注入点孔压随时间变化图

Fig.5 Pore pressure with time at injection point

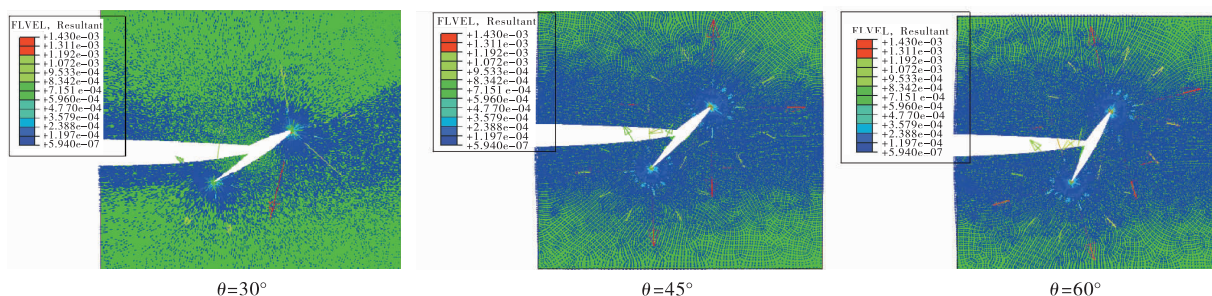


图 6 压裂液流动方向及速度云图

Fig.6 Flow direction and velocity cloud diagram of fracturing fluid

大值为 $1.309 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此分析可知天然裂缝改变水力裂缝的延伸方向,进一步改变了压裂液的流动方向及速度,随着天然裂缝角度 θ 的增大,压裂液向周围岩体的渗流速度降低,压裂液沿着水力裂缝向周围岩体的渗流位置也在逐渐改变。

2.3 水力裂缝宽度、孔压、应力随天然裂缝角度 θ 的变化

由模拟结果的裂缝宽度云图(如图 7 所示),孔压云图(如图 8 所示)及应力云图(如图 9 所示)。由裂缝的宽度云图随着天然裂缝角度 θ 的增加,在裂缝的水平段水力裂缝的宽度变化不明显,即在水平段裂缝宽度不受天然裂缝角度的影响。但是在倾斜的天然裂缝段,水力裂缝宽度变化明显,当天然裂缝夹角 θ 较小时,与 σ_H 成小角度沿天然裂缝延伸的水力裂缝的裂缝宽度较大,而与 σ_H 成大角度沿天然裂缝延伸的水力裂缝的裂缝宽度较小,随着天然裂缝的增加,与 σ_H 成小角度沿天然裂缝延伸的水力裂缝的裂缝宽度逐渐减小,而与 σ_H 成大角度沿天然裂缝延伸的水力裂缝的裂缝宽度逐渐增大,当天然裂缝角度 $\theta = 90^\circ$ 时,两条水力裂缝的裂缝宽度则相等。

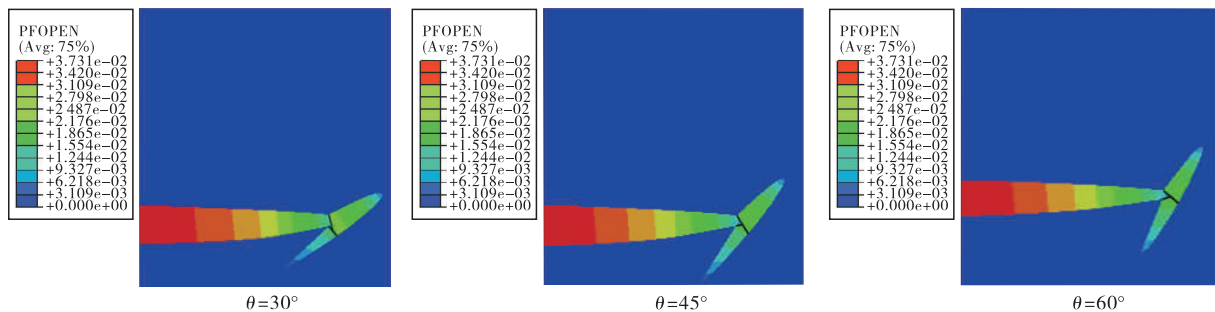


图 7 裂缝宽度云图
Fig.7 Cracks width cloud

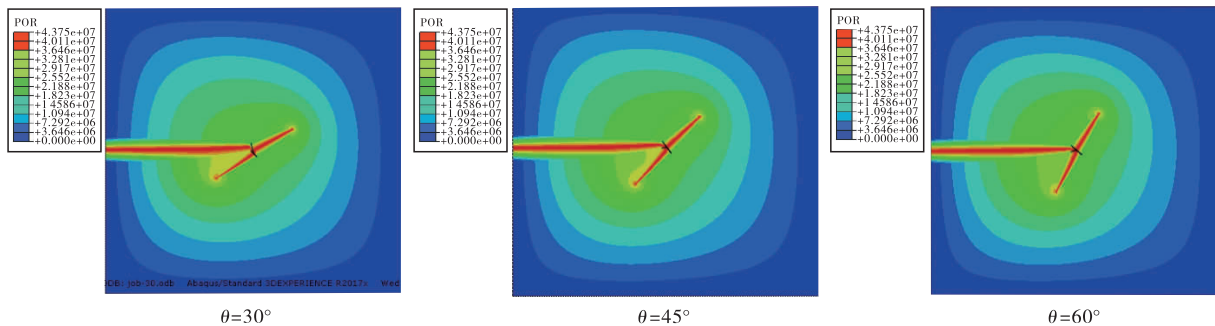


图 8 孔压云图
Fig.8 Porous pressure clouds

分析图 8 的孔压云图可以发现,当天然裂缝角度 θ 分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时,最大孔压分别为 43.75, 42.44, 42.13 MPa, 因此随着天然裂缝角度的增大,最大孔压逐渐减小,最大孔压位于水力裂缝处,并且不同天然裂缝角度所形成的水力裂缝对周围岩体的孔隙压力的影响范围没有明显变化。但是由孔压云图发现,天然裂缝的角度 θ 对水平水力裂缝和与 σ_H 成大角度的水力裂缝之间岩体的孔压影响较大,当天然裂缝角度较小时,其显著影响范围较小,但孔压较大,随着天然裂缝角度 θ 逐渐增大,其影响范围逐渐增大,但孔压逐渐减小。

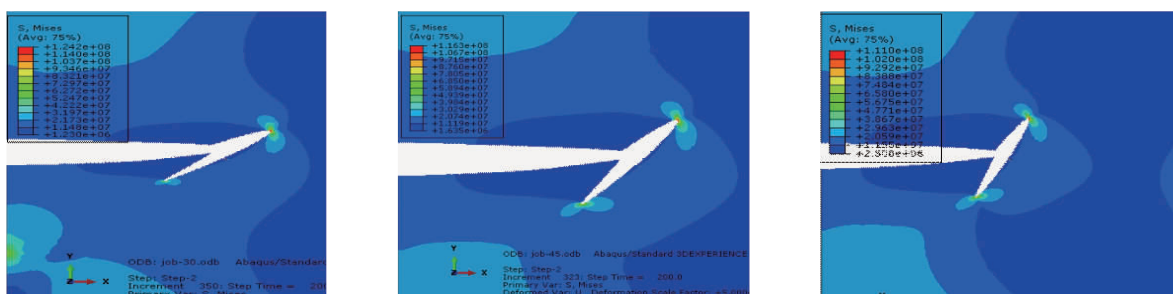


图9 等效应力云图

Fig.9 Isokinetic cloud

分析图9的等效应力云图可发现,在水力压裂过程中,随着天然裂缝角度 θ 的增大,所形成的水力裂缝间断处的最大等效应力逐渐减小。当初始天然裂缝角度 θ 即形成的水力裂缝角度较小时,等效应力主要集中于与 σ_H 成小角度的水力裂缝尖端处,随着角度的 θ 的增大,与 σ_H 成小角度的水力裂缝尖端处的等效应力逐渐减小,而与 σ_H 成大角度的水力裂缝尖端处的等效应力逐渐增大。

3 结 论

在均匀的地应力条件下,天然裂缝角度 θ 会影响水力裂缝的延伸的方向,不同的天然裂缝角度会影响天然裂缝的起裂压力。天然裂缝角度 θ 不影响水力裂缝水平段的裂缝宽度,但当水力裂缝沿着天然裂缝延伸时,天然裂缝角度不同会影响水力裂缝的裂缝宽度。天然裂缝的角度 θ 会影响压裂液向周围岩体的渗流方向以及渗流速度,随着角度的增加,渗流速度降低。在均匀的地应力条件下,天然裂缝角度 θ 会影响孔压的大小,孔压的影响范围以及应力分布。

参考文献:

- [1]张金川,金之均,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,23(7):15-18.
- [2]陈勉.页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):88-94.
- [3]周健,陈勉,金衍,等.裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J].石油学报,2007,28(5):109-113.
- [4]魏源龙.须家河组致密砂岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):2720-2731.
- [5]衡帅.页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(7):1243-1251.
- [6]姚飞,陈勉,吴晓东,等.天然裂缝性地层水力裂缝延伸物理模拟研究[J].石油钻采艺,2008,30(3):83-86.
- [7]杨秀夫.三维水力压裂的数值模拟研究[D].北京:中国石油大学,1998.
- [8]陈治喜.水力压裂裂缝起裂和扩展[D].北京:中国石油大学,1996.
- [9]王瀚.水力压裂垂直裂缝形态及缝高控制数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [10]张广明,刘合,张劲,等.储层流固耦合的数学模型和非线性有限元方程[J].岩土力学,2010,31(5):1657-1662.
- [11]彪仿俊.水力压裂水平裂缝扩展的数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
- [12]连志龙.水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.
- [13]张建光,李湘萍,王传睿,等.页岩气藏水力压裂中应力-流压耦合效应及人工裂缝扩展规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):96-105.
- [14]张搏,李晓,王宇,等.油气藏水力压裂计算模拟技术研究现状与展望[J].工程地质学报,2015,23(2):301-31.
- [15]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.
- [16]孙可明,张树翠,辛利伟,等.页岩气储层层理方向对水力压裂裂纹扩展的影响[J].天然气工业,2016,36(2):45-51.

(责任编辑:殷丽莉)