

基于离散元方法的白砂岩损伤破坏特性分析与实验验证

黄怡洋¹, 周杰², 汪腾¹, 郑光^{1,3}, 郑宇轩¹, 周风华¹

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109

3. 南京航空航天大学宇航空间机构全国重点实验室, 江苏 南京 211100)

摘要: 为探究白砂岩在动静荷载作用下的损伤演化机制、细观裂纹扩展规律及应变率效应, 以细粒白砂岩为研究对象, 采用三维颗粒流代码 (Particle Flow Code in 3 Dimensions, PFC^{3D}) 软件构建基于平行黏结模型 (Parallel Bond Model, PBM) 的三维离散元模型, 对单轴压缩、巴西劈裂和三维分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 三种加载条件下白砂岩的力学行为进行数值分析, 同时开展相应的室内实验, 进行对比分析白砂岩在动静荷载下的宏观力学特征与破坏形态。从细观角度探究了裂纹萌生-扩展-贯通过程、力链演化规律及能量转化特征。引入动态强度放大因子 (Dynamic Increase Factor, DIF), 定量表征其应变率强化效应。结果表明: 所建立的离散元模型能有效表征白砂岩的宏观力学行为, 数值分析结果与室内实验结果的抗压强度、抗拉强度相对误差均低于 2%, 破坏形态较为吻合。白砂岩在单轴压缩、巴西劈裂和动态冲击下的破坏过程裂纹延展的方式存在差异, 但均以剪切裂纹为起裂基础, 拉伸裂纹为扩展引导, 两种裂纹耦合发展的形式形成断裂面, 其中剪切裂纹的占比分别为 61.8%、52.7% 和 54.5%, 裂纹的萌生和扩展与力链的断裂、重组、集中密切相关, 拉伸力链集中区域为裂纹延展的主要路径。在不同应变率加载条件下, 白砂岩试样的裂纹扩展方式及破碎形态未发生明显变化。在高应变率冲击条件下能够吸收更多能量, 具有更好的承载能力, 这是由于在高应变率冲击下试样内部裂纹数量显著增多, 贯穿裂纹带更显著, 致使白砂岩在高应变率冲击条件下能够吸收更多能量。研究成果可为深部岩体工程在动静联合荷载作用下的稳定性评价与灾害防控提供一定的理论参考。

关键词: 白砂岩; 离散元方法; 损伤破坏; 裂纹分析; 实验验证;

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Analysis and Experimental Verification of Damage and Failure Characteristics of White Sandstone using the Discrete Element Method

HUANG Yiyang¹, ZHOU Jie², WANG Teng¹,

ZHENG Guang^{1,3}, ZHENG Yuxuan¹, ZHOU Fenghua¹

*收稿日期: 2026-04-22; 修回日期: 2026-06-24;

基金项目: 国家自然科学基金 (12072169);

第一作者: 黄怡洋 (2000—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2411090013@nbu.edu.cn;

通信作者: 郑光 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, E-mail: zhengguang@nbu.edu.cn.

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,

Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109 China

3. National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the damage evolution mechanism, meso-crack propagation law, and strain rate effect of white sandstone under static and dynamic loads, fine-grained white sandstone was selected as the research object. Taking fine-grained white sandstone as the research object, a three-dimensional discrete element model based on the parallel bond model (PBM) was established using PFC3D software to numerically analyze the mechanical behavior of white sandstone under three loading conditions: uniaxial compression, Brazilian splitting, and three-dimensional split Hopkinson pressure bar (SHPB). Meanwhile, corresponding laboratory experiments were carried out to conduct a comparative analysis of the macroscopic mechanical characteristics and failure modes of white sandstone under static and dynamic loads. The macroscopic mechanical characteristics and failure modes of white sandstone under static and dynamic loads were compared and analyzed. The process of crack initiation, propagation, and coalescence, the evolution law of force chains, and the energy transformation characteristics were explored from a mesoscopic perspective. The dynamic increase factor (DIF) was introduced to quantitatively characterize the strain rate strengthening effect. The results indicate that the established discrete element model effectively represents the macroscopic mechanical behavior of white sandstone, with relative errors of compressive strength and tensile strength between numerical analysis and laboratory results both below 2%, and the failure modes are in good agreement. Under uniaxial compression, Brazilian split, and dynamic impact, the crack propagation patterns of white sandstone differ, but all share a common basis: shear cracks initiate the fracture, tensile cracks guide the propagation, and the coupled development of the two types of cracks forms the fracture surface. The proportions of shear cracks are 61.8%, 52.7%, and 54.5%, respectively. The initiation and propagation of cracks are closely related to the breakage, reorganization, and concentration of force chains, with the concentrated regions of tensile force chains serving as the main paths for crack propagation. Under different strain rate loading conditions, the crack propagation mode and fragmentation morphology of white sandstone do not change significantly. Under high strain rate impact conditions, it can absorb more energy and exhibit better load-bearing capacity. This is because the number of internal cracks in the specimen increases significantly under high strain rate impact, and the penetrating crack zone becomes more pronounced, resulting in the white sandstone absorbing more energy under high strain rate impact conditions. The research findings can provide a theoretical reference for stability evaluation and disaster prevention in deep rock engineering under coupled static-dynamic loads.

Keywords: White sandstone; Discrete element method; Damage and failure; Crack analysis; Experimental validation

在深部采矿与隧道开挖等工程中, 岩石承受着开挖卸荷、地层蠕变等准静态荷载以及爆破扰动、冲击地压等动态荷载, 其力学性能劣化与损伤演化过程直接关系到工程结构的长期稳定与施工安全^[1], 因此深入研究岩石在动静荷载下的变形破坏机理对预测工程稳定性和防范地质灾害具有重要意义。然而, 传统室内实验如单轴压缩、巴西劈裂与霍普金森压杆实验难以实时捕捉细观裂纹演化过程, 有限元方法也难以真实反映岩石内部颗粒、孔隙与微裂隙等影响。相比之下, 离散元方法通过将岩石离散为颗粒集合体, 基于颗粒间粘结与牛顿运动定律, 可直接模拟细观尺度下裂纹萌生、扩展直至宏观破碎的全过程^{[2][3]}, 为深入揭示岩石在复杂荷载下的破坏机制提供了有效手段。

离散元方法在深部岩石力学性能和损伤特性的研究中应用广泛。黄达等^[4]利用 PFC 分析了含单裂隙岩石在静-动序贯加载下的力学响应与能量耗散, 发现初始损伤越强, 岩石峰值前吸收的能量越少, 但峰后耗散的能量越多, 且能量耗散与细观损伤演化密切相关。Zhang 等^[5]利用 PFC^{2D} 研究了不同加载应变率下砂岩的破坏过程, 结果表明, 除泊松比外, 峰值强度、弹性模量等力学参数均随应变率增大而增大。李秀茹等^[6]通过 PFC 离散元程序, 开展爆破荷载作用下深埋

隧道失稳破坏的数值模拟,分析了不同埋深隧道围岩的损伤演化过程和相同埋深隧道围岩颗粒位移与应力随时间的变化规律。结果表明:埋深越大,围岩损伤越严重,损伤主要集中在隧道两帮并逐渐向顶板扩展;爆破荷载主要诱发围岩裂隙,而高地应力则导致岩块剥离与弹射,隧道两帮竖向压应力超过岩体抗压强度是破裂的主要机制。林志斌等^[7]采用 PFC^{3D} 离散元软件及物理模型试验,分析了巷道周边岩体变形破裂的时空演变规律与机理。结果表明:围岩变形与开挖时间呈“台阶式”增长,与距巷道表面距离呈指数衰减,巷道开挖使浅部岩体剪应力迅速增大发生屈服破裂,应力向深处传递导致邻近岩体发生延性剪切破坏,形成明显剪切滑移裂纹。WANG 等^[8]利用 PFC 离散元软件模拟了爆破应力波触发的岩爆,并分析了结构面对岩爆机制的影响。重点考察了不同的结构面倾角和位置,揭示了动态扰动下围岩的裂纹发育、应力分布及动能变化规律。结果表明:岩爆破坏在倾角为 30° 和 150° 时最为严重,而当倾角接近 90° 时破坏程度减弱。张涛^[6]等利用 FLAC^{3D} 和 PFC^{3D} 联合进行了 SHPB 实验的数值分析。结果表明,随着循环冲击次数的增加,试样内部微裂纹、破碎颗粒、断裂力链数量均增加,且试样动态峰值应力降低,动态损伤不断累积。王志亮^[10]等采用 FLAC^{3D} 和 PFC^{3D} 联合进行了 SHPB 实验数值分析,结果表明,在真三轴动态压缩条件下,大理岩试样主要以拉伸裂纹居多,其数量超过总裂纹数的 80%。Yuan 等^[11]基于有限元-离散元耦合方法研究了含闭合裂纹岩石在单轴压缩下的力学行为与能量演化,发现裂纹倾角和长度显著影响岩石的强度与破坏模式,并提出残余能量指数用于评估其动态冲击特性。Wang 等^[12]利用 PFC 程序分析了循环动载下砂岩的力学响应与能量耗散机制,结果表明能量耗散与细观损伤演化密切相关,且频率和应力幅值对裂纹演化有显著影响。Cong 等^[13]采用有限元-离散元耦合方法研究了煤系地层的力学响应与破坏特征,发现在单轴压缩过程中硬岩层呈现拉伸主导的破坏模式而软煤层呈现剪切主导的破坏模式。Zhang 等^[14]采用有限元-离散元耦合方法分析了含边裂纹砂岩在循环动载下的裂纹扩展过程,发现岩石在动载下的抗压强度显著高于静载,且强度随加载频率提高而增加。综上所述,离散元方法在刻画数值分析试样的细观力学行为方面具有独特优势,能够有效模拟颗粒或块体间的相互作用,再现裂纹的萌生、扩展与贯通过程,从而系统揭示岩石等脆性材料在复杂应力条件下的细观破碎机理与损伤演化规律。

目前,针对深部岩石在动静载荷加载条件下的损伤特性及其裂纹演化机制的研究较为有限。为了获得更为清晰的深部岩石在动静载荷作用下的损伤特性与裂纹扩展行为,本文以矿井下常见的白砂岩为研究对象,通过开展单轴压缩、巴西劈裂和三轴 SHPB 离散元数值分析,并结合相应的室内实验,对比分析不同加载状态下岩石的宏观响应与细观损伤机制,以揭示深部岩石在不同荷载作用下的破坏特性与损伤累积过程。

1 数值分析实验

1.1 离散元模型建立

采用 PFC^{3D} 软件构建三维离散元模型,分别对单轴压缩、巴西劈裂以及动态 SHPB 实验进行数值分析。模型中实验试样的尺寸、边界条件与室内实验保持一致,其中单轴压缩实验试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体试样。巴西劈裂实验试样为直径为 50 mm、厚度为 25 mm 圆柱体试样。三维霍普金森压杆实验试样为边长 50 mm 的立方体。单轴压缩和巴西劈裂建模过程如下,首先生成上下刚性墙体作为加载墙面,以及圆筒形约束墙体,形成与试样尺寸一致的封闭区域。随后在该区域内生成颗粒,并删除圆筒约束墙体。接着赋予颗粒平行粘结细观参数。最后采用位移控制加载,当轴向应力达到峰值并下降至其 40% 时终止试验,建立好的模型如图 1-2 所示。动态 SHPB 模拟实验采用有限元-离散元耦合建模方法。其中入射杆与透射杆通过有限元建立,模型尺寸以及材料按照室内实验装置设定。入射杆与透射杆的截面均为正方形,截面尺寸为 50mm×50mm,杆长均为 2000mm。杆件材料为高强度合金钢,密度为 7900 kg/m³,弹性模量为 210 GPa。两杆之间放置立方

体试样，其中试样预应力的施加通过调用 FISH 语言编写的伺服控制程序动态调整 6 个伺服墙的运动速度使试样保持在设定的预应力，最终建立的数值模型如图 3 所示。并在单轴压缩试样以及 SHPB 试样中心添加半径 15 mm 的测量圆用以后续试样应变率的输出。

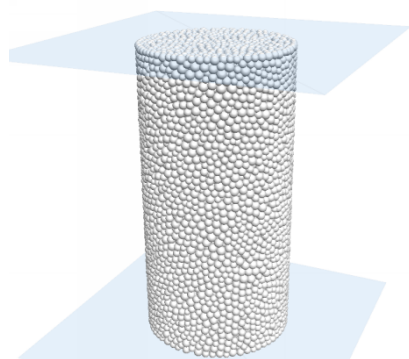


图 1 单轴压缩模拟实验

Fig.1 Uniaxial compression simulation test

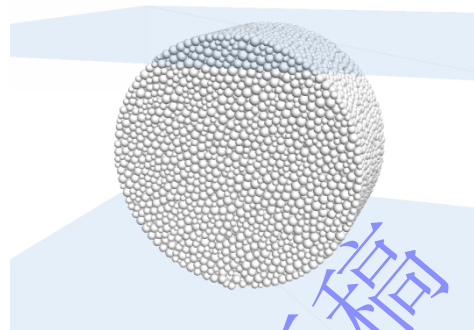


图 2 巴西劈裂模拟实验

Fig.2 Brazilian splitting simulation test

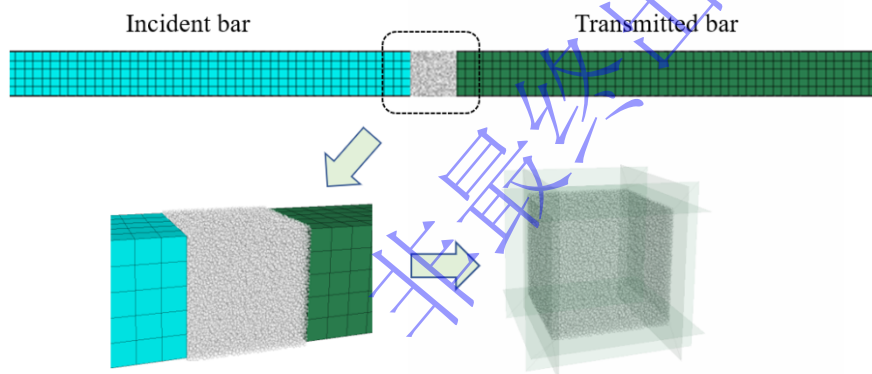


图 3 动态 SHPB 模拟实验

Fig.3 Dynamic SHPB simulation experiment

1.2 颗粒尺寸无关性验证

在离散元软件数值分析中，颗粒尺寸的设定对结果有显著影响。为确定适用于本次研究模型的颗粒粒径范围，在单轴压缩、巴西劈裂和 SHPB 试样中，设置了颗粒数量从 1 万至 8 万（以约 1 万为间隔）的 8 组试验。各组均采用相同细观参数进行数值分析，结果取三次随机生成试样的平均值。

图 4 为三种数值分析实验不同颗粒数目试样的结果图。由图可知，当颗粒数量为 1 万时，单轴压缩和巴西劈裂得到的强度值明显偏高。颗粒数增至 2 万以上后，结果趋于稳定，抗压与抗拉强度的波动幅度分别仅为 2.4% 和 4.1%。在 20 MPa 冲击载荷条件下的 SHPB 实验，颗粒数为 1 万时峰值应力显著偏低，颗粒数大于 2 万后结果同样趋于稳定，整体波动约为 2.9%。以上结果表明，当试样内颗粒数超过 2 万后，模拟结果均达到稳定。该结论与 P. A. Cundall 等^[6]研究一致，当颗粒尺寸小到一定程度时，其对模型宏观特性的影响基本可以忽略。

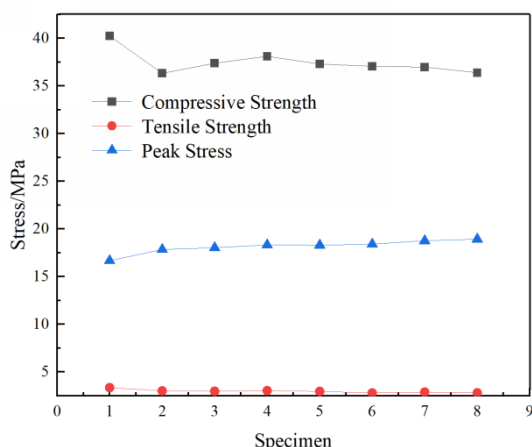


图4 数值分析实验结果

Fig.4 Numerical analysis experimental results

图5为颗粒数量有显著差异的两组试样的破碎结果图。由图可知，在单轴压缩实验中，颗粒数量为2万的试样仅形成两条宏观贯穿裂纹，而颗粒数量较多的颗粒数量为8万的试样对裂纹状态的表征更为清晰，能够体现主裂纹与次生分支裂纹的层级结构，更贴合实际实验的裂纹发展规律。巴西劈裂实验由于试样均沿中部劈裂为两部分，仅形成一条贯穿裂纹，因此颗粒数量对该工况下的裂纹形态影响较小。在 SHPB 冲击实验中，较多的颗粒数量也有助于更清晰地揭示裂纹扩展的形态与规律。

综合上述分析，后续研究将选取单轴压缩实验中颗粒数量为8万的试样、巴西劈裂实验中颗粒数量为2万的试样以及 SHPB 实验中颗粒数量为4万的试样对应的颗粒尺寸（颗粒半径为0.5-1.0mm）开展研究。

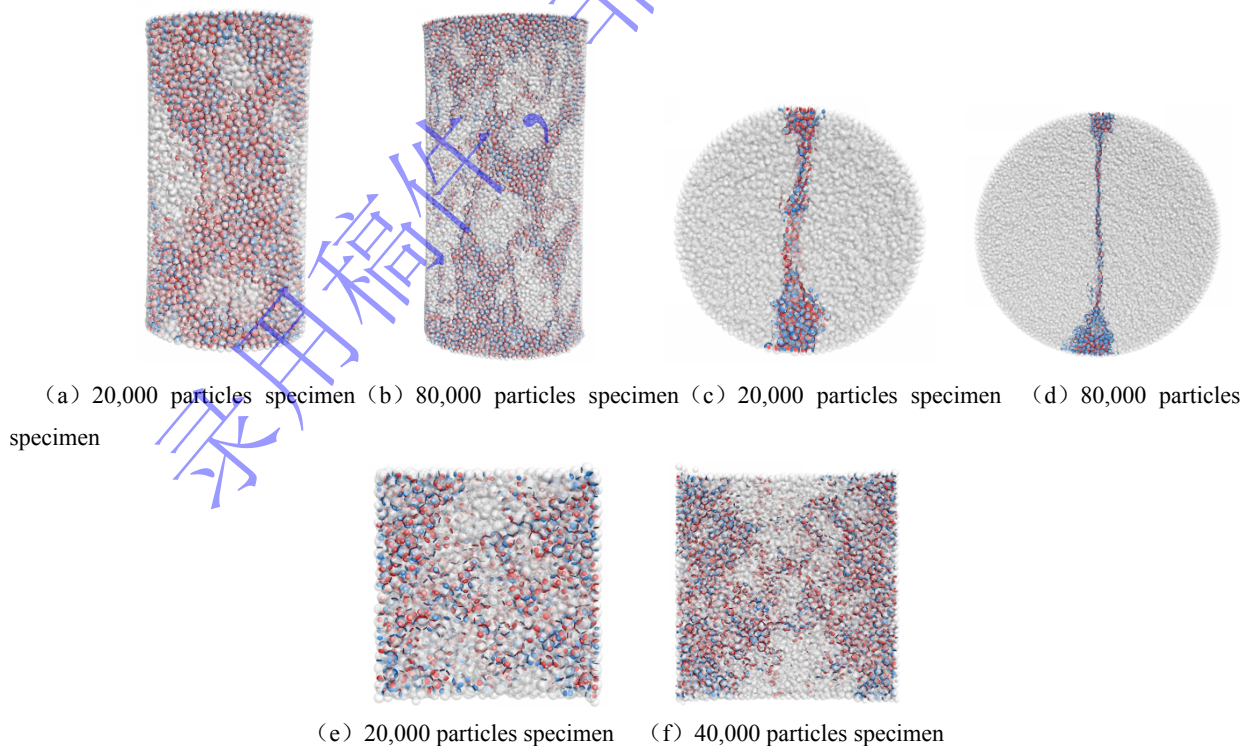


图5 数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results

1.3 细观参数的选取

PFC 软件为模拟颗粒材料的复杂力学响应提供了多种内嵌模型，如 CBM 模型、PBM 模型和 FJM 模型等。其中 PBM 模型能够同时传递力与力矩，并且可以模拟粘结在拉伸和剪切作用下的断裂过程，该模型能较好地再现岩石试样在受压过程中内部微裂纹的萌生、扩展与贯通的破坏机制，特别是在刻画拉伸裂纹与剪切裂纹的演化过程方面表现出良好的效果，现已被广泛应用于研究岩石类材料的相关问题^[17]。因此，本次研究白砂岩数值分析模型选用 PBM 模型进行细观参数标定。

在模型初始细观参数标定中，试样的宏观力学参数与细观参数之间存在复杂的关系^[18]。不同的平行粘结细观参数，对各类宏观力学特性的影响程度与方向也各不相同。Cundall^[15]、赵国彦等^[19]通过平行粘结模型的设定来模拟岩石的力学行为，建立了宏观参数间的定性计算公式：

$$E = E_c \phi_E \left(\frac{k_s}{k_n}, \frac{L}{R}, \frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_{b,m} \phi_c \left(\frac{E_c}{\sigma_{b,m}}, \frac{\tau_{b,m}}{\sigma_{b,m}}, \mu, \frac{k_s}{k_n}, \frac{L}{R}, \frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right) \quad (2)$$

式中 E 为试样的弹性模量， E_c 为平行粘结接触模量， σ_c 为试样抗压强度， k_n/k_s 为颗粒刚度比， $\tau_{b,m}$ 为粘聚力， $\sigma_{b,m}$ 为平行粘结抗拉强度， L 为试样高度， R 为圆柱试样半径， μ 为摩擦系数， R_{\max}/R_{\min} 为模型颗粒最大与最小的半径比， ϕ_E 、 ϕ_c 分别为弹性模量、抗压强度的相关函数。

P. A. Cundall^[15]在建立平行粘结模型时，设定 $E_c = \bar{E}_c$ ， $k_n/k_s = \bar{k}_n/\bar{k}_s$ 来模拟岩石的力学行为，其中 \bar{E}_c 为颗粒接触模量， \bar{k}_n/\bar{k}_s 为平行粘结刚度比。根据数值分析的结果，该设定能较好地符合岩石材料的特性，因此本文中也沿用该设定。根据前人经验抗压强度主要受粘聚力 $\tau_{b,m}$ 、粘结抗拉强度的影响，且二者均与抗压强度呈正相关^[28]。弹性模量主要受粘结接触模量和颗粒接触模量与刚度比控制，二者同样与弹性模量呈正相关^[20]。抗拉强度受粘聚力、粘结抗拉强度影响，整体与抗拉强度呈正相关，刚度比与抗拉强度呈负相关^[29]。结合相关的研究成果^[21-22]，宏观参数与细观参数的主要关系可以修改如下：

$$E = \phi_E \left(\frac{k_n}{k_s}, \frac{\bar{k}_s}{\bar{k}_n}, \bar{E}_c, \bar{E}_c \right) \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sigma_{b,m} \phi_c \left(\bar{E}_c, \bar{E}_c, \frac{k_s}{k_n}, \frac{\bar{k}_s}{\bar{k}_n}, \tau_{b,m} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_t = \tau_{b,m} \bar{\phi}_t \left(\frac{k_n}{k_s}, \frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}, \mu, \bar{\phi} \right) \quad (5)$$

式中 σ_c 为试样的抗拉强度， $\bar{\phi}_t$ 为抗拉强度的相关函数。

结合平行粘结模型中宏细观参数的关联性以及现有的研究成果，通过试错法迭代校准，标定出一组适用于白砂岩的细观参数（见表 1）。采用该参数得到的数值分析结果与室内实验结果吻合度较高。

表 1 白砂岩细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of white sandstone

细观参数	含义	标定值
R_{\min}/mm	最小颗粒半径	0.5
R_{\max}/R_{\min}	最大, 最小颗粒半径比	2.0
E_c/GPa	平行粘结接触模量	3.0
$\overline{k_n/k_s}$	平行粘结刚度比	1.5
$\sigma_{b,m}/\text{MPa}$	平行粘结抗拉强度	7.3
$\tau_{b,m}/\text{MPa}$	平行粘结粘聚力	6.8
$\overline{E_c}/\text{GPa}$	颗粒接触模量	3.0
k_n/k_s	颗粒刚度比	1.5
$\overline{\phi}/^\circ$	摩擦角	45
μ	颗粒摩擦系数	0.55

2 室内实验与数值模型验证

2.1 白砂岩试样的制备

本次实验所用细粒白砂岩呈灰白色。选取表面完好、完整性较高的岩芯样本, 按照试验规范对材料进行切割并打磨, 制备得到三类标准试件。用于单轴压缩实验的圆柱体试件, 直径为 50 mm、高度为 100 mm。用于巴西劈裂实验的圆柱体试件, 直径为 50 mm、厚度为 25 mm。用于三维霍普金森压杆动态力学实验的立方体试件, 边长为 50 mm。

2.2 单轴压缩实验

2.2.1 准静态单轴压缩室内实验

图 6 为准静态单轴压缩实验选用电动伺服岩石多功能加载实验系统。实验采用逐级一次连续加载法, 首先将试件居中放置于实验机上下承压板之间, 调整位置使荷载轴线对准试件中心。之后施加预荷载, 确认试件与承压板贴合紧密、设备数据采集正常。按 0.175 mm/min 的加载速率启动加载, 全过程持续约 13min, 直至试件发生宏观破坏, 同步记录加载过程中的实时荷载与轴向位移数据。



图 6 电动伺服岩石多功能加载系统

Fig. 6 Electric servo rock multi-function loading system

2.2.2 单轴压缩室内实验与数值分析结果对比

图 7 为采用表 1 中白砂岩的细观参数进行单轴压缩数值分析与室内实验的应力应变曲线结果对比图。由图可知, 相比于数值分析的曲线, 室内实验所得到的曲线一开始斜率较小, 呈现凹下去的形态, 这是由于白砂岩内部天然存在微裂隙、孔隙等缺陷, 单轴压缩初期这些缺陷会先被压密, 此时应力增长缓慢而应变增长较快, 因此应力应变曲线呈现凹向应变轴形态。但数值分析模型在单轴压缩实验前颗粒间已经为紧密接触的状态, 故没有压密阶段, 所以数值分析的曲线直接进入近似线性的弹性阶段, 且其峰值应变相应较小^[20]。进入弹性阶段后, 数值分析曲线与实验曲线的斜率基

本吻合，在数值分析实验的数据直线段拟合一次函数如下式所示，它的斜率即为试样的弹性模量为 7.053 GPa。

$$Y = 7.053X - 23.81 \quad (6)$$

峰值过后，室内实验因试样形成宏观破裂面而迅速丧失承载力，应力急剧跌落。而数值模型中，即使出现贯穿性裂纹，但在其两侧颗粒仍可通过摩擦及尚未完全破坏的接触传递部分应力，因此数值分析曲线表现为缓慢的下降。

同时，由图 7 结果可知，室内实验测得的白砂岩抗压强度为 39.67 MPa，数值分析结果为 40.19 MPa，相对误差为 1.3%。弹性模量分别为 7.0 GPa 和 7.053 GPa，相对误差为 0.76%。上述结果表明了数值分析与室内实验的应力-应变曲线在变化趋势与关键力学参数上均具有较好的一致性。

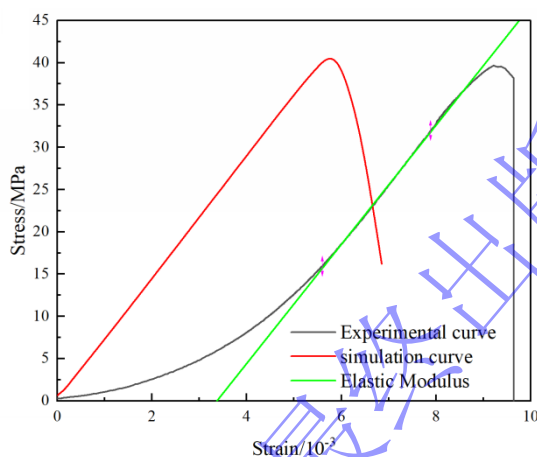


图 7 单轴压缩模拟和实验应力-应变曲线

Fig.7 Uniaxial compression simulation and experimental stress-strain curves

图 8 为单轴压缩实验的裂纹破碎图。由图可知，单轴压缩的数值分析试样与室内实验试样在裂纹的扩展方向、主裂纹与分支裂纹的形态以及试样的宏观破坏特征上展现出显著的相似性。两者均形成了斜向主裂纹与次生的分支裂纹，两种试样的主裂纹均与加载方向呈现一定角度，且在试样的端部产生分支裂纹，二者整体破坏均为典型单轴压剪破坏模式，两种试样的破碎时间也基本相近，形成贯穿性裂纹都在实验进行到 13min 左右。这些相似性也说明该数值模拟较好地还原了单轴压缩实验下试样的裂纹演化与破坏规律，能有效匹配室内实验的力学响应特征。

综合来看，数值分析结果与室内实验结果吻合良好，所建立的数值模型能够有效表征白砂岩在单轴压缩条件下的力学行为。



图 8 单轴压缩模拟和实验破碎图

Fig.8 Uniaxial compression simulation and experimental failure pattern comparison

2.3 巴西劈裂实验

2.3.1 准静态巴西劈裂实验

巴西劈裂实验是测定岩石、混凝土等脆性材料间接抗拉强度的经典方法，核心原理是通过圆盘状试样施加径向压缩载荷，使试样中心产生均匀拉应力，利用材料抗拉强度远低于抗压强度的特性，使试样沿直径方向拉伸破坏，进而通过弹性力学理论推导其抗拉强度。试件破坏时，作用在试件中心最大拉应力为：

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (7)$$

式中： σ_t 代表试件中心最大拉伸应力，即抗拉强度，单位 MPa。 P 代表试件破坏时的极限压力，单位 N。 d 和 t 分别为试件的直径和厚度，单位 mm。 π 为圆周率。

图 9 为劈裂拉伸实验机。本次巴西劈裂实验选取了 3 个圆柱体的标准岩石试件。实验时将试件横置在实验机的上下压头之间，确保加载轴线对准试样的中心，采用直接加压的方式对试样进行加载。

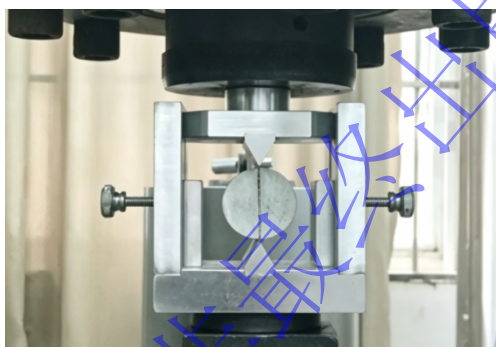


图 9 劈裂拉伸实验机

Fig. 9 Splitting tensile testing machine

2.3.2 巴西劈裂室内实验与数值分析结果对比

表 2 为白砂岩准静态巴西劈裂实验数据记录，室内巴西劈裂实验的实测抗拉强度介于 3.46-5.17 MPa 之间，极限压力在 3.7-6.7 kN 范围，这种波动是由于试样内部矿物成分差异、以及微裂纹、孔隙等天然缺陷共同影响的结果。而数值分析实验中，由于模型是由均质化颗粒建立，规避了天然试样中随机分布的原生缺陷与组分不均问题，因此结果波动性较小，三组模拟通过随机生成的颗粒试样求解后获取上下墙体接触力后取平均带入前文（7）式所求出，平均抗拉强度为 3.65 MPa，平均峰值加载压力约为 7.2 kN，与室内实验结果基本吻合。图 10 为巴西劈裂数值分析和室内实验试样破坏图。对比可知，室内试样与数值分析试样的裂纹均沿中心轴线延展，最终将试样均匀分为左右两部分。

综合数值分析结果与室内实验结果来看，该数值模型能够有效表征白砂岩在巴西劈裂实验条件下的力学行为。

表 2 白砂岩准静态劈裂拉伸实验记录

Tab. 2 Records of quasi-static splitting tensile test of white sandstone

试样编号	直径/mm	厚度/mm	极限载荷/kN	拉伸强度/MPa
1-3	50.1	24.4	6.7	5.17
1-4	50.0	23.8	3.7	3.46
1-5	50.0	25.0	5.6	4.98

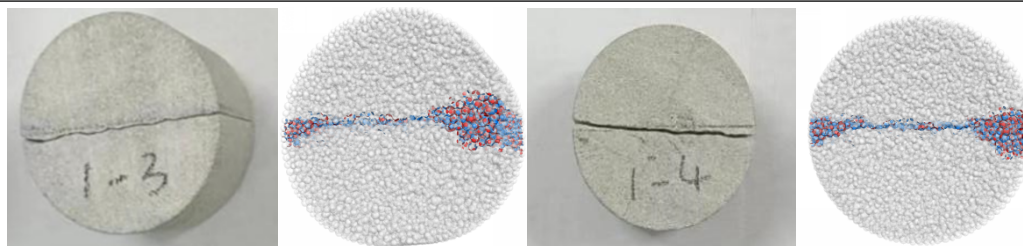


图 10 巴西劈裂模拟和实验破碎图对比

Fig.10 Brazilian splitting simulation and experimental failure pattern comparison

2.4 动态 SHPB 实验

2.4.1 动态 SHPB 室内实验

图 11 为动态加载实验采用的三轴分离式霍普金森压杆 (SHPB) 系统。该系统是由宁波大学与中国科学技术大学联合研制的三维霍普金森杆实验装置。如图所示该系统主要由两大部分构成, 一部分为用于施加三向静水压力的液压控制系统, 另一部分则为施加动态冲击的霍普金森杆加载系统。其中, 三向静水压力通过三个方向的液压油缸分别作用于对应方向的围压杆上, 以实现试样的预加围压。X 方向为动态冲击加载方向, 在该方向额外配置了气枪和对应的子弹, 以及透射杆后方的动能吸收装置。本次动态加载 SHPB 实验旨在研究试样的破坏特征。实验时将试样放置在加载中心, 通过驱动 X 和 Y 方向的液压油缸, 使试样在承受 X、Y 双轴 5MPa 预应力的状态下, 子弹的冲击气压设置为 0.3MPa, 沿 X 方向进行动态加载。

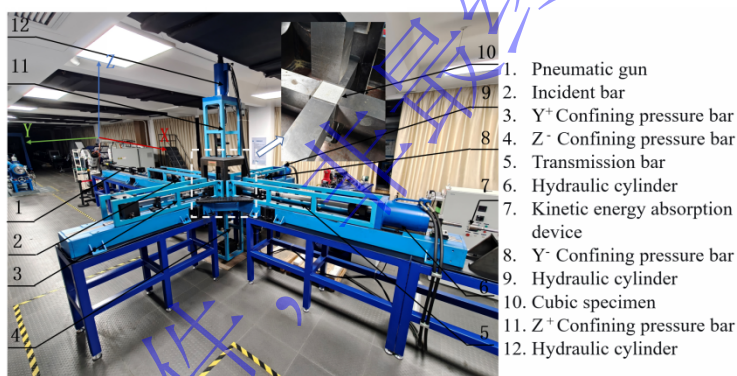


图 11 三维霍普金森杆加载测试试验系统

Fig. 11 3D Hopkinson bar loading test system

2.4.2 动态 SHPB 室内实验与数值分析结果对比

图 12 为动态 SHPB 实验的数值分析结果图。由图可知, 在 X、Y 双轴预应力条件下, 试样总体呈现了在自由面 Z 方向有“V”字形试样剥离。双轴预应力会在试样内部形成复杂应力场, 使角部、受压界面等区域产生局部应力集中, 而 SHPB 实验的高应变率动态冲击会进一步放大这种应力集中, 同时由于白砂岩抗拉强度远低于抗压强度, 裂纹便沿与主应力呈一定角度的应力集中面快速扩展, 最终呈现“V”字形剥离形态。实验试样由于放置在 Z 围压杆上, 杆体的刚性支撑相当于给下部额外增加了压应力约束, 这会削弱下部区域的应力集中, 从而抑制了裂纹在下部的萌生与扩展^[23], 因此裂纹优先在上部沿应力集中的斜向路径扩展。这也是相较于数值分析实验, 室内实验的试样主要在上部产生剥离的原因。

综合来看, 数值分析的裂纹结果与室内实验结果吻合良好, 说明所建立的数值模型能够有效表征白砂岩在动态 SHPB 实验条件下的力学行为。

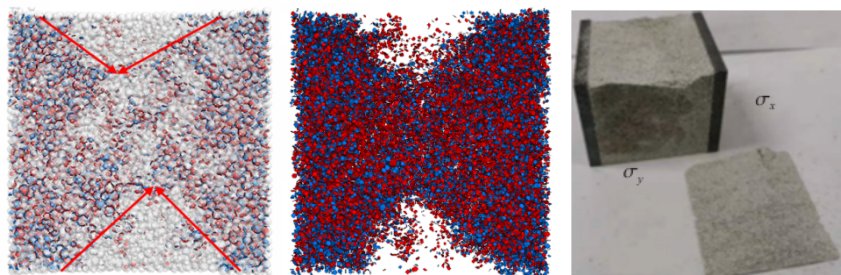


图 12 SHPB 模拟和实验破碎图

Fig.12 SHPB simulation and experimental failure pattern comparison

3 讨论

本节从裂纹类型演化、力链重组特征、能量转化时程三个维度分析白砂岩的破坏机制。这三者分别对应损伤表象、应力传递路径和能量驱动力，是离散元方法能够直接输出、且与宏观失效密切相关的细观指标。

3.1 单轴压缩实验破坏特性讨论

图 13 为单轴压缩数值分析试样破坏特性图。图中红色微裂纹为颗粒间粘结处切向剪应力超过平行粘结粘聚力时所产生的剪切裂纹，蓝色微裂纹为颗粒间粘结处所受法向拉应力超过平行粘结抗拉强度时所产生的拉伸裂纹。总体裂纹扩展过程呈现出“局部萌生—区域扩展—全域贯通”的三阶段渐进规律。在初始阶段，上下墙面的轴向压缩以及端面摩擦^[30]作用使端部在加载接触区产生显著的应力集中，颗粒间发生局部剪切滑移，剪切裂纹率先萌生且占比大于 90%。图 14 为单轴压缩数值分析试样受力变化图，结合图中的受力状态可知，此时蓝色压缩力链分布较为均匀，绿色拉伸力链零散出现，试样内部应力尚未达到颗粒间黏结的强度阈值，因此未见明显裂纹产生。进入发展阶段后，泊松效应使试样横向膨胀受约束，中部形成拉应力区，拉伸力链向中部集中，且拉伸裂纹优先在已有剪切裂纹尖端汇聚，这是剪切滑移引起局部应力重分布所致，两者呈现“剪切引导、拉伸跟进”的耦合扩展模式。贯通阶段，当裂纹密度达临界值，大量剪切裂纹分布于试样各处，拉伸裂纹起“连接桥”作用，将孤立剪切裂纹区串联成宏观破裂面，导致试样整体失稳。

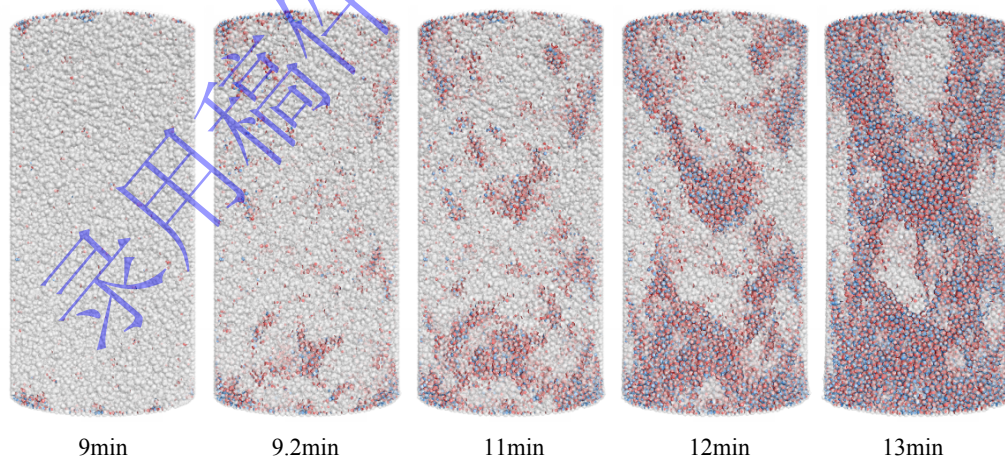


图 13 不同时刻单轴压缩模拟图

Fig.13 Uniaxial compression simulation at different time steps

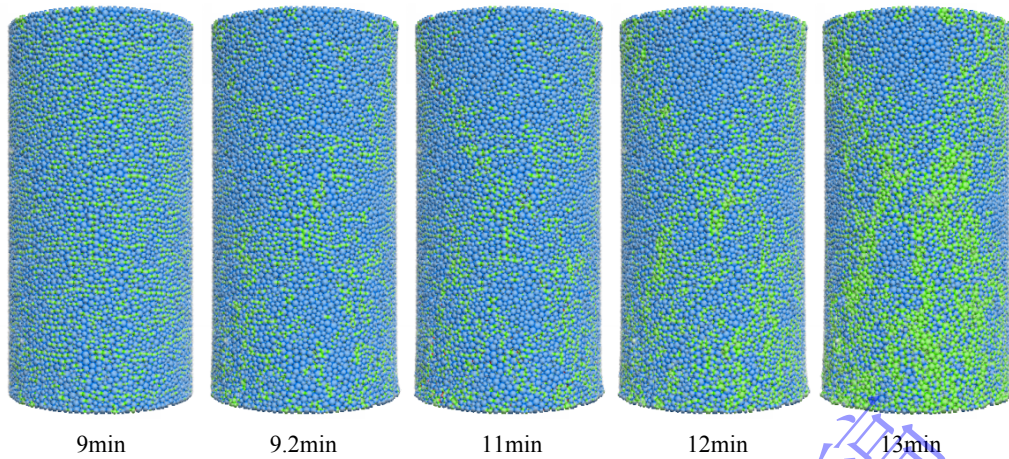


图 14 不同时刻单轴压缩试样受力分布图 (蓝色为压缩力链, 绿色为拉伸力链)

Fig.14 Stress distribution diagrams of uniaxial compression at different time steps(Blue indicates compression force chains, green indicates tension force chains)

图 15 为单轴压缩试样应力与声发射事件、裂纹数量、能量变化时程图。其中, 声发射事件数是由离散元软件统计出的单位时间内颗粒间粘结断裂次数。且 PFC^{3D} 软件能够实时监测数值分析试样内部不同能量的变化与转化特征, 通过各种能量的变化规律, 探究外部载荷作用下试样的损伤破坏机理以及推导基于能量的本构参数和准则具有重要意义^{[24]-[25]}。本节研究中涉及的能量有输入能 W 、应变能 E_s 、耗散能 E_d 、动能 E_k 、胶结破坏能 E_{ce} 。各个能量关系如下:

$$W = E_s + E_d + E_k + E_{ce} \quad (8)$$

由图可知, 10 min 前的弹性阶段, 输入能主要以应变能形式储存, 这是因为颗粒间粘结尚未破坏, 能量以弹性变形能形式暂存于接触键中。分析进行至 8 min 时, 裂纹开始少量萌生, 其中剪切裂纹率先出现, 这是由于上下墙面的轴向压缩作用促使颗粒间发生局部剪切滑移, 当剪应力超过平行粘结的剪切强度时粘结发生剪切断裂, 声发射数量对应应有小幅上升, 反映粘结断裂事件的初始发生。10-11.5 min 为裂纹扩展阶段, 从 10 min 开始胶结破坏能缓慢上升, 表明已有部分粘结开始断裂消耗能量; 应变能增长速度减缓, 并于 11.5 min 达到峰值后开始下降。此时应变能占总能量的 77.5%, 而胶结破坏能仅占 6.7%, 说明大部分能量仍以弹性形式储存, 但局部应力集中已达到粘结强度阈值, 为后续大规模断裂积蓄了能量。11.5-13 min 为裂纹贯通阶段, 胶结破坏能急剧飙升, 占比从 13.4% 快速增长至 57.7%, 大量应变能转化为胶结破坏能和耗散能。这一转变的根源在于, 当裂纹密度达到临界值后, 力链发生大规模重组与断裂, 使储能迅速释放并驱动裂纹扩展。裂纹数量在 2 min 内从 5×10^4 激增至 2×10^5 , 声发射事件于 12 min 左右达到最大值, 对应裂纹数量增长最快、裂纹贯通最剧烈的时刻。由此可见, 能量从应变能向胶结破坏能的转化是驱动裂纹快速扩展的根本原因, 而声发射峰值则对应裂纹生成最为密集的时刻。

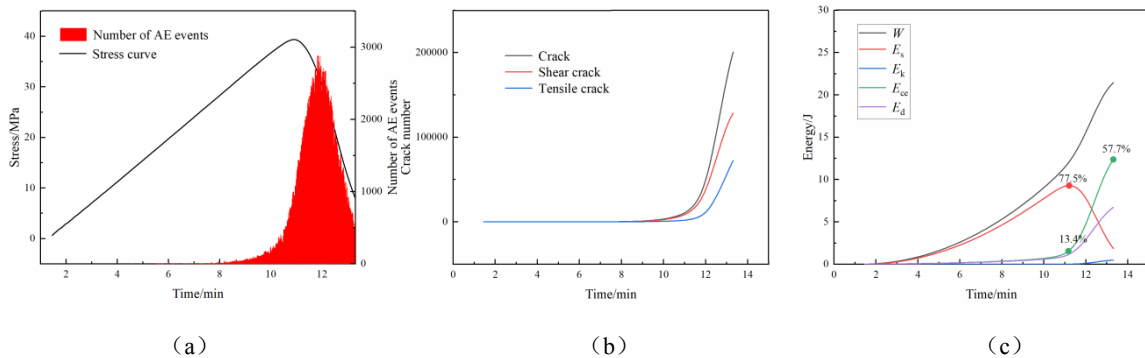


图 15 单轴压缩下白砂岩试样的多维度时程曲线：(a) 应力与声发射事件数；(b) 裂纹数量；(c) 能量
Fig. 15 Multi-dimensional time-history curves of white sandstone specimen under uniaxial compression : (a) stress and AE event count; (b) crack count; (c) energy components

综上，单轴压缩下，加载初期剪切裂纹率先在接触区萌生，输入能以应变能储存，试样处于弹性变形阶段。发展阶段，泊松效应诱发的横向拉应力使拉伸力链集中，剪切与拉伸裂纹同步扩展，胶结破坏能开始增长。贯通阶段，储存的应变能在短时间内大量转化为胶结破坏能，驱动裂纹数量激增，最终形成宏观剪切破坏面。

3.2 巴西劈裂实验破坏特性讨论

图 16-17 为巴西劈裂数值分析实验试样破坏以受力变化图。由图可知，加载初期，拉伸与压缩力链分布均匀，应力传递平缓，无明显细观破坏。随荷载增加，两端加载接触区首先产生压剪应力集中，当剪应力超过颗粒间平行粘结的剪切强度时，剪切裂纹率先在该区域萌生，而此时中心拉应力尚未达到抗拉强度，因此无拉伸裂纹。随着荷载持续增大，试样中心形成连续拉应力带，拉伸力链逐渐向中心集中，压缩力链则向中心两侧迁移。当中心拉应力超过粘结抗拉强度后，拉伸裂纹迅速萌生，并快速将两侧已有的剪切裂纹连接起来，最终裂纹贯通，试样沿主裂纹劈裂为两部分，形成宏观破坏。

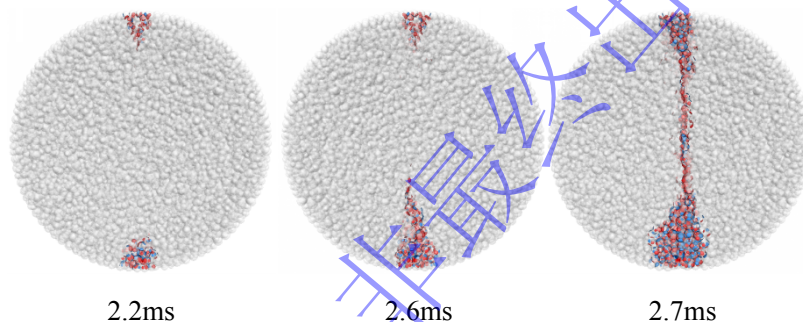
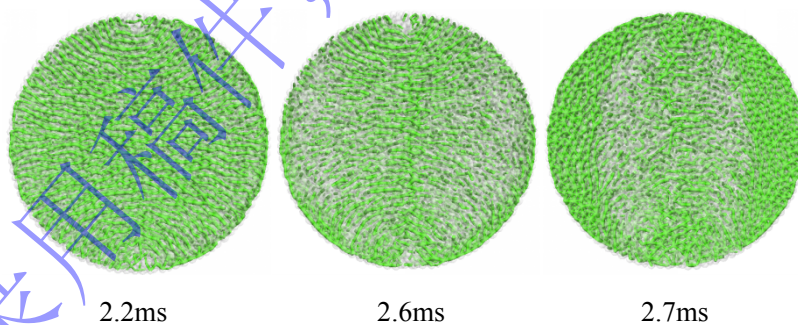


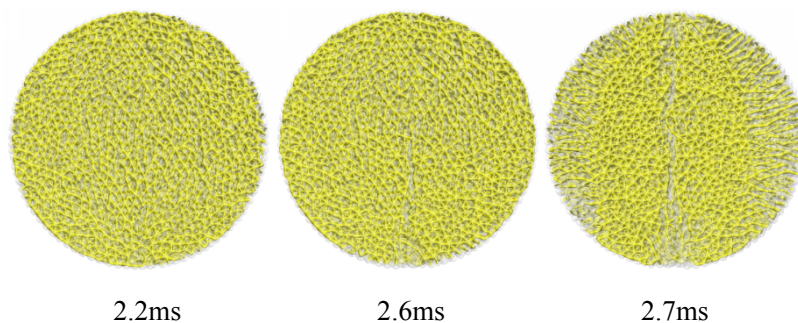
图 16 不同时刻巴西劈裂模拟图

Fig.16 Brazilian splitting simulation at different time steps



(a) 拉伸力链图

(a) Tensile force chain



(b) 压缩力链图

(b) Compression force chain

图 17 巴西劈裂试样不同时刻受力分布图

Fig.17 Stress distribution diagrams of Brazilian split test specimens at different times

图 18 为巴西劈裂试样应力与声发射事件、裂纹数量、能量变化时程图。由图可知，实验前期在加载接触区域在 1.8ms 左右出现剪切裂纹，随后在 2.0ms 左右出现拉伸裂纹，这是由于两端加载接触区为压剪应力集中，剪应力率先超过颗粒间平行粘结的剪切强度，因此剪切裂纹先萌生。此时两种裂纹数量增长平缓，处于破坏积累阶段，输入功也主要转换为应变能的形式储存在试样中。在能量图中与单轴压缩不同，巴西劈裂在 2.60-2.65 ms 胶结破坏能快速增加但应变能未达峰值。原因是中部拉应力尚未超阈值，裂纹集中于接触区，输入能同时用于弹性储能与断裂耗能，故两者同步上升。2.65 ms 左右，应变能达到峰值（占总能量的 54.1%），随后开始下降，试样沿中线开始破碎，裂纹数量与声发射事件均快速增加。在最后的 0.2 ms 内，由于试样的抗拉强度较小所以裂纹扩展克服的阻力很小^[26]，裂纹数量快速从 1560 激增至 6461，胶结破坏能占比由 24.2% 迅速上升至 45.4%，同时声发射事件达到最密集阶段，对应试样的劈裂破碎过程。其中剪切裂纹占总裂纹数量的 52.7%，表明巴西劈裂的细观破坏机制是以剪切裂纹为起裂基础，拉伸裂纹引导两种裂纹共同作用的拉伸-剪切耦合模式。

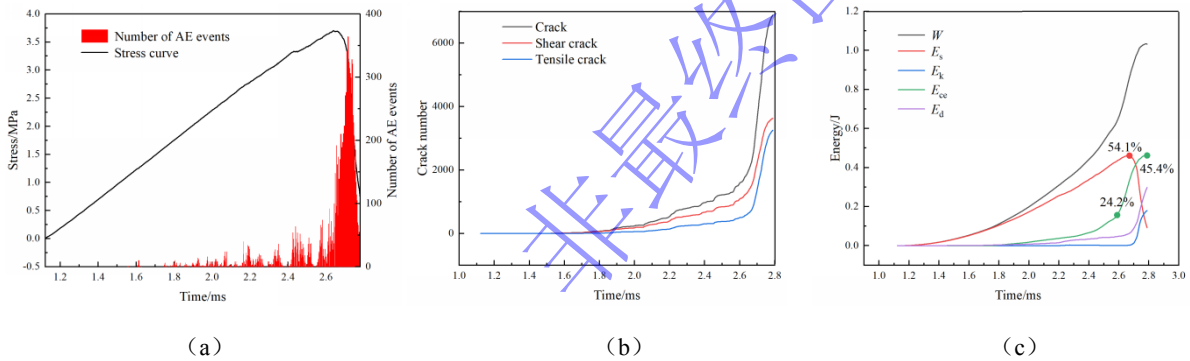


图 18 巴西劈裂下白砂岩试样的多维度时程曲线：(a) 应力与声发射事件数；(b) 裂纹数量；(c) 能量

Fig.18 Multi-dimensional time-history curves of white sandstone specimen under Brazilian split test : (a) stress and AE event count; (b) crack count; (c) energy components

综上，巴西劈裂下，加载初期压缩力链在接触区集聚，剪切裂纹率先萌生，输入能以应变能储存。发展阶段，拉伸力链向试样中心延伸，形成连续拉应力带，剪切裂纹持续增加，拉伸裂纹开始萌生。贯通阶段，当中心拉应力超过粘结强度时，拉伸裂纹迅速萌生，并以较低能量连接两侧剪切裂纹，储存的应变能集中释放，胶结破坏能与耗散能快速上升，裂纹数量在 0.2 ms 内从 1560 激增至 6461，最终沿中线形成宏观劈裂面。统计显示，剪切裂纹占比为 52.7%，表明巴西劈裂的细观破坏机制以剪切裂纹为起裂基础，拉伸裂纹为主导，二者共同作用，呈现拉伸-剪切耦合的破坏模式。

3.3 动态 SHPB 实验破坏特性讨论

图 19 为双轴围压条件下试样受动态加载的破坏图。在加载初期，应力波以远高于颗粒宏观位移的速度穿过试样，使试样左右两侧几乎同步形成应力集中区，并随即在两端加载面率先萌生较多的剪切裂纹。随着加载持续，剪切裂纹较快的向试样中心延伸，随之拉伸裂纹逐渐增多，在拉伸裂纹的引导下，左右两侧的两种裂纹沿主应力方向逐渐向试样中心扩展。具体表现为试样左面上端的裂纹向左下方延伸，左下端的裂纹则朝右上方延伸。右侧裂纹的扩展趋势与之对称。最终，左右两侧的裂纹在试样中部交汇并贯通，导致试样上下两部分呈 V 字形剥离破坏。图 20 为试样内部拉伸力链在不同加载时刻的分布情况。在加载初期，拉伸力链在试样内部分布较为均匀。随着载荷持续作用，力链逐渐发生断裂与重组。至 3232 μ s 时，已产生裂纹的接触面附近拉伸力链显著减少，拉伸力链逐

渐向试样中部集中。进入破坏阶段(3242 μ s)后,拉伸力链大量聚集于试样中部,而在裂纹较为密集的左右两侧区域则分布极少。最终裂纹贯通试样,上下形成V字形剥离,此时拉伸力链主要集中在剥离区域附近。这说明拉伸力链是驱动裂纹相向扩展并最终贯通的根本原因。

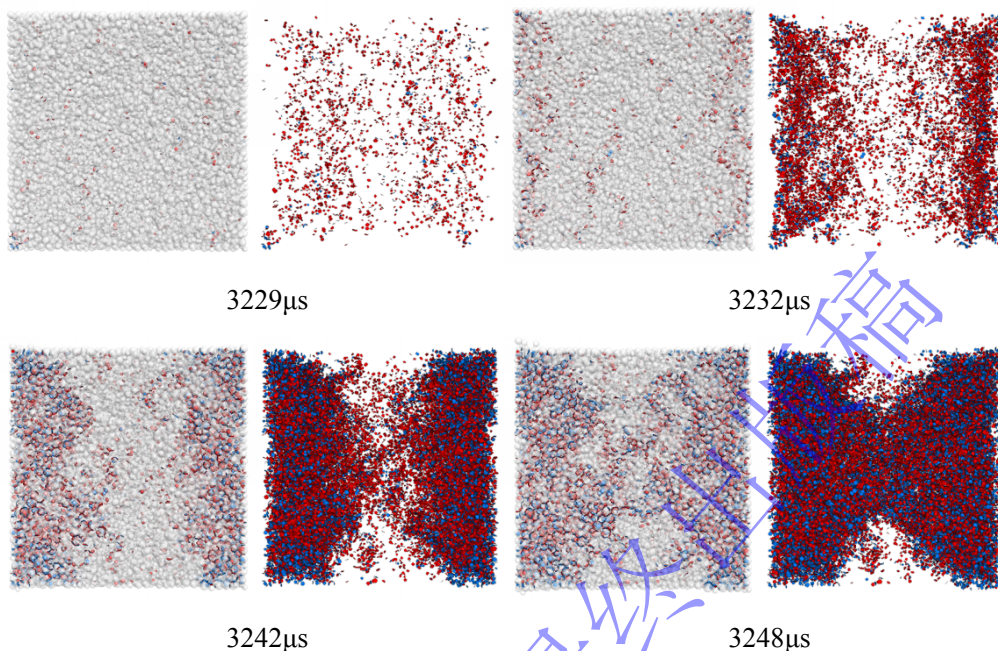


图 19 不同时刻 SHPB 模拟图

Fig.19 Simulation images of SHPB at various time steps

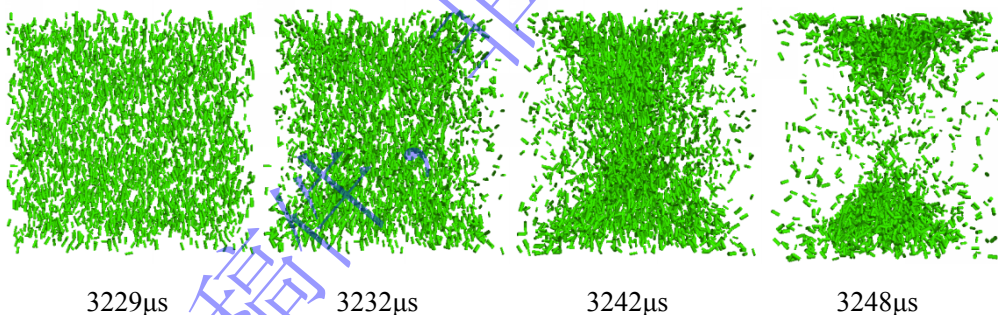


图 20 SHPB 拉伸力链图

Fig.20 SHPB tensile force chain

图 21 为 SHPB 实验试样应力与声发射事件、裂纹数量、能量变化时程图。由图可知, SHPB 动态冲击下白砂岩的损伤演化与准静态实验存在本质差异。在加载初期, 应力波尚未引起粘结破坏, 裂纹数量为零, 各能量分量接近零。随后 3227-3229 μ s, 入射应力波到达加载面, 产生瞬时高幅值压应力集中, 剪应力率先超过剪切强度, 因此剪切裂纹率先萌生, 声发射事件数量随之快速上升至最高值, 此时裂纹数量增长较快, 胶结破坏能和耗散能开始急剧增长。3229 μ s 后拉伸裂纹出现, 剪切与拉伸裂纹同步进入扩展阶段, 其中剪切裂纹增长速率始终高于拉伸裂纹, 最终占比 54.5%这是由于试样受加载面压应力而产生较多的剪切裂纹。与准静态实验不同, SHPB 实验中裂纹数量未出现爆发式激增, 而是呈渐进式增长。这是由于准静态加载下应力分布均匀, 能量以应变能形式长时间储存后瞬间释放, 驱动裂纹急剧贯通。而动态冲击下, 应力波在传播过程中即逐步诱发裂纹, 能量直接转化为胶结破坏能(峰值占比 43.8%)和耗散能(峰值占比 41.8%), 故应变能增幅有限, 峰值占比仅为 22.4%, 裂纹从加载面向内逐步扩展, 损伤累积是渐进过程, 故无瞬间爆发。此外, 围压(5 MPa 双轴)约束了颗粒横向运动, 动能始终维持在极低水平, 能量几乎全部用于胶结破坏与摩擦耗

散。综上，SHPB 冲击下白砂岩的失效本质是应力波驱动的渐进式损伤累积，剪切裂纹在加载面优先汇聚，反射拉伸波促使拉伸裂纹扩展，能量直接耗散而非储存，最终两侧裂纹相向扩展形成 V 字形剥离。

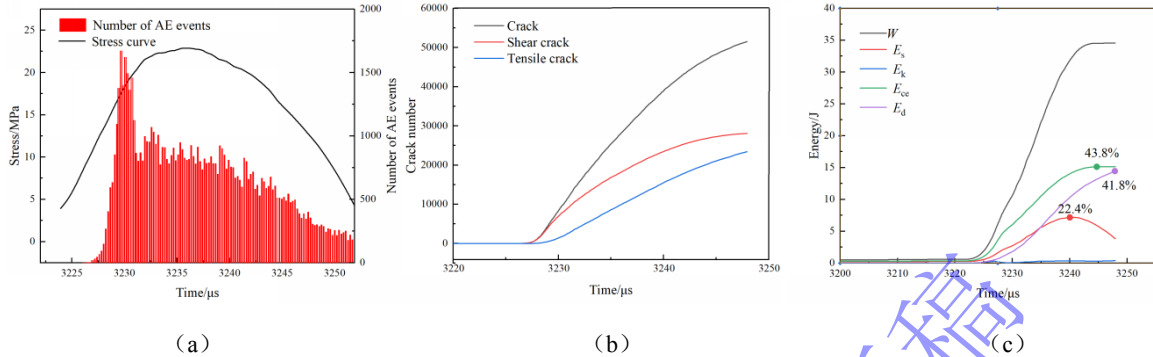


图 21 SHPB 实验下白砂岩试样的多维度时程曲线：(a) 应力与声发射事件数；(b) 裂纹数量；(c) 能量
Fig.21 Multi-dimensional time-history curves of white sandstone specimen under SHPB test : (a) stress and AE event count; (b) crack count; (c) energy components

综上，SHPB 冲击下，加载初期两端加载面率先萌生剪切裂纹，输入功快速攀升，能量直接转化为胶结破坏能与耗散能。发展阶段，拉伸波促使拉伸裂纹生成，两侧裂纹沿主应力方向相向扩展，拉伸力链向中部集中。贯通阶段，左右裂纹在中部交汇，形成 V 字形剥离面，剪切裂纹占 54.5%，围压约束下动能始终保持较低水平，能量优先用于粘结破坏与摩擦耗散。

3.4 应变率效应的讨论

本次研究通过引入动态强度放大因子 (Dynamic Increase Factor, DIF) 来表征白砂岩材料的应变率效应^[27]，其定义是动态载荷下试样峰值应力和准静态载荷下试样峰值应力的比值，DIF 值越高，表明材料对应变率的敏感性越强。

通过调整单轴压缩加载端的加载速度以及 SHPB 实验中的冲击载荷，其中，单轴压缩实验的加载速度分别设定为 0.150 mm/min、0.175 mm/min 和 0.20 mm/min。SHPB 实验则在 5 MPa 双轴围压条件下，将冲击载荷分别设置为 80 MPa、120 MPa 和 160 MPa。对编号为 S1-S3 的单轴压缩试样和编号为 S4-S6 的 SHPB 试样进行了测试，以获得不同应变率条件下的峰值应力。测试结果如下表所示。

表 3 不同应变率准静态与动态力学参数

Table 3 Quasi-static and dynamic mechanical parameters for different strain rates

试样编号	应变率/s ⁻¹	峰值应力/MPa	DIF
S1	2.5×10 ⁻⁵	39.5	1.000
S2	2.92×10 ⁻⁵	39.94	1.011
S3	3.33×10 ⁻⁵	40.84	1.034
S4	20.03	63.16	1.599
S5	32.93	108.7	2.752
S6	43.77	131.13	3.320

图 22 为白砂岩在双轴预应力状态下的动态抗压强度增长因子与应变率 $\dot{\epsilon}$ 之间的变化关系图。由图可知，岩石动态抗压强度增长因子与应变率近似呈线性递增关系，并且拟合度较好。这是由于在高应变率下，裂纹扩展速度受限于应力波传播速度。当加载时间短于单一裂纹从萌生到贯通所需时间时，试样内部多个微裂纹同时激活，对比准静态和动态加载能量图可知，准静态下输入能主要转化为应变能，而动态下输入能主要分配给胶结破坏能。这意味着动态加载下能量被更高效地用于产生

新裂纹而非弹性储存。所以动态加载需要消耗更多能量，宏观表现为强度提高。

式 5 为高应变率下 DIF 的拟合公式：

$$\psi = 0.20249 + 0.07302\dot{\epsilon} \quad (R^2 = 0.95897) \quad (9)$$

式中 ψ 代表动态强度放大因子的值， R^2 为拟合优度。

综上可得，白砂岩无论在低或高应变率情况下的动态抗压强度增长因子都随着应变率增大而不断增大，表现出较好的应变率相关性。

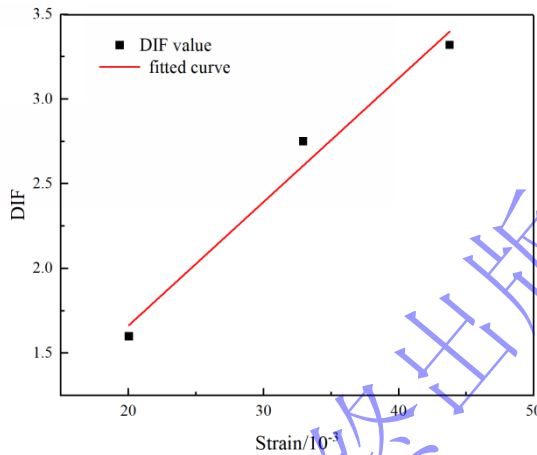
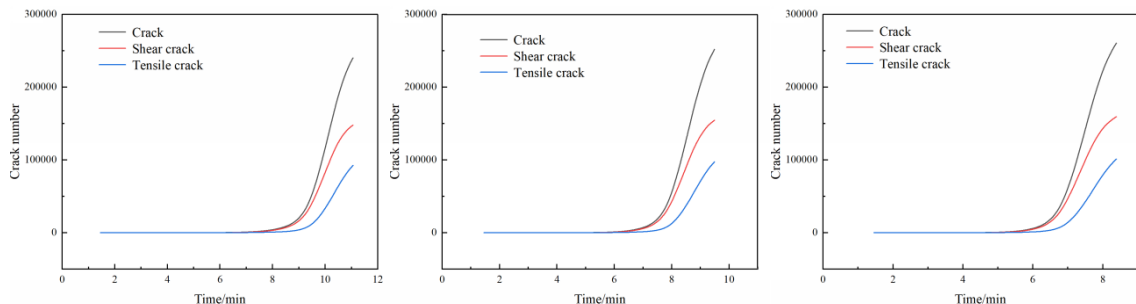


图 22 白砂岩 DIF 拟合曲线

Fig.22 DIF fitting curve of white sandstone

图 23 为不同加载条件试样裂纹数量图，根据图片以及数值分析实验中现象可知，无论是单轴压缩还是 SHPB 实验，试样的裂纹扩展方式及破碎形态未随应变率的提高而发生明显变化。但随着加载速率的增加，试样内部裂纹数量显著增多，与试样 S1 相比，S2 和 S3 试样的裂纹数量分别增加了 4.9%和 8.5%。而与试样 S4 相比，S5 和 S6 试样的裂纹数量则分别增加了 67.4%和 84.9%。这表明裂纹扩展深度随应变率提高有明显加剧。在 SHPB 数值分析实验中，在试样受到动态载荷较短时间内，裂纹数量的增长速率明显加快，分别在 $8 \mu s$ 、 $5 \mu s$ 和 $4 \mu s$ 内迅速增至约 20000 条。由于动态加载速率提高，应力波强度显著增强，试样在极短时间内受到强烈“挤压”作用。由于 Z 方向未施加约束，试样内部产生了较强的动态拉伸应力，导致大量颗粒被“拉开”，从而引发更多拉伸裂纹。最终在 S5 和 S6 试样中，拉伸裂纹与剪切裂纹的占比基本相当。由于试样破坏时发展了更多的裂纹，产生了更细的碎片，吸收了更多的能量，宏观上试样就具有了更好的承载能力。

综合来看，随着加载速率增大，单轴压缩实验与 SHPB 实验在试样前期裂纹扩展及力链演变方面并无显著差异。但在实验后期，由于输入能量增加，更多能量转化为胶结破坏能，试样的破坏程度加剧。单轴压缩试样的贯穿裂纹带随拉伸力链带的扩展而逐渐变宽。在 SHPB 实验中，随着冲击作用的增强，试样上下 V 型剥离区域内部产生的拉伸力链增多，导致该区域出现更多裂纹并发生破坏，从而吸收更多输入能量。



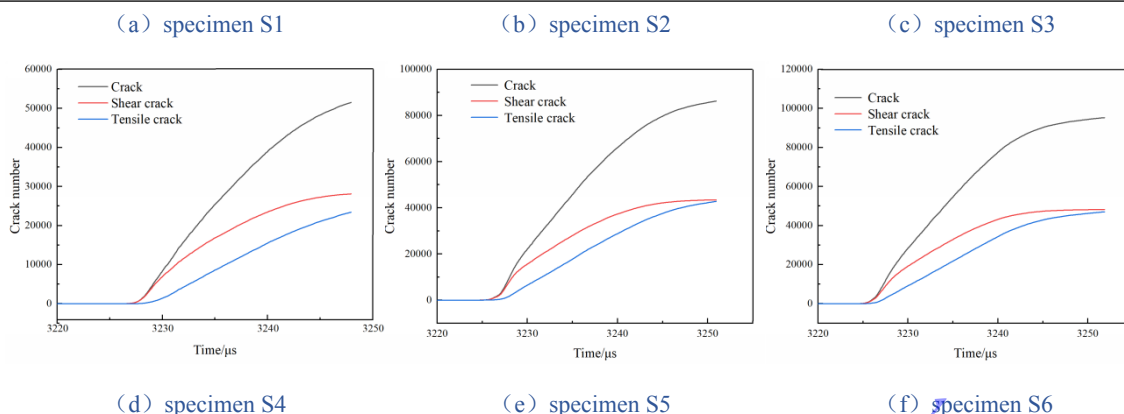


图 23 S1-6 试样裂纹数量曲线
Fig.23 Crack number curve of specimen S1-6

4 结论

(1) 室内实验与离散元数值分析的结果具有良好一致性, 所建立的基于 PBM 模型的离散元模型, 能够有效表征深部白砂岩在准静态和动态荷载下的宏观力学响应与细观损伤演化过程。

(2) 白砂岩在不同加载方式下的破坏特性存在显著差异。单轴压缩表现为“局部萌生—区域扩展—全域贯通”的三阶段破坏过程, 最终形成“X”型或“Y”型贯通破裂面。巴西劈裂中裂纹自加载接触区萌生, 并沿中心拉应力带汇聚贯通。在 SHPB 实验的冲击下, 在双轴围压作用下裂纹从试样两端向中心扩展, 导致试样上下呈“V”字形剥离。尽管破坏形态不同, 三种加载方式的裂纹数量均以剪切裂纹为主导, 其在单轴压缩、巴西劈裂和 SHPB 冲击中的占比分别为 61.8%、52.7%和 54.5%。

(3) 通过分析拉伸力链与压缩力链在加载过程中的分布与重组, 发现裂纹萌生与扩展始终伴随着力链的断裂与重新集中。在单轴压缩与巴西劈裂实验中, 拉伸力链集中区域与裂纹延展位置一致。在 SHPB 冲击中, 拉伸力链也随裂纹发展从均匀分布逐步向“V”形剥离区聚集。这表明试样内部的拉伸力链是驱动试样破碎的主要原因。

(4) 三种加载方式下, 剪切裂纹均为起裂基础, 拉伸裂纹为扩展引导, 三种实验在实验初期都在接触面产生较多的剪切裂纹, 随着实验的进行, 巴西劈裂实验在拉伸裂纹发展的引导下, 两种裂纹快速交织发展, 最终形成宏观的破裂面。而单轴压缩实验和 SHPB 实验是剪切裂纹率先发展至试样破碎各处, 随着拉伸裂纹的增长, 促使两种裂纹共同发展形成宏观破裂面。

(5) 白砂岩在动态荷载下表现出显著的应变率强化效应, 动态抗压强度随应变率升高近似线性增长, 动态强度放大因子 (DIF) 在 $20-44 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内可达 1.60-3.32, 随着加载速率的增加, 试样的裂纹扩展方式及破碎形态虽不随应变率的提高而发生明显变化, 但试样内部裂纹数量显著增多, 表明白砂岩在高应变率冲击条件下能吸收更多的能量, 因此也具有更高的承载能力。

综合上述研究, 本文通过室内实验与离散元数值分析, 研究了动静载荷下白砂岩的宏观力学响应及细观裂纹扩展规律, 为后续深入开展不同应力状态下三轴霍普金森杆动态力学分析及破坏特性研究提供了一定的理论依据与技术参考。

参考文献

- [1] 何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 7599. DOI: 10.13225/j.cnki.jcs.2023.1400.

- HE M C, WU Y Y, GAO Y B, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1400.
- [2] 邓志刚. 动静载作用下煤岩多场耦合冲击危险性动态评价技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(04): 121-132. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.04.015.
- DENG Z G. Multi-field coupling dynamic evaluation method of rockburst hazard considering dynamic and static load[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 121-132. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.04.015.
- [3] CHEN H, ZHAO C, ZHANG R. Damage mechanism of rock induced by microcrack evolution: A multi-dimensional perspective[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 309: 110420. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110420.
- [4] 黄达, 岑夺丰. 单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(09): 1926-1936.
- HUANG D, CEN D F. Mechanical responses and energy dissipation mechanism of rock specimen with a single fissure under static and dynamic uniaxial compression using particle flow code simulations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(09): 1926-1936.
- [5] Chong S, Yiping Z, Yulong Z, et al. Microdamage study of granite under thermomechanical coupling based on the particle flow code[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2023, 17(9): 1413-1427. DOI: 10.1007/s11709-023-0953-2
- [6] 李秀茹, 郭恩栋, 张文静, 等. 基于离散元法的爆破荷载作用下深埋隧道失稳破坏模拟研究[J]. 灾害学, 2019, 34(01): 87-93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.017.
- Li X R, Guo E D, Zhang W J, et al. Simulation study on the failure of deep tunnel under blasting load [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 87-93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.017.
- [7] 林志斌, 李元海, 高文艺, 等. 基于 PFC^{3D} 的深埋圆形巷道变形破裂时效特征分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(02): 73-80. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2017.02.011.
- Lin Z B, Li Y H, Gao W Y, et al. Analysis of time-dependent characteristics of deformation and fracture of deep buried circular tunnel based on PFC^{3D}[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(02): 73-80. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2017.02.011.
- [8] WANG Y, HE M. Numerical investigation on effect of inclination and position of structural planes on rockbursts triggered by blasting disturbance in deep-buried tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024: 1-23. DOI: 10.1007/s00603-024-04314-6.
- [9] 张涛, 蔚立元, 苏海健, 等. 基于 FDM-DEM 耦合的冲击损伤大理岩静态断裂力学特征研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(1): 42-52. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0089.
- ZHANG T, YU L Y, SU H J, et al. Investigation on the static fracture mechanical characteristics of marble subjected to impact damage based on the FDM-DEM coupled simulation[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(1): 42-52. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0089.
- [10] 王志亮, 余浪浪. 深部大理岩真三轴力学特性离散元和有限差分耦合分析[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(7): 126-138. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0394.
- WANG Z L, YU L L. Analysis on true triaxial mechanical properties of deep marble by using a discrete element-finite difference coupling method[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 126-138. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0394.
- [11] YUAN H H, LIU C, ZHU W, et al. Study on the mechanical behavior and energy characteristics of rocks with closed cracks based on combined finite-discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 179: 107057. DOI: 10.1016/j.compgeo.2025.107057.

- [12] Wang Z, Liu X R, Zhong Z L, et al. Mechanical response and energy dissipation mechanism of sandstone under cyclic dynamic loading using particle flow code simulations[J]. *Ekoloji*, 2019, 28(107): 4501-4512.
- [13] Cong R C, Yang R Y, Gong Y J, et al. Numerical investigation of mechanical responses and failure features of coal measure strata using combined finite-discrete element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 171: 106346. DOI: 10.1016/j.comgeo.2024.106346.
- [14] Zhang J, Nie R S, Tan Y C, et al. Investigation of the parallel gradation method based on response of ballast penetration into subgrade soil by discrete element method[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2025, 12(1): 245-260. DOI: 10.1007/s40571-024-00795-y.
- [15] CUNDALL P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model. I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1988, 25(3): 107-116. DOI: 10.1016/0148-9062(88)92293-0.
- [16] ALEFELD G, MAYER G. Interval analysis: theory and applications[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, 121(1): 421-464. DOI: 10.1016/S0377-0427(00)00342-3.
- [17] 从怡, 丛宇, 张黎明, 等. 大理岩加、卸荷破坏过程的三维颗粒流模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 1179-1186, 1212. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0262.
CONG Y, CONG Y, ZHANG L M, et al. 3D particle flow simulation of loading-unloading failure process of marble[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 1179-1186, 1212. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0262.
- [18] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
- [19] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7): 1491-1498.
ZHAO G Y, DAI B, MA C. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1491-1498.
- [20] 傅明智. 基于离散元法的多孔岩石孔隙特征建模及力学特性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2023: 31-34. DOI: 10.27426/d.cnki.gxtd.2023.002113.
- [21] Itasca Consulting Group Inc. PFC^{2D} particle flow code in 2dimensions: fish in PFC2D[M]. Minneapolis: Minnesota, 2004.
- [22] Itasca Consulting Group Inc. PFC^{2D} particle flow code in 2dimensions: theory and background[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [23] 汪腾, 郑光, 郑宇轩, 等. 基于不同本构模型下的白砂岩动态力学性能仿真分析与实验验证[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(12): 108-126. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0436
WANG T, ZHENG G, ZHENG Y X, et al. Simulation analysis and experimental verification of dynamic mechanical properties of white sandstone based on different constitutive models[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(12): 108-126. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0436.
- [24] SONG B, CHEN W. Energy for specimen deformation in a split Hopkinson pressure bar experiment [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(3): 407-410. DOI: 10.1007/s11340-006-6420-x.
- [25] 黄薇, 闫治涛, 孙峰, 等. 层状页岩巴西劈裂破坏特征颗粒流模拟研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(6): 74-82. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.008.
HUANG W, YAN Z T, SUN F, et al. Particle flow simulation of Brazilian splitting failure characteristics of layered shale [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(6): 74-82. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.008.
- [26] 杨志良, 岳松鹏, 巩贺, 等. 不同岩性巴西劈裂试验力学及声发射特征研究[J]. *现代矿业*, 2025, 41(4): 125-131+138. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2025.04.027.

- YANG Z L, YUE S P, GONG H, et al. Research on Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Brazilian Splitting Test with Different Lithology[J]. *Modern Mining*, 2025, 41(4): 125-131+138. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2025.04.027.
- [27] 冯君, 孙巍巍, 黄竞楠, 等. MICP 固化钙质砂动态力学试验及微平面模型仿真[J]. *兵工学报*, 2025, 46(11): 3-15. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0155.
- FENG J, SUN W W, HUANG J N, et al. Dynamic Mechanical Test and Microplane Model-based Simulation of MICP-treated Calcareous Sand [J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(11): 3-15. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0155.
- [28] 吴禄源, 朱永恒, 白海波, 等. 砂岩颗粒流平行黏结模型宏观参数关联性研究[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(04): 487-501. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.04.005.
- Wu L Y, Zhu Y H, Bai H B, et al. Study on the correlation of macro and meso parameters of parallel bond model sandstone [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(04): 487-501. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.04.005.
- [29] 阿比尔的, 郑颖人, 冯夏庭, 等. 平行黏结模型宏观力学参数相关性研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(04): 1289-1301. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0900.
- A B E D, Zheng Y R, Feng X T, et al. Relationship between particle micro and macro mechanical parameters of parallel-bond model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(04): 1289-1301. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0900.
- [30] 李单林, 刘广建, 贾瑞锋, 等. 单轴压缩试验端面摩擦效应及损伤演化规律研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(3): 99-108. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210325.001.
- LI S L, LIU G J, JIA R F, et al. Study on friction effect and damage evolution of end face in uniaxial compression test[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(3): 99-108. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210325.001.

(责任编辑 爆炸与冲击)