

10-25-2024

Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations

ZHENG Jianwei

Research Center for Rock Burst Control, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; Deep Mining and Rockburst Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China, zhengjianvy@163.com

ZHANG Xiufeng

Research Center for Rock Burst Control, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

JU Wenjun

CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

ZHENG Jianwei, ZHANG Xiufeng, JU Wenjun, et al. (2024) "Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 10, Article 10.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0253

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss10/10>

This Identification and Detection is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations

Authors

ZHENG Jianwei, ZHANG Xiufeng, JU Wenjun, WANG Cunwen, HAN Yueyong, LI Guoying, CHEN Yang, LI Haitao, HAO Jinwei, and LIU Biao



移动阅读

郑建伟, 张修峰, 鞠文君, 等. 层面位置对煤岩组合体动态破坏特性影响规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 97-105. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0253

ZHENG Jianwei, ZHANG Xiufeng, JU Wenjun, et al. Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 97-105. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0253

层面位置对煤岩组合体动态破坏特性影响规律研究

郑建伟^{1,2}, 张修峰¹, 鞠文君³, 王存文¹, 韩跃勇¹, 李国营¹,
陈洋¹, 李海涛², 郝晋伟⁴, 刘彪⁵

(1. 山东能源集团有限公司冲击地压防治研究中心, 山东 济南 250014; 2. 煤炭科学研究总院有限公司深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013; 3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 4. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013; 5. 陕西煤业化工集团有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 【目的】层面位置对煤岩组合体动态破坏过程及力学特性具有重要影响作用, 但影响规律尚不清晰。【方法】通过对含有 3 种层面位置的煤岩组合体(层面分别位于岩石部分上位、中位和下位)开展霍普金森冲击(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验, 分析了冲击载荷条件下煤岩组合体动态应力-应变、破坏过程、能量结构、碎块特征的演变规律。【结果和结论】结果表明: (1) 煤岩组合体动态应力-应变过程可以分为近似线性阶段、非线性的动态应力-应变阶段、弹性模量降低阶段、宏观破裂阶段、应力波卸载阶段 5 个阶段。(2) 随着层面由上向下布置, 岩石部分的破坏程度逐渐增强, 破坏过程逐渐剧烈, 破坏后的碎块的均匀程度降低, 而煤体部分的破坏程度则逐步降低, 破碎后的块度逐渐增加。(3) 层面的存在会降低煤岩组合体动态抗压强度, 与无层面煤岩组合体(平均强度为 79.487 MPa)相比, 当层面位于上方时, 组合体动态抗压强度(平均强度为 73.724 MPa)降低 7.25%; 当层面位于中位时, 组合体动态抗压强度(平均强度为 61.798 MPa)降低 22.26%; 当层面位于下位时, 组合体的动态抗压强度(平均强度为 64.991 MPa)降低 18.24%。(4) 随着层面位置由上向下布置, 能量结构发生变化, 反射能占比降低, 吸收能占比增加, 透射能占比减小。本研究可以为超长孔水力压裂技术或地面压裂技术在大范围处理坚硬顶板工程开展过程中压裂位置的选择提供一定指导。

关键词: 层面位置; 煤岩组合体; 动态抗压强度; SHPB; 能量结构; 水力压裂

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)10-0097-09

Influencing analysis of bedding plane location on the dynamic failure characteristics of coal-rock combinations

ZHENG Jianwei^{1,2}, ZHANG Xiufeng¹, JU Wenjun³, WANG Cunwen¹, HAN Yueyong¹,
LI Guoying¹, CHEN Yang¹, LI Haitao², HAO Jinwei⁴, LIU Biao⁵

(1. Research Center for Rock Burst Control, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. Deep Mining and Rockburst Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: [Objective] The bedding plane location significantly impacts the dynamic failure processes and mechanical properties of coal-rock composites, but the specific influence patterns remain unclear. [Methods] Dynamic mechanical tests were conducted on coal-rock composite specimens with bedding planes located at the top, middle, and bottom us-

收稿日期: 2024-04-17; 接收日期: 2024-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52404128, 52374206); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2024TD-ZD002); 山东能源集团 2023 年重点科技项目(SNKJ2023BJ15-R42)

第一作者: 郑建伟, 1989 年生, 男, 陕西榆林人, 博士后, 助理研究员。E-mail: zhengjianvy@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

ing the split Hopkinson pressure bar (SHPB). The investigation focused on the dynamic stress-strain behavior, failure process, energy distribution, and fragmentation characteristics under impact loading conditions. [Results and Conclusions] The findings indicate that: (1) The dynamic stress-strain behavior of coal-rock composites can be segmented into five distinct stages: near-linear stage, nonlinear dynamic stress-strain stage, elastic modulus reduction stage, macroscopic rupture stage, and stress wave unloading stage. (2) As the bedding plane location transitions from top to bottom, the extent of rock damage increases, the failure process becomes more pronounced, and the uniformity of post-failure fragments decreases. Conversely, the coal component exhibits a reduction in damage severity and an increase in fragment size after failure. (3) The presence of a bedding plane significantly reduces the dynamic compressive strength of coal-rock composites. Compared to composites without a bedding plane (average strength: 79.487 MPa), the dynamic compressive strength decreases by 7.25% (average strength: 73.724 MPa) when the bedding plane is at the top, by 22.26% (average strength: 61.798 MPa) when at the middle, and by 18.24% (average strength: 64.991 MPa) when at the bottom. (4) The energy distribution changes as the bedding plane location shifts from top to bottom, with a reduction in reflected energy, an increase in absorbed energy, and a decrease in transmitted energy. These results provide valuable insights for optimizing fracturing positions in large-scale hard roof treatment using ultra-long hole hydraulic fracturing or surface fracturing techniques.

Keywords: bedding plane location; coal-rock combinations; dynamic mechanical properties; split Hopkinson pressure bar (SHPB); energy structure; hydraulic fracturing

根据我国煤炭禀赋特征和国家能源安全战略的双重考量,煤炭作为主体能源的地位短期内不可动摇^[1-2],随着地下开采深度和强度的增加,冲击地压等动力灾害的发生频率和烈度不断加强,而煤层与顶板会形成“煤层-顶板”式承载结构^[3-4],也就是说巷道中出现的冲击式破坏不仅取决于煤、岩的力学特性,更是受到煤岩组合结构模式的影响^[5-6]。为了开展相应的研究,诸多学者通过将其抽象为煤岩组合体来开展试验,如借助煤岩组合体来研究冲击地压的发生机理及破坏过程中的能量演变^[7],通过在煤岩组合体中布置锚杆来研究锚固结构性能等^[8]。基于此可以认为通过开展煤岩组合体力学行为的研究能够对煤矿现场灾害的研究提供一定的指导。

通过对煤岩组合体开展动力试验发现的其动态应力-应变曲线在高应变率下具有双峰特征,主要形成轴向裂纹,低应变率下具有单峰特征,主要形成径向裂纹^[9-11];在真三轴单面临空条件下开展煤岩组合体开展冲击实验,发现组合体中煤样以张拉破坏为主^[12],且煤岩组合体中煤体部分裂隙角度和冲击角度对试件强度有较大影响^[13-14];借助数值模拟对煤岩组合体破坏过程进行研究,认为煤多为压剪破坏,岩多为拉破坏,且岩性对于吸收能利用率有直接影响^[15-16];“煤-岩”组合体和“岩-煤”组合体的动态抗压强度和应变随应变速率的增加呈非线性变化^[17-18];在冲击载荷作用下煤岩组合体内部煤和岩体部分裂纹的产生及扩展速度不一致,且随着子弹速度的增加,入射能线性增加,反射能线性降低^[19-20]。由上述文献可知,大量学者在煤岩组合体的岩性差异、加载率、本构模型^[21-25]等方面已取得了丰富的研究成果。

近年来,超长孔水力压裂技术在冲击地压防治方面

取得良好应用,水力压裂在水平主应力控制下产生水平裂隙,此时可以理解为水平裂隙形成了一定范围的人工层面,该人工层面横向切割坚硬顶板,在使用超长孔水力压裂技术处理巨厚坚硬顶板时,压裂位置的选择缺乏科学考量,在此,将这一问题简化为层面位置影响煤岩组合体动态力学行为的研究,用煤岩组合体中的层面来表征实际工程中的水平裂隙形成的层面,重点分析层面位置对煤岩体结构动态力学性能的影响规律。基于此,借助霍普金森冲击(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验开展对应的动力学实验,探究层面位置对煤岩组合体应力-应变、破坏特征、能量结构的影响规律,为超长孔水力压裂防治冲击地压工程的开展提供一定研究基础。

1 实验介绍

1.1 试件制备

在陕西某矿采集本次实验所需的煤块和岩石,将取得的煤和岩石加工成不同厚度的圆柱,采用云石胶(不饱和聚酯树脂)和固化剂将其粘成长径比为 1:1 的煤岩组合试件(直径 50 mm,高 50 mm),考虑到试件加工的精度及组合后的差异性,共设计 4 类煤岩组合体,编号为 RC32、RC122、RC334 和 TC212,不同类型试件各 3 个试样,试件加工过程如图 1 所示。煤岩组合体基本物理特征及设计类型见表 1,试件编号中 R 和 C 分别代表岩石(单轴抗压强度为 91.85 MPa)和煤(单轴抗压强度为 23.92 MPa),数字代表被层面分割成块的高度比值。

1.2 实验设备及方案

采用中南大学自主研制的小直径 SHPB 系统^[26]对煤岩组合体进行冲击性能实验,实验设备如图 2 所示。



图 1 试件加工过程

Fig.1 Specimen processing

表 1 试件基本物理特征

Table 1 Physical characteristics of specimens

类别	RC32	RC122	RC334	RC212
图示				
直径/mm	49.746	49.806	49.825	49.726
高度/mm	50.224	50.286	50.115	50.122
质量/g	205.8	206.4	205.9	206.6

注：直径、高度和质量均为测试试件的平均值。

首先确定合适的入射应力, 然后对不同煤岩组合体进行 SHPB 实验, 在此过程中记录入射杆和透射杆上的高速应变片信息, 同时借助 5F04 型高速摄像机对试件加载及破坏的全过程进行记录, 最后分析煤岩组合体的动态应力-应变演变、能量演变及破坏过程。

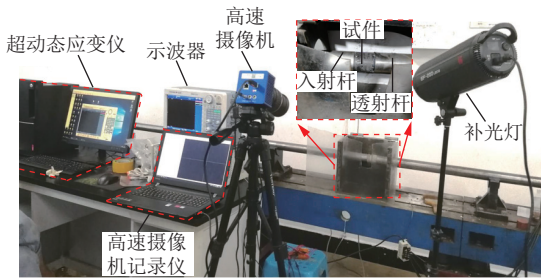


图 2 SHPB 及监测设备

Fig.2 SHPB testing and monitoring equipment

2 实验结果与分析

2.1 煤岩组合体动态应力-应变特征

RC32 试件中岩石部分不存在人为加工的层面, 因此以 RC32 的结果为对照组, 通过对比 RC122、RC334、RC212 的结果来分析层面位置(上、中、下)对煤岩组合体动态力学行为的影响, 动态应力-应变特征如图 3 所示。

综合分析本次实验所获取的煤岩组合体动态应力-应变曲线特征, 认为其大致可划分为 5 个阶段: I 阶段是指近似线性阶段, 在冲击载荷作用下, 极短的作用时间下, 试件内部微裂隙来不及压密或者发育; II 阶段是指非线性的动态应力-应变曲线阶段, 弹性模量开始变化缓慢, 具体原因是试件内部原来分布的裂隙

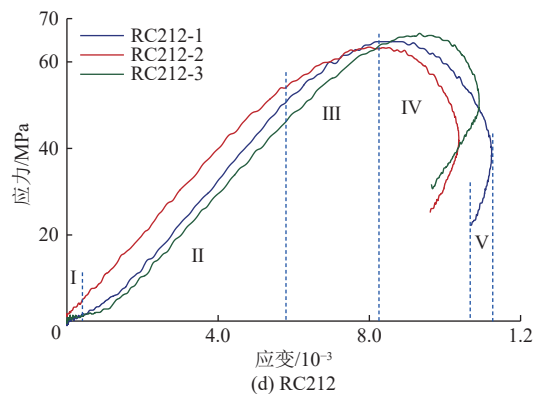
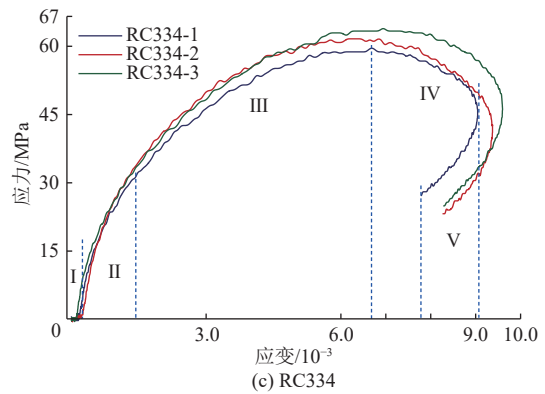
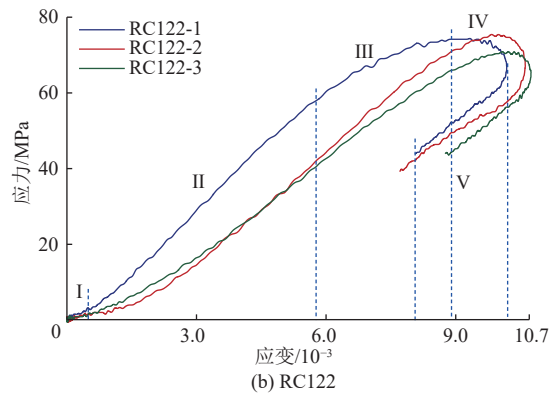
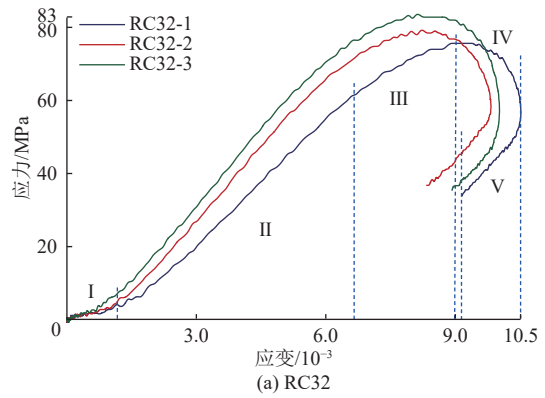


图 3 试件动态应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of specimen under impact load

开始扩展, 同时在冲击载荷的作用下出现新的裂隙; III 阶段是指由于试件在外部冲击作用下内部处于不利方位的裂隙急速发育, 导致弹性模量降低; IV 阶段是指

冲击应力波导致试件出现宏观破裂,试件的整体性和承载力急剧下降;V阶段是指应力波卸载阶段,总应变减小,是因为外部加载应力低于试件内部集聚的内力导致总应变减小。

以 RC32 作为参照组,当组合体上部分为完整岩石时,组合体的平均强度为 79.487 MPa;煤岩组合体 RC122 的平均强度为 73.724 MPa;RC212 的平均强度为 64.991 MPa;RC334 的平均强度为 61.798 MPa。由此可知:当层面位于上方时,组合体的动态抗压强度降低 7.25%;当层面位于中位时,组合体的动态抗压强度降低 22.26%;当层面位于下位时,组合体的动态抗压强度降低 18.24%。因此,在一定程度上可以认为,层面位置的差异会直接影响煤岩组合体的动态抗压强度,当层面位于中位时,组合体动态抗压强度降低最明显,测试结果如图 4 所示。

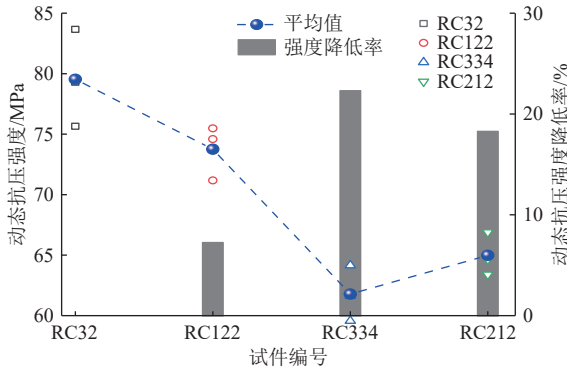


图 4 试件动态抗压强度变化

Fig.4 Dynamic compressive strength variation of specimens under impact load

2.2 煤岩组合体破坏过程

为了进一步揭示层面位置对煤岩组合体动态抗压强度的控制作用,在开展煤岩组合体 SHPB 实验的同时,借助高速摄像机(5F04 型)采集组合体表面裂隙的发展过程,如图 5 所示。

分析图 5a 可知,当煤岩组合体中岩石部分为完整状态时,在冲击作用下,岩石裂隙扩展有限,且能保持较为完整的块体旋转掉落,煤体部分则在拉、压应力波的作用下破坏严重,破碎的煤屑向四处喷射。分析图 5b 可知,当层面位于岩石部分中的上位时,在冲击作用下,岩块中裂隙有一定发育,但可以相对保持较好的完整度而向下掉落,煤块则受载呈破碎状向外喷射。分析图 5c 可知,当层面位于岩石部分的下位时,在冲击作用下,岩块裂隙发育程度增加,岩石被裂隙切割呈板状或碎块状发生旋转且向外喷射,煤体部分同样发生破坏而向下掉落,但是其完整度相对其他组较好;实验过程中由于设备故障未能采集到 RC334 试件在 SHPB 实验过

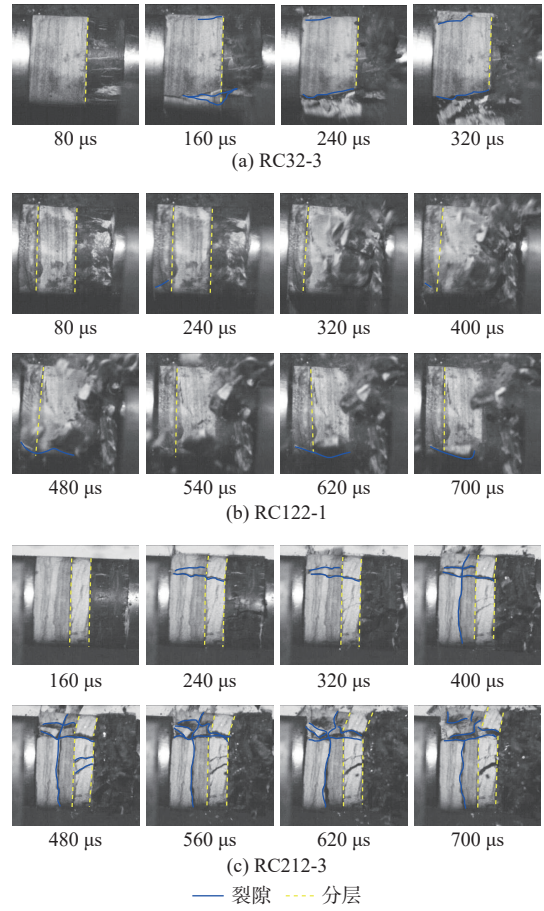


图 5 试件动态破坏过程

Fig.5 Failure process of specimens under impact load

程中的高速摄影照片,但对破坏后的碎块进行了描述,一定程度上可弥补此缺憾。

对比分析不同试件的破坏过程可知,随着人工层面由上向下布置,岩石部分的破坏程度逐渐增强,破坏过程逐渐剧烈,破坏后的块度逐渐降低,而煤体部分的破坏程度则逐步降低,破碎后的块度逐渐增加。

2.3 煤岩组合体能量演变

煤岩组合体在 SHPB 实验中的入射能、反射能、透射能、吸收能如图 6 所示。试件受到入射杆传入的能量后,会转变成不同形式的能量,如冲头的反弹动能,试件破碎所消耗的能量,试件破碎后运动的动能,试件中形成的弹性波能量,以热、声等形式释放的辐射能(0.1%),据相关研究^[26],入射能量最终主要还是会形成反射能、吸收能和透射能 3 种主要的能量结构,其他形式的能量占比相对较小,可以忽略不计。

一般情况下,试件在冲击载荷作用下,输入能量的密度等级越高,其破碎程度就越严重,为降低入射能偏差对煤岩组合体 SHPB 实验分析结果的影响,采用比值法^[27]来对不同煤岩组合体的能量结构进行分析,计算结果如图 7 所示。

分析图 7 可知,一般情况下,煤岩组合体在受到冲

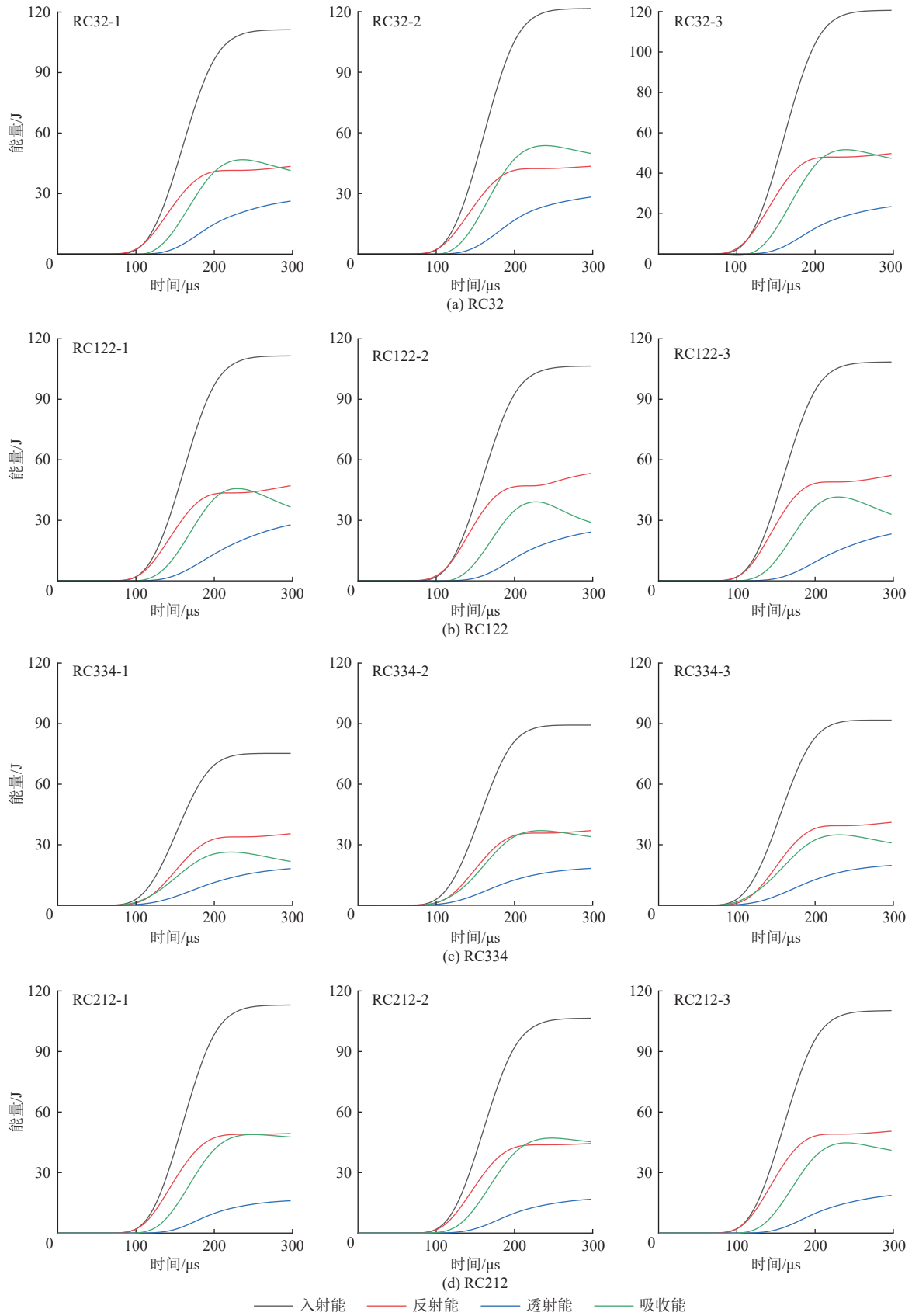


图 6 SHPB 实验能量特征
Fig.6 Energy characteristic of SHPB testing

击作用时,反射能大于吸收能与透射能。当岩石部分为完整时,试件 RC32 反射能平均占比(40.65%)小幅度大

于吸收能量平均占比(37.12%),透射能量平均占比为 22.23%;当层面位于上部层位时,试件 RC122 反射能平

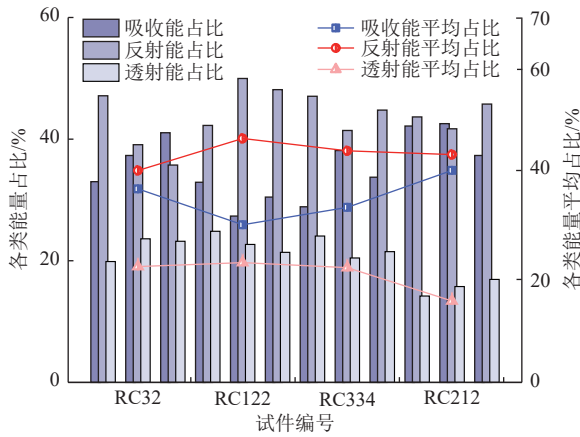


图 7 SHPB 实验能量结构特征

Fig.7 Energy structure characteristic of SHPB testing

均占比(46.78%)明显大于吸收能平均占比(30.24%),且透射能量平均占比达到 22.97%;当层面位于中间层位时,试件 RC334 反射能平均占比(44.42%)明显大于吸收能平均占比(33.58%),且透射能量平均占比达到 22.01%;当层面位于下部层位时,试件 RC212 反射能平均占比(43.70%)小幅度大于吸收能平均占比(40.67%),且透射能量平均占比达到 15.63%。

由上述不同层面位置对煤岩组合体能量分布的影响可知,当层面位于不同位置,且应力波穿越云石胶所形成的层面时,会发生大量的反射、耗散,层面位置由上向下,反射能占比相对降低,吸收能占比相对增加,透射能占比有降低趋势。也就是说应力波从岩石端传入,当层面靠近端部时,会发生第一次明显的反射和透射,对于煤岩组合体来说反射的能量增加,吸收的能量降低;当层面靠近煤体时,应力波在煤岩组合体中已经有了一定的传播,因此在遇到层面时反射的能量降低,吸收的能量增加。在此需要说明的是,由于煤岩组合体试件尺寸较小,且所开展实验的次数有限,所得到的规律并不明显,但是层面位置对于煤岩组合体能量结构的影响趋势是显著的。

2.4 受动载后碎块分析

基于上述分析可知,层面位置对煤岩组合体能量结构的组成有明显影响,且对岩石部分和煤体部分的破坏过程和裂隙扩展程度有显著影响,本部分对受冲击破坏后煤岩组合体碎块进行分析,如图 8 所示。当煤岩组合体试件中岩石部分没有被层面切割时,在冲击作用下,岩石能够以较好的完整状态存在,煤部分破碎程度则较为严重(图 8a);当层面位于上部时,岩石碎块的不均匀程度较高,呈块度差异较大的碎块,碎块中出现 1 块尺寸明显较其他碎块尺寸大得多的岩块(图 8b);当层面位于中部时,岩石碎块的不均匀程度降低,呈块度差异较小的碎块(图 8c);当层面位于下部时,基本上是形成块

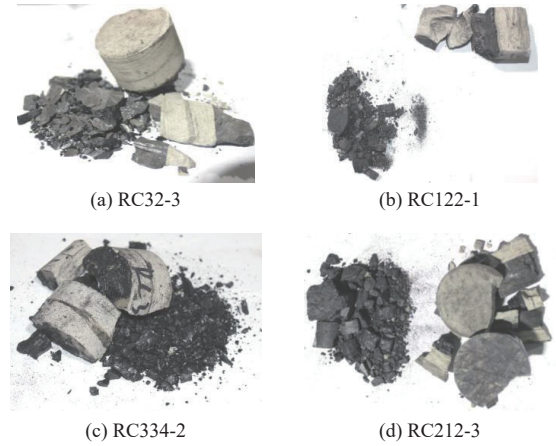


图 8 受冲击破坏后试件

Fig.8 Specimens after impact failure

度较为均匀的碎块(图 8d),煤破坏后形成的块度增加。

分析图 8 可知,当岩石部分被层面切割后,煤岩组合体破坏形态发生了变化,且随着层面位置由上往下,受载后岩石碎块块度的均匀性增加,破碎程度相对增加,主要是因为层面的存在降低了煤岩组合体中岩石部分的强度,且层面位置的不同会改变组合体能量结构。

3 讨论

3.1 煤岩界面处力学分析

综合上述分析可知,层面位置会直接影响煤岩组合体的动态抗压强度和破坏形态,当层面位于中部时,煤岩组合体的动态抗压强度降低最明显,当层面由上向下分布时,岩石破坏程度增加。

文献 [28] 对层间具有一定黏结力的复合岩体进行了深入的静力学分析,认为由于复合岩体中材料的弹性模量以及泊松比不同,在单轴压缩条件下复合岩体层面处,弹性模量大的部分会次生出拉应力,弹性模量小的部分会出现压应力,也就是说层面会改变局部的受力状态。虽然上述实验中的煤岩组合体受冲击载荷的作用,在分析时仍可以借助文献 [28] 中的研究成果进行解释^[29]。基于此,在本次实验中,煤-岩层面处岩石处于“压-拉-拉”的应力状态,煤体处于三向受压的应力状态,结合岩石受压不受拉的力学特性可以认为,岩石部分强度降低,煤体部分强度得到提升;这可以用来解释层面会改变煤岩组合体中岩石部分和煤的破碎程度。

3.2 压裂层位选择的探讨

随着超长定向钻探技术及装备和水压致裂设备的大力发展,超长孔水力压裂技术和地面压裂技术在大范围处理坚硬顶板实现岩层控制、冲击地压防治、顶板大面积来压等方面取得了长足进展。水力压裂会在坚硬顶板内形成裂隙条带,弱化坚硬顶板的强度,改变后续回采过程中坚硬顶板的空

力波穿过裂隙条带时会发生大量反射,改变原应力波传播路径,降低作用在下位巷道围岩上的应力,有利于巷道围岩的稳定性,防止围岩应力过高而诱发冲击地压。目前,中煤科工开采研究院有限公司、中煤科工西安研究院(集团)有限公司、大同煤矿集团有限责任公司等多家单位在国内开展过多项现场实践,取得了良好的效果^[30-35],总结出诸多值得借鉴的经验,但是在压裂位置的选择上,多依据顶板赋存特征和现场施工经验。

本次层面位置影响煤岩组合体动态力学行为的研究成果,在一定程度上可以为压裂位置选择提供一定建议:如果煤层上方存在一层厚度较大的坚硬顶板时,仅从“煤层-顶板”系统对动载能量的吸收和反射分析,应选择上位压裂,但是上位压裂会导致产生厚度相对降低的新坚硬顶板,对于下部的工作面来说并没有彻底解决顶板带来的矿压问题,同时上位压裂也对压裂设备和压裂技术提出更高的要求,如防止压裂裂隙穿层时沿层扩展等;仅从“煤层顶板”系统的动态抗压强度分析,应选择下位压裂,但是考虑到实际过程中下位压裂对于煤层巷道和工作面带来的不确定性会增加,同样要避免压裂裂隙穿层时沿层扩展;因此,综合高位、低位压裂存在的不足和现场的实际情况,建议在坚硬顶板中间开展压裂工程。

4 结论

(1) 通过对具有不同层面位置的煤岩组合体开展 SHPB 实验,认为与完整岩石部分相比,层面的存在会降低煤岩组合体强度,且当层面位于岩石部分中间时,煤岩组合体的动态抗压强度降低显著,降幅达到 22.26%。

(2) 随着层面位置由上向下布置,反射能占比相对降低,吸收能占比相对增加,透射能占比相对减小;岩石的破坏程度增加,煤的破坏程度相对降低。

(3) 在开展超长孔水力压裂技术和地面压裂技术处理大范围坚硬顶板时,建议在坚硬顶板中部开展压裂工程。但在此需要说明的是,现场施工位置的选择是综合岩层赋存状态、生产工艺、地应力赋存状态、钻进设备及工艺、压裂设备及工艺等情况后做出的系统性决策,而本文中对于压裂位置选择的研究处于理论分析阶段,后续需要开展不同尺度的物理及数值模拟来进行综合研究。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 康红普,王国法,王双明,等.煤炭行业高质量发展研究[J].中国工程科学,2021,23(5):130-138.
KANG Hongpu, WANG Guofa, WANG Shuangming, et al. High-quality development of China's coal industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138.
- [3] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] 陈岩,左建平,宋洪强,等.煤岩组合体循环加卸载变形及裂纹演化规律研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):826-833.
CHEN Yan, ZUO Jianping, SONG Hongqiang, et al. Deformation and crack evolution of coal-rock combined body under cyclic loading-unloading effects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 826-833.
- [5] 秦忠诚,陈光波,秦琼杰.组合方式对煤岩组合体力学特性和冲击倾向性影响实验研究[J].西安科技大学学报,2017,37(5):655-661.
QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, QIN Qiongjie. Effects of combination mode on mechanical properties and rock burst tendency of the coal-rock combinations[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 655-661.
- [6] 郑建伟,王书文,李海涛,等.层面数量对煤岩组合体抗压特性影响的实验研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(5):11-22.
ZHENG Jianwei, WANG Shuwen, LI Haitao, et al. Experimental study on compressive strength characteristics of coal-rock combinations influenced by number of bedding surfaces[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(5): 11-22.
- [7] 李利萍,胡学锦,潘一山,等.不同粗糙度煤岩界面超低摩擦效应与声发射特征试验研究[J].力学学报,2024,56(4):1047-1056.
LI Liping, HU Xuejin, PAN Yishan, et al. Experimental study on ultra-low friction effect and acoustic emission characteristics of coal-rock interface with different roughness[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(4): 1047-1056.
- [8] 李怀珍,李学华,种照辉,等.煤岩锚固系统滑移脱黏试验研究与力学性能分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1088-1093.
LI Huaizhen, LI Xuehua, CHONG Zhaohui, et al. Experimental

- research on slippage mode and analysis on mechanical properties of coal rock anchorage system[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(6): 1088–1093.
- [9] GONG Fengqiang, YE Hao, LUO Yong. The effect of high loading rate on the behaviour and mechanical properties of coal-rock combined body[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 4374530.
- [10] MA Cong, ZHU Chuanjie, ZHOU Jingxuan, et al. Dynamic response and failure characteristics of combined rocks under confining pressure[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 12187.
- [11] LI Feng, SUN Runchuan, ZHANG Yue, et al. Dynamic response characteristics and damage evolution of multi-layer combined coal and rock mass under impact loading[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9175.
- [12] 杨科, 刘文杰, 马衍坤, 等. 真三轴单面凌空下煤岩组合体冲击破坏特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 15–27.
YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental study of impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and single face unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 15–27.
- [13] LI Chengjie, XU Ying, CHEN Peiyuan, et al. Dynamic mechanical properties and fragment fractal characteristics of fractured coal-rock-like combined bodies in split Hopkinson pressure bar tests[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3179–3195.
- [14] 马泗洲, 刘科伟, 郭腾飞, 等. 煤岩组合体巴西劈裂动态力学特征数值分析[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(5): 128–140.
MA Sizhou, LIU Kewei, GUO Tengfei, et al. Numerical analysis of dynamic mechanical characteristics of Brazilian splitting of coal-rock combination bodies[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(5): 128–140.
- [15] LI Pingfeng, HUANG Mingjian, LU Junji, et al. Dynamic failure characteristics of combination rock under different strain rates: Insights from SHPB tests[J]. *Shock and Vibration*, 2022, 2022: 9285908.
- [16] XIE Beijing, CHEN Dongxin, DING Hao, et al. Numerical simulation of split-Hopkinson pressure bar tests for the combined coal-rock by using the holmquist–Johnson–cook model and case analysis of outburst[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8833233.
- [17] 李成杰, 徐颖, 叶洲元. 冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 981–988.
LI Chengjie, XU Ying, YE Zhouyuan. Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 981–988.
- [18] SUO Yunchen, LUO Ning, CHAI Yabo, et al. Experimental investigation of dynamic mechanical characteristics of inhomogeneous composite coal-sandstone combination for coalbed methane development[J]. *Heliyon*, 2022, 8(11): e11628.
- [19] 苗磊刚, 牛园园, 石必明. 不同应变率下岩-煤-岩组合体冲击力试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(17): 137–143.
MIAO Leigang, NIU Yuanyuan, SHI Biming. Impact dynamic tests for rock-coal-rock combination under different strain rates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(17): 137–143.
- [20] LIU Wenjie, YANG Ke, DOU Litong, et al. Mechanical properties and failure modes of CRCB specimen under impact loading[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 12108.
- [21] 杜锋, 王凯, 董香栾, 等. 基于 CT 三维重构的煤岩组合体损伤破坏数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(增刊 1): 253–262.
DU Feng, WANG Kai, DONG Xiangluan, et al. Numerical simulation of damage and failure of coal-rock combination based on CT three-dimensional reconstruction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(Sup.1): 253–262.
- [22] 陈见行, 王世纪, 张汉, 等. 水化学条件下煤岩组合体腐蚀特征及动力特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(5): 952–962.
CHEN Jianhang, WANG Shiji, ZHANG Han, et al. Corrosion characteristics and dynamic properties of the coal-rock combination under hydrochemical condition[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 952–962.
- [23] 陈光波, 李元, 李谭, 等. 循环水岩作用下煤岩组合体力学响应及劣化机制[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(1): 108–119.
CHEN Guangbo, LI Yuan, LI Tan, et al. Mechanical response and deterioration mechanism of coal-rock combined body under the action of circulating water-rock[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(1): 108–119.
- [24] 付斌, 周宗红, 王友新, 等. 不同煤岩组合体力学特性的数值模拟研究[J]. *南京理工大学学报*, 2016, 40(4): 485–492.
FU Bin, ZHOU Zonghong, WANG Youxin, et al. Numerical simulation of different combination of coal and rock sample mechanics and acoustic emission characteristics[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2016, 40(4): 485–492.
- [25] 解北京, 严正. 基于层叠模型组合煤岩体动态力学本构模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 463–472.
XIE Beijing, YAN Zheng. Dynamic mechanical constitutive model of combined coal-rock mass based on overlay model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 463–472.
- [26] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [27] 鞠杨, 李业学, 谢和平, 等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2426–2434.
JU Yang, LI Yexue, XIE Heping, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2426–2434.
- [28] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [29] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1747–1757.
YANG Renshu, LI Weiyu, FANG Shizheng, et al. Experimental

- study on impact dynamic characteristics of layered composite rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1747-1757.
- [30] 郑建伟. 顶板条带弱化防治巷道冲击地压技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- ZHENG Jianwei. Research on roof striped weakening method for rockburst prevention in roadway[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [31] 康红普, 冯彦军, 赵凯凯. 煤矿岩层压裂技术与装备的发展方向[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 5-8.
- KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHAO Kaikai. Development trends in hydraulic fracturing technology and equipment for strata control in underground coal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 5-8.
- [32] 于斌, 高瑞, 夏彬伟, 等. 大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 800-811.
- YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, et al. Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 800-811.
- [33] 龚涛, 张继, 夏彬伟. 地面压裂坚硬顶板对矿山压力显现影响的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15427-15439.
- GONG Tao, ZHANG Ji, XIA Binwei. Experimental study on the influence of surface fracturing hard roof on strata behaviours[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15427-15439.
- [34] 孙四清, 李文博, 张俭, 等. 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 1-15.
- SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 1-15.
- [35] 杨俊哲, 郑凯歌, 王振荣, 等. 坚硬顶板动力灾害超前弱化治理技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3371-3379.
- YANG Junzhe, ZHENG Kaige, WANG Zhenrong, et al. Technology of weakening and danger-breaking dynamic disasters by hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3371-3379.

(责任编辑 郭东琼)