

浅埋煤层开采诱发地下水渗流过程

李婧¹ 张伟俊² 李贽鹏¹ 冯春^{3,4} 张一鸣^{1*}

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 山东建勘集团有限公司, 山东 济南 250031; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 4. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 针对榆神矿区覆岩层的红土层遇水展现出的裂隙张开-弥合效应, 采用连续-非连续单元法(continuous-discontinuous element method, CDEM) 研究表征黏性土层塑性变形特征的力学本构, 对该地区黏土层中裂隙张开-弥合过程重现, 并对浅层煤层开采诱发的水-力渗流过程展开分析。结果表明, 红土层遇水膨胀, 对周围土体产生挤压作用, 部分裂缝会发生弥合现象, 破裂度和导水裂隙带减少, 土体应变增大, 整体位移上升, 模拟结果的导水裂隙带高度与经验公式对比, 相对误差为4%。与页岩水力压裂试验结果对比, 裂缝发育面积、位置和厚度基本一致, 验证了该模拟的有效性。

关键词: 连续-非连续单元法; 水-力耦合; 裂隙扩展; 裂隙弥合; 遇水膨胀

中图分类号: TU45 文献标志码: A

引用格式: 李婧, 张伟俊, 李贽鹏, 等. 浅埋煤层开采诱发地下水渗流过程研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(3): 78-87.

LI Jing, ZHANG Weijun, LI Yunpeng, et al. Groundwater seepage induced by shallow coal mining[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(3): 78-87.

Groundwater seepage induced by shallow coal mining

LI Jing¹, ZHANG Weijun², LI Yunpeng¹, FENG Chun^{3,4}, ZHANG Yiming^{1*}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Shandong Construction and Prospecting Group Co., Ltd., Jinan 250031, Shandong, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The red soil layer of overlying strata in Yushen Mining Area showed the fissure opening-healing effect when exposed to water. The continuous-discontinuous element method (CDEM) was used to develop the mechanical constitutive characterization of the plastic deformation characteristics of cohesive soil layer, and recreate the opening and closing process in the clay layers of the region. The process of hydraulic seepage induced by shallow coal mining was analyzed. The results showed that the red soil expanded when water hit it, the surrounding soil was squeezed, and some cracks were healed. The fracture degree and water-conducting fracture zone decreased, and the bulk strain of soil increased and the overall displacement increased. The height of the simulated water-conducting fracture zone was compared with that of the empirical formula, and the relative error was 4%. Compared with the experimental results of shale hydraulic fracturing, the developed fracture area, location and thickness were basically the same, which verified the effectiveness of the simulation.

Keywords: CDEM; water-force coupling; crack extension; crack bridging; water expansion

0 引言

煤炭是我国当前的主要能源之一。陕北侏罗纪煤田是我国重要的煤层储藏地之一,其埋藏较

浅,构造简单,便于开采。然而,随着煤层开采规模不断扩大,涌现了一系列环境安全问题,其中以地下水流失及顶板涌水问题较为突出。对采煤过程诱发渗流过程展开研究可以辅助优化设计,减少地下水流失,同时提升结构安全性。采煤过程诱发渗

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809069); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505504)

第一作者简介: 李婧(1998—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail: 752721089@qq.com

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

流是典型的涉及连续-非连续演化的水-力耦合过程。

前人对裂隙扩展的水力耦合过程研究主要包括理论计算、模拟计算和试验分析。例如,魏久传等^[1]通过相似材料和数值模拟得出煤层采厚对导水裂隙带的发育高度有着密切联系,呈现二次项关系;李树刚等^[2]通过模拟与理论相结合发现煤层采高与导水裂隙带高度呈二次正相关关系;许家林等^[3]通过理论分析关键层的位置可以预计出不同煤层采厚导水裂隙带发育高度,有利于顶板突水灾害的研究;闫立君^[4]通过上覆岩层力学性质和采煤工艺对导水裂隙的分布形态展开理论研究,对提高保水采煤的效率有很大帮助;文献[5-9]提出了关键层理论,为研究采矿场中覆岩移动规律提出了理论基础;刘治国等^[10]通过试验对榆神矿区红土层矿物成分及力学性质展开研究,发现其具有采动自愈性的特征;范立民等^[11]论述榆林神矿区红土层具有很好的隔水能力,为保水开采提供了有利工程地质因素;赵鑫^[12]通过数值模拟对煤层顶板裂隙展开研究发现裂隙呈现扩张并且发育位置发生不断转移的动态演化过程;樊振丽等^[13]通过相似材料模拟试验指出由于榆神矿区黏性矿物具有很好的膨胀性和塑性构成泥盖效应,进而使裂隙在开采过程中发生自行闭合现象;文献[14-15]基于分形理论得出渗透系数与裂隙扩展有着紧密的联系,对岩体的周期性垮落和裂隙的动态发育现象给出了很好的解释,并且基于煤层赋存条件,发现岩层的隔水性取决于“上行裂隙”和“下行裂隙”的贯通特性,从而为岩层提供了隔水性判定条件。

上述研究可以看出,上覆岩层的变形运动和裂隙的发育状况与保水开采联系十分密切。基于对榆神矿区工程地质特点的研究,可以得出静乐组红土层对隔水性有很大的影响,理论计算对于解决复杂地质问题具有局限性,物理试验方法对环境设备要求较高,并且耗时较长。榆神矿区红土层遇水膨胀发生裂隙张开-弥合,文献[16-17]研究了黏性土层塑性变形的力学本构,重现了裂隙弥合过程,并针对上覆岩层变形引发裂隙扩展现象展开研究。本研究以榆神矿区郝家梁煤矿为研究背景,在水-力耦合作用下红土层遇水膨胀产生裂隙弥合效应,从而模拟出浅层煤开采诱发的水-力渗流过程,弥合后破裂度和导水裂隙减少,可辅助研究人员优化开采方案,减少地下水流失,较好地实现保水采煤的目的。

1 数值方法及本构模型

1.1 连续-非连续单元法概述

连续-非连续单元法^[18]是基于式(1)所示的拉格朗日方程将有限元和离散元进行耦合的显式迭代数值方法:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{u}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i, \quad (1)$$

式中: Q_i 为系统的非保守力, L 为拉格朗日函数能量, u_i 为单元节点位移, \dot{u}_i 为节点速度。

CDEM 中的数值模型由块体单元和接触面单元两部分构成,示意图如图1所示。块体单元表征材料的弹性、损伤等连续性特性,接触面单元表征材料的破坏断裂等非连续特征,进而更准确的描述研究对象的破化过程,接触面单元之间引入虚拟弹簧进行力学信息的传递,通过设置弹簧的断裂准则和力学参数实现多裂缝的萌生、发育、扩展交叉过程的模拟,整个分析过程通过设置不平衡率对系统进行力的平衡求解计算。

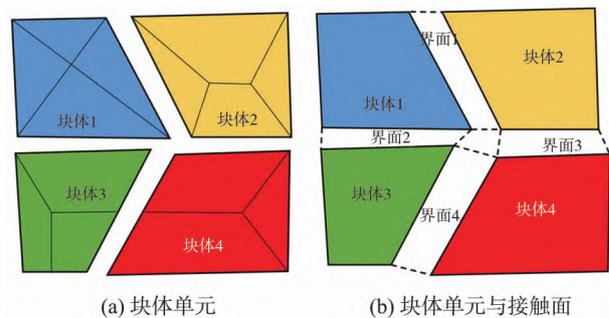


图1 CDEM 结构组成

Fig.1 Structural composition of CDEM

1.2 水-力耦合

模型包含如下基本假设:(1)流体微可压;(2)岩体破裂后,流体流入产生水压;(3)流体压力衰减到一定值后,不再衰减。

水-力耦合^[19]通过裂隙渗流场和虚拟界面的相互作用来实现,施加水压力边界,水压对裂隙面会产生扩张作用,岩层应力场产生变化,影响裂隙开度,进而引起渗流特性的改变。

施加水压力边界条件后,节点产生水压力后,与邻近节点压力产生压力梯度,选取梯度最大的节点进行压力传递,流体压力结构分布示意图如图2所示。

当节点饱和度等于1时,产生节点水压 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$,饱和度小于1时,产生的节点水压 $p_0(t)$ 不参与计算,节点之间水压力传递遵循

$$k = \frac{p_2(t) - p_1(t)}{d}, \quad (2)$$

式中: k 为压力梯度; $p_1(t)$ 为初始水压力, Pa; $p_2(t)$ 为下一时刻水压力, Pa; d 为节点之间的扩散距离, m。

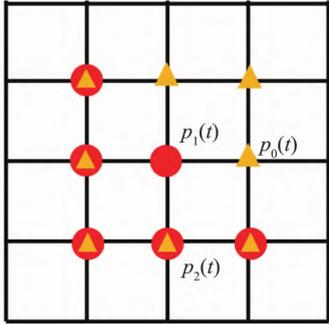


图2 流体压力示意图

Fig.2 Schematic diagram of fluid pressure

水压力损失考虑流体在扩散过程由于摩擦引起压力损失, 水压力

$$p_2(t) = p_1(t) - \frac{2d\sigma_s}{w}, \quad (3)$$

式中: σ_s 为剪切强度, Pa; w 为裂隙开度, m。

水压力损失变化示意图具体如图3所示。

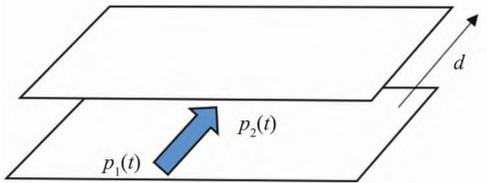


图3 压力变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of pressure change

水压力在扩散过程中, 当产生裂隙破坏时, 流体流入产生压力, 同时压力直接施加在与裂隙单元相关的虚拟界面上, 产生固体节点压力。如图4所示, 固体单元和裂隙单元存在耦合关系, 固体单元 A 边 cd 和相邻固体单元 B 边 ef 存在裂隙单元 ij 。

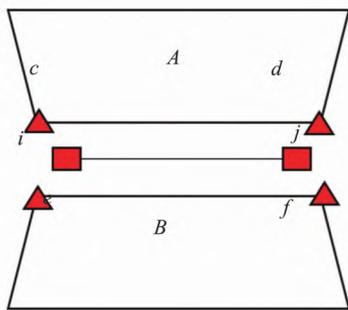


图4 裂隙单元和固体单元耦合示意图

Fig.4 Coupling diagram of crack element and solid element

裂隙单元对固体单元产生节点压力, 固体单元 c 、 d 、 e 、 f 的节点压力为:

$$\begin{cases} F_{ci} = A_c p_i \\ F_{dj} = A_d p_j \\ F_{ei} = A_e p_i \\ F_{fj} = A_f p_j \end{cases}, \quad (4)$$

式中: F_{ci} 、 F_{dj} 、 F_{ei} 、 F_{fj} 为固体单元的节点压力, N; A_c 、 A_d 、 A_e 、 A_f 为四个节点的节点面积, m^2 ; p_i 、 p_j 为裂隙单元的节点压力, Pa。

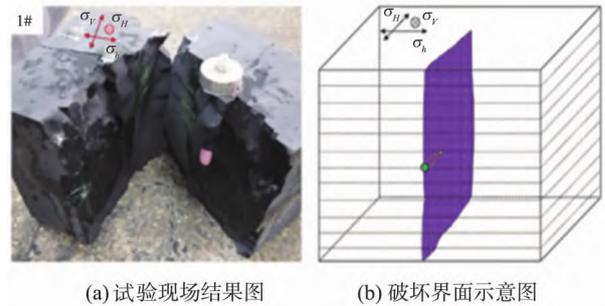
固体单元位置改变后, 会对裂隙单元的开度和渗透系数产生影响, 裂隙节点改变后的裂隙开度为:

$$\begin{cases} a_i = a_{i0} + (u_c - u_e) \\ a_j = a_{j0} + (u_d - u_f) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: u_c 、 u_d 、 u_e 、 u_f 为裂隙节点法向位移, m; a_{i0} 、 a_{j0} 为裂隙单元节点的初始开度, m。渗透系数和裂隙开度符合立方定律。

1.3 算法验证

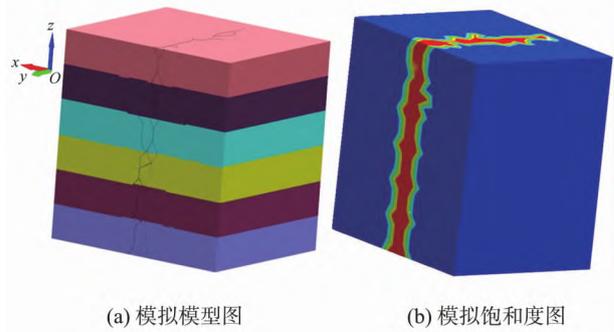
为了对水-力耦合算法有效性进行验证, 将层状页岩的水力压裂试验^[20]与模拟结果进行对比, 页岩水力压裂试验图如图5所示, 根据试验建立 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的模型, 页岩水力压裂模拟结果如图6所示, 试验参数见表1。



(a) 试验现场结果图 (b) 破坏界面示意图

图5 页岩水力压裂试验示意图

Fig.5 Shale hydraulic fracturing test results



(a) 模拟模型图 (b) 模拟饱和度图

图6 页岩水力压裂模拟结果

Fig.6 Simulation results of shale hydraulic fracturing

表1 页岩水力压裂试验参数

Table 1 Shale hydraulic fracturing test parameters

弹性模量/ GPa	泊松 比	垂直地 应力/MPa	最大水平 地应力/MPa	最小水平 地应力/MPa
32.44	0.23	18	25	6

模型参数根据试验参数设置,为了保证地应力的平衡加载,更好的模拟试验现场的地应力状态,分阶段加载应力边界条件,采用虚拟质量法:第一阶段,在三个方向施加 6 MPa 应力;第二阶段,施加 12 MPa 最大水平应力和垂直应力;第三阶段,施加 7 MPa 最大水平应力,从而在三个方向实现施加等效地应力边界条件并分别求解至平衡稳定,模拟实际地应力状况;由于试验过程中对页岩顶部中间位置进行注水压裂,第四阶段为水力压裂阶段,在模型中心位置施加 30 MPa 恒定水压,更准确的模拟试验工况,获得页岩水力压裂裂缝扩展情况。

对页岩进行水力压裂试验:在地应力和水压影响下,裂缝直接穿过层理面,形成了简单的天然裂缝几何形状,图 5 为页岩水力压裂试验结果,图 5(a) 为页岩在水压作用下破坏情况,图 5(b) 为压裂裂缝的几何形状示意图。图 6(b) 为页岩水力压裂模拟结果,图 6(a) 为数值模拟模型图,图 6(b) 为模拟饱和度图。图 7 为基于水-力耦合算法对页岩进行水力压裂数值模拟形成的基本垂直于层理面的裂缝扩展图,进行表征页岩压裂后形成天然裂缝的几何形态,通过将图 5 的裂缝扩展形态和图 6、图 7 的裂缝形态模拟结果进行对比发现,图 6 水力裂缝扩展位置与图 5 扩展位置一致,都处于中部位置;图 7 模拟所示裂缝扩展形态与图 5 试验压裂截面对比,裂缝扩展面积基本贯穿于整个中部截面,与试验结果水力裂缝扩展面积相符合,从而验证模拟算法的有效性。

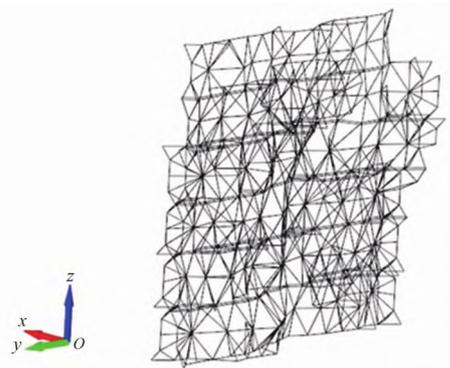


图7 页岩压裂裂隙模拟结果

Fig.7 Simulation results of shale fracturing fractures

由图 5 试验结果和图 6、图 7 模拟结果对比可知,采用水-力耦合对页岩进行水力压裂模拟,岩石破裂情况与试验结果十分相似,由图 6 可知裂缝在水压作用下不断进行扩展,较好的模拟了页岩裂隙的竖向扩展情况,验证了该水-力耦合算法对裂缝发育扩展模拟的有效性。

1.4 裂隙弥合力学模型

研究对象为静乐组红土层,膨胀量与含水量呈反比,土体水量达到饱和状态,膨胀量不再增长^[21],假设黏性红土层满足以下假设:

(1) 吸水速率不是一直增加,呈现先快后慢逐渐折减。

(2) 对于不同类型的黏土,存在最大吸水量,即达到土体的饱和吸水量。

吸水过程的速率和最大吸水量不随渗流压力变化而改变。

基于以上假设,研究对象的体积单元吸水体积遵从

$$V_t = V_{e-\max} (1 - e^{-\frac{t}{s}}) \quad (6)$$

式中: V_t 单元吸水体积 μm^3 ; $V_{e-\max}$ 为研究对象单元的最大吸水体积 μm^3 ; t 为研究对象单元的累计吸水时间 s ; ΔT 为达到 63.5% 吸水体积所对应的时间 s 。

原本张开的裂缝存在一定的裂隙宽度,当膨胀量大于裂隙宽度,裂隙周围土层塑性铰接区会发生相互挤压,当挤压持续时间大于设定值,在塑性作用下会发生裂隙弥合,弥合后土层抗拉强度恢复。

在施加流量边界后,以自由水的形式充满在孔隙单元中,在充满孔隙后,接着以自由水的形式向周围基质渗透吸水,静乐组红土含有丰富的蒙脱石、伊利石等矿物质^[22],对水的敏感性很强,具有很好的吸水膨胀的性质,吸水后具有很好的可塑性,导致单元体应变增大,伴随着膨胀后单元应力的改变,定义膨胀系数功能性函数,可供用户根据研究对象的性质进行定义,并通过与饱和度呈二次函数关系的膨胀校正系数进行修正。

t 时刻研究对象对应的单元体应变增量

$$\Delta \varepsilon_{e-\text{sat}} = k_r k_d \frac{V_t}{V_0} \quad (7)$$

式中: $\Delta \varepsilon_{e-\text{sat}}$ 为 t 时刻单元体应变增量; k_d 为膨胀系数; V_0 为研究对象单元体积 μm^3 ; k_r 为膨胀校正系数 $k_r = s^2(3-2s)$,其中 s 为水的饱和度。

将研究对象遇水膨胀产生的体应变增量分配给单元应力张量

$$\sigma_{ij} = \sigma_{e-ij} + \frac{1}{3} k \Delta \varepsilon_{e-\text{sat}}, \quad i=j \quad (8)$$

式中: σ_{ij} 为研究对象遇水膨胀后的应力, σ_{e-ij} 为研究对象单元初始应力, k 为体积模量。

土体遇水软化,强度衰减,单元与单元之间通过弹簧连接,每隔特定时间判断弹簧的应力状态,当弹簧受到压应力,记录压应力持续时间,当持续时间大于时间系数时,使弹簧状态恢复,即裂隙发生闭合,强度发生折减,折减后的抗拉强度

$$T=rT_0, \quad (9)$$

式中: r 为强度恢复系数; T_0 为弹簧的初始抗拉强度, Pa。

基于连续有限元法和非连续离散元法耦合, 渗流节点压力来自微流体可压, 将节点压力转化成单元压力梯度, 进而转化为流量场, 计算节点饱和度并引入膨胀系数、压力持续时间系数、强度恢复系数等功能性能命令, 进而展现裂隙弥合动态过程的模拟。

2 煤层开采诱发地下水下渗数值模拟

2.1 工程背景

郝家梁煤矿位于陕北侏罗纪煤田榆神矿区, 工作面宽 3 350 m, 长 3 900 m, 煤层埋深为 130 ~ 180 m, 埋藏较浅, 厚度约为 8 m, 直接顶为延安组砂

泥岩互层, 平均厚度为 10 m, 基本顶为基岩风化带, 厚度为 20~30 m, 离石组黄土层和静乐组红土共同构成“泥盖层”, 平均厚度分别为 73 m 和 53.13 m, 静乐组红土湿软干硬, 胶结性好, 具有很好的隔水性, 其中离石组黄土层和松散砂层内含有较丰富的水。

基于上述工作面概况建立模型, 模型长 600 m, 高 194 m, 模型层编号从上至下依次为 1~7, 矿区材料参数见表 2, 采用 Gmesh 进行网格剖分, 网格划分呈现从下至上, 网格尺寸依次增大, 中间开采区部分网格密, 两边稀疏的特点, 使计算模型结果更加准确, 共包含 13 849 个节点, 27 255 个单元。煤层切眼位置距离模型左侧 120 m, 每次开挖 5 m, 开挖 72 步后停止开挖。为了减弱煤层边界效应, 煤层切眼位置距离模型左侧 120 m, 每次开挖 5 m, 开挖 72 步后停止开采, 如图 8 所示。

表 2 矿区各层材料参数
Table 2 Material parameters of each layer in mining area

层号	材料名称	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / MPa	抗拉强度 / MPa	内摩擦角 / ($^\circ$)	厚度 / m
1	基岩	2 500	2 000	0.25	6.00	3.00	35.0	10
2	煤层	1 400	400	0.32	1.34	0.20	42.5	8
3	延安组砂岩互层	2 300	20	0.25	1.20	0.40	30.0	10
4	基岩风化层	2 500	6 000	0.28	3.00	1.50	25.0	25
5	静乐组红土层	2 040	20	0.30	0.07	0.03	29.0	53
6	离石组黄土层	1 770	20	0.35	0.06	0.03	30.0	73
7	松散砂层	1 850	30	0.30	0.15	0.10	30.0	15

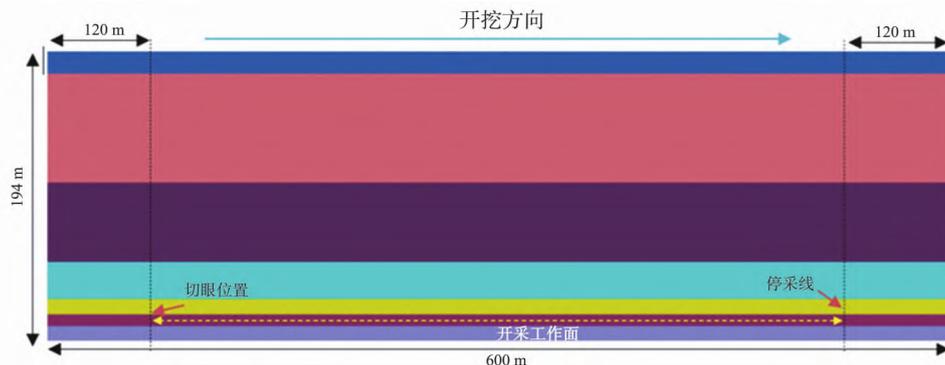


图 8 计算模型图

Fig.8 Calculation model diagram

数值模拟包括三个阶段: 第一阶段为弹性阶段, 材料左右两侧和底部施加边界法向约束条件, 由于模型上部赋存地下水, 不对其施加约束边界条件, 材料模型本构和虚拟界面采用线弹性材料本构; 第二阶段为塑性阶段, 材料模型本构采用 Mohr-Coulomb 模型本构, 虚拟界面采用 Mohr-Coulomb 的应变软化模型本构, 采用虚拟质量法, 对弹塑性阶段的地应力场求解; 第三阶段为煤层开采与裂隙渗流同时进行, 进行水-力耦合计算, 煤层从左向右

每隔 5 m 开挖一次, 共开挖 72 次, 构造采空区, 流体压力为 194 kPa, 在设置流体压力范围内进行水力压裂, 流体随煤层开采产生的采动裂缝向下渗流, 从而监测各阶段所需信息。

2.2 裂隙弥合力学模型

2.2.1 理论基础

保水采煤技术主要集中在抑制导水裂隙带的发育, 提高隔水性能, 隔水性能与隔水层的工程地质条件密切相关, 对于榆神矿区黄土层和红土层的

矿物组成与力学性质很大程度影响着煤层覆岩导水裂隙的发育。随着煤层工作面的开采,上覆岩层发生连续或间断下沉,上部隔水层因下方岩层发生下沉垮落,进而发生失稳,在整体发生下沉过程中,上覆岩层在拉应力和剪应力的共同作用下出现裂缝,裂缝按方向分为横向裂缝和纵向裂缝,对于地下水的下渗主要取决于纵向裂缝的发育程度。静乐组红土作为隔水层具有裂隙修复能力,在地下水的作用下,红土由于其自身含有的黏性矿物发生吸水膨胀,可塑性提高,土层强度降低成为软弱土层。在固液耦合作用下,土体发生膨胀,当膨胀量等于裂隙宽度时会造成两侧土体之间相互挤压,土体周围裂缝呈现塑性分布,结合成黏软的土体结构。地下水并未随导水裂隙通道持续渗流,导水裂隙通道长度减少,出现裂隙弥合现象,有效抑制导水裂隙通道的发育,避免突水安全问题,营造良好的煤炭开采环境。

2.2.2 裂隙弥合模型创建

在施加水压力边界后,在渗流初期,由于裂隙渗流速度较快,所以渗流主要发生在裂隙中,但在渗流后期,孔隙基质有较大的储水空间,裂隙和孔隙之间进行耦合来计算流体之间的动态变化过程,在水压作用下对裂缝产生扩张效应,为地下水的入渗提供了通道,水进入裂隙通道后开始向孔隙基质渗流,流体压力分配对应的节点,在全局坐标系对各节点的流量和流速进行累加计算,完成裂隙和孔隙之间的渗流传递,通过弹簧将单元转化为结构,分析各弹簧的破坏情况可以反映块体单元的破裂情况从而实现强度恢复(弥合)模块;孔隙作为水的储藏空间,在黏土与水相互作用下,黏土孔隙体积变大,从而实现黏土遇水膨胀过程模拟,力学本构模型创建流程如图 9 所示。

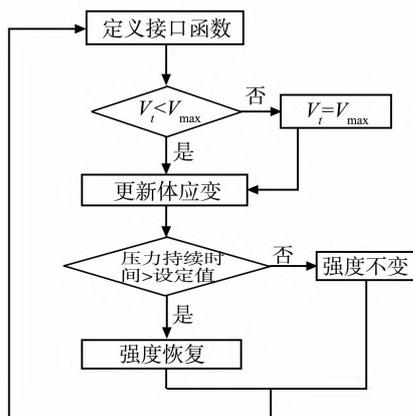


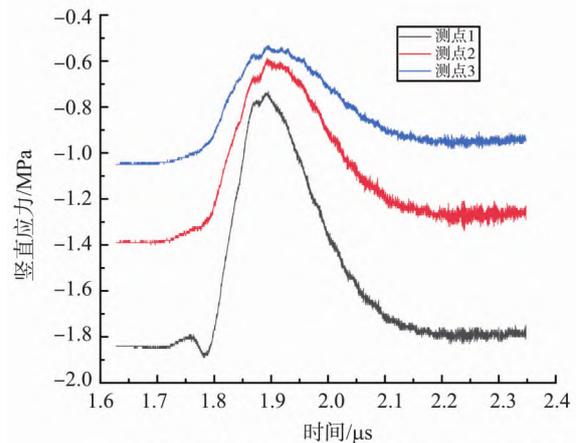
图 9 裂隙弥合力学模型流程图

Fig.9 Flow chart of mechanical model of fracture healing

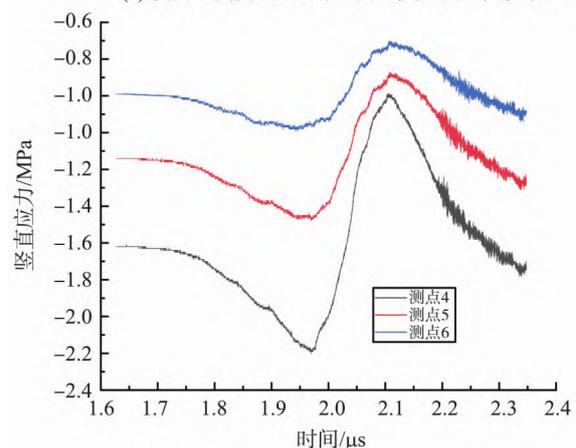
3 结果分析

3.1 覆岩受采动影响应力分布分析

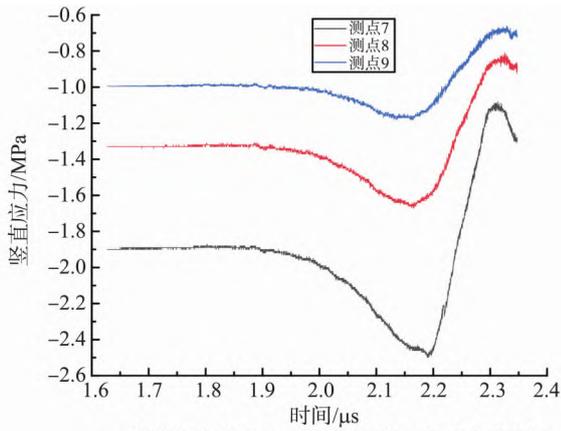
以监测点距离模型左侧边界水平距离为横坐标,以监测点的竖向应力为纵坐标。选取 9 个测点,竖向每 3 个一组,分别距煤层顶板 67、87、107 m,横向分别位于开切眼处、采空区中部和停止开采处,竖向应力随时间变化趋势见下图,竖向应力曲线变化趋势先下降到达低谷后再上升到达峰值后,再缓慢下降最后趋于稳定,竖向应力发生下降由于煤层开采上部覆岩受到扰动破坏,打破了原有覆岩应力场的平衡,考虑到岩层呈现“整体下沉”的趋势,顶板与垮落带发生紧密接触,竖向应力传递到下部,竖向压力不断增加,矿压显现,碎落岩石块不断掉落至采空区,逐渐压实,进入卸压区最后应力趋于稳定至初始应力如图 10 所示,由于煤层已经达到充分开采,裂隙发育较为充分,测点 7 在竖向应力达到峰值后没有发生明显下降的现象,如图 10(c),表明煤层开采后,碎落岩块没有被完全压实,应力无法向下得到很好的传递。



(a) 横向距离为200 m时不同测点竖向应力变化图



(b) 横向距离为300 m时不同测点竖向应力变化图



(c) 横向距离为400 m时不同测点竖向应力变化图

图 10 竖向应力与时间变化曲线

Fig.10 Variation curve of vertical stress and time

3.2 覆岩采动影响位移变化分析

以距离模型左侧边界水平距离为横坐标,下沉为纵坐标,变化图像如图 11 所示。

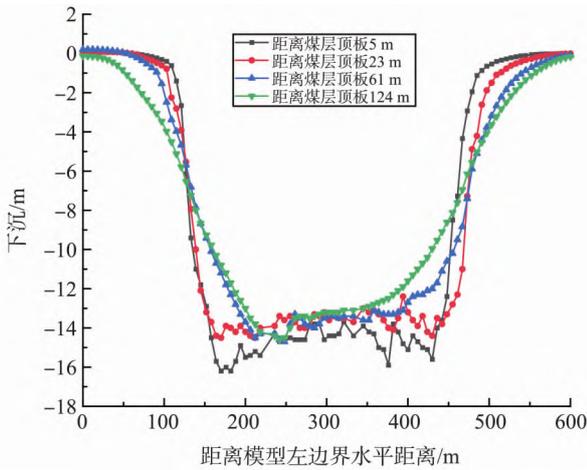


图 11 距离煤层顶板不同高度随水平距离下沉变化图

Fig.11 Changes of subsidence amount in different heights from coal seam roof with horizontal distance

分别在距离煤层顶板 5、23、61、124 m 位置水平布置 4 条测线,由图 11 知:每条测线出现了明显的下沉现象,距离煤层顶板 61 m 和 124 m 处的测线下沉速度基本保持一致,表明它们受到同一关键层的影响;在距离模型左边界 200~400 m,各个测线的下沉最大,表明在此过程中,煤层开采使覆岩发生显著运动,裂缝发育明显,并且随覆岩距离煤层顶板高度的增加,覆岩竖向位移逐渐减小,表明煤层开采顶板岩层破碎随着工作的推进,冒落岩石碎块逐渐压实密实,上部曲线逐渐平缓,说明上部岩层进入弯曲下沉带,下部曲线在中部凹凸不平,是由于煤层上部覆岩岩石碎块和垮落带在工作面上堆积。

3.3 覆岩采动影响渗流场分析

地下水随着覆岩破裂通道渗流,随着工作面的推进,塑性变化区不断扩大,直至工作面开采完毕,

上覆岩层裂隙发育充分,由于煤层开采致使上覆岩层应力扰动并在自身重力影响下发生破坏,产生裂缝,并随着工作面推进,裂缝不断发育,形成贯通裂缝,该裂缝继而形成导水裂隙带。由于导水裂隙带呈周期性分布,地下水沿导水裂隙带呈现周期性下渗的状态,开采结束后渗流面积达到最大。饱和度用来描述岩体中流体充满的程度,通过判断流体饱和度来判断渗流场变化,饱和度随工作面推进变化图如图 12 所示。

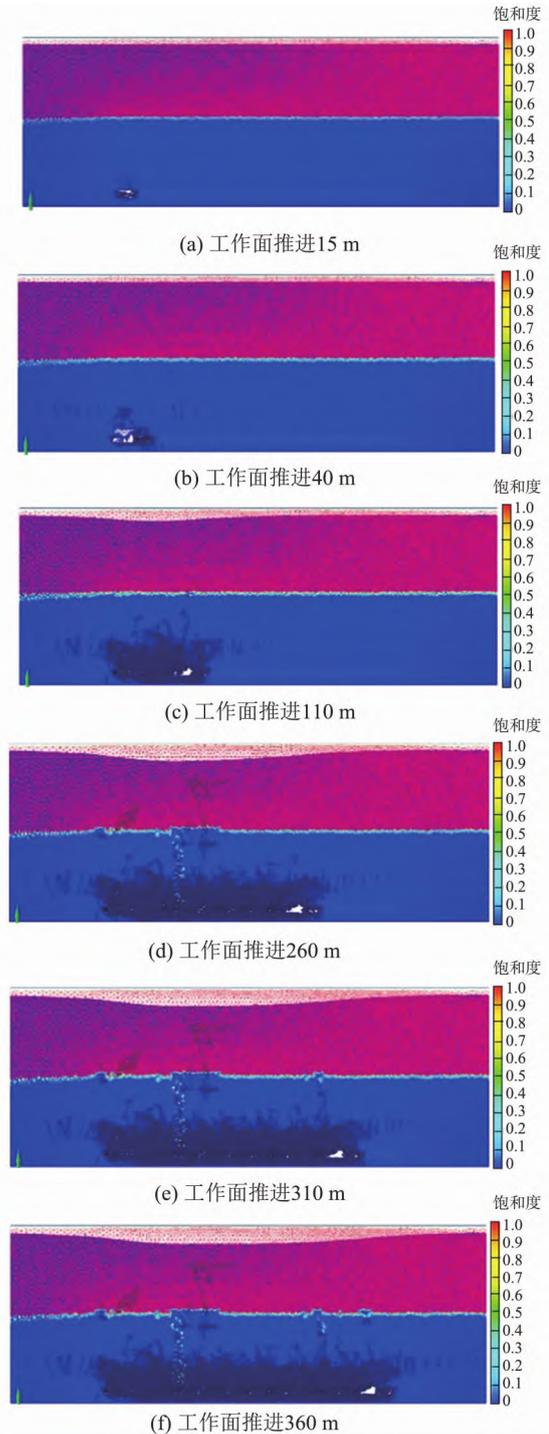


图 12 不同推进距离饱和度图

Fig.12 Saturation maps at different propulsion distances

当工作面推进 15 m 时,如图 12(a) 所示,顶板并未发生垮落,纵向产生轻微裂缝,在横向方向,直接顶和老顶由于弹性模量在拉应力作用下产生轻微的离层裂隙;工作面推进 40 m 时,如图 12(b) 所示,直接顶发生初次垮落,纵向裂缝更加发育,并向两侧逐渐扩展,破坏区域块体向上突起,呈现“拱形”;工作面推进 110 m 时,如图 12(c) 所示,随着煤层不断向前推进和上覆岩层重力作用下,老顶破碎的面积逐渐增大,老顶发生垮落,形成悬臂梁结构,在上覆岩层的不断运动和自身重力的影响下,超过其承受的应力时,岩层不断破碎垮落逐渐填满采空区,在拉应力和剪应力的共同作用下产生裂缝,原有的应力平衡被打破,产生应力重分布,纵向裂缝不断发育;工作面推进 260 m,如图 12(d) 所示张拉裂缝沿重力方向发育的同时受到剪切作用,在接触面上裂缝向水平方向扩展,发生错动形成贯通裂缝;工作面推进 310 m,如图 12(e) 所示碎落的岩石块不断充满采空区,垮落岩块逐渐压实,对顶板和上覆岩层有一定的支撑作用,上覆岩层裂隙发育逐渐稳定,使得纵向裂缝发育速度减缓,发育高度降低;工作面推进 360 m,如图 12(f) 所示,煤层开采结束,裂缝

发育完全,以纵向裂缝为主,贯通裂隙数量逐渐增多,由于采空区两侧有煤柱支撑,导致开切眼侧和停止开采处形成的水平拉应力有沿水平方向变形的趋势,纵向裂缝发育高度在煤柱附近周围最大,两侧向中部靠近时,纵向裂缝高度降低。由于开采的周期性垮落,压力边界随导水裂隙通道呈周期性下渗,导水裂隙带发育到最大值,高度为 79 m。

煤层覆岩层主要含有黏土、松散岩,属于软弱岩层,导水裂隙带高度

$$H_d = \frac{100 \sum M}{5.1n + 5.2} \pm 5.1, \quad (10)$$

式中: $\sum M$ 为总的煤层开采厚度, m; n 为煤层分层数。根据由式(10)得到的导水裂隙带最大约为 82.8 m,与数值模拟结果对比误差为 4%,说明该模型是可行的,为含水情况下煤层开采提供可靠的技术支持。

3.4 裂隙弥合模型结果对比图

黏性土层在水力耦合作用下遇水膨胀,体应变增大,块体之间相互挤压,黏性土层弥合,渗流过程减弱,裂隙弥合与未考虑弥合效应模型效果如图 13 所示。

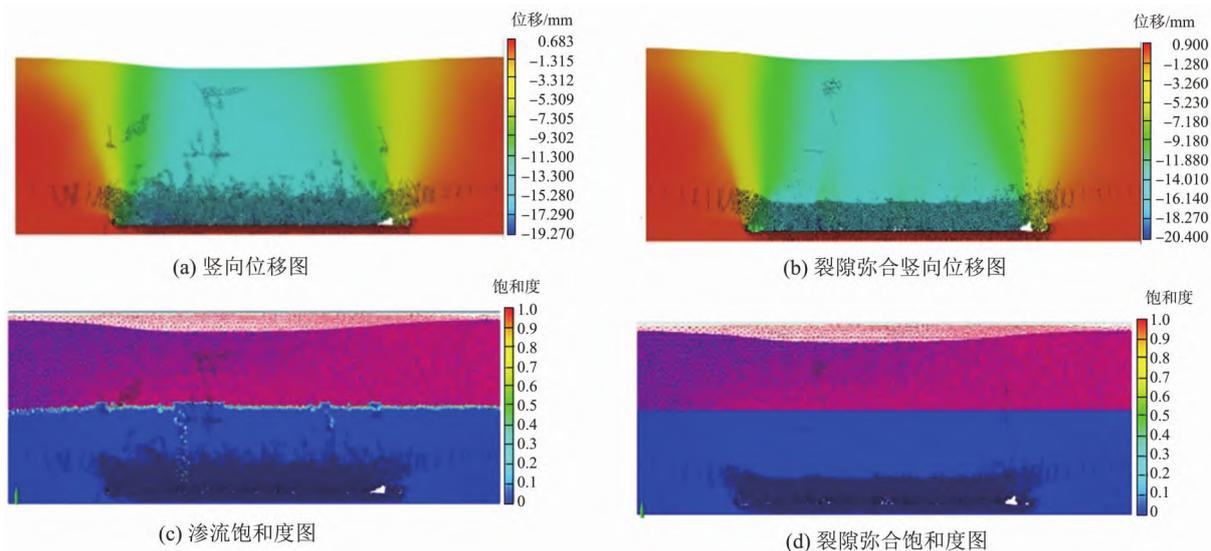


图 13 渗流模型和裂隙弥合模型效果对比

Fig.13 Effect comparison between seepage model and fracture healing model

由图 13(a) 和图 13(b) 可知,渗流最大竖向位移为 0.683 m,裂隙弥合最大竖向位移为 0.9 m,说明图 13(b) 发生了遇水膨胀现象。由图 13(c) 和图 13(d) 可知,地表水通过采动产生的导水裂隙下渗,煤层顶板发生突水现象,由于红土层膨胀导致强度下降,塑性加强,部分裂缝发生弥合,没有产生贯通裂缝,地表水没有发生下渗现象,能很好

避免顶板突水问题。

3.5 弥合前后破裂率对比

通过统计弥合前后弹簧数目进行裂隙弥合模型破裂率的监测,破裂率如图 14 所示,由于煤层的连续开采,破裂率呈不断上升的趋势,并得到实际破裂率与弥合率的和为总破裂率,进一步证明该算法的可行性。

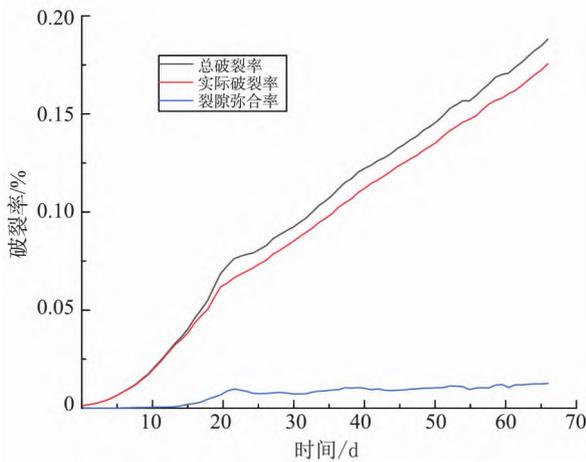


图 14 弥合前后破裂率随时间变化对比图

Fig.14 Comparison diagram of rupture rate over time before and after healing

4 结论

运用 CDEM 与水-力耦合算法,实现煤层开采诱发地表下渗过程的模拟计算,分析了开采扰动上覆岩层的运动,裂缝的动态演化过程,并基于该软件平台开发功能性命令,实现水-力耦合作用下裂缝弥合的力学模型。得出了如下结论。

(1) 水-力耦合作用下裂隙不断演化,通过与页岩水力压裂试验结果对比,垂向裂隙发育位置处于岩层中部,扩展面积发展较为完全,贯穿整个截面,裂缝厚度为单层厚度,与实验结果基本一致,说明可较好的模拟水力裂缝的扩展形态,验证本水-力耦合算法的有效性。

(2) 煤层离层裂缝主要由于张拉应力引起,同时张拉裂缝在受到剪切作用下,裂缝持续发育,形成贯通裂缝,地表水的下渗主要取决于贯通裂缝的发育,由于开采垮落的周期性,地表水呈周期性下渗,导水裂隙最大高度模拟结果与经验公式误差为 4%,导水裂隙的扩展状态受采动和水压影响。

(3) 在 CDEM 平台开发黏土遇水膨胀致使裂隙弥合力学模型,通过定义遇水膨胀和强度恢复两个模块对该现象进行模拟,监测其破裂率,得到弥合率和实际破裂率的和为总的破裂率。对竖向位移云图进行监测,由于黏土层的遇水膨胀性,体应变增大,弥合后整体位移上升 0.082 7 m,为研究水-力耦合作用下裂隙由“张开-闭合”诱发的物理因素提供了科学依据。

(4) 上覆岩层的运动直接影响了裂隙的发育状况,受到开采扰动后,发生整体性下沉,应力到达峰值后会缓慢下降,由于碎落岩块逐渐压实,上部应

力得到很好的传递,即进入卸压区,在距离模型左侧边界 200~400 m 处,采动裂缝发育明显并且随着覆岩距离煤层顶板高度的增加,覆岩竖向位移逐渐减小。

参考文献:

- [1] 魏久传,吴复柱,谢道雷,等. 半胶结中低强度围岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 974-983.
WEI Jiuchuan, WU Fuzhu, XIE Daolei, et al. Development characteristic of water flowing fractured zone under semicemented medium-low strength country rock[J]. Journal of Coal, 2016, 41(4): 974-983.
- [2] 李树刚,李志梁,林海飞,等. 采高对采动裂隙演化规律的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5): 25-28.
LI Shugang, LI Zhiliang, LIN Haifei, et al. Research on influence of mining height on mining fissure evolution[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2015, 42(5): 25-28.
- [3] 许家林,朱卫兵,王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of Coal, 2012, 37(5): 762-769.
- [4] 闫立君. 采动上覆岩层导水裂隙带发育规律及影响因素分析[J]. 能源技术与管理, 2018, 43(6): 105-107.
YAN Lijun. Analysis of development law and influencing factors of water-conducting fissure zone in mining overburden[J]. Energy Technology and Management, 2018, 43(6): 105-107.
- [5] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 2-7.
QIAN Minggao, MIU Xiexing, XU Jialin. Study on the theory of key strata in rock strata control[J]. Journal of Coal, 1996, 21(3): 2-7.
- [6] 缪协兴,钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 25-29.
MIU Xiexing, QIAN Minggao. Advance in the key strata theory of mining rockmass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(1): 25-29.
- [7] 缪协兴,陈荣华,浦海,等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1289-1295.
MIU Xiexing, CHEN Ronghua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engi-

- neering, 2005, 24(8): 1289-1295.
- [8] 许家林, 钱鸣高. 岩层控制关键层理论的应用研究与实践[J]. 中国矿业, 2001, 10(6): 56-58.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study and application of dominant stratum theory for control of strata movement [J]. China's Mining, 2001, 10(6): 56-58.
- [9] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 21-25.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(5): 21-25.
- [10] 刘治国, 樊振丽, 张玉军, 等. 黏土隔水层抗采动能力试验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(12): 63-65.
LIU Zhiguo, FAN Zhenli, ZHANG Yujun, et al. Experimental study of resistance to mining influence ability of clay aquiclude [J]. Coal Technology, 2017, 36(12): 63-65.
- [11] 范立民, 蒋泽泉. 榆神矿区保水采煤的工程地质背景[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 32-35.
FAN Limin, JIANG Zequan. Engineering geologic background of coal mining under water-containing condition in Yushen coal mining area [J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(5): 32-35.
- [12] 赵鑫. 近距离煤层开采顶板裂隙发育规律[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 138-140.
ZHAO Xin. Development law of roof crack in close distance coal seam mining [J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(6): 138-140.
- [13] 樊振丽, 刘治国. 厚黏土层软弱覆岩采动破坏的泥盖效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1196-1204.
FAN Zhenli, LIU Zhiguo. Mud cover effect of mining induced failure of soft overburden in thick clay strata [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(6): 1196-1204.
- [14] 黄庆享. 浅埋煤层保水开采岩层控制研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 50-55.
HUANG Qingxiang. Research on roof control of water conservation mining in shallow seam [J]. Journal of Coal, 2017, 42(1): 50-55.
- [15] 黄庆享. 浅埋煤层覆岩隔水性与保水开采分类[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3622-3627.
HUANG Qingxiang. Classification control of water isolation and water retention mining for shallow coal seam overburden mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl. 2): 3622-3627.
- [16] 许家林. 煤矿绿色开采20年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [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]. Vibration and Shock, 2017, 36(13): 11-18.
- [18] ZHU Xinguang, FENG Chun, CHENG Pengda, et al. A novel three-dimensional hydraulic fracturing model based on continuous-discontinuous element method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 383(6): 113887.
- [19] TAN Peng, JIN Yan, HAN Ke, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation [J]. Fuel, 2017, 206(15): 482-493.
- [20] 黄庆享, 蔚保宁, 张文忠. 浅埋煤层黏土隔水层下行裂隙弥合研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 35-39.
HUANG Qingxiang, WEI Baoning, ZHANG Wenzhong. Study on downward crack closing of clay aquiclude in shallowly buried coal seam [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1): 35-39.
- [21] 郭影, 姜忻良, 曹东波, 等. 一种渗流吸水诱发岩体强度弱化的有限体积数值计算方法[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 139-149.
GUO Ying, JIANG Xinliang, CAO Dongbo, et al. A finite volume numerical simulation method for rock mass strength weakening by seepage water absorbing [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 139-149.
- [22] 杜长城, 祝艳波, 苗帅升, 等. 三趾马红土失水收缩裂缝演化规律研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3019-3027.
DU Changcheng, ZHU Yangbo, MIAO Shuaisheng, et al. The evolution of cracks in the dewatering shrinkage process of hipparion red soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3019-3027.

(编辑: 陈丽萍)