



## 不同应力状态及应变率下组合煤岩体力学特性及能量演化规律

马智会 马智勇 潘荣锟 崔峰

### 引用本文:

马智会, 马智勇, 潘荣锟, 等. 不同应力状态及应变率下组合煤岩体力学特性及能量演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 102–113.

MA Zhihui, MA Zhiyong, PAN Rongkun. Mechanical properties and energy evolution of combined coal-rock body under different stress states and strain rates[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 102–113.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0049>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 易弹射煤体力学特性及能量演化机制

Mechanical properties and energy evolution mechanism of coal prone to ejection

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 51–66 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0834>

##### 低速冲击载荷扰动煤体破裂动力学特征与能量耗散规律研究

Study on dynamics characteristics and energy dissipation laws of coal fracture under low speed impact load

煤炭科学技术. 2024, 52(11): 273–284 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1341>

##### 不同应变率下松软煤体动态压缩力学特征

Dynamic compression mechanical properties of soft coal under different strain rates

煤炭科学技术. 2025, 53(4): 244–254 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1994>

##### 单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal-rock combination under unidirectional unloading condition

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2040>

##### 水岩作用下煤岩组合体力学特性与损伤特征

Mechanical properties and damage characteristics of coal-rock combined samples under water-rock interaction

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 37–46 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-1385>

##### 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律

Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load

煤炭科学技术. 2025, 53(2): 137–150 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1409>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

马智会, 马智勇, 潘荣锟, 等. 不同应力状态及应变率下组合煤岩体力学特性及能量演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 102–113.

MA Zhihui, MA Zhiyong, PAN Rongkun, *et al.* Mechanical properties and energy evolution of combined coal-rock body under different stress states and strain rates[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 102–113.

## 不同应力状态及应变率下组合煤岩体力学特性及 能量演化规律

马智会<sup>1,2,3</sup>, 马智勇<sup>1,4</sup>, 潘荣锟<sup>2</sup>, 崔峰<sup>3</sup>

(1. 四川轻化工大学 应急与安全学院, 四川 自贡 643002; 2. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454000;

3. 义马煤业集团股份有限公司, 河南 三门峡 472300; 4. 四川吉众矿安工程科技有限公司, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 深部煤岩体应力环境复杂多变, 为进一步揭示动载荷诱发冲击地压的发生机制, 采用岩-煤-岩结构试样, 利用改进后 SHPB 试验系统, 开展不同应力状态(无轴压及围压、一维动静组合、三维动静组合)及应变率( $49.3 \sim 137.9 \text{ s}^{-1}$ )下冲击试验, 研究组合煤岩体试样的强度、变形、破坏特征及能量演化规律。结果表明: 无轴压及围压、一维动静组合下组合体试样应力应变曲线峰后存在应力回弹及应变软化 2 种类型, 三维动静组合下都存在应力回弹现象。3 种应力状态下试样峰值强度大致随应变率的增加而增加, 表现出明显的率相关性。3 种应力状态下, 都是反射能占入射能的比例最高, 透射能占入射能的比例最低; 三维动静组合下, 反射能占入射能的比例低于其他 2 种应力状态; 当应变率低于  $123 \text{ s}^{-1}$ , 能量利用率、耗散能随应变率增加而逐渐增加, 耗散能密度随入射能的增加而增加。试样破坏形式表现出明显的率相关性, 随着应变率的增加, 煤、砂岩碎块尺寸也逐渐变小。无轴压及围压、一维动静组合下试样首先在煤岩界面发生破坏, 煤、砂岩产生较多小尺寸碎块是由于峰后二次裂纹造成的。三维动静组合下单次冲击后煤岩体破裂不明显。

**关键词:** 动静加载; 组合煤岩体; 力学特性; 能量演化; 岩石动力学

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0102-12

## Mechanical properties and energy evolution of combined coal-rock body under different stress states and strain rates

MA Zhihui<sup>1,2,3</sup>, MA Zhiyong<sup>1,4</sup>, PAN Rongkun<sup>2</sup>, CUI Feng<sup>3</sup>

(1. School of Emergency & Safety, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 472300, China; 3. Yima Coal Industry Group Co., Ltd., Sanmenxia 472300, China;

4. Sichuan Ji Zhong KuangAn Engineering Technology Co., Ltd., Zigong 643000, China)

**Abstract:** The stress environment of deep coal-rock mass is complex, to further reveal the mechanism of rock burst induced by dynamic load. Based on the Split Hopkinson Pressure Bar test system, the dynamic tests under different stress states (non-axial and confining loads, one-dimensional coupled static-dynamic loads, three-dimensional coupled static-dynamic loads) and strain rates ( $49.3 \sim 137.9 \text{ s}^{-1}$ ) were carried by using the rock-coal-rock structure samples. The characteristics of strength, deformation, failure and energy evolution of rock-coal-rock structure samples were studied. The results show that there were two types of stress rebound and strain softening after the peak of the stress-strain curve of the composite specimen under non-axial and confining loads and under one-dimensional coupled static-dynamic loads, and there was stress rebound phenomena under three-dimensional coupled static-dynamic loads. Under three stress states, the peak strength of the samples increases roughly with the increase of strain rate, showing an obvious rate correlation. Under three stress

收稿日期: 2024-01-10

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0049

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174169); 河南省杰出青年基金资助项目(232300421015); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室开放基金资助项目(WS2023B03)

作者简介: 马智会(1985—), 男, 河南义马人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: [huaer702@163.com](mailto:huaer702@163.com)

通讯作者: 马智勇(1981—), 男, 河南义马人, 高级工程师, 博士。E-mail: [mzyong@suse.edu.cn](mailto:mzyong@suse.edu.cn)

states, the proportion of reflected energy to incident energy was the highest, and the proportion of transmitted energy to incident energy was the lowest. The proportion of reflection energy to incident energy under three-dimensional coupled static-dynamic loads was lower than the other two stress states. When the strain rate is lower than  $123\text{ s}^{-1}$ , the energy utilization rate and dissipated energy increase gradually with the increase of the strain rate, and the dissipated energy density increases with the increase of the incident energy. The failure modes of the samples show an obvious rate correlation, and the size of coal and sandstone fragments decreased gradually with the increase of strain rate. Under non-axial or confining loads and one-dimensional coupled static-dynamic loads, the samples firstly failed at the coal-rock interface. Many small size fragments of coal and sandstone are secondary cracks caused by the effect of loads. The fracture of coal and rock mass is not obvious under three-dimensional coupled static-dynamic loads.

**Key words:** coupled static-dynamic loads; coal-rock combined body; mechanical properties; energy evolution; rock dynamics

## 0 引言

随着国民经济的飞速发展, 能源需求总量逐年提升, 为了保障能源供给, 我国煤矿开采深度以平均每年  $5\sim 10\text{ m}$  的速度向深部迈进<sup>[1]</sup>, 与浅部开采相比, 深部开采地质条件极其复杂, 不可避免地会受到“三高一扰动”的影响, 导致冲击地压等深部工程灾害时有发生。如 2023 年 1 和 11 月, 兖矿新疆矿业有限公司硫磺沟煤矿、黑龙江双鸭山矿业公司先后发生冲击地压事故。冲击地压已经成为我国煤矿当前面临的主要动力灾害之一, 并严重制约矿井的安全、高效开采。

一般认为, 冲击地压的发生与煤岩结构特征、组合方式及比例等密切相关<sup>[2]</sup>。在采掘工作及巷道中, 煤层并不是独立存在的, 而是与顶底板共同组成了一个力学平衡系统<sup>[3]</sup>, 单纯的以煤或顶底板岩石作为研究对象, 难以较为全面地揭示冲击地压发生的本质。为此, 通过研究组合煤岩体的力学特性来分析冲击地压的相关机理得到了采矿界的广泛认可<sup>[4]</sup>。

许多学者采用煤-岩、岩-煤或者岩-煤-岩组合体试样, 研究不同组合方式、比例及倾角下组合煤岩体的力学特性及能量演化规律<sup>[5-8]</sup>。LU 等<sup>[9]</sup>研究了不同加载率对组合煤岩体的力学及破坏特征影响, 发现高加载率下煤样主要是晶粒内破坏, 而较低加载率下煤样主要是晶粒间的破坏。余伟健等<sup>[10]</sup>研究了单轴压缩下不同高度岩-煤-岩试样的裂纹演化规律, 发现煤样自身的强度较低及内部存在较多的天然缺陷是导致组合体整体失稳的重要原因。汪铁楠等<sup>[11]</sup>考虑加载过程中煤岩力学差异, 提出了一种反映煤岩力学特性的裂前宏观弹性力学模型, 发现该模型能够很好地反映煤岩界面对组合体弹性力学性能的影响。

值得注意的是, 上述研究成果主要是关注静态或者准静态下组合煤岩体的力学特性来研究冲击地压的诱发机制。大量的工程实例表明, 冲击地压触

发因素主要包含 2 个方面<sup>[3]</sup>, 一方面是煤岩体所承受的载荷超过了自身极限承载能力; 另一方面是外界动力扰动影响, 即动载荷是诱发冲击地压等动力灾害的主要力源<sup>[12]</sup>, 如河南义马跃进矿冲击地压事故中由爆破引起的占 46%<sup>[13]</sup>。事实上, 煤炭开采过程中, 动力源普遍存在, 如顶板的周期性断裂、较硬煤岩体的卸压爆破、天然地震、机械扰动等<sup>[12]</sup>。动载荷携带能量以应力波的形式扩散传播, 这使得煤岩体不可避免地会受到应力波作用的影响, 一方面会导致煤体、顶底板岩石的损伤、破坏, 另一方面也会诱发煤-顶底板接触界面的摩擦力降低<sup>[14]</sup>, 甚至消失而出现“相互分离”现象, 这些都会诱发或者加剧煤岩体动力失稳破坏现象的发生, 成为冲击地压发生的重大诱因。因此, 组合煤岩体动力学特征研究也得到了许多学者的高度重视。

刘少虹等<sup>[15]</sup>基于改进后的 SHPB 试验系统, 研究了一维动静组合下不同煤样的组合煤岩体试样的动力学特征, 发现组合煤岩体的动态峰值强度与碎块分维数随入射能的增大而增大, 但随着轴压的增加而逐渐递减趋势。侯勇等<sup>[16]</sup>研究了组合煤岩体的动力学特征及瞬变磁场特性, 发现组合煤岩体能够衰减 80% 的应力波传播, 破坏时的应变值与瞬变磁场的信号幅值呈负相关性。李成杰等<sup>[17]</sup>主要分析了冲击载荷下组合煤岩体中煤、岩各自的耗散能及破碎特征, 发现煤与岩石接触面的存在会导致应力波传播十分复杂, 组合煤岩体更容易聚集能量, 进而易导致动力灾害的发生。LI 等<sup>[18]</sup>研究含裂隙的煤岩组合体的动力学特征及断裂特征, 发现煤中裂隙角度为  $30^\circ$  时, 试样断裂尺寸较小。杨科等<sup>[19]</sup>基于 SHPB 试验系统, 采用 4 种岩石与同一煤体组成的试样进行动态冲击试验, 发现组合煤岩体试样大多起裂于远离煤岩体接触面的煤或者岩石, 冲击速度对组合体的破碎程度影响最大。赵洪宝等<sup>[20]</sup>基于 SHPB 试验系统和 DIC 技术, 研究了不同应变率下组合煤岩体力学特性及本构模型研究, 发现煤-岩试



样与岩-煤试样的能量耗散和分形维数随应变率增加而趋于相近。LU 等<sup>[21]</sup>研究动载作用下岩-强/软阻隔层-煤组合承载体应力波传播衰减规律及能量耗散的特征,发现强阻隔层影响下的煤岩体吸能能力提高约 10%,软阻隔层可提高试样达到吸能峰值的速率。

从上述可知,研究动力扰动下组合煤岩体的研究成果较多,但是考虑不同应力状态及应变率下的岩-煤-岩结构的组合体动力学特性及能量演化规律研究相对较少,为此,笔者采用岩-煤-岩结构试样,利用改进后 SHPB 试验系统,开展不同应力状态(无轴压及围压、一维动静组合、三维动静组合)及应变率( $49.3 \sim 137.9 \text{ s}^{-1}$ )下冲击试验,研究组合煤岩体试样的强度、变形、破坏特征及能量演化规律。

## 1 试样制备及试验方案

### 1.1 试样制备

试验选取义马矿区耿村煤矿埋深 633 m 处的煤和砂岩作为试验材料,根据岩石力学试验的相关规程<sup>[22]</sup>,利用取心、切割、打磨等工序,将煤加工成直径为 50 mm、厚度为 20 mm 的圆柱体,将砂岩加工成直径为 50 mm、厚度为 15 mm 的圆柱体。为了更真实模拟煤岩体赋存结构特征,将加工好的煤、砂岩圆柱体采用粘结效果较好的云石胶(厚度约为 0.5 mm)粘结成岩-煤-岩结构的试样(图 1)。该组合煤岩体的基本物理力学参数:密度为  $2.2 \text{ kg/m}^3$ ,纵波波速为  $2269.3 \text{ m/s}$ ,单轴抗压强度为  $32.8 \text{ MPa}$ ,弹性模量为  $6.1 \text{ GPa}$ 。

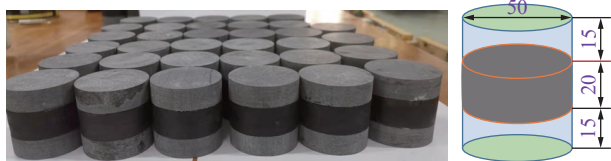


图 1 组合煤岩体试样实物图及几何尺寸示意

Fig.1 Physical photo and geometric dimension diagram of the combined coal-rock body Specimen

### 1.2 试验系统及原理

研究采用由中南大学李夕兵教授及其团队研制的改进后的 SHPB 试验装置<sup>[23-24]</sup>,图 2 为试验装置示意和实物图。该试验系统主要由动力冲击系统(高压氮气、发射腔、纺锤形冲头)、应力波传递系统(入射杆、透射杆、缓冲杆等)及数据监测采集系统(超级动态应变仪、示波器)3 个部分组成,不仅可以进行常规应变率( $1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ )下的材料动态力学性能

测试试验,还可以采用轴压及围压装置(图 2b)对试样施加轴压( $0 \sim 200 \text{ MPa}$ )、围压( $0 \sim 100 \text{ MPa}$ ),研究动静组合加载下的材料动态力学行为。该试验系统采用纺锤形结构的冲击头,该冲头能够实现对试样进行恒应变率加载,能够保证试验结果的有效性。

基于入射波电信号  $\varepsilon_i(t)$ 、反射波电信号  $\varepsilon_r(t)$  和透射波电信号  $\varepsilon_t(t)$ ,结合一维应力波理论和应力均匀性假定,可以推导出岩石试样的动态应力、应变和平均应变率的计算公式为

$$\sigma_s(t) = \frac{E_c A_c}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_c}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_c}{L_s} \varepsilon_r(t) \quad (3)$$

式中:  $E_c$ 、 $A_c$ 、 $C_c$  分别为弹性压杆的弹性模量,横截面积,纵波波速;  $A_s$ 、 $L_s$  分别为试样的横截面积和长度。

### 1.3 试验方案

实际矿井中煤岩体所处的应力环境十分复杂,如,煤柱可以认为其处于一维应力状态,巷道自由面煤岩体处于双轴应力状态,而大多数情况下,煤岩体是普遍处于三维应力状态中。为此,试验设置了无轴压及围压(D-RMR 组)、一维动静组合(Z-RMR 组)和三维动静组合(W-RMR 组)3 种应力状态,见表 1。

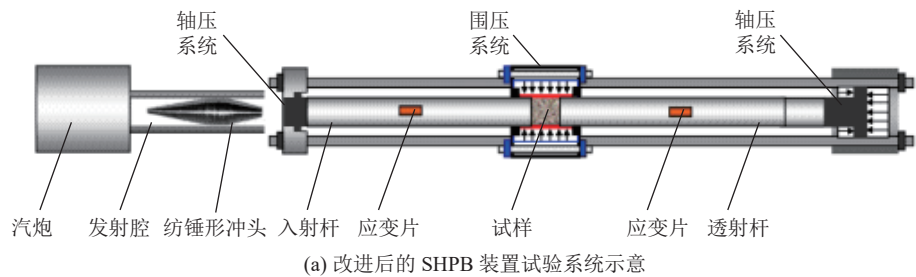
为了更好地模拟煤岩体真实应力环境,根据煤岩体实际取样点埋深(633 m)和地应力大小(最大水平应力为  $14.7 \text{ MPa}$ 、最小水平应力为  $9.1 \text{ MPa}$ ),结合取样方式、加工工序及试验设备特征,试验过程中轴压和围压分别设定为  $15$ 、 $9 \text{ MPa}$ 。实际工程中,不同大小动载荷都可能诱发不同应力状态下煤岩体失稳破坏,为此,试验过程中采用 5 种不同初始入射能(气压分别为  $0.5$ 、 $0.6$ 、 $0.7$ 、 $0.8$ 、 $0.9 \text{ MPa}$ )进行冲击,每种气压下仅进行一次冲击。

## 2 组合煤岩体动力学特性

### 2.1 动态应力平衡

动态测试分析是以一维应力波理论为基础,动态试验结果有效性是要保证破坏前试样两端应力达到平衡为前提。为了评估试验过程中试样两端应力平衡情况,将试样入射应力与反射应力之和与透射波进行比较。图 3 分别为无轴压及围压、一维动静组合下试样动态应力平衡示意,2 个试样入射应力与反射应力之和与透射应力除了加载初期及后期存在





(b) 改进后的 SHPB 装置试验系统实物

图 2 改进后的动静组合加载试验系统

Fig.2 Improved dynamic and static combined loading test system

表 1 组合煤岩体试样试验方案

Table 1 Experiment scheme of the combined coal-rock specimen

应力状态	试样组号	轴压/MPa	围压/MPa	冲击气压/MPa
无轴压及围压	D-RMR	0	0	0.5 ~ 0.9
一维动静组合	Z-RMR	15	0	0.5 ~ 0.9
三维动静组合	W-RMR	15	9	0.5 ~ 0.9

偏差,其他情况下两者基本吻合,这表明试验过程中试样处于较好的应力平衡状态。

如无轴压及围压应力状态下试样,在 60  $\mu$ s 之前,试样入射应力与反射应力之和大于透射应力,随着应力波在试样入射杆及透射杆两端的来回透反射,

当至 60  $\mu$ s 时,入射应力与反射应力之和等于透射应力,一直持续到 125  $\mu$ s,随后两者出现偏差。又如,一维动静组合下试样,0 ~ 160  $\mu$ s 之间,试样入射应力与反射应力之和基本都等于透射应力,其后才出现了偏差。试样到达一定阶段后出现偏差是由于试样出

现了宏观破裂裂纹,导致试样与入射杆及透射杆两端界面接触发生了变化。但是这并不影响 SHPB 试验结果的有效性,因为破坏之前试样基本处于应力平衡中。

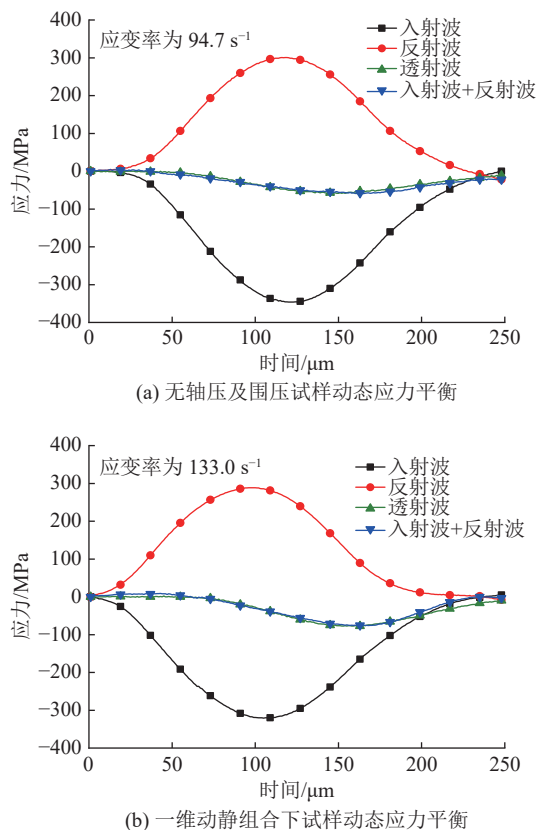


图 3 组合煤岩体试样动态应力平衡  
Fig.3 Dynamic stress equilibrium of combined coal-rock specimen

## 2.2 动态应力-应变曲线

图 4 给出了 3 种应力状态下组合体试样的动态应力-应变曲线。从图中可以看出,应力应变曲线没有明显的压密阶段,这一方面是由于动态冲击载荷作用时间太短,内部初始微孔隙来不及闭合,试样已经进入弹性阶段;另一方面轴压及围压施加过程中,会造成组合试样的内部初始微裂隙闭合。从图中也可以看出,试样在线弹性阶段持续时间不是特别长,大多阶段表现出非线性塑性特征。随着时间的增加,试样逐渐达到峰值应变及载荷,峰值应变及应力具有明显的率效应,即高应变率下试样表现出更高的峰值应变及应力。

根据应力应变曲线峰后的形态,可以将应力应变曲线分为 2 类,第 1 类为峰后应力回弹,即应变随着应力的减少而逐渐减少;第 2 类为应变软化,即应变随着应力减少而增加。从图中可以看出,无轴压及围压及一维动静组合应力状态中,低应变率下试

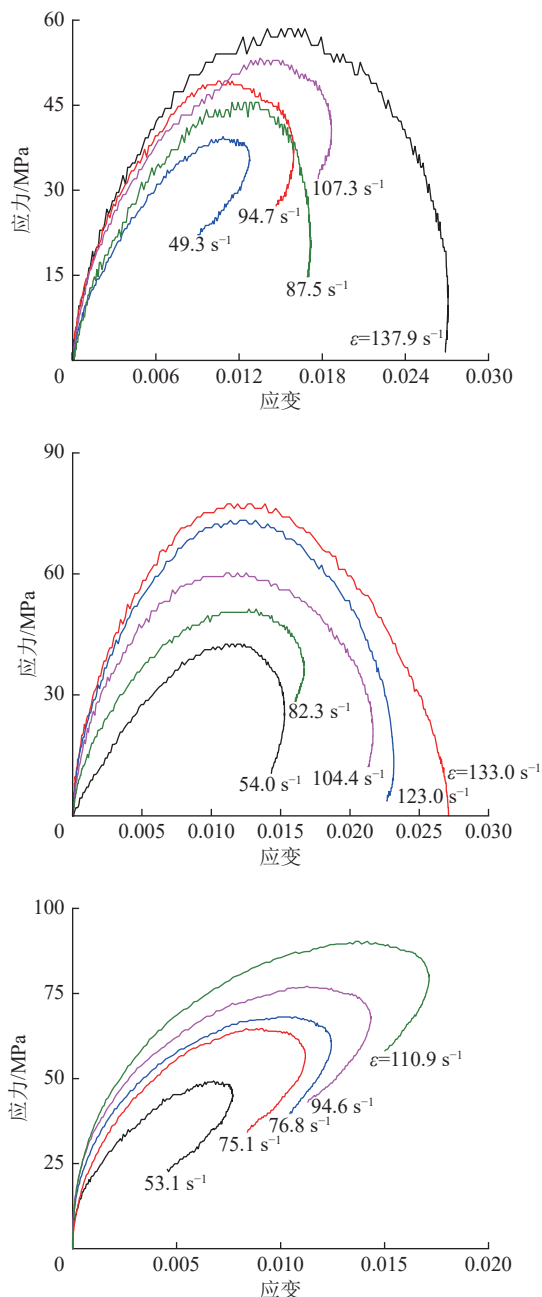


图 4 不同应力状态下组合煤岩体动态应力-应变曲线  
Fig.4 Dynamic stress-strain curves of combined coal-rock specimen under different stress sates

样产生应力回弹现象,如图 4a 中的应变率  $49.3 \text{ s}^{-1}$  时,图 4b 中  $54 \text{ s}^{-1}$  时。三维动静组合加载下都产生了明显的应力回弹现象。上述现象的主要原因是由于在较低的应变率下,试样在加载时期积累的弹性能得到释放,并给入射杆一个反向的压缩应力波。当应变率较高时,试样可能在应力波上升阶段就已经破坏,那么积累的弹性能就会用以组合体碎块表面能及动能等形式释放,从而表现出应力随着应变的增加而减少的现象。此外,从试样最终的破坏形式来看,应力回弹会使得用于消耗试样破坏的能量

较少,试样可能产生碎块尺寸较大,甚至有可能没有明显的宏观裂纹。而应变软化会使得积累的能量大部分用于岩石新裂纹萌生、裂纹扩展及贯通,那么试样可能产生的碎块尺寸较小,甚至呈崩裂式破坏。

### 2.3 强度及变形特征

图 5 为组合煤岩体试样峰值强度随应变率的变化规律,从图中可以看出,三维动静组合下组合煤岩体的峰值强度明显高于一维动静组合及无轴压围压下的强度值,其中无轴压及围压下试样强度最低,如应变率  $53.1 \text{ s}^{-1}$  附近时, W-RMR 组试样的峰值强度 (49.2 MPa) 比 Z-RMR 组试样的峰值强度 (42.5 MPa) 大 15.8%, 也比 D-RMR 组试样的峰值强度 (39.5 MPa) 大 24.6%。特别是高应变率下, 3 种应力状态下的强度差值特别大, 这表明围压和轴压对试样强度具有明显的增强作用。这主要是由于轴压及围压的施加, 有助于煤岩体内部初始微裂隙的闭合, 也会增加内部颗粒与颗粒之间的咬合程度, 使其不易发生错动, 从而提高颗粒间的摩擦能力, 这都会提高试样抵抗冲击载荷的能力。

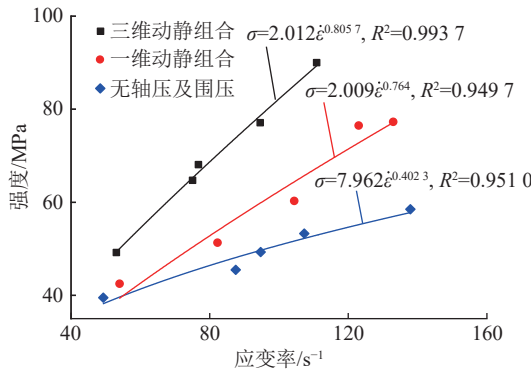


图 5 动态峰值强度随应变率的变化规律

Fig.5 Variation of dynamic peak strength with strain rate

从图中也可看出, 每种应力状态下试样的峰值强度大致随着应变率的增加而增加, 表现出明显的率相关性。对此, 采用幂函数关系式对应变率与动态强度的变化关系进行拟合:

$$\sigma_d = a\dot{\varepsilon}^b \quad (4)$$

式中:  $\sigma_d$  为动态峰值强度;  $a$  和  $b$  为常数。

具体的拟合公式如图 5 所示, 从图 5 中可以看出, 拟合公式拟合相关系数都超过了 0.94, 表明采用该公式可以很好地描述动态峰值强度与应变率变化的关系。

根据宫凤强<sup>[25]</sup>建议的计算方法, 图 6 给出了组合体试样变形模量  $E$  随应变率的变化规律。从图中可以看出, 一维及三维动静组合下组合煤岩体试样

的变形模量大于无轴压及围压下的模量值, 这也表明轴压及围压对试样变形模量具有增强作用。这也是由于轴压及围压有助于煤、砂岩内部初始孔隙、微裂隙的闭合, 增加了组合体试样的强度, 从而提高了其变形模量。为了研究应变率对试样弹性模量的影响, 采用线性关系式对应变率与变形模量的变化关系进行拟合 (图 6), 从图中可以看出, 一维动静组合下变形模量随应变率的增加而增加, 表现出较强率相关性 (相关系数 0.955)。无轴压及围压下组合体试样变形模量也呈一定的率相关性 (相关系数 0.473), 但对应变率敏感性弱于一维应力状态。三维动静组合下, 试样变形模量随应变率增加而变化不明显, 不存在应变率敏感性。

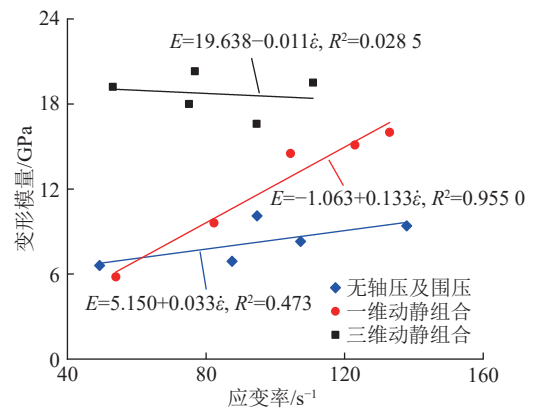


图 6 变形模量随应变率的变化规律

Fig.6 Variation law of deformation modulus with strain rate

### 2.4 能量演化规律

SHPB 试验过程中, 冲击头的动能大部分会转化为入射能, 小部分会转化为反弹动能及其他形式能量。不考虑试样与入射杆及透射杆界面间的能量消耗, 根据应力波理论, 一次 SHPB 试验冲击过程中试样入射能、反射能和透射能可表示为<sup>[25]</sup>。

$$E_I = \frac{A_c}{\rho_c C_c} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_R = \frac{A_c}{\rho_c C_c} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt \quad (6)$$

$$E_T = \frac{A_c}{\rho_c C_c} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (7)$$

式中:  $\sigma_I$ 、 $\sigma_R$  和  $\sigma_T$  分别为入射应力、反射应力和透射应力;  $E_I$ 、 $E_R$  和  $E_T$  分别为入射能、反射能和透射能;  $\rho_c$  为弹性压杆密度。

试样的吸收能  $E_s$  为

$$E_s = E_I - E_R - E_T \quad (8)$$

根据以往研究分析, 用于破碎煤岩体的耗散能



( $U_d$ ) 近似为组合煤岩体吸收能 ( $E_s$ ), 则单位体积内耗散的能量可表示为

$$\eta_v = \frac{U_d}{V} \approx \frac{E_s}{V} \quad (9)$$

式中:  $\eta_v$  为耗散能密度;  $V$  为试样体积。

图 7 为反射能、透射能及耗散能占入射能的比例。从图中可以看出, 3 种应力状态下, 都是反射能占入射能的比例远高于其他 2 种能量所占比例, 耗散能所占入射能的比例高于透射能所占比例。三维

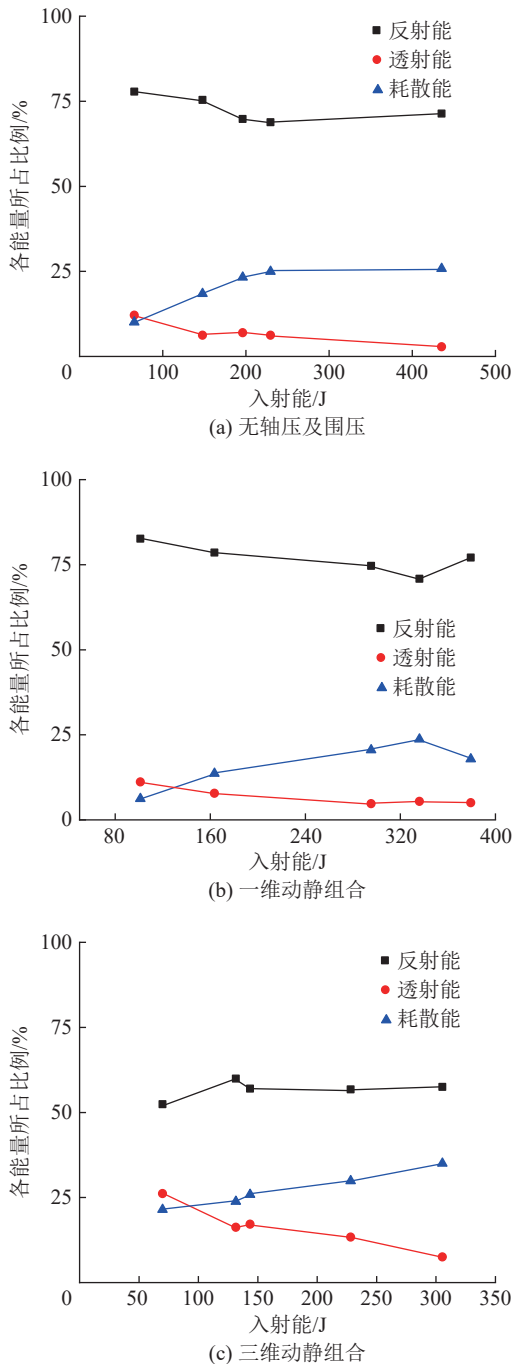


图 7 反射能、透射能及耗散能占入射能的比例

Fig.7 Proportion of reflected energy, transmitted energy and dissipated energy to incident energy

动静组合下, 反射能占入射能的比例低于其他 2 种应力状态下, 透射能及耗散能比其他 2 种应力状态下的值都高, 这主要是由于围压的存在, 使得组合煤岩体的整体刚度提高, 一方面有利于透射波的传递, 另一方面需要消耗更多的能量才能使煤、砂岩产生新生微裂纹, 以及裂纹的扩展、贯通。

图 8 为不同应力状态下试样能量演化规律。从图可知, 随着入射能的增加, 耗散能密度也增加。对不同应力状态下入射能与耗散能密度采用幂函数进行拟合, 得到无轴压及围压、一维动静组合及三维动静组合下组合体试样的入射能与耗散能密度关系表达式 (图 8a)。从图中可以看出, 该拟合公式拟合相

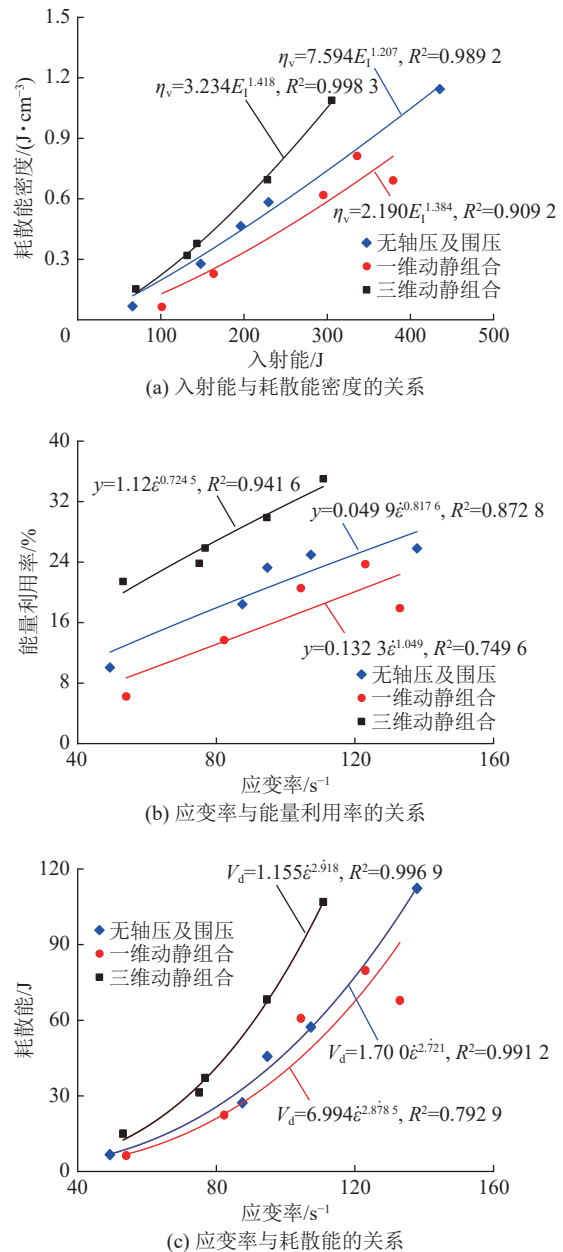


图 8 不同应力状态下试样能量演化规律

Fig.8 Energy evolution of samples under different stress states

关系系数都超过了 0.90, 表明采用该公式可以很好的拟合入射能与耗散能密度变化的关系。

相应的, 对无轴压及围压、一维动静组合及三维动静组合下组合体的应变率与能量利用率 (UTE) 采用幂函数进行拟合, 具体表达式如图 8b 所示。从图中发现, 三维动静组合下, 随着应变率的增加, 能量利用率相应地增加, 采用幂函数拟合效果较好, 相关系数为 0.941 6。一维动静组合及无轴压及围压下, 采用幂函数拟合相关系数没有达到 0.9, 这主要是由于高应变率下能量利用率偏低, 甚至有降低的趋势, 如一维动静组合下, 应变率  $133 \text{ s}^{-1}$  后时的能量利用率 (17.9%) 比应变率  $123 \text{ s}^{-1}$  后时的能量利用率 (25.3%) 低 29%。这可理解为试样破坏并不是应变率越高, 能量利用率就越高。研究发现只有当入射能接近试样破坏所需要的能量时, 相对应的能量利用率才会达到最高值。较高的应变率, 只会让多余的人射能用于试样的破碎, 使煤或者岩石产生尺度更小的碎块, 这样也会导致能量利用率降低。

3 种应力状态下试样的耗散能与随着应变率的增加而增加。为此, 对无轴压及围压、一维动静组合及三维动静组合下组合体的应变率与耗散能 ( $U_d$ ) 采用幂函数进行拟合, 具体表达式如图 8c 所示。

总体来说, 三维动静组合、无轴压及围压, 一维动静组合下 (应变率低于  $123 \text{ s}^{-1}$ ), 能量利用率、耗散能随应变率增加而逐渐增加, 耗散能密度随入射能的增加而增加。应变率高于  $123 \text{ s}^{-1}$  时, 一维动静组合下能量指标增长速率降低。此外, 三维动静组合下能量利用率、耗散能及耗散能密度高于一维动静组合及无轴压及围压下的测量值, 其中一维动静组合下试验值最低。这主要是轴压的预加载使得试样储存了部分弹性能, 当外界应力波作用时, 试样不断吸收能量, 但也会释放能量, 也就是一维动静组合下试样是一个外界能量吸收及同时内部能量释放的过程。那么试样破坏就不需要吸收太多外界能量, 因

此会低于单轴压缩下的能量值。三维动静组合下, 尽管预加载也吸收了部分能量, 但是由于围压的施加会显著提高试样内部颗粒与颗粒之间的咬合程度, 提高摩擦力及试样的整体刚度, 使得试样需要吸收较多的能量才能使其内部发生损伤甚至失稳破坏, 因而其耗散能远高于其他 2 种应力状态下的能量值。

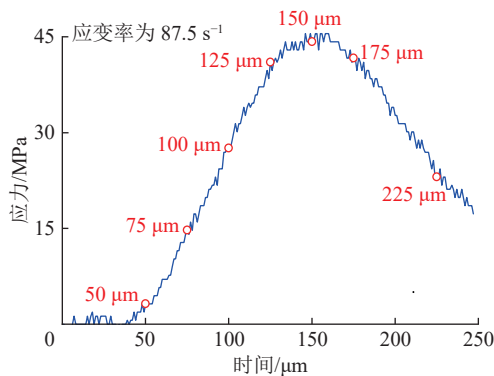
### 3 组合煤岩体破坏过程及特征

#### 3.1 渐进破坏过程分析

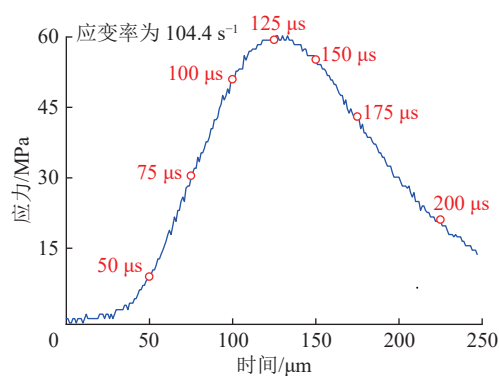
数字图像相关方法 (Digital Image Correlation Method) 是一种基于应力光学理论, 新型的、非接触式的力学测试手段<sup>[26]</sup>, 原理就是利用试样表面随机分布的散斑, 利用试验过程中试样表面灰度变化来计算材料的位移场及应力场。试验过程中采用高清相机 (FASTCAM SA1.1) 拍摄试样破坏全过程, 拍摄频率设置为  $40\,000 \text{ fps}$ , 即每  $25 \mu\text{s}$  拍摄一张图像, 每张图像分辨率为  $512 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

图 9 为无轴压及围压及一维动静组合下 DIC 试验结果。图中左端为应力波入射端, 从图中可以发现, 无轴压及围压及一维动静组合下试样首先在煤-岩界面发生破坏, 如一维动静组合下试样在  $100 \mu\text{s}$  时在煤岩界面存在明显的损伤变形, 这主要是由于煤的弹性模量较低 (图 9d)。煤产生裂纹后, 随着载荷的增加, 裂纹会逐渐往煤的另一侧扩展, 导致煤产生平行于加载方向的贯通裂纹 (图 9c、图 9d)。

从图中也可以看出, 煤及砂岩峰前大多是产生平行于加载方向的劈裂裂纹, 裂纹数量不多, 试样达到峰值强度以后, 入射杆由于惯性会继续向前推进, 导致砂岩宏观贯通裂纹。如一维动静组合下试样在达到峰值载荷时靠近入射端的砂岩存在较小损伤 (图 9b、图 9d),  $150 \mu\text{s}$  时, 砂岩损伤加剧, 到  $175 \mu\text{s}$  时能看到明显的宏观裂纹。又如, 无轴压及围压下试样砂岩直到  $275 \mu\text{s}$  时靠近透射杆端才产生 2 条平行于加载方向的宏观裂纹 (图 9a、图 9c)。当然, 峰

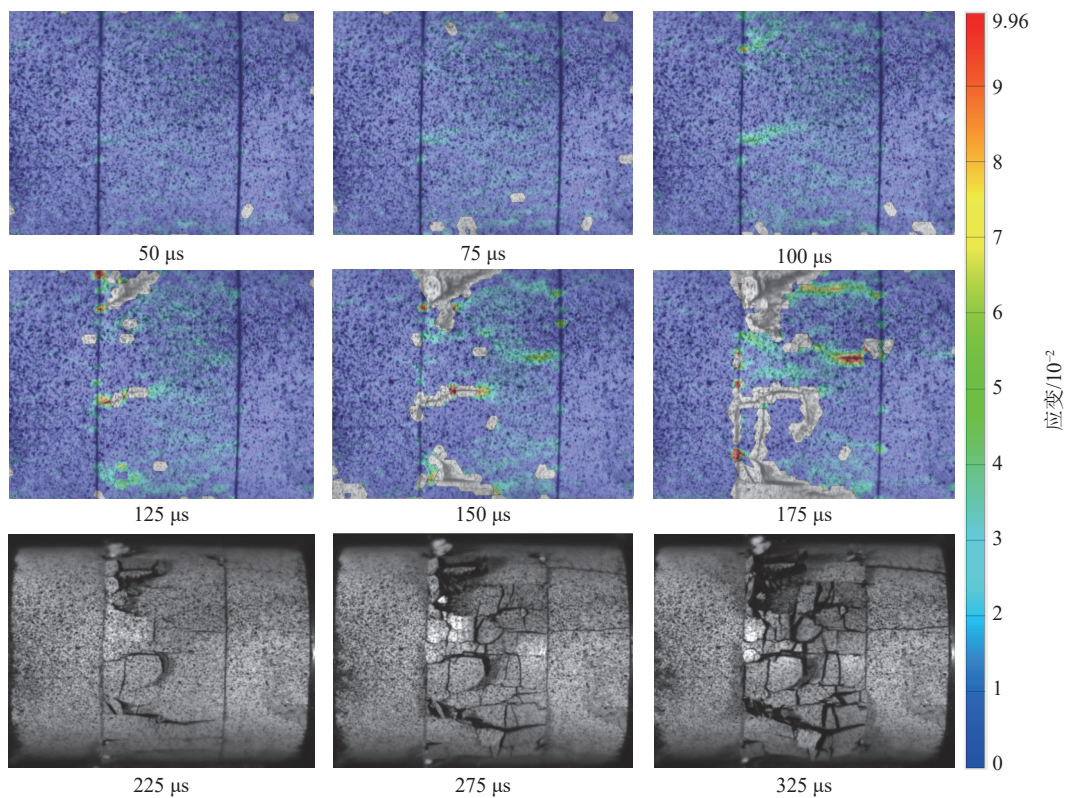


(a) 无轴压及围压下试样时间-应力曲线

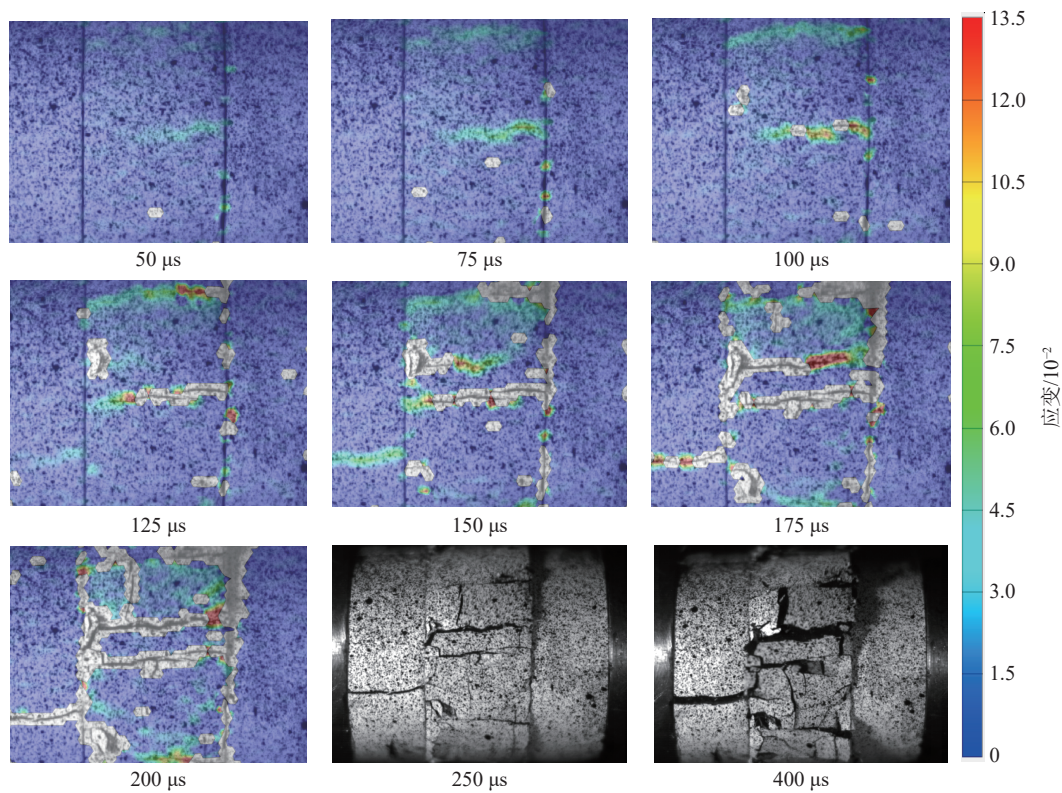


(b) 一维动静组合下试样时间-应力曲线





(c) 无轴压及围压下试样破裂演化过程



(d) 一维动静组合下试样破裂演化过程

图 9 无轴压及围压及一维动静组合下试样破裂演化过程

Fig.9 Fracture evolution of combined coal rock specimen under non-axial and confining loads and one-dimensional coupled static-dynamic loads



后除了会造成砂岩宏观裂纹的产生,同时也会导致煤破裂程度增加,DIC 试验结果表明,煤产生较多小尺寸碎块是由于峰后二次裂纹造成的。

### 3.2 破坏特征

图 10 为不同应力状态下组合煤岩体的动态破坏特性。从图 10a 中可以看出,无轴压及围压下试样破坏形式表现出明显的率相关性,随着应变率的增加,试样破碎程度越来越严重,碎块尺寸也逐渐变小。如应变率为  $49.3 \text{ s}^{-1}$  时,砂岩没有产生宏观裂纹,煤仅一侧出现了剥落。应变率为  $87.5$ 、 $94.7 \text{ s}^{-1}$  时,砂岩和煤都出现了破坏,但产生的碎块尺寸较大。应变率为  $107.3$ 、 $137.9 \text{ s}^{-1}$  时,砂岩和煤也都发生了破坏,产生了许多小尺寸碎块。

一维动静组合下试样规律与无轴压及围压下相同(图 10b),也表现出明显的应变率效应。当应变率为  $54 \text{ s}^{-1}$  时,煤发生了小部分脱落。应变率为  $133 \text{ s}^{-1}$  时,煤破裂碎块尺寸明显变小。从图中也发现,应变率为  $82.4 \text{ s}^{-1}$  时,试样存在双锥形破裂面,这主要是试样尺寸较小,且煤、砂岩弹性模量存在差异,预静载的施加会使煤与砂岩存在摩擦效应,造成靠近砂岩附近煤处于三维应力状态,形成压缩区,当受到外界动力扰动时,压缩区煤的内部随压应力的增加大量新生微裂纹会萌生,裂纹会扩展、贯通,最终形成剪切破裂面。尽管试样发生了破坏,并不代表整个结构完全失去承载能力,实际工程中类似的例子很多,比如产生宏观裂纹煤柱,仍具有一定的承载能力。

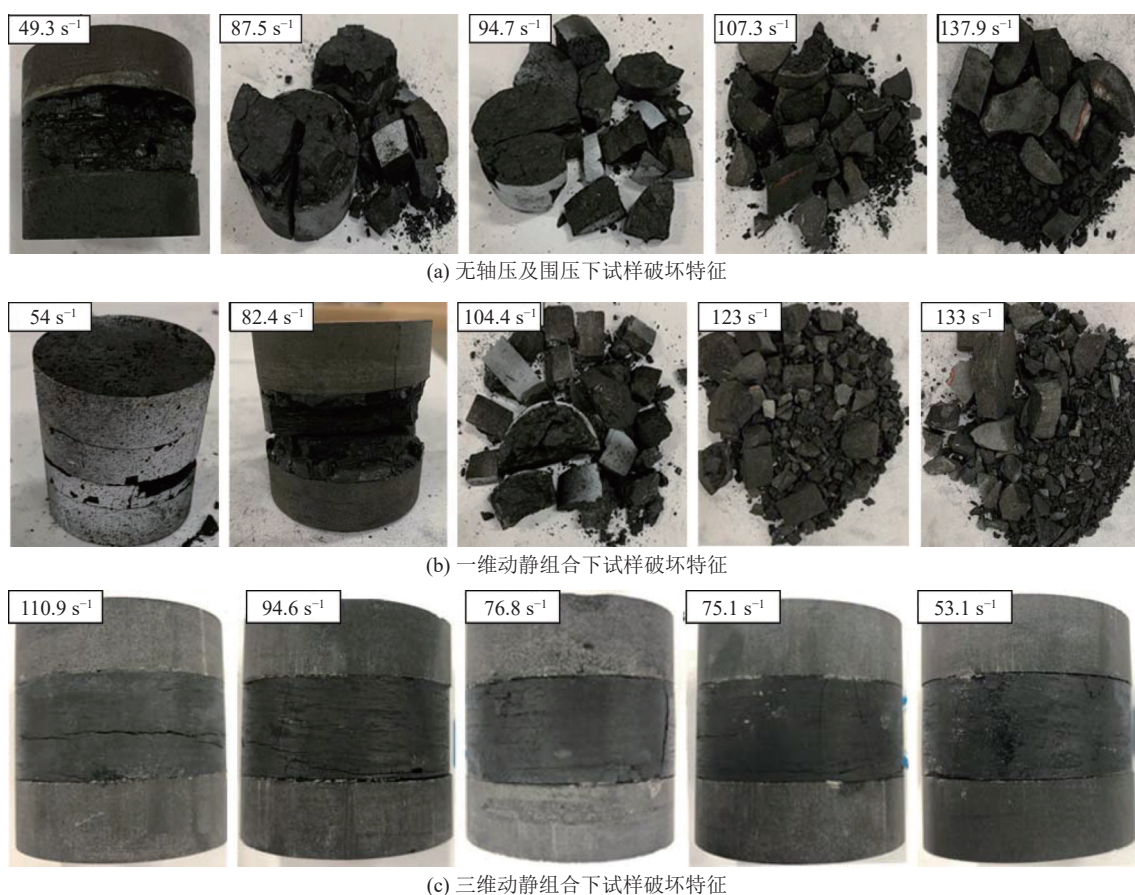


图 10 不同应力状态下组合煤岩体的动态破坏特性

Fig.10 Failure modes of combined coal-rock specimen under different stress states

三维动静组合下单次冲击时煤岩体没有产生尺寸较大的碎块(图 10c),肉眼可见一些不同方向及位置的裂纹,应变率为  $110.9 \text{ s}^{-1}$  时,煤中间位置产生了横向裂纹,试样被破裂呈两大块。其他应变率下试样产生了剪切裂纹,这主要是围压的影响,抑制煤岩体的变形,增强其抵抗冲击载荷的能力。

## 4 讨 论

由试验结果可知,组合煤岩体的力学特性除了受到应力状态的影响外,动载荷对组合煤岩体的力学特征也影响较为显著,不同应力条件下组合煤岩体的强度、能量利用率、耗散能等力学特征随应变率的增加而增加,具有较强的率相关性,这与单一煤或

岩石动态力学特征相同,与组合体结构关系不大。组合体试样破坏特征也表现出明显的率相关性,随着应变率的增加,试样破碎程度越来越严重,碎块尺寸也逐渐变小。但煤较为破碎,而岩石破裂的块度较大,这主要是煤与岩石的弹性模量差异造成界面强度局部变化。煤在上下岩石的夹持作用下,会集聚较高的能量,这表明煤是能量集聚的主要载体<sup>[27]</sup>,因此,释放煤的高储能将是防治冲击地压等动力灾害的根本<sup>[3]</sup>。试验结果发现组合体试样首先在煤岩界面附近煤发生破坏,这一点在 WANG 等<sup>[28-30]</sup>的研究中也得到证实,这表明煤岩界面煤体是煤岩动力灾害防治的关键位置。由于动力扰动作用下组合煤岩体失稳过程的十分复杂,本文研究对象单一,仍然有许多问题尚待研究,例如不同组合方式、比例及倾角下组合煤岩体的动态力学特性,这些在本文中还没有予以考虑。今后将深入开展多种工况下的动力扰动实验,以便为认识煤岩动力灾害发生机理提供科学参考。

## 5 结 论

1) 无轴压及围压、一维动静组合下组合体试样应力应变曲线峰后存在应力回弹及应变软化 2 种类型,三维动静组合下都存在应力回弹现象;3 种应力状态下试样峰值强度大致随应变率的增加而增加,表现出明显的率相关性;无轴压及围压下、一维动静组合下变形模量随应变率的增加而增加,表现出率相关性,三维动静组合下,试样变形模量随应变率增加变化不明显。

2) 3 种应力状态下,都是反射能占入射能的比例最高,而透射能占入射能的比例最低,但三维动静组合下反射能占入射能的比例低于其他 2 种应力状态。应变率低于  $123 \text{ s}^{-1}$  时,无轴压及围压、一维动静组合、三维动静组合下,能量利用率、耗散能随应变率增加而逐渐增加,耗散能密度随入射能的增加而增加。

3) 试样破坏形式表现出明显的率相关性,随着应变率的增加,煤、砂岩碎块尺寸也逐渐变小。无轴压及围压及一维动静组合下试样首先在煤-岩界面发生破坏,煤及砂岩产生较多小尺寸碎块是由于峰后二次裂纹造成的。三维动静组合下煤岩体破裂不明显。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):217-232.
- XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualiza-

tion and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232.

- [2] WANG T, MA Z G. Research on strain softening constitutive model of coal-rock combined body with damage threshold[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2022, 31(1): 22-42.
- [3] 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.
- [4] LIU X S, TAN Y L, NING J G, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of coal in coal-rock combined body[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 140-150.
- [5] DU F, WANG K, WANG G D, et al. Investigation of the acoustic emission characteristics during deformation and failure of gas-bearing coal-rock combined bodies[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 253-266.
- [6] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.真三轴卸卸载条件下组合煤岩冲击破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1522-1533.
- ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Research on impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1522-1533.
- [7] HE Y C, ZHAO P X, LI S G, et al. Mechanical properties and energy dissipation characteristics of coal-rock-like composite materials subjected to different rock-coal strength ratios[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(3): 2179-2193.
- [8] 陈光波,李谭,杨磊,等.不同煤岩比例及组合方式的组合体力学特性及破坏机制[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(2):84-94.
- CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and failure mechanism of combined bodies with different coal-rock ratios and combinations[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 84-94.
- [9] LU Z G, JU W J, GAO F Q, et al. Influence of loading rate on the failure characteristics of composite coal-rock specimens under quasi-static loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(2): 909-921.
- [10] 余伟健,潘豹,李可,等.岩-煤-岩组合体力学特性及裂隙演化规律[J].煤炭学报,2022,47(3):1155-1167.
- YU Weijian, PAN Bao, LI Ke, et al. Mechanical properties and fracture evolution law of rock-coal-rock combination[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1155-1167.
- [11] 汪铁楠,翟越,高欢,等.静力压缩下煤岩组合体的裂前宏观弹性模型[J].岩土力学,2022,43(4):1031-1040.
- WANG Tienan, ZHAI Yue, GAO Huan, et al. A macroscopic elastic model of coal-rock combined body under static compression before cracking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1031-1040.

- [12] ZHANG Q B, ZHAO J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 423–439.
- [13] 梁冰, 汪北方, 李刚, 等. 动力扰动诱发巷帮煤体冲击矿压机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2): 13–18.  
LIANG Bing, WANG Beifang, LI Gang, et al. On the mechanism of the rock-bursts at the roadway sides induced by the dynamic disturbance[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(2): 13–18.
- [14] 李利萍, 唐垒, 潘一山, 等. 高宽比及应力波扰动对砂岩块体超低摩擦影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1384–1393.  
LI Liping, TANG Lei, PAN Yishan, et al. Experimental study on effect of height-width ratio and stress wave disturbance on anomalously low friction of sandstone blocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1384–1393.
- [15] 刘少虹, 秦子晗, 娄金福. 一维动静加载下组合煤岩动态破坏特性的试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 2064–2075.  
LIU Shaohong, QIN Zihan, LOU Jinfu. Experimental study of dynamic failure characteristics of coal-rock compound under one-dimensional static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2064–2075.
- [16] 猴勇, 王科. 组合煤岩体动态力学性能及瞬变磁场特征研究[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(7): 86–91.  
GOU Yong, WANG Ke. Research on dynamic mechanical properties and transient magnetic field characteristics of composite coal and rock mass[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(7): 86–91.
- [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] LI C J, XU Y, CHEN P Y, 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.
- [19] 杨科, 刘文杰, 马衍坤, 等. 煤岩组合体冲击动力学特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2569–2581.  
YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental research on dynamic characteristics of coal-rock combined specimen[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2569–2581.
- [20] 赵洪宝, 吉东亮, 刘绍强, 等. 冲击荷载下复合岩体动力响应力学特性及本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(1): 88–99.
- ZHAO Hongbao, JI Dongliang, LIU Shaoqiang, et al. Study on dynamic response and constitutive model of composite rock under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 88–99.
- [21] LYU X F, LIN X, OUYANG W, et al. Stress wave propagation attenuation law and energy dissipation characteristics of rock-barrier-coal composite specimen under dynamic load[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(1): 276–288.
- [22] T/CSRME 001—2019. 岩石动力特性试验规程[S]. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2019.
- [23] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1387–1395.  
LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1387–1395.
- [24] WU Q H, LI X B, WENG L, et al. Experimental investigation of the dynamic response of prestressed rockbolt by using an SHPB-based rockbolt test system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 93: 103088.
- [25] 宫凤强. 动静组合加载下岩石力学特性和动态强度准则的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
GONG Fengqiang. Experimental study of rock mechanical properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [26] CHEN J J, GUO B Q, LIU H B, et al. Dynamic Brazilian test of brittle materials using the split Hopkinson pressure bar and digital image correlation[J]. *Strain*, 2014, 50(6): 563–570.
- [27] CHEN G B, ZHANG J, LI Y, et al. Energy distribution law of coal-rock combined body under confining pressure effect[J]. *Acta Geophysica*, 2023, 71(4): 1831–1843.
- [28] WANG K, WANG L, DU F, et al. Evolutionary mechanism of permeability of coal-rock combination considering interface effect: Model development and analysis[J]. *Energy*, 2023, 284: 129305.
- [29] 王凯, 付强, 徐超, 等. 原生煤岩组合体界面力学效应数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(S1): 623–633.  
WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, et al. Numerical simulation of interface mechanical effects of primary coal-rock combination[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(S1): 623–633.
- [30] 曹吉胜, 戴前伟, 周岩, 等. 考虑界面倾角及分形特性的组合煤岩体强度及破坏机制分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(1): 175–182.  
CAO Jisheng, DAI Qianwei, ZHOU Yan, et al. Failure mechanism and strength of coal-rock combination bodies considering dip angles and fractal characteristics of interface[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(1): 175–182.