



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究

张玉军 张志巍 肖杰 李友伟 于秋鸽

引用本文:

张玉军, 张志巍, 肖杰, 等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 283–291.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, XIAO Jie. Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 283–291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1698>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采动诱发充填断层活化滞后突水机制研究

Study on mechanism of delayed water inrush caused by mining-induced filling fault activation

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 136–143 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cb30c14f-58a8-4f1b-9ee3-3a2cafa06df9>

煤层底板富水承压溶洞突水力学模型构建及突水判据研究

Construction of mechanical model of water inrush from water-rich confined karst cave in coal seam floor and study on criterion

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/11dae1b2-2c6d-4109-880c-91cabdb5d4c7>

断层突水灾变演化过程划分基础试验研究

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

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 118–128 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0350>

浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究

Study on solid-fluid coupling similarity simulation test of water-sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 165–175 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1227>

掘进巷道富水型断层突水多场灾变演化规律研究

Study on multi-fields catastrophe evolution laws of water inrush from water-rich fault in excavation roadway

煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bbaaeae2-c7e2-44ff-93a8-e7013999a25d>

深部开采底板厚隔水层突水危险性评价方法研究

Study on risk assessment method of water inrush from thick floor aquifuge in deep mining

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6e0a0cc2-87ca-4608-8744-737ffc5c0d83>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张玉军, 张志巍, 肖杰, 等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 283–291.

ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, XIAO Jie, *et al.* Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 283–291.

承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究

张玉军^{1,2,3}, 张志巍^{1,2}, 肖杰⁴, 李友伟⁴, 于秋鸽^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要: 由于煤层底板隐伏断层分布广、数量多、隐蔽性强且不易探测的特点, 使得底板隐伏断层活化突水成为深部开采突水的主要形式之一。根据底板隐伏断层发育规模及空间位置条件, 总结提出了底板沟通隐伏性断层突水、上位隐伏性断层突水及下位隐伏性断层突水3种模式。针对承压水体上煤层底板下位隐伏断层底板突水模式, 通过力学分析、底板突水相似模拟及FLAC^{3D}数值拟研究了煤层回采过程中底板空间采动应力变化规律、隐伏断层扩展及突水通道演化过程。研究结果表明: 近煤层底板采动岩体随工作面推进, 经历压缩-卸荷-恢复过程, 形成采动破坏带, 底板空间采动应力状态以工作面为分界线呈现水平“S”型分布形态; 采动-水压-隐伏断层作用下, 隐伏断层将对采动应力随工作面移动起到阻隔作用; 隐伏断层顶部受矿压-水压作用的破坏程度时机更早、程度更严重, 更易诱发导水裂隙发育, 隐伏断层原生裂隙扩展并向逆工作面推进方向上方发育, 与采动破坏带沟通形成突水通道; 采动承压水导升运移与采动裂隙发育紧密相关, 采动承压水导升强度及强渗流区范围随工作面推进渐进发展, 底板隐伏断层采动突水先出现隐伏断层上方采空区, 突水量随工作面推进渐进增加。在将含隐伏断层底板采动空间划分为隐伏断层采动活化区、阻隔水区和采动影响区的基础上, 揭示了承压水上底板下位隐伏断层突水机制。

关键词: 隐伏断层; 突水机制; 底板突水; 深部开采; 采动-水压作用

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0283-09

Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body

ZHANG Yujun^{1,2,3}, ZHANG Zhiwei^{1,2}, XIAO Jie⁴, LI Youwei⁴, YU Qiuge^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 4. China coal research institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Due to the wide distribution, large quantity, strong invisibility and difficult detection, the activated water inrush of buried fault on the bottom strata has become one of the main forms of deep mining water inrush. According to the development scale and spatial location of buried fault, three modes of water inrush are summarized: water inrush due to connection of floor and buried fault, water inrush of upper and lower buried fault. According to the water inrush mode of the floor of buried fault at the bottom of coal seam above stressed water body, the development of induced floor stress during mining, the extension of buried fault and the evolution of water inrush passages during coal mining are studied by mechanical analysis, physical simulation of floor water inrush and FLAC3D numerical modelling. The results show that with the advance of working surface, the floor rock close to the coal seam is subjected to a compression-unloading-recovery process forming mining-induced failure zone. The stress within the floor is horizontal “S” shape with a boundary of the working face. Under the effect of mining-water pressure-buried fault, the buried fault blocks the extraction-induced stress with the movement of the working face. The degree of damage of the mining pressure-hydraulic pressure of the buried fault is earlier and more serious which is more

收稿日期: 2022-10-17

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1698

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51874177, 52174079); 天地科技创新基金资助项目(KJ-KCQN-03)

作者简介: 张玉军(1978—), 男, 河北张家口人, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhangyujun@tdkcsj.com

likely to induce the development of water conducting fractures. The pre-existing fractures of buried fault expands and develops upward in the opposite direction of advance of the working face, forming the water inrush passages by connecting with the mining-induced destruction zone. The rise of the pressured water is closely related to the mining fracture development. The rise intensity of mining-induced pressured water and the range of strong seepage area develop gradually with the advance of the working face. The buried fault mining area above the hidden fault. The amount of water increases gradually with the advance of the working surface. On the basis of the division of the floor with buried fault into “buried fault mining activation area, water blocking area and mining-induced area”, the water inrush mechanism of floor containing buried fault above the pressurized water is revealed.

Key words: floor concealed fault; water inrush mechanism; numerical simulation; physical simulation; Mining-water pressure action

0 引言

煤炭能源是我国的基础能源,但随着采深逐渐增加,煤炭资源的安全开采受奥陶系灰岩水威胁日趋严重。多数采掘空间突水案例表明,底板隐伏断层分布广、数量多、隐蔽性强且不易探测的特点,使得底板隐伏断层活化突水成为深部开采突水的主要形式^[1-4]。

底板采动突水须具备突水通道,底板承压水采动突水通道形成机制及运移规律是揭示底板突水现象的关键。底板导水隐伏断层是承压水导升运移天然通道,对底板采动应力状态和岩体渗透性有着深刻影响,将造成原始导升高度显著增大^[5]。在特定采矿地质条件下,采动围岩随工作面移动发生周期性运动变化^[6],受隐伏断层原生裂隙发育及力学强度低的影响,底板岩层完整性及阻隔水性能受到不定程度削弱,采动影响及采动裂隙在底板空间传递及分布规律因构造地质条件而具有差异^[7-9]。学者们针对底板隐伏断层采动活化突水运用理论分析、数值模拟、物理模拟的方法得到了很多研究成果^[10]。刘志军等^[11]建立了固流耦合数学模型并利用有限元程序模拟分析了断层要素与突水规律的联系。王进尚等^[12-13]建立了断层递进导升力学模型并推导出断层突水临界力学解析式,通过物理模拟揭示底板突水时空演化规律。张鹏等^[14]基于理论分析和数值模拟对采动诱发底板断层活化及滞后突水的特征进行了深入的研究,获得了采动影响下诱发断层活化及滞后突水机制。李连崇等^[15]运用数值方法研究了含隐伏断层底板受采动影响的采动裂隙形成、断层活化、突水通道形成过程,分析了突水通道形成时空特征。丁建新^[16]研究了不同倾向隐伏断层条件下的底板突水机理。张培森等^[17]通过数值模拟研究了含隐伏断层煤层底板滞后突水影响因素。刘伟韬等^[18]基于理论分析和数值模拟,研究了承压水导升高度、底板岩体应力分布规律。陈亮亮等^[19]通过数值模拟发现小角度隐伏断层受张应力与剪应力作用强于大角度断层,

突水威胁也更大。张志巍等^[20]研究了采动与隐伏断层双重作用下底板破坏特征。杨登峰等^[21]模拟含隐伏断层底板采动突水过程,并分析了采空区底板破坏区的空间分布特征。

现有的研究成果对于隐伏断层活化和突水机理做了大量研究工作,但仍需要在采动-承压水-隐伏断层联合条件下,进一步分析采动承压水导升运移和导水通道发育的联动过程,对底板隐伏断层突水机制做出进一步说明。笔者在底板隐伏断层存在条件下,采用物理模拟、数值模拟和理论分析的方法,以下位隐伏性断层突水模式为研究对象,分析底板导水隐伏断层采动突水过程,以完善深部开采底板突水机制。

1 含隐伏断层底板突水模式分类

底板突水需要满足一定的水源、动力以及通道条件。众多学者从突水量、突水特征、突水通道类型、突水地点等多角度划分了不同的突水类型。针对底板隐伏断层发育规模及与主采煤层之间的空间位置条件,笔者将底板隐伏断层突水模式划分为3种模式:沟通隐伏性断层突水模式、上位隐伏性断层突水模式及下位隐伏性断层突水模式,突水模式如图1所示。

沟通隐伏性断层发育规模大,直接沟通煤层底板与承压含水层,不仅增大底板采动最大破坏深度,且本身为优势的导升通道与补给路径。另外2类隐伏断层发育规模较小,落差小、隐蔽性强,探测难度大,若隔水层较薄时,通常具有突水威胁;上位隐伏性断层对矿压破坏最大深度影响显著,采掘期间易发现此类断层,多数情况下可以采取一定措施加固底板来减小底板采动裂隙发育深度,达到突水防治的目的;下位隐伏断层是最难以探测的,其主要影响承压水原始导升高度与采动导升高度,底板突水通常与此类隐伏断层关系密切。

2 底板下位隐伏断层扩展判据力学分析

通常煤矿隐伏断层规模相较于工作面尺寸而言

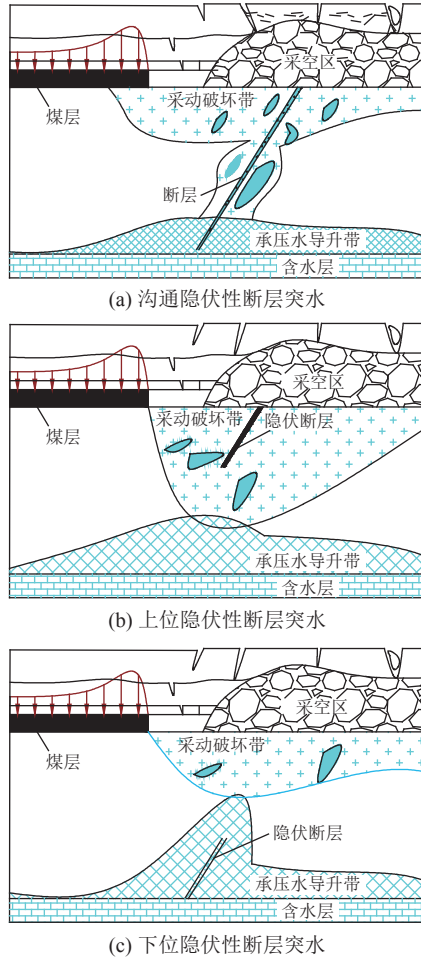


图 1 煤层底板隐伏性断层突水模式

Fig.1 Water inrush pattern of hidden faults in coal seam floor

较小,因此煤矿底板下位导水隐伏断层可以简化为受采动应力与水压力耦合作用下的压剪裂纹,采动裂隙通常是张拉破坏(I型)与滑剪破坏(II型)的共同造成。假设隐伏断层延展长度为 $2a$,倾角为 α ,受垂直应力 σ_z 与水平应力 σ_x ,建立如图2所示隐伏断层受力学模型。

考虑水压力作用时的结构面正向应力 σ_n 与切向应力 τ_n 分别为

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} - \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha - P_w \\ \tau_n = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha \end{cases} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{[\sin 2\alpha - (1 - \cos 2\alpha)(\tan \varphi' + \lambda_{12})]\sigma_z - [\sin 2\alpha + (1 + \cos 2\alpha)(\tan \varphi' + \lambda_{12})]\sigma_x - 2c'}{2(\tan \varphi' + \lambda_{12})} - \frac{K_{IIc}}{\sqrt{\pi a}(\tan \varphi' + \lambda_{12})} \quad (7)$$

3 含隐伏断层底板采动导水通道演化及突水相似模拟

3.1 试验系统

底板隐伏断层采动导水通道演化规律研究选用

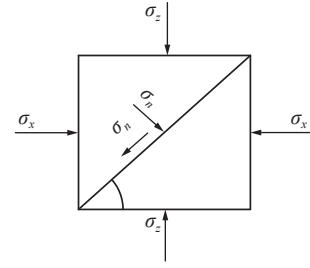


图 2 隐伏断层受力分析模型

Fig.2 Hidden fault stress analysis model

其中, P_w 为水压,Pa。根据断裂力学理论可知,隐伏断层尖端应力强度因子计算式为

$$\begin{cases} K_I = -\sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \end{cases} \quad (2)$$

其中, K_I 为张开型裂纹应力强度因子, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$; K_{II} 为滑开型裂纹应力强度因子, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。对于滑剪型(II型)裂纹,裂纹面表面受 σ_n 作用会产生与 τ_n 作用方向相反的剪应力 τ_f :

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi' + c' \quad (3)$$

其中, τ_f 为结构面受与 τ_n 反向切向应力,Pa; φ' 为隐伏断层结构面内摩擦角, $^\circ$; c' 为隐伏断层结构面黏聚力,Pa。那么,作用于裂纹面上的总的剪应力为

$$\tau = \tau_n - \tau_f \quad (4)$$

根据大量混凝土压剪试验研究,岩石压剪断裂判据^[22]为

$$\lambda_{12} \Sigma K_I + \Sigma K_{II} = K_{IIc} \quad (5)$$

其中, λ_{12} 为压剪系数; K_{IIc} 为压剪断裂韧性。整理式(1)一式(5)得到隐伏断层采动活化扩展的力学判据为

$$\begin{aligned} & [\sin 2\alpha - (1 - \cos 2\alpha)(\tan \varphi' + \lambda_{12})]\sigma_z - \\ & [\sin 2\alpha + (1 + \cos 2\alpha)(\tan \varphi' + \lambda_{12})]\sigma_x - \\ & 2P_w(\tan \varphi' + \lambda_{12}) - 2c' = \frac{2K_{IIc}}{\sqrt{\pi a}} \end{aligned} \quad (6)$$

由公式(6)可得隐伏断层采动活化扩展的临界水压力 P_c 为:

山东科技大学的采动高水压底板突水相似模拟试验系统^[23]。该试验系统由4部分构成:试验台系统、伺服加载系统、水压控制系统和电脑采集系统,如图3所示。水压控制系统通过高压软管与试验台水箱连接,将水通过试验台下部的水箱注入模型底板,可模

拟水压-构造-矿压联合作用下裂隙扩展及突水通道形成过程。试验台后面利用透明有机钢化玻璃进行密封,开采模拟煤层时暂时开启局部密封板,保证三维模拟环境^[24]。



图3 试验系统

Fig.3 Test system

3.2 模型设计

以山东某矿采地质条件为工程背景,设计含隐伏构造底板的突水相似模拟试验,模拟11煤开采过程中,底板徐灰含水层(承压水水压3.4 MPa)受开采扰动突水过程。试验模型中11煤顶底板岩层依据实际矿井岩层进行设计,11煤埋深372.5 m,底板隔水层厚度35.37 m,水压3.4 MPa,煤层厚度2 m,煤层上覆岩层42.63 m,垂直方向需施加厚覆岩329.87 m相应压力,岩体平均容重取25 kN/m³。

根据原型实际矿井开采情况,设计试验模型尺寸为1 200 mm×800 mm×400 mm(长×高×宽),依据试验台的尺寸,确定模拟试验的主要相似比:①几何相似比为1:100,②容重相似比为1:1.5,应力和强度相似比为1:150。试验按几何相似比对断层形态进行铺设,模拟隐伏断层倾角60°,展布长度412.42 mm,隐伏断层上距11煤40.05 mm,模型设计如图4所示。顶板岩层采用传统的砂、水泥、石膏、水配比而成相

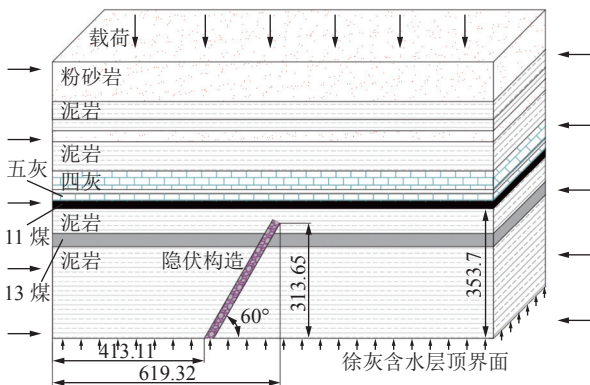


图4 含隐伏构造底板模型

Fig.4 Geological generalization model

应模拟材料,各分层间铺撒云母粉分隔,底板岩层采用新型流固耦合相似模拟材料(以砂子、石蜡、碳酸钙、凡士林、液压油配比而成),断层充填物以砂子和黏土配比为主。

模型上部和水平方向施加均布载荷模拟实际围岩的受力状态。模型前后采用有机玻璃进行位移约束,既能清晰地观察到试验过程中底板岩层的破坏和承压水沿裂隙的渗流情况,又能实现深部真实岩层的三维受力状态。

3.3 应力传感器的布设

试验共布置13个应力传感器,1—5号传感器布置于13煤与上覆泥岩层位置,用于监测底板应力变化。1—5号传感器相距200 mm,1号和5号传感器距离试验机两侧200 mm,距离试验机底部331.4 mm。其余8个传感器布置在隐伏构造附件围岩中,a1、a3、b1、c1传感器布置于断层上盘,a1、b1、c1距离断层30 mm,分别位于断层上盘上、中、下3个区域,a1、a3距离60 mm;a2、a4、b2、c2传感器与a1、a3、b1、c1传感器沿断层对称分布。传感器布置方式如图5所示。

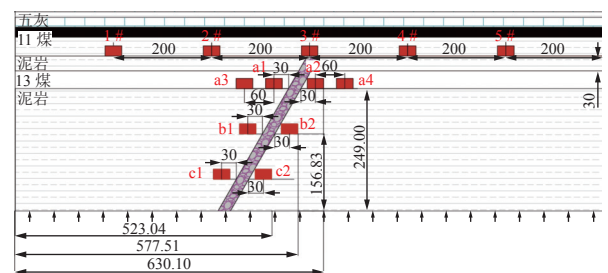


图5 应力传感器布置

Fig.5 Stress sensor layout

3.4 模型的开挖

模型开挖11煤,模拟煤层开挖1 000 mm,开挖步距为100 mm,共计开挖10次,开挖每次间隔30 min,共计5 h开挖完成。开切眼和终采线距离试验机一侧距离100 mm,开采方式采用人工钻凿的形式(图6)。

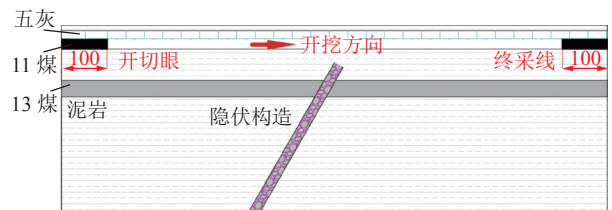


图6 模拟开挖方案

Fig.6 Simulation excavation scheme

3.5 煤层底板和隐伏断层采动应力演化规律

1)煤层底板应力监测结果。图7为距离煤层底

板 2.23 m 的编号 1—5 号的应力传感器(对应 DB1 ~ DB5)不同开挖距离时采动应力监测结果。随着工作面推进, 2—4 号传感器底板位置出现应力集中现象, 2 号传感器支承压力约为 13.2 MPa(模拟数据为 0.088 MPa), 采动应力增加 3.5%, 3 号、4 号应力传感器支承压力约为 14.1 MPa(模拟数据为 0.094 MPa), 采动应力增加 10.6%。工作面推进 20 ~ 30 m 时, 3 号传感器采动应力呈均匀增加, 而 4 号传感器采动应力则快速增加, 2 号传感器采动应力短暂增加后快速降低, 表明卸压区与增压区以煤壁为界分布。工作面推进 30 ~ 60 m 时, 1 号传感器采动应力状态为波浪起伏式变化, 分析为采空区扩大及覆岩移动破坏而引起的阶段性应力状态变化; 2 号、3 号传感器呈剧烈的阶梯式卸荷现象, 2 号传感器较早发生且最大卸荷应力约为 4.2 MPa(0.028 MPa), 卸荷比例为 67%; 4 号传感器一直处于总体稳定而稍有起伏的应力集中状态。工作面推进 60 ~ 100 m 时, 1 号传感器底板位置处于稳定卸荷应力状态, 底板应力约为 11.7 MPa(0.078 MPa); 2 号、3 号传感器由卸荷状态逐渐向原岩应力状态阶梯式回复, 3 号传感器底板应力状态在工作面推进 60 m 时, 呈现一次快速回复现象, 且其应力变化曲线中间过渡区间比 2 号传感器持续时间较短; 4 号传感器在推进至 70 m 时, 采动应力呈阶梯式下降, 最大卸荷应力约为 2.7 MPa(0.018 MPa); 模型开挖结束后, 可见 1—3 号卸荷应力依次减小, 表明远离工作面的后方采空区卸荷效应越明显。

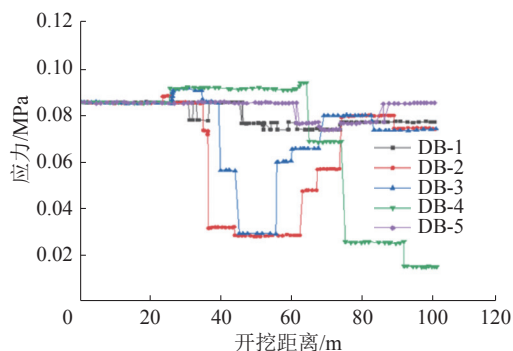


图 7 煤层底板应力监测

Fig.7 Coal seam floor stress monitoring

综上所述, 在近煤层底板空间, 采动应力随工作面推进, 应力增高区与卸压区以工作面为分界线呈现水平“S”型分布形态。底板采动应力造成底板岩体塑性破坏, 形成导水裂隙带。

2) 隐伏断层应力监测结果。图 8 为距断层 3 m 的应力传感器采动应力监测结果。工作面推进至 20 m 时, 隐伏断层顶端 a1、a2 应力传感器率先卸压, 且上

盘 a1 卸压程度大于下盘 a2, 隐伏断层顶端由压缩应力状态变为张拉应力状态。工作面推进 20 ~ 60 m 时, a1 仍处于张拉应力状态, b1 在开挖 40 m 时出现迅速卸压而进入张拉应力状态; a2、b2 出现先卸压后增压现象, a2 增加约 3 MPa(0.02 MPa), b2 增加约 1.5 MPa(0.01 MPa)。工作面推进 60 ~ 100 m 时, a1、a2 应力呈现阶梯式上升, 但 a2 应力大于 a1, 表明隐伏断层上盘卸压后应力状态难以恢复; b1 在工作面推进 60 ~ 80 m 时张拉应力先增后减, 而 b2 张拉应力逐步增加, 表明在隐伏断层中部位置, 上盘采动岩体应力变化较之下盘更剧烈。

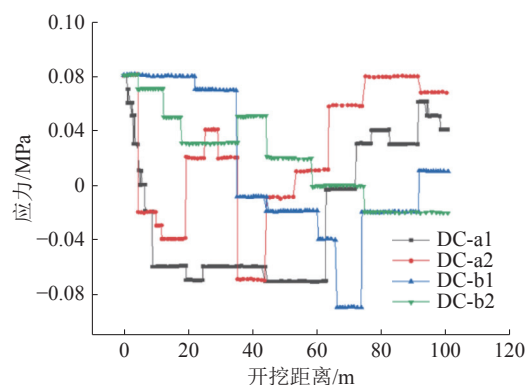


图 8 隐伏断层应力实测曲线

Fig.8 Measured curve of stress of buried fault

综上所述, 受隐伏断层影响, 断层上下盘采动应力变化规律差异明显, 首先隐伏断层顶端较之中部位置采动应力变化更为剧烈, 其次隐伏断层上盘较之下盘采动卸压程度更大; 总体表明隐伏断层顶部受矿压-水压作用而发生破坏的时机更早、程度更严重, 更易诱发导水裂隙发育, 隐伏断层将对采动应力随工作面移动起到阻隔作用。

3.6 突水通道演化形成规律

煤层开切眼时直接顶随采随落, 此时底板隐伏断层和水压的分布状态并没有明显变化, 如图 9a 所示。隐伏断层底部由于受承压水的影响, 产生部分微裂隙且有向上发展的趋势。

工作面推进 40 m 时, 采空区上方基本顶破断。采空区底板及隐伏断层围岩处于卸压状态, 底板采动剪切裂隙发育, 形成采动破坏带; 受采动-承压水作用, 隐伏断层内部原生裂隙扩展连通, 承压水发生顶托运移, 隐伏断层填充物湿润程度自下而上减弱, 如图 9b 所示。

工作面推进 60 m 时, 基本顶随采随垮; 2 号、3 号传感器处于卸荷状态, 底板隔水层岩体横向裂隙发育, 承压水存在局部的层流现象; 受矿压-水压-隐伏断层联合作用, 隐伏断层顶端活化裂隙向左上方

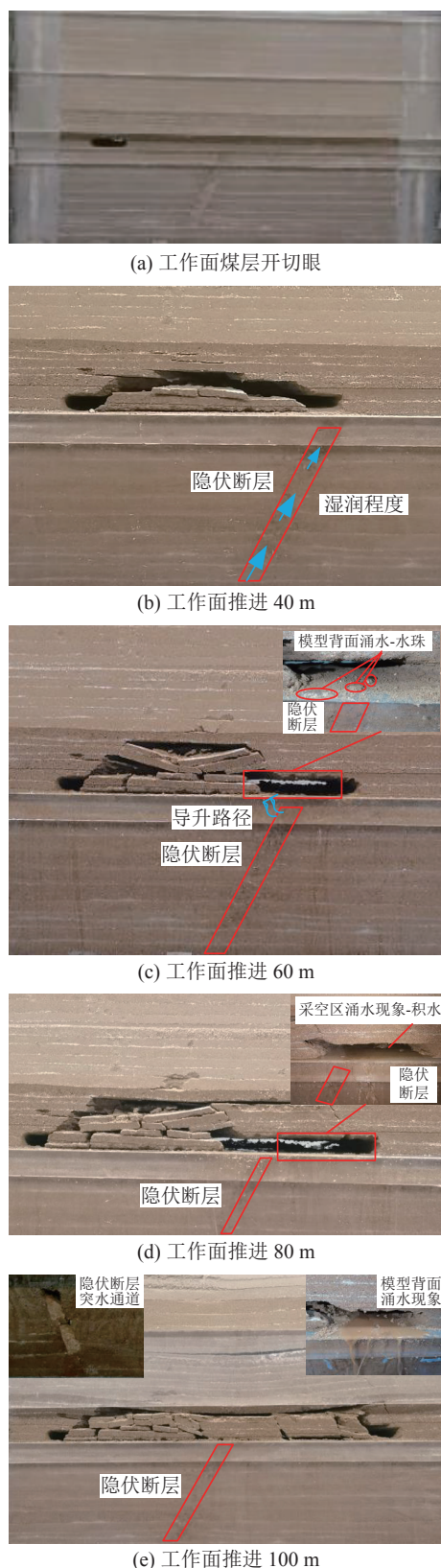


图 9 底板采动裂隙演化及导水通道形成

Fig.9 Development law of mining fissures in floor

沟通底板剪切裂隙,承压水沿导升通道涌入采空区,如图 9c 所示。

工作面推进 80 m 时,采空区中部底板空间持续

处于卸荷状态,但隐伏断层顶端随着顶板压实而采动应力增加,但承压水冲刷扩径携带隐伏断层充填物进入采空区,突水通道形成,突水点增多并突水量增加,如图 9d 所示。

工作面推进 100 m 时,受底板承压水持续冲刷扩径,隐伏断层围岩及其上部一定范围岩体力学强度弱化,可见隐伏断层内部出现孔洞,如图 9e 所示。

综上分析,采动联合承压水及隐伏断层作用,底板采动岩体随工作面移动,其应力状态经历压缩-卸压-压实过程而形成底板采动破坏带;隐伏断层上盘及其顶端受采动影响较之下盘与其中部更为明显,断层原生裂隙扩展并向逆工作面推进方向上方发育,与采动破坏带沟通形成突水通道,底板隐伏断层采动突水量渐进增加。

4 含隐伏断层底板采动导水通道演化数值模拟

4.1 模型建立

在底板隐伏断层存在条件下,为直观呈现突水通道演化规律及承压水运动趋向,以上述工程地质条件为基础,采用 FLAC^{3D} 数值软件的流固耦合模块对其进行研究。

根据图 4 地质概化模型建立图 10 所示的数值模型,模型尺寸 $x \times y \times z$ 为 $200 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 102 \text{ m}$,其中煤层底板隔水层厚度为 36 m,煤层厚度 2 m,模拟水压力 3.4 MPa,开切眼和终采线各留设宽度 50 m 安全煤岩柱,煤层开挖沿 x 向推进,开切眼设计位于 $x=50 \text{ m}$ 处,设定一次采全高、开挖步距为 10 m,开挖步数为 10 步。模型各岩层力学参数见表 1。

4.2 承压水上隐伏断层采动突水通道演化

图 11 为工作面推进 50、60、100 m 时,隐伏断层存在条件下的塑性区模拟结果。分析可知,随工作面推进距离增加,采空区底板采动破坏范围在横向上发展,而在垂向上存在极限范围,此时底板采动破坏带约 12 m,以剪切破坏为主要破坏形式;受采动及承压水作用,加之隐伏断层本身为低强地质体,可见在隐伏断层顶端先与采动破坏带沟通,且在隐伏断层上盘下端部出现原位张裂区,如图 11a 所示。当工作面过断层后,隐伏断层内部原生裂隙受矿压-水压联合作用,发生扩展沟通,其导水性能得到增强,在隐伏断层上盘发展出自下而上采动塑性区,塑性区范围自下而上减小,表明在矿压-水压-隐伏断层联动条件下,隐伏断上盘围岩极易发生破坏,此时原位张裂区横向距离约为 24 m,为底板采动破坏带的 2 倍,主要以张拉破坏为主要破坏形式,如图 11b、图 11c 所示。

表 1 岩层力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters

组别	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
db 1	33	5.2	0.23	3.6	1.2
db 2	36	2.1	0.33	1.8	0.2
db 3	32	4.8	0.23	3.1	1.1
db 4	31	1.9	0.32	1.6	0.2
db 5	39	5.3	0.24	2.5	2.0
db 6	30	2.6	0.36	2.2	0.21
db 7	36	4.9	0.24	2.7	3.0
gs 1	35	3.1	0.26	3.6	0.52
gs 2	22	1.1	0.23	0.3	0.3
gs 3	34	3.0	0.27	2.2	0.21
dc	18	0.3	0.33	0.1	0.1
mc	28	1.3	0.23	0.3	0.3

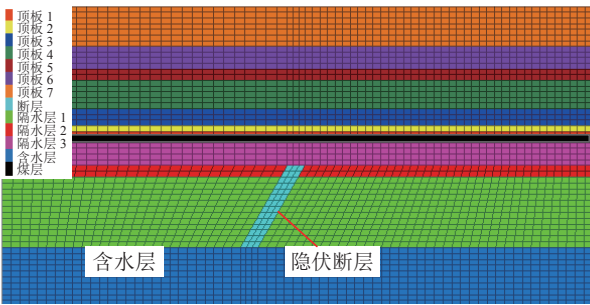


图 10 数值模型

Fig.10 Numerical model

综上可知，承压水上隐伏断层存在条件下，受矿压-水压联合作用，隐伏断层顶端首先破坏，隐伏断层上盘将发生自下而上的张拉破坏而形成承压水导升通道，最终沟通底板采动破坏带而形成突水通道。

4.3 底板隐伏断层存在下承压水采动运移分析

图 12 为工作面不同推进距离的承压水采动渗流场计算结果，底板承压水受采动影响而导升，在隐伏断层底端集聚，顺隐伏断层强导水通道渗流导升。在隐伏断层上盘原位张裂破坏区发生强力导升运移，其渗流强度和导升高度均大于隐伏断层下盘，工作面前方为支承压力压缩区，渗透性能削弱，如图 12a 所示。底板采动裂隙为导水通道，工作面过断层后，采动承压水在底板采动裂隙网络横向运移，并涌出工作面；同时，隐伏断层上盘导水裂隙扩展范围增加，导致采动承压水强渗流区范围及导升高度进一步发展，如图 12b 所示。工作面推进 100 m 时，可见隐伏断层上盘塑性区范围及承压水强渗流区基本吻合，且承压水在底板采动破坏带运动范围扩大，并以隐伏断层为中线基本对称，表明发生了以隐伏断层为

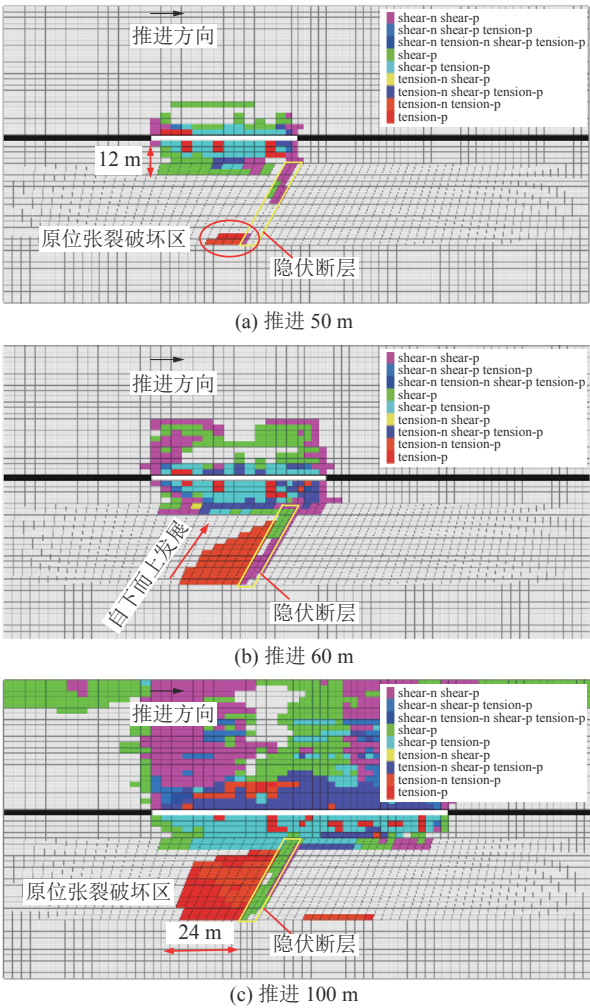


图 11 不同推进距离时塑性区计算结果

Fig.11 Calculation results of plastic zone at different advancing distances

主要突水通道的底板突水现象，如图 12c 所示。

综上可知，矿山-水压力共同作用时，承压含水层上隐伏断层对于采动应力传递和分布影响深远，进而影响采动导水裂隙发育规律及承压水采动导升路径，表现为突水通道上下对接发展及承压水顺隐伏断层强力导升。

4.4 含隐伏断层底板突水机制

通过上述高水压-强采动联合作用条件下，对含正隐伏断层采动突水通道发生路径的模拟结果表明：当底板隔水层较薄时，在隐伏断层上方受采动作用底板岩层最终会发育有倒“八”字型突水通道，在矿压-水压-隐伏断层联合作用下，隐伏断层内部原生裂隙扩展及其上盘发生自下而上的原位张裂破坏，采动承压水导升强度及强渗流区范围随工作面推进渐进发展，采动承压水导升运移与采动裂隙发育紧密相关，最终与底板采动破坏带上下对接发展为突水通道。

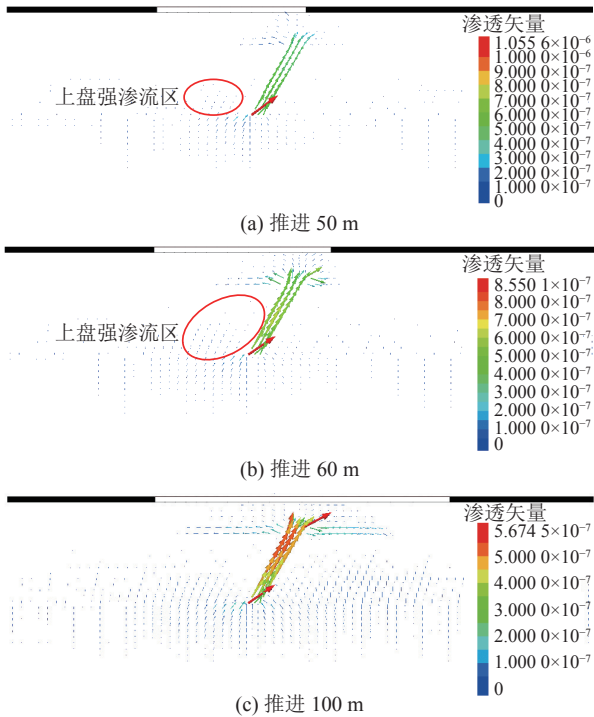


图12 不同推进距离时渗流场计算结果

Fig.12 Calculation results of seepage field at different advancing distances

因此,对含隐伏断层底板采动突水机制描述如下:突水通道是突水发生的必要条件,下位隐伏性断层具有良好的储、导水性,下伏隐伏断层能够致突的关键在于断层活化导水区能否连通采动影响区。因此,将含隐伏断层底板空间分为隐伏断层采动活化区、阻隔水区、采动影响区3部分,其中采动影响区又可细分为导水裂隙带、微小裂隙带和物性差异带^[25]。对于下位隐伏性断层,采动影响下能否发生底板突水灾害在于隐伏断层活化导水区是否连通采动影响区,未连通则无突水威胁,若是连通则要考虑承压水导升至此,水压是否已消减为0,若水压存在则要考虑此时水压能否突破物性差异带与微小裂隙带,基于以上认识,将下位隐伏断层采动—水压联合作用突水机制示意如图13所示。

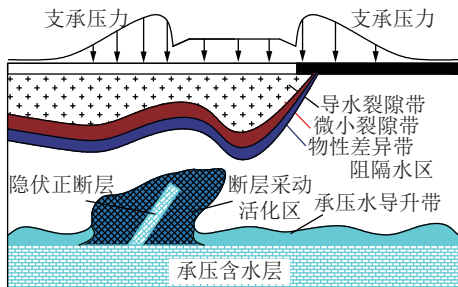


图13 下位隐伏断层采动—水压联合作用突水机制

Fig.13 Mining-hydraulic combined action mechanism of hidden fault

5 结 论

1)依据底板隐伏断层发育规模及空间位置条件,提出了底板隐伏断层突水的3类模式:沟通隐伏性断层突水模式、上位隐伏性断层突水模式及下位隐伏性断层突水模式。

2)模拟研究结果表明:近煤层底板采动岩体随工作面推进,经历压缩—卸荷—恢复过程,形成采动破坏带,底板空间采动应力状态以工作面为分界线呈现水平“S”形分布形态;采动—水压—隐伏断层作用下,隐伏断层将对采动应力随工作面移动起到阻隔作用。

3)隐伏断层顶部受矿压—水压作用的破坏程度时机更早、程度更严重,更易诱发导水裂隙发育;隐伏断层原生裂隙扩展并向逆工作面推进方向上方发育,与采动破坏带沟通形成突水通道;采动承压水导升运移与采动裂隙发育紧密相关,采动承压水导升强度及强渗流区范围随工作面推进渐进发展,底板隐伏断层采动突水先出现隐伏断层上方采空区,突水量随工作面推进渐进增加。

4)分析得出了采动应力与水压力耦合作用下下位隐伏断层扩展的判据,基于将含隐伏断层底板采动空间划分为隐伏断层采动活化区、阻隔水区和采动影响区的基础上,揭示了承压水上底板下位隐伏断层突水机制。

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍. 深部煤炭资源赋存规律与开发地质评价研究现状及今后发展趋势[J]. 煤, 2008(2): 1-11.
PENG Suping. Present study and development trend of the deepen coal resource distribution and mining geologic evaluation[J]. Coal, 2008(2): 1-11.
- [2] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [3] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [4] 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): 34-37.
DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(5): 34-37.
- [5] 魏久传, 李白英. 承压水上采煤安全性评价[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4): 57-59.
WEI Jiuchuan, LI Baiying. Security evaluation of coal mining

- above the confined aquifers[J]. *Coal Geolgy & Exploration*, 2000, 28(4): 57–59.
- [6] 文志杰, 景所林, 宋振骥, 等. 采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 52–61.
- WEN Zhijie, JING Suolin, SONG Zhenqi, *et al.* Study on coal face spatial structure model and control related dynamic disasters[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 52–61.
- [7] 陈军涛, 武强, 尹立明, 等. 高承压水上底板采动岩体裂隙演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(7): 54–60, 140.
- CHEN Juntao, WU Qiang, YIN Liming, *et al.* Law of crack evolution in floor rock mass above high confined water[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 54–60, 140.
- [8] 张风达. 深部采空区煤层底板滞后破坏特征[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(7): 42–47.
- ZHANG Fengda. Delayed failure characteristics of deep coal seam floor in goaf[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(7): 42–47.
- [9] 王连国, 韩猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 317–322.
- WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, *et al.* Stress distribution and damage law of mining floor[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 317–322.
- [10] 田雨桐, 张平松, 吴荣新, 等. 煤层采动条件下断层活化研究的现状分析及展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 60–70.
- TIAN Yutong, ZHANG Pingsong, WU Rongxin, *et al.* Research status and prospect of fault activation under coal mining conditions[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 60–70.
- [11] 刘志军, 胡耀青. 承压水上采煤断层突水的固流耦合研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(10): 1046–1050.
- LIU Zhijun, HU Yaoqing. Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(10): 1046–1050.
- [12] 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.
- [13] 王进尚, 姚多喜. 承压水上含隐伏断层突水动态监测物理模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(2): 681–689.
- WANG Jinshang, YAO Duoxi. Physical simulation study on dynamic monitoring of water inrush from concealed fault in confined water[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(2): 681–689.
- [14] 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 mechanism of delayed water inrush caused by mining induced filling fault activation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 136–143.
- [15] 李连崇, 唐春安, 李根, 等. 含隐伏断层煤层底板损伤演化及滞后突水机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1838–1844.
- LI Lianchong, TANG Chun'an, LI Gen, *et al.* Damage evolution and delayed groundwater inrush from micro faults in coal seam floor[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1838–1844.
- [16] 丁建新. 不同倾角隐伏断层条件下的底板突水模拟研究[J]. *中国煤炭地质*, 2021, 33(6): 47–53.
- DING Jianxin. Simulative study on floor water bursting in conditions of buried fault with different[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(6): 47–53.
- [17] 张培森, 颜伟, 张文泉, 等. 含隐伏断层煤层回采诱发底板突水影响因素研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(4): 765–772.
- ZHANG Peisen, YAN Wei, ZHANG Wenquan, *et al.* Study on factors influencing groundwater inrush induced by backstopping of a coal seam with a hidden fault[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(4): 765–772.
- [18] 刘伟韬, 刘士亮, 廖尚辉, 等. 断层影响下底板突水通道研究[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(12): 85–88.
- LIU Weitao, LIU Shiliang, LIAO Shangwei, *et al.* Study on water inrush passage from floor affected by fault[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(12): 85–88.
- [19] 陈亮亮, 王恩营, 廉有轩. 煤层底板隐伏断层突水危险性数值模拟分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(S1): 41–44.
- CHEN Liangliang, WANG Enying, LIAN Youxuan. Numerical simulation analysis of water inrush risk of buried faults in coal seam floor[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(S1): 41–44.
- [20] 张志巍, 张玉军, 张风达. 采动与隐伏断层双重作用下底板破坏特征[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(1): 194–199.
- ZHANG Zhiwei, ZHANG Yujun, ZHANG Fengda. Double function of traction and concealed fault[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(1): 194–199.
- [21] 杨登峰, 陈忠辉, 刘鑫, 等. 含隐伏断层煤矿底板采动突水规律数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(11): 193–195.
- YANG Dengfeng, CHEN Zhonghui, LIU Xin, *et al.* Numerical simulation of mining-induced water bursting law of coal floor with hidden faults[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(11): 193–195.
- [22] 周群力. 岩石压缩剪断裂判据及其应用[J]. *岩土工程学报*, 1987, 9(3): 33–37.
- ZHOU Qunli. Rock compressive shear fracture criterion and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 9(3): 33–37.
- [23] 孙文斌, 张士川. 深部采动底板突水模拟试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3274–3280.
- SUN Wenbin, ZHANG Shichuan. Development of floor water invasion of mining influence simulation testing system and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3274–3280.
- [24] 张士川, 郭惟嘉, 孙文斌, 等. 深部开采隐伏构造扩展活化及突水试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3111–3120.
- ZHANG Shichuan, GUO Weijia, SUN Wenbin, *et al.* Experimental research on extended activation and water inrush of concealed structure in deep mining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3111–3120.
- [25] 张玉军, 张风达, 张志巍, 等. 采动煤层底板层次性破坏特征全空间多参量协同监测[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 86–94.
- ZHANG Yujun, ZHANG Fengda, ZHANG Zhiwei, *et al.* Full-space multi-parameter cooperative monitoring of failure hierarchy characteristics of mining coal seam floor[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 86–94.