



移动扫码阅读

方士正, 杨仁树, 李炜煜, 等. 非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 83-96.

FANG Shizheng, YANG Renshu, LI Weiyu, *et al.* Experimental study on energy dissipation and failure characteristics of rock at depth under non-hydrostatic pressure condition[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 83-96.

非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究

方士正¹, 杨仁树¹, 李炜煜², 李永亮³, 陈 骏⁴

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232000; 3. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083; 4. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:深部岩石常处于非静水压初始应力场, 岩石所处应力状态的不同导致其对动态荷载的响应有所差异, 为研究非静水压及动载耦合作用下岩石的动力学行为, 利用分离式霍普金森杆试验系统, 开展多种初始应力组合下的岩石动态压缩试验, 分析不同非静水压条件对岩石能量耗散及破坏规律的影响规律。通过试验结果发现, 轴压和围压均对岩石动态强度产生显著影响, 以 8 MPa 时为临界点, 岩石动态强度随着轴压提升呈先增加后减小的趋势, 但岩石动态强度随着围压的增加持续增大; 岩石耗散能随着轴压的增加逐渐减小, 但随围压变化趋势较为复杂, 在轴压较低时, 耗散能随着围压的增加而减小, 在轴压较高时, 耗散能随围压提升表现出先增加后减小的特征。根据试样的表现及内部破坏形态, 结合分形理论及 CT 扫描技术, 分析不同非静水压力条件下岩石的破坏模式发现, 岩石表面裂纹与轴围压比存在显著关联, 当轴围压比较低时, 岩石侧面及端面裂纹较少, 随着轴围压比的提高, 岩石表面裂纹明显增加。通过对岩石扫描后横向及纵向切片分析发现, 岩石内部同时存在环向和径向裂纹, 且岩石破坏由贯穿型剪切裂纹控制。同时可以发现, 非静水压条件下岩石的破坏可分为中心圆台形岩块和周边破碎岩块 2 部分, 当轴压增加时岩石的破坏程度加剧, 而围压的提升则使得岩石破坏程度降低。

关键词:深部开采; 非静水压; 岩石破坏; SHPB; 能量耗散; 破坏特征

中图分类号: TD253

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0083-14

Experimental study on energy dissipation and failure characteristics of rock at depth under non-hydrostatic pressure condition

FANG Shizheng¹, YANG Renshu¹, LI Weiyu², LI Yongliang³, CHEN Jun⁴

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Deep buried rock is often in a non-hydrostatic initial ground stress field, and the different stress states lead to different rock response under dynamic loading. To study the dynamic behavior of rocks under coupled non-hydrostatic pressure and dynamic loading, the dynamic compression tests under different initial stress are carried out by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) experimental system, and the influence of different non-hydrostatic pressure on energy dissipation and failure characteristics of rock is analyzed. Based on the test results, it is found that both axial and lateral confining pressure have a significant impact on the rock dynamic strength. Taking 8 MPa as the critical point, the rock dynamic strength first increases and then decreases with the increase of axial confining pressure, but the rock dynamic strength will continue to increase with the increase of lateral confining pressure. The rock dissipative energy gradually de-

收稿日期: 2022-12-29 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1504

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52227805, 51934001)

作者简介: 方士正(1989—), 男, 安徽淮南人, 博士。E-mail: szfang89@163.com

creases with the increase of axial confining pressure, but the trend of dissipative energy changes with confining pressure is complicated. When the axial confining pressure is low, the dissipative energy decreases with the increase of the confining pressure, and when the axial confining pressure is high, the dissipative energy shows a characteristic of increasing first and then decreasing with the increase of lateral confining pressure. According to the apparent and internal damage patterns of the specimens, combined with fractal theory and CT scanning technology, the influence of the damage pattern of rocks under different non-hydrostatic pressure conditions is analyzed. It is found that there is a significant correlation between the apparent cracks of rock and the ratio of axial-confining pressure. When the axial confining pressure ratio is low, there are fewer cracks on the side and end faces of rock. With the increase of the axial confining pressure ratio, the number of apparent cracks of rock increases. Through the analysis of the cross-sectional and vertical slices of the rock, it is found that there are circumferential and radial cracks in the rock simultaneously, and the rock failure is controlled by the penetrating shear cracks. It also can be found that the damage of rocks under non-hydrostatic pressure conditions can be divided into two parts: the central spherical rock mass and the peripheral broken rock mass, and the damage degree of rocks increases when the axial pressure increases, while the elevation of the surrounding pressure makes the damage degree of rocks decrease.

Key words: deep mining; non-hydrostatic pressure; rock failure; SHPB; energy dissipation; failure characteristics

0 引言

采用钻爆法进行深部地下工程岩体开挖时,工程岩体受到初始地应力场和爆炸应力场的耦合作用^[1]。初始地应力场的方向和大小受多种因素影响,包括自重应力、构造应力、工程扰动等^[2-4],导致深部岩体所处的初始地应力场较为复杂。初始地应力场对岩体的力学性质影响显著,研究动态荷载下非静水压条件对岩石动力学行为及能量耗散规律,有利于实现地下工程的安全高效开挖和节能环保,提高矿山企业的经济效益和社会效益。

针对深部岩石力学问题,众多学者从岩石动态强度^[5-6]、能量耗散^[7-8]及破坏机理^[9-11]等方面开展研究,并取得了大量的研究成果。夏开文等^[12]对深部岩石动力学近年来取得的进展进行了系统的回顾,分析了围压作用对岩石动态压缩、拉伸、弯曲和剪切等行为的影响规律,并将围压分离式霍普金森杆可以划分被动围压、主动三轴围压和真三轴围压。在被动围压研究方面,LIU等^[13]采用厚壁圆筒装置,对比分析了无约束和被动围压条件下的混凝土动力学性质,研究结果表明,混凝土的动态峰值应力、侧向应力峰值和峰值轴向应变对约束条件下的应变率具有很强的敏感性,且破坏模式同时受加载率和围压的影响。杨国梁等^[14]研究了被动围压条件下页岩的动力学特性,结果发现,被动围压存在能显著提高岩石材料的动态承载力和抗变形能力。李成武等^[15]采用数值模拟的方法研究了套筒弹性模量、厚度等参数对煤样变形破坏的作用。被动围压的原理是岩石变形后对约束装置产生作用力,随后约束装置对岩石产生反作用力形成的约束应力,但在工程中岩石一般处于地应力的主动作用下,因此主动围压作用下的岩石动力学性质更能符合真实情景,GONG

等^[16]利用改进的 SHPB 实验系统,研究了高应变率和低围压对砂岩动态力学性能的影响,结果表明,砂岩的动态单轴和三轴抗压强度随应变率的对数线性增加。DU等^[17]对处于静水压条件下倾斜圆柱形砂岩试样进行动态压缩-剪切联合试验,通过试验发现,静水压和动载速率均有利于增强岩石的承载能力,且对岩石的破坏模式产生显著影响。WU等^[18]首先对 Laurentian 地区花岗岩施加 0~20 MPa 的静压约束,随后开展动态拉伸试验,结果发现,岩石的动态拉伸强度对静水压敏感,随着静水压的增加而增大。随着霍普金森杆实验技术的进步,岩石动态性质第二主应力效应无法考虑的问题得以克服,真三轴条件下的动力学性质测试相继见诸报道,徐松林等^[19]采用研制的真三轴霍普金森杆,分析了动载下混凝土材料三向应力应变关系。LIU等^[20]利用真三轴霍普金森杆试验系统,实现了对岩石多种初始预应力的加载,对岩石分别开展了单轴、双轴、三轴动力学测试,实验结果发现,岩石动态强度随着冲击加载方向预应力增加而降低,随侧向预应力增大而增加,岩石动态弹性模量随着约束的增加而增大。岩石破坏的本质是能量积聚和耗散过程^[21],其破坏模式和能量耗散密切相关,王文等^[22]探讨了不同含水煤样在静载及动力扰动作用下的能量耗散规律,发现试样的总吸能同时受到冲击载荷与轴向预应力影响,当轴向预应力不变时,试样的总吸能随冲击速率的增加而增大,但需要考虑轴向预应力与煤样单轴抗压强度的比值。刘少虹等^[23]研究了应力波幅值及静载对组合煤岩中应力波传播及能量耗散的影响机制,发现煤岩组合体对能量耗散的能力与应力波幅值呈正相关关系,且随静载的增加表现出先增后减的变化。马少森等^[24]研究了静载压力、应变率等因素对花岗岩能量耗散的影响规律,结果表明,随着轴压的

增大, 试样的单位体积吸收能降低, 当围压或应变率增大时, 岩石单位体积吸收能增加, 同时探讨了岩石初始储能与极限储能比值对岩石释能的影响。周宗红等^[25]以白云岩为研究对象, 分析了动载下岩石能量耗散的轴压效应和围压效应。赵光明等^[26]通过数值模拟方法, 讨论了类岩材料的破坏模式和能耗, 分析发现, 岩石的破坏模式有张拉应变、轴向劈裂拉伸和压碎等, 且试样的破坏模式和能耗都具有率效应特征。王伟等^[27]对砂岩试样开展了不同动静组合与加载速率耦合作用下的冲击试验, 并利用 CT 扫描和数字岩心技术获得试样内部的裂纹三维空间分布, 分析了初始应力状态对岩石破坏模式及裂纹密度的影响规律。

深部岩石所处初始地应力场较为复杂, 已有较多的报道分析和研究了岩石在多种初始地应力状态下的动力学性质^[28-30]。但对于地下工程岩体, 岩石常处于三向不等应力的非静水压力作用下, 以井下巷道掘进为例, 随着巷道的开挖, 不同位置处岩体的应力状态有所差异, 如图 1 所示, 在工作面的动载扰动下表现出差异性力学行为。受外载扰动时, 初始应力方向和大小对岩石力学响应存在显著影响, 为分析非静水压条件下的岩石动力学行为及破坏规律, 基于分离霍普金森杆实验系统, 通过对试样施加不同的轴向及侧向围压模拟不同的非静水压状态, 开展非静水压条件下的动力学试验, 分析轴向及侧向围压对岩石动态强度的作用规律, 其次, 分析了不同非静水压状态下岩石的能量耗散规律, 随后, 对试验后岩石的表观及内部裂纹进行分析, 探讨岩石的破坏机理。研究结果可为更加合理高效的破岩和矿山开采提供理论依据。

1 试验设备及方案设计

1.1 试样制备

天然岩石材料是一种典型的非均质的多相复合材料, 内部存在大量的天然缺陷, 为减小岩石内部缺陷对试验结果造成的误差, 试验中采用均质性较好的红砂岩, 岩石试样采自湖南某岩石加工厂, 岩石表观为暗红色, 表面没有宏观缺陷, 破坏后的岩石断面没有明显宏观缺陷。为满足测试要求^[31], 将动力学岩石测试试样加工为圆柱形, 其高度 l_s 和直径 D_s 分别为 30 mm 和 50 mm, 图 2 为加工好的动力学测试试样照片。使用 YAD-2000 微机控制全自动压力试验机对岩石试样静力学性质进行测试, 岩石单轴抗压强度为 58.2 MPa, 抗拉强度为 2.6 MPa。

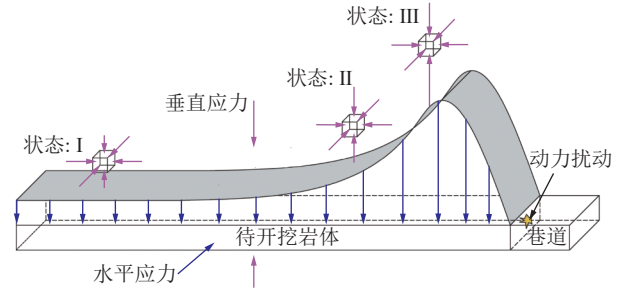


图 1 巷道掘进面岩石应力状态

Fig.1 Rock stress state at roadway working face

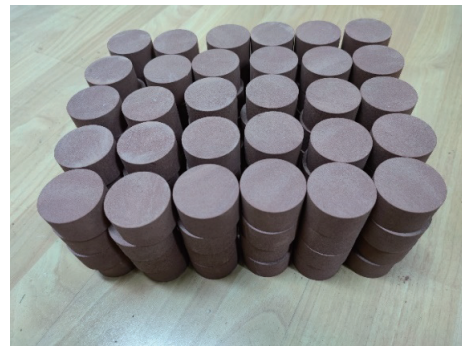


图 2 制备好的测试试样

Fig.2 Picture of prepared samples for dynamic test

1.2 试验系统

试验所用的分离式霍普金森杆(SHPB)装置主要由 4 部分组成, 包括动力控制系统、杆件系统、数据采集系统和围压加载系统等, 图 3 为试验系统示意图。杆的弹性模量 E_b 为 206 GPa, 波速 C_b 为 5 106 m/s, 杆的直径 D_b 均为 50 mm, 撞击杆、入射杆、透射杆长度分别为 400、3 000、2 500 mm。所用应变片对称的黏贴在杆中部两侧, 应变片阻值为 120 Ω , 灵敏度为 2.08, 增益为 1 000, 桥路电压为 2 V, 采集电路采用半桥对臂电路。

霍普金森杆动力学试验中, 当撞击杆打击入射杆后, 将产生向前传播的压缩波 σ_0 , 在应力波传播过程中, 通过应变片记录下应力波在传播过程中的入射波 $\varepsilon_{in}(t)$, 当应力波到达试样后, 部分应力波反射回入射杆形成反射波 $\varepsilon_{re}(t)$, 部分应力波透过试样, 传递至透射杆形成透射波 $\varepsilon_{tr}(t)$ 。根据应力波传播原理^[32], 可按式(1)计算岩石应力 $\sigma_s(t)$, 应变 $\varepsilon_s(t)$ 及应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$:

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = [E_b A_b / (2A_s)] [\varepsilon_{in}(t) + \varepsilon_{re}(t) + \varepsilon_{tr}(t)] \\ \varepsilon_s(t) = (C_b / l_s) \int_0^{t_0} [\varepsilon_{in}(t) - \varepsilon_{re}(t) - \varepsilon_{tr}(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = (C_b / l_s) [\varepsilon_{in}(t) - \varepsilon_{re}(t) - \varepsilon_{tr}(t)] \end{cases} \quad (1)$$

1.3 试验加载方案

主要通过对岩石试样施加不同的轴压 σ_a 和围

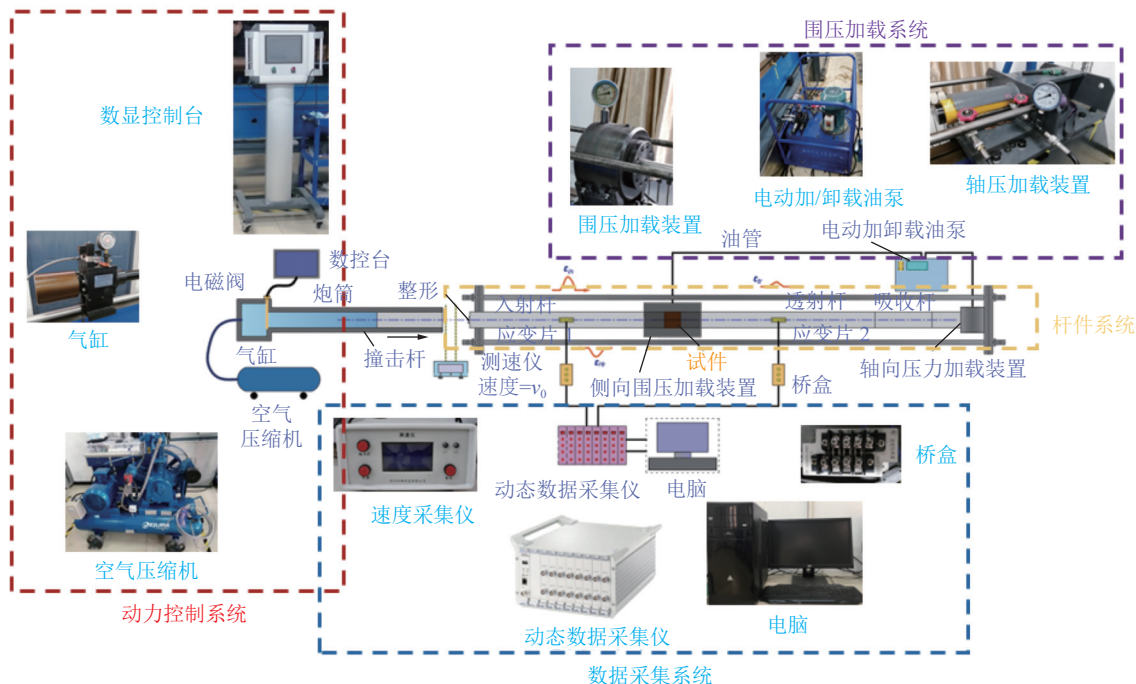


图3 分离式霍普金森杆实验系统示意

Fig.3 Schematic diagram of SHPB experimental system

压 σ_1 来模拟不同的初始应力场状态。如图 4 所示, 试验设计了 3 种工况, 工况一为轴压大于围压, 工况二为轴压小于围压, 工况三为轴压与围压相等。轴压与围压均设计为 6 个水平: 4、8、12、16、20、24 MPa。当轴压为 4 MPa, 围压在 4~24 MPa 变化, 其余应力组合方式依次类推。试验中冲击气压 P_0 均为 0.7 MPa。对岩石试样施加不同的轴围压时, 首先对试样预加载 0.1 MPa 的轴压, 防止施加围压时杆端与试样产生缝隙, 随后同步施加轴向和围压, 当某一方向围压达到设计值后停止加载, 另一方向继续施加压力, 直到达到设计值后停止施加围压。

2 动力学试验结果分析

2.1 动态应力平衡及应力-应变曲线分析

采用 SHPB 试验系统进行材料的动态力学性能测试时, 主要需要满足 2 个假设, ①平截面假设, 即在应力波的传播过程中, 波导杆中的任一横截面应力始终保持平面状态; ②应力均匀假设, 即应力波在试样中传播时, 试样中的应力处处近似相等^[33-34]。本试验中采用硬橡胶作为整形器, 将整形器置于入射杆自由端, 图 5 给出了试验后典型的试验及平衡曲线, 可以看出动力学加载过程中可以满足动态力平衡条件。

图 6 为红砂岩试样在 3 种不同非静水压力条件下的动态应力应变曲线, 由图 6 可知, 围压组合方式

对应力应变曲线的形态分布影响较小, 不同非静水压力状态下的应力应变曲线均可分为 5 个阶段, 第 I 阶段为弹性阶段, 此时岩石体积收缩, 能量在岩石内部累积, 但与静载下明显的下凹型曲线不同, 该阶段岩石表现出线弹性特征, 表明在冲击荷载作用下岩石没有出现压密过程, 这可能是由于在预应力作用下岩石内部部分微裂纹已发生闭合, 在动态荷载下其余微裂纹来不及发生闭合导致的; 第 II 阶段为裂纹萌生扩展阶段, 此时岩石中积聚了足够的能量, 原有微缺陷将被激活起裂, 裂纹扩展方向与非静水压主应力及动载方向密切相关, 该阶段压缩模量略有降低; 第 III 阶段为裂纹不稳定快速扩展阶段, 由于试样内裂纹的持续扩展, 部分裂纹间贯通或合并, 岩石产生不可逆的损伤和扩容, 该阶段压缩模量进一步降低; 第 IV 阶段为峰后阶段, 岩石已经形成宏观破坏裂纹, 将试样切割成若干块, 但由于围压作用, 试样整体上仍保持完整, 试样承载力缓慢下降, 应变快速增加; 第 V 阶段为回弹阶段, 该阶段岩石虽已破坏, 但并未出现粉碎性破坏, 试样仍保持完整, 岩石内部储存的弹性能释放, 导致试样出现小幅度的反弹。

2.2 岩石动态强度的轴压效应

参考李夕兵等^[35]研究方法, 岩石动力学性质分为初始压力和动态强度, 二者之和为组合应力, 采用组合应力的方式对岩石动力学强度进行描述。从图 7 中可以发现, 当围压一定时, 岩石的动态强度随着轴

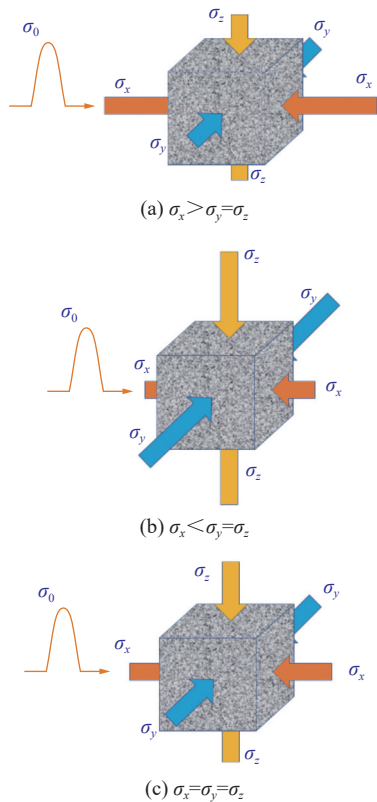


图4 3种轴围压组合加载方式
Fig.4 Three loading modes of combined axial-lateral confining pressure

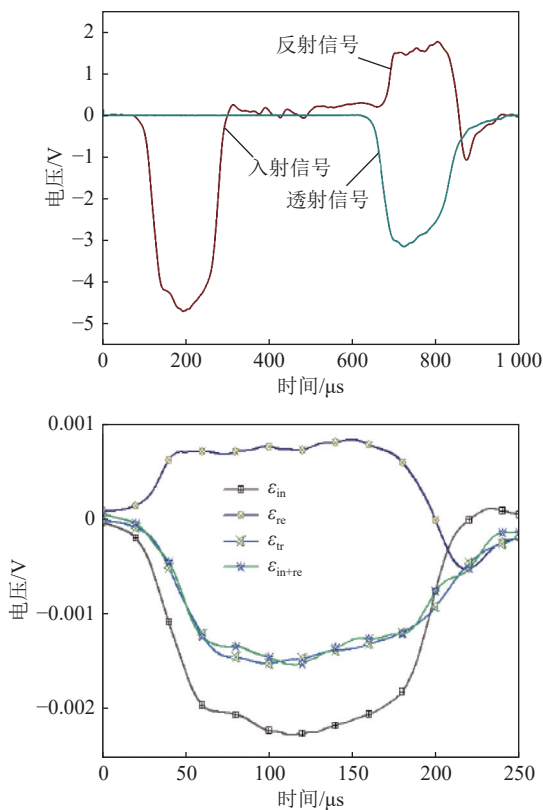


图5 典型动态试验及平衡曲线
Fig.5 Typical dynamic stress balance curve

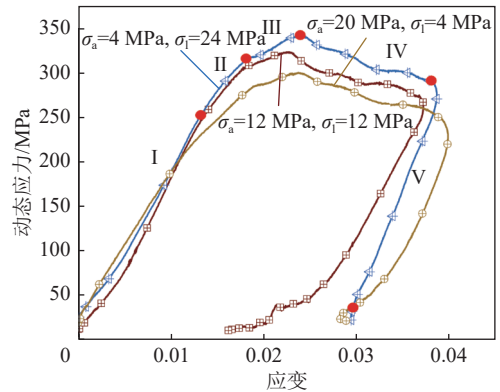


图6 典型岩石动态应力-应变曲线
Fig.6 Typical rock dynamic stress-strain curve

压的增加表现出先略有增加后快速减小的趋势，强度变化以轴压 8 MPa 时为转折点。从围压为 4 MPa 时的动态强度随轴压变化规律分析可知，当轴压由 4 增加至 8 MPa 时，岩石动态强度 316.11 MPa 增大至 319.13 MPa，随着轴压持续增加，岩石的动态强度不断减小。同时从图 7 可以发现，在轴压为 8~24 MPa 范围内，岩石动态强度的下降速率随着围压的增加而减小，这是由于随着围压的增加，对试样的横向变形约束作用增大，岩石抵抗变形的能力和承载力增加。岩石动态强度与轴压的关系与李夕兵及金解放等^[35-36]的研究结果具有相似的规律性，即动态强度随轴压的增加出现先增加后减小的趋势。分析认为，当轴向预应力较小时，岩石内部裂纹在预应力作用下发生闭合，且杆件与试样处的摩擦力对岩石变形具有约束作用，因此岩石强度提升；但当轴向预应力较大时，岩石内部不仅发生原生裂纹的闭合，同时还会伴随新的微裂纹萌生，应力波作用时在裂纹处形成反射拉伸，从而加剧岩石的破坏，导致岩石承载能力降低。

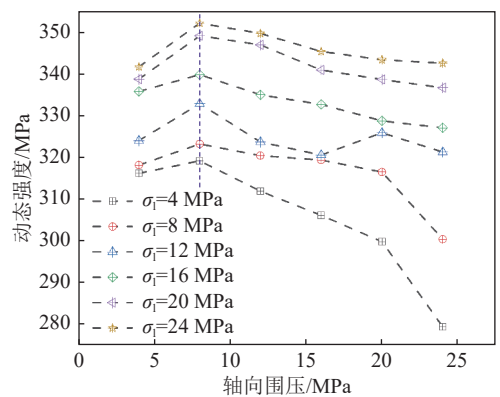


图7 岩石动态强度的轴压效应
Fig.7 Effect of axial confining pressure on rock dynamic strength

2.3 岩石动态强度的围压效应

从图8中可以发现,当轴压一定时,岩石的动态强度随着围压的增加而增大,表明围压对岩石动态强度具有强化作用,这是由于当围压增加后,限制了岩石的变形,岩石中裂纹的萌生和扩展需要更多的能量,导致岩石强度的增加。对岩石强度与围压的数据进行线性拟合,拟合后发现岩石强度与围压表现出较好的线性正相关关系(式(2)),从拟合后的曲线斜率可知,随着围压的增加,岩石动态强度随着围压的变化速率总体上呈现出逐渐增加的趋势,围压的增加对于轴压为24 MPa的岩石强度提升最为明显。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = 4 \text{ MPa}, \sigma_d = 308.92 + 1.43\sigma_1, R^2 = 0.9487 \\ \sigma_a = 8 \text{ MPa}, \sigma_d = 311.04 + 1.78\sigma_1, R^2 = 0.9843 \\ \sigma_a = 12 \text{ MPa}, \sigma_d = 303.24 + 2.00\sigma_1, R^2 = 0.9734 \\ \sigma_a = 16 \text{ MPa}, \sigma_d = 300.15 + 1.95\sigma_1, R^2 = 0.9701 \\ \sigma_a = 20 \text{ MPa}, \sigma_d = 296.74 + 2.05\sigma_1, R^2 = 0.9469 \\ \sigma_a = 24 \text{ MPa}, \sigma_d = 274.82 + 3.07\sigma_1, R^2 = 0.9304 \end{array} \right. \quad (2)$$

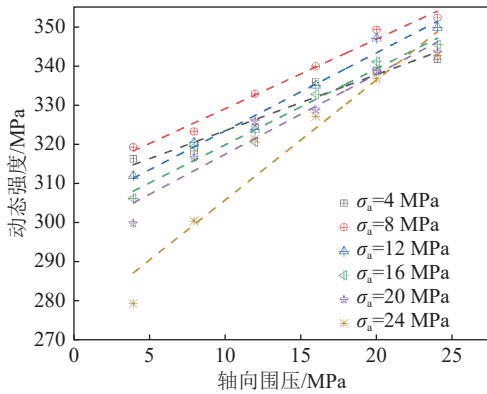


图8 岩石动态强度的围压效应

Fig.8 Effect of lateral confining pressure on rock dynamic strength

3 非静水压力条件下岩石能量分布规律

谢和平等^[21,37]从能量的角度分析岩石的变形破坏过程,提出岩石材料的破坏本质上是能量耗散以及能量释放的结果,岩石材料在受载后内部能量积聚,获得的能量将用于材料内部裂纹的萌生、扩展和贯通,最终导致材料的破坏,因此从能量的角度分析非静水压力对岩石耗散能的影响具有重要意义。根据试验中得到的入射波 $\epsilon_{in}(t)$ 、反射波 $\epsilon_{re}(t)$ 和透射波 $\epsilon_{tr}(t)$,结合弹性杆的物理力学参数弹性模量 E_b 、纵波波速 C_b 、截面面积 A_b ,基于应力波和冲击动力学理论,可以分别计算出入射能 E_{in} 、反射能 E_{re} 和透射能

E_{tr} ,计算方法如式(3)所示^[38]:

$$E_j = A_b E_b C_b \int \epsilon_j^2 dt, \quad j = in, re, tr \quad (3)$$

根据能量守恒原理,由撞击杆产生的入射能为输入能,部分能量沿弹性杆释放,部分能量则用于岩石的变形及破坏,忽略岩石与弹性杆的摩擦耗能,以及岩石变形破坏过程中的声能、电磁能等,则可以认为加载过程中试样消耗的耗散能 E_{ab} 为入射能与反射能、透射能的差值,计算公式如式(4)所示。

$$E_{ab} = E_n - E_{nz} - E_b \quad (4)$$

3.1 耗散能的轴压效应分析

图9为耗散能随轴压的变化趋势,可以明显的看出,在围压一定时,耗散能随着轴压的增加而减小,呈现线性关系,如式(5)所示。从岩石材料的变形破坏过程中对能量吸收进行分析,在输入一定的能量后,岩石内部的原生缺陷被激活起裂,或在岩石内薄弱处形成新的裂纹,但裂纹起裂后因能量的耗散和应力分布的转化而使得裂纹尖端应力消驰,导致裂纹在扩展较小距离后即止裂,此时细观裂纹均匀的分布在岩石内部;当继续输入的能量足够后,原有的裂纹尖端形成应力集中,积聚足够的能量后再次起裂,裂纹间相互贯通和交汇,并最终形成宏观主裂纹,最终导致岩石的破坏。轴压的存在一方面对于岩石受载后的变形产生约束,导致岩石的承载能力提高,耗散能降低,另一方面,轴压的施加使得岩石材料本身发生变形,导致岩石内部空隙的闭合,岩石的承载力增强,耗散能降低。根据王春等^[39]的研究,岩石在预加载后岩石内储存的能量与轴向及围压有关,当轴压足够大时,岩石内部积聚能量将引起微裂纹的起裂,使得岩石在动载作用下更易发生破坏,承载能力降低。可见,岩石试样的耗散能随轴压的变化规律较为复杂,不仅涉及轴压作用下岩石本身的变形,还与轴压对岩石变形的约束作用有关。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = 4 \text{ MPa}, E_{ab} = 616.74 - 8.42\sigma_a, R^2 = 0.8257 \\ \sigma_1 = 8 \text{ MPa}, E_{ab} = 553.97 - 3.39\sigma_a, R^2 = 0.8257 \\ \sigma_1 = 12 \text{ MPa}, E_{ab} = 570.22 - 5.13\sigma_a, R^2 = 0.8267 \\ \sigma_1 = 16 \text{ MPa}, E_{ab} = 577.63 - 7.03\sigma_a, R^2 = 0.8675 \\ \sigma_1 = 20 \text{ MPa}, E_{ab} = 548.99 - 6.43\sigma_a, R^2 = 0.8244 \\ \sigma_1 = 24 \text{ MPa}, E_{ab} = 512.71 - 5.63\sigma_a, R^2 = 0.8734 \end{array} \right. \quad (5)$$

3.2 耗散能的围压效应分析

由图10可以看出,当轴压一定时,岩石耗散能随围压变化较为复杂,当轴压较低(4~16 MPa)时,耗散能随着围压的增加而逐步减小,原因在于当轴

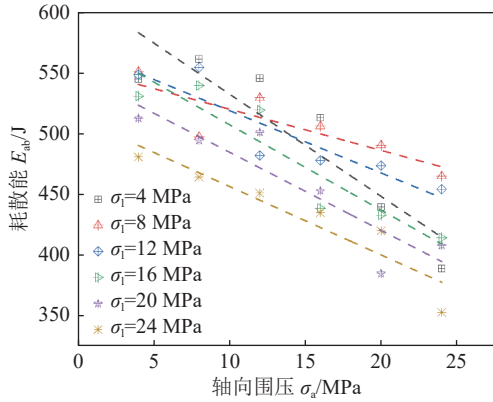


图 9 岩石耗散能随轴压变化规律

Fig.9 Variation of dissipative energy of rock with axial confining pressure

压较低时,与岩石内部微观裂纹发育受到限制有关,当轴压较大(20~24 MPa)时,岩石耗散能先随着围压的增加而增大;当围压超过 8 MPa 后,耗散能随着围压增加而减小。这是由于在高轴压作用下,岩石内部已经产生损伤,当围压较低时,岩石内部初始裂纹已经开始扩展,导致其对能量的耗散能力降低,随着围压增加,岩石内部初始裂纹发育受到限制,岩石变形破坏需要更多的能量,其对能量的耗散能力增强。

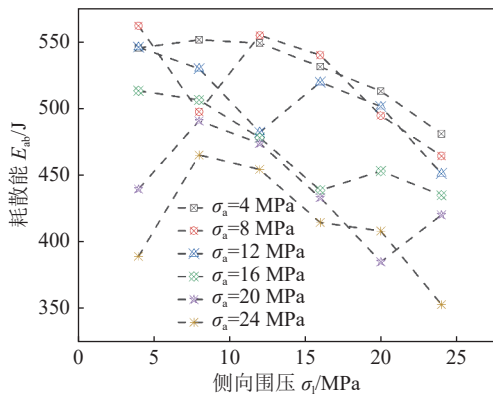


图 10 岩石耗散能随围压变化规律

Fig.10 Variation of dissipative energy of rock with confining pressure

3.3 岩石单位体积能量吸收值

为了分析岩石试样在不同非静水压条件下对能量的耗散能力,引入参数岩石单位体积能量吸收值 η_s 来进行表征,其值为耗散能与岩石体积的比值,按照式(6)进行计算可以得到。

$$\eta_s = E_{ab}/V_s \quad (6)$$

图 11 为岩石单位体积能量吸收值随非静水压的变化特征,可以看出,在冲击荷载相同时,整体上

岩石的单位体积能量吸收值随着围压的提高而降低。这是因为低围压时岩石内部薄弱处的首先发生屈服破坏,此时微裂纹间的摩擦力较小,不能抑制裂缝的滑移,因而在冲击荷载作用下岩石内部裂缝的开展贯通较容易;如前所述,随着围压的提高,岩石内部颗粒咬合作用增强,冲击荷载作用下产生的损伤单元较小,宏观裂纹面沿薄弱处产生,各截面的滑移运动同样受到限制,因而表现出岩石单位体积能量吸收值随着围压增加而减小的负相关性特征。

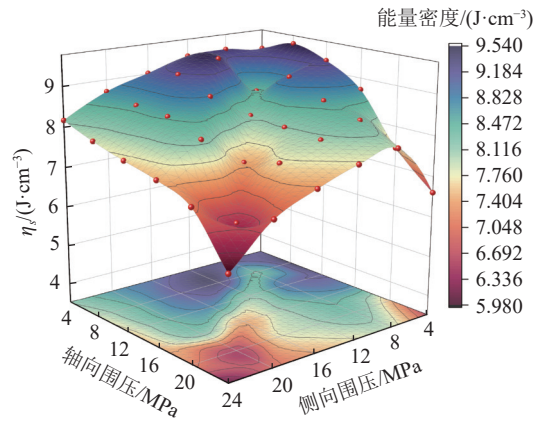


图 11 岩石单位体积能量吸收值随非静水压的变化规律
Fig.11 Variation of rock energy absorption per unit volume with non-hydrostatic pressure

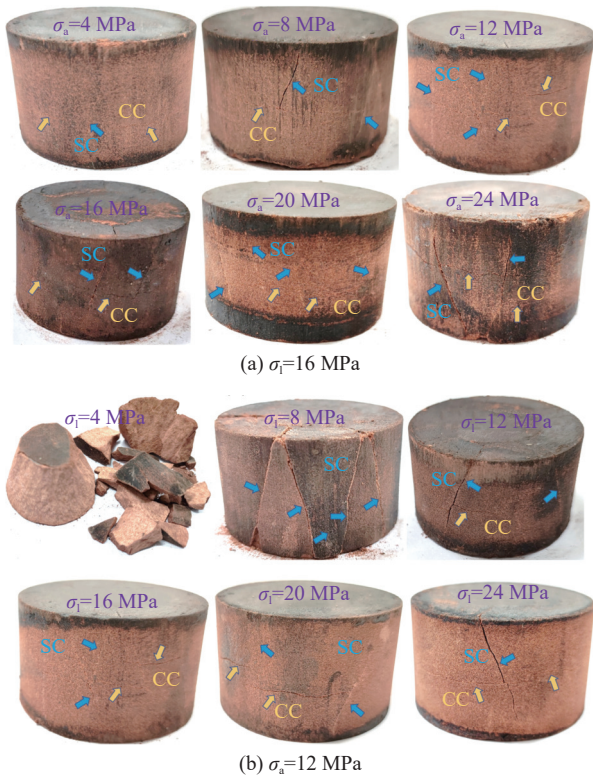
4 试样破坏形态分析

4.1 岩石侧面表现宏观破坏形态

深部地下工程中,岩体受载扰动后的破坏形态与工程掘进及围岩支护密切相关,因此需对动载作用下的岩石试样破坏形态进行分析。

限于篇幅,选取较为典型的试样进行分析,图 12a 为围压为 16 MPa 时轴压由 4 MPa 逐渐增加至 24 MPa 时的试样侧面破坏形态。从图 12a 中可以发现,岩石侧面裂纹主要为剪切裂纹和环向裂纹 2 种,随着轴压的增加,岩石试样侧面的剪切裂纹数量及长度均有所增加;但环向裂纹的分布随轴压的变化没有明显的规律性,环向裂纹的连通性、长度、数量与轴压均未表现出明显的关联。

图 12b 为在轴压 12 MPa 时岩石试样侧面破坏形态随围压的变化特征,从图 12b 中发现,当围压为 4~8 MPa 时,试样破坏较为严重,试样周边岩块破坏后与中心圆台状岩块剥离,此时侧面破坏仅存在剪切裂纹;当围压为 12 MPa 时,试样中开始出现环向裂纹,环向裂纹与剪切裂纹交汇在试样中部;当围压为 16~24 MPa 时,岩石试样中剪切裂纹数量没有



SC—剪切裂纹; CC—环向裂纹

图 12 试验后试样侧面破坏形态

Fig.12 Sample lateral failure mode after testing

明显的变化,环向裂纹仍分布在试样的中部,但其长度和连通性明显随着围压的增加而增加,在围压为 24 MPa 时,环向裂纹达到最长,几乎贯穿整个试样。

4.2 岩石端面表现宏观破坏形态

为进一步分析岩石试样所处非静水压状态对岩石破坏形态的影响规律,选取与分析侧向破坏形态一致的试样,对其端面(与入射杆接触端)裂纹分布进行分析。图 13 为围压为 16 MPa 时,轴压由 4 MPa 提升至 20 MPa 时的试样端面形态及数值化处理后

裂纹分布图,可以发现,试样端面破坏可以分为中心完整区和周边裂隙区,图 13 中蓝色线条沿裂纹扩展轨迹绘制,红色圆形以岩样中心为原点,以裂纹距中心最近点为半径绘制。由图 13 可知,周边裂隙区的裂纹沿径向发育,随轴压的提升,裂纹发育数量增加,当轴压为 4 MPa 时,存在 1 条径向裂纹,当轴压为 8 MPa 时,径向裂纹数量增加为 5 条,随着轴压进一步提升至 12、16、20 MPa 时,径向裂纹数量逐渐增加,当轴压为 24 MPa 时,周边岩块与中心岩块剥离。综上所述,轴压的提升虽加强了对岩石轴向变形的约束,但轴向预应力的增加使得岩石内部储存的能量增加,将促进岩石的破坏。

图 14 为轴压为 12 MPa 时,围压为 8~24 MPa 时的试样端面形态及数值化处理后裂纹分布图,可以明显的看出,当轴压一定时,随着围压的增加岩石端面破坏程度逐步降低,在围压为 8 MPa 时,发育较多的径向裂纹,当围压为 12 MPa 时,径向裂纹数量减少为 8 条,当围压进一步增加至 16 MPa 和 20 MPa 时,径向裂纹数量快速减小,在围压为 24 MPa 时,试样端面存在 2 条对称的径向裂纹。分析认为,岩石端面的径向裂纹受侧向围压影响显著,侧向围压越大,径向裂纹数量越少,这是因为端面裂纹的扩展是岩石在动载作用下产生横向变形,向周边膨胀,在拉应力驱动下产生径向裂纹,但侧向围压的存在限制岩石的横向变形膨胀,当输入能一定时,高围压条件下岩石端面径向裂纹扩展需要克服更多的阻力,因此径向裂纹更少。

分形理论已广泛应用于岩石等不连续材料破坏的分析^[40-42],在外界载荷扰动下岩石会产生裂隙而导致损伤和破坏,岩石破坏块度和裂纹分布特征满足分形原理,因此其破坏程度可以用分形维数来表

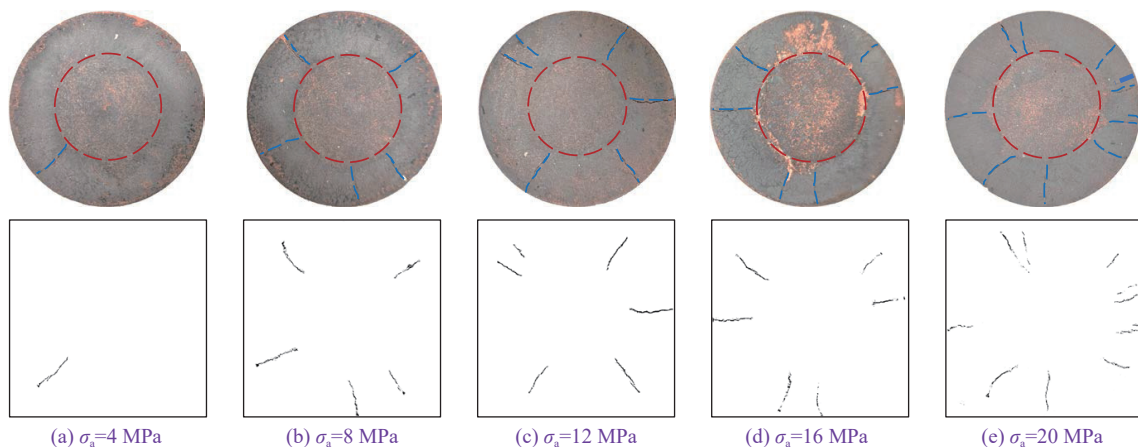


图 13 试验后试样端面破坏形态及裂纹分布 ($\sigma_c=16$ MPa)

Fig.13 Failure mode of sample end after testing ($\sigma_c=16$ MPa)

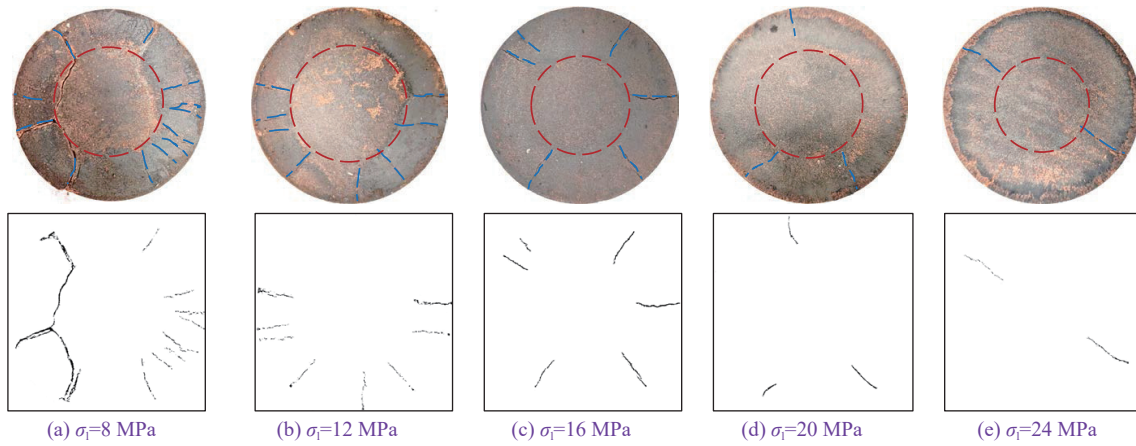


图 14 试验后试样端面破坏形态及数值化裂纹分布(σ_a=12 MPa)

Fig.14 Failure mode of sample end after testing (σ_a=12 MPa)

征。通过引入分形维数,建立材料损伤程度 ω 和分形维数 D 之间的关系:

$$\omega = \frac{D_t - D_1}{D_t^{\max} - D_0} \quad (7)$$

其中, D_t 为介质损伤区域的分形维数; D₀ 为未扰动时材料中初始损伤区域的分形维数,在本实验中,由于原始试样是完整的,所以 D₀=0; D_t^{max} 为材料达到最大损伤区域时的分形维数,对于平面问题, D_t^{max}=2; 对于三维问题, D_t^{max}=3。岩石分形维数采用 Matlab 二维分形维数计算程序得到,结果如图 15 所示。

可以发现,当围压为 16 MPa 时,随着轴压的增加,岩石端面的损伤度分别为 0.486, 0.535, 0.542, 0.538, 0.551, 整体上呈增大趋势,采用线性拟合方法得到损伤度随轴压的变化规律,如图 16a 所示。当轴压保持恒定时,随着围压由 8 MPa 逐渐增加至 24 MPa,岩石表面损伤度由 0.640 减小至 0.464,如图 16b 所示。为分析轴围压比对端面损伤的影响,定义轴围压比 ζ=σ_a/σ₁,建立轴围压比与损伤的关系,如图 16c 所示,可以看出,在不同的应力组合方式下,岩石端面损伤随轴、围压之比变化趋势基本一致,但随应力组合方式有所差异。

4.3 岩石内部微观裂隙形态分析

岩石材料的破坏模式与其所处初始应力场紧密相关,如图 17 所示。在无围压条件下,岩石不存在约束及内部初始应力,此时岩石的临界破坏模式以轴向劈裂破坏为主,岩石的破坏由横向拉应力控制,横向拉应力的产生是由于纵向压缩变形产生泊松效应引起的横向拉应力导致的^[43];当岩石存在轴向初始应力时,在冲击荷载作用下,试样同样发生由于轴向压缩变形及泊松效应引起的横向变形,但由于轴压的存在,岩石与杆件接触端面间形成较大的摩擦

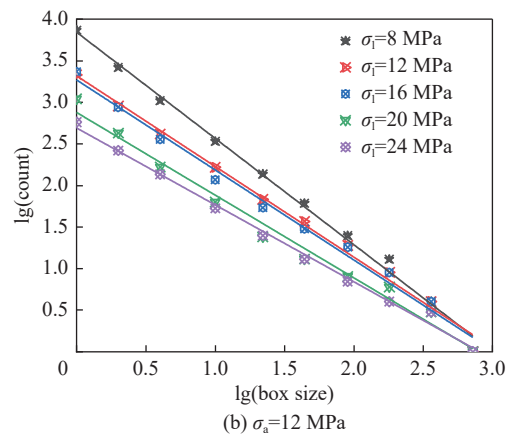
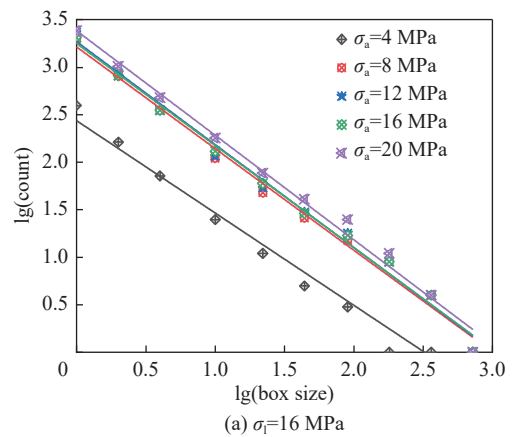


图 15 分形计算结果

Fig.15 Fractal calculation results

力,约束试样的横向变形,且横向约束由试样端面至中部逐渐减弱,因此发生沿轴向的共轭破裂面^[35,44];当岩石处于三维应力状态时,岩石试样在动载下主要为压剪破坏,破坏后试样可以分为 2 部分: I 为中心圆台形岩块, II 为周边破碎岩块^[27]。

采用 NSI X5000 型工业 CT 对完成试验后的试样进行扫描,获取岩样可得到试样不同位置的横向

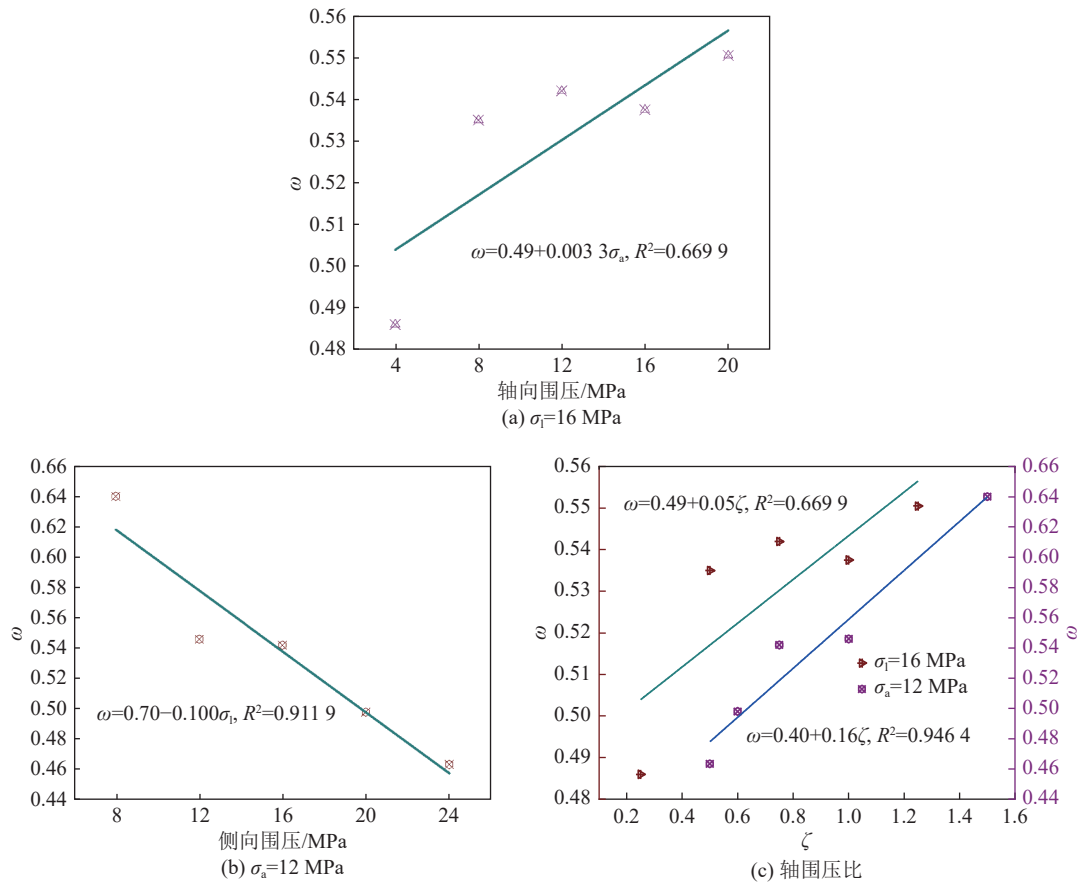


图 16 分形维数随围压及轴围压比变化关系

Fig.16 Relationship between fractal dimension and lateral pressure

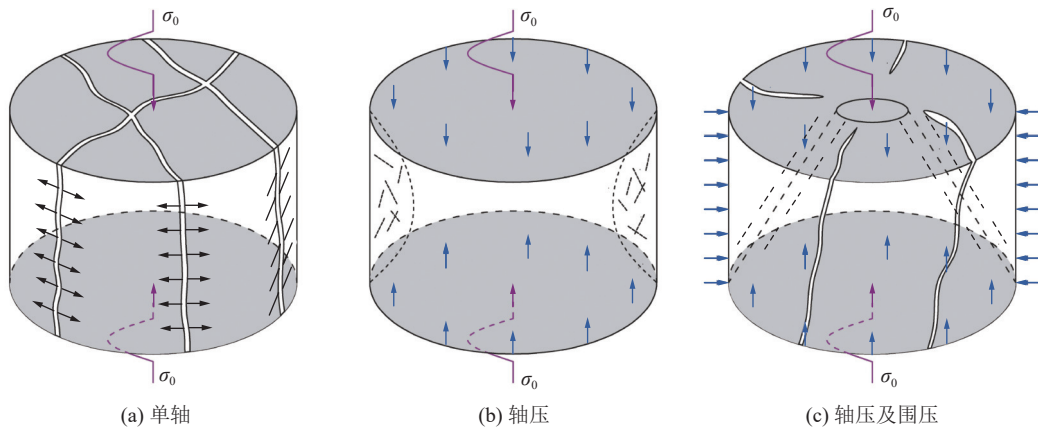


图 17 不同初始应力状态下岩石动态破坏模式

Fig.17 Rock damage pattern in uniaxial or confining pressure state under impact loading

切面图,然后基于三维软件对图像进行重构,得到纵向切面及三维裂隙重构图,如图 18 所示。

由图 18 可以看出,在相同的冲击气压作用下,岩石试样破坏模式受轴围压比影响明显,随轴围压比的增加岩石内部损伤加剧。当轴围压比为 1 : 3 时,岩石试样的横向切片(图 18a)中出现环形破坏裂纹,部分环形裂纹较为明显,并存在少量由试样表面

至环形裂纹面的径向裂纹,当轴围压比为 2 : 1 时,岩石试样的横向切片中出现明显的环形破坏裂纹并形成闭环,与轴围压比为 1 : 3 时相比,由试样表面至环形裂纹面的径向裂纹数量明显增加,部分裂纹穿越环形裂纹发育至岩石内部;从纵向切片(图 18b)可以发现,轴围压比为 1 : 3 时的岩石中存在着典型的剪切裂纹,该切片中出现的三条剪切裂纹与水平

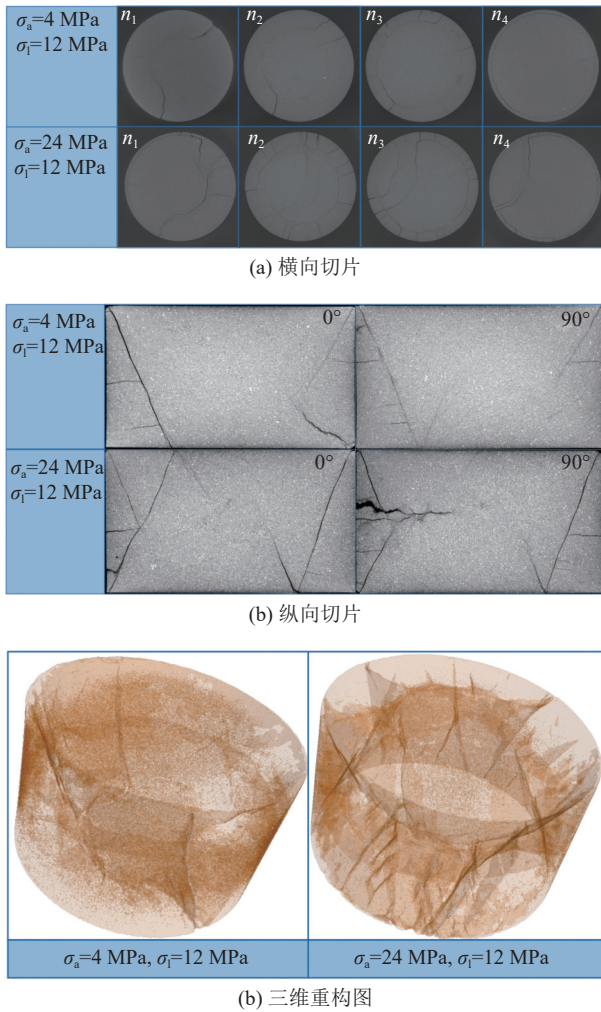


图 18 岩石试样 CT 扫描切片及三维重构

Fig.18 CT scan slices and 3D reconstruction images of rock samples

方向夹角大小基本一致, 约为 70° , 轴围压比为 2 : 1 时的纵向切片中的剪切裂纹数量有所增加, 贯穿试样的剪切裂纹与水平方向同样约为 70° , 随轴围压比变化不大, 其余剪切裂纹与水平方向夹角分布较为随机; 由三维重构图 (图 18c) 可以看出, 两种轴围压比条件下岩石试样均表现为典型的剪切破坏, 试样中出现明显的圆台体, 但对比二者可以发现, 轴围压比为 2 : 1 时的岩石试样内部破坏更为严重, 出现大量的剪切裂纹, 试样中出现近似上下对称的双圆台体。

5 讨 论

岩石力学行为的本质的能量的演化, 基于试验结果及文献 [25,44-45] 对轴压及围压对岩石的耗散能影响规律进行分析。金解放等 [44] 开展了围压为 4 MPa 时不同轴压下的岩石耗散能分布规律研究, 结

果如图 19 所示, 由图 19 可知, 随着轴压的增加, 岩石耗散能有减小的趋势, 这种趋势在冲击速率较低时表现不明显, 在冲击速率较高时较为显著。在围压对岩石耗散能影响研究方面, 吕晓聪等 [45] 研究发现, 当入射能量相同时, 低围压时砂岩试样的比能量吸收值高于其处于高围压时。

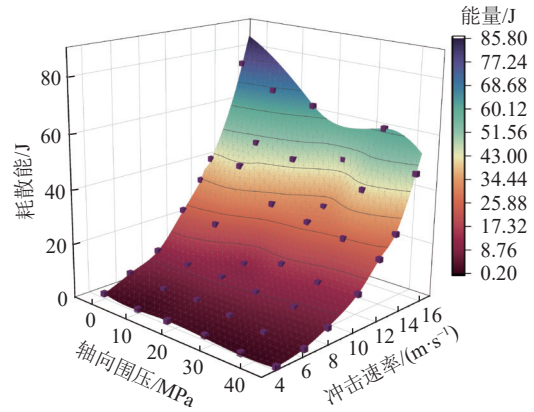


图 19 耗散能随轴压及冲击速率变化规律 (根据文献 [43] 绘制)

Fig.19 Variation of dissipation energy with axial pressure and impact velocities [43]

周宗红等 [25] 利用动静组合霍普金森实验系统研究白云岩在不同轴压及围压组合下的耗散能分布规律, 发现当轴压一定时, 岩石单位体积吸收能随围压变化表现出先增加后减小的特征, 当围压一定时, 岩石单位体积吸收能随轴压的变化表现出相似的规律。可见, 岩石耗散能随轴压及围压变化规律较为复杂, 分析认为, 这既与岩石材料本身性质相关, 也与初始非静水压力条件下岩石结构变化及内部储能密切相关, 有待进一步研究和厘清。

基于以上分析可知, 轴围压比对岩石动力学行为及能量耗散影响显著, 对工程实践具有一定的指导意义。如在钻爆法进行巷道掘进时, 一方面需要对巷道轮廓内岩石进行高效破碎, 另一方面需要尽量保护巷道轮廓外围岩, 而在目前的工程爆破中, 尚未充分考虑地应力对孔网参数选取的影响。基于试验结果, 当岩体处于轴围压比较高的应力场环境时, 可适当增加炮眼间距, 或减少药量, 当轴围压比较小时, 则需提高炸药单耗。同时, 可根据不同位置处岩石所处应力状态及应力波衰减规律, 推断不同位置处岩石所受荷载及破坏程度, 从而进行差异化支护。

6 结 论

1) 轴压和围压均对岩石动态强度产生显著影响, 岩石的动态强度随着轴压的增加表现出先略有增加

后快速减小的趋势,轴压为8 MPa时为临界值;岩石动态强度随围压的增加持续增大,且动态强度的增长速率与轴压大小有关。

2)围压一定时,岩石耗散能随着轴压的增加呈线性负相关关系。耗散能与围压变化关系较为复杂,当轴压为4~16 MPa时,耗散能随着围压的增加而减小,当轴压为20~24 MPa时,岩石耗散能随围压增加表现出先增加后减小的趋势。

3)对试样的表观破坏形态分析发现,当轴压增加时,岩石的破坏程度加剧,而围压的提升则使得岩石破坏程度降低,不同应力状态下岩石端面损伤随轴围压比变化规律基本一致。从岩石内部破坏模式可以看出,非静水压条件下,岩石的破坏可分为中心圆台形岩块和周边破碎岩块两部分,中心圆台形岩块由压剪破坏形成,随着轴围压比增加,岩石破坏程度加剧。

参考文献(References):

- [1] YANG R, DING C, LI Y, *et al.* Crack propagation behavior in slit charge blasting under high static stress conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 117-123.
- [2] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 211.
- [3] ZHANG Y, YIN S, ZHANG J. In situ stress prediction in subsurface rocks: an overview and a new method[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 1-11.
- [4] 赵星光,王 驹,秦向辉,等.中国高放废物地质处置地下实验室场址深部岩体地应力测量及工程应用[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2634-2645.
ZHAO X G, WANG J, QIN X H, *et al.* In-situ stress measurements at depth and engineering application at China's underground research laboratory site for high-level radioactive waste disposal[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2634-2645.
- [5] LI X, ZHOU Z, ZHAO F, *et al.* Mechanical properties of rock under coupled static-dynamic loads[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, 1(1): 41-47.
- [6] 王传乐,杜广印,李二兵,等.北山深部花岗岩常规三轴压缩条件下的强度参数演化及能量耗散[J].*岩石力学与工程学报*, 2021, 40(11): 2238-2248.
WANG C L, DU G Y, LI E B, *et al.* Evolution of strength parameters and energy dissipation of Beishan deep granite under conventional triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(11): 2238-2248.
- [7] 王明洋,李 杰,李凯锐.深部岩体非线性力学能量作用原理与应用[J].*岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 659-667.
WANG M Y, LI J, LI K R. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 659-667.
- [8] 尤业超,李二兵,谭跃虎,等.基于能量耗散原理的盐岩动力特性及破坏特征分析[J].*岩石力学与工程学报*, 2017, 36(4): 843-851.
YOU Y C, LI E B, TAN Y H, *et al.* Analysis on dynamic properties and failure characteristics of salt rock based on energy dissipation principle[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(4): 843-851.
- [9] 陈 静,江 权,冯夏庭,等.含初始损伤大理岩的时效变形与破坏试验研究[J].*工程科学与技术*, 2018, 50(5): 27-37.
CHEN J, JIANG Q, FENG X T, *et al.* Experiment Study of Time-dependent Deformation and Failure of Original Damage Marble[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 27-37.
- [10] 左建平,陈 岩,宋洪强.深部煤岩组合体破坏行为与非线性模型研究进展[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2510-2521.
ZUO J P, CHEN Y, SONG H Q. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2510-2521.
- [11] LIU K, ZHAO J, WU G, *et al.* Dynamic strength and failure modes of sandstone under biaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128.
- [12] 夏开文,王 帅,徐 颖,等.深部岩石动力学实验研究进展[J].*岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 448-475.
XIA K W, WANG S, XU Y, *et al.* Research progress in deep rock dynamics experiments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 448-475.
- [13] LIU P, ZHOU X, QIAN Q. Experimental investigation of rigid confinement effects of radial strain on dynamic mechanical properties and failure modes of concrete[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 939-951.
- [14] 杨国梁,毕京九,张志飞,等.被动围压下层理角度对页岩动态强度及耗能的影响[J].*矿业科学学报*, 2021, 6(2): 188-195.
YANG G L, BI J J, ZHANG Z F, *et al.* Study on the influence of the bedding angle under passive confining pressure on the dynamic strength and energy consumption of shale[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(2): 188-195.
- [15] 李成武,王金贵,解北京,等.煤岩材料SHPB实验被动围压数值模拟研究[J].*采矿与安全工程学报*, 2014, 31(6): 957-962.
LI C W, WANG J G, XIE B J, *et al.* Numerical analysis of split Hopkinson pressure bar test with passive confined pressure for coal[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(6): 957-962.
- [16] GONG F, SI X, LI X, *et al.* Dynamic triaxial compression tests on sandstone at high strain rates and low confining pressures with split Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 211-219.
- [17] DU H, DAI F, WEI M, *et al.* Dynamic Compression-Shear Response and Failure Criterion of Rocks with Hydrostatic Confinement

- ing Pressure: An Experimental Investigation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(2-3): 1-17.
- [18] WU B, YAO W, XIA K. An Experimental Study of Dynamic Tensile Failure of Rocks Subjected to Hydrostatic Confinement[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 49(10): 1-10.
- [19] 徐松林, 王鹏飞, 单俊芳, 等. 真三轴静载作用下混凝土的动态力学性能研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(15): 59-67.
- XU S L, WANG P F, SHAN J F, *et al.* Dynamic behavior of concrete under static tri-axial loadings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(15): 59-67.
- [20] LIU K, ZHANG Q, WU G, *et al.* Dynamic Mechanical and Fracture Behavior of Sandstone Under Multiaxial Loads Using a Triaxial Hopkinson Bar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 2175-2195.
- [21] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3565-3570.
- XIE H P, PENG R D, JU Y. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3565-3570.
- [22] 王 文, 李化敏, 顾合龙, 等. 动静组合加载含水煤样能量耗散特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3965-3971.
- WANG W, LI H M, GU H L, *et al.* Feature analysis of energy dissipation of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3965-3971.
- [23] 刘少虹, 毛德兵, 齐庆新, 等. 动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S1): 15-22.
- LIU S H, MAO D B, QI Q X, *et al.* Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S1): 15-22.
- [24] 马少森, 陈卫忠, 赵武胜. 三维动静组合加载下花岗岩能量耗散试验研究[J]. *山东大学学报:工学版*, 2019, 49(3): 95-102.
- MA S S, CHEN W Z, ZHAO W S. Experimental study on energy dissipation of granite subjected to three-dimensional coupled static and dynamic loading[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2019, 49(3): 95-102.
- [25] 周宗红, 章雅琦, 杨安国, 等. 白云岩三维动静组合加载力学特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 1030-1036.
- ZHOU Z H, ZHANG Y Q, YANG A G, *et al.* Experimental study on mechanical characteristics of dolomite under three-dimensional coupled static-dynamic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 1030-1036.
- [26] 赵光明, 马文伟, 孟祥瑞. 动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3598-3605, 3624.
- ZHAO G M, MA W W, MENG X R. Damage modes and energy characteristics of rock-like materials under dynamic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12): 3598-3605, 3624.
- [27] 王 伟, 梁渲钰, 张明涛, 等. 动静组合加载下砂岩破坏机制及裂纹密度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2647-2658.
- WANG W, LIANG X Y, ZHANG M T, *et al.* Experimental study on sandstone failure mechanism and crack density under combined dynamic and static loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2647-2658.
- [28] 杜超超, 温 森, 孔庆梅. 一维动静组合加载下复合岩样动力学特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(21): 168-178, 206.
- DU C C, WEN S, KONG Q M. Tests for dynamic mechanical properties of composite rock samples under 1-D dynamic-static combined loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(21): 168-178, 206.
- [29] 宋常胜, 王 文, 刘 凯, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样能量耗散特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 2011-2026.
- SONG C S, WANG W, LIU K, *et al.* Energy dissipation of saturated coal specimen by using a true triaxial Hopkinson bar system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 2011-2026.
- [30] 刘志义, 甘德清, 于泽峰, 等. 一维动静组合加载下磁铁矿岩石力学特性及破碎特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 2869-2880.
- LIU Z Y, GAN D Q, YU Z H, *et al.* Experimental research on the dynamic mechanical properties and breakage behavior of magnetite under one-dimensional coupled dynamic and static loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 2869-2880.
- [31] ZHOU Y, XIA K, LI X, *et al.* Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 105-112.
- [32] 王礼立. 应力波基础(2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- WANG L L. *Fundamentals of Stress Waves (2nd edition)*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [33] CHEN W, LU F, FREW D J, *et al.* Dynamic compression testing of soft materials[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, 69(3): 214-223.
- [34] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93-106.
- [35] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 251-260.
- LI X B, GONG F Q, ZHAO J, *et al.* Test study of impact failure of rock subjected to onedimensional coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 251-260.
- [36] 金解放, 杨 益, 廖占象, 等. 动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 1990-2002.
- JIN J F, YANG Y, LIAO Z X, *et al.* Effect of dynamic loads and geo-stresses on response characteristics of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 1990-2002.
- [37] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2603-2608.
- XIE H P, PENG R D, JU Y, *et al.* On energy analysis of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2603-2608.

- [38] LUNDBERG B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(6): 187-197.
- [39] 王春,程露萍,唐礼忠,等.高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时含铜蛇纹岩能量演化规律[J].*爆炸与冲击*,2019,39(5): 55-68.
WANG C, CHENG L P, TANG L Z, *et al.* Energy evolution law of copper-bearing serpentine received frequent impact under common action of high axial compression and confining pressure[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2019, 39(5): 55-68.
- [40] 谢和平,鞠杨.分数维空间中的损伤力学研究初探[J].*力学学报*,1999(3): 45-55.
XIE H P, JU Y. A study of damage mechanics theory in fractional dimensional space[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1999(3): 45-55.
- [41] 赵洪宝,王涛,苏泊伊,等.局部荷载下煤样内部微结构及表面裂隙演化规律[J].*中国矿业大学学报*,2020,49(2): 227-237.
ZHAO H B, WANG T, SU B Y, *et al.* Evolution law of internal microstructures and surface cracks of coal under local loading[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2020, 49(2): 227-237.
- [42] ZUO J, YANG R, MA X, *et al.* Explosion wave and explosion fracture characteristics of cylindrical charges[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 135(5): 104501.
- [43] 赵光明,周俊,孟祥瑞,等.高径比差异条件下花岗岩岩石动态冲击压缩特性[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(7): 1392-1401.
ZHAO G M, ZHOU J, MENG X R, *et al.* Dynamic impact compression characteristics of granite rocks with different length-diameter ratios[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(7): 1392-1401.
- [44] 金解放,吴越,张睿,等.冲击速度和轴向静载对红砂岩破碎及能耗的影响[J].*爆炸与冲击*,2020,40(10): 42-45.
JIN J F, WU Y, ZHANG R, *et al.* Effect of impact velocity and axial static stress on fragmentation and energy dissipation of red sandstone[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2020, 40(10): 42-45.
- [45] 吕晓聪,许金余,葛洪海,等.围压对砂岩动态冲击力学性能的影响[J].*岩石力学与工程学报*,2010,29(1): 193-201.
LU X C, XU J Y, GE H H, *et al.* Effects of confining pressure on mechanical behaviors of sandstone under dynamic impact loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 193-201.