

# 基于扩展有限元法的煤岩体水力裂隙特征

王子一,康向涛\*,高璐,唐猛,邹义怀,易汉华

(贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为合理探究煤岩体水力裂隙相关特征,基于扩展有限元理论,建立煤岩体水力压裂模型,得出煤岩体的水力压裂裂隙特征。结果表明:前 30 s 裂隙应力场扩散速度最快,在 30 s 达最大值,随后以极大的速度降低,裂隙应力场向裂隙四周扩散直到注水结束后达到稳态且压强几乎无变化;水力裂隙整体和横截面均为椭圆形,孔隙宽度由中央向两端逐渐减小,且孔隙压力场与孔隙宽度变化规律云图分别关于 Y 轴与 X 轴方向对称;水压裂缝总体呈椭圆形态,并从初始孔隙向两端延伸最终形成“1”字型裂缝。在工程实践中有一定参考价值,对有限元理论和裂隙的研究具有一定推动作用。

**关键词:**扩展有限元;煤岩体;水力压裂;裂隙

**中图分类号:**X752      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2021)04-0040-06

## On Hydraulic Fracture Characteristics of Coal and Rock Mass Based on Extended Finite Element Method

WANG Ziyi, KANG Xiangtao, GAO Lu, TANG Meng, ZOU Yihuai, YI Hanhua

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the hydraulic fracture characteristics of coal and rock mass reasonably, the hydraulic fracturing model of coal and rock mass is established based on the extended finite element theory, and the hydraulic fracturing fracture characteristics of coal and rock mass are obtained. Results show that the diffusion rate of fracture stress field is the fastest in the first 30 s, and reaches the maximum in the first 30 s, and then decreases at a great speed. The fracture stress field spreads around the fracture until it reaches a steady state after water injection and the pressure is almost unchanged. The whole and cross-section of hydraulic fractures are elliptical, and the pore width decreases gradually from the center to both ends. The cloud diagram of pore pressure field and pore width change is symmetrical about Y axis and X axis respectively. The water pressure cracks are generally elliptical, and extend from the initial pores to both ends to form “1”-shaped cracks. It has a certain reference value for engineering practice and the research of finite element theory and cracks.

**Keywords:** extended finite element; coal and rock mass; hydraulic fracturing; cracks

煤炭在我国能源体系中占有主体地位,对我国经济发展具有促进作用,2020 年中国的煤炭消费总量为 38.6 亿 t,在一次能源中占比将达到 55.3%。随着煤炭矿井的开采深度逐渐增加,煤与瓦斯突出的危险性也在增加。煤层的低透气性是煤矿瓦斯抽采的难题,对于低透气性较难抽采的煤层,为提高其预抽煤层瓦斯效果,水力压裂技术被广泛应用。

国内外对水力压裂的相关研究诸多,唐世斌等<sup>[1]</sup>将拉伸截断的摩尔-库仑准则引入有限元程序中,考虑了裂缝倾角、岩石内摩擦角和载荷条件对裂缝尖端应力场分布的影响,得到了影响水力裂缝的起裂类型

收稿日期:2021-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064009);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]一般 400)

\* 通信作者,E-mail:xiaokangedu@163.com

和位置的因素;李明等<sup>[2]</sup>采用水平集法(LSM)描述非均质岩石的静态材料边界特性,采用基于流-固耦合弹塑性理论的弥散裂缝模型进行水力压裂过程的模拟,得出了等效开裂区域的发展过程、注水点处水压力与注水时间变化曲线和有效应力路径;刘泉声等<sup>[3]</sup>采用连续-非连续方法,通过 ins-coh 程序在 ABAQUS 有限元模型全域内批量嵌入零厚度黏聚力单元,建立计算模型,模拟高水压下压裂液在岩体中流动,揭示了岩体裂隙面萌生、扩展、贯通的完整破坏过程;李明等<sup>[4]</sup>基于水平集法的基本思想,模拟了含有不同包裹体分布的岩石试件的水力压裂传播特点;盛茂等<sup>[5]</sup>运用考虑缝内水压力作用的相互积分法来数值求解缝尖应力强度因子,并采用最大能量释放率准则确定裂缝是否继续扩展及扩展方位,编制了计算机程序;张振南等<sup>[6]</sup>基于有限元法,研究了劈裂单元内水压对结点力的作用以及结点速度场对渗流场的作用,建立了水力劈裂方程并验证其正确性;董卓等<sup>[7]</sup>利用最大周向应变断裂准则,基于裂纹扩展增量法模拟水力裂缝扩展过程,分析了定向射孔水力裂缝初始起裂水压、扩展路径与倾角、地应力差、泊松比和注水压力的影响;Zhifeng Luo 等<sup>[8]</sup>模拟计算了带有孔和初始预设断裂的弯曲梁断裂传播路径和三轴应力作用下的断裂连接孔,得到了水力裂缝与孔隙弹性介质中孔的相互作用关系;Heng Zheng 等<sup>[9]</sup>基于扩展有限元方法,建立了损伤-应力-渗流耦合的水力压裂扩展模型,定量分析了天然裂缝的接近角和水平应力差对天然裂缝扩展的影响。

学者们对利用水力压裂治理低渗透性煤层瓦斯的研究做出了诸多贡献,但是,对利用扩展有限元法研究水力致裂裂隙特征研究不足.本文在前人的研究基础上,考虑流-固耦合效应、裂缝流和压裂液滤失的情况下,利用扩展有限元法建立煤岩体开裂和渗流相互耦合模型,基于 ABAQUS 有限元分析软件对煤岩体的裂隙扩展规律进行分析研究.

## 1 模型建立

### 1.1 有限元理论

一般情况下,煤岩体的裂隙尖端在应力的加载和地应力的作用下会产生一定的应力集中现象,由于任何材料都有一定的塑性,因此裂隙尖端附近会产生非线性效应.在进行水力压裂时,煤岩体产生的裂纹,通过弹性力学、断裂力学计算的结果具有一定的精度.所以,在研究中可以视情况把煤岩体视为弹性介质进行研究分析.煤岩体应力平衡可以由虚功原理表示,某体积域内在  $t$  时刻构形的虚功原理为

$$\int_V (\sigma' - u_f \mathbf{I}) \varepsilon dV = \int_S q v dS + \int_V w v dV + \int_V s n \rho_f g v dV. \quad (1)$$

式中:  $\sigma'$  为有效应力;  $\varepsilon = \partial v / \partial x$  为虚变形速率;  $v$  为虚速度场;  $q$  为单位面积的表面力;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $dV$  为体积微元;  $dS$  为面积微元;  $u_f$  为渗流速度;  $w$  为单位体积的体积力(不含流体质量);  $s$  为固相材料的饱和度;  $n$  为固相材料的孔隙率;  $\rho_f$  为流体密度;  $g$  为重力加速度。

煤岩体多孔介质应力平衡方程可以通过虚功原理表示:某时刻岩石的虚功与作用在岩石上的体力和面力产生的虚功大小相等,若不考虑岩石中流体黏性,最终化简可得到式(2)<sup>[10]</sup>:

$$\int_V \mathbf{e} \mathbf{D}_{ep} \frac{de}{dt} dV + \int_V \mathbf{e} \mathbf{D}_{ep} \left[ m \frac{(s_o + p_o e)}{3K_s} \frac{dp_o}{dt} \right] dV - \int_V \mathbf{e} \mathbf{m} (s_o + p_o \xi) \frac{dp_o}{dt} dV = \int_V \mathbf{u} \frac{df}{dt} dV + \int_S \frac{d\tau}{dt} dS. \quad (2)$$

式中:  $e$  为虚位移;  $\mathbf{D}_{ep}$  为弹塑性矩阵;  $t$  为时间;  $\mathbf{m} = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$ ;  $K_s$  为固体颗粒的压缩模量;  $S_o$  为岩石含液饱和度;  $P_o$  为孔隙液体压力;  $\xi = \frac{ds_o}{dp_o}$  为表征毛细压力与饱和度关系的参数;  $\tau$  为时间为岩体面力;  $f$  为岩石体力;  $u$  为虚应变。

扩展有限元法在常规有限元的位移模式中加入能反映裂隙所在面的不连续特性,从而不要求裂隙所在面与单元边保持一致,其克服了常规有限元分析煤岩体断裂问题中网格剖分繁琐、裂隙扩展后需要重新剖分网格的缺点,基于以下两种思想,对位移函数求解:

1) 基于单位分解思想,使用扩展元函数导入到有限元近似函数中,以此来模拟初始裂隙,由于初始裂

隙是裂隙的一个子集,所以,它与扩展裂隙有统一的表达式,其位移函数为

$$c = \sum_N^{l=1} N_l(x) \left[ c_l + H(x) \mathbf{a}_l + \sum_4^{\alpha=1} F_\alpha(x) \mathbf{b}_l^\alpha \right]. \quad (3)$$

式中:  $N_l(x)$  为普通节点位移形函数;  $c_l$  为位移求解连续部分;  $\mathbf{a}_l, \mathbf{b}_l^\alpha$  皆为节点扩展自由度向量;  $H(x)$  为裂缝面的间断跳跃函数;  $F_\alpha(x)$  为裂隙尖端应力渐进函数。

2) 基于拉格朗日公式和虚功方程离散化思想,可得到固体有限元网格,当流体流过这些网格时,流体还需要满足连续方程,在某时间增量内流入的流体流量等于流体体积的增加速率,即

$$\frac{d}{dt} \left( \int_V \frac{\rho_f}{\rho_f^0} s n dV \right) = - \int_S \frac{\rho_f}{\rho_f^0} s n v_f dS. \quad (4)$$

式中:  $v_f$  为渗流速度;  $n$  为  $S$  面外法线方向. 方程采用流体的参照密度  $\rho_f^0$  进行量纲一化。

## 1.2 边界和初始条件

在 ABAQUS 中建立煤岩体的二维均质可变形模型,其区域边界为封闭边界并约束  $X$  和  $Y$  方向节点位移为  $U_1=0, U_2=0$ . 孔隙压力边界条件为一定值  $P_{ob}$ . 水力压裂初始裂隙在煤岩体正中央,沿着  $Y$  方向设置,并给定初始参数: 模型为煤岩体密度  $1380 \text{ kg/m}^3$ ; 煤岩体初始孔隙率  $11.2\%$ ; 煤岩体初始渗透率  $2.7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ; 煤岩体弹性模量  $2.693 \times 10^9$ ; 煤岩体泊松比  $0.3385$ .

基于已有的有限元分析理论,运用有限元数值模拟软件 ABAQUS 对煤岩体水力压裂成缝过程进行模拟,建立  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  的煤岩体二维水力压裂模型,并设置初始裂隙位于煤岩体中心位置长度为  $4 \text{ m}$ ,注水点在初始裂隙中央,并对其施加  $X$  方向与  $Y$  方向的约束,其示意图如图 1 所示,该模型采用四方形网格,为减少计算量和有针对性地对裂隙进行研究,故采用过渡网格的形式沿  $X$  轴方向向中轴线加密进行网格划分。

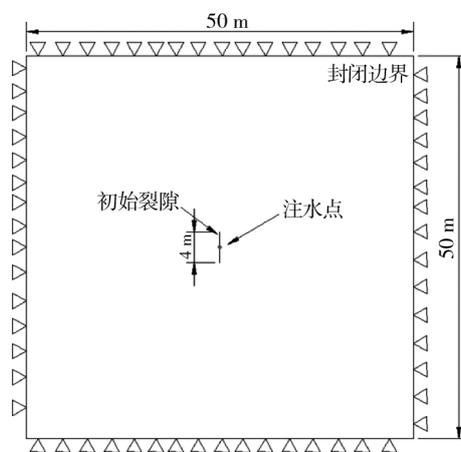


图 1 煤岩体二维水力压裂模型

## 2 计算结果分析

基于已建立的煤岩体二维水力压裂模型,通过初始裂隙单元模拟  $1 \text{ h}$  内水力压裂成缝的应力场、孔隙压力等变化规律,并通过后处理手段得到数值模拟结果图(图 2)以及对应曲线(图 3)。

由图 2 可以看出,原始裂隙在注水  $10 \text{ min}$  后,裂隙沿  $Y$  轴向两边延伸且裂隙尖端与尾端云图基本呈对称图形,尖端与尾端最大应力均达到  $13.84 \text{ MPa}$ ,其应力场影响范围以  $X$  方向  $6.92 \text{ MPa}$  和  $Y$  方向  $9.26 \text{ MPa}$  向煤岩体局部扩散;注水  $30 \text{ min}$  时,沿  $X$  轴方向应力场影响范围有小幅度扩散,但沿  $Y$  轴方向在  $15 \text{ min}$  时的应力场影响范围已经基本扩散到整个煤岩体,并以  $X$  方向  $8.96 \text{ MPa}$  和  $Y$  方向  $10.24 \text{ MPa}$  继续向全局扩散,此时,煤岩体的内部开始出现微小变形情况;注水  $40 \text{ min}$  时,煤岩体内部裂隙周围应力分布逐渐趋于稳定状态, $X$  方向应力场呈椭圆状分布,其大小为  $9.43 \text{ MPa}$ , $Y$  轴应力大小为  $10.61 \text{ MPa}$ ;注水结束时,裂隙已发育完全,其裂隙形状呈“1”字型,且  $X$  方向应力场呈葫芦状,其应力大小为  $9.87 \text{ MPa}$ , $Y$  方向最大应力位于裂隙尖端与尾端,其应力大小为  $14.81 \text{ MPa}$ ,煤岩体周围应力分布已达到稳定状态.由以上分析结合应力云图可得到,沿  $X$  轴传播的应力场大小增长百分比分别为  $28.9\%$ ,  $5.25\%$ ,  $4.67\%$ ,其增长趋势逐渐减小,当注水结束时,应力场在煤岩体中趋于平稳状态,其增长比几乎为  $0\%$ ,其应力传播增长比逐渐减少说明应力传播能力逐渐减弱,考虑其可能是由于在传播过程中能量损耗的原因,沿  $Y$  轴应力扩散规律与  $Y$  轴方向基本一致。

由图 3 可知,在注水之初,由于裂隙还没有开始完全传播,所以,能量几乎没有损耗,其压强增长速度最大,其大小达到峰值后,在  $30 \text{ s}$  时,又以极大的速度减少,说明,此时,裂隙已经开始发育并损耗能量而

导致压强短时间内急速减低;30~250 s 时,压强值呈上下起伏的变化情况,但总体上呈下降趋势且下降速度接近于 30 s 时的下降速度;在 300~2 640 s 后,压强大小变化相对于 30~250 s 时压强变化起伏度较小,趋近于平稳状态;注水 3 460 s 后,压强基本无变化,已达到平稳状态.综上所述,在注水之初(5 min 之前),煤岩体裂隙压强已有大幅度变化,但在宏观上,裂隙变化不大;裂隙发生可见变化是在 5 min 时,裂隙初步开始发育,但发育速度较慢且不明显;10 min 时,裂隙开始加速发育直到 30 min 时,裂隙发育速度逐渐下降且最小发育增长比为 4.67%;在注水 42 min 时,煤岩体内部裂隙周围应力分布有向稳态发展的趋势且压强变化起伏较小,“1”字型裂隙基本形成;在注水 57 min 时,煤岩体内部裂隙周围应力场变化基本已经达到稳态且压强基本无变化,“1”字型裂隙已完全形成,该状态一直维持到注水结束.

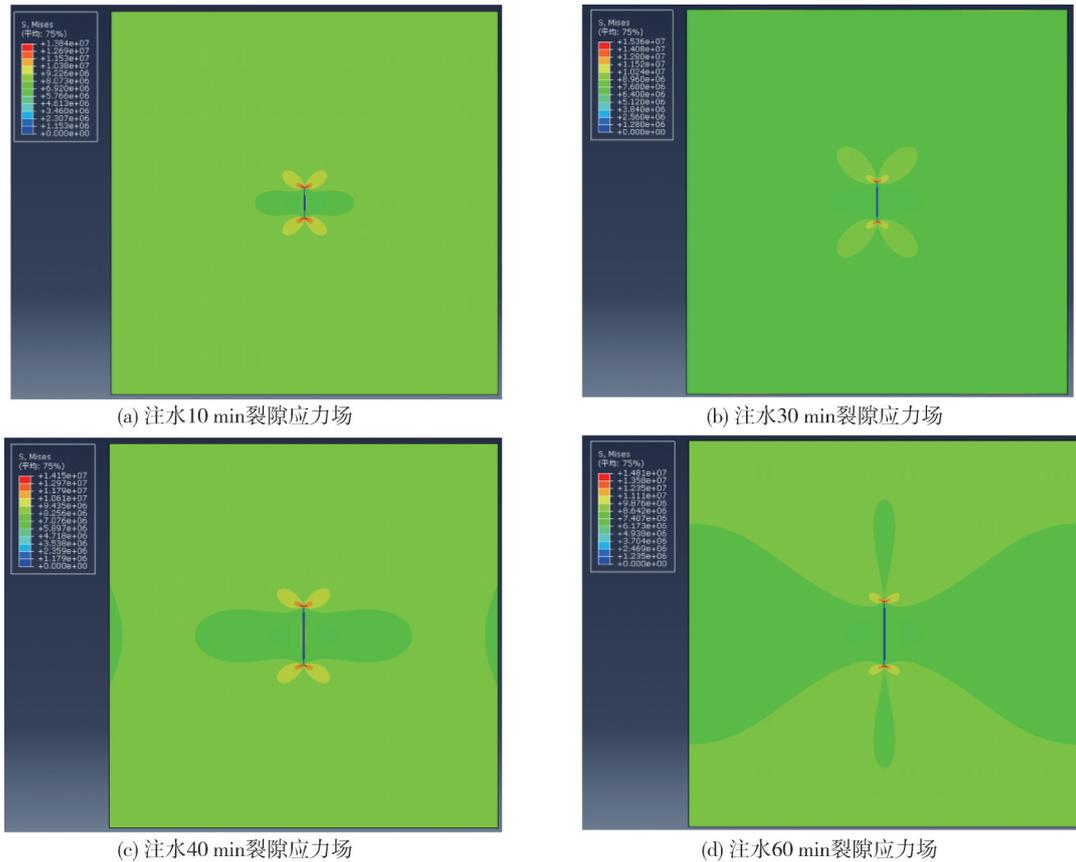


图 2 应力场阶段变化云图

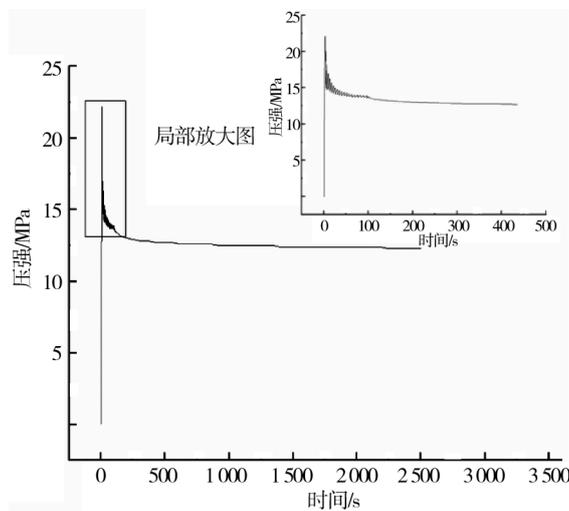


图 3 应力场变化曲线

在定义 cohesive 的力学性能时,实际上就是确定本构模型的具体形状,包括:刚度、极限强度、临界

断裂能量释放率、最终失效单元位移. 裂隙中的流体压力是裂缝扩展的能量来源. 在 cohesive 单元中的流体流动方向分为沿着 cohesive 单元的切向流动以及垂直于 cohesive 单元的法向流动. 利用 ABAQUS 软件内置 cohesive 单元对孔隙压力和孔隙宽度进行模拟, 其初始饱和度设置为 1, 其孔隙变化如图 4 所示.

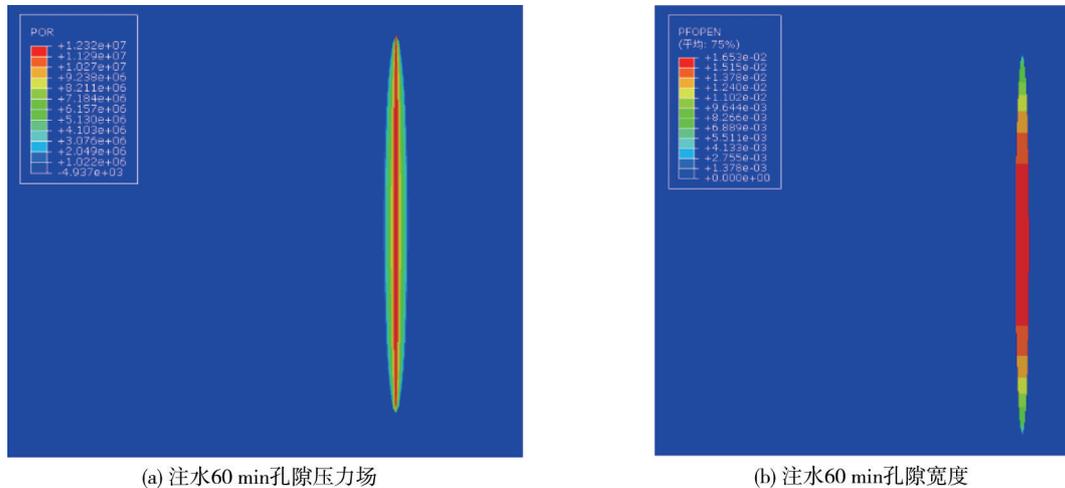


图4 孔隙变化阶段云图

由图4可知,注水60 min时,裂隙长度为17 m,其整体形状为长条状,横截面为类椭圆形,裂隙最大压力(14.09 MPa)位于裂隙中心轴线(Y方向)位置,裂隙最小压力(5.84 MPa)位于边缘位置,其压力分布是以中心轴线(Y方向)为对称轴的中心对称分布;孔隙压力场对孔隙周围的影响范围为椭圆状,影响半径为19.8 m,裂隙最宽处(13.1 cm)位于裂隙中间,宽度从中间向两端逐渐减少,最小值(6.5 cm)位于裂隙尖端位置,并有向两端(Y轴)继续扩展的趋势,其云图以裂隙中心位置(X轴方向)呈中心对称,且水力裂隙孔隙压力影响面积和孔隙宽度的增长率此时为最大.注水结束时,裂隙长度为23 m,其最大、最小孔隙压力分布与注水30 min时基本一致,其最大孔隙压力为12.32 MPa,最小孔隙压力为5.13 MPa,此时,孔隙压力场影响范围已达整个煤岩体并保持相对稳态,压力值基本无变化,其相应曲线斜率逐渐降低;孔隙宽度变化规律与注水30 min时相似,其最大值为16.53 cm,最小值为8.26 cm.综合分析可知,注水结束的孔隙压力略小于注水中的孔隙压力是由于孔隙压力从开始注水到结束注水是呈逐渐减小到稳定的趋势,其原因是孔隙间压力要向周围传播,由于应力波的传播会消耗应力波能量,所以,总体呈减小趋势直到内部应力场平衡稳定,相应变化曲线在此时增长率趋近于0.

### 3 结论

1) 注水30 s时,裂隙应力场扩散速度达到极大值,随后又以极大的速度减小;30~250 s时,压强值呈上下起伏的变化情况,但总体上呈下降趋势且下降速度接近于30 s时的下降速度;在300~2 640 s后,压强大小变化相对于30~250 s时压强变化起伏度较小,趋近于平稳状态;注水3 460 s后,压强基本无变化,几乎已达到平稳状态,注水结束后,最大应力位于裂隙尖端与尾端,其大小为14.81 MPa.

2) 水力裂隙整体和横截面均为椭圆形,注水整个过程中,孔隙压力最大值位于裂隙中心轴线(Y方向)处,其大小为14.09 MPa,孔隙压力场呈椭圆状向裂隙四周扩散直到注水结束并有小幅度减小的趋势.孔隙宽度最大值位于孔隙中间段处,大小为16.53 cm,孔隙压力场与孔隙宽度变化规律云图分别关于Y轴与X轴方向对称,两者整体呈斜率逐渐减小的增长趋势.由数值模拟结果可知,水压裂缝总体呈椭圆形,从注水开始到结束期间,初始孔隙向两端延伸最终形成“1”字型裂缝,两者结果基本吻合.

**参考文献:**

- [1] 唐世斌,董卓,王嘉旭,等.不同荷载作用条件下水力裂缝起裂特性的数值模拟研究(英文)[J].Journal of Central South University,2020,27(12):3875-3887.
- [2] 李明,史艺涛,李鑫,等.基于水平集法的三维非均质岩石建模及水力压裂特性[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(1):109-114.
- [3] 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.
- [4] 李明,郭培军,李鑫,等.基于水平集法的非均质岩石建模及水力压裂传播特性研究[J].岩土力学,2016,37(12):3591-3597.
- [5] 盛茂,李根生.水力压裂过程的扩展有限元数值模拟方法[J].工程力学,2014,31(10):123-128.
- [6] 张振南,王毓杰,牟建业,等.基于单元劈裂法的全耦合水力压裂数值模拟[J].中国科学:技术科学,2019,49(6):716-724.
- [7] 董卓,唐世斌.基于最大周向应变断裂准则定向射孔水力裂缝扩展研究[J].岩土力学,2019,40(11):4543-4553.
- [8] Luo Z F, Zhang N L, Zeng J, et al. Interaction of a hydraulic fracture with a hole in poroelasticity medium based on extended finite element method[J].Engineering Analysis with Boundary Elements,2020, 115 (6):108-119.
- [9] Zheng H, Pu C S, Sun C. Study on the interaction between hydraulic fracture and natural fracture based on extended finite element method[J].Engineering Fracture Mechanics,2020, 230 (5):106981.
- [10] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等.基于 ABAQUS 平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J].岩土力学,2016,37(5):1512-1520.