



# 河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙涌水量时空演化的FDEM–CFD耦合分析

杨泽斌 李浩 马立强 麦龙泉

## 引用本文：

杨泽斌, 李浩, 马立强, 等. 河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙涌水量时空演化的FDEM–CFD耦合分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 176–184.

YANG Zebin, LI Hao, MA Liqiang. FDEM–CFD coupling analysis of spatiotemporal evolution of mining-induced overburden fracture–water inflow in shallow and thick coal seam under river[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 176–184.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1161>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 185–192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d749e872-e15c-4dff-b196-aa45fb971793>

#### 采动诱发的含原生裂隙覆岩运移及涌（淋）水时空特征分析

Study on overlying strata containing primary fractures migration and spatial–temporal characteristics of water gushing (leaching) caused by mining field disturbance  
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0323>

#### 富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征

Evolution characteristics of water flowing fracture in shallow buried coal seam in water abundance gully valley area  
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 1–11 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1985>

#### 浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group  
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 65–76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1108>

#### 深部煤层非充分采动下覆岩裂隙场可视化探测研究

Study on visual exploration of fissure field of overlying strata in deep coal seam under subcritical extraction  
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c499572d-a6e9-4ad2-b404-73729ad60719>

#### 采动覆岩高位离层演化特征及涌（突）水前兆信息研究

Study on evolution features of high level overburden separation layer and precursor information of water inrush during coal mining  
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 194–205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.023>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨泽斌, 李 浩, 马立强, 等. 河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化的FDEM-CFD耦合分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 176-184.

YANG Zebin, LI Hao, MA Liqiang, et al. FDEM-CFD coupling analysis of spatiotemporal evolution of mining-induced overburden fracture-water inflow in shallow and thick coal seam under river[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 176-184.

## 河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化的 FDEM-CFD 耦合分析

杨泽斌<sup>1</sup>, 李 浩<sup>1</sup>, 马立强<sup>2</sup>, 麦龙泉<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 211116)

**摘要:** 河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙分布与涌水量是工作面安全生产的决定性因素之一。数值模拟是二者重要预测方法, 其合理性的关键在于建立岩体破坏-裂隙流体耦合理论及相应的模拟方法。以路家村矿15404工作面为研究背景, 构建拉/剪应力下非贯通裂隙开裂、贯通裂隙的法向与切向本构关系, 并基于二相流质量守恒、动量守恒与状态方程, 结合增强的浸没边界算法识别流-固界面, 通过流体体积法实现裂隙内流体自由面的追踪和重构。在此基础上形成FDEM-CFD河下采煤覆岩裂隙与涌水量预测数值模型耦合程序, 通过相邻工作面地面钻孔冲洗液消耗量观测法验证导水裂隙带发育高度, 以及采用大井法理论对涌水量结果进行对比。结果表明: 采动岩体破坏-裂隙流体耦合理论及相应的FDEM-CFD程序, 可数值实现河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙形成, 以及裂隙内流体运移过程。当工作面推进至80~120 m时覆岩内形成贯通地表的导水裂隙。招山河水的主要下泄路径为工作面后方8~20 m位置处的导水裂隙, 其斜向采空区、倾角65°~72°。模拟所得采空区涌水量为18.78 m<sup>3</sup>/h, 与大井法计算结果接近。上述成果在路家村矿区得到初步应用, 为进一步开展河下浅埋厚煤层防治水工程提供理论支撑。

**关键词:** 河下浅埋煤层; 覆岩裂隙; 涌水量; 本构模型; FDEM-CFD 耦合

**中图分类号:** TD745      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2024)06-0176-09

## FDEM-CFD coupling analysis of spatiotemporal evolution of mining-induced overburden fracture-water inflow in shallow and thick coal seam under river

YANG Zebin<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, MA Liqiang<sup>2</sup>, MAI Longquan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of In-situ Property Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. China University of Mining and Technology School of Mining Engineering, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The distribution of overlying rock fractures and water inflow during mining in shallow and thick coal seams under the river is one of the decisive factors for the safe production of working faces. Numerical simulation is an important prediction method for both, and the key to its rationality lies in the establishment of a rock mass failure fracture fluid coupling theory and corresponding simulation methods. Taking the 15404 working face of Lujiacun Mine as the research background, the normal and tangential constitutive relationships of non through crack cracking and through crack under tensile/shear stress are constructed. Based on the conservation of mass, momentum, and state equations of two-phase flow, the enhanced immersion boundary algorithm is combined to identify the fluid solid interface. The fluid volume method is used to track and reconstruct the fluid free surface inside the crack. On this basis, a coupling program of FDEM-CFD numerical model for predicting overlying rock fractures and water inflow in coal mining under the river is formed. The development height of the water conducting fracture zone is verified through the observation of the consumption of flushing fluid in adjacent working

收稿日期: 2023-08-12      责任编辑: 黄小雨      DOI: 10.12438/cst.2023-1161

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42102310); 山西省基础研究计划资助项目(20210302123106); 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室开放基金资助项目(2021SKM503)

作者简介: 杨泽斌(2000—), 男, 山西长治人, 硕士研究生。E-mail: zbyangtyut@163.com

通讯作者: 李 浩(1991—), 男, 山西离石人, 副研究员, 博士。E-mail: haolityut@163.com

faces, and the results of water inflow are compared using the large well method theory. The results indicate that the coupling theory of mining rock mass failure and fracture fluid, as well as the corresponding FDEM-CFD program, can numerically achieve the formation of overlying rock fractures in shallow and thick coal seams under rivers during mining, as well as the fluid transport process within the fractures. When the working face advances to 80-120 m, a water conducting crack that runs through the surface is formed within the overlying rock. The main discharge path of the Zhaoshan River is the water diversion fissure located about 8-20 m behind the working face, which is inclined towards the goaf and has an inclination angle of about 65°-72°. The simulated water inflow in the goaf is 18.78 m<sup>3</sup>/h, which is close to the calculation results of the large well method. The above achievements have been preliminarily applied in the Lujiacun mining area, providing theoretical support for further carrying out water prevention and control projects in shallow and thick coal seams under the river.

**Key words:** shallowly buried coal seam beneath a river; overlying strata fractures; water inflow; constitutive model; FDEM-CFD coupling

## 0 引言

河下浅埋煤层采动覆岩导水裂隙分布及涌水量是决定工作面安全生产的关键因素之一,一旦导水裂隙波及地表水体且裂隙开度较大,将导致矿井排水压力增加、甚至发生淹井事故<sup>[1-3]</sup>。

数值预测采动覆岩裂隙分布及涌水量是预测上述灾害机理与水量大小的重要方法之一,其合理性的关键在于建立岩石变形-开裂-离散块体运动及岩体裂隙中流体运移理论模型及其模拟方法。众多学者结合连续介质假设,模拟研究采动覆岩破坏高度。石必明等<sup>[4]</sup>基于岩石破裂损伤理论和有限元计算方法,利用 RFPA 应用软件系统模拟保护层开采远距离动态发展过程,得出了随保护层工作面推进,被保护层煤体应力和变形分布特征。LIU 等<sup>[5]</sup>采用 FLAC3D 对裂隙岩体进行数值模拟,研究了裂纹面几何参数、强度参数以及围压对岩石力学特性的影响。祝凌甫等<sup>[6]</sup>采用 FALC3D 模拟研究了大采高综放开采顶煤运移规律,结果表明采高加大顶煤始动点前移,位移量增加,有利于顶煤的破碎,加大支架支护强度对下位顶煤位移影响较大,有利于下位顶煤的破碎。刘红元等<sup>[7]</sup>应用岩层破断过程分析 SFPA2D 系统,分析了采动影响下覆岩破坏的动态发展过程。BEKYTSCHKO 等<sup>[8]</sup>提出扩展有限元法 (XFEM) 可以很好地模拟裂纹扩展路径并且不需要重新划分网格,极大地提高了精度并减少了计算量。杨贵<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 有限元分析软件,建立二维、三维模型对覆岩不同岩性组合、断层及工作面几何参数对破坏高度的影响进行研究。另有部分学者基于离散介质假设,主要通过 UDEC 软件,将覆岩块体简化为砌块形状,数值研究采动覆岩裂隙。张吉雄<sup>[10]</sup>利用 UDEC 离散元分析软件,模拟分析不同强度充填体条件下,等价采高充填综采及传统采综采覆岩运动、关键层弯曲下沉及

地表变形特征,掌握充填开采岩层移动规律。李墨等<sup>[11]</sup>基于变形分析法对导水裂隙带发育高度进行了预测。周昊楠等<sup>[12]</sup>采用离散元数值模拟方法系统研究了天然均质岩石在单轴压缩破坏过程中的力学、热力学及损伤演化规律。此外,学者广泛将采动覆岩简化为“孔隙介质”,通过控制渗透系数决定水流的快慢。刘卫群等<sup>[13]</sup>基于随机有限元理论和渗流力学原理,通过推导渗流随机有限元列式,得到随机渗流单元水导矩阵,将可靠度计算引入采动岩体随机渗流之中,并对实际渗流问题进行了数值计算,反映了保护关键层和防水层对预防矿井的顶板突水具有重要作用。吴雪峰<sup>[14]</sup>通过建立顶板突水溃砂数值模拟模型,运用 PFC2D 数值模拟软件分析开采中顶板变形以及采空区上覆岩层孔隙率的变化情况,分析含砂层开采顶板突水溃砂的细观机理。杨天鸿等<sup>[15]</sup>开发利用渗流与应力耦合分析系统模拟承压水底板的破裂失稳过程,分析了底板突水的机理,对底板的易突水部位进行了预测。

但是,上述文献中固体理论模型主要基于连续介质假设,通过 FLAC3D、Ansys 等软件固体力学模块基于“连续介质假设”,将采动覆岩裂隙简化为塑性区、损伤带等力学响应。基于离散介质假设 UDEC 软件,模拟得到砌体形式的采动裂隙;更重要的是,渗流模块大多基于“孔隙介质模型”,通过调整渗透系数值改变渗透速率。实测结果表明,岩体并不是理想的连续或者离散介质,并且在采动应力下覆岩往往从准连续介质转化为离散介质,在此过程中不仅出现弹塑性变形、开裂、还会有离散岩块运动。这些开度、贯通度变化的裂隙(而非孔隙介质)会深刻影响地下水运移路径与速率,是地下水运移的主要通道。而渗透系数这一概念更适合反映孔隙介质的渗透性,即便采用张量形式,也只能反映渗透各向异性,很难反应裂隙岩体渗透的非均质性。

以采动覆岩裂隙-裂隙渗流力学理论为研究主线,对固体部分依次建立完整岩石的弹塑性变形、非贯通裂隙的混合型断裂、贯通型裂隙的压剪摩擦本构关系;对流体部分依次建立质量守恒方程、动量守恒方程、状态方程。编制裂隙岩体有限离散元-流体动力学耦合的FDEM-CFD数值流程,自然形成反映采动裂隙岩体渗透非均质性、各向异性数值模型。模拟研究河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化规律。该研究成果对水体下安全采煤、保水采煤设计具有重要意义。

## 1 岩体破坏-裂隙流体耦合理论

### 1.1 岩体破坏本构关系

钻孔原位测试结果表明,采动覆岩往往存在三类型破坏:完整岩块弹塑性变形、非贯通裂隙开裂、贯通裂隙两侧岩块的法向与切向作用。采用基于摩尔-库仑屈服准则的应变软化本构模型<sup>[16]</sup>描述完整岩块的弹塑性变形。进一步在有效应力空间中建立后二者的本构关系。

#### 1.1.1 非贯通裂隙开裂

拉、压剪应力下非贯通裂隙的力学响应包括2个方面:裂尖的开裂、裂尖后方裂隙表面的压剪摩擦。本部分只讨论前者,而后者在下文中予以说明。

裂尖的潜在断裂面由黏聚力单元表示,通过有限元FEM方法计算。实验表明,拉、剪及混合型断裂模式下的断裂过程分为弹性变形和韧性断裂两个阶段。弹性段本构关系可由下式表示<sup>[17]</sup>:

$$\boldsymbol{\sigma}_c = \mathbf{D}_c \boldsymbol{\varepsilon}_c = \begin{bmatrix} D_{c,n} & 0 & 0 \\ 0 & D_{c,S} & 0 \\ 0 & 0 & D_{c,t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{c,n} \\ \varepsilon_{c,S} \\ \varepsilon_{c,t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当应力达到如下条件,进入韧性断裂过程:

$$\left( \frac{\langle \sigma_{c,n} \rangle}{\sigma_{c,n}^{\text{peak}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{c,S}}{\sigma_{c,S}^{\text{peak}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{c,t}}{\sigma_{c,t}^{\text{peak}}} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

式中,  $\boldsymbol{\sigma}_c$  为应力矢量;  $\mathbf{D}_c$  为黏聚力单元的弹性刚度矩阵;  $\boldsymbol{\varepsilon}_c$  为应变矢量, 其与分离位移量  $S$  的关系为  $\boldsymbol{\varepsilon}_c = \mathbf{S}/T_0$ , 当模型采用国际单位制时有  $T_0=1$ , 为单元的本构厚度;  $D_{c,n}, D_{c,S}, D_{c,t}$  为法向和二个切向方向上的弹性模量;  $\varepsilon_{c,n}, \varepsilon_{c,S}, \varepsilon_{c,t}$  为  $\boldsymbol{\varepsilon}_c$  各个方向上的分量;  $\sigma_{c,n}, \sigma_{c,S}, \sigma_{c,t}$  ( $\sigma_{c,n}^{\text{peak}}, \sigma_{c,S}^{\text{peak}}, \sigma_{c,t}^{\text{peak}}$ ) 是法向和二个切向方向的(最大)应力;  $\langle \rangle$  为 Macaulay 符号。

满足式(2)后材料进入韧性断裂阶段。考虑到剪切应力下该阶段易出现塑性剪切位移、剪切模量降低现象,故在本构关系中引入塑性和损伤。记拉、剪损伤变量为  $d_{c,n}, d_{c,S}$ , 剪切塑性位移为  $S_{c,S}^{\text{plastic}}$ , 拉总

位移为  $S_{c,n}$ , 剪总位移为  $S_{c,S}$ , 那么应力和拉、剪总位移之间的关系:

$$\sigma_{c,n} = (1 - d_{c,n}) D_{c,n} S_{c,n} \quad (3)$$

$$S_{c,S}^{\text{plastic}} = S_{c,S}^{\text{in}} - d_{c,S} \sigma_{c,S} / [(1 - d_{c,S}) D_{c,S}] \quad (4)$$

其中,  $S_{c,S}^{\text{in}} = S_{c,S} - \sigma_{c,S} / D_{c,S}$ 。

采用 Benzeggagh-Kenane 断裂准则<sup>[18]</sup>作为岩石完全断裂的判据:

$$G_c^F = G_{c,n}^F + (G_{c,S}^F - G_{c,n}^F) \xi^\chi \quad (5)$$

式中,  $G_c^F, G_{c,S}^F, \chi$  分别为完全断裂时的张拉型断裂能、剪切型断裂能、材料参数。在拉、剪及混合模式下的断裂能  $G_{c,n}, G_{c,S}, G_{c,m}$  表达式为:

$$G_{c,j} = \int_0^{S_{c,j}} t_{c,j}(S_{c,j}) dS_{c,j} \quad (6)$$

其中,  $j$  为变量, 表示 n, S, m(即张拉型、剪切型、混合型)断裂模式。断裂能混合比  $\xi$  表达式为:

$$\xi = G_{c,S} / (G_{c,n} + G_{c,S}) \quad (7)$$

由上述(1)–(7)式确定拉、剪荷载下裂尖断裂过程。裂尖后方裂隙表面,以及贯通裂隙的压剪摩擦力学响应,通过下文确定。

#### 1.1.2 贯通裂隙的法向与切向作用

黏聚力单元完全断裂后(即式(5)成立)赋予状态变量 state=0, 删除黏聚力单元并激活该位置处的接触对。遍历搜索整个数值模型中 state=0 的黏聚力单元与初始接触对, 其围合而成的最小区域内部采用 FEM 计算, 采用离散元 DEM 计算区域  $\Omega_1$  与区域  $\Omega_2$  之间的法向与切向作用。

若区域  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  之间任意相邻实体单元节点间距  $> 0$ , 则二个区域不存在相互作用。以体积力与水压力为外力计算其力学响应。

若区域  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  之间任意相邻实体单元节点间距  $\leq 0$ , 则在去除水压力的有效应力空间中对节点力矢量在法向、切向方向的分解, 若有法向力  $\sigma_n \neq 0$ , 且切向力  $\sigma_s = 0$ , 则有压缩本构关系为:

$$\sigma_n = \frac{D_n N_{\max} n}{N_{\max} - n} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_n$  为压缩应力;  $N_{\max}$  为结构面最大闭合量, 常数, 根据三维形貌扫描实验确定;  $n$  为结构面闭合量, 变量;  $D_n$  为结构面法向模量, 本文取值为其相邻岩块参数。

若相邻实体单元节点间距为 0, 且有相邻节点力切向力差值  $\sigma_s \neq 0$ , 则二者之间存在剪切摩擦, 结合 SARGIN 等<sup>[19]</sup>的研究成果并拟合实验曲线, 得到剪切本构关系:

$$\sigma_s = \frac{D_s S + \sigma_{s,p}(p-1)(S/s_p)^2}{1 + (D_s s_p / \sigma_{s,p} - 2)(S/s_p) + D_s (S/s_p)^2} \quad (9)$$

式中,  $D_s$  为剪切模量;  $S(s_p)$  为剪切(峰值)位移;  $p$  为材料参数;  $\sigma_s(\sigma_{s,p})$  为(峰值)剪应力。

本文将粗糙裂隙简化为平直裂隙, 在降低计算成本的同时, 也会对带来相应的问题: 由于采用罚函数计算贯通裂隙的法向作用, 易导致区域  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  之间任意接触的实体单元之间的裂隙开度小于 0。此假设条件对流体在张拉型裂隙内运移影响很小; 但对剪切渗流影响较大。为便于开展后者的 CFD 计算, 以直剪实验结果为基础, 结合 LADANYI<sup>[20]</sup> 的研究成果, 确定剪胀方程为:

$$\Delta n = S^{0.65} (1 - \sigma_n / \sigma_u)^{0.001} \tan \psi_0 \quad (10)$$

其中,  $\Delta n$  为剪胀引起的法向位移增量;  $\sigma_n$  为法向应力;  $\sigma_u$  为相邻岩块的单轴抗压强度;  $\psi_0$  为初始剪胀角。由此, 在 FDEM 裂隙开度模拟结果的基础上, 根据剪切位移修正剪切裂隙开度。

基于 1.1 节各式, 以初始定义的接触对、采动应力下新生成的 state=0 的黏聚力单元(式(5))为激活有限元或离散元的判据。由此编制相应的有限元-离散元 FDEM 数值程序, 模拟采动覆岩从准连续介质转化为离散块体全过程。

## 1.2 裂隙岩体多相流动力学基本方程

在建立裂隙岩体多相流动力学基本方程前, 简要说明河下采煤突水过程。工作面采动导致覆岩内出现自下而上的裂隙, 并随即在其中充满空气。若裂隙波及地表水体, 则地下水自上而下逐渐占据裂隙内空气的空间, 并进入工作面。上述过程可简化为气-水二相流在贯通裂隙内的运移模型。在此基础上, 结合流体体积法(VOF)实现气-水二相边界追踪。二相流质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

式中,  $t$  为时间;  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  为流体分别在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的速度;  $\rho$  为密度, 且有:

$$\rho = \rho_w V_p + \rho_a (1 - V_p) \quad (12)$$

式中,  $\rho_w$  为流体密度;  $\rho_a$  为空气密度;  $V_p$  为计算网格中水的体积分数, 且有  $0 \leq V_p \leq 1$ , 为待求解变量。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st} \quad (13)$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $\mathbf{u}$  为流体速度矢量;  $p$  为流体压力;  $\mathbf{g}$  为重力加速度;  $\mathbf{F}_{st}$  为水的表面张力;  $\boldsymbol{\tau}$  为黏滞力

引起的应力张量, 且有:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu [(\nabla \cdot \mathbf{u}) + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T] \quad (14)$$

其中  $\mu$  为动力黏度, 且有:

$$\mu = \mu_w V_p + \mu_a (1 - V_p) \quad (15)$$

式中:  $\mu_w$  为壁面动力黏度;  $\mu_a$  为空气的动力黏度。另外, 为使上述方程组封闭, 补充 Mie-Gruneisen 状态方程<sup>[21]</sup>:

$$p = \rho c_0^2 \eta \quad (16)$$

其中,  $c_0$  为材料常数, 取值为 1500 m/s;  $\eta$  为名义体积压缩应变,  $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ 。其中  $\rho_0$  为参考密度, 取值为 1 000 kg/m<sup>3</sup>。

为了将气水二相流限制在岩体裂隙内, 在流体所有可能流经的位置布置欧拉网格。而后采用增强的浸没边界算法识别水-岩界面, 从而使得气水只能在欧拉网格与裂隙相交的区域流动。在此基础上, 将未与裂隙相交的欧拉网格删除, 从而大大提高计算效率。再结合流体体积 VOF 方法, 在每个时间增量步内计算每个欧拉单元中水的体积分数, 实现裂隙内流体自由面的追踪和重构。将式(11)~(15)赋予欧拉网格。

基于以上各式及方法, 形成 FDEM-CFD 数值计算流程如图 1 所示。

## 2 参数识别与理论模型验证

第一节中的岩体破坏本构关系参数可通过三轴压缩实验、I/II 型断裂实验、直剪试验获取, 得到岩石力学参数见表 1。且其合理性已经被笔者验证<sup>[22]</sup>。尚需验证贯通裂隙内流体动力学方程及相应的 CFD 程序。

对比实验与模拟结果验证理论模型的合理性。由巴西劈裂法制备棱长 100 mm、单一粗糙结构面的立方体砂岩试件, 三维形貌扫描并计算 JRC 值, 选取 JRC 值接近的试件开展剪切渗流实验。夹具固定试件下盘, 在试件上盘逐级施加法向力直至 10 MPa, 剪切加载速率为 0.02 mm/min。当剪切位移达到 4 mm 时停止剪切加载, 并在裂隙进水口施加 0.5, 1.5, 2.5 MPa 水压力, 出口处设置水压力 0 MPa, 监测出入口水流量。建立与单裂隙剪切渗流试验试样尺寸、边界条件一致的数值模型。在固定试件下盘的同时, 通过与试样紧贴的刚性平板, 对试样上盘施加  $v_x = 0.02$  mm/min 的剪切荷载, 同时对上盘顶面施加 10 MPa 法向荷载。模型的裂隙位于  $y$  方向中部, 简

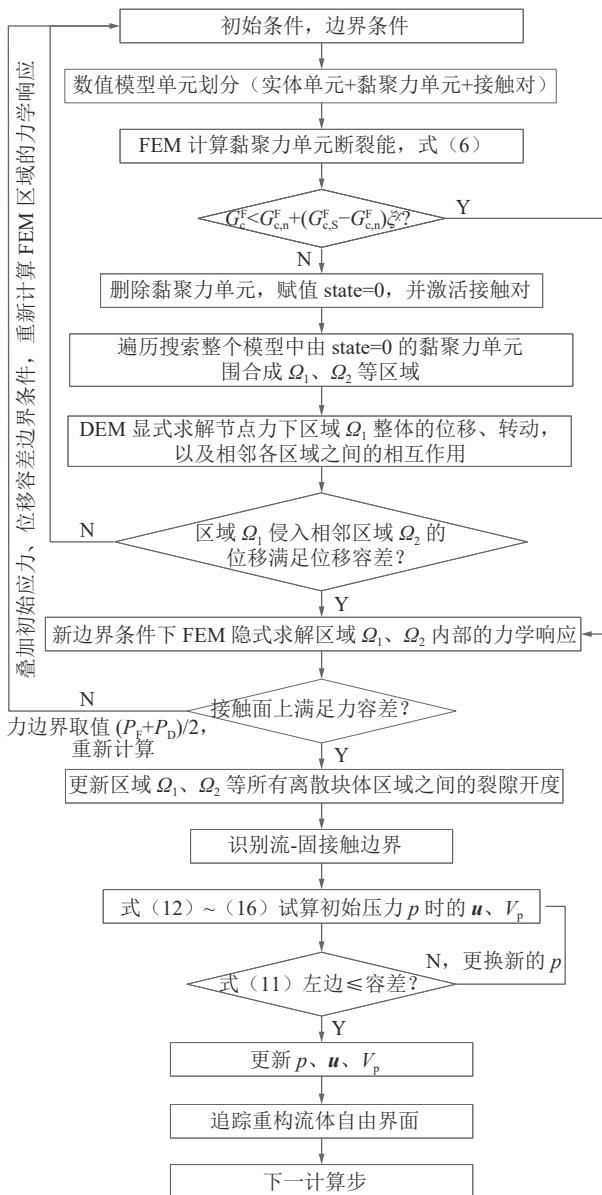


图1 FDEM-CFD耦合数值计算流程

Fig.1 FDEM-CFD Coupled numerical calculation process

化为平直裂隙,由接触对表示,并赋予式(8)~(9)力学属性;上下盘采用实体单元。设置同样的流体边

界条件。初始时刻裂隙内充满空气。待切向位移为4 mm时,在欧拉域左、右边界施加水压力边界,其余欧拉边界处施加法向速度约束。通过实验和计算程序(图1)得到实验与模拟结果如图2所示。

由图2可知,当入口水压力分别为0.5、1.5、2.5 MPa,实验(模拟)水流量分别为 $8.7 \times 10^{-6}$ ( $1.09 \times 10^{-5}$ )、 $1.66 \times 10^{-5}$ ( $2.05 \times 10^{-5}$ )、 $2.18 \times 10^{-5}$ ( $2.83 \times 10^{-5}$ ) $\text{m}^3/\text{s}$ ,模拟与试验结果偏差为23%~29%。模拟结果相较试验偏高,主要原因在于真实裂隙是粗糙的,而在数值模型中被简化为平直裂隙,导致后者水力开度较大;而且在粗糙裂隙中局部流体流速很快,有较高的惯性力而阻碍水流运移。上述CFD结果表明,增强的浸没边界算法可有效将气水二相流限制在裂隙内流动。相比较大井法等传统涌水量预测方法动辄70%以上的误差<sup>[22]</sup>,CFD方法总体满足工程所需,且涌水量结果偏于安全。

### 3 河下工作面采动突水数值模拟

#### 3.1 工作面矿井地质和水文地质概况

山西孟县路家村煤矿位于太行山西侧,孟县盆地东南部边缘。区域地层总体为走向近东西向,向南倾的单斜地层,大型断裂较少,宽缓次级褶曲较发育。分布的地层主要有奥陶系中统峰峰组,石炭系中统本溪组、上统太原组,二叠系下统山西组、下石盒子组、上统上石盒子组,第四系上更新统及全新统。工作面基本上正南北向布置,自北向南开采推进,全部垮落法管理顶板。主采15号煤直接顶为泥岩,老顶主要为灰岩、砂质泥岩,各岩层分布及其厚度如图3所示,其中15404与15405工作面覆岩地层中泥质岩层(包括泥岩、砂质泥岩)总厚度一般占煤层覆岩总厚度的50%以上,煤层厚度为7.7 m,最小采深为63 m。

路家村煤矿地区降水量多集中在每年的七、八、

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

岩性	$D_{c,n}/(10^6 \text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$D_{c,S}/(10^6 \text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{c,n}^{\text{peak}}/\text{N}$	$\sigma_{c,S}^{\text{peak}}/\text{N}$	$\chi$	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$c/\text{MPa}$	$\phi/^\circ$	$N_{\text{max}}/\text{mm}$	$D_a/\text{GPa}$	$D_s/\text{GPa}$	$\sigma_{s,p}/\text{MPa}$	$s_p/\text{mm}$	$\psi_\phi/^\circ$
黄土	0.45	2.56	30.86	2 162.24	2.03	11.85	0.25	7.36	23	0.20	11.85	0.94	0.271	2.87	2.1
细砂岩	1.10	19.27	790.29	5 695.38	2.77	20.11	0.21	15.22	35	0.36	20.11	9.75	7.31	0.75	3.4
砂质泥岩	0.71	2.71	452.95	3 226.76	2.19	15.33	0.25	9.88	28	0.29	15.33	4.10	4.72	1.15	2.7
泥岩	0.45	2.56	308.60	2 162.24	2.03	11.85	0.25	7.36	23	0.20	11.85	0.94	2.71	2.87	2.1
煤	0.43	1.98	215.78	1 420.50	1.78	10.21	0.28	4.77	22	0.41	10.21	3.06	3.43	1.12	2.0
中砂岩	1.52	23.76	731.15	6 861.82	2.73	25.73	0.19	17.03	41	0.41	25.73	11.55	10.75	0.66	4.2
灰岩	3.66	37.28	1 023.10	10 435.72	2.25	41.56	0.19	22.70	42	0.34	41.56	16.31	19.66	0.70	3.1

注:  $E$ 为弹性模量;  $c$ 为材料黏聚力;  $\phi$ 为材料的摩擦角。

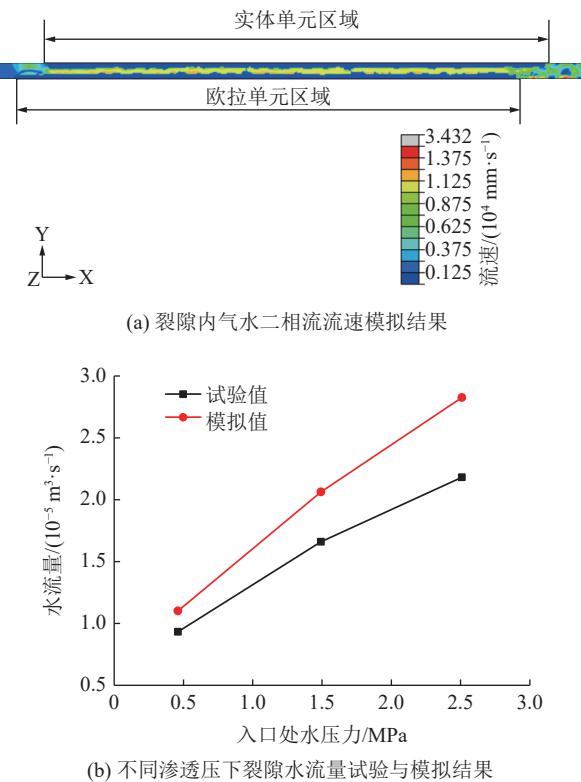


图 2 剪切渗流实验与数值模拟结果对比

Fig.2 Comparison of shear seepage experiment and numerical simulation results

九月, 占全年总降水量的 74%~98%。15404 工作面顶板的二叠系砂岩裂隙含水层富水性差, 地表招山河是其主要涌水水源。招山河河流宽度为 1.98~5.80 m, 河流深度为 0.15~0.28 m, 最大河水流速为 0.64 m/s。需要强调的是, 招山河是季节性河流, 按照采煤计划, 15404 工作面旱季开采, 待推进至 170 m 后进入雨季并停采。雨季招山河洪水流量将达 2 300 m<sup>3</sup>/h。一旦采动裂隙波及地表、河水大量下泄至工作面, 将导致严重突水灾害。

### 3.2 建立工程数值模型

为研究河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化规律, 根据路家村 15404 工作面工程地质条件, 采用图 1 所示的 FDEM-CFD 耦合数值计算流程, 建立如图 3 所示的 FDEM-CFD 数值模型, 模拟研究河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化规律。其中 FDEM 模型主要反映固体变形、开裂、运动过程。模型长×高=300 m×80 m, 工作面推进长度 160 m, 两侧各预留 70 m 边界煤柱。其顶部为自由边界, 其余 5 面采用位移约束方式固定其法向位移, 在高度方向设置重力荷载。FDEM 模型由实体单元、黏聚力单元、接触对组成, 分别赋予弹塑性、断裂、压缩-剪切力学属性(1.1 节)。因 15404 工作面在推进至 170 m 后进入雨季停采, 故在所得 FDEM 模型计算结果基础上建立 CFD 模型以模拟招山河水沿采动裂隙进入工作面情况。CFD 模型(即流体部分)由欧拉单元组成, 赋予流体动力学属性(1.2 节)。考虑到招山河河道流向被工作面所覆盖, 通过煤层开采形成的导水裂隙带下渗进入采掘工作面, 模拟其流体只在欧拉单元与 FDEM 相交的裂隙中流动, 因此仅在采动覆岩裂隙较为发育的采空区附近布置欧拉域以模拟招山河河水, 其长×高=230 m×60 m, 欧拉域底界与煤层底板重合。欧拉单元尺寸为 10<sup>-3</sup> m。对整个欧拉域施加重力荷载, 在其表面设置为法向速度为 0 的边界, 同时在水-岩接触边界处采用浸没边界算法, 将水流控制在采动覆岩裂隙内。各岩层及流体力学参数见表 1, 其中黄土不能承受拉力, 压剪强度设置为泥岩的 1/10, 其他参数与泥岩一致。在此基础上, 通过 FDEM-CFD 数值程序(图 1)计算河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙-涌水量时空演化规律。

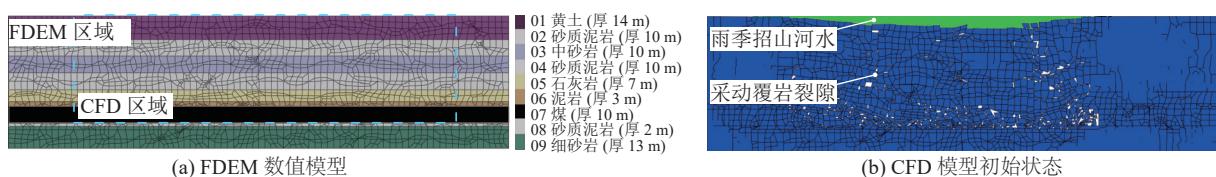


图 3 路家村矿 15404 工作面 FDEM-CFD 数值模型

Fig.3 FDEM-CFD numerical model of 15404 Working Face in Lujiacun Mine

### 3.3 FDEM-CFD 模拟结果

通过以上数值模型得到河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙数值结果如图 4 所示。

如图 4 所示, 当工作面从 0 m 推进至 20 m 过程中, 顶板泥岩随煤层开采而垮塌。当工作面推进至 20 m 时, 灰岩基本顶断裂, 并导致其上部的砂质泥岩

层同步断裂, 导水裂隙发育至距煤层 23 m 位置处的中砂岩底界, 其最大位移约为 1.07 m。

当工作面推进至 50 m, 煤层顶板灰岩将形成大面积悬顶, 同时在工作面后方约 30 m 位置处顶板中砂岩断裂, 导致其上方砂质泥岩同步断裂。但由于表层黄土塑性变形能力较强, 使得导水裂隙发育至

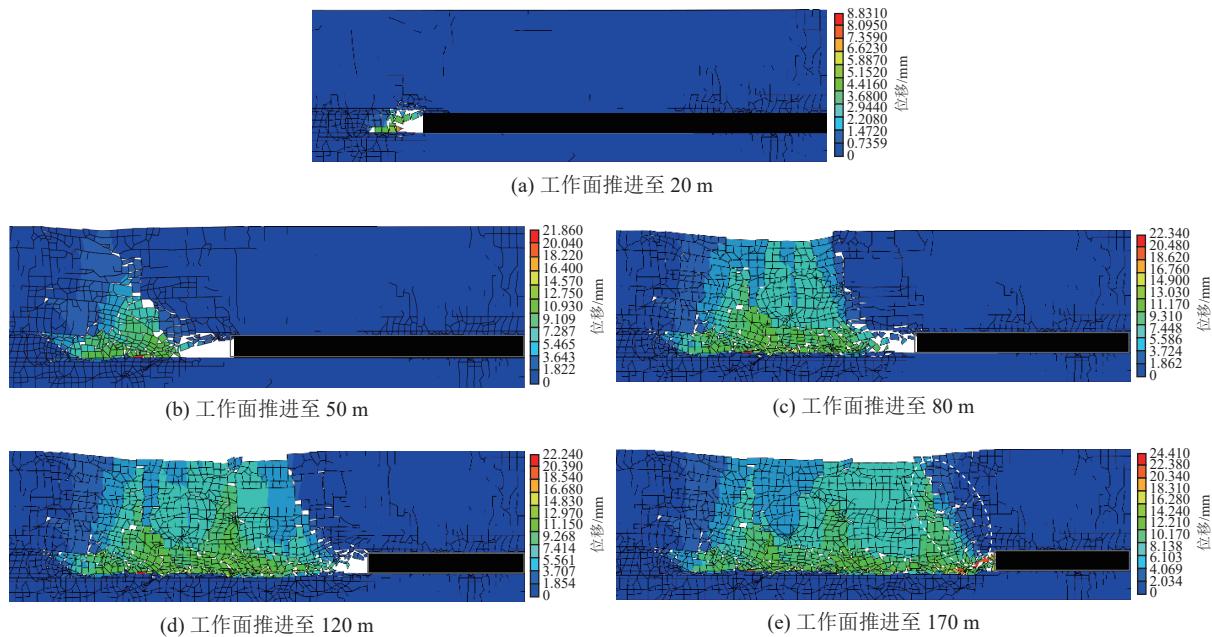


图4 工作面推进过程中覆岩位移场与裂隙分布

Fig.4 displacement field and crack distribution of overlying rock during the advancement process of the working face

黄土层底界,此时黄土层的最大下沉位移约1.8 m。

当工作面推进至80 m,煤层顶板灰岩将形成大面积悬顶。而在工作面后方约15 m位置处灰岩断裂,并形成向采空区倾斜、倾角约72°且贯通地表与工作面的导水裂隙。由于表层黄土塑性变形能力较强,使得其内导水裂隙开度远小于岩层内的采动裂隙,此时黄土层的最大下沉位移约3.7 m。

与以上类似,当工作面推进至120 m、170 m时,在工作面后方8~11 m位置处灰岩断裂,并形成向采空区倾斜、倾角65°~68°且贯通地表与工作面的导水裂隙。黄土层的最大下沉位移约4 m。

综上所述,工作面在推进过程中顶板覆岩不断产生裂隙并向上扩展,当工作面推进至80~120 m左右时,导水裂隙带发育高度已发育至地表。主要导水裂隙带通常位于工作面后方8~20 m位置处,向采空区倾斜、倾角65°~72°。

通过以上数值模型得到河下浅埋厚煤层工作面涌水量数值结果如图5所示。

如图5所示,当工作面推进至170 m后进入雨季,招山河水上涨,河水沿着采动裂隙进入工作面。经过40.9 h后水流进入顶板中砂岩层,87.8 h后水流进入灰岩层,128.7 h后水流进入工作面并形成大量积水。根据水流速度云图(图5)及图4e可知,水流的主要下泄路径为工作面后方8~20 m位置处的导水裂隙。这是因为其他位置处的采动裂隙被重新压实,导致裂隙开度较小、水流量较小。经过175.62 h后,采空区内积水体积达到3 298.4 m<sup>3</sup>,即涌水量为

18.78 m<sup>3</sup>/h。

### 3.4 导水裂隙带发育高度验证与涌水量理论计算

#### 3.4.1 导水裂隙带发育高度

在相邻工作面开展地面钻孔,通过冲洗液消耗量判断导水裂隙带发育高度。钻孔距离开切眼190 m,距离回风巷30 m。钻孔处煤层厚度为7.4 m,煤层顶板与地表间距161 m。

钻孔钻进过程中冲洗液消耗情况如图6a所示,在深度0~39.8 m范围内,冲洗液消耗量总体上低于0.5 m<sup>3</sup>/m;在钻进至39.8 m时,消耗量突然增大至2.5~4.2 m<sup>3</sup>/m;在60 m以深消耗量渐增呈波状变化,多处短时漏水,在89.78 m,112.20 m处尤为明显,并在128.93 m起中止循环。

通过钻孔冲洗液消耗量观测,可得出覆岩导水裂隙带已波及至顶板121.2 m高度处(即地表以下39.8 m)。该数值远大于15404工作面煤层顶板覆岩高度63 m。由此可知,路家村15404工作面导水裂隙带发育高度已延伸至地表(图6b)。

#### 3.4.2 涌水量

15404工作面涌水量主要受其直接顶板上方的招山河水影响。招山河河流平均宽度为3.9 m,河流平均深度0.21 m,河水流速为0.16~0.64 m/s,平均速度为0.31 m/s。在煤层开采条件下,使用大井法理论预计工作面涌水量。计算公式采用潜水完整井稳定流裘布依公式:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg R_0 - \lg r_0} \quad (17)$$

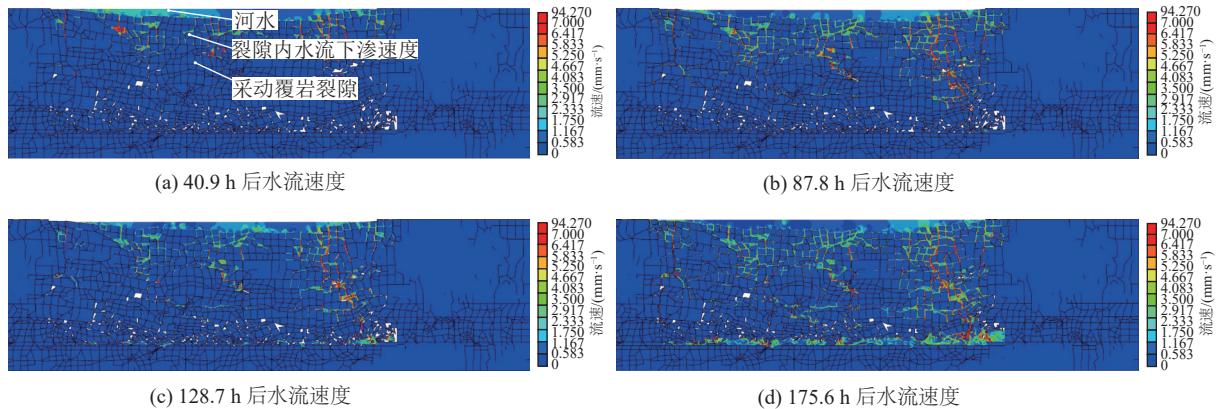
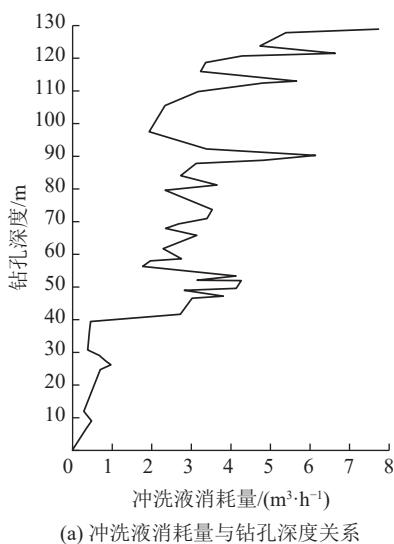


图 5 工作面涌水量模拟结果  
Fig.5 Simulation results of water inflow in the working face



(a) 冲洗液消耗量与钻孔深度关系



(b) 路家村 15404 工作面现场勘查

图 6 导水裂隙带现场观测

Fig.6 Field observation of water conducting fracture zone

式中:  $Q$  为预测矿井正常涌水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $K$  为渗透系数;  $H$  为潜水含水层厚度;  $S$  为水位降深值;  $R_0$  为引用影响半径;  $r_0$  为引用半径。

矿坑天然水位近似水平, 因此引用影响半径  $R_0$

和  $r_0$  引用半径可采用如下式计算:

$$R_0 = r_0 + R, R = 10S \sqrt{K}, r_0 = \sqrt{F/\pi} \quad (18)$$

式中,  $F$  为开采区面积,  $\text{m}^2$ 。

根据路家村煤矿地质材料并结合采矿参数, 计算参数确定为: 渗透系数为  $2.443 \text{ m/d}$ , 潜水含水层厚度为  $12 \text{ m}$ , 水位降深值为  $23 \text{ m}$ , 开采区面积为  $10400 \text{ m}^2$ , 计算得到工作面涌水量为  $20.85 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

以上模拟与理论计算最大涌水量数据有较好的一致性, 表明数值理论与模型具有较好的可靠性。

#### 4 结 论

1) 建立采动岩体破坏-裂隙流体耦合理论及相应的 FDEM-CFD 程序, 可数值实现河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙形成, 以及裂隙内流体运移过程。

2) FDEM 模拟结果表明, 当工作面推进至  $80 \sim 120 \text{ m}$  时, 形成贯通地表的导水裂隙。主要导水裂隙带位于工作面后方  $8 \sim 20 \text{ m}$  位置处, 向采空区倾斜、倾角  $65^\circ \sim 72^\circ$ 。

3) CFD 预测地表招山河水的主要下泄路径为工作面后方  $8 \sim 20 \text{ m}$  位置处的导水裂隙。采空区内涌水量为  $18.78 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

#### 参考文献(References):

- [1] 丁百川. 我国煤矿主要灾害事故特点及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 109-114.  
DING Baichuan. Features and prevention countermeasures of major disasters occurred in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 109-114.
- [2] 虎维岳, 田干. 我国煤矿水害类型及其防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 92-96.  
HU Weiyue, TIAN Gan. Mine water disaster type and prevention and control countermeasures in China[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 92-96.

- [3] 董书宁,虎维岳.中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J].*煤田地质与勘探*,2007,35(5):34-38.
- DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(5): 34-38.
- [4] 石必明,俞启香,周世宁.保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J].*中国矿业大学学报*,2004,33(3):259-263.
- SHI Biming, YU Qixiang, ZHOU Shining. Numerical simulation of far-distance rock strata failure and deformation caused by mining protecting stratum[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(3): 259-263.
- [5] LIU H, ZHANG Y. Numerical simulation of the failure process and mechanical behavior of a rock material with nonpersistent cracks under compression[J]. *Arabian Journal For Science And Engineering* 2018,43, 3673-3683.
- [6] 祝凌甫,闫少宏.大采高综放开采顶煤运移规律的数值模拟研究[J].*煤矿开采*,2011,16(1):11-13,40.
- ZHU Lingfu, YAN Shaohong. Numerical simulation of top-coal movement rule in fully-mechanized caving mining with large mining height[J]. *Coal Mining Technology*, 2011, 16(1): 11-13, 40.
- [7] 刘红元,刘建新,唐春安.采动影响下覆岩垮落过程的数值模拟[J].*岩土工程学报*,2001,23(2):201-204.
- LIU Hongyuan, LIU Jianxin, TANG Chun'an. Numerical simulation of failure process of overburden rock strata caused by mining excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 201-204.
- [8] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 45(5): 601-620.
- [9] 杨贵.综放开采导水裂隙带高度及预测方法研究[D].青岛:山东科技大学,2005.
- YANG Gui. Study on the height of water flowing fractured zone and prediction method in fully mechanized sub-level caving[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [10] 张吉雄.矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- ZHANG Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal winning technology and its engineering applications[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [11] 李墨,王金安.金沙河下采煤地表移动变形与导水裂隙带高度预测分析[J].*中国矿业*,2012,21(8):120-124.
- LI Zhao, WANG Jinan. Predictive analysis of ground deformation and water flowing fracture height mining under Jinsha River[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(8): 120-124.
- [12] 周昊楠.均质/非均质岩石热力学特性的离散元模拟与试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- ZHOU Haonan. Simulation study on mechanical properties of heterogeneous composite rock and discrete element method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [13] 刘卫群,唐珺,蔺海晓.渗流随机有限元程序设计及煤层顶板涌水预测[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2012,31(3):310-314.
- LIU Weiqun, TANG Jun, LIN Haixiao. Stochastic finite element program of seepage and application in forecasting water burst at coal seam roof[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2012, 31(3): 310-314.
- [14] 吴雪峰.含砂层开采顶板突水溃砂机理的细观数值模拟研究[J].*陕西煤炭*,2017,36(1):65-68.
- WU Xuefeng. Microscopic numerical simulation study on the mechanism of water and sand inrush from roof in the sand contained layer mining[J]. *Shaanxi Coal*, 2017, 36(1): 65-68.
- [15] 杨天鸿,唐春安,刘红元,等.承压水底板突水失稳过程的数值模型初探[J].*地质力学学报*,2003,9(3):281-288.
- YANG Tianhong, TANG Chun'an, LIU Hongyuan, et al. Numerical model of the instability-failure process of the coal-bed floor due to confined water inrush[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(3): 281-288.
- [16] 丁其乐.端帮压煤井工开采覆岩运动规律及控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- DING Qile. Overlying strata movement law and control of underground mining in end slope[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [17] 李浩,白海波,马立强,等.双系煤层采动导水裂隙演化规律的FDEM耦合模拟研究[J].*煤炭学报*,2022,47(12):4443-4454.
- LI Hao, BAI Haibo, MA Liqiang, et al. Research on the evolution law of water flowing fractures in the Jurassic and Carboniferous coal seams based on FDEM simulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4443-4454.
- [18] BENZEGGAGH M L, KENANE M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(4): 439-449.
- [19] 路德春,杜修力,闫静茹,等.混凝土材料三维弹塑性本构模型[J].*中国科学:技术科学*,2014,44(8):847-860.
- LU Dechun, DU Xiuli, YAN Jingru, et al. A three-dimensional elastoplastic constitutive model for concrete[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(8): 847-860.
- [20] Ladanyi B, Archambault G. Direct and indirect determination of shear strength of rock mass[C]//AIME Annual Meeting, Las Vegas, Preprint. 1980(80-25): 16.
- [21] 李晓杰,闫鸿浩,王小红,等.Mie-Grüneisen状态方程的物理力学释义[J].*高压物理学报*,2014,28(2):227-231.
- LI Xiaojie, YAN Honghao, WANG Xiaohong, et al. A physical mechanics paraphrase on Mie-grüneisen equation of state[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(2): 227-231.
- [22] 华解明.“大井法”预测矿井涌水量问题探讨[J].*中国煤炭地质*,2009,21(6):45-47.
- HUA Jieming. Questioning on mine water inflow “virtual large diameter well” method prediction[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(6): 45-47.