



移动扫码阅读

孙文斌, 杨 辉, 赵金海, 等. 断层突水灾变演化过程划分基础试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 118-128.

SUN Wenbin, YANG Hui, ZHAO Jinhai, *et al.* Basic experimental research on the delineation of the evolutionary process of fault water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 118-128.

断层突水灾变演化过程划分基础试验研究

孙文斌^{1,2}, 杨 辉¹, 赵金海^{1,2}, 薛延东¹, 张晓波¹, 刘倩慧¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建
国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 断层突水严重威胁煤矿开采, 灾害呈滞后性、隐蔽性等特征, 掌握断层突水灾变演化机制、过程规律, 对开展煤矿防治水工作具有重要理论指导意义。通过构建突水演变分析模型, 分析了承压水导升路径和断层带演化特征。采用岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统, 结合声发射和数字散斑技术, 配制含断层破碎带充填物的大尺寸类岩石试样, 研究了双轴加载过程中含不同岩性和产状断层充填物的试样失稳破坏特征, 获得了声发射事件和试样变形特征, 最后采用改造升级的采动底板突水模拟试验系统和应力、水压、并行电法在线监测子系统, 室内再现了采动断层突水演变全过程, 获得了各监测参数演变特征。研究表明: 断层带受开采扰动响应更强烈, 更容易破坏失稳为承压水导升提供空间; 断层充填物的性质决定了断层活化的强度和难易程度, 将一定程度上影响断层突水的时空演化过程; 断层尖端受流固耦合作用明显, 断层带及隔水层产生的裂隙经历萌生—扩展—贯通阶段, 断层与工作面的相对位置关系决定了断层演化带和底板破坏带对接的时空位置; 根据承压水导升路径, 将断层突水过程划分为“断层活化”“贯通导水”“双带”(断层演化带与底板破坏带)对接”3个灾变演化阶段, 实现了断层突水演化过程的阶段划分。

关键词: 断层; 突水通道; 断层活化; 断层充填物; 相似模拟; 灾变特征; 底板突水

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)07-0118-11

Basic experimental research on the delineation of the evolutionary process of fault water inrush

SUN Wenbin^{1,2}, YANG Hui¹, ZHAO Jinhai^{1,2}, XUE Yandong¹, ZHANG Xiaobo¹, LIU Qianhui¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Coal mining is seriously threatened by fault water inrush, showing the disaster characteristics of hysteresis and concealment. Mastering the evolution mechanism and process law of fault water inrush disaster has important theoretical guiding significance for carrying out deep water prevention and control work. By constructing water inrush evolution analysis model, the conduction path of confined water and the evolution characteristics of fault zone are analyzed. Using true triaxial rock test system of coupled stress-seepage, combined with acoustic emission and digital speckle technology, large-size rock-like specimens containing fault fracture zone fillings were designed. The instability and failure characteristics of specimens with different lithologic fillings and fault occurrences during biaxial loading were studied. The acoustic emission events and specimen deformation characteristics were obtained. Finally, the modified and upgraded mining floor water inrush simulation test system and parallel electrical on-line monitoring, stress and water pressure monitoring subsystems were used to reproduce the whole process of mining fault water inrush evolution in the laboratory, and the evolution characteristics of monitoring parameters were obtained. The results show that the response of fault zone to mining disturbance is stronger, and it is easier to destroy and destabilize to provide space for confined water conduction. To a certain extent, the nature of fault fillings determines the difficulty of fault activation, then affects the temporal and spatial evolution process of fault water inrush. The fault tip is obviously affected by fluid-

收稿日期: 2023-03-19 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0350

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51974172, 52274131); 泰山学者工程专项经费资助项目(tsqn202211152)

作者简介: 孙文斌(1981—), 男, 山东鄄城人, 教授, 博士生导师。E-mail: swb@sdust.edu.cn

solid coupling. The cracks generated by the fault zone and the aquiclude undergo the initiation-expansion-through stage, the relative position relationship between the fault and the working face determines the time and space position of the fault evolution zone and the floor failure zone. According to the conduction path of confined water, the process of fault water inrush is divided into three stages: fault activation, water conduction, double zone (fault evolution zone and floor failure zone) docking, the stage delineation of fault water inrush evolution process are realized.

Key words: fault; water inrush channel; fault activation; fault fillings; similar simulation; disaster characteristics; water-inrush

0 引 言

2022年我国原煤产量45.6亿t,在一次能源结构中占比达到56.2%^[1],煤炭作为我国主体能源地位近期内不会改变^[2],经过数年高强度开采,我国浅、中部煤炭资源日益枯竭,大部分矿区逐步迈入深部开采阶段,深部水文地质条件越来越复杂,隐蔽致灾因素显著增加^[3]。深部高应力和高水压使底板变形及破坏程度较浅部相对剧烈^[4],同时,断层的存在使突水的潜在危险性也随之加大,由断层引发的矿井突水事故达到70%左右^[5],已成为深部开采水害防治的焦点问题。突水需要水源和突水通道,水源是突水的前提,突水通道是突水的必要条件,但突水通道并非瞬时产生,而是由逐渐萌生的微小裂隙在采动应力和高承压水耦合效应下渐进演化贯通的结果。因此对断层突水灾变演化过程进行阶段划分,可为断层突水过程化防控提供新思路。

针对断层突水,众多学者从断层突水机理和灾害演化过程及监测入手开展了大量研究,韩科明等^[6]基于关键层理论分析开采影响断层活化因素,推导了断层滑移失稳力学判据,得到下盘开采断层更容易活化。于秋鸽等^[7]建立了断层带岩体原始裂隙损伤发育力学模型及断层带岩体滑移力学模型,分析了断层活化的机理,并得到了断层参数影响断层活化程度的规律。杨善安^[8]阐述了采动过程中矿压作用下的变形特征,并指出断层两盘位移量的差异性诱发断层突水的重要原因,黎良杰等^[9]将断层突水划分为张开型断层突水和闭合性突水,并用关键层模型对断层突水进行力学分析,指出正断层比逆断层更容易突水,对断层突水有了较好的认识。笔者^[10]和李杨杨等^[11]研制的底板突水演变过程可视化试验平台配合相似模拟材料探索了断层突水全过程,实现了承压水导升过程可视化问题。史莉红等^[12]建立的承压水导升系统可直观观测导水裂隙带发育高度,为描述断层突水灾变演化过程特征提供了有力证明。王进尚等^[13]研制了一种煤层底板破坏与递进导升协同突水定点动态监测系统,揭示了采场底板破坏与承压水递进导升协同突水机理,并将隐伏断层突水

过程划分为自然导升段、递进导升段、强化导升段以及贯通阶段4个阶段。张玉军等^[14]运用FLAC^{3D}数值模拟软件研究了不同倾角下底板隐伏断层承压水导升路径,一定程度上还原了断层突水演化过程。马丹^[15]和李仕杰等^[16]考虑了断层破碎带颗粒中渗流问题,认为断层破碎带物源组合和渗流过程中颗粒流失是细微通道演变为突水通道的重要诱因。于海涛^[17]利用XRD衍射、电镜扫描等技术得到了断层带微观特征,通过配制断层相似样品进行了渗流试验,将断层带渗流划分为缓慢增长、快速增长和饱和阶段。

针对灾害演化过程监测方面,刘盛东^[18]和刘静等^[19]通过并行电法监测系统在断层赋存状态、富水区探测、底板破坏深度与承压水导升过程中电位变化规律做了大量研究,并揭示了水力耦合状态下灾害前兆信息。原富珍等^[20]通过微震信号监测岩体破裂的位置和裂隙扩展路径来反演突水通道的位置,导水裂隙带发育特征,并通过微震事件的强度判定岩体破坏程度。诸多学者的研究成果丰富了断层突水机理、明确了活化导水机制,为断层突水演变过程的阶段划分提供了基础。

笔者从分析断层突水灾变演化过程入手,掌握断层活化特征以及开采过程中断层及围岩应力值、水压、涌水量等特征参数变化规律,根据突水通道时空演化过程和灾变特征规律,对断层突水过程进行标志性阶段划分,以期对断层突水分阶段防控提供一定的试验基础。

1 断层突水演化过程分析

1.1 工程背景

济北矿区某矿开采深度大、断层繁多且产状不一、水压大且补给来源广,受突水威胁严重。1311工作面煤层平均厚度4m,煤层倾角2~12°,平均6°。工作面内部及附近断层发育,例如F₁断层倾角为60°~70°,落差为0~30m,根据采区水文地质钻孔实测,如图1所示,揭露的潜在突水水源有煤层顶底板砂岩水、奥灰水、断层水。采动效应下断层活化后将成为潜在的突水通道,诱发底板突水事故。

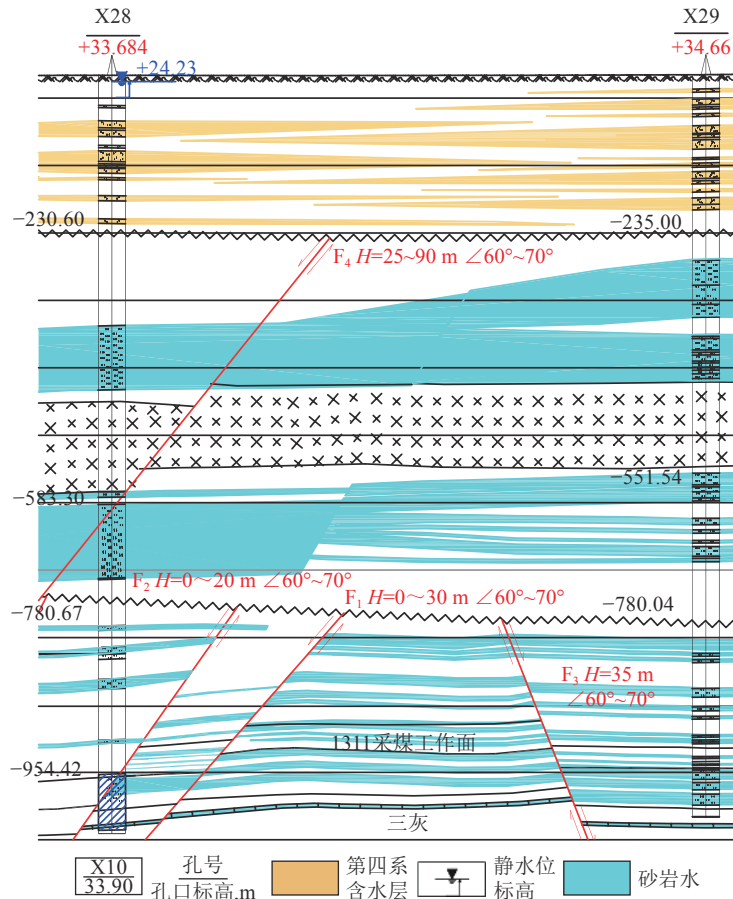


图 1 水文地质柱状图

Fig.1 Hydrogeological column of working face

1.2 断层突水演变模型

文献 [21-25] 对断层突水演化过程进行了系统研究,从断层活化条件、承压水在隔水层和断层中导升条件、底板破坏带和断层演化带发育形态和范围,具体可以简化为断层突水演变分析模型(图 2)。

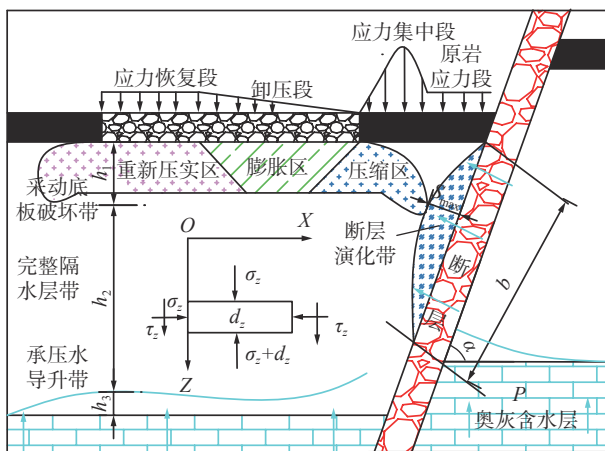


图 2 突水演变分析模型

Fig.2 Water inrush evolution analysis model

高压水进入断层带后,水压对断层进行劈裂,承压水将开始导升。采动推进过程中,底板破坏带逐

渐向断层附近演化,当承压水导升到一定程度时,断层演化带逐渐发育成熟,当底板破坏带与断层演化带沟通时,底板断层突水事故发生。根据几何关系得到临界断层保护煤柱宽度,即断层突水力学判据为

$$L < \frac{7(P - \gamma h \cos \alpha)L^4 \cos^4 \alpha}{5Eab^3 \sin \alpha} + \frac{lh_1}{\sqrt{h_1^2 + P \sin \alpha}} \quad (1)$$

式中: L 为断层突水临界煤柱留设宽度, m; h 为煤层底板至含水层之间岩层厚度, m; γ 为上覆岩层的容重, N/m^3 ; l 为支承压力集中区宽度, m; a 为断层与水平方向夹角, ($^\circ$); P 为含水层水头压力值, MPa; E 为弹性模量, N/m^2 ; a 为断层宽度, m; b 为断层长度, m; h_1 为采动破坏带厚度, m。

采动过程中,隔水层会出现横纵裂隙,削弱隔水层的阻水能力,也加速了底板裂隙的演化和双带对接的进程。对隔水层进行力学分析,推导了底板隔水层在断层影响下的极限水压:

$$P_w = \left[\frac{C(\lambda - 1) \cot \varphi}{\lambda} + \frac{C + C_F \sin \alpha}{\lambda(\tan \varphi + \tan \varphi_F \sin \alpha)} + \gamma h_1 + \beta \gamma H \right] \left[e^{\frac{(h-h_1-h_3)\lambda(\tan \varphi + \tan \varphi_F \sin \alpha)}{L}} - 1 \right] \quad (2)$$

式中： P_w 为隔水层水压，MPa； C 为底板岩体黏聚力，MPa； φ 为底板岩体的内摩擦角，(°)； C_f 为断层面上的黏聚力，MPa； φ_f 为断层面上的摩擦角，(°)； h_2 为隔水层厚度，m； h_3 为承压水导升带厚度，m。

通过分析突水演变分析模型，建立突水通道形成过程(图 3)，以水的导升路径为标志，将断层突水分为“断层活化”“贯通导水”“‘双带’(断层演化带与底板破坏带)对接”3 个阶段。第一阶段为断层活化阶段，断层受到水压和矿压耦合作用发生失稳破坏，为承压水进入断层破碎带提供空间。第二阶段承压水初步导升，流固耦合作用下水的流动同时加速充填物的运移，孔隙率大的地方演变为强渗流区，断层释放的能量加剧底板水的导升和裂隙萌生与扩展。第三阶段为“双带”对接阶段，根据“最优路径”原则和“最小阻力突水”原则，断层演化带与底板破坏带导通，最终形成完整的突水通道，底板水涌入采空区，断层突水事故发生。

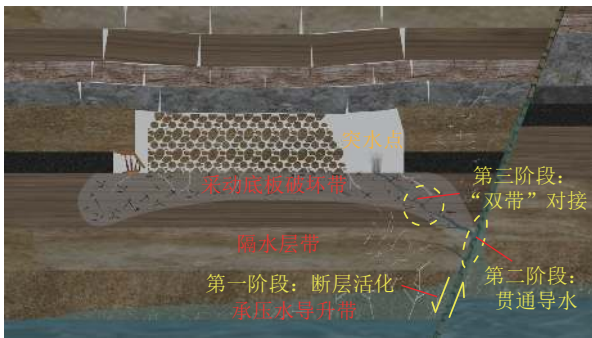


图 3 断层突水灾变过程划分

Fig.3 Delineation of evolutionary process of fault water inrush

2 断层破碎带失稳特征

根据前述理论分析章节，断层活化与断层的产状和断层破碎带内部岩性组分、颗粒特征等差异性会影响断层活化水平，现场采煤过程中，断层活化难以探测且具有一定的危险性，因此为更好揭示采动效应下断层活化特征，配制含断层破碎带充填物的大尺寸类岩石试样，采用岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统，结合声发射和数字散斑技术，研究垂向应力和水平应力加载过程中断层失稳破坏特征，追踪裂隙起裂—扩展—贯通过程声发射事件和试样变形特征，通过改变水平应力和断层充填物岩性组分，从采动外因和断层内因揭示断层活化特征，丰富现有断层活化特征规律研究成果。

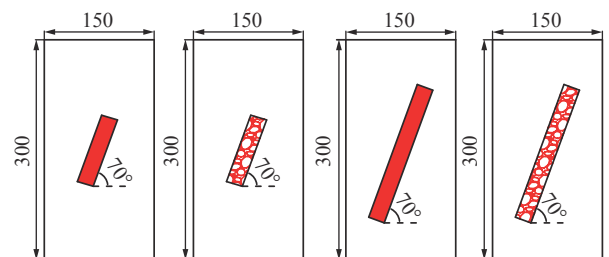
2.1 试样配制

断层破碎带相对破碎，且原生裂隙相对较多，难

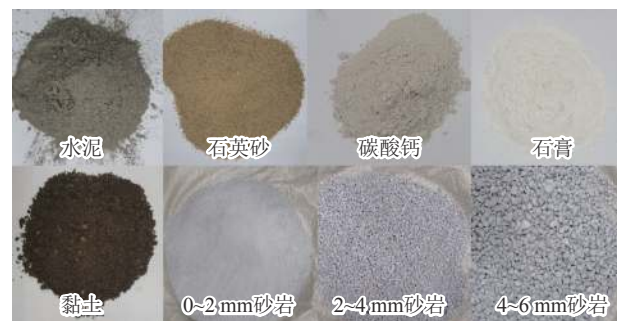
以现场取样进行力学试验，综合相似模拟材料组分性质可控和试样均质的优势，断层充填物围岩选用水泥砂浆类岩石试样开展试验，试样设计及研制步骤如图 4 所示，设计大尺寸试件尺寸为 300 mm×150 mm×150 mm，设计对照组和含断层充填物类岩石试样 5 种，见表 1，倾角均为 70°，断层长度分别为 100 mm 和 200 mm。根据前人研究成果^[26-27]，确定围岩材料质量配比为石英砂：碳酸钙：普通硅酸盐水泥：石膏=1.87：0.47：0.70：0.30，水为骨料和胶结剂总质量的 20%，该材料的力学性能与典型砂岩较为接近。断层充填物采用两种岩性组分配比，方案一选用石英砂：水泥：黏土：石膏=5.5：1.5：1.2：1.8，方案二采用不同粒径级配的角砾岩为骨料，水泥和石膏为胶结剂。用粒径筛将 0~2、2~4、4~6 mm 破碎的砂岩颗粒予以筛分，根据 Talbot 理论，每一种粒径质量分数为

$$P_i = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^n \times 100\% \quad (3)$$

式中： P_i 为直径小于 d_i 颗粒的质量分数； d_i 为第 i 组的颗粒直径； d_{\max} 为所有颗粒粒径的最大值； n 为 Tal-



(a) 含断层破碎带试样设计



(b) 相似模拟材料组分



(c) 抹油 (d) 铺设围岩 (e) 填充断层充填物 (f) 试样实物

图 4 含断层破碎带试样

Fig.4 Specimens with fault fracture zone

bot 级配指数,一般取 0.3~0.5,此处取 0.4。经计算,3 种颗粒的质量分数分别为 64.4%、20.6% 和 15%。

表 1 试验配制方案
Table 1 Test preparation scheme

试验编号	断层长度	充填物组分
对照组	无	无
A组	10 cm	方案一
B组	20 cm	方案一
C组	10 cm	方案二
D组	20 cm	方案二

2.2 试验系统

本次力学试验采用岩石应力-渗流耦合真三轴试验系统配合声发射监测系统和数字散斑应变测量分析系统,对裂隙演化过程进行分析和定量描述,试验系统如图 5 所示。数字散斑利用图像相关算法进行物体表面变形点的立体匹配,并重建出匹配点的三维空间坐标^[28],实现断层活化的可视化分析。

该系统可施加的最大轴向荷载为 1 600 kN,2 个侧向最大施加荷载分别为 1 000、500 kN。可对大尺寸试样进行加载试验,考虑传感器布设位置和数字散斑需要,本次试验断层活化简化为含断层破碎带试样双向加载下失稳特征,先施加围压 σ_2 至 50 kN,稳定后施加 σ_1 直至试样失稳破坏。试验前在声发射传感器上均匀涂抹凡士林,能够最大限度减少端部摩擦效应,采用 0.5 mm 的 HB 铅笔芯进行断铅测试,保证响应幅值超过 90 dB 之后再行试验^[29]。

2.3 试样数字散斑演变特征

为更好揭示断层破碎带失稳特征,采用三维数字散斑应变测量及分析系统对双轴加载过程中断层带及围岩表面应变率进行监测,监测结果如图 6 所示,双轴加载过程中,断层两盘与围岩交界处逐渐产生裂隙,同时破碎带也萌生细小的裂隙,验证了采动效应下断层更容易破坏失稳发生活化。随着轴向应力进一步加载,断层尖端萌生裂纹裂隙逐步扩展,断层尖端应力集中是导致在此处裂隙萌生的主要原因,最后与试样的宏观剪切裂隙贯通,一定程度上还原了断层演化带的形成过程。试样应变率最大值位于断层尖端和断层两盘,有效揭示了采动效应下断层动力响应特征。

2.4 试样声发射规律

对含 4 类含断层充填物大尺寸类岩石试样进行双轴加载,记录试样产生宏观裂隙失稳时载荷峰值过程中声发射事件的累计能量如图 7 所示。在双轴

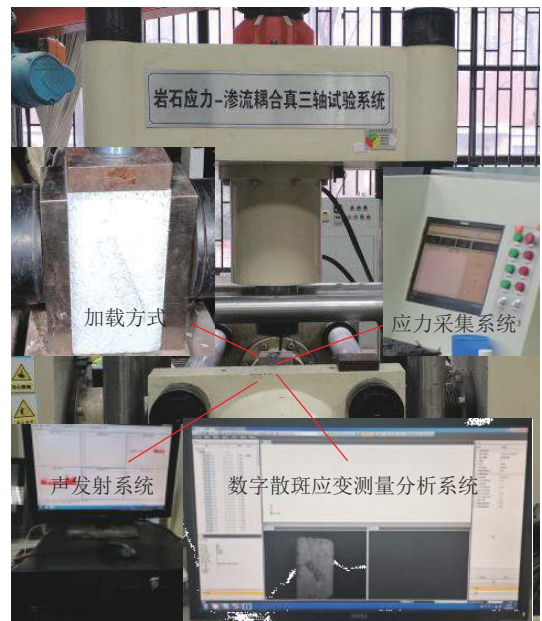


图 5 试验系统

Fig.5 Experimental system

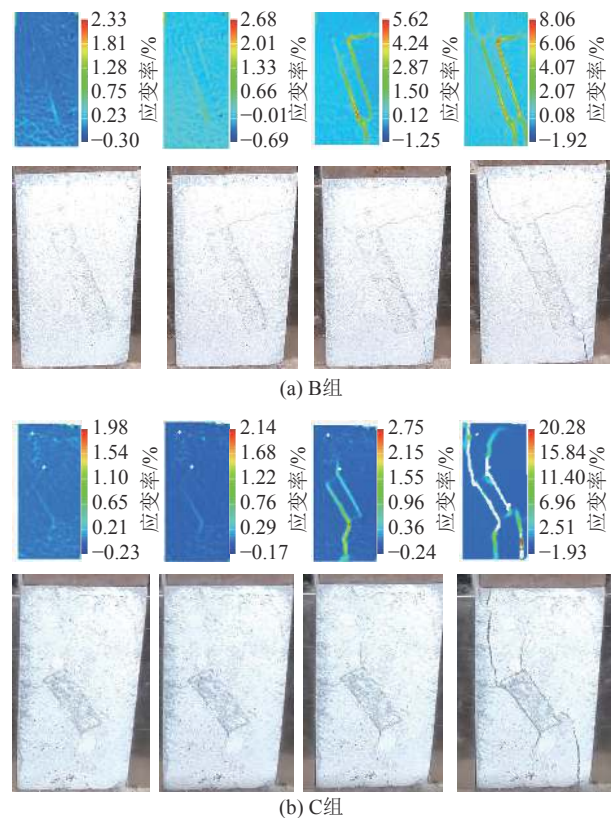


图 6 数字散斑演变规律

Fig.6 Digital speckle evolution law

加载下,得到 5 组试件的峰值强度分别为 15.98、12.11、9.18、8.23、6.91 MPa, A~D 组试样峰值强度相比对照组分别下降 24.22%、42.55%、48.5%、56.76%,说明不同性质的断层影响了试样的整体破坏强度,一定程度上决定了断层演化带的发育特征。

声发射事件的累计能量分别为 127、97.6、87.9、48.7、35.5 kJ, A ~ D 组试样累计能量相对对照组分别下降了 23.15%, 30.79%, 61.65%, 72.05%, 代表了内部裂隙发育数量和程度的差异性。由此可得, 含不同充填物岩性和产状的断层一定程度上影响整体试样的峰值强度和破坏方式, 也影响了声发射事件累计能量的变化规律。加载初期为对原有裂隙和断层充填

物压密阶段, 声发射事件累计能量急剧增长; 加载中期为断层活化阶段, 声发射事件出现集中现象, 是内部裂隙演化和断层尖端裂隙起裂—扩展的结果; 加载末期声发射事件集中的原因是由试样的整体破坏造成的增长。综上数据对比分析, 验证了断层充填物的岩性和产状将影响断层活化的难易程度和强度。

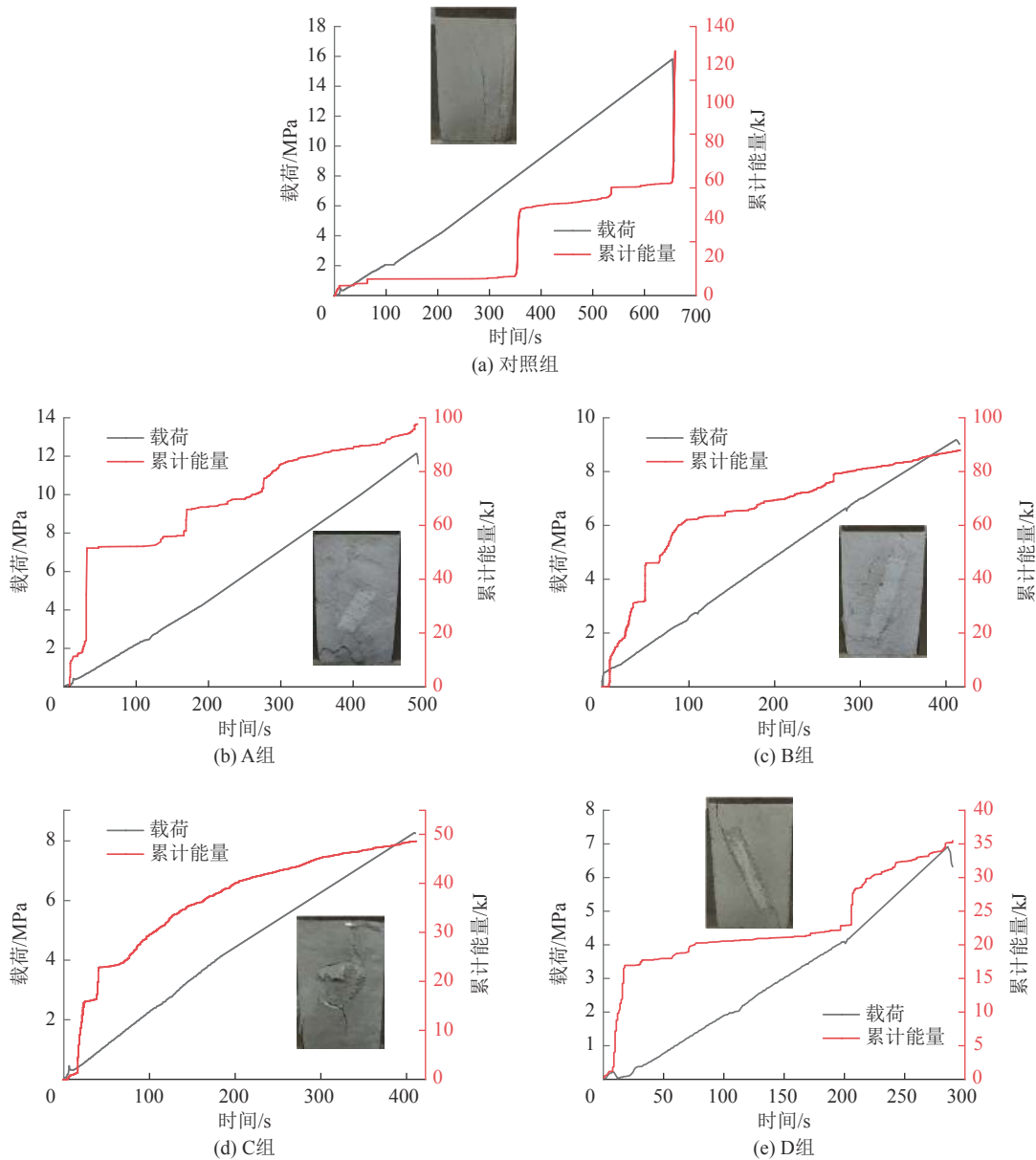


图7 试样声发射演变规律

Fig.7 Evolution law of acoustic emission of specimens

3 断层突水时空演化过程相似模拟试验研究

煤层深部开采现场水文地质条件复杂, 监测方案施工困难、成本高、危险性系数大, 难以开展系统性现场断层突水演化过程监测感知研究。室内试验根据工程实际背景和相似比原理一定程度上可模拟

现场原位条件, 成为研究矿井冲击地压、突水等地下工程动力灾害问题的有效研究手段。鉴于室内试验的优点和真实性, 借助改造升级的采动底板突水模拟试验系统和应力、水压、并行电法在线监测子系统, 室内再现采动断层突水演变全过程, 得到采动过程

中应力、孔隙水压力、视电阻率等参量演变规律,在综合分析纵横裂隙扩展、断盘活动滑移、承压水导升高度的基础上,针对参数特征,对断层突水演变致灾过程进行感知,进而划分标志性阶段。

3.1 试验系统

图8为断层突水监测系统,该突水模拟系统可实现水平独立分级加载、覆岩柔性均布加载和恒压稳流供水,能够一定程度上真实模拟现场水文地质条件。



图8 断层突水监测系统

Fig.8 Monitoring system of fault water inrush

试验台尺寸为1200 mm×400 mm×800 mm(长×宽×高);系统可以施加竖向最大载荷1 MPa,精度为0.01 MPa;可实现水平分级独立加载,以模拟不同深度的垂直和水平应力梯度;具有位移控制和载荷控制2种加载方式,载荷加载速率最小为0.05 kN/s,位移加载精度为0.02 mm/s;高水压加载系统可模拟最大水压值为5 MPa,监测精度为0.01 MPa,具备模拟深部断层突水的试验条件。

3.2 模型

根据济北某矿1311工作面水文地质条件,以 F_1 断层为研究对象,确定相似模拟试验的几何相似比为100,容重相似比为1.5,时间相似比为10,应力相似比为150,渗透系数为0.1。图9为本次室内相似材料模拟模型,设计采深960 m,底板隔水层厚度34 m,煤层厚度4 m,根据应力相似比,模型在垂向上施加等效均布载荷为127 kPa。深部水平应力一定程度上影响岩体的变形和破坏特征,经现场测试,侧压系数为1.5,因此根据垂向载荷确定水平方向分级加载180、190、200 kPa,来模拟不同深度的水平应力加载,模式底部施加模拟水压53 kPa。

为掌握断层破碎带和底板岩体受力和导水特征,布设 DC_1 - DC_4 应力传感器监测底板不同深度和断层两盘应力值,本次铺设并行电法电极16个,间距为5 cm,共布置应力传感器4个,水压传感器1个, DC_1 ~ DC_4

用来监测断层两盘应力变化情况。具体位置如图10所示。

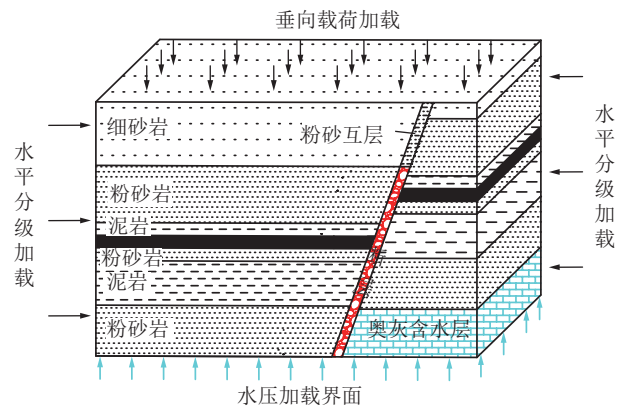


图9 断层突水相似模拟试验模型

Fig.9 Similar simulation model of the water inrush

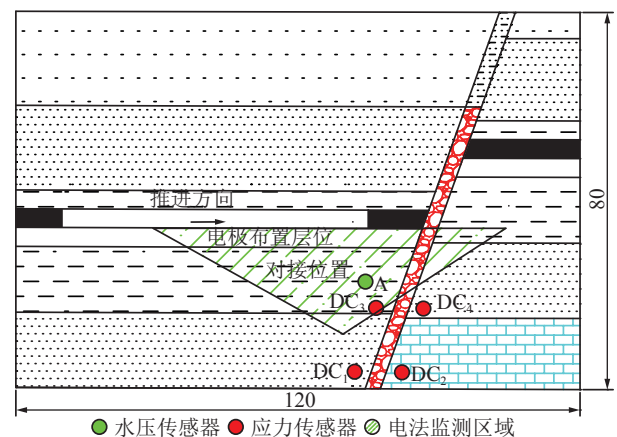


图10 传感器布设位置

Fig.10 Sensors placement

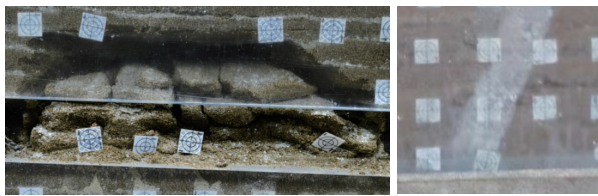
为配合试验效果,底板岩层和部分上部顶板岩层采用新型流固耦合相似模拟材料,由河砂(1~2 mm)、碳酸钙、液压油、石蜡、凡士林加热混合搅拌配制而成。其余岩层采用河砂(1~2 mm)、碳酸钙、石膏、水配比而成普通材料,各岩层分层间铺撒云母粉分隔,断层采用砂子、黏土颗粒和石膏配比而成。各岩层配料见表2。模型及监测系统铺设完成后,自然状态下风干1周后,对模型进行开挖,考虑边界效应,煤层留设10 m煤柱后向断层方向开挖,记录开挖过程中底板突水通道演变特征。

3.3 突水通道时空演化过程

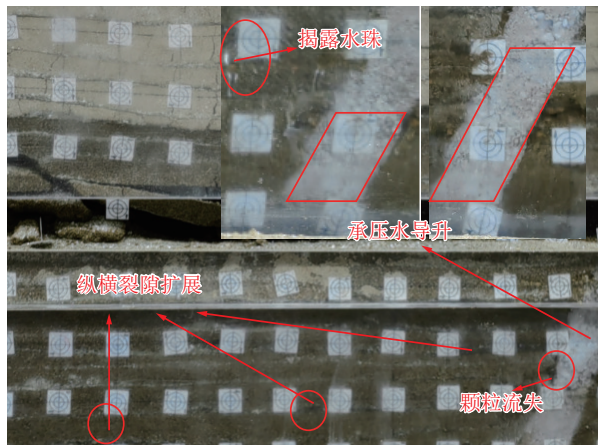
图11为推进过程中底板突水状况演化过程,煤层开挖至30 m时,顶板初次来压,直接顶开始垮落同时高承压水会对底板和断层下尖端产生损伤效应如图11a所示,断层围岩逐渐萌生裂隙并进一步扩展、发育,验证了断层尖端处流固耦合作用比较显著。

表 2 各岩层配料
Table 2 Proportioning for each rock layer

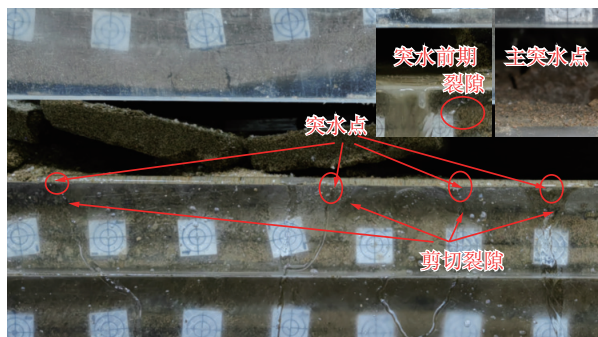
层位	岩层	厚度/mm	材料质量比	备注
顶板	细砂岩	200	8 : 7 : 3	普通材料
	粉砂岩	120	8 : 6 : 4	
	粉砂岩	60	18 : 1 : 0.7 : 1.2 : 0.9	
	泥岩	40	12 : 1.8 : 0.7 : 1.2 : 0.6	
煤层	3 _上 煤	40	30 : 1 : 0.8 : 1.2 : 1	新型流固耦合相似模拟材料
	粉砂岩	40	18 : 1 : 0.7 : 1.2 : 0.9	
底板	泥岩	140	12 : 1.8 : 0.7 : 1.2 : 0.6	
	粉砂岩	160	18 : 1 : 0.7 : 1.2 : 0.9	
含水层	奥灰	150	30 : 1 : 0.8 : 1 : 1.3	
断层	充填物	40	1 : 1.2 : 0.3	砂、黏土、石膏



(a) 30 m



(b) 45 m



(c) 55 m

图 11 突水通道演化

Fig.11 Evolution of water inrush channel

当工作面推进至 45 m 时,采场出现周期来压,顶板再次垮落。断层和底板部分裂隙揭露水珠,承压水

渐进导升,开采扰动对底板影响的范围增加,底板横向裂隙逐步向上层向扩展,水沿着底板和断层发育的裂隙向上导升如图 11b 所示。

当工作面推进至 55 m,距离断层 15 m 左右时,煤壁前方开始出现突水点如图 11c 所示,在断层与采空区之间存在明显的裂隙贯通区,存在较为明显的横竖向裂隙,裂隙的产生是由工作面前方顶板的压缩与断层错动的剪切作用造成的,采空区附近的剪切裂隙逐渐向下向右扩展,底板裂隙与断层裂隙贯通时,断层水涌入采空区。

观察突水的水质情况,突水前期,水呈浊状且流速较快,判断为断层破碎带内部的黏土颗粒涌出,随着煤层继续开采,水流逐渐变清且水流趋于稳定并在后方采空区新增出水点。水流稳定后,通过观察突水孔洞,发现孔洞并不是水平发育,为斜向下扩展,验证了突水现象遵从“最小阻力突水原则”,即突水通道与断层倾向大致垂直,也验证了断层突水依然遵循“最优路径原则”。

3.4 监测参数演变规律

煤层推进过程中断层附近应力变化规律如图 12 所示,工作面由 10 m 推进至 30 m 时,断层上盘应力监测数据与下盘数据有着不同的趋势,1 号与 3 号监测点均出现应力增高趋势,随后开始降低;2 号与 4 号监测点则基本保持稳定,断层上下盘围岩应力变化趋势不一致,且开挖至 40 m 时,1 号和 3 号监测点应力增加是因传感处于应力集中区,且由于断层的阻隔作用,断层带应力出现叠加现象,也是造成断层尖端受流固耦合作用显著的根本原因。

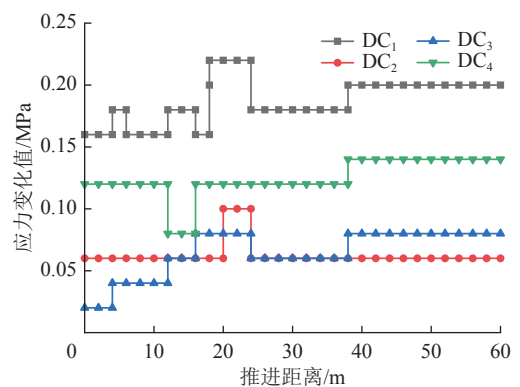


图 12 断层应力演变特征

Fig.12 Fault stress evolution characteristics

本次相似模拟试验选用 DMKY 系列微型高精度孔隙水压力计进行渗透水压力在线监测,量程为 0.01 ~ 10 MPa, 100 kPa 以下分辨率为 0.005 kPa,适用于模型试验中测量岩体(土体)、泥浆等内部或周

围的孔隙水压力。

图13为煤层推进过程中水压值变化规律和突水水量图,当工作面推进至45 m时,断层水逐步导升,水压值急剧下降,水开始向底板隔水层中和经断层向底板破坏带中的裂隙中导升,当工作面推进至55 m时涌水量急剧增加,含水层-断层带-底板破坏带-采空区完整的突水通道发育完成,水大规模涌入采空区。

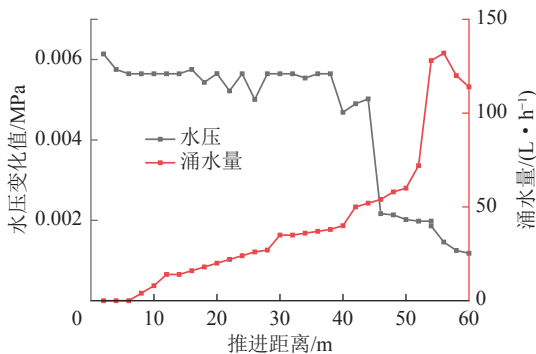


图13 水压-水量变化曲线

Fig.13 Water pressure -water inflow change curves

网络并行电法广泛应用于矿井水害防治中,基于水、岩体和空气的电阻率差异可用于突水通道水动态导升过程探测。为满足实验室小型模拟试验要求,缩短监测电极间距并将其铺设在顶板围岩中。本次采用网络并行电法系统智能追踪突水通道的空间特征,考虑到试验台尺寸和监测范围,为提高精确度和分辨率,供电电压选择72 V,最小有效电流选择0.5 mA,深度系数为可信度较高的探测深度与最远两电极取直线距离(75 cm)的比值,此处取0.3,则探测深度为22.5 cm。

观察开采过程中电阻率相对变化值,电阻率逐渐降低的低阻区圈定为裂隙进一步发育、水导升的位置。电阻率降低显著的区域代表渗流强的位置,也是最容易演化为突水通道的位置。煤层推进过程中,采空区处是相对高阻区,工作面前方与断层之间的煤体下方区域因水导升电阻率逐步降低,中间电阻值更低处为主要突水通道,即断层演化带与底板破坏带对接处,其中,图14为采动过程中突水通道电阻率监测图。

工作面前方与断层之间的煤体及下方三角形区域是断层突水形成的主要区域,煤层开采过程中要加强对该区域的监测,综合断层活化特征及断层突水演化过程的划分,采用增大留设保护煤柱宽带、超前注浆加固处理、堵水材料封堵等分阶段防控措

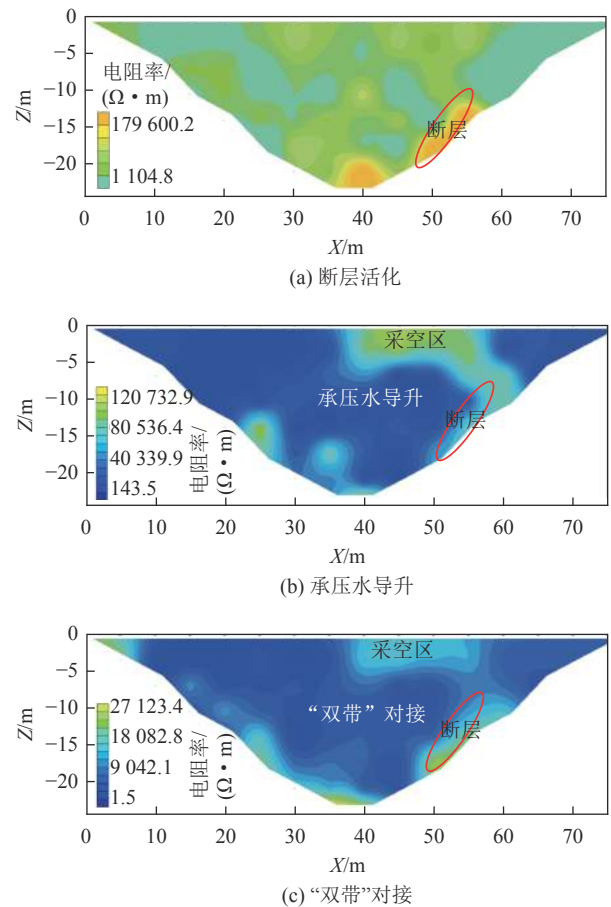


图14 突水通道电阻率监测图

Fig.14 Resistivity monitoring map of the water intrusion channel

施,以保证煤层开采的安全进行。需要指出的是,研究成果主要依托深部开采矿井为工程地质背景,针对部分浅埋弱胶地层等特殊地质条件尚未考虑,未进行现场进一步验证;断层突水是复杂的动力异常显现现象,还需根据大量案例分析断层产状及内部破碎带充填物等差异性诱发断层活化的程度,总结断层突水机制类别,揭示各阶段参数演变规律,实现对断层突水演化过程的阶段划分进一步优化和完善。

4 结 论

1)通过构建突水演变分析模型,明确了断层突水是断层演化带和底板破坏带对接的结果。采动效应下,断层较围岩动力响应更强烈,根据承压水导升路径,断层突水过程可划分为“断层活化”“贯通导水和“双带”对接”三阶段,原始导水断层是“贯通导水”““双带”对接”两阶段,属于“三阶段”的特殊情况。

2)通过含破碎带充填物试样双轴加载试验,验证了采动效应下断层较围岩动力响应更强烈,断层充填物的性质决定了断层活化的难易程度和强度,

一定程度上影响着断层突水的时空演化过程。

3)通过断层突水相似模拟试验得到断层突水是裂隙萌生—扩展—贯通的结果,突水通道孕育过程中蕴含着应力、水压、电阻率等多参数的演变规律,精确掌握诸多参数突变节点可作为断层突水分阶段划分的重要依据。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[N]. 中国信息报, 2023-02-28.
- [2] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.
- [3] 武强, 郭小铭, 边凯, 等. 开展水害致灾因素普查防范煤矿水害事故发生[J]. 中国煤炭, 2023, 49(1): 3-15.
WU Qiang, GUO Xiaoming, BIAN Kai, et al. Carrying out general survey of the water disaster-causing factors to prevent the occurrence of coal mine water disasters[J]. China Coal, 2023, 49(1): 3-15.
- [4] 陈军涛. 深部开采底板破裂与裂隙演化基础试验研究[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2019.
- [5] 边凯, 李思宇, 刘博, 等. 承压水上含断层煤层开采底板突水规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 169-177.
BIAN Kai, LI Siyu, LIU Bo, et al. Study on water inrush law of mining floor in coal seam with fault above confined water[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(6): 169-177.
- [6] 韩科明, 于秋鸽, 张华兴, 等. 上下盘开采影响下断层滑移失稳力学机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1327-1335.
HAN Keming, YU Qiuge, ZHANG Huaxing, et al. Mechanism of fault activation when mining on hanging-wall and footwall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1327-1335.
- [7] 于秋鸽, 张华兴, 张玉军, 等. 采动影响下断层活化机理及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 18-30.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, ZHANG Yujun, et al. Analysis of fault activation mechanism and influencing factors caused by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 18-30.
- [8] 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. Prevention and control of water inrush from faults in floor rocks in the workings[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 620-625.
- [9] 黎良杰, 钱鸣高, 李树刚. 断层突水机理分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 119-123.
LI Liangjie, QIAN Minggao, LI Shugang. Mechanism of water-inrush through fault[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 119-123.
- [10] 孙文斌, 张士川, 李杨杨, 等. 固流耦合相似模拟材料研制及深部突水模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2665-2670.
SUN Wenbin, ZHANG Shichuan, LI Yangyang, et al. Development application of solid-fluid coupling similar for floor strata and simulation test of water-inrush in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2665-2670.
- [11] 李杨杨, 张士川, 孙熙震, 等. 煤层采动底板突水演变过程可视化试验平台研制与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3515-3524.
LI Yangyang, ZHANG Shichuan, SUN Xizhen, et al. Development and experimental research on the visualization test platform for water inrush evolution process of coal seam mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3515-3524.
- [12] 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 test system for confined water conduction in fault zone[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 136-141.
- [13] 王进尚, 姚多喜, 黄浩. 煤矿隐伏断层递进导升突水的临界判据及物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2014-2020.
WANG Jinshang, YAO Duoxi, HUANG Hao. Critical criterion and physical simulation research on progressive ascending water inrush in hidden faults of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 2014-2020.
- [14] 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 confined water lifting in coal seam floor with a hidden fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 17-24.
- [15] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1751-1763.
MA Dan, DUAN Hongyu, ZHANG Jixiong, et al. Experimental investigation of creep-erosion coupling mechanical properties of water inrush hazards in fault fracture rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1751-1763.
- [16] 李仕杰, 黄震, 廖永斌, 等. 深部巷道断层破碎带渗透性测试及动态监测研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 50-55.
LI Shijie, HUANG Zhen, LIAO Yongbin, et al. Study on permeability test and dynamic monitoring of fault in deep roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 50-55.
- [17] 于海涛. 深部断层带微观特征及其渗透突水演化规律模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
YU Haitao. Research on the microscopic characteristics of deep fault zone and simulation on evolution law of seepage water inrush[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [18] 刘盛东, 刘静, 戚俊, 等. 矿井并行电法技术体系与新进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2336-2345.
LIU Shengdong, LIU Jing, QI Jun, et al. Applied technologies

- and new advances of parallel electrical method in mining geophysics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2336–2345.
- [19] 刘静, 刘盛东, 王勃, 等. 水岩耦合演化自然电场近源效应与临灾前兆[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1286–1295.
LIU Jing, LIU Shengdong, WANG Bo, *et al.* Near-source effect of natural electric field in water-rock coupling evolution and its imminent disaster precursors[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1286–1295.
- [20] 原富珍, 马克, 庄端阳, 等. 基于微震监测的董家河煤矿底板突水通道孕育机制[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1846–1856.
YUAN Fuzhen, MA Ke, ZHUANG Duanyang, *et al.* Preparation mechanism of water inrush channels in bottom floor of Dongji-ahé Coal Mine based on microseismic monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1846–1856.
- [21] 郭惟嘉, 张士川, 孙文斌, 等. 深部开采底板突水灾变模式及试验应用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 219–227.
GUO Weijia, ZHANG Shichuan, SUN Wenbin, *et al.* Experimental and analysis research on water inrush catastrophe mode from coal seam floor in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 219–227.
- [22] 卜万奎. 采场底板断层活化及突水力学机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
BU Wankui. Research on mechanical mechanism of fault activation and water inrush from faults in mining floor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [23] 朱光丽. 采动诱发断层活化(滞后)突水致灾机理试验及评价研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
ZHU Guangli. Experimental on mechanism and evaluation of fault activation conducting water inrush by mining[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [24] 安泰龙, 姚邦华, 李硕, 等. 底板承压水作用下断层破碎带岩体冲蚀-渗流灾变规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 354–360.
AN Tailong, YAO Banghua, LI Shuo, *et al.* Study on the fault erosion-seepage rule under the effect of floor confined water[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 354–360.
- [25] 张鹏, 朱学军, 孙文斌, 等. 采动诱发充填断层活化滞后突水机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(3): 136–143.
ZHANG Peng, ZHU Xuejun, SUN Wenbin, *et al.* Study on the mechanism of delayed water inrush caused by mining-induced filling fault activation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 136–143.
- [26] 郭孔灵, 杨磊, 盛祥超, 等. 水力耦合作用下含三维裂隙类岩石材料的破裂力学行为及声发射特征[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4380–4390.
GUO Kongling, YANG Lei, SHENG Xiangchao, *et al.* Fracture mechanical behavior and AE characteristics of rock-like material containing 3-D crack under hydro-mechanical coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4380–4390.
- [27] 王鹏飞. 渗压作用下断层带岩体断裂导渗演化机制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
WANG Pengfei. Study on evolution mechanism of fracture and seepage of fault zone rockmass under osmotic pressure [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [28] 孔凯, 尹大伟, 张虎, 等. 岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(5): 30–39.
KONG Kai, YIN Dawei, ZHANG Hu, *et al.* Experimental study on deformation field and energy evolution characteristics of rock-coal composite samples[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 41(5): 30–39.
- [29] 陈军涛, 李明, 程斌斌, 等. 加载速率对大尺寸试样破裂特性的影响规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 163–172.
CHEN Juntao, LI Ming, CHENG Binbin, *et al.* Influence of loading rate on the fracture characteristics of large-size specimen[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 163–172.