

煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制与试验验证

康红普^{1,2,3}, 高富强^{1,2,3}, 王晓卿^{1,2,3}, 柏建彪⁴, 王琦⁵, 章冲⁵, 王襄禹⁴, 杨磊^{1,2,3}, 娄金福^{1,2,3},
李延辉⁴, 王学宁^{3,4}, 原贵阳^{1,2,3}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 3. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 5. 山东大学, 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 断层滑移型冲击地压是煤矿冲击地压的主要类型, 目前对其发生全过程缺乏系统研究, 其机理与防控仍是根本难题。为实现断层滑移型冲击地压的试验模拟, 研制了煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统, 开发了低强高脆相似模拟材料, 制备了包含断层与巷道的大尺寸相似模型, 开展了一系列验证试验, 实现了巷道冲击破坏模拟与断层剪切滑移模拟。煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统具备三向六面加载功能, 竖向加载能力为 20 MPa, 模型尺寸为 1.50 m×0.75 m×0.75 m; 主体框架创新采用键板连接, 确保了主体框架的高刚度; 发明了蜂窝加载壳结构, 实现了密集油缸群加载, 能够满足断层滑移型冲击地压试验模拟的要求。开发了适用于断层滑移型冲击地压模拟的相似材料, 材料以水玻璃为胶结物、以氟硅酸钠为固化剂、以滑石粉为骨料, 单轴抗压强度介于 3.44~7.81 MPa, 冲击能指数为 9.2, 弹性能指数为 8.83, 兼具低强高脆特性。基于试验系统和低强高脆材料实现了静载巷道冲击破坏模拟, 验证了低强高脆相似材料模拟巷道冲击破坏的可行性, 获得了巷道极限平衡状态的加载条件, 巷道帮部连续片落为巷道冲击破坏的显著前兆特征。实现了粗糙锯齿断层的剪切滑移模拟, 证实粗糙断层剪切滑移会对巷道形成动载扰动, 获得了断层剪切滑移的合理加载方式, 采用动区顶部先加载、底部后卸载的方式能够实现断层的瞬间滑移, 并能消除对静区应力状态的影响。

关键词: 断层滑移型冲击地压; 试验系统; 低强高脆相似材料; 物理模拟; 巷道冲击破坏

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)09-3701-10

Development and experimental validation of a test system for simulation of fault-slip rockbursts in coal mine roadways

KANG Hongpu^{1,2,3}, GAO Fuqiang^{1,2,3}, WANG Xiaoqing^{1,2,3}, BAI Jianbiao⁴, WANG Qi⁵, ZHANG Chong⁵,
WANG Xiangyu⁴, YANG Lei^{1,2,3}, LOU Jinfu^{1,2,3}, LI Yanhui⁴, WANG Xuening^{3,4}, YUAN Guiyang^{1,2,3}

(1. Coal Mining Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

收稿日期: 2024-03-14 修回日期: 2024-06-21 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0266

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51927807); 天地科技股份有限公司资助项目 (KJ-2021-KCSYS-02, KJ-2021-KCSYS-01)

作者简介: 康红普 (1965—), 男, 山西五台人, 中国工程院院士。E-mail: kanghp@163.com

通讯作者: 高富强 (1981—), 男, 河南周口人, 研究员, 博士。E-mail: gaofq0215@gmail.com

引用格式: 康红普, 高富强, 王晓卿, 等. 煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制与试验验证[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3701-3710.

KANG Hongpu, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Development and experimental validation of a test system for simulation of fault-slip rockbursts in coal mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3701-3710.



移动阅读

Abstract: Fault-slip rockbursts are a major type of rockbursts in coal mine roadways, posing great hazards. Currently, there is a lack of systematic research on the entire process of fault-slip rockbursts, and prediction and prevention remain fundamental challenges. To achieve experimental simulation of fault-slip rockbursts, a testing system was developed, along with the development of low-strength high-brittleness similar simulation materials. A large-scale similar model containing faults and roadways was prepared, and a series of verification experiments were conducted, realizing the simulation of roadway shock failure and fault shear slip. The testing system is equipped with a triaxial six-face loading function, with a vertical loading capacity of 20 MPa and a model size of 1.50 m×0.75 m×0.75 m. The main frame innovatively adopts a key plate connection, ensuring high rigidity of the main frame. A honeycomb loading shell structure was invented, achieving oil cylinder group loading, which can meet the requirements of fault-slip rockburst simulation. A similar material suitable for fault-slip rockburst simulation was developed, which uses water glass as the binder, sodium fluosilicate as the curing agent, and talcum powder as the aggregate. The similar material has characteristics of both low strength and high brittleness, with a uniaxial compressive strength ranging from 3.44 to 7.81 MPa, an impact energy index of 9.2, and an elastic energy index of 8.83. Based on the test system and low-strength and high-brittleness materials, the bursting failure simulation of roadway under static load was realized, and the feasibility of simulating bursting failure of roadway using low-strength and high-brittleness materials was verified. The loading conditions of the critical equilibrium state of the roadway were obtained, with the continuous shedding of the roadway's side as a significant precursor characteristic of roadway damage. The shear slip of rough serrated faults was realized, confirming that the shear slip of rough faults would cause significant dynamic load disturbances to the roadway, obtaining a reasonable loading method for fault slip. The method of loading the top of the dynamic zone first and unloading the bottom later can achieve instantaneous slip of the fault and eliminate the influence on the static zone stress state.

Key words: fault-slip rockbursts; test system; low-strength high-brittleness material; physical simulation; roadway bursting failure

冲击地压已成为我国煤矿的第一大灾害^[1-2], 煤矿冲击地压一般可分为煤体压缩型、顶板断裂型和断层滑移型等 3 种基本类型^[3-4]。断层滑移型冲击地压是指由于采矿活动导致断层滑移释放能量, 能量以震动波的形式传递到巷道, 引起巷道大范围动力破坏的现象, 释放能量多、震级高是其显著特点, 并且冲击破坏部位往往与断层滑移区距离较远^[3-4]。近些年, 山东龙郛煤业、河南义马千秋煤矿、辽宁孙家湾煤矿均发生了由断层滑移型冲击地压引发的重大事故, 社会影响恶劣, 因此, 亟需加强对断层滑移型冲击地压的研究。

煤矿中断层滑移一般由开采活动引起, 大量研究聚焦于断层滑移与开采活动的关系, 证实断层上盘与断层下盘开采均能诱发断层滑移。蔡武等^[5]、李振雷等^[6]通过建立断层解锁力学模型, 提出了开采诱发断层滑移的概念模型。李志华等^[7-9]研究了断层上盘与下盘开采诱发断层活化过程, 发现断层下盘开采导致断层面剪应力相对增加、正应力相对减小, 并且指出断层下盘开采时断层更易滑移。谭云亮等^[10-11]解释了逆断层的冲击释能机制, 指出断层下盘开采卸荷导致断层上盘回弹, 从而释放出能量巨大的应力波。王宏伟等^[12]、王爱文等^[13]、张科学等^[14]、张宁博等^[15]采用相似模拟方法还原再现了断层下盘开采诱发断层

滑移的过程。王涛等^[16]、吕进国等^[17]采用相似模拟方法分析了断层上盘开采引起断层活化的机制, 发现断层上盘开采时断层面应力变化相对复杂。王晓卿等^[18]采用离散元模拟方法建立了具有岩桥锁固结构的断层模型, 研究了断层上盘开采诱发锁固断层滑移的模式与机制。基于大量断层滑移研究, 断层滑移诱发冲击地压机制被归结为 2 种, 一种认为断层构造应力与采动应力形成的叠加应力超出断层煤柱的承载强度导致断层煤柱发生冲击破坏^[5-6, 16]; 另一种机制认为, 断层构造应力和采动应力形成的叠加应力虽然不足以使煤柱冲击, 但叠加应力促使断层滑移产生动载, 断层煤柱在动静组合载荷作用下发生冲击破坏^[5-6, 16]。第 1 种断层诱冲机制实质为煤体在静载作用下发生冲击破坏 (虽有断层参与), 严格意义而言, 其属于应变型冲击破坏^[3-4]。第 2 种机制反映了断层滑移型冲击地压的动静组合载荷特性, 由于普遍采用简易的二维平面试验装置, 加载能力有限, 并且通常不考虑断层锁固结构, 导致断层滑移过程产生动载能量极小, 因此, 该机制在试验层面未能得到严格还原和证实。但第 2 种断层诱冲机制已在数值模拟层面得到证实, NEMCIK 等^[19]、高富强等^[20]借助数值模拟方法再现了断层滑移产生震动波、震动波诱发巷道冲击破坏的过程。

关于断层的试验研究主要包括2类,一类是针对断层试样的岩石力学试验,聚焦于断层的黏滑特性,主要采用双轴试验系统,试样尺寸普遍较小,一般不超过1 m^[21-23];另一类是开展断层相关相似模拟试验,研究断层对开采工程的影响,广泛采用二维平面试验装置(在煤矿领域称之为采场试验台),上述关于开采活动诱发断层滑移的相似模拟研究均属此类。娄金福等^[24]研制了超大尺寸二维平面试验装置,模型尺寸高达5.0 m×2.0 m×0.4 m,可进行双向加载,最大加载能力为2.1 MPa。HUANG Feng等^[25]采用大型二维平面试验装置研究了断层对隧道稳定性的影响,模型尺寸为3.0 m×2.4 m×0.4 m,仅可进行顶面加载,最大加载能力为74 kPa。LIU Xiaoyan等^[26]研制了断层蠕滑模拟试验装置,模型尺寸可达1.5 m×0.6 m×0.6 m,采用三向加载方式,兼具柔性和刚性加载,分析了断层蠕滑对隧道衬砌稳定性的影响。ZHEN Cui等^[27]研制了走滑断层模拟试验装置,装置结构相对简单,剪切盒包含主动部和被动部,模型尺寸较小,仅为0.72 m×0.50 m×0.45 m,采用油缸对主动部加载促使断层滑移。XUE Tianen等^[28]研制了三轴加载相似模拟试验系统,模型为立方体,尺寸为1.0 m,研究了隧道横穿断层带的稳定性问题。综上分析,目前缺乏适用于断层滑移型冲击地压研究的大型三轴试验系统。

断层滑移型冲击地压具有不可预测性,难以开展现场研究,并且其发生具有“断层滑移产生震动波—震动波传播—震动波致使巷道冲击破坏”全过程的特点,而目前缺乏专用模拟试验系统,导致尚未实现断层滑移型冲击地压全过程的试验模拟,其机理与防控仍未取得根本进展。在此背景下,国家重大科研仪器研制项目“煤矿巷道断层滑移型冲击地压模拟试验系统”(51927807)于2019年立项,旨在研发大型三维断层滑移型冲击地压专用物理模拟仪器,实现断层滑移型冲击地压的试验模拟。作为项目的阶段性成果,论文基于断层滑移型冲击地压发生过程,研制煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统,开发低强高脆相似模拟材料,制备大尺寸相似模型,开展巷道静载冲击试验与断层剪切滑移试验,验证相似材料的力学性能、巷道极限平衡状态的加载条件、断层剪切滑移的加载方式,为实现断层滑移型冲击地压全过程试验模拟提供支撑。

1 巷道断层滑移型冲击地压试验原理

巷道断层滑移型冲击地压试验原理如图1所示。模型包含断层与巷道,断层从上至下倾斜布置。为确保断层在滑移过程中产生震动波,将断层设计为锁固

断层^[18],锁固结构可为单一凸起状、规则锯齿状或粗糙状。断层上盘布置巷道,称之为静区,通过对静区加载使巷道达到极限平衡状态;断层下盘称之为动区,动区用于剪断断层以激发震动波。巷道可平行断层布置或垂直断层布置。以巷道与断层平行布置为例,首先对模型静区加载,使巷道围岩达到极限平衡状态,然后通过加载模型动区使断层发生快速剪切滑移,断层锁固结构在剪断过程中产生动载,动载以震动波的形式传播至巷道,对处于极限平衡状态的巷道形成扰动,诱发巷道发生冲击破坏。

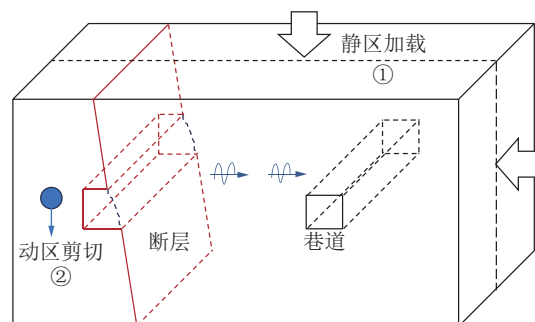


图1 巷道断层滑移型冲击地压试验模拟原理

Fig.1 Schematic of physical modeling for fault-slip rockbursts of roadway

根据试验原理,试验模型的尺寸应足够大,以满足断层与巷道同时布置的空间要求。加载能力应足够大,以满足大尺寸模型巷道临界状态的加载要求。模型材料应兼具低强高脆特性,以满足模型加载和巷道冲击破坏要求。因此,必须研制专用模拟试验系统以及低强高脆相似模拟材料。

2 煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制

2.1 系统组成

煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统由主体框架、液压加载装置、控制装置和附属装置4部分组成(图2)。主体框架为模型加载提供反力,由主梁、长横梁与短横梁通过键板和螺栓组装而成,键板承受剪力,螺栓只承受拉力。主体框架均采用Q690D特种钢焊接而成。键板和特种钢的创新应用确保了主体框架的高刚度,在满载20 MPa条件下主体框架最大变形量仅为0.75 mm。模型舱容纳最大模型尺寸(长×宽×高)为1.50 m×0.75 m×0.75 m。

液压加载装置包括液压泵站与加载单元。加载单元环绕模型布置,可对模型进行三向六面加载。模型尺寸较大,为保证传力效果,模型顶、底面与前、后侧面加载单元采用密集油缸群加载,加载块尺寸为15 cm×15 cm,油缸群为10排×5列布置。为实现密集油缸群加载,发明了蜂窝加载壳结构(图3),通过在实



图2 煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统

Fig.2 House-built test systems for simulating fault-slip rockbursts in roadways

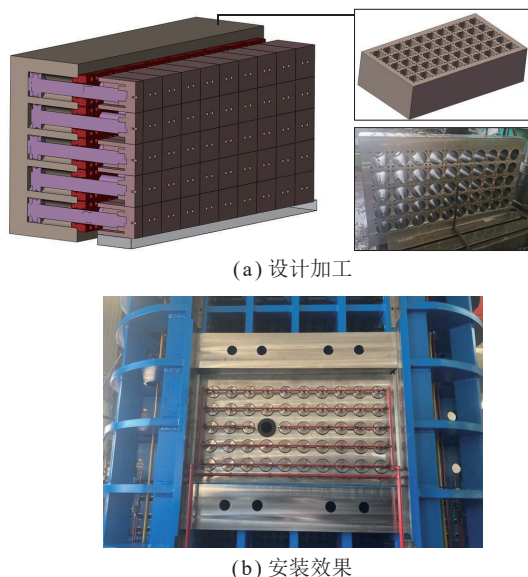


图3 蜂窝加载壳结构

Fig.3 Honeycomb load-bearing shell structure

体加载座内布置大量油腔,相邻油腔共用油腔壁,有效解决油缸安装空间不足难题。蜂窝加载壳镶嵌在主体框架内。顶面油缸采用双级加载,加载能力为 20 MPa;底面、前、后侧面油缸采用单级加载,加载能力为 10 MPa。模型左、右侧面加载单元采用普通油

缸加载,加载块尺寸为 25 cm×25 cm,油缸采用 3 排×3 列布置(中间未布置油缸,预留侧面巷道掘进孔),左右侧加载能力为 10 MPa。

控制装置包括控制柜和控制系统。控制系统可按照设定程序对模型不同区域进行加载、保载与卸载,并可实时采集各油路加载应力与位移。加卸载均采用应力伺服控制,压力传感器布置在加载块端部,与模型直接接触。附属装置包括送样小车、模型吊装装置与制样装置。

2.2 加载设计

模型加载系统如图 4 所示。模型底部断层位置固定,位于底面加载单元中间,即模型动区、静区底部均为 5 排油缸。根据模型顶部断层位置,将断层布置划分为不同方式。若动区顶部为 4 排油缸,则称之为上 4 下 5 布置;若动区顶部为 3 排油缸,则称之为上 3 下 5 布置,对应断层倾角分别为 81°和 71°。模型顶部左侧 4 排油缸均可单独控制,分别命名为上 1、上 2、上 3、上 4 油路。对于上 4 下 5 布置模型,上 1~上 4 油路全部用于动区顶部加载;对于上 3 下 5 布置模型,上 1~上 3 油路用于动区顶部加载,上 4 油路用于静区顶部加载。动区底部 5 排油缸为整体控制,命名为下 1 油路,可快速撤回,实现卸载。静区顶、底部油缸均为整体控制,分别命名为上 5 油路与下 2 油路。前、后侧油缸分别使用 1 条控制油路,左右侧油缸共用 1 条控制油路。

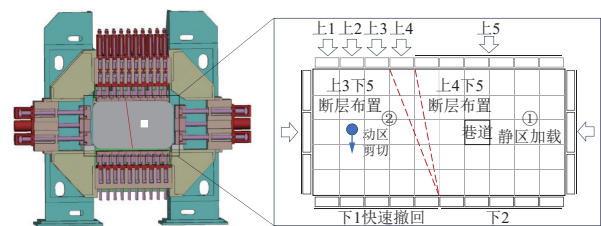


图4 加载系统设计

Fig.4 Design for the loading system

2.3 升级改造

在试验过程中,发现试验系统存在若干影响试验操作的缺陷,包括模型需频繁升降、模型底面存在被动承载-主动加载转换、静区底部由于剪切形成应力集中导致油管爆裂、左右侧加载单元安装繁琐等。对试验系统进行了相应改造(图 5):①在静区底部油缸加载块下方安装承载垫块,厚度为 55 mm (确保模型处于合适的试验高度),将静区底部改为刚性承载;②在动区底部增加定位调整平台,在模型安装时可确保动、静区底部油缸处于同一基准面;③将左右侧加载单元原有的螺栓安装改为插销油缸安装;④将送样小车改造为可升降结构,避免模型频繁升降。升级改造

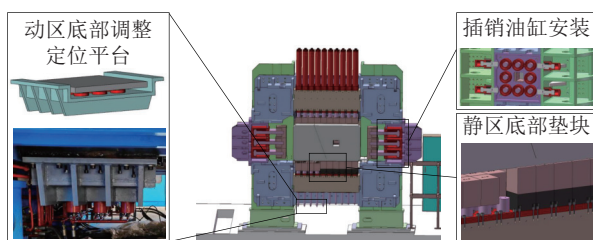


图5 试验系统升级改造

Fig.5 Upgrade of the test system

有效简化了模型安装和试验流程,降低了试验操作难度。

3 低强高脆相似模拟材料研发与模型制备

3.1 低强高脆相似模拟材料

根据试验原理,低强高脆相似模拟材料是实现巷道断层滑移型冲击地压试验模拟的基础。通过大量试验,发现以水玻璃为胶结物、以氟硅酸钠为固化剂的试样具备高脆性,在单轴压缩过程中能够发生剧烈弹射破坏,但试样强度偏高,并且2者在反应过程中会析出自由水,导致试样成型效果较差。进一步试验发现掺入骨料会降低试样强度,减小自由水析出,并且证实掺入粉状骨料模型的蓄能效果明显强于颗粒骨料。因此,提出了以水玻璃为胶结物、以氟硅酸钠为固化剂、以滑石粉为骨料的相似材料,通过优化配比实现了低强高脆特性^[29]。材料单轴抗压强度为3.44~7.81 MPa,黏聚力为2.01~3.65 MPa,内摩擦角 $7^{\circ}\sim 40^{\circ}$,密度 $1\ 400\text{ kg/m}^3$ 。材料动态破坏时间为390 ms,冲击能指数为9.2,弹性能指数为8.83,具备强冲击倾向性。相似材料单轴压缩试验结果如图6所示。

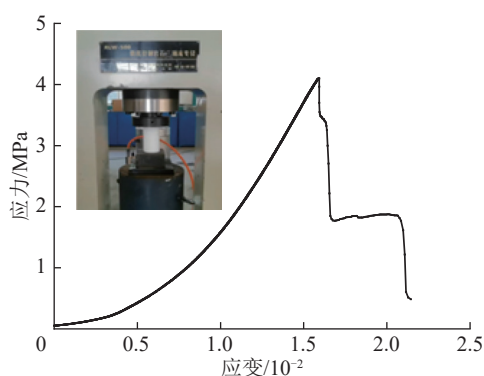


图6 相似材料单轴压缩试验

Fig.6 Unconfined compression test on the low-strength high-brittleness material

为进一步验证相似材料的力学性能,使用低强高脆材料制备了巷道相似模型,开展了落锤冲击试验(图7)。模型长×宽×高为75.0 cm×40.0 cm×65.5 cm,巷道位于模型中部,断面长×高为14.9 cm×11.4 cm。模型顶面应力为0.38 MPa,左侧面应力为0.50 MPa,

右侧面为刚性约束。在模型顶部放置钢垫板,以均匀传播落锤动载,落锤冲击位置偏移巷道左帮3 cm。在落锤冲击扰动下,巷道左帮发生大范围冲击破坏,迸射出大量破碎块体。落锤冲击试验证实了相似材料的低强高脆特性以及模拟巷道冲击破坏的可行性。

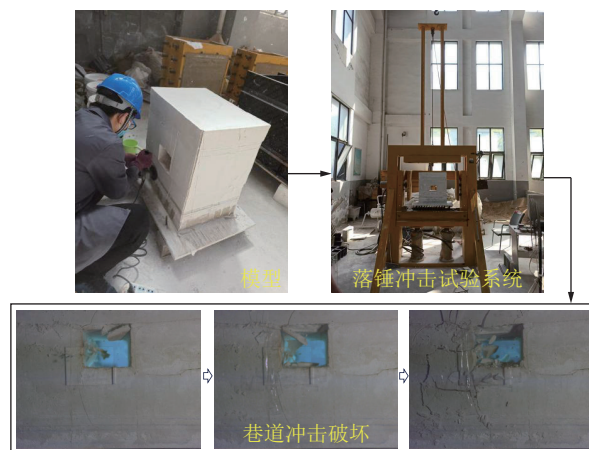


图7 相似材料落锤冲击试验

Fig.7 Drop weight test on roadway model made from low-strength high-brittleness material

3.2 模型制备

针对低强高脆相似材料的流态特性,研制了模具箱、组合式巷道模具与断层隔板,开发了包含断层与巷道的大尺寸模型制备技术。模具箱由底板与侧板组成,侧板底部安装有倒角模具,使模型成型后具有斜面倒角,方便吊装。在模具箱侧板预留方形贯穿孔,组合式巷道模具可横贯插入。组合式巷道模具由4块钢板通过内螺栓拼装,方便移除。断层隔板按照断层形状加工,厚度不超过3 mm。将模具箱、组合式巷道模具和断层隔板组装后,将混合均匀的低强高脆相似材料浇筑至模具箱内,并在浇筑过程中不间断搅拌,以增强模型的均匀性和密实性。模型凝固后,先移除组合式巷道模具,再拆除模具箱侧板,然后移离断层隔板,即可制备得到具有精细断层结构和巷道的大尺寸相似模型(图8)。共制备了2类模型:一类是断层滑移模型,包含断层与巷道,长×宽×高为0.85 m×0.85 m×1.60 m,巷道断面尺寸为0.15 m×0.15 m;另一类是巷道冲击模型,长×宽×高为0.95 m×0.75 m×0.55 m,模型仅包含巷道,用于开展巷道静载冲击模拟试验。

4 试验验证

4.1 巷道静载冲击试验

为了验证相似材料性能以及探索加载方案,开展了巷道静载冲击试验。巷道冲击模型尺寸较小(图8),故加工了试验盒,以弥补油缸行程不足。试验盒也相

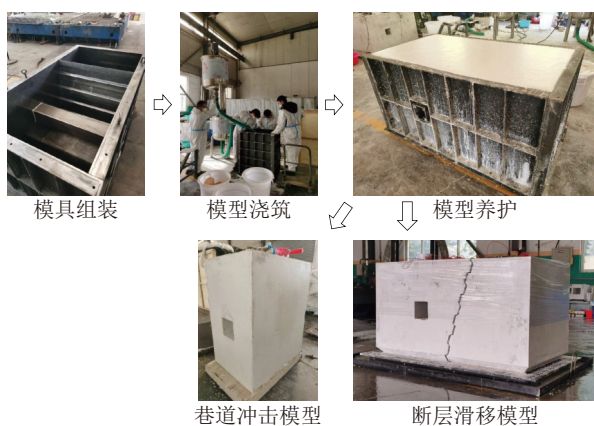
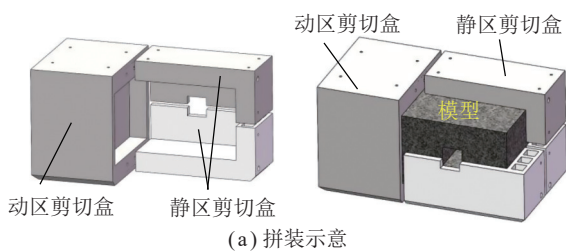


图8 模型制备过程

Fig.8 Procedures of creating physical model for simulating fault-slip rockbursts of roadways

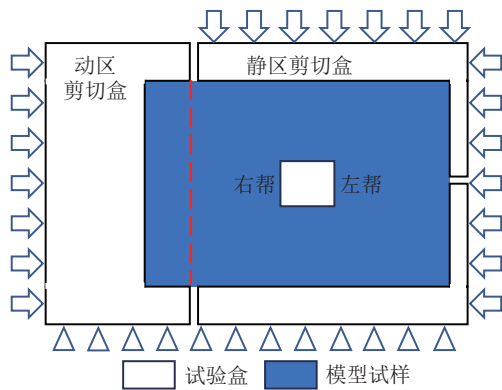
应分为动区和静区,动区为整体式,静区为4块分体式(图9(a))。首先将模型吊装入静区试验盒,在模型与试验盒之间铺设双层减摩板,再将动区试验盒安装到位,完成模型与试验盒拼装(图9(b))。试验盒分体之间留有3 cm左右缝隙,以便于对试样加载。试验采用双向三面加载方式,对模型顶面与左、右侧面加载(由于动区试验盒为整体式,动区顶部不加载),底部



(a) 拼装示意



(b) 模型拼装



(c) 加载示意

图9 模型安装与加载

Fig.9 Installation and loading of the physical model

为被动承载(图9(c))。首先进行双向同步加载,侧向应力加载至3.5 MPa后开始保压,随后仅增大顶部应力,直至巷道发生冲击破坏。在巷道顶板与帮部布置3组相互垂直的应变片,在模型后方观察孔布置微型高速相机,捕捉巷道冲击破坏情况。巷道右帮与左帮以高速相机画面作为区分,因此,靠近动区剪切盒侧为巷道右帮、相对侧为巷道左帮。

当顶部应力加载至5.5 MPa并开始稳压后,巷道右帮肩窝处出现掉渣、片帮,随后巷道右帮持续发生掉渣与片帮,但巷道仍处于相对稳定状态,以此作为冲击破坏过程的记录起始时刻(图10(a))。至425.5 ms时,右帮中下部发生一次剧烈弹射,弹射块体最大尺寸达到5 cm,巷道进入非稳定破坏阶段(图10(b))。此后,巷道右帮多处发生不同规模的弹射现象,并出现裂纹、鼓翘(图10(c)、(d))。至1 082 ms时,巷道右帮发生大范围冲击破坏,抛掷出大量破碎块体,至1 224.5 ms时结束(图10(e)、(f))。由此可见,巷道冲击破坏过程极其短暂,且具有显著的前兆特征。0~425.5 ms为冲击前兆阶段,巷道帮部发生连续的掉渣、片落;425.5~1 224.5 ms为冲击破坏阶段,持续819 ms,先是零星弹射,后是大范围冲击抛出。

图11为静区加载应力与巷道应变监测曲线(选取试验后期2 400 s),可以看出,加载应力曲线均较为

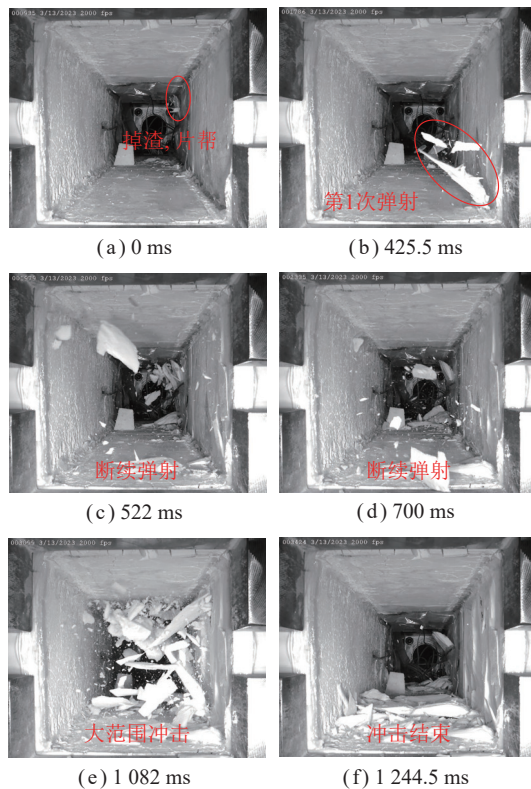


图10 巷道冲击破坏过程

Fig.10 Snapshots showing the produced rockburst process of the roadway

平稳,响应及时。在加载过程中,应变变化较小,至1 760 s时,巷道发生剧烈冲击破坏,巷道应变瞬间增大,其中巷道右帮的应变变化尤其显著。巷道静载冲击试验证实了低强高脆材料模拟巷道冲击的可行性,为实现巷道极限平衡状态加载提供了加载条件和前兆信息参考。

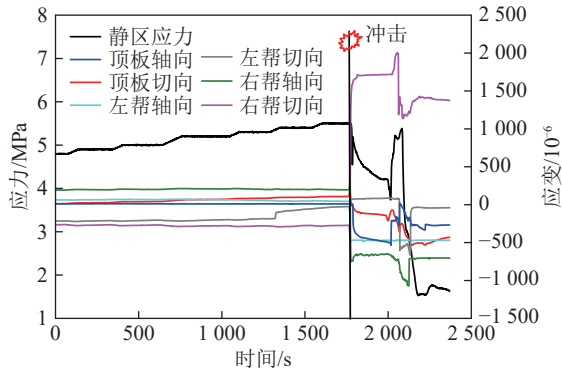


图 11 静区加载应力与应变监测曲线

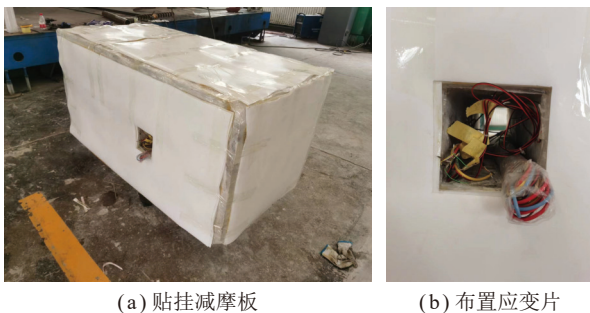
Fig.11 Monitored stress and strain curves during the test

4.2 断层剪切滑移试验

在巷道达到极限平衡状态后,需通过动区剪切促使断层滑移,共提出2种断层滑移加载方式,分别为动区顶底部同步加卸载与动区顶部先加载、底部后卸载,前者是指同时对动区顶部和底部分别进行加载和卸载,后者是指先将动区顶部加载至较高应力、后对动区底部进行卸载,促使动区相对静区发生剪切滑移,对2种加载方式分别进行了试验验证。

4.2.1 动区顶底部同步加卸载

使用断层滑移模型(图8)开展断层剪切滑移试验,断层布置方式为上3下5。在模型安装前,使用缠绕膜包裹模型,并在模型表面贴挂2层减摩板(图12(a))。在巷道顶部与帮部布置3组相互垂直的应变片,用于监测巷道变形(图12(b))。



(a) 贴挂减摩板

(b) 布置应变片

图 12 模型准备

Fig.12 Physical modeling preparation

试验开展于试验系统升级改造之前,采用三向六面加载方式。首先,将模型各向同步加载至3.4 MPa,然后,将模型左右侧加载至3.6 MPa,再将模型上下侧

加载至4.0 MPa,直至巷道出现明显破坏迹象;最后,锁死静区顶、底部加载油路,对动区顶底部进行同步加卸载,促使断层滑移。加载应力与加载位移如图13所示,可以看出,在动区顶底部同步加卸载开始后,动区顶部应力迅速增加,约300 s后,即46 074 s时,上1应力达到峰值8.43 MPa并迅速降低至0,上2和上3应力也出现了迅速降低(图13(a))。与此同时,上1、上2和上3油路的加载位移迅速同步增大,动区底部位移迅速减小,表明动、静区产生错动,即断层发生剪切滑移(图13(b))。断层滑移时模型伴随有较大的声响。为避免在动区剪切过程中静区发生倾斜,必须锁死静区顶、底部加载油路,即将静区顶底部应力边界由主动加载转换为被动保载,此过程应力出现小幅降低,并且在动区执行剪切过程中(历时约300 s),静区顶部外边缘位置应力急剧增大、静区底部外边缘部位应力急剧降低,即静区顶底部边界的应力状态被显著改变(图13(c))。由于断层滑移,左右侧加载应力出现了短时波动(图13(d))。

试验前后断层形态如图14所示,可以看出,断层由试验前的粗糙锯齿状被剪切成试验后的平直状,断层上盘的锯齿凸起被从根部剪断,剪断的锯齿镶嵌在断层下盘的锯齿凹槽内,并且剪断面上剪切滑痕明显。巷道应变监测结果如图15所示。在加载过程中,巷道应变一直缓慢增加,至46 074 s时巷道应变出现陡变,与断层滑移时刻吻合,并且以左帮和顶部应变变化最大,同时通过高速相机观测到巷道表面有剥落现象,表明断层剪切滑移会对巷道形成动载扰动。

4.2.2 动区顶部先加载、底部后卸载

为改进并验证断层滑移加载方式,基于升级改造后的试验系统再次开展了断层剪切滑移试验。模型采用上4下5断层布置。为实现动区复用、降低试验成本,模型动区和静区底部均采用混凝土材料。混凝土模型尺寸小于相似模型1 cm,在混凝土表面贴挂厚度为1 cm的橡胶板,找平模型,以降低材料弹性模量不同对加载效果的影响。模型及模型准备如图16所示。

试验系统静区底部被改造为刚性承载,因此采用三向五面加载方式。首先,将模型各向同步加载至3.5 MPa;然后,静区顶面继续加载至8.6 MPa,直至巷道出现明显破坏迹象。先将动区顶部加载至15.0 MPa,然后快速收回动区底部油缸,即采用动区顶部先加载、底部后卸载方式促使断层滑移。动区加载应力和加载位移如图17所示。可以看出,在收回动区底部油缸瞬间,动区顶部4组加载应力快速降低,与此同时,顶部4组油缸快速同步伸出,位移瞬间增加55 mm,

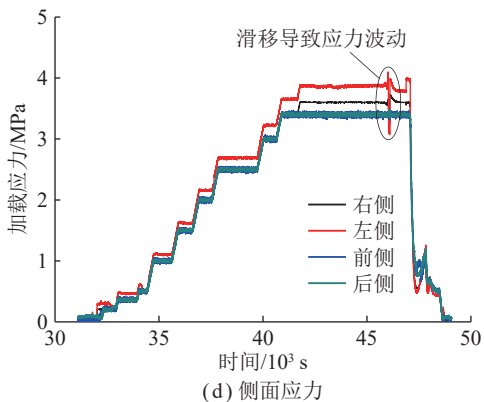
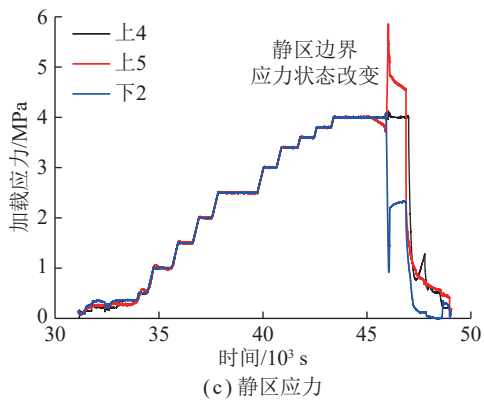
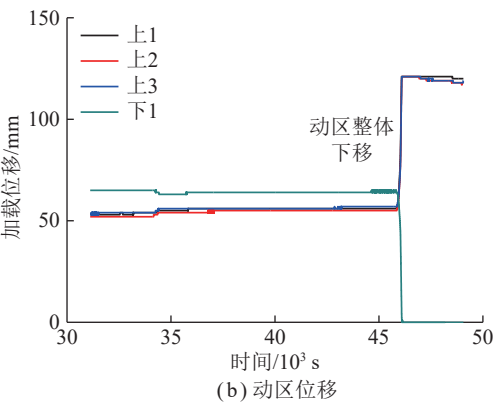
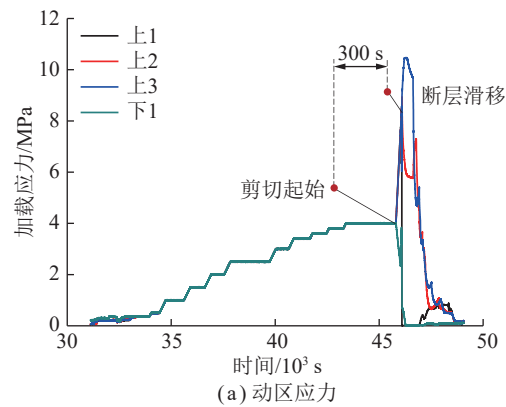


图 13 加载应力与加载位移

Fig.13 Changes of the stress and displacement of the loading rigs

表明动区发生了快速整体沉降,导致断层发生剪切滑移。断层滑移时模型发出声响。断层滑移后,断层下盘的锯齿被全部齐根剪断,断层面变得平直,剪断的

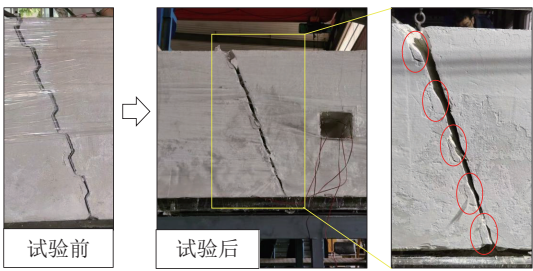


图 14 断层剪切滑移情况

Fig.14 Photos showing the slippage along the fault after test

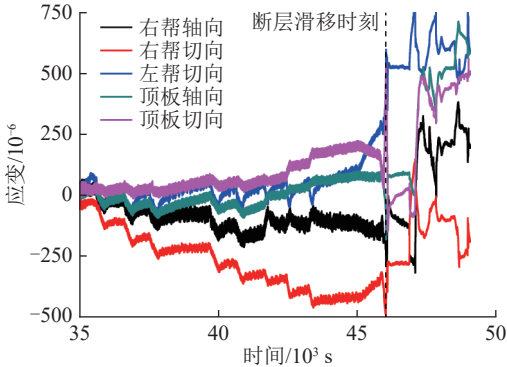


图 15 巷道应变监测结果

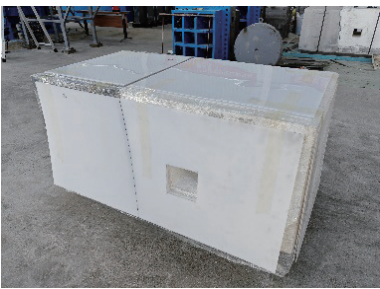
Fig.15 Strain changes on the roadway surface during the test



(a) 模型



(b) 贴挂橡胶板



(c) 贴挂减摩板

图 16 模型及模型准备过程

Fig.16 Preparation of physical modeling

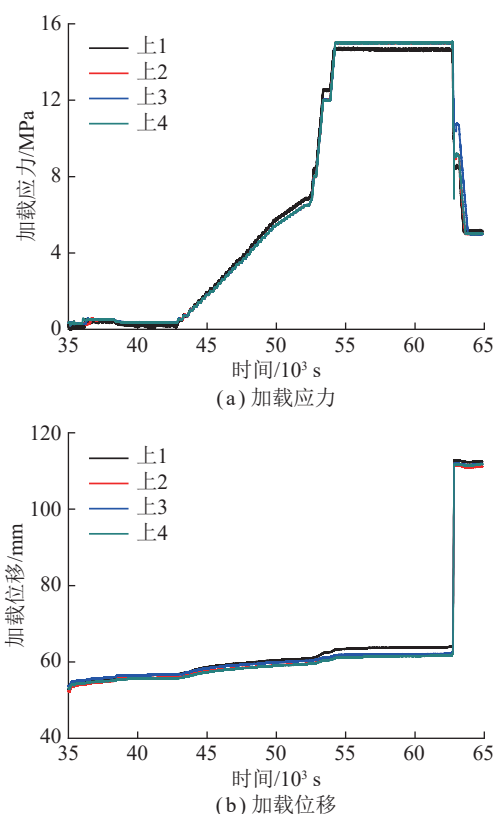


图17 动区加载应力和加载位移

Fig.17 Loads and displacements of the loading rigs in the dynamic area

锯齿密实镶嵌在断层下盘的锯齿凹槽,断层面有明显的剪切滑痕(图18)。

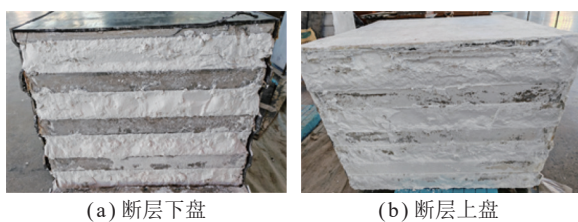


图18 剪断后的断层面形态

Fig.18 Conditions of the fault surfaces after slippage

断层剪切滑移试验表明,采用动区顶底部同步卸载和动区顶部先加载、底部后卸载的方式均能促使断层发生剪切滑移。前者从动区加载至断层剪切滑移历时较长(经历载荷累积阶段),在此过程中静区顶、底部应力边界发生显著变化,从而改变了巷道的极限平衡应力状态。而后者在动区卸载瞬间断层即发生剪切滑移,消除了动区剪切加载过程对静区应力状态的影响。因此,适合采用动区顶部先加载、底部后卸载的断层滑移加载方式。

5 结 论

(1) 研制了煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系

统,具备三向六面加载功能,竖向加载能力为20 MPa,模型尺寸为1.50 m×0.75 m×0.75 m;主体框架创新采用键板连接,确保了主体框架的高刚度;发明了蜂窝加载壳结构,实现了密集油缸群加载,能够满足断层滑移型冲击地压试验模拟的要求。

(2) 开发了适用于断层滑移型冲击地压模拟的相似材料,材料以水玻璃为胶结物、以氟硅酸钠为固化剂、以滑石粉为骨料,单轴抗压强度介于3.44~7.81 MPa,冲击能指数为9.2,弹性能指数为8.83,兼具低强度高脆特性。

(3) 基于试验系统和低强度高脆材料实现了巷道静载冲击破坏模拟,验证了采用低强度高脆相似材料模拟巷道冲击破坏的可行性,获得了巷道极限平衡状态的加载条件,巷道帮部连续片落为巷道冲击破坏的显著前兆特征。

(4) 实现了粗糙锯齿断层的剪切滑移,锯齿被齐根剪断,证实粗糙断层剪切滑移会对巷道形成显著的动载扰动,获得了断层剪切滑移的合理加载方式,采用动区顶部先加载、底部后卸载的方式能够实现断层的瞬间滑移,并能消除对静区应力状态的影响。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [3] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [4] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):1-6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.
- [5] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687-700.
- [6] 李振雷,窦林名,蔡武,等.深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机理研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):333-342.
LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 333-342.

- [7] 李志华, 窦林名, 曹安业, 等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 69–73.
LI Zhihua, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanism of fault slip induced rock burst during mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 69–73.
- [8] 李志华, 窦林名, 陈国祥, 等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 491–495.
LI Zhihua, DOU Linming, CHEN Guoxiang, et al. The risk of fault induced rock burst during mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(4): 491–495.
- [9] 李志华, 窦林名, 陆振裕, 等. 采动诱发断层滑移失稳的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 499–504.
LI Zhihua, DOU Linming, LU Zhenyu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(4): 499–504.
- [10] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367–379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367–379.
- [11] 谭云亮, 谭涛, 张修峰, 等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 214–223.
TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, et al. Difference and mechanism of dynamic behaviors[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.
- [12] 王宏伟, 王晴, 石瑞明, 等. 煤矿冲击地压与断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 762–790.
WANG Hongwei, WANG Qing, SHI Ruiming, et al. A review on the interaction mechanism between coal bursts and fault structure instability from the perspective of multi-physical field[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 762–790.
- [13] 王爱文, 潘一山, 李忠华, 等. 断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2486–2492.
WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2486–2492.
- [14] 张科学, 何满潮, 姜耀东. 断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 12–20.
ZHANG Kexue, HE Manchao, JIANG Yaodong. Mechanism research of roadway pressure bump induced by fault slip and activation[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 12–20.
- [15] 张宁博, 单仁亮, 赵善坤, 等. 卸载条件下逆冲断层滑移实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3794–3804.
ZHANG Ningbo, SHAN Renliang, ZHAO Shankun, et al. Mechanism of thrust fault rupture causing by unloading effect[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1671–1680.
- [16] 王涛, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 断层活化与煤岩冲击失稳规律的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 180–186.
WANG Tao, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Experimental research on fault reactivation and relating coal bumps[J]. Journal of Mining & Safety Mining, 2014, 31(2): 180–186.
- [17] 吕进国, 王涛, 丁维波, 等. 深部开采逆断层对冲击地压的诱导机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 405–416.
LÜ Jinguo, WANG Tao, DING Weibo, et al. Induction mechanisms of coal bumps caused by thrust faults during deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 405–416.
- [18] 王晓卿, 高富强, 李建忠, 等. 开挖诱导锁固断层滑移的实现方式及影响因素[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 692–700.
WANG Xiaoqing, GAO Fuqiang, LI Jianzhong, et al. Realization method and influencing factors of excavation-induced slip for locked fault[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 692–700.
- [19] NEMCIK Jan, VENTICINQUE Gaetano, GONG Libin. Dynamic analysis of fault slips and their influence on coal mine rib stability[C]//Proceedings of the 2020 Coal Operators' Conference. Wollongong: Mining Engineering, University of Wollongong, 2019.
- [20] GAO F, KANG H, LI J. Numerical simulation of fault-slip rockbursts using the distinct element method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 1–12.
- [21] 赵扬锋, 樊艺, 荆刚, 等. 断层黏滑失稳过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3101–3113.
ZHAO Yangfeng, FAN Yi, JING Gang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics in the process of fault stick-slip instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3101–3113.
- [22] DING Ling, ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, et al. Investigation on acoustic emission characteristics of fault stick-slip under different lateral pressures[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 6718.
- [23] DONG Peng, XIA Kaiwen, XU Ying, et al. Laboratory earthquakes decipher control and stability of rupture speeds[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2427.
- [24] 娄金福, 高富强, 李建忠, 等. 采场模型试验应力(压力)测量系统研制及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 31–40.
LOU Jinfu, GAO Fuqiang, LI Jianzhong, et al. Research and application of stress (pressure) measurement system for physical modeling[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 31–40.
- [25] HUANG Feng, WU Chuangzhou, NI Pengpeng, et al. Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 13: 104355.
- [26] LIU Xiaoyan, ZHANG Chuanqing, XIAO Haibin, et al. Deformation and failure characteristics of a deeply buried tunnel subjected to creep slip fault movement: Based on the engineering conditions of Yunnan water intake project[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81: 322.
- [27] CUI Zhen, LI Jianhe, FU Xingwei, et al. Evaluating the response of a tunnel subjected to strike-slip fault rupture in conjunction with model test and hybrid discrete–continuous numerical modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 4743–4764.
- [28] XUE Tianen, ZHANG Qiangyong, ZHANG Zhenjie, et al. Geomechanical model test on excavation and support of deep tunnel crossing a fault under hydro-mechanical coupled condition[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(4): 2063–2082.
- [29] LI Yanhui, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Development and performance study on low strength and high rockburst tendency similar simulation material of coal[J]. Construction and Building Materials, 2023, 404(133230): 1–15.