



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506301

引用格式: 吉东亮, 袁维, 冯怀平, 等. 不同节理角度复合岩体的动载损伤机理[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(26): 11236-11243.

Ji Dongliang, Yuan Wei, Feng Huaiping, et al. Dynamic load damage mechanism of composite rock mass with different joint angles[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(26): 11236-11243.

矿冶工程

不同节理角度复合岩体的动载损伤机理

吉东亮^{1,2,3}, 袁维^{2*}, 冯怀平², 陶剑³, 赵洪宝⁴, 王路军¹, 李晓斌¹

(1. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211; 2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043; 3. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025; 4. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要 为研究动态冲击作用下复合岩体的力学特性, 利用 FLAC-PFC 耦合构建了三维 SHPB 模拟系统, 基于 Weibull 分布及损伤理论建立考虑岩石非均匀性的弹性损伤本构模型, 进行不同节理角度复合岩煤、复合煤岩试样的动态冲击模拟。对比分析了动力冲击后不同角度试样的动态强度、裂纹扩展规律, 得到不同节理角度复合岩体的渐进损伤演化过程, 并给出不同节理角度复合岩体的能量耗散特征。结果表明: 通过 FLAC-PFC 耦合构建的三维 SHPB 模型有效性得到验证; 将基于 Weibull 分布的弹性损伤本构模型计算结果与试验结果对照, 验证了开发本构模型的正确性; 对于不同节理角度复合岩体, 损伤区在煤体侧开始萌生并沿着节理扩大直至失稳, 实现了动载作用下煤岩体损伤过程的表征; 对于不同节理角度复合岩体, 应变能在煤体侧开始集中并沿着节理扩大直至破坏, 展示了能量集中的空间分布, 实现了能量演化的可视化。

关键词 动态冲击; 复合岩体; 损伤表征; 渐进破坏; 能量耗散

中图法分类号 TD315;

文献标志码 A

Dynamic Load Damage Mechanism of Composite Rock Mass with Different Joint Angles

Ji Dong-liang^{1,2,3}, YUAN Wei^{2*}, FENG Huai-ping², TAO Jian³, ZHAO Hong-bao⁴,
WANG Lu-jun¹, LI Xiao-bin¹

(1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior in Traffic Engineering Structure and System Safety, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

[Abstract] To study the mechanical properties of composite rock masses under dynamic impact, a three-dimensional SHPB simulation system was constructed using the FLAC-PFC coupling method. Based on the Weibull distribution and damage theory, an elastic damage constitutive model considering the non-uniformity of rocks was established. Dynamic impact simulations of composite coal-rock and composite rock-coal samples with different joint angles were conducted. The dynamic strength and crack propagation laws of samples with different joint angles after dynamic impact were compared and analyzed. The progressive damage evolution process of composite rock masses with different joint angles was obtained, and the energy dissipation characteristics of composite rock masses with different joint angles were given. The results show as follows. The three-dimensional SHPB model constructed by FLAC-PFC coupling is effective. The calculation results of the elastic damage constitutive model based on the Weibull distribution are compared with the experimental results to verify the correctness of the developed constitutive model. For composite rock masses with different joint angles, the damage zone begins to emerge on the coal side and expands along the joint until failure, achieving the characterization of the damage process of coal-rock under dynamic loading. For composite rock masses with different joint angles, the strain energy begins to

收稿日期: 2025-08-31; 修订日期: 2026-02-06

基金项目: 河北省教育厅青年基金(50199990574); 河北省燕赵黄金台聚才计划(A2025022); 河北省自然科学基金青年科学基金(E2026210170, E2026210046); 国家自然科学基金(U2568213); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(NICE_RD_2025_111); 河北省自然科学基金杰出青年基金(E2024210019); 河北省高等学校基础研究重点培育专项(JZX2024011); 石家庄市五大主导产业项目(SWDCY202604)

第一作者: 吉东亮(1992—), 男, 汉族, 山西晋城人, 博士, 讲师。研究方向: 岩石力学。E-mail: 1065045422@qq.com。

* 通信作者: 袁维(1986—), 男, 汉族, 湖南长沙人, 博士, 教授。研究方向: 岩石力学及边坡灾害防治。E-mail: yuanweisuper001@126.com。

concentrate on the coal side and expands along the joint until failure, demonstrating the spatial distribution of energy concentration and realizing the visualization of energy evolution.

[**Keywords**] dynamic loading; composite rock mass; damage characterization; progressive failure; energy dissipation

随着中国资源开采越来越深,各种动力冲击灾害频发,严重影响开采活动的安全进行^[1]。由于沉积岩天然的层状赋存特性,在形成过程中不断受到外力构造和自然环境等因素的影响,会形成含不同节理角度的复合煤岩体^[2]。在工程施工过程中,复合煤岩体除承受静态荷载外还会受到动态荷载的影响,而动态载荷下裂纹发育、扩展和贯通会降低岩体的稳定性^[3]。因此,研究动力作用下含节理岩体的力学特性对动力灾害预警和防控有着重要的现实意义。

为分析含节理岩体的力学特性,目前已展开大量试验研究。代航宇等^[4]分析了层理性页岩力学性质和破坏形态。沈顺超等^[5]考察了交叉裂隙砂岩的强度破坏特性,裂纹首先从预制裂隙尖端萌生,并向邻近裂隙扩展。考虑到裂纹形态的影响,陈国庆等^[6]研究了开放型岩桥裂纹的贯通机理,发现岩桥倾角对裂纹扩展路径具有决定性影响。唐志成等^[7]针对非贯通类节理岩体开展了剪切试验,建立了剪切变形与节理几何参数的关系模型。在冲击作用下,李地元等^[8]通过 SHPB 试验研究了大理岩的动态破坏特性,得出动态强度随应变率增加而提高的结论。赵洪宝等^[9]针对组合岩体研究了节理的存在对其强度变形的影响。Wen 等^[10]研究了煤组合体结构破坏力学响应及冲击倾向性特征。以上研究对裂纹的产生过程尚不清晰,许多学者采用多种监测手段来精准反映岩体的能量和变形特性。赵扬锋等^[11]采用微震和电荷感应技术监测裂隙砂岩破裂过程,发现电荷信号对裂纹萌生具有更敏感响应。黄华森等^[12]基于声发射技术,实现了对岩石多重分形的定量分析。宋彦琦等^[13]基于 DIC 系统讨论了加载过程中的应变局部化效应。但以上均无法分析试样内部的裂纹演化过程,因此许多学者利用数值计算从能量角度进行分析。

关于冲击作用下数值模拟分析得到许多有益的结果。Tang 等^[14]运用 RFPA 分析了断续节理岩体中裂隙的产生与扩展机制并考虑了其相互影响作用。张学朋等^[15]基于颗粒离散元模型,成功模拟了不同加载速率下花岗岩的断裂行为。刘海明等^[16]利用颗粒流方法模拟了交叉双节理岩石的裂纹扩展特征,揭示了节理角度影响裂纹扩展模式的关键机制。能量分析理论为理解裂隙扩展机制提供了新的视角。张俊等^[17]研究了能量演化过程的分段特性。谢和平等^[18]提出岩石破坏时 70% ~

80% 的输入能量以耗散能形式释放,能量释放率可作为新的破坏判据。这一理论很好地解释了孙杰豪等^[19]利用声发射信号得到 b 值下降阶段对应的能量释放情况。

以上研究主要考虑了岩体在外力作用下的力学和能量耗散特性,对于其损伤演化和能量累积过程的内在机理研究相对较少。现利用 FLAC-PFC 耦合构建三维 SHPB 模拟系统,通过三维模拟系统得到试样微裂纹从初始萌生、发展到最后破坏的特征。并构建损伤本构模型实现损伤过程的三维表征,基于应变能密度理论再现能量演化规律,以期复合岩体在动力作用下的变形控制提供一定的理论支持。

1 计算模型构建

在三维动力加载条件下,为了在保证计算精度的同时提高计算效率,将 FLAC3D 构建的连续介质和 PFC3D 构建的离散介质耦合建立 SHPB 模拟系统(图 1),其中复合岩体为离散介质,入射杆与透射杆为连续介质。构建模型与试验情况相符^[20],入射杆、复合岩体与透射杆均设置测量球监测应力变化情况。

为了验证模型的有效性,在耦合墙体位置设置监测点,记录从入射杆到试样,试样到透射杆应力情况,从图 2(a)可以看出试样两端受力平衡,说明试样两端满足应力平衡条件。并比较了入射杆和透射杆上的动态应力平衡变化[图 2(b)],模拟结果和试验结果^[20]较为一致,从而说明建立模型的正确性。

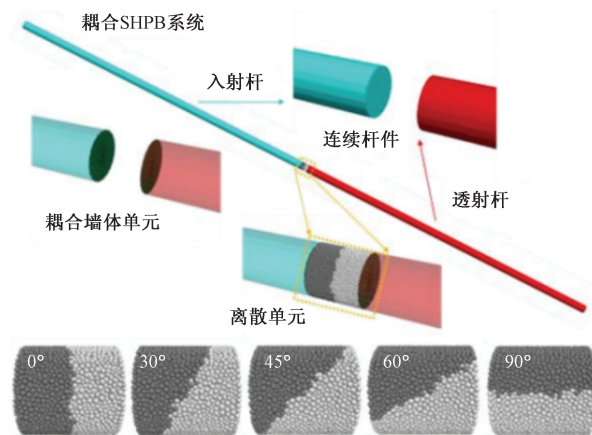
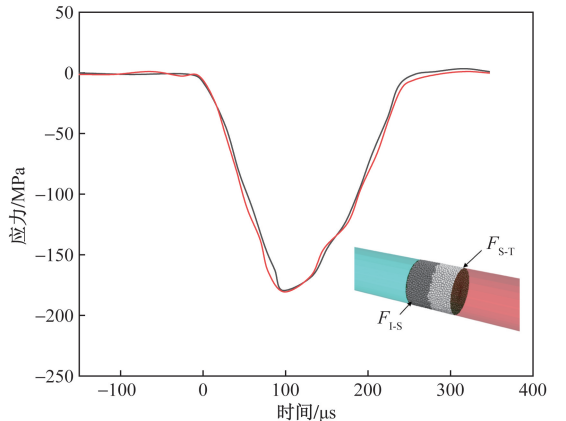
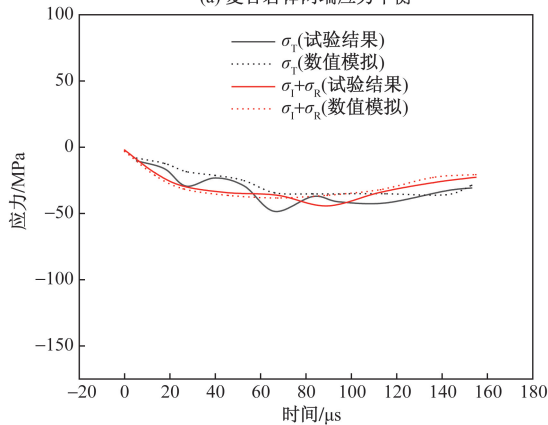


图 1 耦合 SHPB 系统

Fig. 1 Coupled SHPB system



F_{I-S} 为入射杆右侧试样所受应力; F_{S-T} 为透射杆左侧试样所受应力
(a) 复合岩体两端应力平衡



(b) 动态应力平衡

图2 模型有效性验证

Fig. 2 Model Validity verification

2 细观单元损伤模型

2.1 材料的非均质性

考虑到岩体的非均质性,认为材料力学性质满足 Weibull 分布^[21],不同均质度 m 下 Weibull 分布如图 3 所示。

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式(1)中: u 为单个单元的参数; u_0 为单元的平均参数; m 为参数分布的非均匀程度, m 越大表示参数分布得越均匀。

2.2 损伤本构关系

采用细观力学的方法,假设在细观上岩体内每点都满足损伤本构关系^[22]。如果岩体出现损伤,其本构关系不变,这时表现为弹性模量开始减小,强度出现降低,如图 4 所示。

在三维条件下,采用最大拉应变准则和摩尔库仑准则作为破坏判断准则^[23]。当应变状态达到了最大拉伸应变准则引起拉伸损伤,压应力或者剪应力导致应力状态满足剪切破坏准则,则发生剪切损伤。

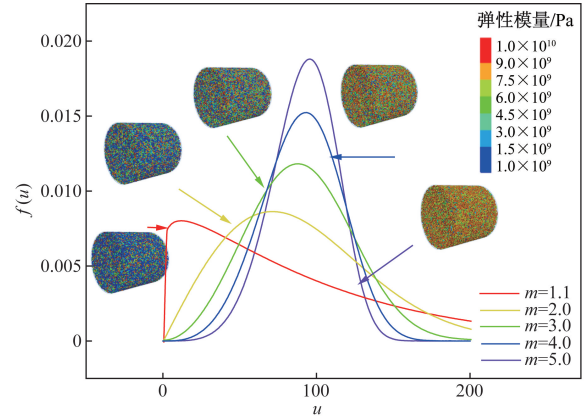
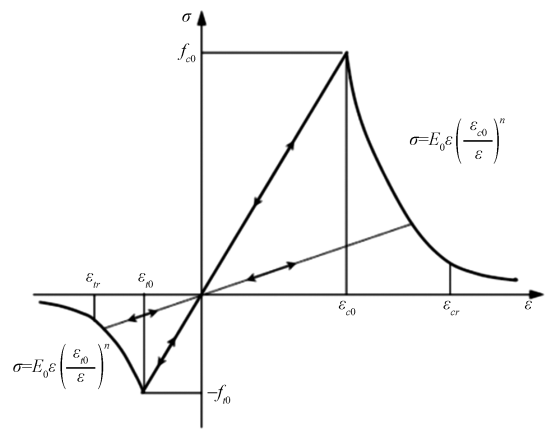


图3 Weibull 分布

Fig. 3 Weibull distribution



E_0 为损伤前弹性模量; E 为损伤后弹性模量; ε_0 为最大拉伸应变;
 ε_{c0} 为弹性极限最大压应变; f_{c0} 为单轴抗压强度; f_{t0} 为单轴抗拉强度

图4 本构关系示意图

Fig. 4 The constitutive law

$$D = \begin{cases} 0, & F_1 < 0, \quad F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_1} \right|^n, & F_1 = 0, \quad dF_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_3} \right|^n, & F_2 = 0, \quad dF_2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: ε_{t0} 和 ε_{c0} 分别为弹性极限对应的拉伸应变和最大压应变; ε_3 和 ε_1 分别为拉应变和压应变; D 为损伤量; F_1 和 F_2 为应力状态函数。

由于 Mohr-Coulomb 准则没有考虑到中间主应力的影响,可以选择 Drucker-Prager 准则^[23],代替 Mohr-Coulomb 准则作为剪切破坏准则。

$$F_1 = -\sigma_3 - f_{t0} \quad (3)$$

$$F_2 = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K \quad (4)$$

$$E = (1 - D) E_0 \quad (5)$$

式中: σ_3 为最小主应力; J_2 为第二偏应力不变量; I_1 为偏应力张量的第一不变量; K 为临界阈值常数。

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_1)^2] \quad (6)$$

$$I_1 = \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3$$

(7)

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

(8)

$$K = \frac{6cc\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

(9)

式中: C 为黏聚力。

对于岩石类准脆性材料,单元主要发生拉伸损伤,因此,如果细观单元同时满足剪切破坏准则和拉伸破坏准则,此时拉伸准则优先。

2.3 损伤本构模型验证

为了对比不同均质性对岩石材料动态力学性质的影响,选取文献[20]中的砂岩参数,如表1所示。

由Voronoi多边形建立动态压缩和拉伸试样,晶体内部采用平行接触模型(Parallel-bonded),晶间采用光滑节理模型(Smooth-Joint),其弹性模量服从Weibull分布,生成模型如图5所示。

取3种不同均质性 m 值建立模型,根据已有取值经验^[23],设置 m 值分别为1.1、3.0和5.0,代表材料从相对非均质性到相对均质性。图6给出了不同形状参数 m 时的弹性模量分布。

表1 砂岩数值模拟参数

Table 1 Sandstone parameters for numerical simulation

参数	钾长石	绿泥石	石英	云母其他
颗粒最小半径 $R_{\min}/\text{mm}$	0.18	0.18	0.18	0.18
颗粒粒径比	1.52	1.52	1.52	1.52
颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 600	2 500	2 750	2 700
岩石基质摩擦系数 μ	0.67	0.40	0.48	0.32
平行黏结刚度比 k_n/k_s	1.3	1.5	1.1	2.7
平行黏结接触模量 E_c/GPa	9	8	11	7
平行黏结黏聚力/MPa	70	60	80	40
平行黏结抗拉强度/MPa	12	10	14	8
内摩擦角/($^{\circ}$)	35	30	32	33
摩擦因数	1	1	1	1
光滑节理法向刚度	0.9	0.9	0.9	0.9
光滑节理剪切刚度	0.3	0.3	0.3	0.3
光滑节理抗拉强度/MPa	15	17	22	16
光滑节理黏聚力/MPa	65	72	80	60
光滑节理摩擦角/($^{\circ}$)	20	20	20	20
节理面摩擦系数	0.3	0.3	0.3	0.3

图7给出了不同形状参数 m 取值时的损伤规律。可以看出试件的非均质性对损伤模式有明显的影响^[24],这需要进一步与试验结果对比来选择可以真实反映模拟损伤模式的 m 值。

对所建模型分别进行动态冲击和动态拉伸试验,计算结果如图8所示,当 $m=1.1$ 时,损伤出现在整个试样内部,这与所的实验结果不符。当 $m=3.0$ 时,损伤区沿着冲击方向形成一个破裂面,损伤分布较为合理,此时动态强度与实验结果也比较相符。对于较高数值的参数 $m=5.0$,损伤区分布不太明显,因此选择 $m=3.0$ 进行后续计算。另外,可以看出试验初期会有压密段而模拟并未出现,这是因为模拟过程中有一个预压阶段,但随着加载进行

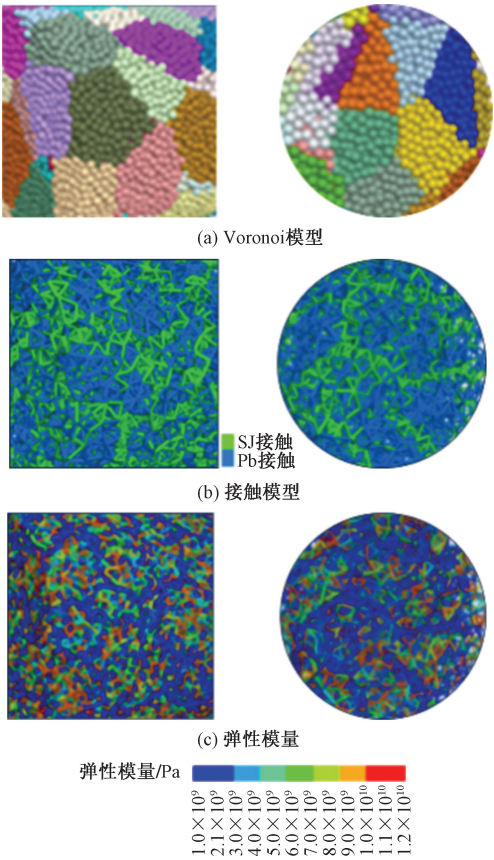


图5 模型生成

Fig. 5 Model generation

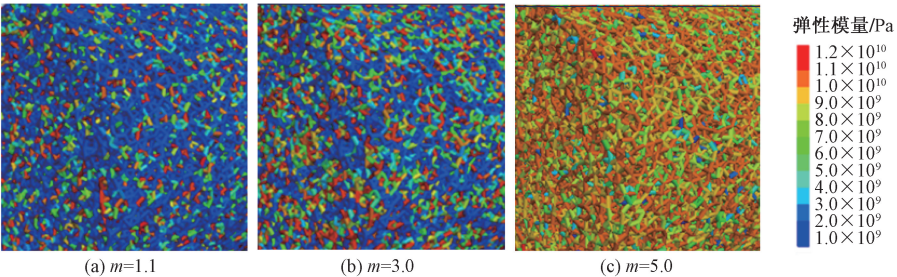


图6 不同 m 值的弹性模量分布

Fig. 6 Elastic modulus distribution of different values for the shape parameter m

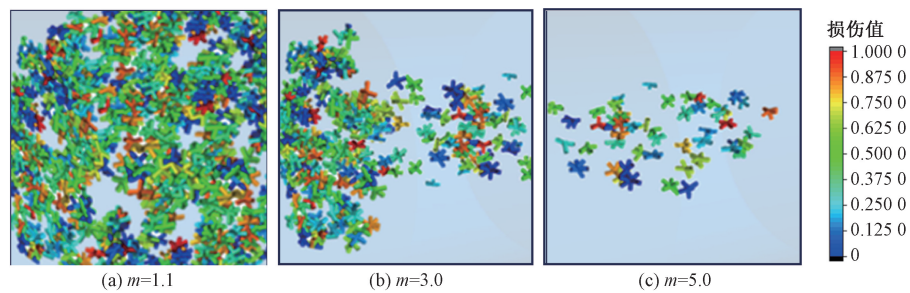


图7 不同 m 值的损伤分布
Fig. 7 Damage pattern for different values of the shape parameter m

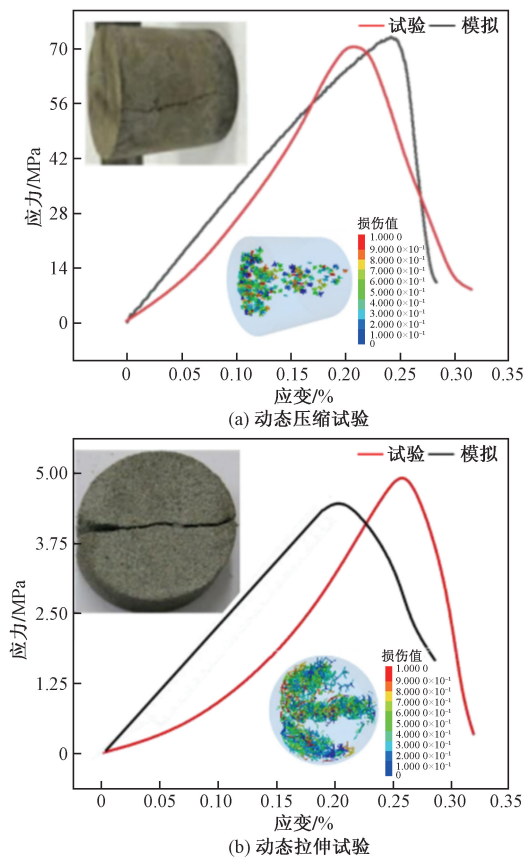


图8 数值模拟和试验结果的比较
Fig. 8 Comparison of numerical simulation results with experimental results

试验结果和模拟结果的峰值强度、破坏模式一致性相对较好,从而说明构建本构模型的正确性。

3 复合岩体分析

3.1 复合岩体生成

复合岩体试样建立模型为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 模型加载方式与试验加载方式相同, 模拟参数如表 1 和表 2 所示。

通过分区生成接触模型, 砂岩和煤交界面采用光滑节理模型, 模型弹性模量服从 Weibull 分布, 生成了不同角度下复合岩体模型, 其分布参数如图 9 所示, 记为复合岩煤 (R-C) 和复合煤岩 (C-R)。

表2 煤样数值模型参数
Table 2 Micro-parameters of coal in model

参数	非晶质	黏土及其他
颗粒最小半径 $R_{\min}/\text{mm}$	0.18	0.18
颗粒粒径比	1.52	1.52
颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 650	2 200
岩石基质摩擦系数 μ	0.30	0.32
平行黏结刚度比 k_n/k_s	2.82	2.70
平行黏结接触模量 E_c/GPa	8.0	6.0
平行黏结黏聚力/MPa	43	33
平行黏结抗拉强度/MPa	27	8
摩擦因数	1	1
光滑节理法向刚度	0.9	0.9
光滑节理剪切刚度	0.3	0.3
光滑节理抗拉强度/MPa	17	16
光滑节理黏聚力/MPa	60	60
光滑节理摩擦角/ $^\circ$	20	20
节理面摩擦系数	0.4	0.3

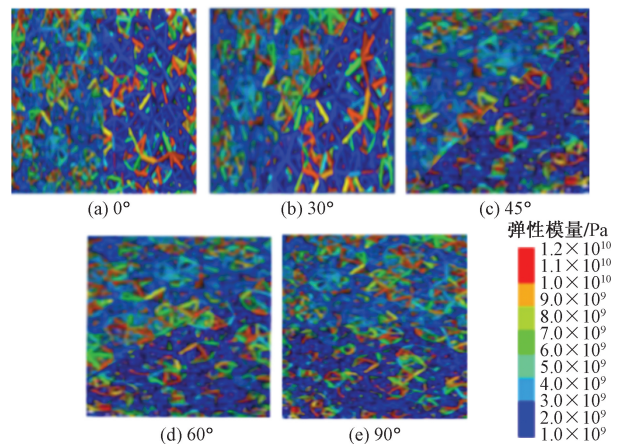


图9 不同角度下的弹性模量分布
Fig. 9 Elastic modulus distribution under different inclination angles

3.2 裂纹演化和破坏模式

图 10 给出了不同节理角度下复合岩体的破坏模式, 对于复合岩煤 (R-C) 和复合煤岩 (C-R), 内部微裂纹均首先在煤体侧萌生并逐渐扩展, 复合岩体颗粒间发生剪切位移直到形成宏观破坏。可以看出复合岩体的煤体作为主要承载体, 最先发生应力集中从而更容易发生破坏, 破坏模式与试验观测现象基本相符^[25]。

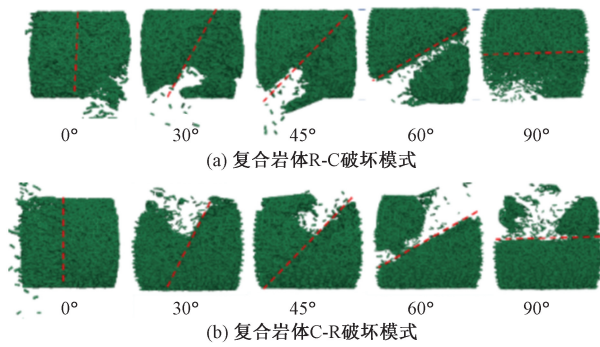


图 10 破坏模式

Fig. 10 Failure mode

3.3 渐进损伤表征

图 11 为不同节理角度复合岩体的损伤演化情况。对于复合岩体 R-C,当节理角度为 0° 时,损伤区在试样两端出现且煤体侧较大。当节理角度为 30° 、 45° 和 60° 时,损伤区在煤体侧开始萌生并沿着节理面逐渐扩大,损伤最终达到最大形成宏观破坏,当节理角度为 90° 时,损伤区在试样冲击面出现且沿着煤体侧发展。同样,对于复合岩体 C-R,损伤区也主要在煤体侧,破坏模式与试验观测现象基本

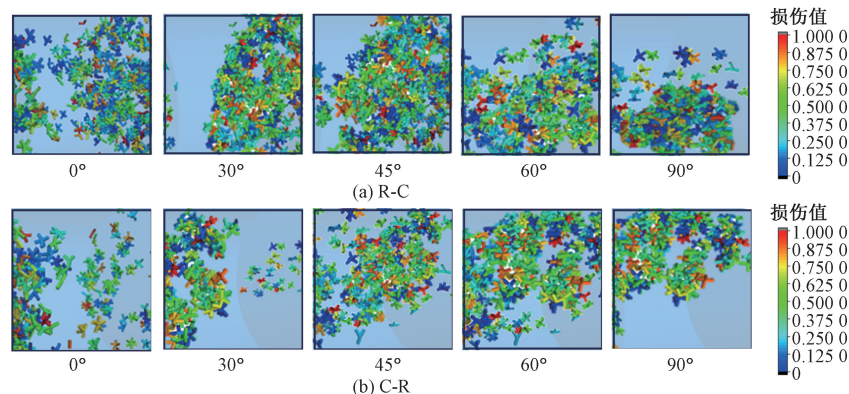


图 11 不同角度损伤分析

Fig. 11 Damage evolution at different angles

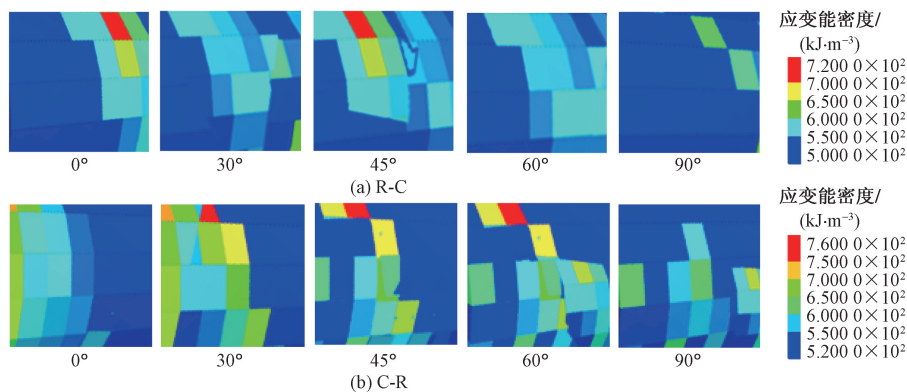


图 12 不同角度能量分析

Fig. 12 Energy evolution at different angles

相符。通过开发的本构模型实现了不同节理角度复合岩体损伤的三维空间表征,以上研究可为三维裂纹进一步分析提供新的参考^[26-30]。

3.4 能量演化过程

通过二次开发将其编入软件,可以直接表征复合岩体的能量分布^[31-34],其公式表示为

$$U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (10)$$

式(10)中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力; U 为应变能密度。

图 12 为不同节理角度复合岩体的应变能分布。对于复合岩体 R-C,可以看出应变能集中在煤体侧,随着加载的进行应变能沿着节理面分布范围逐渐扩大,应变能数值明显增加,最大值达到 720 kJ/m^3 。对于复合岩体 C-R,随着冲击的进行应变能范围逐渐扩大,同样沿着节理面主要集中在煤体侧,在冲击面上形成明显的损伤区,再现了不同节理角度复合岩体应变能的空间演化过程,以上研究可为能量的三维空间分析提供可靠依据。

4 结论

基于损伤本构关系,利用 FLAC-PFC 耦合构建了三维 SHPB 模拟系统,通过三维模拟系统开展了动态压缩、动态拉伸模拟试验,进行了动力冲击下数值模拟验证,并进一步分析了复合岩体的宏观力学行为与细观损伤破坏机理,得到了如下结论。

(1)利用 FLAC-PFC 耦合构建了三维 SHPB 模拟系统,基于损伤本构关系实现了动载条件下的数值模型计算验证,保证了模型计算的正确性。

(2)通过构建的损伤模型进行复合岩体分析,对于不同节理角度复合岩体,损伤区均在煤体侧开始萌生并沿着节理扩大直至破坏,得到复合岩体三维裂纹空间扩展形态,可为三维裂纹研究提供新的思路。

(3)基于应变能密度再现了不同节理角度复合岩体应变能的空间演化过程,得到复合岩体中的煤体是能量主要承载体。对于不同节理角度复合岩体,应变能在煤体侧开始集中并沿着节理扩大直至破坏,实现了能量演变的三维可视化。

鉴于复合岩体动态失稳过程的复杂性,当前对其破坏机制的认识仍存在诸多不足。诸如结构面倾角、粗糙度及关键物性参数对力学响应的影响规律,尚未在本文中系统探讨。然而,上述因素对于理解动载下复合岩体的失稳机制至关重要,有待后续研究结合具体工况开展深入分析。

参 考 文 献

- [1] Pan Y S, Wang A W. Disturbance response instability theory of rock bursts in coal mines and its application[J]. Geohazard Mechanics, 2023, 1(1): 1-17.
- [2] 吉东亮. 动静荷载作用下复合岩体力学响应与渐进破坏机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.
Ji Dongliang. Study on mechanical response and progressive failure of composite rock mass under static and dynamic loading[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2023.
- [3] 郑建伟, 张修峰, 齐庆新, 等. 不同围压下层数对煤岩组合体破坏特性的实验[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(30): 12840-12846.
Zheng Jianwei, Zhang Xiufeng, Qi Qingxin, et al. Influencing analysis of bedding quantity on failure behavior of coal-rock combination under different triaxial loading conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(30): 12840-12846.
- [4] 代航宇, 刘建峰, 林浩, 等. 三轴压缩条件下具有层理性页岩的力学性质及声发射演化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10419-10428.
Dai Hangyu, Liu Jianfeng, Lin Hao, et al. Mechanical properties and acoustic emission evolution of layered shale under triaxial compression[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10419-10428.
- [5] 沈顺超, 肖桃李, 折海成, 等. 交叉裂隙砂岩样单轴力学特性与扩展破坏[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3766-3772.
Shen Shunchao, Xiao Taoli, She Haicheng, et al. Cross fractured sandstone samples uniaxial mechanical properties and fracture extended failure[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(9): 3766-3772.
- [6] 陈国庆, 陈毅, 孙祥, 等. 开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 908-915.
Chen Guoqing, Chen Yi, Sun Xiang, et al. Crack coalescence and brittle failure characteristics of open rock bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 908-915.
- [7] 唐志成, 夏才初, 丁增志. 非贯通类节理岩体剪切变形规律分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2353-2358.
Tang Zhicheng, Xia Caichu, Ding Zengzhi. Analysis of shear deformation law for intermittent jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2353-2358.
- [8] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2872-2883.
Li Diyu, Han Zhenyu, Sun Xiaolei, et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2872-2883.
- [9] 赵洪宝, 吉东亮, 王涛, 等. 双向约束条件下冲击荷载对煤样结构影响与机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 353-360.
Zhao Hongbao, Ji Dongliang, Wang Tao, et al. Influence and mechanism of impact load on internal structure of coal sample under biaxial static constraint[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(2): 353-360.
- [10] Wen Z J, Xu C L, Gong F Q, et al. Mechanical response and impact tendency index correction of gangue-coal combined structure[J]. Journal of Central South University, 2025, 32(6): 2288-2306.
- [11] 赵扬锋, 荆刚, 程传杰, 等. 含裂隙砂岩破裂特征及微震和电荷感应信号规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 211-219, 233.
Zhao Yangfeng, Jing Gang, Cheng Chuanjie, et al. Tests for fracture characteristics of fractured sandstone and micro-seismic and charge induced signal laws[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 211-219, 233.
- [12] 黄华森, 张永发, 王超林, 等. 基于声发射信号的含孔洞红砂岩多重分形特性和破坏机制分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(14): 6023-6034.
Huang Huasen, Zhang Yongfa, Wang Chaolin, et al. Failure mechanism analysis of sandstone with cavity based on acoustic emission spectrum[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6023-6034.
- [13] 宋彦琦, 李名, 王晓, 等. 基于高速摄影的双预制裂纹大理岩加卸载试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2679-2689.
Song Yanqi, Li Ming, Wang Xiao, et al. Experimental test on marble containing two pre-existing cracks under loading and unloading conditions based on high-speed photography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2679-2689.

- [14] Tang C N, Zhang Y B, Liang Z Z, et al. Fracture spacing in layered materials and pattern transition from parallel to polygonal fractures[J]. *Physical Review E*, 2006, 73(5): 056120.
- [15] 张学朋, 蒋宇静, 王刚, 等. 基于颗粒离散元模型的不同加载速率下花岗岩数值试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(9): 2679-2686.
- Zhang Xuepeng, Jiang Yujing, Wang Gang, et al. Numerical experiments on rate-dependent behaviors of granite based on particle discrete element model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(9): 2679-2686.
- [16] 刘海明, 倪晨阳, 王希辉, 等. 单轴压缩条件下交叉双节理岩石裂纹扩展特征颗粒流分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(S2): 3710-3721.
- Liu Haiming, Ni Chenyang, Wang Xihui, et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of cross jointed rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(S2): 3710-3721.
- [17] 张俊, 刘先峰, 王通, 等. 冻融灰岩能量演化规律及分段损伤模型[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(29): 12658-12666.
- Zhang Jun, Liu Xianfeng, Wang Tong, et al. Energy evolution law and segmented damage model of freeze-thaw limestone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(29): 12658-12666.
- [18] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003-3010.
- Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [19] 孙杰豪, 郭保华, 田世轩, 等. 基于声发射特征参数的砂岩节理直剪破坏特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(S1): 167-177.
- Sun Jiehao, Guo Baohua, Tian Shixuan, et al. Experimental study of direct shear failure characteristics of sandstone joints based on characteristic parameters of acoustic emission[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(S1): 167-177.
- [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] Weibull W. A statistical theory of strength of materials[M]. Stockholm: IVB-Handl, 1939.
- [22] Zhu W C, Tang C. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(2): 236-252.
- [23] Tang C N, Lin P, Wong R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—Part II: numerical approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(7): 925-939.
- [24] Ji D L, Cheng H, Zhao H B. A voronoi tessellated model considering damage evolution for modeling meso-mechanical mechanism of the sandstone[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, 158: 446-467.
- [25] 许凯, 陈祖庆, 孙振涛, 等. 基于全卷积神经网络的纵横波分解技术研究及其在弹性波成像中的应用[J]. *石油物探*, 2024, 63(6): 1126-1137.
- Xu Kai, Chen Zuqing, Sun Zhentao, et al. FCN-based P-and S wave decomposition technique and its application in elastic imaging[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2024, 63(6): 1126-1137.
- [26] 胡华瑞, 刘仕威, 汪文德, 等. 三轴荷载下深部裂隙砂岩力学行为及损伤特性分析[J]. *矿产保护与利用*, 2025, 45(2): 14-21.
- Hu Huarui, Liu Shiwei, Wang Wende, et al. Analysis of mechanical behavior and damage characteristics of fractured sandstone under triaxial stress load[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2025, 45(2): 14-21.
- [27] Zhao G K, Guo Y T, Yang C H, et al. Evaluation of the cross-scale mechanical behavior and fracability of deep shales: how innovations benefit the exploitation of deep resources[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2025, 17(2): 91-94.
- [28] Dai L P, Zhao X, Pan Y S, et al. Microseismic criterion for dynamic risk assessment and warning of roadway rockburst induced by coal mine seismicity[J]. *Engineering Geology*, 2025, 357: 108324.
- [29] Zhao H, Jiang H, Wu Z, et al. Numerical study on the mechanism of tool impact fragmentation in heterogeneous rock under confining pressure[J]. *Deep Resources Engineering*, 2026, 3: 100208.
- [30] 丁超, 马坚伟. 基于逆散射成像条件的转换波弹性波动方程自动偏移速度分析[J]. *石油物探*, 2023, 62(4): 645-654.
- Ding Chao, Ma Jianwei. Converted phase elastic wave equation intelligent migration velocity analysis based on inverse-scattering imaging[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(4): 645-654.
- [31] Wang C, Liu Y, Song D, et al. Evaluation of bedding effect on the bursting liability of coal and coal-rock combination under different bedding dip angles[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, 11(1): 29-40.
- [32] Xu B, Tang J, Li J, et al. Dynamic range compression dual-domain attention network for tunnel extreme exposure image enhancement in transportation visual systems[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2026, 5: 100337.
- [33] Cui Y, Zhang Y, Zhang C H, et al. Task cognition and planning for service robots[J]. *Intelligence & Robotics*, 2025, 5: 119-142.
- [34] Zhang X, Tang J, Pan Y, et al. Experimental study on compound dynamic disaster in deep coal rock under gas and stress loading and unloading[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2025, 16(1): 60-76.