

文章编号:1672-3961(2021)06-0119-10

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.005

基于连续-非连续元三维煤层气压裂开采分析



高慧¹,冯春²,朱心广^{2,3},张一鸣^{1*},王向刚⁴,辛星⁴,申永利⁴,孙子正⁵

(1. 河北工业大学土木与交通学院,天津 300401; 2. 中国科学院力学研究所,北京 100190;
3. 中国科学院大学工程科学学院,北京 100049; 4. 中化学交通建设集团有限公司,山东 济南 250000;
5. 山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250061)

摘要:基于连续-非连续单元方法,同时考虑单元变形、裂缝开展、块体接触等真实过程,引入应力与裂隙渗流耦合相关算法与模型,分析煤层在多种应力条件下,采用水以及超临界二氧化碳(supercritical carbon dioxide, SC-CO₂)作为压裂液的不同压裂过程,获得对应的裂缝扩展模式及压裂液使用量,并进一步对裂缝宽度发展与注入流体变化等结果展开分析。结果表明,超临界CO₂压裂下煤体裂缝发展较完全,裂缝数量多且形态复杂;煤体的破裂度随地应力的增加先减小后增大。本研究结果可辅助设计人员优化压裂设计,节省成本的同时提高压裂效率,为SC-CO₂应用于煤层气开采提供依据。

关键词:煤层气开采;连续-非连续元方法;水-力耦合;压裂;超临界二氧化碳

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A

引用格式:高慧,冯春,朱心广,等.基于连续-非连续元三维煤层气压裂开采分析[J].山东大学学报(工学版),2021,51(6):119-128.

GAO Hui, FENG Chun, ZHU Xinguang, et al. Three-dimensional hydraulic fracturing analysis of coal bed methane based on continuous-discontinuous element method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(6):119-128.

Three-dimensional hydraulic fracturing analysis of coal bed methane based on continuous-discontinuous element method

GAO Hui¹, FENG Chun², ZHU Xinguang^{2,3}, ZHANG Yiming^{1*}, WANG Xianggang⁴, XIN xing⁴, SHEN Yongli⁴, SUN Zizheng⁵

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China National Chemical Communications Construction Group Co., Ltd., Jinan 250000, China; 5. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on the continuous-discontinuous element method, considering the real process of unit deformation, fracture and block contact, such as the introduction of pressure and fracture seepage coupling model and related algorithm, this study analyzed the different fracturing processes of coal seam under various stress conditions using water and supercritical carbon dioxide as fracturing fluids, obtained the corresponding fracture expansion mode and fracturing fluid usage, and analyzed the evolutions of crack openings and fluid volume. The results showed that the fracture development of supercritical carbon dioxide fracturing was complete, the number of fractures was large and the shape was complex, and the fracture degree of coal body first decreased and then increased with the increase of in-situ stress. This work assisted the designers to optimize the fracking design, improved the fracking efficiency, saved the cost, and provided some analysis for SC-CO₂ application in coal bed methane extraction.

Key words: coal-bed methane extraction; continuous-discontinuous element method (CDEM); hydro-mechanical coupling; fracturing; SC-CO₂

收稿日期:2021-01-06;网络首发时间:2021-09-06 13:53:34

网络首发地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20210906.0941.010.html>

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51809069);国家自然科学基金项目(51709258)

第一作者简介:高慧(1996—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程. E-mail:2370706591@qq.com

*通信作者简介:张一鸣(1984—),男,上海人,教授,主要研究方向为岩土工程和土木工程防灾减灾等. E-mail:yiming.zhang@hebut.edu.cn

0 引言

我国埋深在 2000 m 以内的可开采浅层煤层气资源约为 $12.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 属煤层气资源大国^[1]。伴随我国能源消费量逐年增长, 煤层气开采利用已经成为能源开采领域一大热点。

由于煤层气储存层往往具有低渗透、低压和低饱和等特征, 传统开采方法效率较低^[2]。目前水力压裂方法包括水、液态二氧化碳及超临界二氧化碳压裂技术, 这些技术广泛应用于煤层气开采中, 可大幅提升开采效率。相关研究包括试验研究及数值研究方法。在试验研究方面, 程远方等^[3]对煤岩进行真三轴水力压裂实验, 研究了多裂缝扩展的转换条件; 王磊等^[4]运用 TCHFSM-I 型大尺寸真三轴压裂渗流装置, 研究了超临界 CO_2 压裂过程; 文献^[5]分析对比多种不同压裂液的压裂过程, 发现超临界 CO_2 更能促进岩体形成复杂裂缝网络; 卢义玉等^[6]采用页岩露头与砂岩开展真三轴 SC-CO_2 与水力压裂对比试验, 发现 SC-CO_2 压裂较水力压裂起裂压力更低。多数试验研究受限于仪器尺寸与成本, 试件尺度较小, 研究具体工程还需要数值方法辅助。在数值研究方面, 熊俊杰等^[7]利用 RFPA 数值模拟软件构建钻孔水力压裂模型, 分析应力平衡状态对钻孔水力压裂的影响; Hamidi 等^[8]采用三维离散元模拟水力压裂裂缝的扩展情况, 并研究了流体速度等对裂缝扩展的影响等, 苏建政等^[9]基于位移间断边界元方法, 通过引入 Pen-Robinson 方程实现超临界 CO_2 压裂过程的模拟, 朱宝存等^[10]以 ANSYS 有限元数值模拟软件为平台, 研究地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响, 颜志丰等^[11]运用有限元数值模拟方法, 计算不同地应力条件下、裂缝处于不同位置时煤储层的破裂压力, 王新萍等^[12-13]采用扩展有限元算法, 基于 ABAQUS 对压裂裂缝进行数值模拟, 并得到较高的匹配性; 刘思敏等^[14]发展了用于计算含裂纹平面各向同性线弹性材料 T 应力的数值流形方法, 并进一步探讨了裂纹构型对 T 应力的影响规律。目前数值研究多基于有限元或离散元方法, 考虑三维连续-非连续全过程的煤层气压裂数值分析仍然较少。

本研究基于连续-非连续单元方法 (continuous-discontinuous element method, CDEM), 同时考虑了单元变形、裂缝开展、块体接触等真实过程, 通过引入应力与裂隙渗流耦合相关算法与模型, 研究煤层在多种应力条件下, 采用水及超临界 CO_2 作为压裂

液的裂缝开展过程及规律, 研究表明煤体裂缝主要平行于最大水平主应力方向开展。水力压裂下, 煤体的裂缝扩展较慢, 裂缝形态单一简单; 而超临界 CO_2 压裂条件下, 裂缝发展较完全, 次生裂缝多且形态复杂。随着地应力逐渐增大, 水力压裂煤体的流体体积逐渐减小, 超临界 CO_2 压裂煤体的流体体积先减小后增大; 水力压裂及超临界 CO_2 压裂下煤体的破裂度随着地应力的增加先减小后增大。相关研究成果可辅助工程人员改进压裂措施, 降低成本, 进一步提升开采效率。

1 数值方法及本构模型

本研究采用连续-非连续单元方法。该方法利用可变形块体单元表征材料变形特性, 同时利用单元间虚拟界面表征材料断裂, 同时可利用在模型中部设置圆盘来施加流体压力。

1.1 连续-非连续单元方法简介

连续-非连续单元法^[15-18]是一种拉格朗日系统下基于可断裂单元的动态显式求解算法, 通过拉格朗日能量系统建立严格的控制方程, 将有限元、块体离散元和颗粒离散元进行统一和耦合, 结合全局动态松弛算法来辅助显式迭代求解。拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_i} \right) + \left(\frac{\partial L}{\partial u_i} \right) = Q_i, \quad (1)$$

式中: v_i, u_i 为广义坐标, L 为拉格朗日系统的能量, Q_i 为非保守力所做的功。

CDEM 中的数值模型由块体及界面两部分构成, 示意图如图 1 所示, 实线为真实界面, 虚线为虚拟界面。块体由一个或多个有限元单元组成, 用于表征材料的连续特征。2 个块体间的公共边界为界面, 用于表征材料的非连续特征。界面包含真实界面及虚拟界面 2 个概念, 真实界面用于表征材料的交界面、断层、节理等真实的不连续面; 虚拟界面用于传递力学信息或为显式裂纹的扩展提供潜在通道。

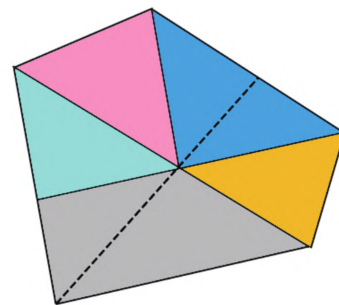


图 1 CDEM 中的数值模型构成
Fig. 1 Composition of numerical models in CDEM

在有限元单元上施加线弹性本构进行煤岩体的静力计算,通过在虚拟界面上施加脆性断裂的摩尔-库伦模型模拟煤岩体的塑性、损伤及断裂过程;并且从有限元单元中创建裂隙渗流网络模拟煤岩体压裂时的渗流过程,与固体力学模型进行耦合求解煤岩体压裂的过程。CDEM 方法将连续与非连续介质算法进行耦合,不仅可以模拟煤岩体的弹性塑性变形,还可以模拟煤岩体断裂过程,呈现煤层气压裂开采过程中压裂裂缝的扩展过程。

1.2 岩体弹性-损伤-断裂本构

本次模拟采用弹性-损伤-断裂本构,其中在每个有限元单元上施加线弹性本构,输入的参数包括密度、弹性模量、泊松比、抗拉强度和内摩擦角;在虚拟界面上施加损伤-断裂本构,输入的参数包括接触面法向刚度、切向刚度、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度、拉伸断裂能、剪切断裂能。

利用增量法表述的单元线弹性本构^[19]为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\Delta\theta\delta_{ij}, \\ \sigma_{ij}(\lambda_1) = \Delta\sigma_{ij} + \sigma_{ij}(\lambda_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量, $\Delta\sigma_{ij}$ 为增量应力张量, $\Delta\varepsilon_{ij}$ 为增量应变张量, $\Delta\theta$ 为增量体应变, K 为体积模量, G 为剪切模量, δ_{ij} 为 Kronecker 记号, λ_1 为下一时步, λ_0 为当前时步。

虚拟界面上采用考虑强度线性软化效应的最大拉应力模型及 Mohr-Coulomb 模型进行损伤断裂的计算。首先采用增量法计算虚拟界面上下一时步的法向及切向试探接触力

$$\begin{cases} F_n(\lambda_1) = F_n(\lambda_0) - k_n A_c \Delta du_n \\ F_s(\lambda_1) = F_s(\lambda_0) - k_s A_c \Delta du_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_n 、 F_s 为法向、切向接触力,N; k_n 、 k_s 为单面面积上法向、切向接触刚度,Pa/m; A_c 为虚拟界面的面积, m^2 ; Δdu_n 、 Δdu_s 为法向、切向相对位移增量,m。

对是否发生拉伸破坏进行判断,如果

$$-F_n(\lambda_1) \geq \sigma_t(\lambda_0) A_c,$$

则判断发生拉伸破坏,对法向接触力及抗拉强度进行修正:

$$\begin{aligned} F_n(\lambda_1) &= -\sigma_t(\lambda_0) A_c \\ \sigma_t(\lambda_1) &= -(\sigma_{t0})^2 \Delta du_n / (2G_{ft}) + \sigma_{t0}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: σ_{t0} 、 $\sigma_t(\lambda_0)$ 及 $\sigma_t(\lambda_1)$ 分别为初始时刻、本时刻及下一时刻虚拟界面上的抗拉强度,Pa; Δdu_n 为当前时刻虚拟界面上的法向相对位移,m; G_{ft} 为拉伸断裂能,Pa·m。

对是否发生剪切破坏进行判断,如果

$$F_s(\lambda_1) \geq F_n(\lambda_1) \tan \phi + c(\lambda_0) A_c,$$

则判断发生剪切破坏,对切向接触力及黏聚力进行修正:

$$\begin{aligned} F_s(\lambda_1) &= F_n(\lambda_1) \tan \phi + c(\lambda_0) A_c \\ c(\lambda_1) &= -(c_0)^2 \Delta du_s / (2G_{fs}) + c_0, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ϕ 为虚拟界面的内摩擦角; c_0 、 $c(\lambda_0)$ 及 $c(\lambda_1)$ 分别为初始时刻、本时刻及下一时刻虚拟界面上的黏聚力,Pa; Δdu_s 为当前时刻虚拟界面上的切向相对位移,m; G_{fs} 为剪切断裂能,Pa·m。

基于式(4)(5),可绘制出虚拟界面上法向及切向的本构曲线,具体如图 2 所示。

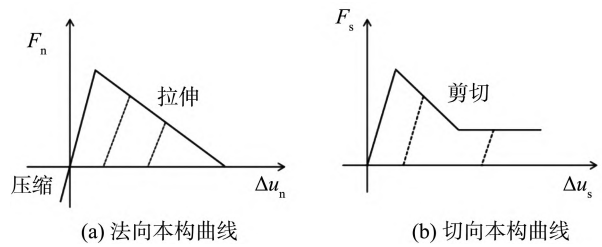


图 2 虚拟界面上的本构曲线
Fig.2 Constitutive curve at virtual interface

1.3 应力与裂隙渗流的耦合

应力与裂隙渗流之间的耦合,通过虚拟界面与裂隙渗流之间的相互影响来完成。裂隙渗流对虚拟界面施加裂隙压力,虚拟界面产生的变形影响裂隙开度,进而影响裂隙渗流。

裂隙渗流遵循达西定律:

$$v = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p, \quad (6)$$

式中: v 为裂隙渗流的流速,m/s; κ 为裂隙的渗透率, m^2 ; μ 为流体的动力黏度,Pa·s; p 为裂隙中的流体压力,Pa/m。

如图 3 所示,CDEM 中的节点包括连续节点(圆形)、离散节点(三角形)及混合节点(方形)等 3 类,连续节点被一个或多个有限元单元共用,不参与界面力的求解;离散节点仅属于一个有限元单元,参与界面力的求解;混合节点被多个有限元单元共用,参与界面力的求解。

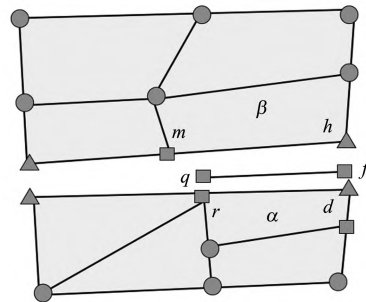


图 3 固体单元与裂隙单元耦合示意图
Fig.3 Coupling between solid element and fracture element

计算裂隙渗流与固体应力的耦合时,裂隙流体压力直接施加至与该裂隙相关的固体单元边界,两个共边界的固体单元间的张开量换算成裂隙开度及渗透系数,施加给裂隙渗流单元。如图3所示,固体单元 α 的边 rd 与固体单元 β 边 mh 相邻,中间夹着裂隙单元 qf 。

裂隙单元给固体单元4个节点 $m、h、r、d$ 的节点压力可表示为

$$\begin{cases} F_{mq} = A_m p_q \\ F_{hf} = A_h p_f \\ F_{rq} = A_r p_q \\ F_{df} = A_d p_f \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $F_{mq}、F_{hf}、F_{rq}、F_{df}$ 分别为4个节点的节点压力,N; $A_h、A_m、A_r、A_d$ 为节点面积; p_q 及 p_f 为裂隙单元 q 节点及 f 节点的节点压力,Pa。

固体边界位置调整后,将对裂隙单元的开度产生影响,可表示为

$$\begin{cases} b_q = b_{q0} + (u_m - u_r) \\ b_f = b_{f0} + (u_h - u_d) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $u_h、u_m、u_r、u_d$ 为4个节点沿着裂隙法向的位置,m; $b_{q0}、b_{f0}$ 为裂隙单元 $q、f$ 两个节点初始开度,m。

通过立方定律确定裂隙渗流中裂隙的渗透率。立方定律是描述表面光滑的平行板裂隙内的渗流运动的定律^[20-23]

$$Q = \frac{g w e^3}{12 \mu} J, \quad (9)$$

式中: Q 为通过裂隙的流量, m^3/s ; g 为自由落体加速度, m/s^2 ; w 为平行板间的间距,m; e 为水力等效开度,m; J 为量纲为1的水力梯度。

使用 GDEM 软件输入的流体渗透系数

$$k_p = \frac{\kappa}{\mu} = \frac{b^2}{12\mu}, \quad (10)$$

式中: k_p 为流体渗透系数, $m^2/(Pa \cdot s)$; b 为裂隙初始开度,m。

2 煤层压裂模拟

2.1 模型及力学参数

本次数值模拟考虑了煤层在多种应力条件下,采用水以及超临界二氧化碳作为压裂液的不同压裂过程。建立 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 立方体数值计算模型,如图4(a)所示。模型中部设置直径为 1.0 cm 的圆盘模拟注入孔;采用三角形网格对上述模型进行剖分,模型共包含 $28\ 932$ 个块体单元, 6050 个

节点,网格如图4(b)所示。

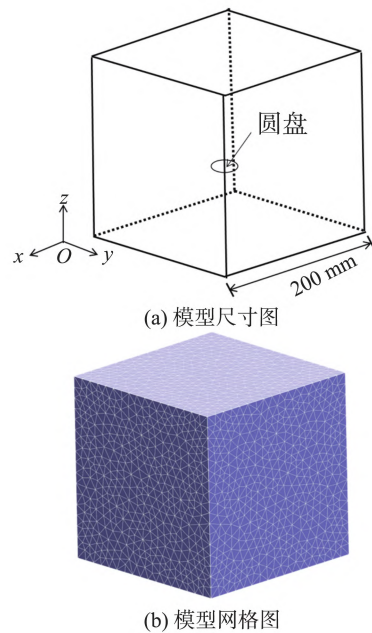


图4 计算模型及网格图

Fig.4 Computational models and grid diagrams

煤层的初始地应力如下: x 方向为 -11.3 MPa , y 方向为 -4.4 MPa , z 方向为 -5.9 MPa 。本次模拟采用的煤体本构为线弹性本构,拉伸断裂能和剪切断裂能设为 $0.01 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 。以山西沁水盆地某一煤矿参数为基础设置计算模型材料参数,包括煤层密度 ρ_1 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、黏聚力 c 、抗拉强度 σ_t 及内摩擦角 φ ,如表1所示。

表1 计算模型材料参数
Table 1 Model material parameters

$\rho_1/(kg \cdot m^{-3})$	E/GPa	μ	c/MPa	σ_t/MPa	$\varphi/(^\circ)$
1390	3.49	0.28	1.46	1.66	35

在虚拟界面上施加脆性断裂的摩尔-库伦模型本构,输入的参数与单元参数一致。

从单元中创建裂隙渗流网络并设置裂隙渗流计算参数,包括流体密度 ρ_2 、体积模量 K 、渗透系数 k_p 和裂隙初始开度 b ,渗透系数及裂隙初始开度根据式(10)计算,结果见表2。

表2 裂隙渗流参数
Table 2 Fissure seepage parameter

压裂方式	$\rho_2/(kg \cdot m^{-3})$	K/MPa	$k_p/(\mu m^2 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1})$	b/nm
水力压裂	1 000	10	0.06	26.8
SC-CO ₂ 压裂	467	10	0.06	26.8

水力压裂时圆盘处裂隙渗流网络的渗透系数为 $6.00 \mu m^2/(Pa \cdot s)$,裂隙初始开度为 268.0 nm 。超临界二氧化碳压裂时圆盘处裂隙渗流网络的渗透系数为 $149.00 \mu m^2/(Pa \cdot s)$,裂隙初始开度为

268.0 nm。

2.2 模拟方案及步骤

本次模拟煤层压裂采用定压注入,定压压力为15.0 MPa。模拟在不同水平地应力下,煤体压裂的裂缝扩展形态,通过调整水平向(x 方向)的地应力来实现,共调整5次,分别为15、12、9、6、3 MPa。对比水力压裂和超临界二氧化碳压裂两种压裂液下的煤体压裂效果。

数值计算共分为2个阶段:第1阶段为静力计算阶段,采用虚拟质量法,局部阻尼系数取0.8,获得模型在重力作用下的静态应力场,模型整体施加初始地应力;第2阶段为水力压裂阶段,将接触面模型切换到脆性断裂的摩尔-库伦模型,渗流计算时步取 1×10^{-6} ,求解迭代步数,为10 000,获得煤体裂隙渗流发展的过程。

3 模拟结果及分析

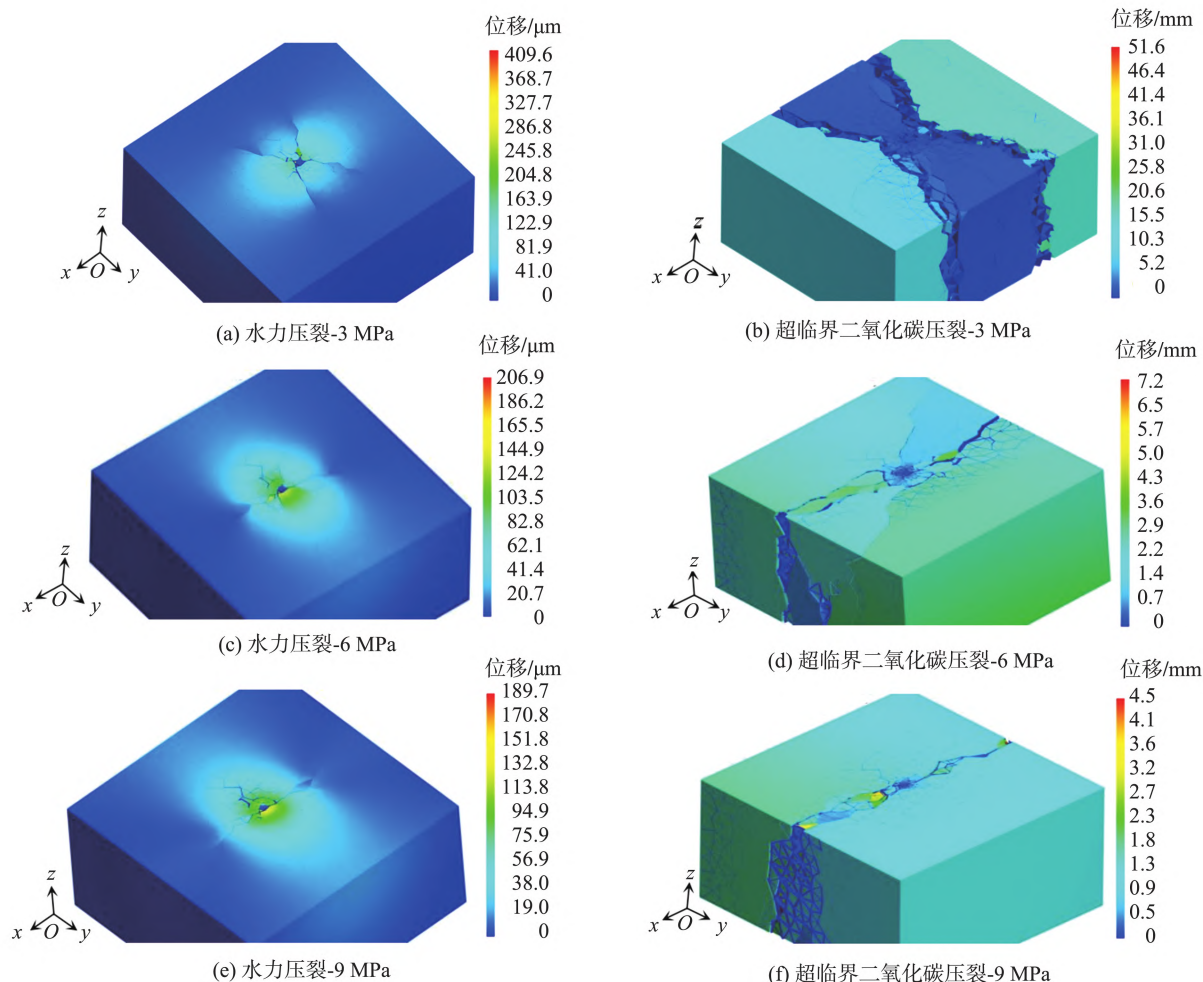
3.1 裂缝特征分析

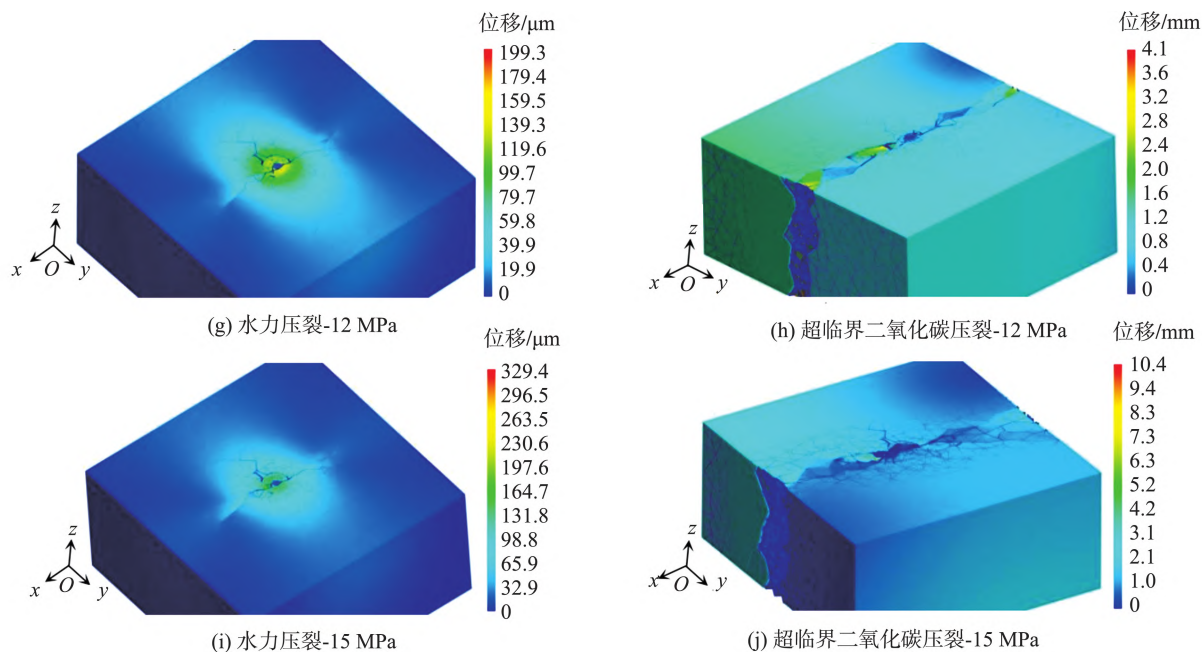
在煤体的中心平行于 xOy 面对煤体进行剖切,观察裂缝的内部形态及扩展过程,如图5所示为超

临界 CO_2 及水力压裂煤体在不同地应力下的裂缝扩展过程。

由图5可知,裂缝从煤体中心圆盘处开始起裂,沿着 $x(y)$ 方向展开向外展开,裂缝与 $y(x)$ 方向垂直,并有次生小裂缝向外扩展。煤体的裂缝扩展结果与孟召平等^[24]得出的结论相符合:水力压裂时,在煤储层中形成何种裂缝,取决于煤层中垂直应力、最大水平主应力和最小水平主应力三向主应力的相对大小。当水平地应力相差很近且均较小时,裂缝的扩展产生分叉(如图5(a)(b)所示),但分叉也是沿着最大主应力方向扩展的。总结来说,本次模拟计算的裂缝是垂直于最小水平主应力,平行于最大水平主应力开展的。

因为设置的是同样的渗流计算时步和迭代步数,所以模拟计算的时间是相同的,由图5可知,2种压裂液下煤体的裂缝特征有一定的差异:水力压裂煤体在不同地应力下裂缝的大致形态特征相同,裂缝刚开始扩展且扩展较慢,次生裂缝都是小裂缝,裂缝形态单一简单;随着地应力的增大,裂隙扩展范围先减小后增大。





注:水力压裂位移5倍显示

图5 不同压裂液及不同应力作用下的煤体裂缝形态

Fig.5 Fracture morphology of coal

超临界 CO₂ 压裂下煤体的裂缝延伸方向与水力压裂相似,但延伸程度更远,主裂缝发展较完全,沿延伸方向贯通整个煤面,呈长条状,裂缝数量多且形态复杂,煤体出现破裂现象;随着地应力的增大,裂隙扩展范围有先减小后增大的规律。

由图5可知,超临界 CO₂ 压裂所引发的裂隙比水力压裂的裂隙更加复杂,裂隙的发展更快、更远。这是因为超临界 CO₂ 的黏度小、易扩散、表面张力为0等物理性质使得它比水更易进入煤体的微裂隙中进行延伸扩展,因此超临界 CO₂ 压裂下的煤体主裂缝扩展更远,裂缝数目更多,裂缝网络也变得复杂、曲折。

3.2 裂缝开度

图6为z向地应力和y向地应力恒定、x方向地应力变换下煤体中心处裂隙开度与时间的关系曲线。

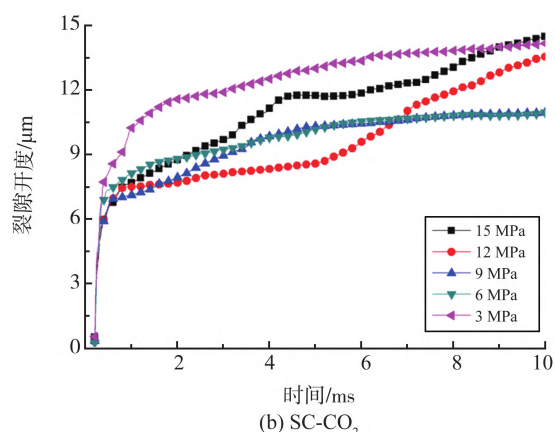
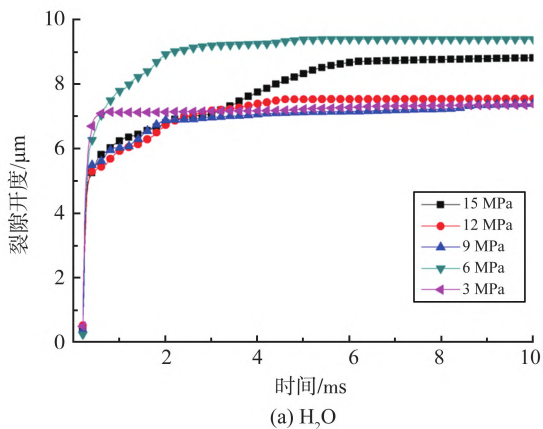


图6 裂隙开度与时间曲线

Fig.6 Curve of crack width and time

由图6可知,随着时间增加,水力压裂下裂隙开度快速增大至某特定值,随后继续增大,经过0.006 s时煤体中心处的裂缝开度达到最大,流体继续注入,裂缝开始由中心向外扩展,次生裂缝出现,主裂缝宽度变化不大;超临界 CO₂ 压裂时,不同地应力对应曲线变化趋势存在差异,裂隙开度持续增加。

图7为x方向地应力与注入点裂隙开度关系曲线。

图7显示,随着地应力逐渐增大,裂隙宽度与x向地应力之间相关性不明显;水力压裂时,裂隙开度随地应力增大先增大后减小再增大,而超临界 CO₂ 压裂下煤体的裂隙开度是先减小后增大。因煤层y方向地应力为-4.4 MPa,z方向地应力为-5.9 MPa,当x方向地应力为6.0 MPa时,裂隙开度

曲线表现出不同的规律:以 6.0 MPa 为分界线,6.0 MPa 之前,水力压裂和超临界 CO₂ 压裂下裂隙开度趋势相反;6.0 MPa 之后,随 x 方向地应力增大,裂隙开度先减小后增大。三向地应力相差不大的条件下,压裂液在煤体中开始扩展阶段的渗透路径没有明显倾向,导致该条件下裂隙开度发展较缓慢;当 z 向地应力、 y 向地应力一定,随 x 向地应力的增大,裂隙开度增幅变大,相同地应力下,超临界 CO₂ 压裂裂隙开度大于水力压裂,最大可达 2 倍。煤体的裂缝起裂、扩展具有不确定性,裂隙宽度不仅受地应力的影响,而且与压裂液等其他因素有关。

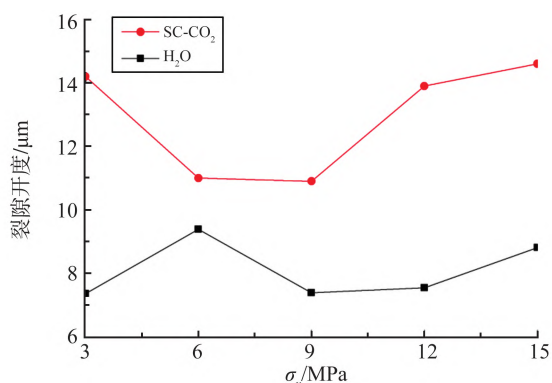


图 7 裂隙开度对比曲线
Fig.7 Crack width contrast curve

3.3 流体体积与时间、地应力曲线

图 8 所示为不同地应力下煤体内流体体积随时间变化曲线。

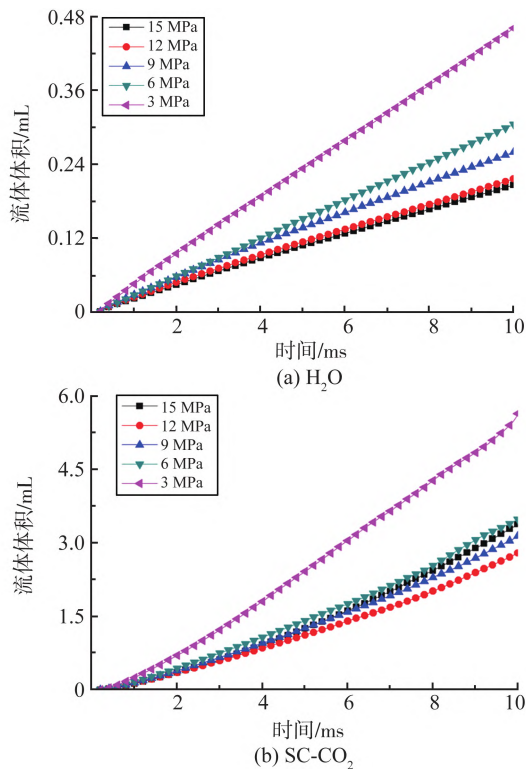


图 8 流体体积与时间曲线
Fig.8 The relationship between fluid volume and time

由图 8 可知,随着时间的增加,流体体积逐渐增加。 x 地应力为 3.0 MPa 时煤体内流体体积增长速度最快,体积最大。 x 地应力为 3.0 MPa 时,水力压裂下煤体的流体体积达到 0.47 mL,超临界 CO₂ 压裂下煤体的流体体积曲线有变缓的趋势,最终为 6.00 mL,是水力压裂的 12 倍多。

图 9 所示为不同压裂液下煤体内流体体积与地应力之间的关系。

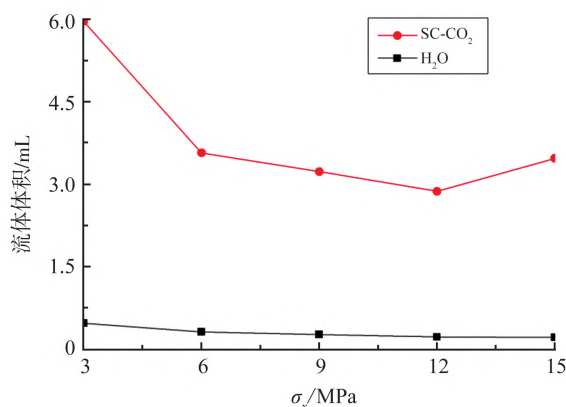


图 9 流体体积对比曲线
Fig.9 Fluid volume contrast curve

由图 9 可知,随着地应力的逐渐增大,水力压裂煤体的流体体积逐渐减小,由 0.47 mL 逐渐减少至 0.21 mL,变化较小。随着地应力的逐渐增大,超临界 CO₂ 压裂煤体的流体体积先减小后增大, x 方向地应力是 3.0 MPa 时流体体积为 6.00 mL,在 x 向地应力 12.0 MPa 时流体体积减小到 2.90 mL,随后增大到 3.50 mL,变化较大。整体来看,超临界 CO₂ 压裂下煤体的流体体积多于水力压裂,可达水力压裂流体体积的 12~13 倍。

3.4 破裂度变化

破裂度定义为数值计算中发生破裂的虚拟界面面积与总虚拟界面面积的比。煤体破裂度随时间的变化如图 10 所示。

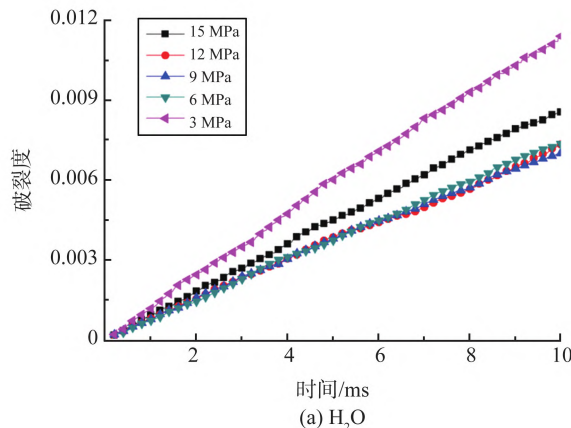


图 10 破裂度随时间变化曲线
(a) H₂O

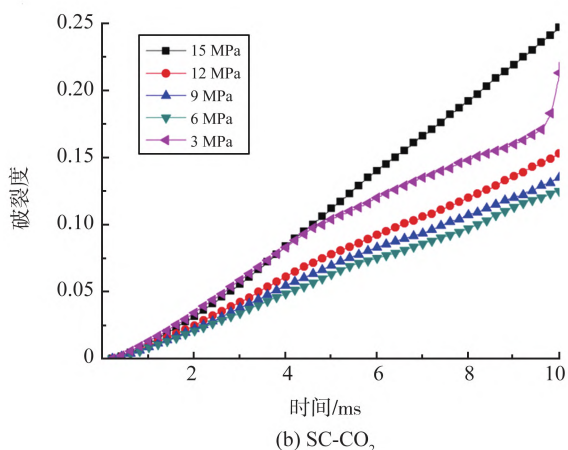


图10 破裂度与时间曲线

Fig.10 The relationship between fracture degree and time

由图10可得,水力压裂过程中煤体的破裂度在不同地应力下的变化过程类似,随着时间发展,破裂度持续增加,计算完成时的破裂度在地应力为3.0 MPa时最大,达到1.2%。超临界CO₂压裂下的煤体破裂度在不同地应力下的增长趋势也大致相同,除3.0 MPa地应力下的曲线有些许不同;破裂度随地应力增大而增大,最大为25.3%。

图11展示了不同压裂液条件下煤体破裂度与地应力之间的关系。

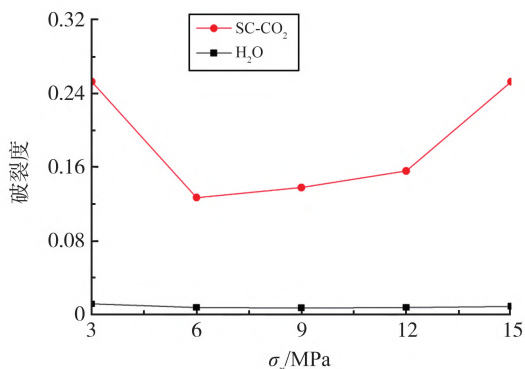


图11 破裂度对比曲线

Fig.11 Fracture degree contrast curve

由图11可知,水力压裂下煤体的破裂度随着地应力的增加先减小后增大,首先在 x 向地应力为3.0 MPa时破裂度为1.2%,在 x 向地应力为9.0 MPa时减小到0.7%,随后在 x 向地应力为15.0 MPa时增大到0.9%,变化较小。超临界CO₂压裂下,随着地应力的逐渐增大,煤体的破裂度先逐渐减小至13.8%,随后逐渐增加至25.3%。超临界CO₂压裂煤体的破裂度约是水力压裂煤体破裂度的20倍。

4 结论

本研究完成了如下工作:

(1)在连续-非连续单元方法中引入脆性断裂的Mohr-Coulomb模型、裂隙渗流与应力耦合模型,实现了水及超临界CO₂作为压裂液压裂煤层的模拟计算,对煤层在不同压裂液及不同应力条件下的裂缝扩展情况进行了分析,得出以下结论:煤体裂缝从煤体中心圆盘处起裂,沿着最大水平主应力方向,垂直于最小水平主应力的方向展开。水力压裂煤体的裂缝形态单一简单,次生裂缝都是小裂缝;而超临界CO₂压裂裂缝发展较完全,贯通整个煤面,裂缝数量多且形态复杂,次生裂缝多。

(2)裂隙开度与 x 向地应力之间无明显线性关系。相同地应力下,超临界CO₂压裂裂隙开度大于水力压裂,最大可达2倍。煤体的裂缝起裂、扩展存在不确定性,裂隙开度不仅受地应力的影响,而且与压裂液等其他因素有关。

(3)对煤层在不同压裂液及不同应力条件下的压裂结果进行分析,得出以下结论:随着地应力的逐渐增大,水力压裂煤体的流体体积逐渐减小,超临界CO₂压裂煤体的流体体积先减小后增大,变化较大,整体来看,超临界CO₂压裂下煤体的流体体积为水力压裂的12~13倍。水力压裂及超临界CO₂压裂下煤体的随着地应力的增加先减小后增大。超临界CO₂压裂煤体的破裂度约是水力压裂煤体的20倍。

参考文献:

- [1] 庚劭,陈浩,陈艳鹏,等.第4轮全国煤层气资源评价方法及结果[J].煤炭科学技术,2018,46(6):64-68.
GENG Meng, CHEN Hao, CHEN Yanpeng, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6):64-68.
- [2] 刘丹璐.煤层气水力压裂工艺新进展[J].石化技术,2019,26(9):228-229.
LIU Danlu. New progress in hydraulic fracturing of coal bed methane[J]. Petrochemical Technology, 2019, 26(9):228-229.
- [3] 程远方,徐太双,吴百烈,等.煤岩水力压裂裂缝形态实验研究[J].天然气地球科学,2013,24(1):134-137.
CHENG Yuanfang, XU Taishuang, WU Bailie, et al. Experimental study on the hydraulic fractures' morphology of coal bed[J]. Natural Gas Geo Science, 2013, 24(1):134-137.
- [4] 王磊,梁卫国.超临界CO₂/清水压裂煤体起裂和裂缝扩展试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):2680-2689.

- WANG Lei, LIANG Weiguo. Experimental study on fracture initiation and growth in coal using hydraulic fracturing with supercritical CO₂ and normal water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (Suppl.1):2680-2689.
- [5] ZOU Y S, LI N, MA X F, et al. Experimental study on the growth behavior of supercritical CO₂-induced fractures in a layered tight sandstone formation [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 49:145-156.
- [6] 卢义玉,廖引,汤积仁,等. 页岩超临界 CO₂ 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(1):175-180.
- LU Yiyu, LIAO Yin, TANG Jiren, et al. Experimental study on fracture initiation pressure and morphology in shale using supercritical CO₂ fracturing [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):175-180.
- [7] 熊俊杰,杨程涛,王洪盘,等. 不同扩孔半径下的钻孔水力压裂数值模拟研究[J]. 能源与环保,2019,41(1):27-31.
- XIONG Junjie, YANG Chengtao, WANG Hongpan, et al. Research on numerical simulation of hydraulic fracturing with boreholes in different radius of reaming[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(1):27-31.
- [8] HAMIDI F, MORTAZAVI A. Three dimensional modeling of hydraulic fracturing process in oil reservoirs [C]//Proceedings of 46th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago, USA: [s. n.], 2012: 24-27.
- [9] 苏建政,李凤霞,周彤. 页岩储层超临界二氧化碳压裂裂缝形态研究[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):616-625.
- SU Jianzheng, LI Fengxia, ZHOU Tong. Hydraulic fracture propagation behaviours and geometry under supercritical CO₂ fracturing in shale reservoirs[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40(3):616-625.
- [10] 朱宝存,唐书恒,颜志丰,等. 地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1199-1202.
- ZHU Baocun, TANG Shuheng, YAN Zhifeng, et al. Effect of crustal stresses and natural fractures on fracture pressure of coal reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9):1199-1202.
- [11] 颜志丰,据宜文,唐书恒,等. 沁水盆地南部煤层气储层压裂过程数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2013,56(5):1734-1744.
- YAN Zhifeng, JU Yiwen, TANG Shuheng, et al. Numerical simulation study of fracturing process in coalbed methane reservoirs in southern Qinshui basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5):1734-1744.
- [12] 王新萍,张起贵,张润旭. 基于扩展有限元算法的裂缝转向扩展轨迹预测[J]. 燕山大学学报,2020,44(2):182-188.
- WANG Xinping, ZHANG Qigui, ZHANG Runxu. Trajectory prediction of crack turning propagation based on extended finite element algorithm [J]. Journal of Yanshan University, 2020, 44(2):182-188.
- [13] 郭辉,王新萍. 低渗透煤层转向压裂裂缝扩展规律的扩展有限元模拟研究[J]. 煤矿安全,2020,51(11):189-194.
- GUO Hui, WANG Xinping. Finite element simulation of fracture propagation path during oriented perforation steering fracturing in low permeability coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11):189-194.
- [14] 刘思敏,张慧华,韩尚宇,等. 基于数值流形方法和交互积分法的平面裂纹 T 应力求解[J]. 应用力学学报,2021,38(1):113-120.
- LIU Simin, ZHANG Huihua, HAN Shangyu, et al. Calculation of T-stress for planar cracks with the numerical manifold method and the interaction integral method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(1):113-120.
- [15] LI S H, WANG J G, LIU B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4):331-348.
- [16] WANG Y N, ZHAO M H, LI S H, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method[J]. Science China Technological Sciences, 2005, 48(Suppl.1):95-106.
- [17] 冯春,李世海,郝卫红,等. 基于 CDEM 的钻地弹侵彻爆炸全过程数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2017,36(13):11-18.
- FENG Chun, LI Shihai, HAO Weihong, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13):11-18.
- [18] FENG C, LI S H, LIU X H, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(1):26-35.
- [19] 冯春,李世海,郑炳旭,等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2019,39(2):110-120.
- FENG Chun, LI Shihai, ZHENG Bingxu, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in an open-pit mine based on CDEM [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2):110-120.

- [20] ЖОМИЗЕ М. Фильтрация в трещиноватых породах [М]. Москва, Российская Федерация: Государственное энергетическое издательство, 1951;1-120.
- [21] РОММ Е С. Фильтрционные свойства трещиноватых горных пород [М]. Москва, Российская Федерация: Издательство Недр, 1966;1-44.
- [22] SNOW D. Anisotropic permeability of fractured media [J]. Water Resources Research, 1969, 5 (6): 1273-1289.
- [23] 蒋宇静,李博,王刚,等.岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展 [J].岩石力学与工程学报,2008,27(12): 2377-2386.
- JIANG Yujing, LI Bo, WANG Gang, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2377-2386.
- [24] 孟召平,王宇恒,张昆,等.沁水盆地南部煤层水力压裂裂缝及地应力方向分析 [J].煤炭科学技术,2019,47(10):216-222.
- MENG Zhaoping, WANG Yuheng, ZHANG Kun, et al. Analysis of hydraulic fracturing cracks for coal reservoirs and in-situ stress direction in Southern Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10):216-222.

(编辑:郭少华)

(上接第 118 页)

- [11] KANDULA S S V, ABANTO-BUENO J, GEUBELLE P H, et al. Cohesive modeling of dynamic fracture in functionally graded materials[J]. International Journal of Fracture, 2005, 132(3):275-296.
- [12] PARK K, PAULINO G H, ROESLER J. Cohesive fracture model for functionally graded fiber reinforced concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2010, 40(6):956-965.
- [13] TIJSSENS M G A, SLUYS B L J, GIESSEN E V D. Numerical simulation of quasi-brittle fracture using damaging cohesive surfaces [J]. European Journal of Mechanics, 2000, 19(5):761-779.
- [14] MUNJIZA A, JOHN N W M. Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(2):281-295.
- [15] GUO L, XIANG J, LATHAM J P, et al. A numerical investigation of mesh sensitivity for a new three-dimensional fracture model within the combined finite-discrete element method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 151:70-91.
- [16] ZHOU F, MOLINARI J F. Dynamic crack propagation with cohesive elements: a methodology to address mesh dependency [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(1):2000-2006.

(编辑:郭少华)