

静载作用下复合岩体损伤演化与渐进破坏机制

吉东亮 朱永全 李晓斌 贾康杰 马怡琛 盖少鹏 岳祖润

Damage evolution and progressive failure mechanism of composite rock mass under static loading

Ji Dongliang, ZHU Yongquan, LI Xiaobin, JIA Kangjie, MA Yichen, GE Shaopeng, YUE Zurun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241104.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续石墨纤维增强铝基复合材料准静态拉伸损伤演化与断裂力学行为

Damage evolution and fracture behaviors of continuous graphite fiber reinforced aluminium matrix composites subjected to quasi-static tensile loading

复合材料学报. 2020, 37(4): 907–918 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190726.001>

基于X射线原位拉伸的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的微观损伤演化

Micro-fracture behaviors of 3D needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites based on in-situ X-ray

复合材料学报. 2023, 40(8): 4460–4470 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.005>

三角角联锁机织铝基复合材料面内拉伸力学行为与失效机制

Mechanical behavior and failure mechanism of the 3D angle interlocking woven reinforced aluminum matrix composites under in-plane tensile loading

复合材料学报. 2021, 38(9): 2997–3007 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.007>

基于数字图像技术的C/SiC复合材料拉伸行为与失效机制

Tensile behavior and failure mechanism of C/SiC composite based on digital image technology

复合材料学报. 2022, 39(5): 2387–2397 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210629.003>

基于PFC^{3D}的机床床身用树脂矿物复合材料损伤性能细观研究

Meso-scale study on damage performance of resin mineral composite material for machine tool bed based on PFC^{3D}

复合材料学报. 2022, 39(2): 834–844 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210420.004>

C/SiC复合材料连接结构拉脱失效机制

Pull-out failure mechanism of C/SiC composite connection structure

复合材料学报. 2023, 40(12): 6852–6858 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230407.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241104.002

静载作用下复合岩体损伤演化与渐进破坏机制



分享本文

吉东亮¹, 朱永全¹, 李晓斌², 贾康杰¹, 马怡琛¹, 盖少鹏³, 岳祖润^{*1}

(1. 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; 2. 北京低碳清洁能源研究院 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211; 3. 沈阳农业大学 农学院, 沈阳 110161)

摘要: 为研究静载作用下复合岩体的力学特性, 采用伺服压力试验机进行不同节理角度复合岩体的静力加载试验, 对比分析了静力加载后复合岩体的抗压强度、裂纹扩展规律。考虑到岩石材料的非均匀性建立了弹性损伤本构模型, 再现不同节理角度复合岩体的渐进损伤演化过程, 并给出加载过程中复合岩体的能量耗散特征。结果表明: 随着节理倾角增加, 复合岩体的抗压强度逐渐减小, 在 45°时达到最小值为 18.0 MPa, 随后开始明显增加, 在 90°时达到最大值为 43.0 MPa, 复合岩体强度随节理倾角增加整体表现出明显倒 U 型变化; 基于 Weibull 分布构建了弹性损伤本构模型, 通过单轴压缩和巴西劈裂试验结果与模拟计算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破坏, 模拟结果与试验结果吻合较好, 实现了静载作用下岩石损伤过程的表征; 加载过程中应变能在煤体侧开始集中并沿着节理扩大从而形成失稳, 展示了能量集中的时空分布特征。

关键词: 静载; 复合岩体; 损伤演化; 渐进破坏; 能量演变

中图分类号: TU528; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)08-4691-11

Damage evolution and progressive failure mechanism of composite rock mass under static loading

Ji Dongliang¹, Zhu Yongquan¹, Li Xiaobin², Jia Kangjie¹, Ma Yichen¹, Ge Shaopeng³, Yue Zurun^{*1}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior in Traffic Engineering Structure and System Safety, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, National Institute of Low Carbon and Clean Energy, Beijing 102211, China; 3. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: To study the mechanical characteristics of composite rock mass under static loading, static loading tests of composite rock mass with different joint angles were conducted using a servo pressure testing machine, and the compressive strength and crack propagation of the composite rock mass were compared and analyzed. Taking into account the inhomogeneity of rock materials, an elastic damage constitutive model was established to reproduce the progressive damage evolution process, and the energy dissipation characteristic was presented during loading. The results show that: With the increase of joint inclination angle, the compressive strength of the composite rock mass gradually decreases, reaching a minimum of 18.0 MPa at 45°. Then the compressive strength begins to increase significantly, reaching a maximum of 43.0 MPa at 90°. The strength of the composite rock mass shows a significant inverted U-shape change with the increase of joint inclination angle. An elastic damage constitutive

收稿日期: 2024-08-20; 修回日期: 2024-10-01; 录用日期: 2024-10-24; 网络首发时间: 2024-11-05 08:56:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241104.002>

基金项目: 河北省教育厅青年基金 (50199990574); 河北省省级科技计划 (23567602H); 国家自然科学基金 (52404109)

Science and Technology Project of Hebei Education Department for Young Scholar (50199990574); S&T Program of Hebei (23567602H); National Natural Science Foundation of China (52404109)

通信作者: 岳祖润, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土基础力学 E-mail: yzr1898@qq.com

引用格式: 吉东亮, 朱永全, 李晓斌, 等. 静载作用下复合岩体损伤演化与渐进破坏机制 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4691-4701.

Ji Dongliang, Zhu Yongquan, Li Xiaobin, et al. Damage evolution and progressive failure mechanism of composite rock mass under static loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(8): 4691-4701(in Chinese).

model was established based on Weibull distribution. The constitutive model was verified by comparing the results of uniaxial compression and Brazilian splitting tests with the simulation results. For composite rock masses with different joint angles, the damage zone starts to originate on the coal side and expands along the joints until it fails. The simulation results are in good agreement with the test results, realizing the characterization of the rock damage process under static loading. Strain energy density begins to concentrate on the coal side and expands along the joints, showing the spatio-temporal distribution characteristics of energy concentration.

Keywords: static loading; composite rock mass; damage evolution; progressive failure; energy evolution

资源开采进入深部以后赋存环境发生巨大变化,煤层呈现出地应力高、构造复杂等特点。煤层不是独立存在而是与顶底板岩层协同共生,掘进后的巷道围岩大多是煤体和顶底板岩层共同形成的复合煤岩结构体^[1-3]。而在工程施工过程中,复合岩体在静态荷载作用下裂纹发育、扩展和贯通会降低岩体的稳定性^[4]。因此进行静力作用下含节理岩体的力学特性研究对灾害防控有一定的指导意义。

关于复合岩体的受力机制展开了大量的试验研究。考虑煤岩体结构的影响,腾俊洋等^[5]分析了岩石的组合方式决定着其受力状态,从而影响着复合岩体的破坏模式。黄锋等^[6]发现软层抑制裂隙扩展的能力随软层厚度的增加递增;刘晓云等^[7]得到较高强度材料体积占比的变化对复合试件整体强度的影响较显著;杨科等^[8]系统探讨了不同比例组合试样在静动态作用下的变形特点;李成杰等^[9-11]探究了不同裂隙角度下复合岩体的能量耗散规律;并同时考虑了组合体不同位置处的应变特征,分析了其径向变形和煤体部分的扩容特性;当煤岩体所处的外部应力边界条件改变时,周辉等^[12]得到随着围压的增大,水平层状复合岩石的破坏形态呈现出明显差异,整体上破坏形态逐渐由脆性破坏向延性破坏过渡;闫长斌^[13]分析了层间剪切带发生错动破坏引起围岩系统失稳的演化过程;李地元等^[14]发现含不同裂隙倾角试样强度、应变和弹性模量等力学参数随预制裂隙倾角表现为先减小后增大。

关于复合岩体的数值分析方面,李昂等^[15]发现岩样的渐进破坏过程均是以拉应力破坏为起点,并终止于主剪切带的形成;黄书岭等^[16]提出层状岩体复合材料硬化-软化模型;殷鹏飞等^[17]进一步分析了裂纹的数目和分布区域来阐明层状复合岩石试样破坏的细观机制。李昂等^[18]考虑工程应用从而得到采面底板岩体深部以压剪破坏形式为主,进入采空区后转化为拉剪破坏。考虑到加载过程的能量积累,左建平和宋洪强^[19]基于煤-岩

弹性能密度差,建立了差能失稳模型;左建平等^[20-21]进一步对比了不同加载条件下煤、岩单体与其组合体的破坏机制差异,并分析了其对冲击倾向性的影响;谢和平等^[22]、杨磊等^[23]分析了煤岩组合体不同耗能参数的响应规律,讨论了能量驱动灾变演化机制;刘少虹^[24]认为煤岩体结构与外部荷载之间的协同作用是控制冲击地压发生的关键。

以上研究主要考虑了静力作用下的变形特性和能量耗散,对于其变形破坏和能量演化的内在机制研究相对较少。本文用伺服压力试验机进行不同节理角度复合岩体的静力加载试验,对比分析了静力加载后不同节理角度复合岩体的抗压强度、裂纹扩展。得到加载过程中的渐进损伤演化特征,并给出不同节理角度复合岩体的能量耗散规律,实现了损伤过程的表征和能量演变的可视化,以期复合地层变形分析提供一定的参考。

1 试验设计

本次试验材料为原煤和砂岩,将其中部分岩样加工成标准试样(50 mm×100 mm)和圆盘试样(50 mm×25 mm)进行对照试验,复合岩体则由不同节理角度试样二次光滑处理后利用环氧树脂粘结而成,图1为复合试样(50 mm×100 mm)。

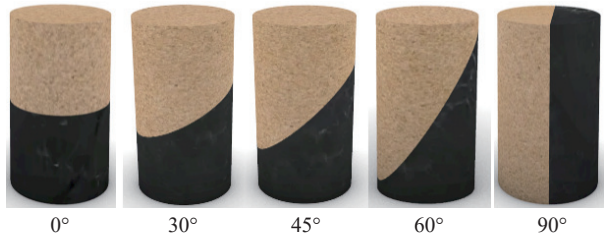


图1 复合岩体试样

Fig. 1 Composite rock samples

本次复合岩体静力加载采用苏州南光 WDW-300 E 微机控制电液伺服压力试验机(图2),室内单轴压缩和巴西劈裂试验采用位移控制加载方式,每步增量为 0.01 mm,直到试样发生破坏。



图2 试验设备
Fig.2 Experimental equipment

表1为不同节理角度复合岩体在静力作用下的试验方案，为保证试验结果的正确性，每种试样进行多次重复试验，分析不同节理角度下试样的应力、应变并进行试验结果分析(R为岩石，C为煤，B为圆盘试样，R-C为复合岩体)。

表1 静力加载不同节理角度试样方案
Table 1 Testing results of samples with different joint angles under static loading

Sample	Group	Angle/(°)
R	5	-
C	5	-
B	5	-
R-C1	5	0
R-C2	5	30
R-C3	5	45
R-C4	5	60
R-C5	5	90

Notes: R is rock; C is coal; B is disk specimen; R-C is composite rock mass.

2 结果分析

2.1 静载作用下应力-应变关系

表2为不同节理角度试样在静载作用下的试验结果，采用WDW-300E微机控制电液伺服压力试验机进行加载，通过应力控制加载直到复合岩体发生破坏，得到不同节理角度下试样的峰值应力和破坏模式等结果。

表2 静力作用下不同节理角度复合岩体试样的试验结果
Table 2 Testing results of composite rock mass at different angles under static loading

Sample	Group	Angle/(°)	σ /MPa
R	5	-	40.0
C	5	-	20.0
R-C1	5	0	30.0
R-C2	5	30	25.0
R-C3	5	45	18.0
R-C4	5	60	22.0
R-C5	5	90	43.0

Note: σ is uniaxial compression strength.

通过表2中纯煤、纯岩和复合试样试验结果对比可以发现，纯煤样的峰值应力均值为20.0 MPa，其峰值应变均值为1.35%；而对于纯岩样，其峰值应力均值为40.0 MPa，其峰值应变均值为0.86%。对于峰值应力，其基本顺序为纯岩样>复合岩体>纯煤样，而对于峰值应变，基本顺序为纯岩样<复合岩体<纯煤样，在下文分析时取其中一组数据进行详细分析。

图3(a)为不同节理角度复合岩体单轴压缩下应力-应变曲线，当节理角度为0°、30°、45°、60°、90°时，复合岩体的应力峰值分别为30.0 MPa、25.0 MPa、18.0 MPa、22.0 MPa和43.0 MPa。随着倾角的增大，复合岩体的抗压强度逐渐减小，并在45°时达到最小值为18.0 MPa，随后开始明显增加，在90°时达到最大值为43.0 MPa，试样强度与节理倾角整体表现出明显倒U型变化^[25]。而其峰值应变(图3(b))随着角度的增大逐渐减小，这是由于在压缩条件下复合试样中的煤体比岩石强度更低，应变也主要在煤体部分产生，随着角度的增大岩体在加载方向占比增加，其对于复合岩体产生一种支撑作用导致整体应变减小，从而应变表现为单调减小。而弹性模量(图3(c))则主要由应力-应变关系决定，节理角度为0°、30°、45°、60°、90°时，复合岩体平均弹性模量分别为2.5 GPa、3.0 GPa、3.4 GPa、4.2 GPa和5.7 GPa。由此可知复合岩体弹性模量整体上随着角度的增大而增大，两者具有一定的二次函数关系，说明随着节理角度的增大，试样抵抗变形能力增加，这也与试样峰值应变的单调减小有着较好的对应关系。

2.2 静载作用下破坏模式

基于超高速相机拍摄照片，通过自编的Python程序提取裂纹图像，图4为不同节理角度复合岩体在静载作用下的破坏形态，其中黑色线

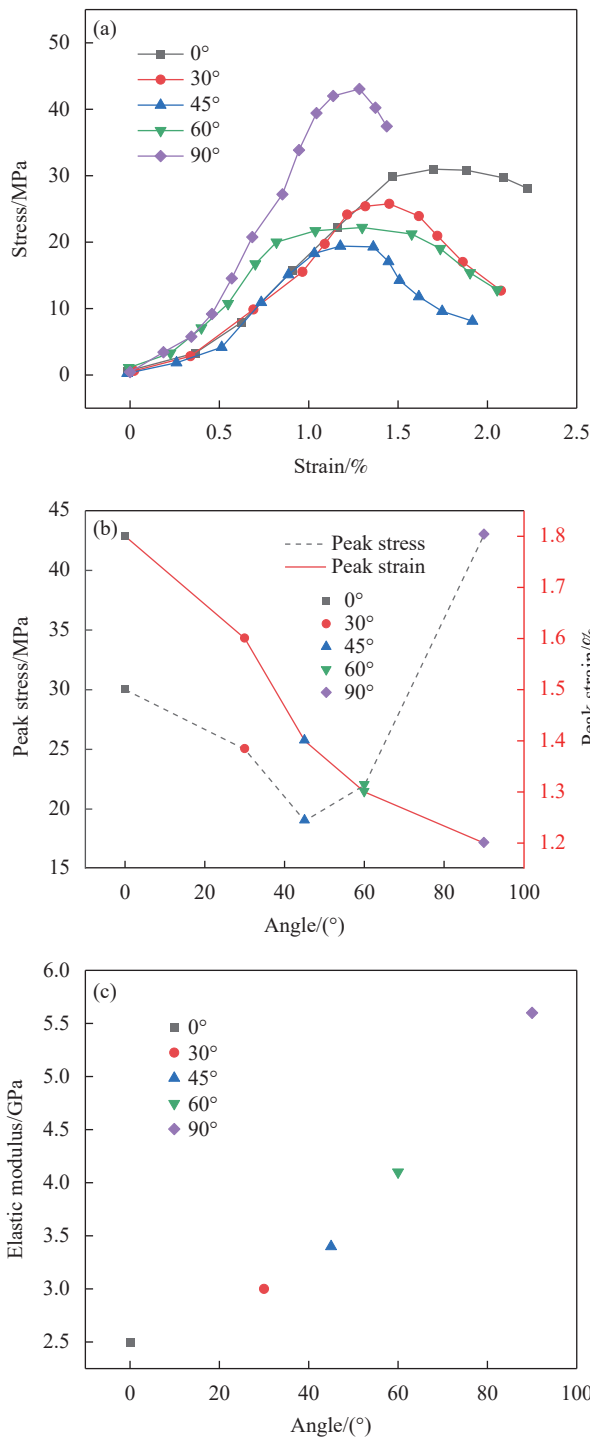


图3 静载下复合岩体力学特性

Fig. 3 Mechanical properties of composite rock mass under static loading

条为劈裂拉伸裂纹，浅灰色为剪切裂纹。可以看出，在静载条件下，节理角度为0°的复合岩体在煤体侧产生明显的主劈裂拉伸裂纹并向岩体侧贯穿。随着角度的增加，节理角度为30°、45°和60°的复合岩体会沿着节理面产生一条主剪切裂纹。节理角度为90°的复合岩体则发生明显的劈裂破坏。

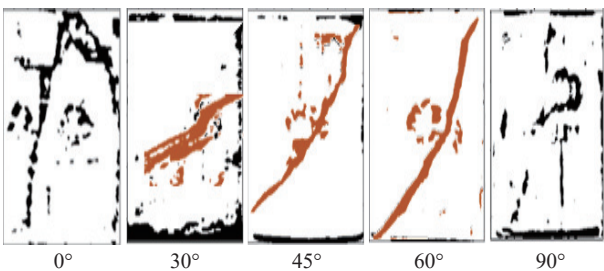
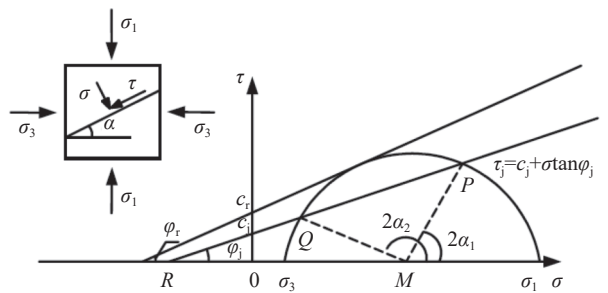


图4 静载下复合岩体破坏模式

Fig. 4 Failure mode of composite rock mass under static loading

基于以上得到的试验结果，可以采用单节理面理论模型进行解释。在施加应力作用下，单一节理试样节理面上可以分为两种应力作用：法向应力 σ 和切向应力 τ ，力的大小随节理倾角 α 而变化，如图5所示。



σ is normal stress; σ_1 is maximum principal stress; σ_3 is minimum principal stress; τ is tangential stress; c_j is cohesion; φ_j is friction angle; c_j is cohesion for joint plane; φ_j is friction angle for joint plane; α , α_1 , and α_2 are joint angles; τ_j is joint surface strength; M, R, Q and P are intersections

图5 复合岩体节理面力学分析

Fig. 5 Mechanical analysis of composite rock mass at joint surface

节理面的应力可表示为^[25]

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\alpha) \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据库仑准则，节理面强度曲线RQP可表示为

$$\tau_j = c_j + \sigma \tan \varphi_j \quad (2)$$

式中： c_j 为节理面的粘聚力； φ_j 为节理面的内摩擦角； σ 为正应力； τ 为剪应力； σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； α 为连接角。

由图5可知，在莫尔圆上，若节理应力状态超过节理面强度曲线，则节理发生滑移破坏，即 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 。若节理应力状态不超过节理面强度曲线，节理岩体此时破坏不由节理面控制，其破坏主要与岩体内部自身强度较小的岩块有关，此时 $\alpha < \alpha_1$ 或 $\alpha > \alpha_2$ 。若 $\alpha = \alpha_1$ 或 $\alpha = \alpha_2$ ，此时剪应力等

于节理面的最大抗剪强度，节理面恰好发生滑移。

由图 5 可知， $\angle R_{PM} = 2\alpha_1 - \varphi_j$ ，可得

$$\frac{L_{PM}}{\sin \varphi_j} = \frac{L_{RM}}{\sin (2\alpha_1 - \varphi_j)}$$

(3)

$$\tau_m \sin (2\alpha_1 - \varphi_j) = (\sigma_m + c_j \cot \varphi_j) \sin \varphi_j$$

(4)

式中： L_{PM} 、 L_{RM} 分别为三角形 PRM 两条边； σ_m 为平均应力， $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ ； τ_m 为最大剪应力， $\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。

由式 (4) 可得

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha_1 &= \varphi_j + \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_m + c_j \cot \varphi_j}{\tau_m} \sin \varphi_j \right) \\ 2\alpha_2 &= \pi + \varphi_j - \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_m + c_j \cot \varphi_j}{\tau_m} \sin \varphi_j \right) \end{aligned} \right\}$$

(5)

由式 (5) 可知，节理岩体发生沿节理失稳的临界倾角 (α_1, α_2) 受节理的强度参数 (c_j, φ_j) 和应力作用 (σ_1, σ_3) 共同影响。

当试样为单轴压缩时，即 $\alpha_3 = 0$ 。当莫尔圆与节理面强度曲线相交时，必然存在 2 个交点。由上述试验可知，当复合岩体节理角度为 0° 时，复合岩体在煤体侧产生明显的主劈裂拉伸裂纹并向岩体侧贯穿；节理角度为 90° 的复合岩体发生明显的劈裂破坏，岩体不会沿着节理面发生滑移破坏。其原因主要是节理面角度处于 $\alpha < \alpha_1$ 和 $\alpha > \alpha_2$ ，此时复合岩体破坏受自身强度较小的岩块控制。而节理角度为 30° 、 45° 和 60° 时，复合岩体会沿着节理面滑动破坏，说明节理角度处于 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 之间。

3 数值模拟分析

3.1 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^[26]，不同均质度 m 下弹性模量分布如图 6 所示，由计算公式如下：

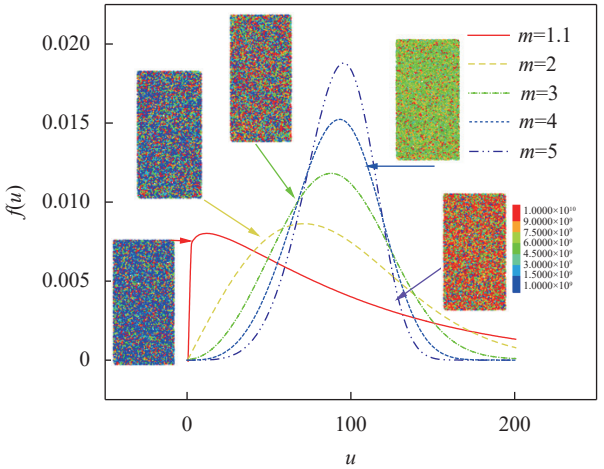
$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right]$$

(6)

式中： 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 值越大表示参数分布得越均匀。

3.2 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^[27]。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 7 所示。



$f(u)$ is function distribution; u is the parameter of an individual element (e.g., Young's modulus and strength); m is heterogeneity coefficient

图 6 岩石 (煤) 弹性模量 Weibull 分布

Fig. 6 Weibull distribution of Young's modulus of rock (coal)

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

(7)

式中： 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； n 为指数； F_1 和 F_2 为两个反映应力状态的函数。

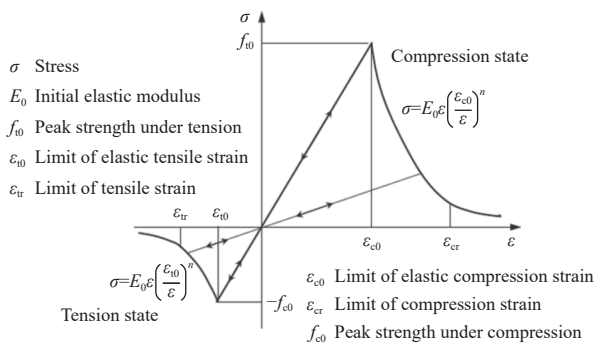


图 7 岩石 (煤) 本构关系示意图

Fig. 7 Constitutive law of rock (coal)

3.3 破坏准则

采用最大拉应变准则和摩尔库仑准则作为破坏判断准则^[28]。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：

$$F_1 = -\sigma_3 - f_{t0}$$

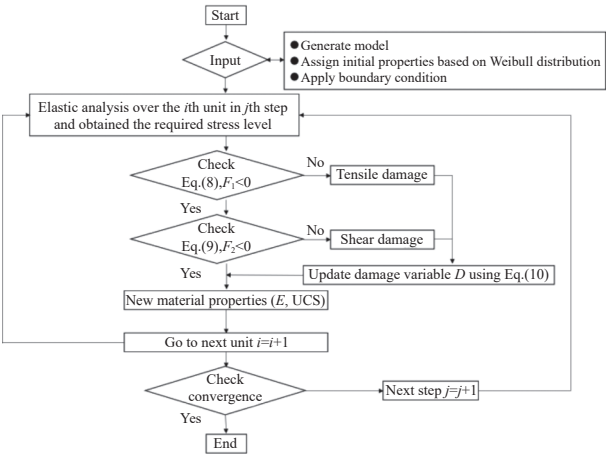
(8)

$$F_2 = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - f_{c0}$$

(9)

$$E = (1 - D)E_0 \tag{10}$$

式中： f_{t0} 和 f_{c0} 分别是单元的单轴抗拉和单轴抗压强度； E_0 和 E 分别为损伤前和损伤后的弹性模量； F_1 和 F_2 是两个表示应力状态的函数，其数值大于0表示介质分别发生了拉伸和剪切损伤。基于上述分析，计算流程如图8所示。

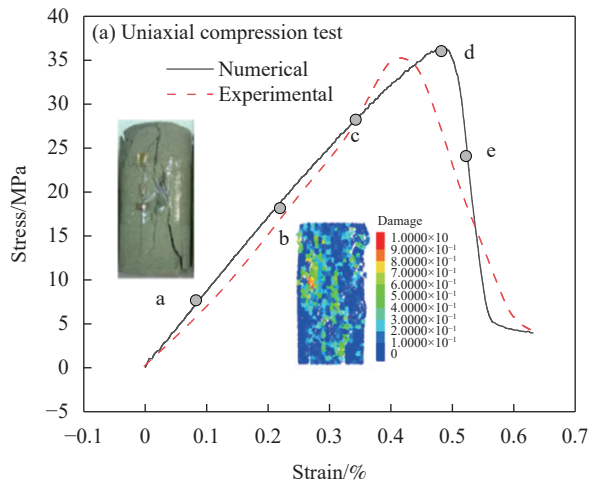


F_1 和 F_2 are two functions reflecting stress states; D is the damage variable, which lies between 0 and 1; E is elastic modulus; UCS is uniaxial compressive strength

图8 岩石(煤)本构关系计算流程

Fig. 8 Calculation flow of constitutive law of rock (coal)

首先进行模型的输入，主要包括模型的生成、基于Weibull分布的参数赋值和边界条件的确定。随后进行基本的力学分析直到达到要求的应力状态。一般先进行拉伸损伤的判定，如果满足拉伸损伤则直接更新损伤变量；如果不满足拉伸损伤则进行剪切损伤的判定；如果满足剪切损伤则直接更新损伤变量，从而得到新的参数值；如果不



满足则接着进行下一个单元的循环，直到所有单元完成遍历，最后达到模型的计算收敛。从非均匀性出发，考虑拉伸损伤和剪切损伤，最终实现损伤的定量表征。

3.4 静力加载下的数值模型与验证

数值模拟时假设试样为非均质的，模型尺寸为50 mm×100 mm。其弹性模量和强度满足Weibull分布，模拟参数见表3。基于砂岩和煤成分组成测试结果，砂岩模型内钾长石、绿泥石、石英和云母矿物晶体比例分别为15%、14%、62%和9%。计算模型采用平行粘结模型 (Parallel bonded model, PBM) 和光滑节理模型 (Smooth joint model, SJM)。

表3 模拟岩石试样主要参数

Table 3 Main parameters of rock in numerical simulation				
Parameter	Potassium feldspar	Chlorite	Quartz	Other
Minimum radius R_{min}/mm	0.18	0.18	0.18	0.18
Particle size ratio R_{rat}	1.52	1.52	1.52	1.52
Density $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	2 600	2 500	2 750	2 700
Fraction factor (Particle) μ	0.67	0.4	0.48	0.32
Stiffness ratio k_n/k_s	1.3	1.5	1.1	2.7
Contact modulus E_c/GPa	9	8	11	7
Cohesive strength pb_{coh}/MPa	70	60	80	40
Tensile strength pb_{ten}/MPa	12	10	14	8
Fraction/(°)	35	30	32	33
Normal stiffness s_{jkn}	0.9	0.9	0.9	0.9
Shear stiffness s_{jks}	0.3	0.3	0.3	0.3
Tensile strength s_{jten}/MPa	15	17	22	16
Cohesive strength s_{jcoh}/MPa	65	72	80	60
Fraction $s_{j\theta}/(°)$	20	20	20	20
Fraction factor $s_{j\mu}$	0.3	0.3	0.3	0.3

图9将模拟计算结果与试验结果进行对比，单轴压缩下两者的应力-应变曲线比较吻合，峰值

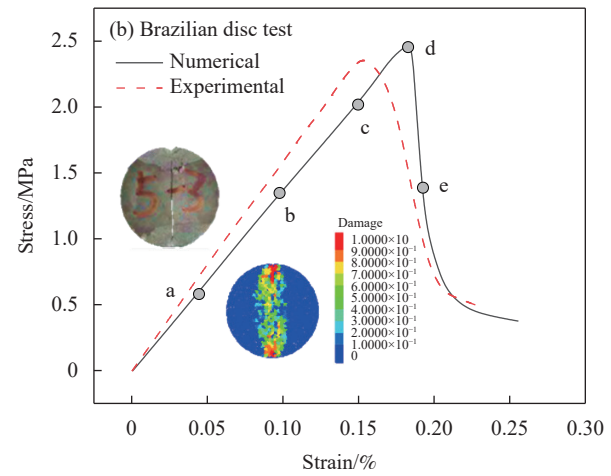


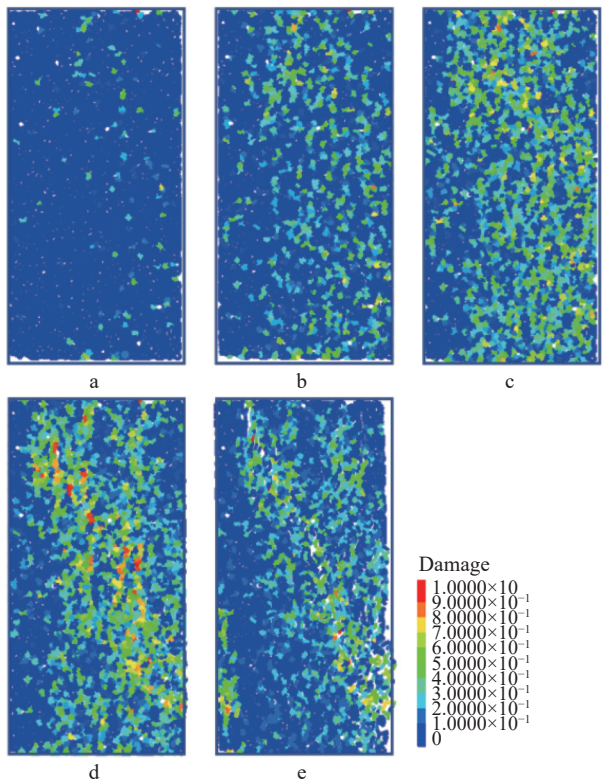
图9 岩石单轴压缩和巴西劈裂

Fig. 9 Uniaxial compression and Brazilian splitting of rock

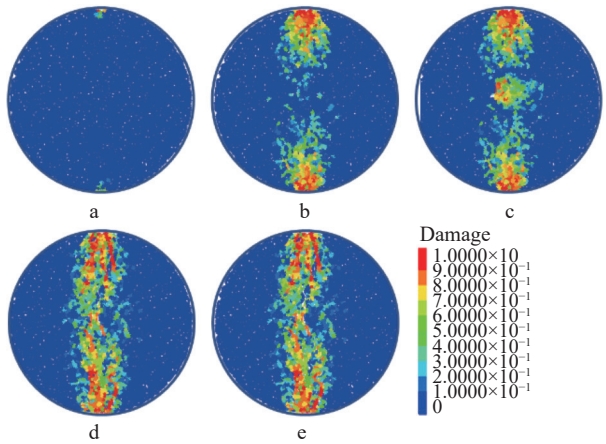
强度均达到约 35.0 MPa，整体上岩石呈单斜面剪切破坏，而对于巴西劈裂，两者抗拉强度均约为 2.5 MPa，可以看出单轴压缩和巴西劈裂条件下两者破坏模式比较接近，从而说明自定义本构模型的正确性。

3.5 渐进损伤分析

从图 10 可以看出单轴加载初期损伤区随机产生，损伤区随着加载的进行逐步扩大直至形成明显的破坏面。而对于巴西劈裂损伤区则主要由两



(a) Uniaxial compression test



(b) Brazilian disc test

图 10 静载下岩石损伤演化

Fig. 10 Damage evolution of rock under static loading

侧开始，在中心点明显扩展沿着轴线形成贯通破坏。单轴压缩和巴西劈裂模拟结果与试验结果相对一致，说明所构建模型可以较好地捕获岩石渐进破坏过程，进而说明构建本构模型的正确性。

3.6 能量演化分析

复合岩体受到冲击作用后，颗粒将逐渐累积应变能^[29-30]，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，表示为

$$U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (11)$$

式中： E 是弹性模量； ν 是泊松比； σ_1 、 σ_2 和 σ_3 最大主应力、中间主应力和最小主应力； U 是应变能密度。

加载过程中的能量演化如图 11 所示。随着加载的进行，可以看到应变能集中分布在损伤区附近，损伤区范围扩大时，应变能也明显增加，与单轴压缩和巴西劈裂破裂模式具有较好的对应关系，说明破坏过程是由加载能量驱动的，进一步阐释了能量驱动下的渐进破坏机制。

4 复合岩体静力加载分析

4.1 复合岩体参数

基于煤成分组成测试结果，煤样内非晶质和黏土及其他矿物晶体比例分别为 82% 和 18%。通过多次参数的调整，使数值曲线结果与试验结果基本相符。

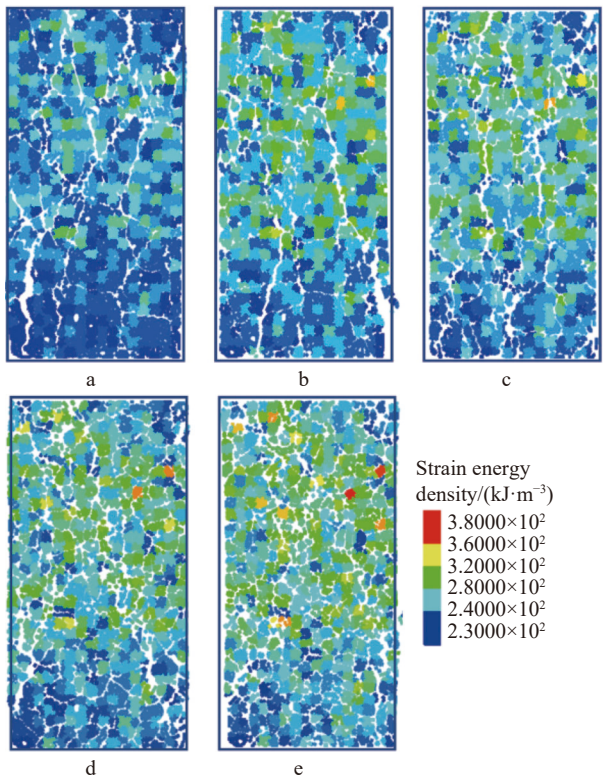
试样建立模型为 50 mm×100 mm，模型加载方式与试验加载方式相同，模拟参数选取见表 3 和表 4。模型弹性模量服从 Weibull 分布，其分布参数如图 12 所示。

4.2 复合岩体位移分析

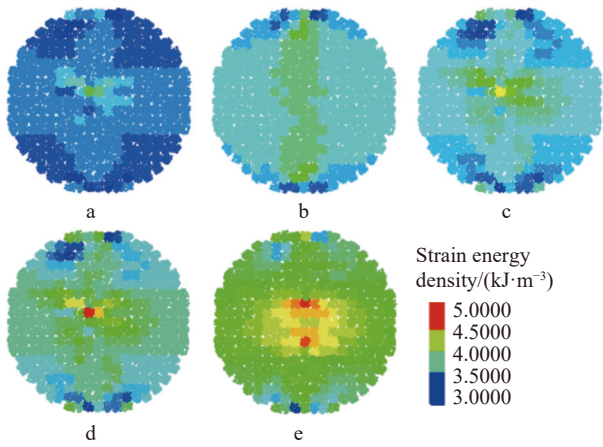
静力加载条件下复合岩体破坏模式如图 13 所示，可以看出节理 0° 的复合岩体主要为煤体的劈裂破坏，节理 30°、45° 和 60° 的复合岩体主要为沿着节理面的剪切破坏，节理 90° 的复合岩体主要为煤体侧的轴向劈裂破坏。模拟结果与试验结果具有较好的一致性。

4.3 静力加载下损伤演化

图 14 为不同角度复合岩体静力加载下损伤演化情况，对于复合岩体，当节理角度为 0°，煤体侧在中心开裂，随着节理角度的增加，损伤区在煤体侧开始萌生并逐渐沿着节理面扩大，当节理角度为 90°，损伤则在煤体侧产生劈裂，最终达到最大形成宏观破坏。这主要是由于煤体侧强度较



(a) Uniaxial compression test



(b) Brazilian disc test

图 11 静载下岩石应变能密度分布

低，受到加载作用后容易产生更多的损伤破坏，破坏模式与试验观测现象基本相符。

4.4 静力加载下能量分布

图 15 是不同节理角度复合岩体能量分布情况，随着节理角度的增加，应变能密度分布范围扩大，但可以看出明显集中分布在煤体侧，在静载作用下复合岩体内部能量不断积累并逐渐达到承载能力，随后就会出现能量的释放从而发生破坏。这与前面的损伤分布具有很好的对应性，同时与试

表 4 煤样数值模型参数

Table 4 Micro-parameters of coal in model

Parameter	Amorphous	Clay and others
Radius $s_{\min}$ /mm	0.18	0.18
Particle size ratio	1.52	1.52
Density ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 650	2 200
Fraction factor μ	0.3	0.32
Stiffness ratio k_n/k_s	2.82	2.7
Contact modulus E_c /GPa	8.0	6.0
Cohesive strength pb_{coh} /MPa	43	33
Tensile strength pb_{ten} /MPa	27	8
Fraction factor (pb)	1	1
sj_{kn}	0.9	0.9
sj_{ks}	0.3	0.3
sj_{ten} /MPa	17	16
sj_{coh} /MPa	60	60
sj_{θ} ($^{\circ}$)	20	20
sj_{μ}	0.4	0.3

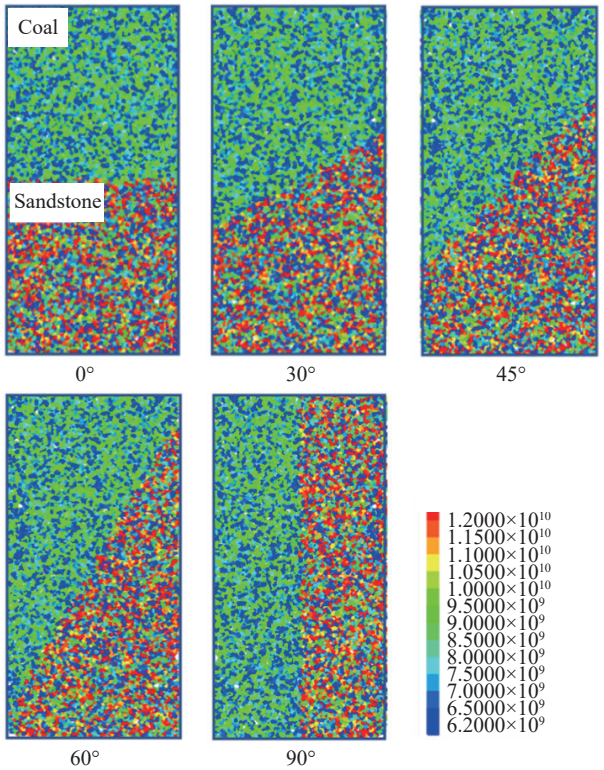


图 12 复合岩体弹性模量分布

Fig. 12 Distribution of elastic modulus of composite rock mass

验结果相比也具有很好的一致性。说明复合岩体的破坏过程本质为能量调整的过程，通常在力学参数(弹性模量、强度)更小的一侧更容易形成能量积聚。

5 结论

采用伺服压力试验机进行不同节理角度复合岩体的静力加载试验，系统研究了力学响应特性，

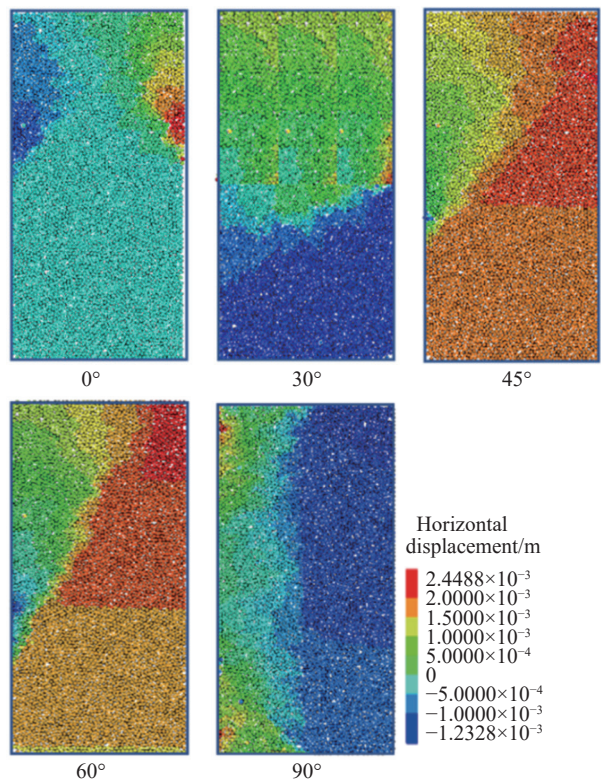


图 13 静载下复合岩体水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of composite rock mass under static loading

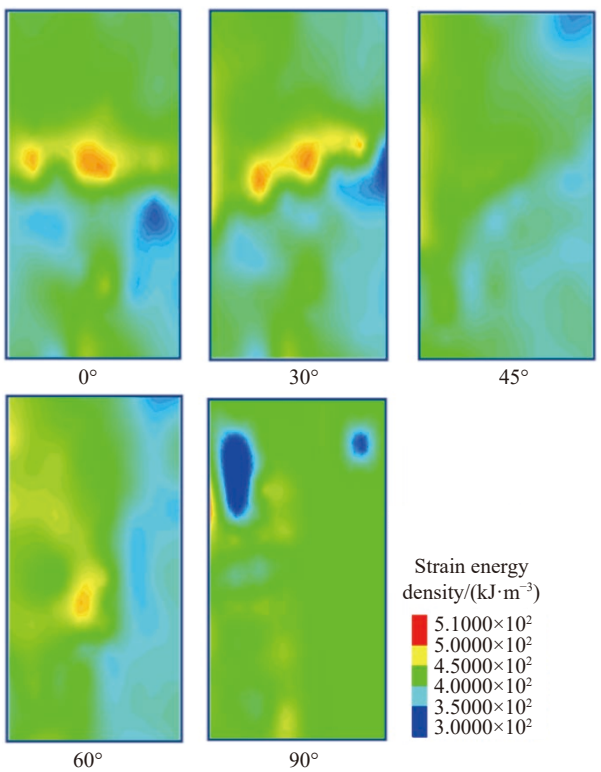


图 15 静载下复合岩体应变能密度分布

Fig. 15 Strain energy density of composite rock mass under static loading

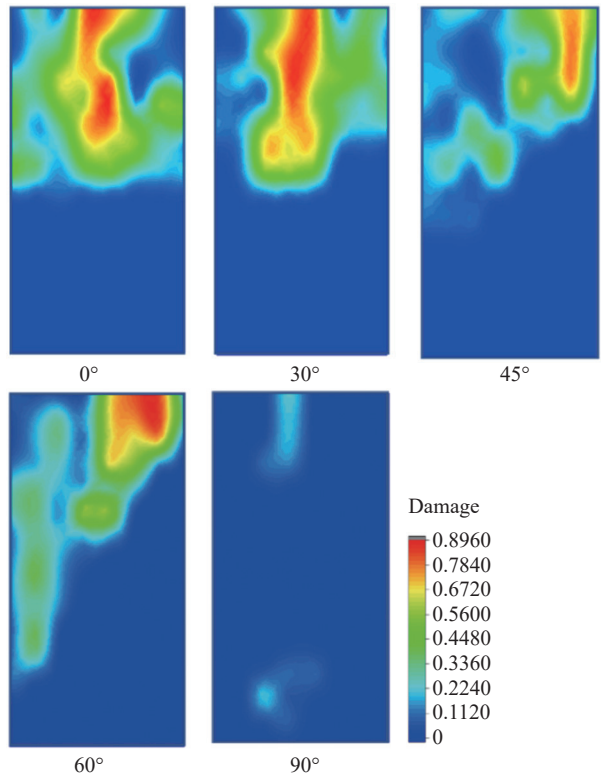


图 14 静载下复合岩体损伤演化过程

Fig. 14 Damage evolution processes of composite rock mass under static loading

并构建了弹性损伤本构模型，主要结论如下：

(1) 静载条件作用下，随着节理角度的增加，复合岩体应力峰值表现为先减小后增大，在 45° 时达到最小值，为 18.0 MPa，其弹性模量单调增加至 5.7 GPa，而峰值应变逐渐减小到 1.2%；

(2) 静载条件下复合岩体的破坏主要集中在煤体侧，基于单节理面模型阐明了复合岩体的宏观破裂机制，当节理角度为 0° 或 90° 时，复合岩体破坏受自身强度较小的岩块控制，当节理角度为 30°、45° 和 60° 时，复合岩体会沿着节理面滑动破坏；

(3) 基于 Weibull 分布构建了弹性损伤本构模型，通过模拟结果与试验结果对比验证了本构模型的正确性，静力作用下主要在煤体侧形成损伤区，实现了复合岩体损伤过程的定量表征；

(4) 岩石破坏是内部应力重分布的结果，基于应变能密度理论得到复合岩体应变能分布与破坏模式具有良好的对应关系，阐明了复合岩体在能量驱动下的渐进破坏机制。

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] 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(in Chinese).
- [3] GONG F Q, WANG Y L, WANG Q. Peak-strength strain energy storage index for evaluating coal burst liability based on the linear energy storage law [J]. [Geohazard Mechanics](#), 2023, 1(2): 153-161.
- [4] ZHAO Y S, FENG Z J. A brief introduction to disaster rock mass mechanics [J]. [Geohazard Mechanics](#), 2023, 1(1): 53-57.
- [5] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3263-3278.
- TENG Junyang, TANG Jianxin, WANG Jinbo, et al. The evolution law of the damage of bedded composite rock and its fractal characteristics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3263-3278(in Chinese).
- [6] 黄锋, 周洋, 李天勇, 等. 软硬互层岩体力学特性及破坏形态的室内试验研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 230-238.
- HUANG Feng, ZHOU Yang, LI Tianyong, et al. Laboratory experimental study on mechanical properties and failure modes of soft and hard interbedded rock mass [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 230-238(in Chinese).
- [7] 刘晓云, 叶义成, 王其虎, 等. 单轴压缩下不同强度组合复合岩体相似材料试件力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 183-190.
- LIU Xiaoyun, YE Yicheng, WANG Qihu, et al. Mechanical properties of similar material specimens of composite rock masses with different strengths under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(S2): 183-190(in Chinese).
- [8] 杨科, 刘文杰, 窦礼同, 等. 煤岩组合体界面效应与渐进失稳特征试验 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1691-1700.
- YANG Ke, LIU Wenjie, DOU Litong, et al. Experiment on interface effect and progressive instability characteristics of coal-rock assembly [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1691-1700(in Chinese).
- [9] 李成杰, 徐颖, 张宇婷, 等. 冲击荷载下裂隙类煤岩组合体能量演化与分形特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2231-2241.
- LI Chengjie, XU Ying, ZHANG Yuting, et al. Study on energy evolution and fractal characteristics of cracked coal-rock-like combined body under impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2231-2241(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 李成杰, 徐颖, 冯明明, 等. 单轴荷载下类煤岩组合体变形规律及破坏机理 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1773-1782.
- LI Chengjie, XU Ying, FENG Mingming, et al. Deformation law and failure mechanism of coal-rock-like combined body under uniaxial loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1773-1782(in Chinese).
- [12] 周辉, 宋明, 张传庆, 等. 水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 465-473.
- ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing, et al. Effect of confining pressure on mechanical properties of horizontal layered composite rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 465-473(in Chinese).
- [13] 闫长斌. 含层间剪切带复合岩体失稳机制的突变理论分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(10): 4281-4286.
- YAN Changbin. Analysis of instability mechanism of composite rock mass with interlayer shear zone by catastrophe theory [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4281-4286(in Chinese).
- [14] 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 Diyun, 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(in Chinese).
- [15] 李昂, 邵国建, 范华林, 等. 基于细观层次的软硬互层状复合岩体力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3042-3049.
- LI Ang, SHAO Guojian, FAN Hualin, et al. Investigation of mechanical properties of soft and hard interbedded composite rock mass based on meso-level heterogeneity [J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 33(S1): 3042-3049(in Chinese).
- [16] 黄书岭, 徐劲松, 丁秀丽, 等. 考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 743-756.
- HUANG Shuling, XU Jinsong, DING Xiuli, et al. Study of layered rock mass composite model based on characteristics of structural plane and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 743-756.

743-756(in Chinese).

[17] 殷鹏飞, 杨圣奇, 高峰, 等. 不同节理模型在层状复合岩石离散元模拟中的应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 164-173, 183.

YIN Pengfei, YANG Shengqi, GAO Feng, et al. Application of different joint models in stratified composite rock DEM simulation composite rock DEM simulation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 164-173, 183(in Chinese).

[18] 李昂, 纪丙楠, 牟谦, 等. 深部煤岩层复合结构底板破坏机制及应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 559-572.

LI Ang, JI Bingnan, MOU Qian, et al. Failure mechanism of composite structure floors of deep coal and rock strata and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 559-572(in Chinese).

[19] 左建平, 宋洪强. 煤岩组合体的能量演化规律及差能失稳模型 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3037-3051.

ZUO Jianping, SONG Hongqiang. Study on energy evolution law and differential energy instability model of coal-rock combined body [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3037-3051(in Chinese).

[20] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制与力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 84-92.

ZUO Jianping, XIE Heping, WU Aimin, et al. Investigation on failure mechanisms and mechanical behaviors of deep coal-rock single body and combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 84-92(in Chinese).

[21] 左建平, 陈岩, 崔凡. 不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 81-87.

ZUO Jianping, CHEN Yan, CUI Fan. Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal-rock combined bodies [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 81-87(in Chinese).

[22] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.

XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074(in Chinese).

[23] 杨磊, 高富强, 王晓卿, 等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3894-3902.

YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3894-3902(in Chinese).

[24] 刘少虹. 动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 292-300.

LIU Shaohong. Nonlinear catastrophe model and chaotic dynamic mechanism of compound coal-rock unstable failure under coupled static dynamic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 292-300(in Chinese).

[25] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 120-125.

CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2013: 120-125(in Chinese).

[26] ZHU W C, TANG C A, HUANG Z P, et al. A numerical study of the effect of loading conditions on the dynamic failure of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(S1): 348-353.

[27] ZHU W C, TANG C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(1): 25-56.

[28] JI D L, ZHAO H B, VANAPALLI S. Damage evolution and failure mechanism of coal sample induced by impact loading under different constraints [J]. Natural Resources Research, 2023, 1: 1-29.

[29] 吉东亮, 程辉, 赵洪宝, 等. 冲击扰动下岩石蠕变损伤演化与失稳诱发机制 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 197-207.

JI Dongliang, CHENG Hui, ZHAO Hongbao, et al. Creep damage evolution and instability induction mechanism of rock under impact disturbance [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 197-207(in Chinese).

[30] JI D L, CHENG H, ZHAO H B. A Voronoi tessellated model considering damage evolution for modeling meso-mechanical of the sandstone [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2024, 158: 446-467.