DOI：10.11858/gywlxb.20251198

基于 FDEM 的含铜钠长岩冲击破裂过程与能量耗散特征研究

张熙远[1]，李祥龙[1,2]，左庭[1]，刘金保[3]，王建国[1,2]，胡涛[1]，王浩[1]
（1. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650093；
2. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心，云南 昆明 650093；
3. 云南磷化集团有限公司，云南 昆明 650600）

摘要：为了保证铜矿资源的高效回采，以含铜钠长岩试样为研究对象，使用分离式霍普金森压杆（SHPB）施加不同强度的冲击荷载，利用高速摄像系统记录裂纹扩展过程，并结合一维应力波传播理论和能量守恒定律，分析试样在不同冲击气压下的能量耗散规律；同时，基于有限-离散元（FDEM）耦合算法，建立含铜钠长岩冲击过程的数值模型。结果表明：入射能和应力峰值随着冲击气压的增大而增大，试样破碎程度也随之加剧；当入射能小于 140 J 时，随入射能的增加，能量耗散率逐渐增大；当入射能大于 140 J 时，能量耗散率随入射能的增加逐渐减小，能量耗散率在冲击气压为 0.35 MPa 时最大；在冲击过程中，拉伸破坏占主导作用，并在水平方向形成主优势区。新增裂纹面积和冲击总能量随着冲击荷载的增加而增大，冲击气压为 0.30 MPa 时，应变能比能量最小，在此气压下，剪切裂纹占比最小，说明 0.30 MPa 的冲击气压的破岩效率最高；基于 FDEM 构建的数值模型可以有效地预测在不同冲击荷载下含铜钠长岩的损伤破裂过程。

关键词：分离式霍普金森压杆（SHPB）；裂纹演化；能量分析；有限-离散元方法
中图分类号：O346.1; O521.9　　**文献标志码：**A

铜作为现代工业的核心基础材料，其需求量持续攀升与资源开发效率不足的矛盾日益凸显。虽然我国铜资源储量较为丰富，但赋存条件复杂，为了满足日益增长的市场应用需求，必须保证铜矿资源的高效回采[1]。岩石破碎作为铜矿开采的核心能耗环节，其效率直接关系到企业的经济效益与资源的可持续利用，所以高效碎岩是矿山企业实现降本增效的关键技术。拉拉铜矿作为四川省最大的铜矿生产基地，深部开采规模为 3000 吨/天，其生产任务艰巨。钠长岩作为拉拉铜矿矿化岩石的典型代表，使其成为研究含铜矿岩动态破碎行为和能量耗散规律的理想对象。

目前，矿山开采主要还是采用爆破，机械等通过施加动态载荷使岩石发生破碎。分离式霍普金森压力杆（SHPB）测试设备是当前动态力学特性研究中常用的工具之一[2]。实验研究表明，岩石的变形破坏是一个能量输入、耗散和释放的过程[3]。近年来，众多学者依托 SHPB 实验装置，围绕不同类型岩石的破坏形态演化特征与能量耗散机制展开了系统性研究，并形成了丰富的有价值研究成果。张惠梅等[4]探究单次、循环冲击在不同冲击气压下风积砂混凝土能量耗散特征与宏观破坏的关系；牛俊超[5]等开展不同冲击气压下动态抗压强度试验，探究磁铁矿能量演化及破坏形态与应变率下的相关性；平琦等[6]对含孔砂岩进行 SHPB 试验，研究了在不同加载速率下，含孔砂岩破碎形态与能耗密度的关系，同时在相同加载条件下，与完整岩样进行对比实验分析破坏模式；段继超等[7]对石灰岩样开展动态拉伸试验，探究不同干湿循环次数岩样裂纹演化过程及能耗情况；戴兵等[8]引入 GEV 分布函数，研究不同倾角裂隙岩石的能量分配和转换；焦振华等[9]通过自制侧限约束装置对煤样进行不同冲击气压、不同约束状态的 SHPB 试验，并通过 CT 扫描分析煤样内部损伤特征；王雁冰等[10]开展大量动态断裂冲击试验，分析不同角度层理对试件断裂耗能影响；周俊等[11]对不同高径比的花岗岩进行动态压缩试验，发现单位体积岩石破碎耗能随高径比增大而减小；孙卓越等[12]对不同长径比的砂质泥岩进行不同冲击气压的动态压缩试验，试验得出破碎耗能密度随长径比增长呈下降趋势并建立了考虑长径比和应变率因素耦合的损

收稿日期：2025-09-11；修回日期：2025-11-03
基金项目：国家自然科学基金（52274083）；云南省重大科技专项（202202AG050014）；云南省基础研究计划（202201AT070178）
第一作者：张熙远（2001－），男，硕士，主要从事岩石破碎及工程爆破研究. E-mail：zxykust@163.com
通信作者：李祥龙（1981－），男，博士，教授，主要从事岩石破碎及工程爆破研究. E-mail：lxl00014002@163.com

伤本构模型；Li 等[13]采用由石膏制成的 SHPB 装置对含节理的试样进行冲击试验，根据石膏棒的传播系数分析了节理粗糙度对岩体的波能衰减的影响；Li 等[14]对有节理的大理石试件进行冲击试验，研究发现节理数量和角度与岩石的能量吸收率有很大的相关性。

随着计算机技术的快速发展，数值模拟分析方法为动态力学特性研究提供新的思路。王江波等[15]利用软件 ABAQUS 验证了使用整形器的 SHPB 装置入射波形满足几何相似律；张旭等[16]为探究高温下大理岩动态破坏过程，利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟分析高温大理岩不同温度、不同冲击速度下的动态压缩试验，从能量耗散的角度探讨大理岩损伤的温度阈值与能量失效判据；吉东亮[17]利用 PFC 构建 SHPB 模拟系统，通过观察模型损伤演化过程和能量分析验证弹性损伤本构模型的正确性。Li[18]等通过 PFC 建立了带有特殊形状撞锤的 SHPB 模型，研究发现岩石材料应变率效应与横向惯性约束和非均质性有关；Zhu 等[19]利用有限元软件 RFPA-Dynamics（Rock Failure Process Analysis for Dynamics）模拟静、动 SHPB 联合试验下岩石的破坏过程，阐明了静态和动态联合载荷下动态强度变化的机制；Zhou 等[20]进行了室内冲击试验，通过高速相机观察破坏微观过程，发现试件破碎后仍处于良好的应力平衡状态，同时利用 PFC 进行数值模拟，用微裂缝的演变来描述岩石的破坏过程；Zuo 等[21]对含不同角度节理的凝灰岩进行冲击试验并使用有限离散元数值计算裂纹扩展和演化过程，研究不同角度节理对凝灰岩能量演化和破坏特性的影响。

目前进行 SHPB 冲击试验数值仿真大多数采用有限元或离散元，很少采用有限-离散元耦合方法对冲击试验进行数值仿真。有限元法作为一种连续介质力学方法，在分析宏观尺度模型方面具有更大的优势，离散元法可以更有效地表示微裂纹的断裂过程。为此，本文使用 SHPB 试验装置对含铜钠长岩进行常规冲击试验，并借助高速相机观察试样微观破坏过程、同时利用有限-离散元方法进行 SHPB 系统的数值仿真，基于以上试验内容研究在冲击荷载下含铜钠长岩的破碎特征和裂纹扩展及能量演化情况。

1 SHPB 实验设计

1.1 试验设备

含铜钠长岩试样的冲击试验采用昆明理工大学岩石力学实验室的 Φ50mm 分离式霍普金森杆，如图 1 所示。纺锤体子弹长度为 400mm，入射杆和透射杆直径为 50mm，长度均为 2000mm，压杆和子弹均为合金钢制作，弹性模量为 210GPa，密度为 7.85g/cm^3，纵波波速为 5190m/s。

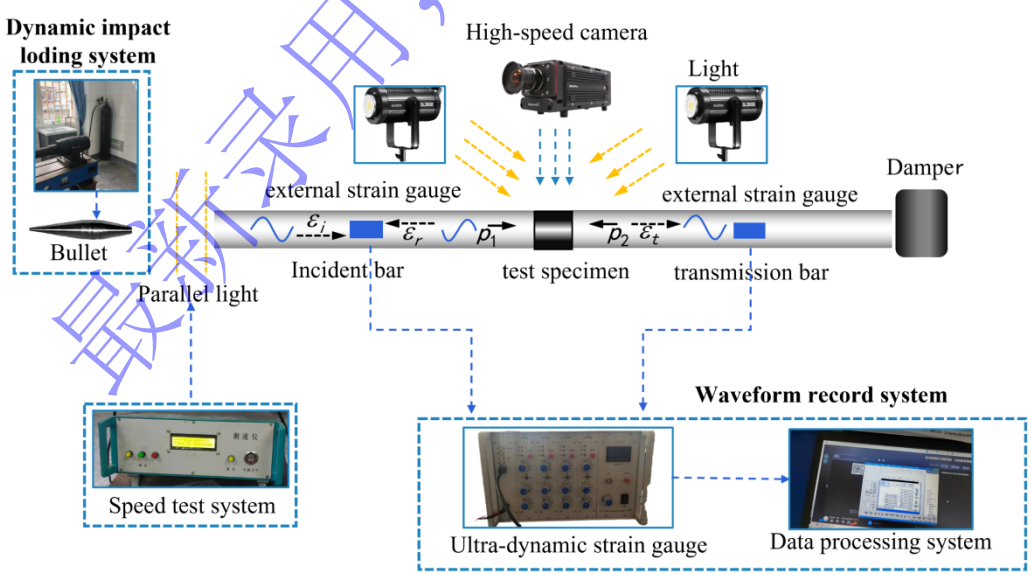


图 1 SHPB 试验装备
Fig. 1 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test setup

通过采集压杆系统杆件上入射波、反射波以及透射波的应变信号，根据一维应力波理论和应力均匀性假设[22]-[24]，用三波法将采集的试验数据进行处理，得到试样的应力 $\sigma(t)$ 、

轴向应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 分别为：

$$\sigma(t)=\frac{E_0A_0}{2A_s}\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)\right] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\frac{C_0}{L_s}\int_0^T\left[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_R(t)-\varepsilon_T(t)\right]dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{C_0}{L_s}\left[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_R(t)-\varepsilon_T(t)\right] \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_I,\varepsilon_R,\varepsilon_T$ 分别为入射应变、反射应变、透射应变；A_0,E_0 分别为杆的横截面积和弹性模量；C_0 为杆件中的一维弹性波纵波波速；A_s,E_s 分别为试样的长度和横截面积。

1.2 试样制备

含铜钠长岩岩样取自四川凉山拉拉铜矿某中段。根据国际岩石力学学会（ISRM）规定的标准尺寸[25]，考虑到摩擦和惯性的影响，加工成直径为 50 mm、高度为 50 mm 的圆柱形试样。部分试样如图 2 所示。

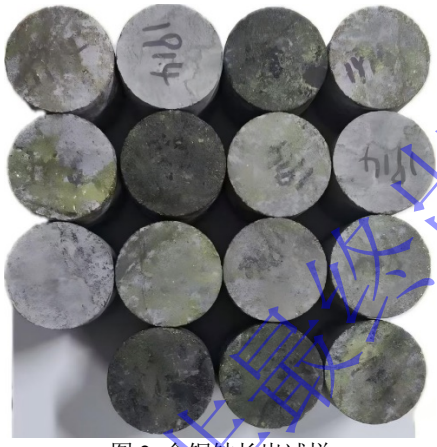


图 2 含铜钠长岩试样

Fig. 2 Copper-bearing albite rock sample

含铜钠长岩试样加工完成后，测量试样的质量、密度等基础参数，同时采用 RSM-SY6(C)非金属声波检测仪检测含铜钠长岩试样的纵波波速。为了减少应变弥散效应[[26]，确保动态力学特性得到准确测量，尽量选择密度、纵波波速等参数相近的试件，部分试样的基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 含铜钠长岩基本物理力学参数

Table1 Basic physical and mechanical properties of copper-bearing albite rock

Density ρ(g/cm^3)	Longitudinal wave velocity/(m/s)	Elastic modulus E/(GPa)	Poisson's ratio υ	Compressive strength/(MPa)
2.857	3384	76.25	0.46	37.61

1.3 试验方案和应力平衡验证

在正式试验前，对含铜钠长岩试样进行试冲击测试。发现，当气压<0.25 MPa 时，试样保持完整，没有观察到破裂痕迹；而当气压>0.45 MPa 时，碎块过度细化且高速摄影照片破裂过程较少，不利于裂纹形态定量分析。因此选取 0.25-0.45 MPa 这个冲击气压范围，以覆盖从裂纹稳定扩展到破碎的完整过渡。因此，初始气压设定为 0.25MPa，每间隔 0.05MPa 为一级，共分 5 级：0.25MPa、0.30MPa、0.35MPa、0.40MPa、0.45MPa。为确保测试的可靠性必须遵循应力平衡原则。图 3 为随机选取冲击气压为 0.40MPa 时的动态应力平衡曲线。图中显示入射应力 σ_I 加反射应力之 σ_R 和与透射应力 σ_T 较为吻合。表明试样在冲击加载过程中试样入射端与透射端较好地实现动态应力平衡，因此得出的数据是真实有效的。

最新录用，非最终出版稿

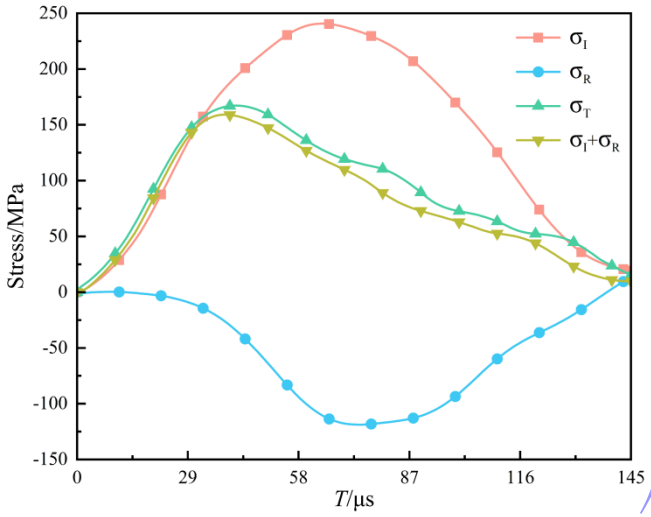


图 3 动态应力平衡曲线
Fig. 3 Achievement of dynamic stress equilibrium in the specimen

2 SHPB 试验结果分析

2.1 不同冲击气压下含铜钠长岩动态响应特性

利用 SHPB 试验装置，对含铜钠长岩试样开展冲击试验，在每个冲击气压下，做五组平行实验，选取规律性较好的数据进行分析。根据公式（1）、（2）、（3）可以得到不同冲击荷载下含铜矿岩的平均应变率和峰值应力。试验结果如表 2 所示。

表 2 含铜钠长岩的冲击试验数据
Table 2 Impact test results on copper-bearing albite rock

Number	Impact pressure/(MPa)	Impact velocity/(m/s)	Average strain rate /(s^{-1})	Peak stress/(MPa)
HT-1	0.25	5.34	41.55	97.76
HT-2	0.30	6.76	56.23	117.59
HT-3	0.35	8.32	61.14	133.15
HT-4	0.40	10.27	71.16	136.93
HT-5	0.45	12.81	81.39	161.88

图 4 描述的是含铜钠长岩试样在不同冲击气压下的动态应力-应变曲线特征。可以看出，应变速率与峰值应力均随着冲击气压的升高呈现递增趋势。从曲线形态看，总体上大致分为三个典型阶段：第一个阶段是弹性变形阶段，此阶段应力-应变关系近似满足线性特征，其本质原因在于加载速率较高，含铜钠长岩试样内部微裂隙的闭合过程耗时极短，即压密阶段在极短的时间内完成，因此在应力应变曲线中并不明显；第二阶段是塑性变形阶段，此阶段应力随应变的增长速率逐渐减缓，线性关系不再显著，试样内部微裂纹持续扩展，新生损伤逐步累积，直至达到峰值应力；在破坏阶段，试样达到峰值应力后，整体失去承载力，应力随应变增加呈现快速下降趋势。

最新录用，非最终出版稿

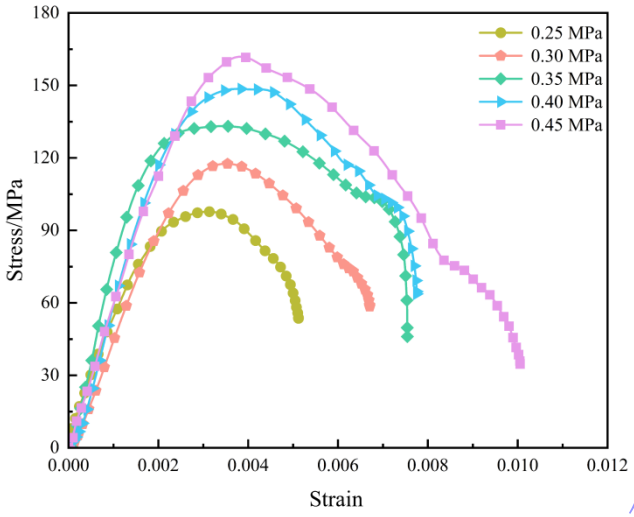
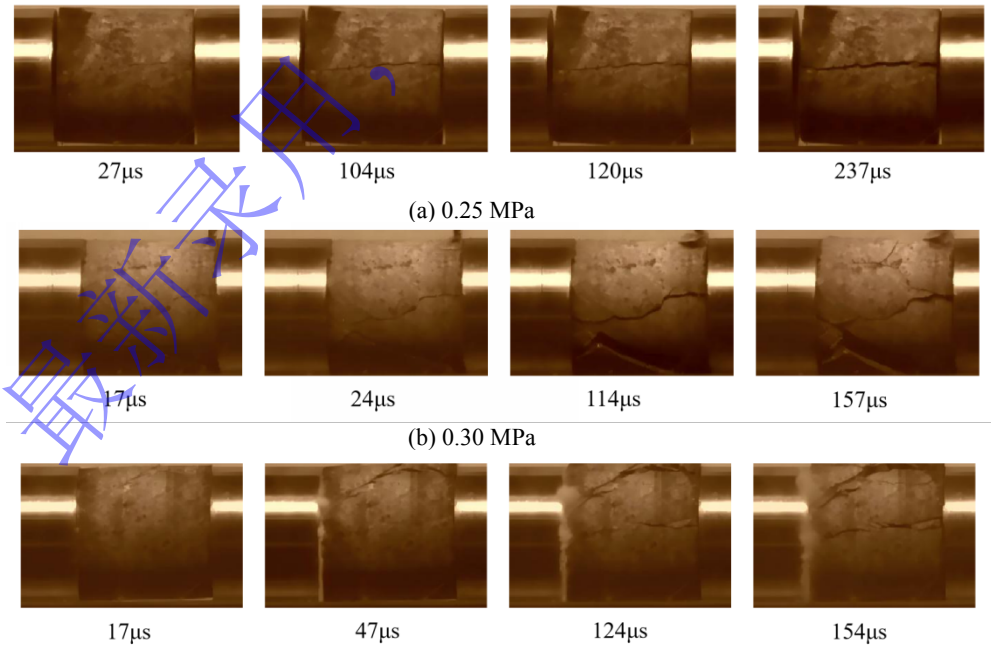


图 4 动态压缩应力-应变曲线

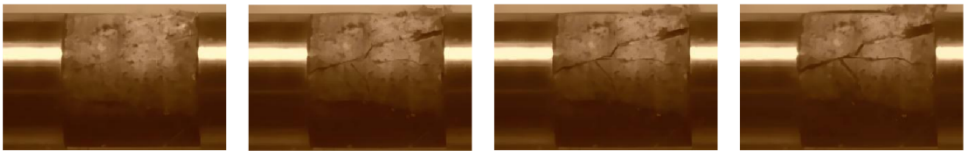
Fig. 4 Dynamic compressive stress-strain curve

2.2 裂纹扩展与破碎效果

为了研究含铜钠长岩试样在冲击荷载作用下裂纹演化情况，借助高速相机记录试样动态变形破坏全过程。图 5 直观呈现了不同冲击气压下，试样在不同时刻裂纹的萌生扩展和的损伤演化特征。由图可见，在加载初始阶段，裂纹主要萌生于试样与压杆的接触界面区域；随着载荷持续施加，裂纹沿冲击方向逐步扩展延伸成拉伸主裂纹，最终贯通形成破碎带，将试样分割成多个碎块。值得注意的是，随着冲击荷载强度的提升，试样内部裂纹扩展速率显著加快，破坏程度呈加剧趋势。以冲击气压 0.35 MPa 为例，如图 5(c)所示。试样与杆体接触界面处开始萌生沿冲击方向的初始裂纹；约 47 μs 时，受应力波的多次反射和透射作用影响，裂纹持续向前扩展成拉伸主裂纹，同时主裂纹周围伴随生成拉伸-剪切混合裂纹；124 μs 拉伸主裂纹进一步延伸直至贯穿试样整体，试件在该阶段依然能承受一些残余应力的作用；至 154 μs 时，拉伸主裂纹扩展成为宏观裂纹，此时试件仍然与杆件接触，次生裂纹不断地迅速扩展直至冲击过程结束，最终试样完全破坏。

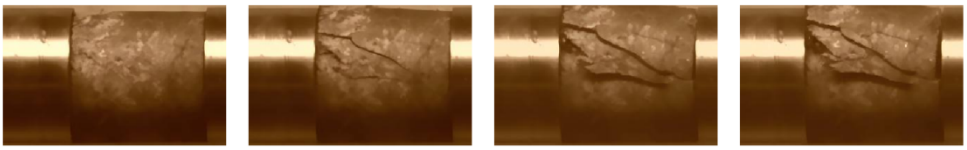


最新录用，非最终出版稿



13μs 33μs 40μs 60μs

(d) 0.40 MPa



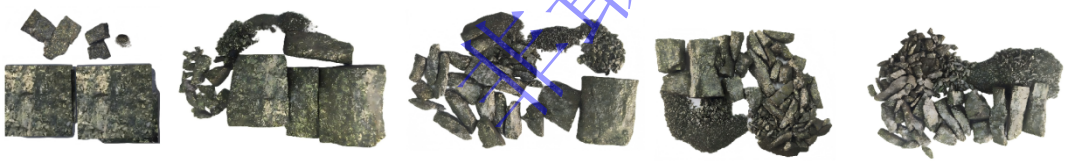
7μs 13μs 23μs 40μs

(e) 0.45 MPa

图 5 不同冲击气压下含铜钠长岩裂纹演化过程

Fig. 5 Crack evolution process of copper-bearing albite under different impact pressures

试样受到冲击荷载超过其承载能力开始发生破坏，通过裂纹的萌生、随后持续延伸扩展直至贯通，最终试样完成破坏过程，形成大小不一的碎块。图 6 为岩样在不同冲击荷载下的试样岩破碎形态，可以直观表征冲击荷载作用下含铜钠长岩试样的破碎程度。随着冲击荷载的增加，试样的破坏模式由轴向贯通破坏向整体挤压破坏的形式转变。具体表现为试样破碎程度加剧、破碎块度明显减小、碎块数量增多。碎块断口处出现大面积黄色金属星斑，含金属岩样主要沿金属矿物富集带发生破裂。作为对比，在与表 2 相近应变率下，非金属岩样破坏形式以平行于主应力方向的拉伸劈裂为主，破碎面相对平直，碎块形态较为规则，且相对于非金属岩样，含铜钠长岩动态应力峰值下降了 22%-34%[27][29]。上述差异表明金属矿物的局部富集不仅降低了钠长岩的宏观强度，而且破坏形态表现出不规则破碎特征。



0.25 MPa 0.30 MPa 0.35 MPa 0.40 MPa 0.45 MPa

图 6 不同冲击气压下含铜钠长岩破碎形态

Fig. 6 Fracture morphology of copper-bearing albite under different impact gas pressures

2.3 能量分析

根据弹性杆在冲击过程的一维应力波理论和应力均匀性理论[26]，子弹撞击压杆形成入射波产生入射能，在冲击过程中被分为三部分，一部分能量传递到试样后反射回入射杆形成反射能，一部分能量穿过试样传向透射杆形成透射能，最后一部分能量被试样所吸收用于试样的变形、破坏形成耗散能。将入射杆和透射杆上应变片收集到的电信号进行计算分析，入射能 W_I、透射能 W_R、反射能 W_T 和耗散能 W_D。计算原理如公式(4)、(5)所示[30]。

$$W_I = A_0 E_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t)dt$$

$$W_R = A_0 E_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t)dt \tag{4}$$

$$W_T = A_0 E_0 C_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t)dt$$

$$W_D = W_I - W_R - W_T \tag{5}$$

式中：A_0 为压杆的横截面积，E_0 为压杆的弹性模量，C_0 为杆件纵波速度，为 5172m/s，ε_I、ε_R、ε_T 为入射波、透射波、反射波对应的应变。

含铜钠长岩试样在不同冲击气压下的能量分配特征如表 3 所示。实验数据表明，入射能随冲击气压升高呈递增趋势，耗散能亦随入射能增加呈现递增规律。在 SHPB 试验中，反射能、透射能、耗散能占比入射能的大小可用于表征试件的能量演化规律。经计算，各

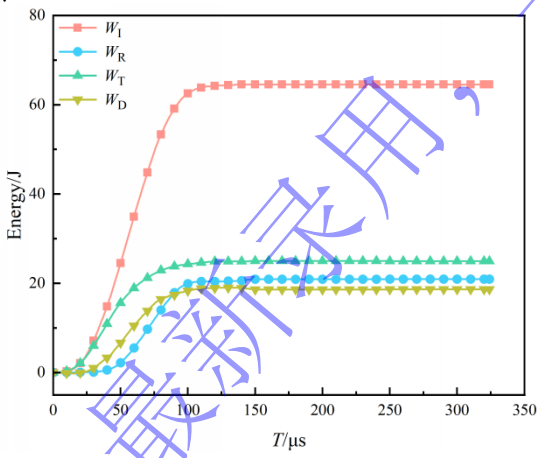
冲击气压下反射能占比入射能的平均值为 32.43%、25.30%、26.30%、28.70%、30.44%；透射能占比入射能的平均值为 38.68%、42.17%、37.32%、36.32%、29.93%；耗散能占比入射能的平均值为 28.89%、32.52%、36.39%、34.98%、31.32%。当入射能小于 140J 时，随入射能的增加，能量耗散率逐渐增大，当入射能大于 140J 时，随入射能的增加，能量耗散率逐渐减小，能量耗散率在冲击气压为 0.35MPa 时最大。在同等试验条件下，含铜钠长岩的耗散能普遍低于非金属岩样的 47%-59%[31]-[33]。分析原因在坚硬脆性基质中沿晶界或呈脉状富集的铜矿物，有效改变了裂纹的扩展路径。在动态载荷下，裂纹优先在金属矿物边界处萌生并随之发生频繁的偏转与分叉，从而形成曲折、复杂的破碎网络，最终产生形态不规则且更为细小的碎块。由于散布于坚硬脆性基质中的铜矿物，其硬度和强度远低于非金属岩样的基体强度，界面处的抗拉、抗剪强度弱化，使得裂纹起裂与扩展所需能量降低；其次，两种材料之间存在的波阻抗失配，也会在应力波传播过程中于界面处引发部分能量的反射与散射，进一步降低了实际输入含铜钠长岩试样内部并用于做功的能量。因此，用于裂纹扩展的能量明显低于非金属岩样。

表 3 不同冲击气压下含铜钠长岩能量计算

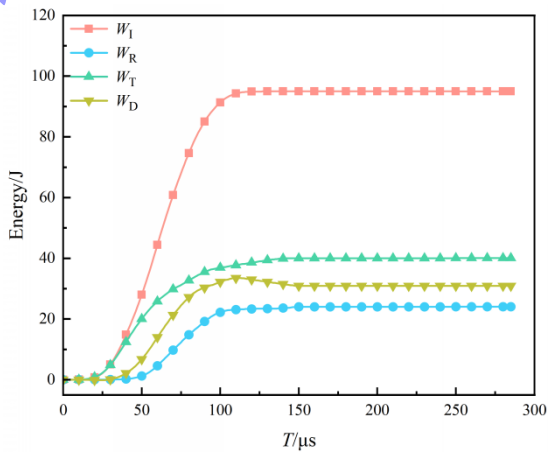
Table 3 Energy analysis of copper-bearing albite during impact under different gas pressures

Number	Average strain rate/(s^{-1})	Impactgas pressure/(MPa)	W_I/(J)	W_R/(J)	W_T/(J)	W_D/(J)
HT-1	41.55	0.25	64.52	20.92	24.95	18.64
HT-2	56.23	0.30	94.97	24.03	40.05	30.89
HT-3	61.14	0.35	136.95	36.02	51.10	49.83
HT-4	71.16	0.40	156.82	45.00	56.96	54.85
HT-5	81.39	0.45	196.28	59.74	58.75	61.47

图 7 展示了不同冲击气压下含铜钠长岩试样的能量时程曲线特征。结合表 3 数据可知，试样入射能、反射能、透射能及耗散能的演化过程呈现三阶段特征：初始阶段，入射能量、反射能量、透射能量及耗散能量从零开始缓慢增长，表征试样微裂纹的萌生与稳定扩展；第二阶段，四种能量随时间快速增长，对应试样内部裂纹网络加速形成与贯通；第三阶段，各能量曲线发展趋势开始趋缓，随后基本保持恒定，试样达到能量平衡态。当冲击气压分别为 0.25、0.30、0.35、0.40、0.45 MPa 时，加载持续时间分别为 288、248、234、233、230 μs，能量达到恒定的起始时间分别为 188、127、121、125、117 μs。这表明，随着冲击气压的增加，总的加载时间不断缩短，能量越快达到平衡。

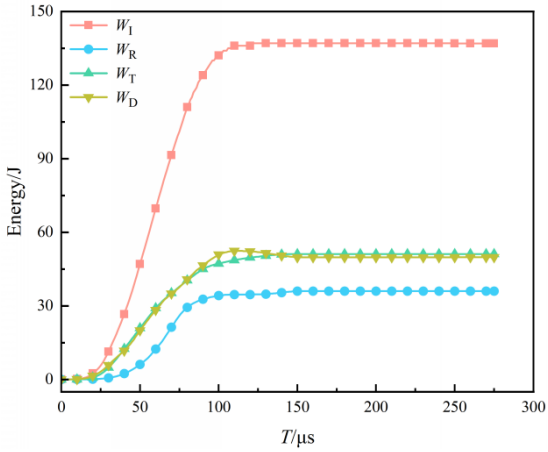


(a) 0.25 MPa

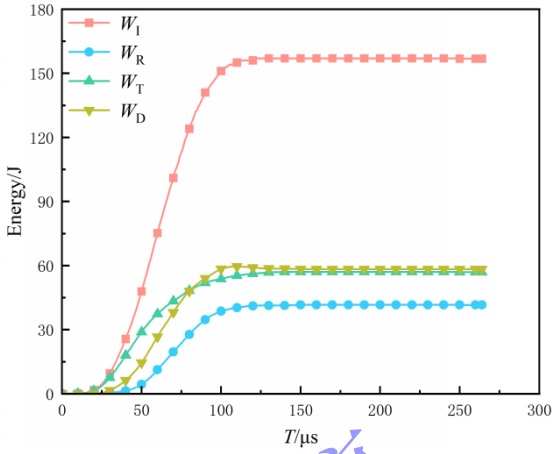


(b) 0.30 MPa

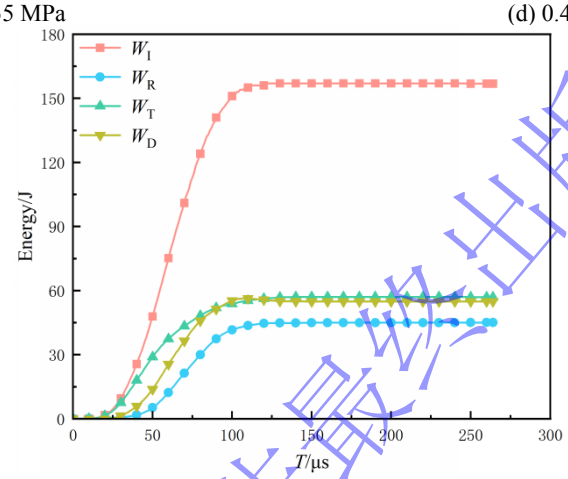
最新录用，非最终出版稿



(c) 0.35 MPa



(d) 0.40 MPa



(e) 0.45 MPa

图 7 能量时程曲线

Fig. 7Energy vs. time curves

3 FDEM 数值计算

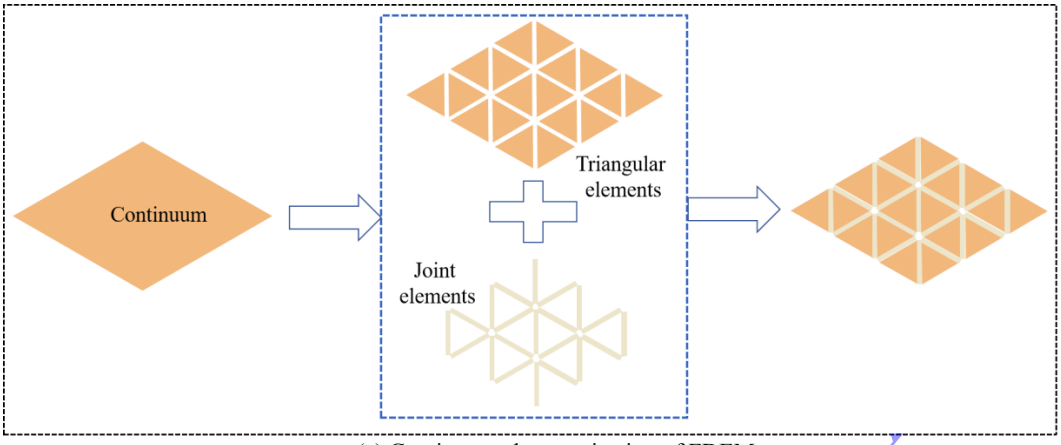
3.1 FDEM 基本原理

近几年由 Munjiza 等人[34][36]提出的组合有限-离散元方法（FDEM）在岩石压裂及固体裂纹扩展模拟领域展现出显著优势[37][38]。如见图 8(a)所示，该方法将试样分割成三角形单元网格，并在它们之间设置零厚度节理单元。然后通过节理单元的断裂来模拟裂纹的萌生和扩展。与其他方法相比，FDEM 设置零厚度节理单元可以模拟节理网络动态演化，并且不容易导致网格畸变，计算稳定。当求解域被分割成一系列三角形网格，整个解域的运动定律可以通过这些三角单元节点的运动定律来确定。根据牛顿第二定律，当已知每个节点的质量和总节点力时，单元的这些节点在任何时间的位置和速度均可得到确定。节点的运动方程如下[39]。

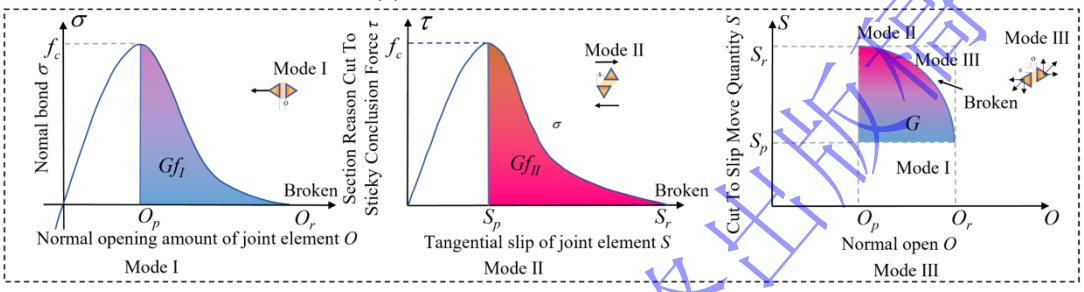
$$m_n \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial u}{\partial t} = f_{total} \tag{6}$$

其中：m_n 为节点质量；f_{total} 为总节点力，等于由接触力 f_c、三角形单元的变形力 f_d、黏聚力单元的变形力 f_j 和其他外部载荷例如重力 f_e 引起的节点力的矢量和，μ为阻尼系数。

最新录用，非最终出版稿



(a) Continuum characterization of FDEM



(b) Fracture constitutive model of joint element

图 8FDEM 基本原理

Fig. 8Schematic diagram of the combined finite-discrete element method (FDEM)

Yan 等[40]开发了一种根据应力状态自适应地插入粘聚力单元的一种自适应 FDEM 方法该方法将节理面直接作为离散块体边界，网格生成与节理几何自洽。与传统 FDEM 相比，自适应有限离散元方法可以显著提升计算效率和降低计算成本。本文采用 Yan 等[41][42]开发的 MultiFracs 软件，对含铜钠长岩试样冲击试验进行二维 FDEM 数值模拟，考虑二维数值计算的局限性，在数值模拟部分，分析裂纹扩展和能量规律，不涉及块度分析。节理单元的裂缝本构模型可分为三种类型；即模型I、模型Ⅱ和模型Ⅲ，如图 8(b)分别定义了拉伸、剪切和混合拉伸-剪切的破坏模式，节点单元的应力-应变由 O 和 S 确定。临界法向张开度 O_p 表示纯拉伸，而 S_p 表示纯剪切。模型采用损伤因子 D 来定量表征节理单元的破坏，取值在 0 到 1 之间，当 D=0 时，节理单元没有损伤；当 D=1 时，表示节理单元破裂形成裂缝。损伤系数 D 的推导如下[43]:

$$D=\begin{cases}0 & ,o<o_{\mathrm{p}}\ ,s<s_{\mathrm{p}}\\ \dfrac{o-o_{\mathrm{p}}}{o_{\mathrm{r}}-o_{\mathrm{p}}} & ,o\geq o_{\mathrm{p}}\ ,s<s_{\mathrm{p}}\\ \dfrac{s-s_{\mathrm{p}}}{s_{\mathrm{r}}-s_{\mathrm{p}}} & ,o<o_{\mathrm{p}}\ ,s\geq s_{\mathrm{p}}\\ \left(\dfrac{o-o_{\mathrm{p}}}{o_{\mathrm{r}}-o_{\mathrm{p}}}\right)^2+\left(\dfrac{s-s_{\mathrm{p}}}{s_{r}-s_{\mathrm{p}}}\right)^2 & ,o\geq o_{\mathrm{p}}\ ,s\geq s_{\mathrm{p}}\end{cases}\tag{7}$$

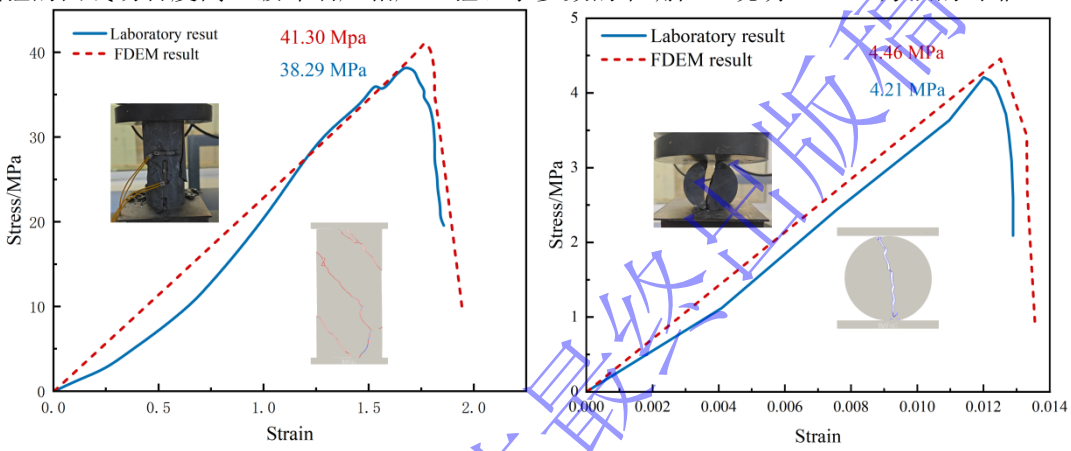
式中：O 为法向张开量，m；O_p 为临界法向张开量，m；O_r 为最大法向张开量，m；S 为切向滑移量，m；S_p 为临界剪切滑移量，m；S_r 为最大剪切滑移量，m；D 为损伤因子。

3.2 参数校准及模型建立

FDEM 的微观参数可以分为三个部分。第一部分是三角单元的微观参数，包括弹性模量 E、泊松比 υ二部分是节理单元的微观参数，包括抗拉强度 f_t，粘聚力 c、内摩擦角 φ和断裂能量释放速率 Gf_{I}、Gf_{II}。第三部分是微观罚参数，包括三角形单元的法向罚参数 p_n 和切向罚参数 p_t，节理单元的法向罚参数 pf_n 和切向罚参数 pf_t。其中，第一部分参数和第二部分除了断裂能量释放率都可以从室内力学试验中通过获得物理力学参数，如表 1 所示；

而对于第三部分微观罚参数，依据 Yan 等[44]开展的大量自适应 FDEM 数值模拟结果确定。当三角形单元的法向和切向罚参数设定为试样的弹性模量 E，节理单元的法向和切向罚参数设定为试样弹性模量 100 倍时，数值模拟结果与试验结果最为吻合，结果较为稳定。因此，只需标定断裂能量释放率 Gf_{I}、Gf_{II}。根据 B.S.A. Tatone[45]的研究成果，断裂能的标定时根据单轴压缩、巴西劈裂数值试验进行综合标定。

对于单轴压缩试验和巴西劈裂试验数值模拟，使用的数值样品与实验室样品相匹配。单轴压缩测试样品的宽度为 50mm，高度为 100 mm；巴西劈裂测试样品直径为 50 mm。经过不断试错与反复验证，发现当 Gf_{I}=1000 J/m^2，Gf_{II}=2000 J/m^2 时，数值模拟结果与力学试验结果吻合度较高，其对应的应力-应变曲线和宏观破坏响应如图 9 所示。对于单轴压缩试验来说，图 9(a)中 FDEM 获取的单轴压缩应力-应变曲线与试验结果匹配度高，模拟的单轴抗压强度为 41.30 MPa 与试验强度 38.29 MPa 相差仅 7.86%；对于巴西劈裂而言，图 9(b)中 FDEM 模拟的抗拉强度为 4.46 MPa，与试验值 4.21 MPa 误差仅 5.94%；同时两组对比试验的曲线吻合度高，破坏响应相应，验证了参数的准确性，说明 FDEM 方法的可靠。



(a)Uniaxial compression test (b)Brazil split comparison

图 9 实验室测试与模拟得出单轴压缩和巴西劈裂结果比对

Fig.9Comparison between laboratory tests and numerical simulation for: (a) uniaxial compression, and (b) Brazilian splitting results

因此，选取 FDEM 参数如表 4 所示。

表 4 FDEM 微观参数

Table 4 Calibrated micro-mechanical parameters for the FDEM model

Triangle cell		Joint element	
Density, ρ/(kg/m^3)	2857	Cohesion,c/(MPa)	6.29
Elastic modulus, E/(GPa)	76.25	Friction angle, φ/(°)	53.03
Poisson's ratio, υ	0.46	Tensile strength, f_t/(MPa)	4.21
Normal penalty parameters of triangular element, p_n/(GPa)	76.25	Mode I fracture energy, Gf_{I} /(J/m^2)	1000
Tangential penalty parameters of triangular element, p_t/(GPa)	76.25	Mode Ⅱ fracture energy, Gf_{II}/(J/m^2)	2000
		Normal Penalty parameter of the joint element, pf_n/(GPa)	7625
		Tangential Penalty parameter of the joint element, pf_t/(GPa)	7625

数值模拟尺寸与上文实验室设备尺寸相同，具体模型及网格设置如图 10 所示。试样网格采用局部加密，可以更细致化模拟岩石破碎特征和裂纹的萌生和扩展。杆件因为是刚性材料不用考虑变形，采用大网格来减少计算成本。网格总数 17297，满足网格尺寸敏感性的要求[45]。模型采用速度边界施加冲击荷载。将纺锤形子弹设定为表 2 节含铜钠长岩动态压缩试验的子弹冲击速度。

最新录用，非最终出版稿

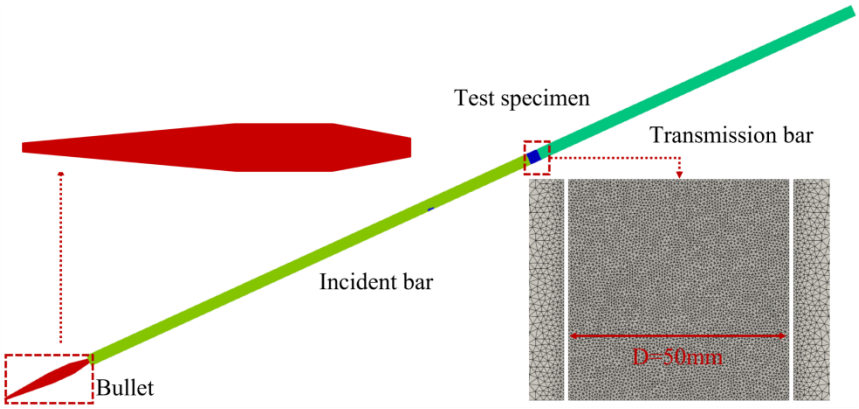
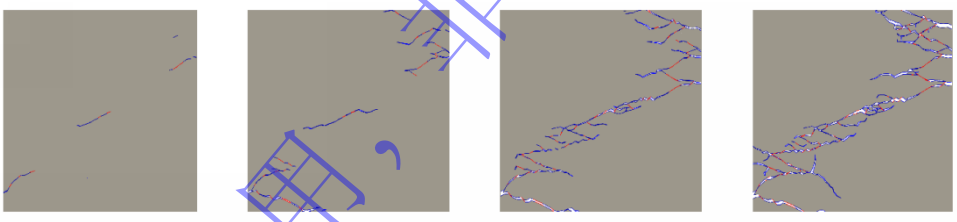


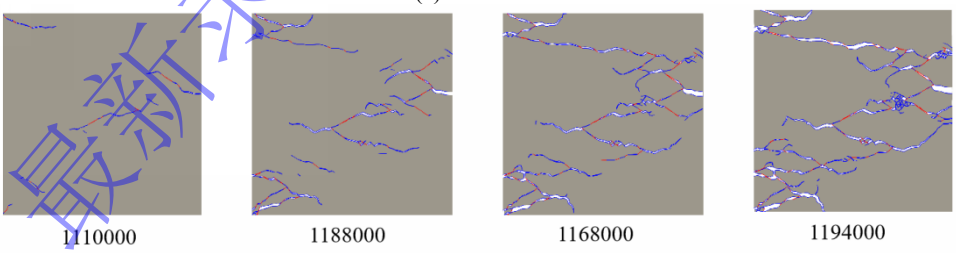
图 10 含铜钠长岩试样数值计算模型
Fig. 10Numerical model for the copper-bearing albite rock sample

3.3 模拟结果

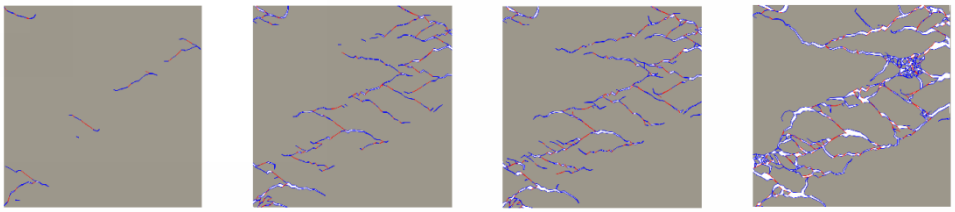
图 11 为对不同冲击气压下含铜钠长岩冲击试验 FDEM 模拟得到的动态破坏过程。整个模拟以时间步长推进破坏过程。根据模拟结果显示，随着冲击气压的增大，试样内部裂纹萌生数量增多，且裂纹出现的时间步长和破坏所用时间步长逐渐缩小。以冲击气压 0.35 MPa 为例，如图 11(c)所示。在冲击荷载传递过程中，当时间步为 918000 时，应力波从入射杆传输到试样中，试样首先发生局部拉伸剪切混合破坏，随着时间步长的增加，试样进一步受到入射杆和透射杆的挤压，当时间步为 948000 时，裂纹继续扩展并向试样中心迅速延伸，此时裂纹数量急剧增加，拉伸破坏占主导作用并伴随着少许的剪切裂纹的生成；随着试样被拉伸裂纹贯通，在 964000 时间步，拉剪混合裂纹沿着主裂纹向四周扩展延伸形成破碎带，试样在卸载后，试样破坏并没有马上结束，在 1026000 时间步可以看到裂纹还在缓慢地在原有裂纹周围延伸，原有裂纹宽度还在不断放大，最终，裂纹停止生长，表明冲击试验结束。模拟结果与高速摄影观测的裂纹演化过程具有良好一致性，验证了 FDEM 方法在表征岩石裂纹扩展过程中的可靠性。



(a) 0.25 MPa

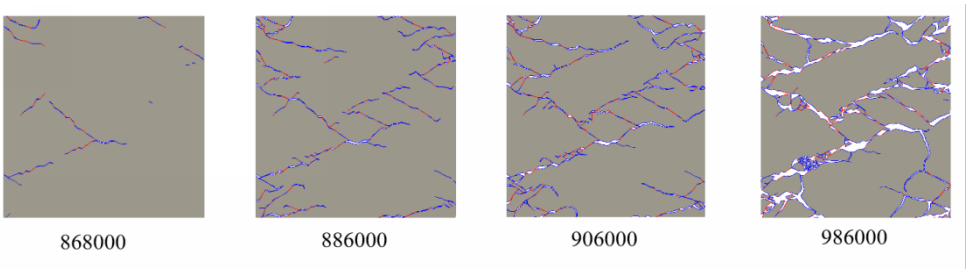


(b) 0.30 MPa

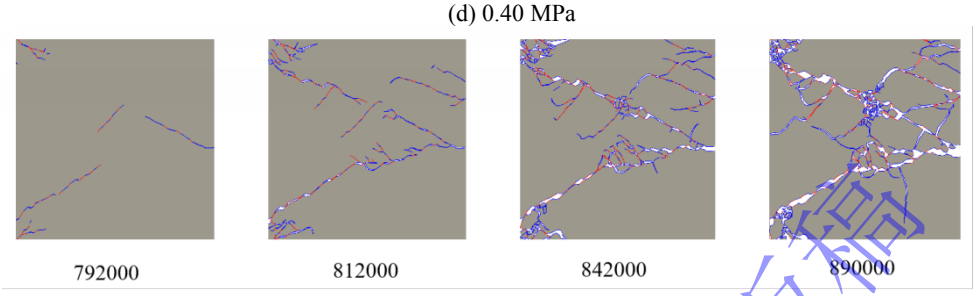


(c) 0.35 MPa

最新录用，非最终出版稿



(d) 0.40 MPa

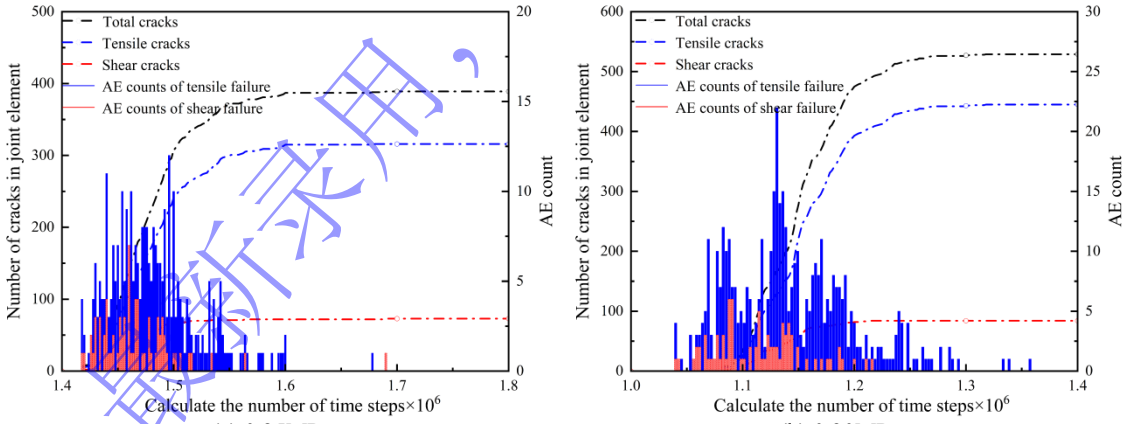


(e) 0.45 MPa

图 11 不同冲击气压下模型的裂纹演化图（蓝色代表拉伸裂纹，红色代表剪切裂纹）

Fig. 11Crack propagation in the model under different impact gas pressures (blue denotes tensile cracks, red denotes shear cracks)

图 12 显示的是不同冲击荷载下裂纹数和声发射次数。在本文中，AE 计数定义为每个步骤中断开的节理单元的数量，它等于当前步骤的断开节理单元的累积数量减去前面步骤中断开的节理单元的累积数量。从图 12 可以看出，在整个冲击过程中，拉伸破坏占据主导作用，与图 11 试样破坏图对应起来。随着冲击气压的增大，试样开始出现裂纹的时间步长越来越早。以冲击气压 0.35MPa 为例，如图 12(c)所示。裂纹扩展划分三个阶段，首先是快速扩展阶段，拉伸裂纹 AE 计数和剪切裂纹 AE 计数在 0.90×10^6-0.975×10^6 时间步出现频率、数量高。节理单元裂纹数量曲线斜率陡峭；第二阶段为稳定扩展期，在 0.975×10^6-1.0×10^6时间步，拉伸裂纹声发射事件降低但持续存在，剪切裂纹声发射事件偶尔出现。节理单元裂纹数量曲线斜率变缓，表明裂纹进入扩展阶段；最后为稳定阶段，在 1.0×10^6 步后，裂纹 AE 计数趋近于零，累积曲线趋于水平，裂纹扩展基本停止，说明冲击过程结束。



(a) 0.25MPa (b) 0.30MPa

最新录用，非最终出版稿

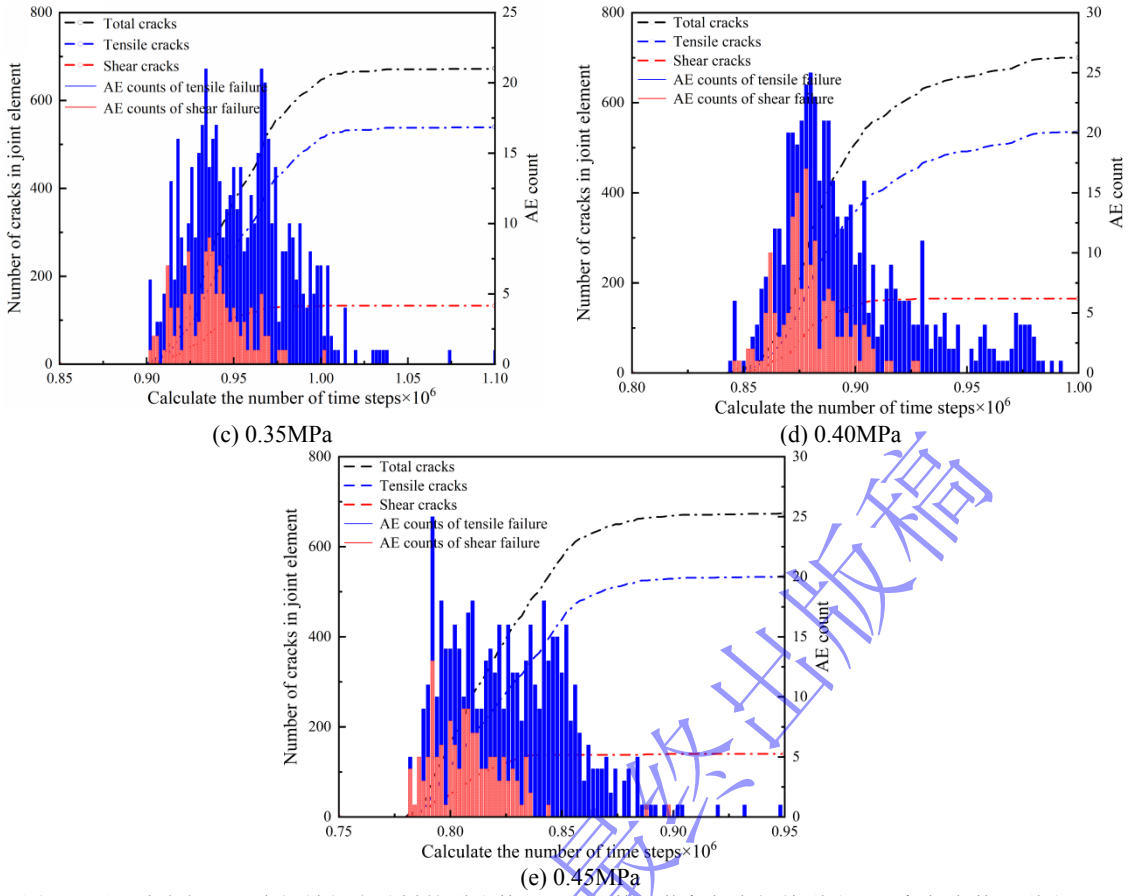


图 12 不同冲击气压下含铜钠长岩试样的裂纹数和 AE 计数（蓝色代表拉伸裂纹，红色代表剪切裂纹）
Fig.12 Crack number and AE count of copper-bearing albite rock samples under different impact gas pressures (blue denotes tensile cracks, red denotes shear cracks)

图 13 展示了该模型在不同冲击气压条件下的裂纹倾斜角度特性。可以看出，拉伸裂纹在几乎所有角度区间均呈现数量优势，表明拉伸应力在裂纹形成过程中起到了主要作用。拉伸裂纹和剪切裂纹在 0°-180°范围内均有分布，但是在某一方向的数量相比于其他方向较为突出。在冲击气压为 0.25 MPa 时，总裂纹数为 425 条，拉伸裂纹数为 350 条，剪切裂纹数为 75 条。拉伸裂纹在倾角为 0°-10°数量最多，36 条，剪切裂纹在倾角为 170°-180°数量最多，8 条；在冲击气压为 0.30 MPa 时，总裂纹数为 537 条，拉伸裂纹数为 457 条，剪切裂纹数为 80 条。拉伸裂纹在倾角为 170°-180°数量最多，44 条，剪切裂纹在倾角为 170°-180°数量最多，14 条；在冲击气压为 0.35 MPa 时，总裂纹数为 690 条，拉伸裂纹数为 556 条，剪切裂纹数为 134 条。拉伸裂纹在倾角为 170°-180°数量最多，45 条，剪切裂纹在倾角为 80°-90°数量最多，18 条；在冲击气压为 0.40 MPa 时，总裂纹数为 770 条，拉伸裂纹数为 597 条，剪切裂纹数为 173 条。拉伸裂纹在倾角为 10°-20°数量最多，44 条，剪切裂纹在倾角为 70°-80°数量最多，19 条；在冲击气压为 0.45 MPa 时，总裂纹数为 1197 条，拉伸裂纹数为 979 条，剪切裂纹数为 218 条。拉伸裂纹在倾角为 0°-10°数量最多，68 条，剪切裂纹在倾角为 110°-120°数量最多，20 条。可以看出拉伸裂纹在水平方向形成主优势区，分析原因是这一现象可归因于试样受水平方向冲击载荷作用——拉伸裂纹的萌生与扩展方向与冲击方向高度一致，沿最大拉应力方向（垂直于冲击方向）优先扩展；相比之下，剪切裂纹的主优势区方向随冲击气压变化呈现差异性（包括水平、垂直及倾斜方向）。剪切裂纹占总裂纹数的百分比在 0.25MPa 至 0.45MPa 分别为 17.65%、14.90%、19.42%、22.47%、18.21%，发现剪切裂纹在 0.3MPa 时占比最少。分析原因剪应力尚未突破启滑阈值，能量优先被拉伸断裂耗散，并且试样被快速拉伸贯通，剪切裂纹萌生被抑制，从而导致其占最小。

最新录用，非最终出版稿

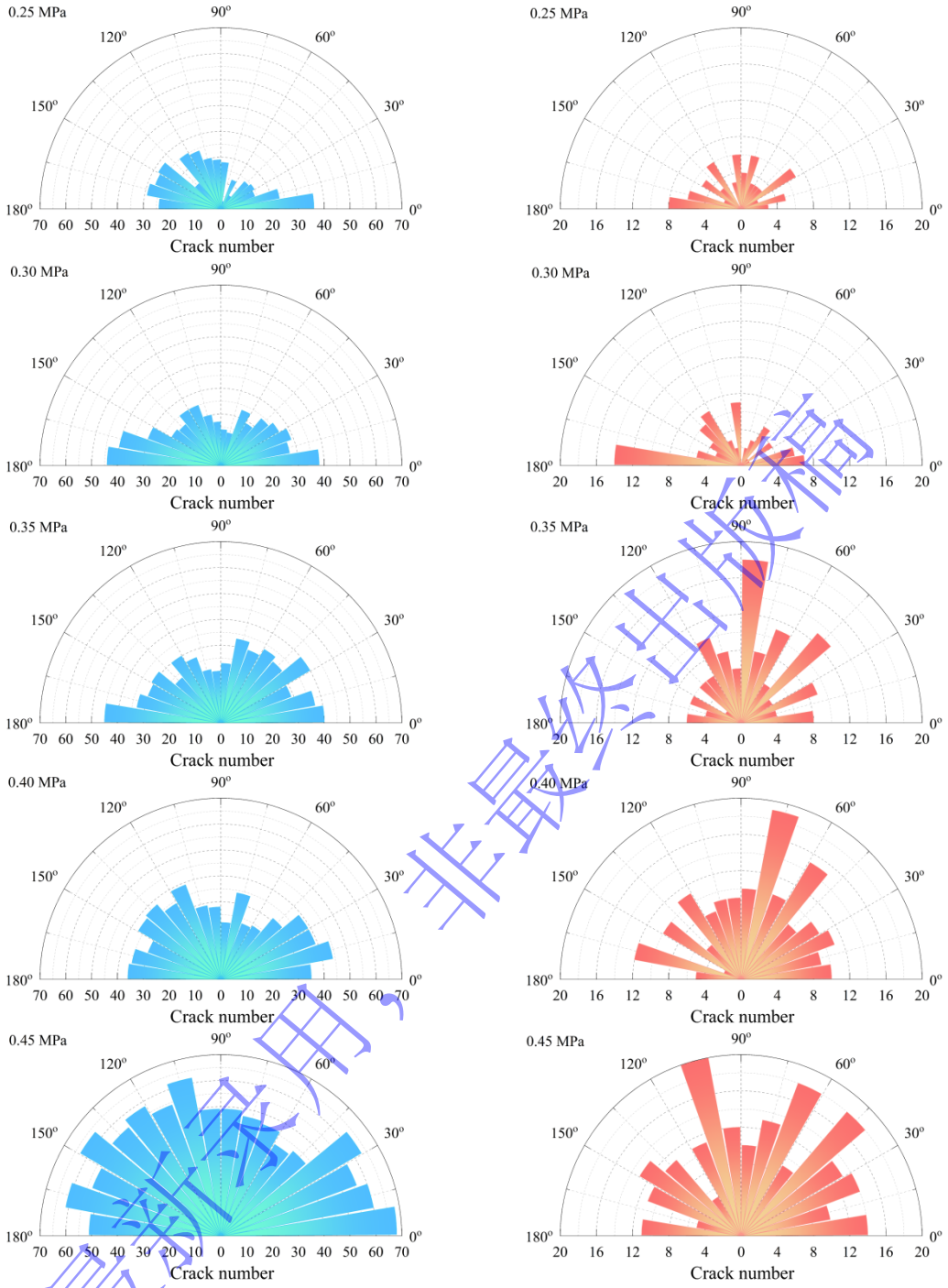


图 13 不同冲击气压下含铜钠长岩裂纹走向玫瑰图（蓝色代表拉伸裂纹，红色代表剪切裂纹）

Fig. 13 Rose diagrams showing fracture orientation distributions under different impact gas pressures (blue denotes tensile cracks, red denotes shear cracks)

图 14 说明了冲击气压对新增裂纹面积、冲击总能量和应变能比能量的影响。总体而言，新增裂纹面积与冲击总能量随着冲击荷载的增加而变大。在冲击过程中，冲击能量通过多种形式转化为岩石损伤所需的能量，如应变能、声能、热能等。在本次模拟中，采用的 FDEM 数值模拟方法的模型建立在均质岩体中，并且未开启热学与渗流，只考虑纯力学，所以裂纹扩展的能量用应变能表示。岩石在冲击气压作用下发生弹性变形、塑性变形，储存应变能。当应变能超过岩石的强度极限时，岩石发生破裂，应变能转化为裂纹扩展的能量。

应变能比能（*SE*）通常用于评估冲击荷载的破岩效率，其定义为每单位体积岩石新增裂纹面积所需的应变能量。对于 2D 数值模拟，*SE* 定义为每单位新增裂纹面积岩石碎片所需的应变能，可以通过以下公式获得：

最新录用，非最终出版稿

$$SE = \frac{E_S}{A_F} \tag{8}$$

式中：E_S 为冲击过程结束所产生的应变能/J；A_F 为模拟最后一步新增裂纹面积/m²。

SE 值越小，表示冲击能量转化为岩石破裂能量的效率越高，破碎效果越好。SE 越大，表示能量消耗越多，冲击破碎效率越低。应变能和新增裂纹面积可通过 MultifracS 输出结果获得。如图蓝色曲线所示，可以得出，应变能比能首先随着冲击气压的增大而变小，随着冲击气压的进一步增加，应变能比然后变大。计算出的最小应变能比能量为 20629.95J/m²，对应的冲击气压为 0.30MPa。通过对图 13 统计结果，剪切裂纹在 0.3MPa 时占比最少。根据 Bahrami 等[46]研究成果，同一岩石发生剪切破坏需要的能量普遍高于拉伸破坏需要的能量。因此 0.30 MPa 冲击气压下能量主要消耗于拉伸裂纹扩展，避免了高耗能的剪切滑移，综合破碎效率最高。

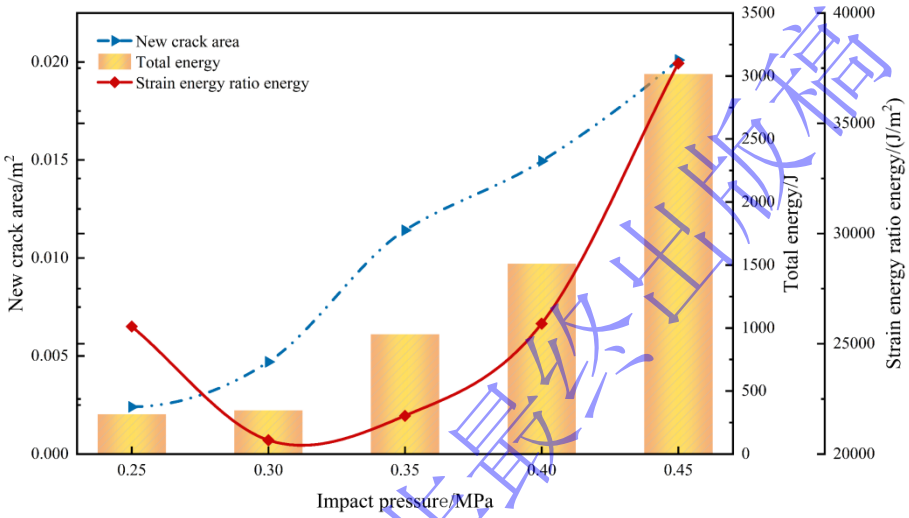


图 14 冲击气压-比能量-新增裂隙面积图

Fig. 14Relationship between impact gas pressure, specific energy, and newly created fracture area

4 结 论

（1）随着冲击气压的增大，含铜钠长岩试样应力峰值由 97.76 MPa 增大到 161.88 MPa 不断变大，破碎程度加剧。在冲击荷载的作用下，裂纹萌生在试样与杆交界处，向试样中心方向扩展延伸成拉伸主裂纹，并随着加载时间的推移衍生大量次生裂纹，最终交汇贯通形成破碎带。入射能与耗散能均随冲击气压的增大而增大。当能量耗散率在入射能小于 140J 呈上升趋势，140 J 后转而下降，能量耗散率在冲击气压为 0.35 MPa 时最大。

（2）对比试验结果与数值模拟结果，验证了该模型的有效性与细观参数的合理性。裂纹扩展过程和数值计算结果演化一致。通过 FDEM 模拟冲击过程发现，冲击气压升高缩短了裂纹萌生到贯通的时长，裂纹总数增加；破坏模式以拉伸破坏占主导作用，拉伸裂纹沿 0°/180°水平近轴带集中，形成方向性主优势区。

（3）新增裂纹面积与冲击总能量随冲击荷载的增大同步增长；应变能比能量呈“V”型变化，于达到最小值为 20629.95 J/m²，且该气压下剪切裂纹占比最低为 14.90%。综合能量和裂纹分析，0.30 MPa 破岩效率最高。

（4）与非金属岩样相比，含铜钠长岩裂纹优先在金属矿物边界处萌发、发展，在相近应变率下的动态应力峰值与耗散能均明显降低，碎块形态不规则且粒径细化。

参考文献

[1] 工信部等十一部门联合印发《铜产业高质量发展实施方案(2025—2027 年)》[J].资源再生,2025,(02):48-51.

The Ministry of Industry and Information Technology and other 11 departments jointly issued the ' Implementation Plan for High-quality Development of Copper Industry (2025-2027) [J]. Resource Regeneration, 2025, (02): 48-51.

[2] GRADY D E, HOLLENBACH R E, SCHULER K W, et al. Strain rate dependence in

录用稿，非最终出版稿

dolomite inferred from impact and static compression studies [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(8): 1325-1333.
[3] 左庭,李祥龙,王建国,等.冲击荷载下含铜矿岩能量耗散的数值模拟[J].爆炸与冲击, 2025,45(05):76-89.
ZUO T, LI X L, WANG J G, et al. Numerical simulation of energy dissipation of copper-bearing rock under impact load [J]. Explosion and impact, 2025, 45 (05): 76-89.
[4] 张慧梅,王丹,陈世官.不同冲击荷载作用下风积砂混凝土动力学特性及能量耗散规律研究[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(02):210-218.
ZHANG H M, WANG D, CHEN S G. Study on dynamic characteristics and energy dissipation law of aeolian sand concrete under different impact loads [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(02): 210-218.
[5] 牛俊超,李吉民,梅林芳,等.冲击荷载下磁铁矿动力学特性及破坏特征研究[J].爆破, 2025,42(02):52-59.
NIU J C, LI J M, MEI L F, et al. Study on dynamic characteristics and failure characteristics of magnetite under impact load [J]. Blasting, 2025, 42(02): 52-59.
[6] 平琦,刘子训,孔德龙,等.含孔砂岩试件冲击动力学特性和耗能分析[J/OL].地下空间与工程学报,1-9[2025-07-04].
PING Q, LIU Z X, KONG D L, et al. Impact dynamic characteristics and energy dissipation analysis of sandstone specimens with holes [J/OL]. Journal of Underground Space and Engineering, 1-9 [2025-07-04].
[7] 段继超,宗琦,高朋飞,等.冲击荷载作用下干湿循环石灰岩拉伸破坏特性试验研究[J].振动与冲击,2024,43(24):204-215+233.
DUAN J C, ZONG Q, GAO P F, et al. Experimental study on tensile failure characteristics of dry-wet cycle limestone under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(24): 204-215+233.
[8] 戴兵,赵桂锋,张雷,等.不同加载速率作用下含平行裂隙岩石的试验研究：能量耗散与损伤演化[J].岩石力学与工程报,2024,43(S1):3397-3412.
DAI B, ZHAO G F, ZHANG L, et al. Experimental study on rocks with parallel fractures under different loading rates: energy dissipation and damage evolution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3397-3412.
[9] 焦振华,姜耀东,赵毅鑫,等.侧限约束冲击载荷下煤样能量耗散与损伤特征[J].中国矿业大学学报,2023,52(03):492-501.
JIAO Z H, JIANG Y D, ZHAO Y X, et al. Energy dissipation and damage characteristics of coal samples under lateral restraint impact load [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2023, 52 (03) : 492-501.
[10] 王雁冰,付代睿.层理角度对天然岩石材料动态断裂行为的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(04):849-867.
WANG Y B, FU D R. Effect of bedding angle on dynamic fracture behavior of natural rock materials [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42 (04): 849-867.
[11] 周俊,赵光明,孟祥瑞,等.高径比差异条件下花岗岩动态冲击能量耗散及破碎特征[J].采矿与安全工程学报,2023,40(02):379-386.
ZHOU J, ZHAO G M, MENG X R, et al. Dynamic impact energy dissipation and fragmentation characteristics of granite under different height-diameter ratios [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023,40 (02) : 379-386.
[12] 孙卓越,吴拥政,李军臣,等.考虑长径比与应变率耦合效应的砂质泥岩动态损伤本构模型[J/OL].煤炭科学技术, 1-14[2025-07-04]
SUN Z Y, WU Y Z, LI J C, et al. Dynamic damage constitutive model of sandy mudstone considering the coupling effect of aspect ratio and strain rate [J/OL]. Coal Science and Technology, 1-14 [2025-07-04].
[13] LI J C, RONG L F, LI H B, et al. An SHPB test study on stress wave energy attenuation in jointed rock masses [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 403–420.
[14] LI D, HAN Z, SUN X, et al. Dynamic mechanical properties and fracturing behavior of marble specimens containing single and double flaws in SHPB tests [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 1623–1643.
[15] 王江波,李汶峰,任文科,等.SHPB 入射波相似律与整形技术的试验与数值研究[J].振动与
最新录用，非最终出版稿

冲击,2022,41(06):169-176+221.
WANG J B, LI W F, REN W K, et al. Experimental and numerical study on similarity law and shaping technique of SHPB incident wave [J]. Vibration and shock, 2022,41 (06): 169-176+221.
[16] 张旭,刘晓辉,刘楚佳,等.高温大理岩的动态能量耗散机理及破坏特征[J].爆炸与冲击,2025,45(06):68-80.
ZHANG X, LIU X H, LIU C J, et al. Dynamic energy dissipation mechanism and failure characteristics of high temperature marble [J]. Explosion and impact, 2025,45 (06): 68-80.
[17] 吉东亮,高新强,董北毅,等.动载作用下复合岩体力学失稳机制与损伤本构模型研究[J].振动与冲击,2024,43(19):103-116.
JI D L, GAO X Q, DONG B Y, et al. Study on mechanical instability mechanism and damage constitutive model of composite rock mass under dynamic load [J]. Vibration and impact, 2024,43 (19):103-116.
[18] LI X B, YANG Z, ZHOU Z L. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1693-1709.
[19] ZHU W C, BAI Y, LI X B, et al. Numerical simulation on rock failure under combined static and dynamic loading during SHPB tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 142-157.
[20] ZHOU Z L, ZHAO Y, JIANG Y H, et al. Dynamic behavior of rock during its post-failure stage in SHPB tests [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(1): 184-196.
[21] ZUO T, LI X L, WANG J G, et al. Insights into natural tuff as a building material: effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108584.
[22] 柴少波, 王昊, 井彦林, 等. 充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10)2025－2037.
CHAI S B, WANG H, JING Y L, et al. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39 (10): 2025–2037.DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0310.
[23] 滕骁,卢玉斌,陈兴,等.再生混凝土动态直接拉伸的试验研究 [J].振动与冲击,2016,35(9):43－51.
TENG X, LU Y B, CHEN X, etal. Tests for dynamic direct tensile of recycled aggregate concrete [J] . Journal of Vibrationand Shock, 2016, 35 (9): 43–51.
[24] 魏威. 冲击载荷作用下活性材料的响应特性研究 [D]. 北京:北京理工大学,2016:35－39.
WEI W. Study on the dynamic responses of the active material sunder impact loadings [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 35–39.
[25] 王建国,雷振,杨阳,等.饱水冻结花岗岩动态力学性状的应变率效应[J].地下空间与工程学报, 2018, 14(5):1292－1297.
WANG J G, LEI Z, YANG Y, etal. Strain rate effect of dynamic mechanical characteristics of saturated freezing granite [J] . Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (5): 1292–1297.
[26] 李夕兵,宫凤强,周子龙,等.岩石类材料 SHPB 实验中的几个关键问题[C]//中国力学学会爆炸力学实验技术专业组.第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集.中南大学资源与安全工程学院;深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室;湖南城市学院土木工程学院;,2010:6-19.
LI X B, GONG F Q, ZHOU Z L, et al. Several key problems in the SHPB experiment of rock-like materials [C] //Explosion Mechanics Experimental Technology Group of Chinese Society of Mechanics. Proceedings of the 6th National Explosive Mechanics Experimental Technology Conference. School of Resources and Safety Engineering, Central South University; hunan Provincial Key Laboratory of Deep Metal Mineral Development and Disaster Control; college of Civil Engineering, Hunan City University, 2010: 6-19.
[27] 翟越,马国伟,赵均海,等.花岗岩在单轴冲击压缩荷载下的动态断裂分析[J].岩土工程学报,2007,(03):385-390.
ZHAI Y, MA G W, ZHAO J H, et al. Dynamic fracture analysis of granite under uniaxial impact
录用稿,非最终出版稿

compression [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2007, (03): 385-390.
[28] WANG Z, HUANG J, CHEN Y, et al. Dynamic mechanical properties of different types of rocks under impact loading [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 19147.
[29] 杨辉.单轴冲击荷载下花岗岩力学特性与数值模拟研究[D].合肥工业大学,2020.
YANG H. Study on mechanical properties and numerical simulation of granite under uniaxial impact load [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
[30] 温森,吴斐,李胜,等.冲击荷载下强度比对类复合岩样能量耗散影响的研究[J].振动与冲击,2023,42(13):111-118.
WEN S, WU F, LI S, et al. Study on the effect of strength ratio on energy dissipation of composite rock samples under impact load [J]. Vibration and impact, 2023, 42 (13) : 111-118.
[31] GONG F, JIA H, ZHANG Z, et al. Energy dissipation and particle size distribution of granite under different incident energies in SHPB compression tests [J]. Shock and Vibration, 2020(1): 8899355.
[32] 于水生,卢玉斌,朱万成,等.SHPB 试验中花岗岩破坏程度与能量耗散关系分析[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(12):1733-1737.
YU S S, LU Y B, ZHU W C, et al. Analysis of the relationship between granite damage degree and energy dissipation in SHPB test [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2015, 36(12): 1733-1737.
[33] 王德荣,刘昭言,刘家贵,等.砂岩和花岗岩的动态性能与能量耗散分析[J].北京理工大学学报,2017,37(12):1217-1223.
WANG D R, LIU Z Y, LIU J G, et al. Analysis of dynamic properties and energy dissipation of sandstone and granite [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(12): 1217-1223.
[34] MUNJIZA A, KNIGHT E E, ROUGIER E. Large strain finite element method: a practical course [M]. John Wiley & Sons, 2015.
[35] MUNJIZA A, KNIGHT E E, ROUGIER E. Computational mechanics of discontinua [M]. John Wiley & Sons, 2011.
[36] YAN C Z, ZHENG H, SUN G H, et al. Combined finite-discrete element method for simulation of hydraulic fracturing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(4): 1389-1410.
[37] FUKUDA D, MOHAMMADNEJAD M, LIU H Y, et al. Development of a GPGPU-parallelized hybrid finite-discrete element method for modeling rock fracture [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(10): 1797-1824.
[38] ZHOU L, ROUGIER E, MUNJIZA A, et al. Simulation of discrete cracks driven by nearly incompressible fluid via 2D combined finite-discrete element method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(9): 1724-1743.
[39] YAN C Z, ZHENG H. FDEM-flow3D: a 3D hydro-mechanical coupled model considering the pore seepage of rock matrix for simulating three-dimensional hydraulic fracturing [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 212-228.
[40] YAN C Z, ZHENG Y C, WANG G, et al. A 2D adaptive finite-discrete element method for simulating fracture and fragmentation in geomaterials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023,
[41] YAN C Z, XIE X, REN Y H, et al. FDEM-based 2D coupled thermal-hydro-mechanical model for multiphysical simulation of rock fracturing [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 149: 104964.
[42] YAN C Z, ZHAO Z H, YANG Y, et al. Three-dimensional thermal-hydro-mechanical coupling model for simulation of fracturing driven by multiphysics [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 155: 105162.
[43] YAN C Z, HAN D, ZHENG H, et al. A linear fracture constitutive model for the two-dimensional finite-discrete element method (FDEM) and its parameter calibration procedure [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2025, 176: 106228.
[44] YAN C Z, TONG Y. Calibration of microscopic penalty parameters in the combined finite–discrete-element method [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(7): 04020092.
[45] TATONE B S A, GRASSELLI G. A calibration procedure for two-dimensional laboratory-scale hybrid finite–discrete element simulations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 56-72.
最新录用，非最终出版稿

[46] BAHRAMI B, NEJATI M, AYATOLLALI M R, et al. Theory and experiment on true mode Ⅱ fracturing of rocks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 240: 107314.

Impact-Induced Fracture Process and Energy Dissipation Characteristics of Copper-Bearing Albite Rock Based on FDEM

ZHANG Xiyuan[1], LI Xianglong[1,2], ZUO Ting[1], LIU Jinbao[3], WANG Jianguo[1,2], HU Tao[1], WANG Hao[1]

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunan, China;

2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department, Kunming 650093, Yunan, China;

3. Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd. , Kunming 650600, Yunan, China)

Abstract: In order to ensure the efficient recovery of copper resources, the copper-bearing albite rock samples were taken as the research object, and the impact loads with different strengths were applied by the split Hopkinson pressure bar (SHPB). The crack propagation process was recorded by a high-speed camera system, and the energy dissipation law of the samples under different impact pressures was analyzed by combining the one-dimensional stress wave propagation theory and the law of conservation of energy. At the same time, a numerical model of the impact process of copper-bearing albite is established based on the finite-discrete element coupling algorithm. The results show that the incident energy and the peak stress increase with the increase of the impact pressure, and the degree of sample breakage also increases. When the incident energy is less than 140 J, the energy dissipation rate increases with the increase of the incident energy. When the incident energy is greater than 140 J, the energy dissipation rate decreases with the increase of the incident energy, and the energy dissipation rate reaches the maximum when the impact pressure is 0.35 MPa. In the process of impact, tensile failure plays a dominant role and forms the main dominant area in the horizontal direction. The new crack area and the total impact energy increase with the increase of impact load. When the impact pressure is 0.30 MPa, the strain energy ratio is the smallest. Under this pressure, the proportion of shear cracks is the smallest, indicating that the rock breaking efficiency of 0.30 MPa impact pressure is the highest;The numerical model based on FDEM can effectively predict the damage and fracture process of copper-bearing albite under different impact loads.

Keywords: split Hopkinson pressure bar (SHPB); crack evolution; energy analysis; finite-discrete element method (FDEM)

最新录用，非最终出版稿