

采动岩体损伤与断层冲蚀协同致灾时空演化机制

姚邦华^{1,3}, 李 硕¹, 杜 锋^{2,3}, 李振华^{2,3}, 张勃阳³, 曹正正³, 王 戈¹

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘 要:随着我国煤矿开采向深部延伸, 断层突水成为威胁煤矿安全生产的重大灾害之一。基于采动诱发断层突水相关研究成果, 笔者提出了采动岩体损伤破裂-破碎岩体(断层)冲蚀协同致灾的突水概念模型, 推导了 2 种介质的渗透性演化方程, 系统性构建了工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同致灾力学模型; 数值模拟研究了采动岩体变形破坏、断层内颗粒运移以及渗流通道演化特征, 系统性阐释了采动诱发断层突水的渗流灾变时空演化机制。研究表明: ①随着工作面不断推进, 底板采动岩体损伤场与断层冲蚀裂隙相连通, 形成了含水层—断层—采动裂隙—工作面的渗流路径, 并随着冲蚀时间增加, 最终发展成为数条优势导水通道, 造成工作面涌水量的急剧增大并发生滞后突水。②随着渗流时间增加, 断层内部涌水量、裂隙开度均表现为缓变—突增—稳定 3 个阶段, 冲蚀颗粒体积分数则呈现先增大后减小的变化趋势。③在研究矿区地质条件下, 为预防发生断层突水, 可采取超前注浆或留设防水煤柱等方法, 超前注浆时间应在底板裂隙带连通断层之前, 若不采取注浆措施则合理防水煤柱的留设宽度不应低于 20 m。

关键词: 断层突水; 采动岩体; 冲蚀作用; 突水通道

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2212-10

Mechanical model of deformation-seepage-erosion for Karst collapse column water inrush and its application

YAO Banghua^{1,3}, LI Shuo¹, DU Feng^{2,3}, LI Zhenhua^{2,3}, ZHANG Boyang³, CAO Zhengzheng³, WANG Ge¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: With the extension of coal mining in China, fault water inrush has become one of major disasters threatening the safety of coal mine production. Based on the research results related to the mining-induced fault water inrush, this paper proposes a conceptual model of water inrush caused by the erosion synergy of mining-induced rock mass damage rupture and fractured rock mass (fault), derives the permeability evolution equation of the two media, and systematically constructs the cooperative disaster causing mechanism model between mining failure and particle erosion inside faults. The numerical simulation is conducted to study the deformation and failure of rock mass, the particle transport in faults and the evolution characteristics of seepage channel, and systematically explain the temporal and spatial evolution mechanism of seepage catastrophe caused by mining-induced fault inrush. The results show that: ① With the continuous advancement of

收稿日期: 2023-03-26 修回日期: 2023-08-31 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0394

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274193, 52274079, 52174073)

作者简介: 姚邦华 (1984—), 男, 山东昌乐人, 副教授, 博士。E-mail: yaobanghua@126.com

通讯作者: 杜 锋 (1984—), 男, 安徽肥东人, 副教授, 博士。E-mail: dufeng@hpu.edu.cn

引用格式: 姚邦华, 李硕, 杜锋, 等. 采动岩体损伤与断层冲蚀协同致灾时空演化机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2212-2221.

YAO Banghua, LI Shuo, DU Feng, et al. Mechanical model of deformation-seepage-erosion for Karst collapse column water inrush and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2212-2221.



移动阅读

working face, the damage field of mine floor rock mass is connected with the fault erosion fracture, forming a seepage path of aquifer-fault-mining fracture-working face, and with the increase of erosion time, it finally develops into several dominant water diversion channels, resulting in a sharp increase in water inflow at the working face and a lagging water inrush. ② With the increase of seepage time, the water inflow and fracture opening degree inside faults all show three stages: slow change, sudden increase and stable, and the erosion particle concentration shows a trend of first increasing and then decreasing. ③ Under the geological conditions of the mining area studied in this paper, in order to prevent the occurrence of fault water inrush, the methods such as advanced grouting or leaving water prevention coal pillars can be adopted, and the advance grouting time should be before the bottom plate fracture zone connects faults, if grouting is not applied, the width of the reasonable water prevention coal pillar should not be less than 20 m.

Key words: fault water inrush; quarried rock mass; erosion; water inrush channels

随着我国煤矿开采逐渐向深部延伸,重大灾害发生的几率呈增长态势,其中突水是最为严重的矿井灾害之一。据统计,在2012—2022年间,全国煤矿共发生水灾致死事故118起,死亡450余人^[1]。研究表明,我国高达80%以上的突水事故与断层相关,因此,断层突水害防治一直是地下工程研究的热点与难点。

多年来,相关研究人员针对断层突水机理开展了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。李博等^[2]通过理论分析并建立了断层突水的Forchheimer非达西流、N-S非线性渗流模型,并对巷道富水型断层突水动态过程进行了数值模拟分析。史莉红等^[3]将相似材料实验平台与自制承压水导升系统相结合,对注浆前后工作面推进过程中断层带围岩应力演化、裂隙发育以及承压水导升特性进行了系统研究。刘树才等^[4]通过试验给出了采动过程中煤层底板岩层产生导水裂隙时的导电性变化规律,并以此为基础建立底板采动导水裂隙带动态演化地电模型,利用三维电法正演软件对此地电模型进行正演数值模拟,得出煤层底板导水裂隙演化过程中的视电阻率响应特征。黄存捍等^[5]针对煤层底板隐伏小断层突水过程,应用RFPA-FLOW^{2D}软件进行模拟计算分析。结果表明:在矿压和水压共同作用下,煤层底板破坏过程经历了小断层活化、小断层活化区扩展和裂隙贯通3个阶段;隐伏小断层越发育,底板破坏区贯通强度越大,煤层底板发生突水的可能性也越大。ZHANG等^[6]探讨了任楼煤矿主要含水层在开采作用下的水化学时空演化规律,收集了不同时期3个主要突水含水层的地下水样品,分析其主要成分,建立突水源判别模型。SUN等^[7]使用Comsol数值模拟软件,分析了含隐伏断层的煤层底板突水通道的形成和演化规律,结果表明,随着工作面的推进,应力逐渐集中在隐伏断层附近,且断层内部的流速远大于底板中的流速,表明隐伏断层大大增加了煤层底板突水危险性;ZHENG等^[8]提出了一种新的参数“活化系数”来描述断层带活化过程,并建立了活化系数与渗透系数的功能函数关系,利用不同情况的数值

案例来确定该函数参数,最后提出了1种突水风险评价方法。杨善安^[9]较为细致地阐述了断层位置及要素与断层突水之间的关系,研究了最容易发生工作面断层突水的断层位置。杨映涛等^[10]开展了底板断层突水的相似模拟实验研究,分析了断层位置和断层倾角对其突水的影响。刘燕学^[11]研究了断层影响下煤层底板突水机理,表明断层带的存在大大增加了底板突水的危险性;李海龙等^[12]针对工作面推过底板后,底板裂隙破坏深度会出现滞后加深的现象,以某矿现场地质条件为依托,采用相似模拟手段,模拟得到采动动载作用下底板岩层裂隙演化的规律;武强等^[13]对于断层滞后突水弱化机理及主控因素进行了深入研究,提出了煤层底板断层突水时间弱化效应的新概念;周钢等^[14]采用相似模拟手段,分析了煤层开采顺序、煤柱尺寸及推进方向对断层突水的影响;张庆艳等^[15]利用可考虑质量迁移及地应力状态的突水突泥试验系统开展了不同条件下的断层破碎带突水突泥灾害演化过程模拟试验,研究结果表明断层内的充填物颗粒迁移是诱发断层突水的重要原因。煤矿断层突水是采动应力和承压水共同作用的结果,也可归结为断层裂隙扩展和断层突水通道的形成过程。黄润秋等^[16]从断裂力学角度出发,对深埋隧道突水过程中的水力劈裂作用进行分析,给出了突水发生的临界水头压力值以及裂隙开度的变化值,可间接得到流固耦合作用下裂隙岩体的渗透系数;马丹等^[17]构建了弱胶结断层岩体蠕变-冲蚀耦合突水模型。该模型拓展了连续等效介质渗流理论,研究了弱胶结断层岩体突水灾变过程的时空演化特征。张玉军等^[18]通过分析底板采动应力场空间分布规律,构建含隐伏断层底板承压水导升力学模型,并基于半无限体理论推导了采动影响在底板空间的应力传递规律表达式,通过FLAC^{3D}模拟分析了隐伏断层倾角对承压水采动导升规律的影响。

综上所述,针对采动诱发断层突水问题,国内外学者进行了大量研究,相关学者普遍认为在采动影响下,工作面附近煤岩层在卸荷作用下产生损伤破坏,

造成裂隙扩展并沟通了导水断层,最终诱发了断层突水。笔者在总结相关研究成果的基础上,提出了断层突水的概念模型,认为采动裂隙导通断层是诱发断层突水的必要条件而非充分条件。断层破碎带内部由弱胶结岩体构成,孔裂隙高度发育,内含泥质填充物,胶结强度低,受冲蚀作用影响,填充物发生迁移运动,造成岩体裂隙扩展,渗透率变大,这是诱发断层突水的另一个必要条件。因此,笔者认为在围岩采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同作用下,围岩损伤裂隙与断

层相连通,形成了从含水层—断层—采动裂隙—工作面的渗流路径,最终引起工作面突水,如图1所示。

为了从本质上揭示采动诱发断层突水机理,笔者分别建立岩体损伤—渗流方程、破碎岩体冲蚀—渗流方程,构建工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同致灾力学模型;数值模拟研究采动岩体变形破坏、断层内部颗粒运移以及渗流通道演化特征,系统阐释采动诱发断层突水的渗流灾变时空演化机制。并将研究成果应用于断层突水预测,为断层煤柱合理留设提供依据。

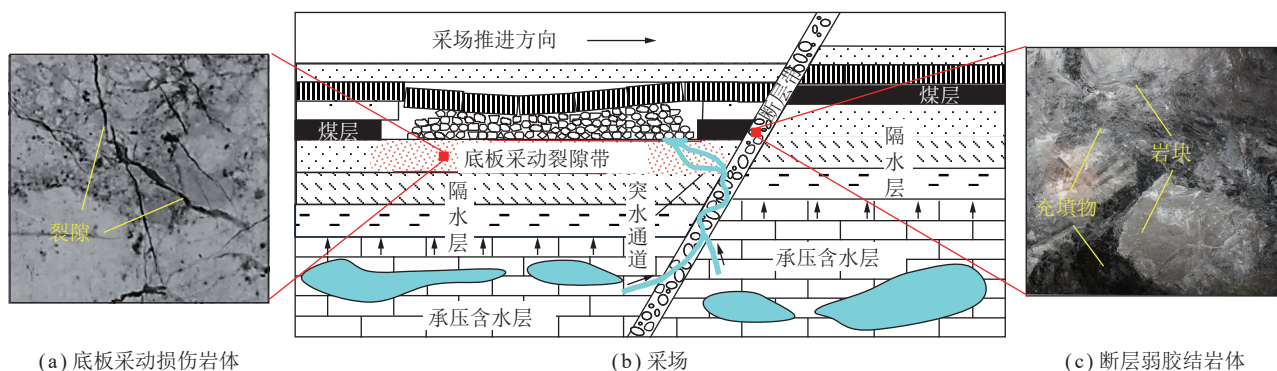


图1 工作面围岩采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同突水概念模型

Fig.1 Conceptual model of synergistic water inrush between mining failure and particle erosion inside faults of surrounding rock of working face

1 突水力学模型的建立

为了研究工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀作用协同下的突水特征,需建立2者协同作用下的突水力学模型,但由于2者的作用机制不同,所需力学模型不同,因此,分别建立岩体损伤—渗流模型和破碎岩体冲蚀—渗流模型,并建立耦合关系。最终得到工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同致灾力学模型。

1.1 岩体损伤—渗流模型

为研究岩体渗流特征,将其视为双重孔隙结构,如图2(a)所示,其中岩体裂隙是流体流动的主要通道。

根据岩石力学相关理论,岩体在达到峰值强度前的弹性阶段内,岩体裂隙开度的变化是可以恢复的;然而,当达到峰值强度后,岩体基质出现损伤破裂,岩体裂隙度也大幅度增加,此时,岩体出现不可恢复的内部损伤,如图2(b)所示。

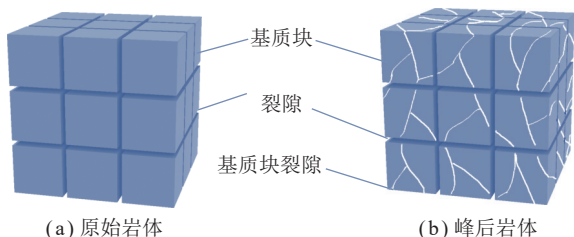


图2 岩体损伤—渗流几何模型

Fig.2 Geometric model of rock damage-seepage

因此,将岩体损伤—渗流模型的建立分为2个阶段^[19],如图3所示。一是岩体峰值强度前的弹性阶段,岩体的渗透率 k 可表示为

$$k = k_0 e^{-3C_f(\sigma_e - \sigma_{e0})} \quad (1)$$

式中, k_0 为岩体的初始渗透率; C_f 为裂隙压缩系数, $C_f = \frac{1}{K_p} - \frac{1}{K}$; K_p 为煤体裂隙的体积模量,Pa; K 为煤体的体积模量,Pa; σ_e 为有效应力, $\sigma_e = \sigma - p$; σ 为应力, Pa; p 为孔隙压力; σ_{e0} 为岩体的初始有效应力。

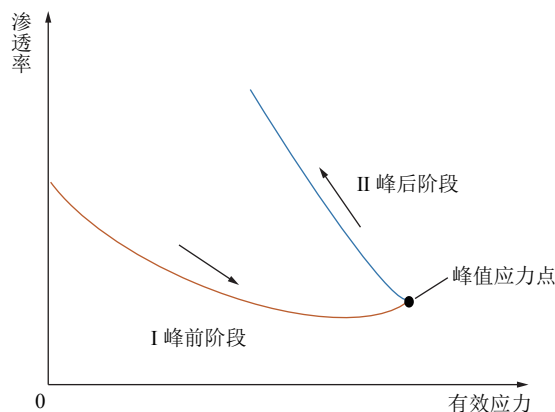


图3 岩体渗透率演化

Fig.3 Evolution of rock mass permeability

二是岩体峰值强度后的阶段,此时需要考虑损伤对岩体裂隙及渗透率的影响,岩体的渗透率 k 可表

示为

$$k = k_0 e^{-3C_f \alpha D (\sigma_c - \sigma_{c0})} \quad (2)$$

式中, α 为损伤对渗透率的影响系数; D 为损伤变量, 可以定义为

$$E = (1 - D)E_0 \quad (3)$$

式中, E 和 E_0 分别为处于损伤状态和无损伤状态的岩体的弹性模量。

为了确定数值分析单元的损伤变量, 分别采用最大拉应力准则和莫尔-库仑准则对拉伸损伤和剪切损伤进行判断, 其定义公式为

$$\begin{cases} F_1 = \sigma_1 - f_t = 0 \\ F_2 = -\sigma_3 + \sigma_1 [(1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)] - f_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_1 、 F_2 为定义的 2 个判定变量; σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力; f_t 和 f_c 分别为岩体的单轴抗拉强度和抗压强度; φ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

单元的应力类型损伤变量可以表示为

$$D = \begin{cases} 0, & F_1 < 0, F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\sigma_t}{f_{t0}} \right|^2, & F_1 = 0, dF_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\sigma_c}{f_{c0}} \right|^2, & F_2 = 0, dF_2 > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_t 和 σ_c 分别为最大正应力和最小正应力; f_{t0} 和 f_{c0} 分别为拉应力和剪切应力; d 为加卸载。

1.2 破碎岩体冲蚀-渗流模型

1.2.1 几何模型

断层内的变质量渗流发展过程是固体、流体以及充填物颗粒 3 者相互影响的耦合过程, 即: 在水流冲蚀下, 细小固体颗粒物运移流失, 使得断层的孔裂隙结构发生变化, 孔裂隙结构变化引起渗透性改变, 渗透性改变导致应力状态以及冲蚀程度的变化。断层煤岩体内部结构也可以看作是 1 种双重孔隙介质: 其中岩块为基质块, 岩块间裂隙为流体渗流的主要通道, 其几何模型如图 4 所示^[20]。

1.2.2 应力场方程

基于上述双重孔隙几何模型, 取断层特征微元体, 如图 4 所示, 设基质块边长为 a , 裂隙宽度为 b , 且 $b \ll a$, 则微元体体积 $V = (a+b)^3 \cong a^3$ 。设基质块的孔隙率为 ϕ_m , 裂隙率为 ϕ_f , 则微元体的空隙度 ϕ 为

$$\phi = \phi_m + \phi_f = \phi_m + \frac{(a+b)^3 - a^3}{(a+b)^3} \cong \phi_m + \frac{3b}{a} \quad (6)$$

则断层内破碎岩体应力场控制方程可表示为

$$(\lambda + G)\varepsilon_{V,i} - G\nabla^2 u_i + \phi p_{h,i} = 0 \quad (7)$$

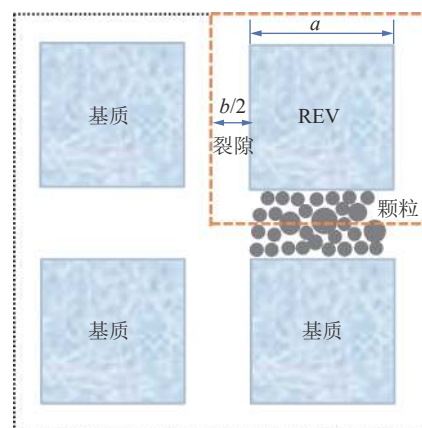


图 4 破碎岩体冲蚀-渗流几何模型

Fig.4 Geometric model of erosion-seepage of broken rock mass

式中, λ 、 G 为破碎岩体介质的等效 Lamé 常数; ∇ 为梯度算子; $u_i (i=1,2,3)$ 为固体骨架在 $x_i (i=1,2,3)$ 方向的位移; ε_V 为体积应变; p_h 为饱和孔隙水压力。

1.2.3 流体运动方程

研究表明^[21], 破碎岩体渗流非线性特征明显, 因此笔者采用布里克曼方程来表征流体控制方程:

$$-\frac{\eta}{k_s} q + \nabla \left[-p + \frac{\eta}{\phi} (\nabla q + (\nabla q)^T) \right] = 0 \quad (8)$$

式中, q 为渗流速度, m/s; k_s 为微元体渗透率; T 为温度, K; 真实速度 $v_i = q_i / \phi$, ($i = 1, 2, 3$); η 为流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

忽略孔隙对微元体渗透性的影响, 微元体的渗透率和裂隙率之间满足三次方关系, 则微元体的渗透率可表示为

$$k_s = k_0 \left(\frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \right)^3 \quad (9)$$

式中, ϕ_{f0} 为微元体的初始裂隙率。

1.2.4 质量守恒方程

对于微元体而言, 流入和流出微元体的颗粒和流体质量是相等的, 根据质量守恒定律, 可以推导得到微元体内颗粒的质量守恒方程^[22]为

$$\left[\frac{3}{a} \frac{\partial(bC)}{\partial r} + \frac{\partial(C\phi)}{\partial r} \right] + \nabla(Cq) = \frac{3}{a} \frac{\partial b}{\partial r} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (10)$$

式中, r 为时间, s; C 为颗粒的体积分, %。

流体的质量守恒方程

$$\left\{ \frac{3}{a} \frac{\partial[b(1-C)]}{\partial r} + \frac{\partial[(1-C)\phi]}{\partial r} \right\} + \nabla[(1-C)q] = 0 \quad (11)$$

1.2.5 裂隙率演化方程

由笔者之前的研究^[23]可知微元体在应力和冲蚀共同作用下的裂隙演化控制方程为

$$\frac{3}{a} \frac{\partial b}{\partial r} = \frac{1-R_m}{3} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial r} + \lambda_1 \rho_s (b_{\max} - b) C |q| \quad (12)$$

其中, λ_1 为常数; ρ_s 为颗粒密度; b_{\max} 为裂隙最大宽度; R_m 为弹性模量衰减量, $R_m = 1 - E/E_m$, 其中 E_m 为微元体基质弹性模量, $|q| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}$ 为流体的渗流速度, q_1 、 q_2 、 q_3 为不同速度分量。

综上, 式 (7)、(11) 和 (12) 共同构成了破碎岩体冲蚀-渗流模型, 模型包含了固体变形-流体渗流-充填物颗粒迁移之间的耦合。

1.3 模型之间的耦合关系

在分别获得岩体损伤-渗流模型和破碎岩体冲蚀-渗流模型后, 两模型通过岩体渗透性建立起耦合关系。底板岩体受采动作用影响, 发生损伤, 裂隙发育, 岩体渗透性变强; 断层岩体受冲蚀作用影响, 在固体变形-流体渗流-物颗粒迁移 3 者耦合影响下, 破坏加剧, 岩体渗透性变强。耦合得到工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同致灾力学模型, 耦合关系如图 5 所示。

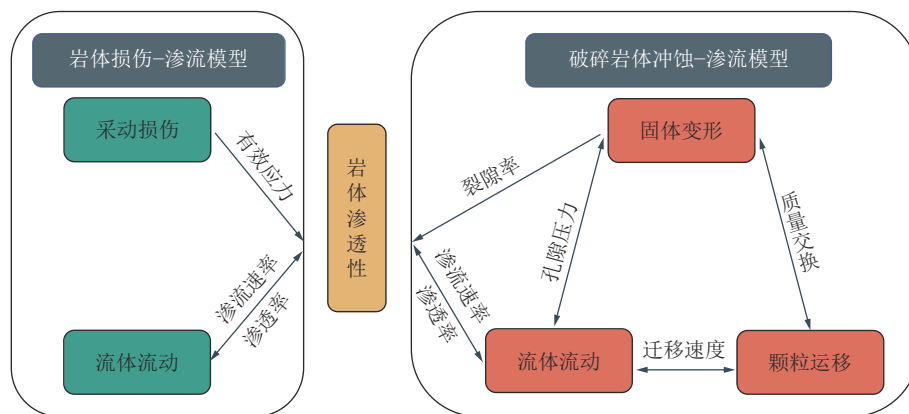


图 5 耦合关系示意

Fig.5 Schematic diagram of coupling relationship

2 断层渗流突水模型数值分析

2.1 工程背景

某矿核定生产能力为 60 万 t/a, 设计开拓方式为立井单水平上山、下山开拓; 可采煤层为二叠系山西组二₁ 煤层, 煤层厚 5 m, 采用综采放顶煤工艺。该矿地质情况比较复杂, 水害严重, 自建井以来, 共发生突水事故 30 余次。其中, 2017 年该矿 1903 工作面发生底板突水事故, 造成矿井被淹, 直接经济损失达 2 000 余万元。根据调查结果, 确定为 F1061 断层诱发工作面突水事故, 突水水源为底板奥陶系灰岩水。整理得到的突水量随时间变化, 见表 1。

表 1 不同时刻的断层涌水量

Table 1 Fault water inflows at different times

时间/h	0	1	6	10	14
涌水量/(m ³ · h ⁻¹)	25	35	300	1 300	1 500

根据矿井地质资料, 奥陶系灰岩含水层距二₁ 煤间距最小 20.58 m, 最大 65.38 m, 平均 43.75 m 富水性中等。F1061 断层为正断层, 走向 NE, 倾向 NW, 倾角约 50°, 落差为 9 m。断层带内岩体主要包括胶结岩、角砾岩以及碎屑充填颗粒等。此外, 隔水层位于煤层底板与含水层之间, 主要由砂质泥岩、泥岩等组成, 厚

35.22~48.90 m, 平均 41.15 m, 层位稳定, 隔水性能强。

2.2 数值计算模型建立

2.2.1 断层内裂隙非均匀性表征

为深入揭示断层突水通道时空演化机制, 笔者考虑了断层内初始裂隙分布的非均质性, 并用 Weibull 概率密度函数进行表征:

$$f(b) = \frac{m}{\bar{b}_0} \left(\frac{b}{\bar{b}_0} \right)^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{b}{\bar{b}_0} \right)^m \right] \quad (13)$$

式中, \bar{b}_0 为平均裂隙开度; m 为均匀性指数。

2.2.2 断层渗流突水数值模型建立

根据该断层突水区域有关地质资料, 得到与实际相符的数值计算模型如图 6 所示, 模型的几何尺寸为 250 m×100 m, 煤层厚度为 5 m, 断层位于模型中间, 高 100 m, 宽度为 10 m; 工作面每次推进 10 m。对于模型的变形场边界条件: 模型底部约束垂直方向的位移, 左右两边约束水平方向的位移, 模型上覆岩层厚度为 400 m, 以均布载荷形式加载在模型上边界, $q=10$ MPa, 断层内初始裂隙分布满足 Weibull 分布, 各岩层岩力学参数见表 2, 数值模拟参数见表 3。对于模型的渗流边界条件: 含水层水压为 $p=5$ MPa, 模型四周均为不透水边界, 工作面采空区孔隙水压力为大气压力, 模型的初始孔隙压力也为大气压力。

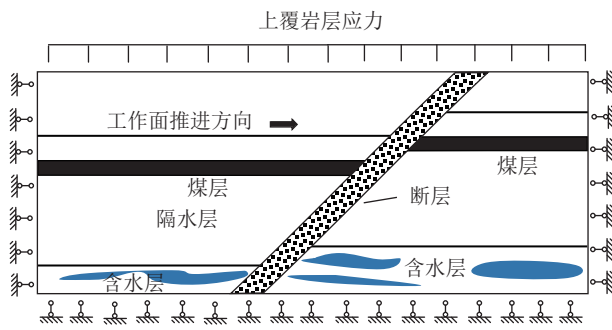


图6 数值计算模型示意

Fig.6 Schematic diagram of the geometric model

表2 煤层层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of rock formations

岩性	弹性模量/ GPa	泊松比 μ	黏聚力 c / MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透率 k / 10^{-15} m^2
顶板	5	0.30	3.5	30	0.01
煤	2	0.32	1.5	28	0.05
底板	5	0.30	3.5	30	0.01
含水层	10	0.25	4.0	35	1.00
断层	1	0.35	0.5	25	0.10

表3 断层渗透特性主要参数

Table 3 Main parameters of fault permeability characteristics

模拟参数	取值
水动力黏度 $\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.001
初始渗透率 $k_0/10^{-13} \text{ m}^2$	1.0
裂隙溶蚀系数 λ_1/m^{-1}	0.01
悬浮颗粒初始体积分数 $C_0/\%$	0.01
均匀性指数 m	8

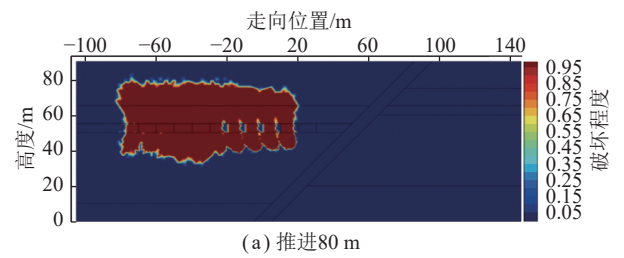
2.3 数值模拟结果

将理论推导的结果利用多物理场耦合软件 COMSOL 求解, 得到数值模拟结果。

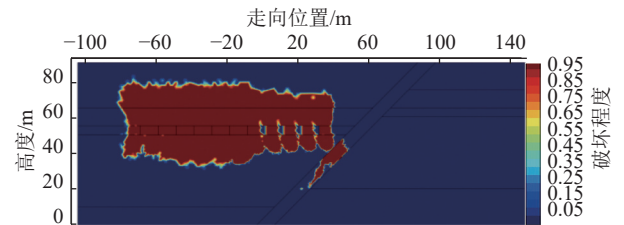
2.3.1 采场塑性区及垂直应力变化规律

图7给出工作面不同推进距离条件下塑性区分布云图, 从图7可以看出: 当工作面推进到80 m时, 煤层底板破坏深度为13 m; 100 m时, 煤层底板破坏深度达到14 m左右, 此时, 采场底板的裂隙带与导水断层相连接, 断层突水的危险性增加。同时, 采动对断层有一定的“活化”作用, 断层内部的破坏范围和深度大于煤层底板完整岩层的破碎程度。

图8给出工作面不同推进距离条件下采场垂直应力分布云图, 从图8可以看出: 工作面的开采使得采空区上部和下部岩层出现卸压, 相应的工作面两侧



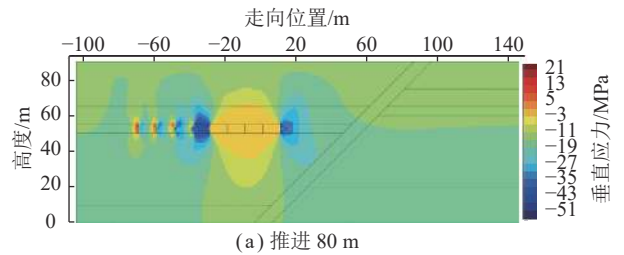
(a) 推进80 m



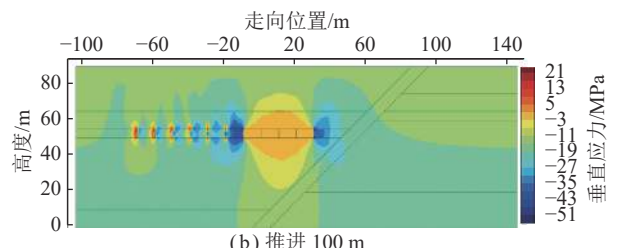
(b) 推进100 m

图7 工作面不同推进距离条件下塑性区分布云图

Fig.7 Cloud distribution of plastic zones under different propulsion distances of the working surface



(a) 推进 80 m



(b) 推进 100 m

图8 工作面不同推进距离条件下垂直应力分布云图

Fig.8 Vertical stress distribution cloud under different propulsion distances of the working surface

煤壁发生应力集中。当工作面推进到80 m之后, 工作面前方应力集中区基本接近底板断层, 当推进到100 m时, 应力集中区到达断层。

2.3.2 断层内裂隙开度变化规律

图9给出不同时刻裂隙开度变化云图, 从图中可以看出, 断层裂隙开度随冲蚀的不断进行而逐渐增大, 其中断层塑性区域增加较快。从图9可以看到, 在渗流时间为5 h之前, 模型裂隙开度较初始基本没有变化; 5 h之后, 首先是在断层塑性区, 一条渗流通道正在逐渐形成, 模型的最大裂隙开度增加到0.6 mm; 10 h之后, 最大裂隙开度进一步增加到0.7 mm, 之后一直到15 h, 最大裂隙开度基本保持不变, 但达到最大裂隙开度区域不断变大, 最终随着断层裂隙逐渐扩

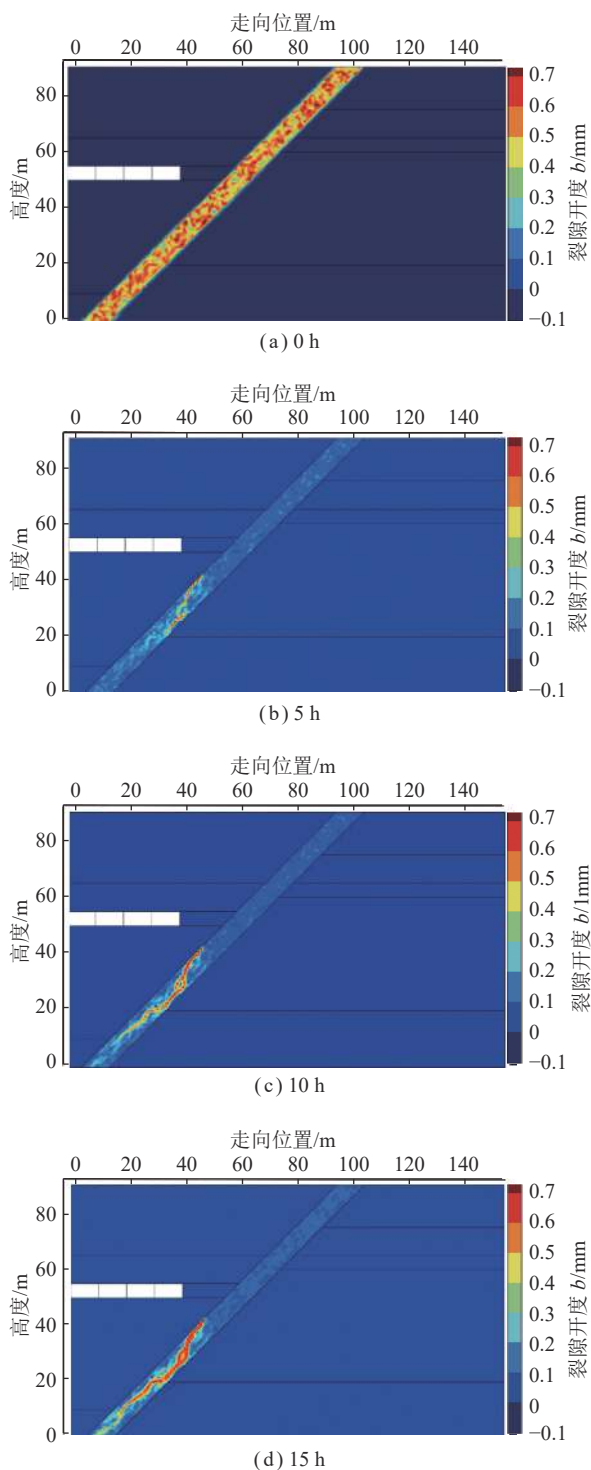


图 9 不同时刻下裂隙开度变化云图

Fig.9 Cloud diagram of fracture opening change at different times

展连通, 渗流通道逐渐贯通, 形成数条渗流优势通道。

2.3.3 断层内冲蚀颗粒体积分数变化规律

图 10 给出断层中不同时刻下冲蚀颗粒体积分数变化云图, 从图 10 可以看出: 颗粒体积分数和裂隙的扩展规律一致。颗粒体积分数在裂隙开度较大的位置明显要比裂隙开度小的区域大。渗流时间在 8~15 h 时, 最大颗粒体积分数为 0.35 左右, 平均颗粒体

积分数逐渐增大, 颗粒分布呈现明显的集聚, 并沿主要的渗流通道运移流失。还可以看到, 颗粒体积分数自下而上逐渐增大。这是因为被冲蚀到流体中的颗粒随着时间增加会越来越多, 并通过裂隙/孔隙随流体逐渐向模型顶部运移, 造成颗粒体积分数的增加。

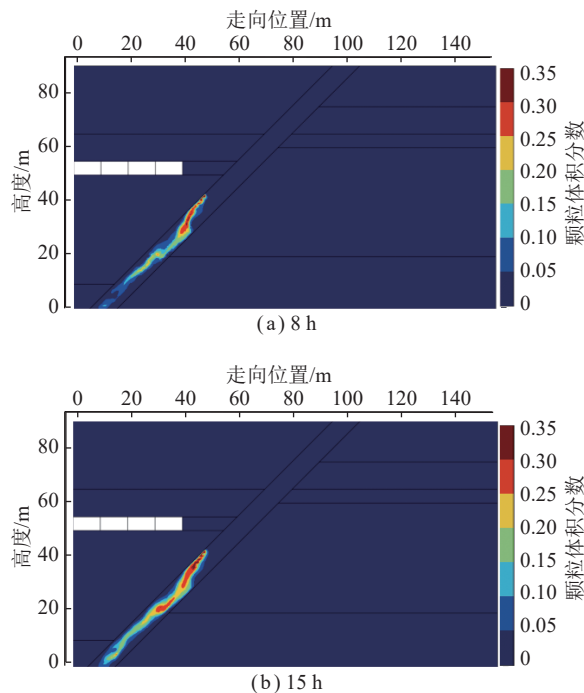


图 10 不同时刻下冲蚀颗粒体积分数变化云图

Fig.10 Cloud map of erosion particle concentration change at different times

图 11 给出断层中某点不同时刻下裂隙开度和冲蚀颗粒体积分数变化曲线, 从图中可以看出: 5.7 h 之前颗粒体积分数和裂隙的扩展规律一致, 随时间快速增大, 这是因为工作面采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同作用下, 断层岩体进一步破坏, 充填物颗粒不断液化运移、流失, 裂隙开度和冲蚀颗粒体积分数变化迅速。在 5.7 h 后, 裂隙开度不断增大并逐渐保持不

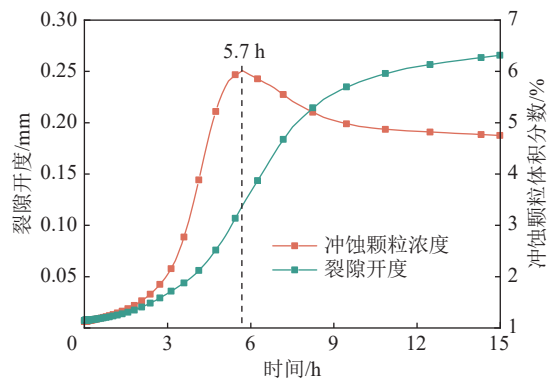


图 11 不同时刻下裂隙开度和冲蚀颗粒体积分数变化曲线

Fig.11 Curves of fracture opening and erosion particle concentration at different times

变, 冲蚀颗粒体积分数下降并逐渐保持不变, 两者变化规律不同, 这是因为在突水发生之前, 充填物颗粒不断积聚使得裂隙通道减小, 冲蚀颗粒体积分数减小, 之后突水通道逐渐贯通, 冲蚀颗粒体积分数和裂隙开度大小逐渐稳定。

2.3.4 采场渗流速度变化规律

图 12 给出了不同时刻下渗流速度分布云图, 从图中可以看出: 渗流流速也与裂隙的扩展规律相关。渗流时间在 8 h 时, 底板裂隙带连通, 但断层内部裂隙未连通, 部分区域渗流速度达到增大。渗流时间在 15 h 时, 渗流速度不断增大, 断层内部的冲蚀裂隙带相连通, 随后与工作面底板裂隙带连通, 突水通道基本形成。

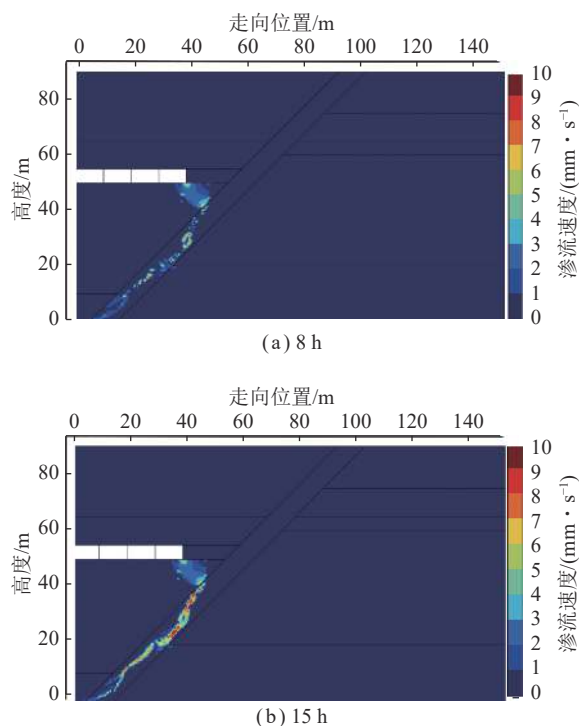


图 12 不同时刻下渗流速度分布云图

Fig.12 Cloud distribution of seepage velocity at different times

2.3.5 采区涌水量变化规律

图 13 给出了涌水量随工作面推进变化曲线, 从图中可以看到, 随着工作面推进距离增加, 涌水量基本呈非线性上升趋势。且当工作面推进到 80 m 之前, 涌水量增加缓慢, 当工作面推进到 100 m 时, 涌水量突增, 其中工作面推进到 40 m 之前, 涌水量很小, 大约为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$, 到 80 m 时, 缓慢增加到 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右, 到 100 m 时, 涌水量急剧增大到 $25 \text{ m}^3/\text{h}$, 表明工作面有发生突水趋势。

图 14 给出了模拟得到的工作面推进到 100 m 后, 断层突水涌水量时变曲线和现场数据关系, 可以看出数值模拟得到的变化趋势与现场数据 2 者基本一致,

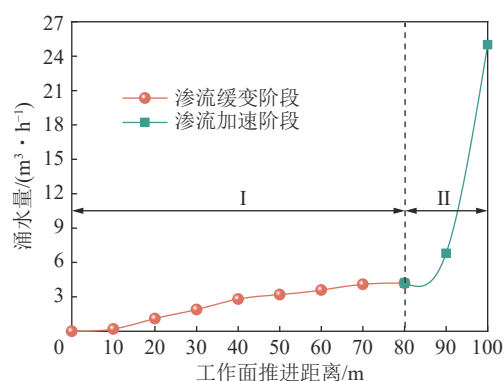


图 13 涌水量随工作面推进变化曲线

Fig.13 Change curve of water inflow with the advancement of the working face

证明了笔者所建立的断层突水力学模型的正确性。从图 14 还可以看出, 初始模型涌水量增加缓慢, 4.5 h 左右开始其增加速度越来越快, 在初始时刻其流量约为 $35 \text{ m}^3/\text{h}$, 而 7.8 h 后涌水量增到 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$, 4.5~7.8 h 时间段内涌水量的变化速度高达 $353 \text{ m}^3/\text{h}^2$ 。可见, 4.5 h 后断层涌水量会陡然增加, 发生突水事故, 该时刻可被称为“突水临界点”。

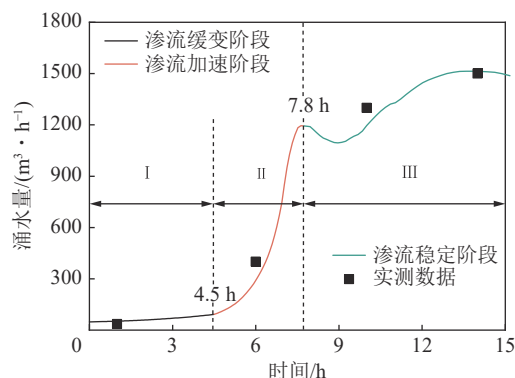


图 14 涌水量随时间变化曲线

Fig.14 Water inflow curve over time

综合图 13、14 涌水量随不同条件的变化曲线, 可以看出冲蚀作用下破碎岩体渗透性表现为缓变—突增—稳定 3 个阶段。而且, 可以看出工作面突水呈现一定的滞后性, 工作面推进到 100 m 时底板裂隙带与断层破碎带相接, 但未立即发生突水, 之后, 裂隙带在承压含水层的作用下, 岩层中原有的裂隙不断被软化 and 扩展, 形成较大的过水通道, 最终引发滞后突水。

3 讨 论

传统上, 相关学者普遍认为单一工作面采动是诱发断层突水的主要原因, 笔者在此基础上考虑另一重要条件, 即断层内部颗粒冲蚀作用, 并将两者有机结合, 认为 2 者的协同作用是诱发断层渗流灾变的根本

原因。通过笔者的研究结果证实了这一观点,即随着工作面的不断推进,底板采动岩体损伤场与断层冲蚀裂隙相连通,形成了含水层—断层—采动裂隙—工作面的渗流路径,并随着冲蚀时间增加,最终发展成为数条优势导水通道,造成工作面涌水量的急剧增大并发生滞后突水,考虑两者协同作用的采动诱发断层突水机制如图 15 所示。

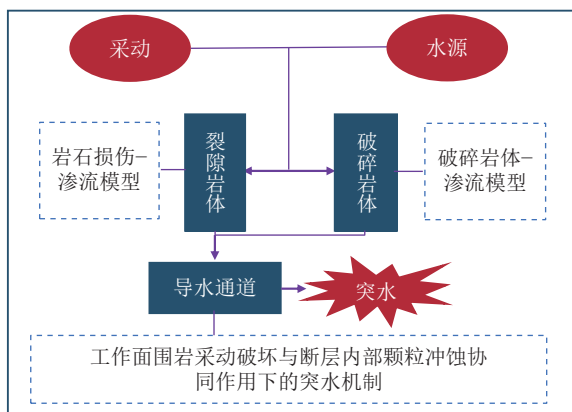


图 15 采动诱发断层突水机制示意

Fig.15 Schematic diagram of fault water inrush model

根据笔者研究结果,诱发断层突水的条件可概况为时空 2 个方面:一方面,随着工作面推进,底板破坏带沟通了导水断层,这是诱发断层突水的空间条件;另一方面,采动裂隙带沟通断层后,断层内部冲蚀作用随时间不断演化,造成颗粒流失,导水性增强,这是诱发断层突水的时间条件。因此为了防止断层突水事故的发生,可针对诱发其突水的时空两方面条件采取不同的措施:对于受采动应力影响的导水断层等地质构造,要按规定留设断层阻隔水煤(岩)柱,例如,在笔者计算条件下,防水煤柱的留设宽度不应小于 20 m;此外,若不考虑留设防水煤柱,则必须对含水层采取疏水降压,或者对断层采取超前预注浆封堵加固措施,防止采动裂隙沟通断层后发生冲蚀灾变和滞后突水。

笔者研究综合考虑了采动岩体破坏与断层内部颗粒冲蚀协同作用,通过理论分析和数值模拟手段,系统性阐释了工作面采动诱发断层突水时空演化机制,并为断层突水防治提供了理论支撑,丰富了煤矿底板突水理论。但是由于深部地下多物理场(温度场、应力场)耦合特征及地下岩体介质结构和水文地质环境的复杂性与不确定性,为了更好的将理论应用于突水灾害防治工作的实践中,仍需针对复杂的物理场耦合环境和不同的岩体赋存条件开展更为深入的研究。

4 结 论

(1) 数值再现了围岩采动破坏与断层颗粒冲蚀协

同作用下的突水全过程,即在围岩采动破坏与断层内部颗粒冲蚀协同作用下,围岩损伤裂隙与断层相连通,形成了从含水层—断层—采动裂隙—工作面的渗流路径,断层内部裂隙在冲蚀下发展成为数条优势导水通道,最终造成了工作面涌水量的急剧增大和突水事故的发生。

(2) 研究结果表明采动岩体以及断层内部破碎岩体渗透性均表现为缓变—突增—稳定 3 个阶段。以此为基础,模拟研究了工作面不同推进距离下断层裂隙开度、悬浮颗粒体积分数及涌水量变化规律。模拟得到结果与现场基本一致,验证了模型的正确性。

(3) 对于受采动应力影响的导水断层等地质构造,要按规定留设断层阻隔水煤(岩)柱,例如,在笔者计算条件下,防水煤柱的留设宽度不应小于 20 m;此外,若不考虑留设防水煤柱,则必须对含水层采取疏水降压,或者对断层采取超前预注浆封堵加固措施,防止采动裂隙沟通断层后发生冲蚀灾变和滞后突水。

参考文献(References):

- [1] 董书宁. 人工智能技术在煤矿水害防治智能化发展中的应用[J]. 煤矿安全, 2023, 54(5): 1-12.
DONG Shuning. Application of artificial intelligence technology in the intelligent development of coal mine water hazard prevention and control[J]. Safety in coal mine, 2023, 54(5): 1-12.
- [2] 李博, 武强, 班文韬. 掘进巷道富水型断层突水多场灾变演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 161-167.
LI Bo, WU Qiang, BAN Wentao. Study on multi-field catastrophe evolution law of water-rich fault inrush in tunneling roadway[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 161-167.
- [3] 史莉红, 武守鑫, 刘冲, 等. 断层带承压水导升模拟试验系统研制与应用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 136-141.
SHI Lihong, WU Shouxin, LIU Chong, et al. Development and application of simulation experiment system for pressurized water guidance in fault zone[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 136-141.
- [4] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348-356.
LIU Shucai, LIU Xinming, JIANG Zhihai, et al. Electromechanical exploration of water conductive fracture evolution law of coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348-356.
- [5] 黄存捍, 黄俊杰, 李振华. 煤层底板隐伏小断层突水数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 44(10): 24-26.
HUANG Cunhan, HUANG Junjie, LI Zhenhua. Numerical simulation of water inrush in hidden small faults of coal seam floor[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(10): 24-26.
- [6] ZHANG Jie, CHEN Luwang, CHEN Yifei, et al. Discrimination of water-inrush source and evolution analysis of hydrochemical environment under mining in Renlou Coal Mine, Anhui Province, China[J].

- Environmental Earth Sciences, 2020, 79(2): 61–73.
- [7] SUN Wenbin, XUE Yanchao, LI Tingting, et al. Multi-field coupling of water inrush channel formation in a deep mine with a buried fault[J]. Mining & Minerals, 2019, 38(3): 528–535.
- [8] ZHENG Zhuo, LIU Rental, ZHANG Qingsong. Numerical simulation and risk assessment of water inrush in a fault zone that contains a soft infill[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(3): 667–675.
- [9] 杨善安. 采场底板断层突水及其防治方法[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 620–625.
- YANG Shan'an. Water inrush and prevention method of stope floor fault[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 620–625.
- [10] 杨映涛, 李抗抗. 用物理相似模拟技术研究煤层底板突水机理[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(SI): 33–36.
- YANG Yingtao, LI Kangkang. Study on water inrush mechanism of coal seam floor using physical similarity simulation technique[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(SI): 33–36.
- [11] 刘燕学. 峰峰煤田煤层底板强度及断裂构造控水作用[J]. 河北煤炭, 1998(3): 21–22.
- LIU Yanxue. Strength of coal seam floor and water control effect of fracture structure in Fengfeng coalfield[J]. Hebei Coal, 1998(3): 21–22.
- [12] 李海龙, 白海波, 马丹, 等. 采动动载作用下底板岩层裂隙演化规律的相似模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 366–372.
- LI Hailong, BAI Haibo, MA Dan, et al. Similar simulation study on fracture evolution law of bottom slate layer under mining dynamic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 366–372.
- [13] 武强, 刘金韬, 钟亚平, 等. 开滦赵各庄矿断裂滞后突水数值仿真模拟[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 511–516.
- WU Qiang, LIU Jintao, ZHONG Yaping, et al. Numerical simulation simulation of water inrush after fault hysteresis in Kailuan Zhaogezhuang mine[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 511–516.
- [14] 周钢, 李世平, 张晓龙. 微山湖下断层煤柱留设与开采技术的模拟试验[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(5): 13–16.
- ZHOU Gang, LI Shiping, ZHANG Xiaolong. Simulation experiment on coal column retention and mining technology in faults under Weishan Lake[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(5): 13–16.
- [15] 张庆艳, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1911–1922, 1932.
- ZHANG Qingyan, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Experimental study on the evolution characteristics of water inrush mud in fault fracture zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1911–1922, 1932.
- [16] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573–576.
- HUANG Runqiu, WANG Xianeng, CHEN Longsheng. Analysis of hydraulic splitting effect in the water inrush process of deep buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573–576.
- [17] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 弱胶结断层岩体蠕变–冲蚀耦合突水模型研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2453–2464.
- MA Dan, DUAN Hongyu, ZHANG Jixiong, et al. Study on creep-erosion coupled water inrush model of rock mass in weakly cemented fault[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(6): 2453–2464.
- [18] 张玉军, 张志巍, 李友伟. 含隐伏断层煤层底板承压水采动导升机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 17–24.
- ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, LI Youwei. Study on the mechanism of pressurized water extraction and guidance mechanism of coal seam floor with hidden fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 17–24.
- [19] 薛熠, 高峰, 高亚楠, 等. 采动影响下损伤煤岩体峰后渗透率演化模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 521–527.
- XUE Yi, GAO Feng Gao, YA Nan. et al Study on the evolution model of post-peak permeability of damaged coal rock mass under the influence of mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(3): 521–527.
- [20] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245–255.
- [21] 杨天鸿, 师文豪, 李顺才, 等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 11(7): 1598–1609.
- YANG Tianhong, SHI Wenhao, LI Shuncai, et al. Research status and development trend of nonlinear seepage water inrush mechanism of broken rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 11(7): 1598–1609.
- [22] 张凤婕, 吴宇, 茅献彪, 等. 煤层气注热开采的热–流–固耦合作用分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 505–510.
- ZHANG Fengjie, WU Yu, MAO Xianbiao, et al. Analysis of heat-fluid-structure interaction in heat injection mining of coalbed methane[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 505–510.
- [23] 姚邦华, 王连成, 魏建平, 等. 煤矿陷落柱突水的变形–渗流–冲蚀耦合模型及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2007–2013.
- YAO Banghua, WANG Liancheng, WEI Jianping, et al. Deformation-seepage-erosion coupling model and application of water inrush in coal mine collapse column[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 2007–2013.