

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0223

冲击载荷下石墨矿石动力学特性的层理效应 及宏观破坏机理*

叶海旺^{1,2}, 钱正昆¹, 雷涛^{1,2}, 温颖³, 李睿¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

3. 湖北省地质矿业开发有限责任公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为探究冲击载荷作用下层理对石墨矿石动力学特性的影响规律, 采用直径为 50 mm 的分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 系统, 对 0°、45°和 90°层理角度的石墨矿石开展了不同冲击荷载 (0.3、0.4 和 0.5 MPa) 下的动态压缩实验, 并结合高速摄影和电子扫描技术分析了不同层理角度石墨矿石的动态力学特性和冲击破坏模式。研究表明: 石墨矿石中矿物多呈同形粒状定向排列, 接触界限不规则, 白云母和石英含量较高, 与石墨伴生, 沿层理面富集; 层理面的存在对石墨矿石的力学性质存在劣化作用, 45°层理劣化作用最强; 能耗特性随层理角度增大呈 U 形变化, 与强度特征相似; 同一应变率下, 矿石破碎尺寸与能耗密度具有明显的相关性, 0°层理破碎平均尺寸较小, 能耗密度较大, 45°层理破碎后块度最大, 能耗密度最小; 受外力作用时, 石墨鳞片不仅从内部断裂, 也易被伴生矿物撕裂, 随层理角度的增大, 试样破坏形式可归纳为张拉破坏—剪切破坏—张拉劈裂破坏的演化过程。冲击荷载作用下, 石墨鳞片破坏程度主要受压力大小和作用方向控制, 拉伸破坏可减少石墨鳞片内部断裂, 低应变率可减少岩粉产生。因此, 可通过调整冲击波传播方向、降低峰值应力和增大矿石拉应力破坏区域, 以减少爆破冲击对石墨鳞片的破坏作用。

关键词: 层理效应; 石墨矿; 分离式霍普金森压杆; 动力学特性; 破坏模式

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Bedding effect and macro-micro mechanism of graphite ore dynamic mechanical properties under impact loads

YE Haiwang^{1,2}, QIAN Zhengkun¹, LEI Tao^{1,2}, WEN Ying³, LI Rui¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, Hubei, China;

3. Hubei Geological & Mining Exploration Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: To reveal the influence law of graphite ore with different bedding angles under impact load, impact experiments on graphite ore samples with different bedding angles (0°, 45° and 90°) were conducted by using a 50 mm diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) device, with the combined use of high-speed photography and electron microscopy scan. The dynamic mechanical properties and impact failure modes were investigated during the dynamic fracture process. The results show that most of the minerals in graphite ore are arranged in an allotriomorphic granular orientation within an irregular contact boundary. There is a high content of muscovite and quartz, associated with graphite and enriched along the bedding planes. The bedding angles have a deterioration effect on samples, and the 45° bedding angle has the strongest deterioration

* 收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-08-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1909602, 2021YFC2902901); 湖北省重点研发计划 (2021BCA152)

第一作者: 叶海旺 (1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, yehaiwang369@hotmail.com

通信作者: 雷涛 (1983—), 男, 博士, 讲师, leitao539@163.com

effect. The energy dissipation characteristics show a U-shaped trend with the increase of bedding angle, similar to the strength characteristics. At the same strain rate, the average particle size of the broken samples is strongly correlated with the energy dissipation density. The average particle size of 0° bedding angle is the smallest, with the largest energy dissipation density. On the contrary, the average particle size is the largest when the bedding angle is 45° , with the smallest energy dissipation density. When graphite flakes are subjected to external forces, they will not only break from the inside but also be torn by associated minerals. The destruction form can be summarized as the evolution of tensile failure-shear failure-tensile splitting failure. The relevant characteristic results obtained from the experiments show that the damage degree of the graphite flakes is mainly controlled by the magnitude and direction of the impact load. Tensile failure can reduce the internal fracture of graphite flakes, and a low strain rate can reduce the production of rock powder. Therefore, the destructive effect of blasting impact load on graphite flakes can be reduced by adjusting the propagation direction of the shock wave, reducing the peak stress, and increasing the failure area of ore tensile stress.

Keywords: bedding effect; graphite ore; split Hopkinson pressure bar; dynamic mechanical properties; failure modes

石墨被誉为 21 世纪支撑高新技术发展的战略资源,已被广泛应用于高新技术、军工、航空航天等重要领域^[1]。石墨矿床类型主要为鳞片状晶质石墨和隐晶质石墨,在我国已探明的石墨矿区中,晶质石墨矿区占比达到 80% 以上,由于受变质岩和混合岩化作用,晶质石墨矿石具有明显的层理分布特征^[2]。晶质石墨矿藏多为露天矿藏,矿山生产方式以爆破落矿为主,但石墨鳞片易受外力荷载作用而产生断裂,导致石墨的经济价值和应用价值都大幅降低^[3]。因此,针对不同层理角度石墨矿石动力破坏特性开展研究,可以为矿山开采爆破工艺设计提供理论支撑,从采选源头保护石墨鳞片,有效提高矿山生产效率。

受层理效应的影响,岩体的力学性质表现出显著的各向异性。目前,针对高应变率岩石的动力学研究,学者们通常采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对层理岩石开展动态压缩实验,在力学特性、破坏模式和能耗规律等方面已经取得了大量成果。温森等^[4]利用 SHPB 对自制层状岩样进行了冲击实验,结果表明,层理倾角为 60° 时能量吸收率最低,试样破碎程度也较低,该结果与孙清佩等^[5]对不同层理倾角页岩开展的冲击实验获得的结果基本一致。李地元等^[6]对层状砂岩进行了冲击压缩和冲击劈裂实验,总结了层状砂岩的 5 种破坏模式,实验结果表明,砂岩的动态强度随角度的增大呈现倒 U 形变化,且能量吸收率也受到层理倾角的影响。Wang 等^[7]采用 SHPB 实验系统和高速摄影对层理岩石裂纹扩展特性进行了研究,结果表明,随着层理角度增大,试件破坏模式逐渐由拉伸破坏转变为拉剪复合破坏,并且当层理角垂直于冲击方向时,试样动态断裂韧性最大。杨国梁等^[8]通过 SHPB 实验研究了不同加载角度下层理页岩裂纹的扩展规律,发现加载角度与动态起裂韧度呈正相关,与起裂速度具有负相关关系,层理弱面对试样破裂模式具有显著影响。王雁冰等^[9]利用 SHPB 对不同层理角度的天然岩石试样开展了动态断裂冲击实验,结果表明,层理面影响应力波反射的有效面积,从而影响岩石的破坏特性。

在大量室内实验的基础上,学者们发现矿物自身的组成成分和赋存状态对其力学特性具有重要影响。叶海旺等^[10-12]利用 SHPB 对不同品位的石墨矿石开展了冲击压缩实验,总结了不同品位石墨矿石的冲击破坏模式和能量吸收规律,发现石墨矿石强度具有随品位增加而弱化的趋势。梁中勇等^[13]对不同层理角度的白云岩开展了单轴压缩、巴西劈裂和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观测,结果表明,层理面颗粒结构不规则,不成整体,试件一般沿层理面呈脆性破坏。刘磊等^[14]利用 SHPB 系统对砂卡岩开展了冲击实验,结合 SEM 和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)物相分析技术,探究了砂卡岩在不同温度下的动态力学特性和微观破坏机制。包含等^[15-16]通过观察黑云母石英片岩的宏微观破坏过程,发现层理面上的矿物定向排列会导致岩石强度表现出各向异性,岩石破坏模式也受矿物定向排列的影响,表现为张拉—剪切—拉剪混合的渐进式破坏进程。武仁杰等^[17]利用 SHPB 对层状千枚岩开展了冲击实验,结合三维激光仪观察断面微观特征,发现岩石强度及裂纹扩展受基质体和层理面共同控制,随着层理角度增大,层理面的影响程度加深。

综上所述,目前学者们已经对层理岩石的力学特性和破坏模式进行了大量的研究,但很少有针对石墨矿的研究。石墨矿石矿物成分复杂,破碎岩成熟度较高,其中矿物多以晶粒形态赋存,石墨鳞片以嵌合结构的形式集中分布在层理面上,其特殊的赋存状态对石墨矿石的力学特性具有显著影响,并且石墨鳞片硬度小于其他矿物,在荷载作用下,石墨鳞片不仅从内部发生断裂破坏,也会被其他破碎矿物撕裂。因此,本文中,拟通过 SHPB 实验系统对不同层理角度的石墨矿开展冲击压缩实验,利用高速摄影和 SEM 技术观测试样破坏过程和宏微观破坏特性,探讨不同层理角度石墨矿石在冲击荷载作用下的力学特性、破坏模式和能耗特性的变化规律,以期对矿山合理开采和破碎提供理论指导。

1 实验条件及方案

1.1 SHPB 实验系统

采用 $\varnothing 50\text{ mm}$ 的 SHPB 实验系统进行不同层理倾角石墨矿石的动态冲击压缩实验,如图 1 所示。该系统由动力装置、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、动态应变仪、高速摄影仪和数据处理系统组成。压杆系统材质为合金钢,密度、弹性模量和纵波波速分别为 $7\ 180\text{ kg/m}^3$ 、 210 GPa 和 $5\ 200\text{ m/s}$ 。

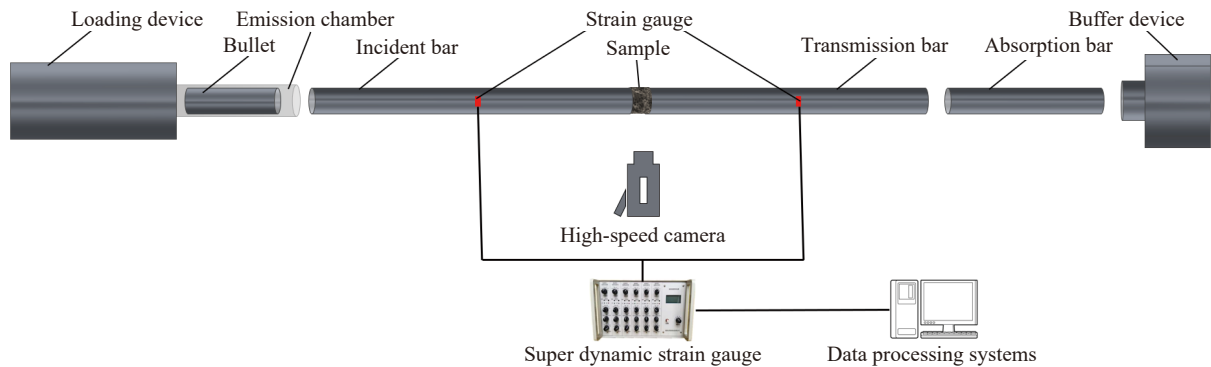


图 1 SHPB 实验系统

Fig. 1 SHPB experimental system

1.2 试样制备

为避免石墨矿岩的离散性对实验结果的影响,选取同一块石墨原矿通过调整钻机角度来获取不同角度的层理试样,定义层理角度 θ 为层理面与冲击荷载法线方向的夹角,制取 θ 分别为 0° 、 45° 和 90° ,直径和高度均为 50 mm 的标准石墨矿石试样,加工好的试样如图 2 所示。

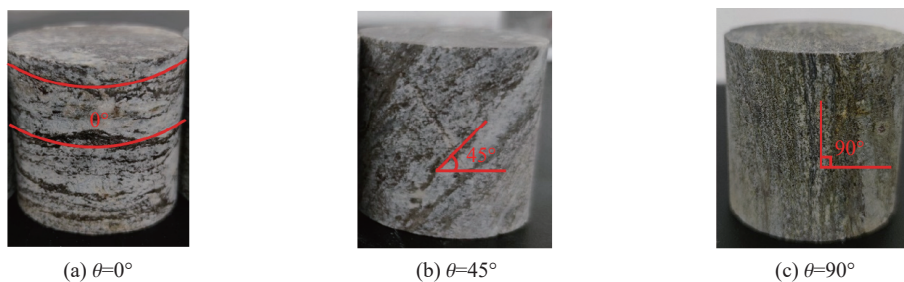


图 2 不同层理角度的试样照片

Fig. 2 Photos of samples with different bedding angles

1.3 实验方案

实验前在试样两端均匀涂抹黄油,使试样与杆件紧密接触,减少能量损失,并且保证每次子弹回腔距离相同,保证子弹从同一位置射出。通过施加 0.3 、 0.4 和 0.5 MPa 的 3 组冲击气压,分别对层理角度

为 0°、45°和 90°的 3 组试样各进行 5 次冲击实验, 选取其中误差较小的 3 次实验结果进行分析, 测得子弹平均冲击速度分别为 9.6 m/s(0.3 MPa)、12.2 m/s(0.4 MPa)和 14.4 m/s(0.5 MPa)。根据一维应力波理论和应力平衡假设, 采用三波法计算试样平均应变 ε_s 、平均应力 σ_s 和平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ ^[18]:

$$\begin{cases} \varepsilon_s(t) = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \\ \sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_r(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_0 为压杆纵波波速, l_0 为试样长度, $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射应变、反射应变和透射应变, t 为时间, A 和 E 分别为压杆的截面面积和弹性模量, A_s 为试样的截面面积。

实验结束后, 对 3 组冲击气压下试样的应力平衡进行分析, 如图 3 所示, 入射应变加上反射应变与透射应变曲线基本重合, 即 $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$, 因此试样在动力加载过程中满足两端应力平衡^[19]。

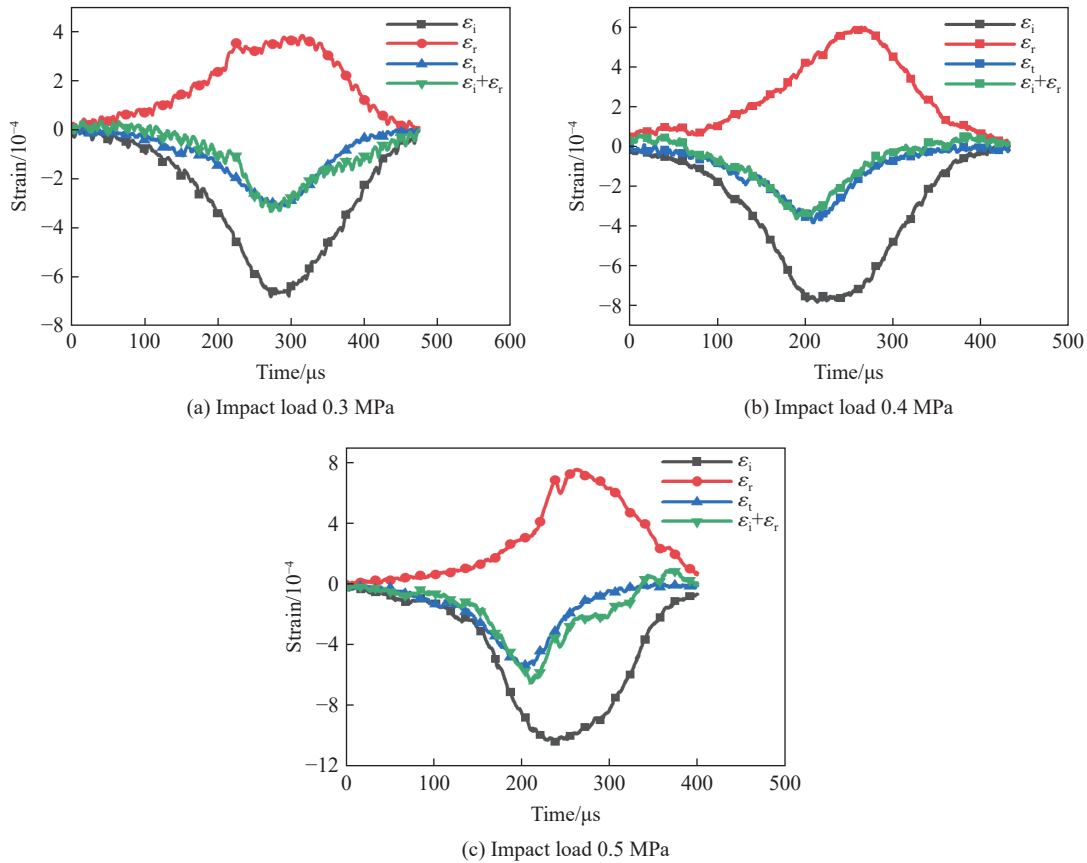


图 3 三种冲击荷载下试样的动态平衡曲线

Fig. 3 Dynamic equilibrium curves of samples under three impact loads

2 实验结果分析

2.1 动态抗压强度变化

图 4 给出了不同平均应变率下石墨矿石动态抗压强度随层理角度的变化曲线。可以看出, 在同一应变率下, 石墨矿石的动态强度随层理角度的增大呈 U 形分布, 该结果与罗宁等^[20]的研究结论基本一致。层理角度为 0°时, 动态抗压强度最高; 层理角度为 90°时, 动态抗压强度稍低; 层理角度为 45°时, 试

样的动态抗压强度最低。由动态抗压强度的变化可以发现, 当冲击荷载方向与层理面垂直时, 冲击荷载作用下可较好地压密试样内部裂隙, 增强其动态抗压强度; 当冲击荷载方向与层理面存在夹角时, 试样强度随夹角增大而减小, 45°夹角时取得最小值, 此时在冲击荷载作用下, 试样容易产生沿层理面的滑移剪切破坏。

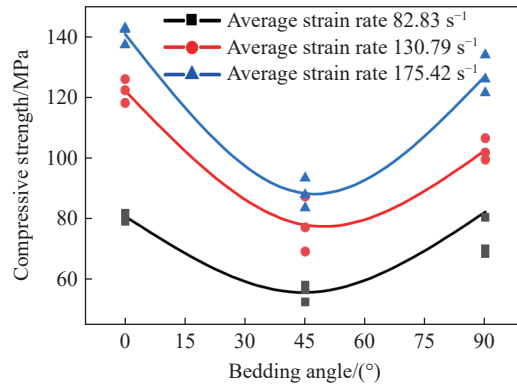


图 4 动态抗压强度与层理角度的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic compressive strength and bedding angle

2.2 破坏应变变化特征

取峰值应力对应的应变为试样破坏应变, 表征岩石承受极限荷载下的形变程度。将同一冲击气压下的应变率和试样破坏应变求均值, 绘制不同层理角度试样的破坏应变曲线(图 5)。各层理角度试样的破坏应变均随着应变率的升高而增大, 即随着冲击气压升高, 试样破坏时应变率升高, 破坏时吸收能量更多, 破坏应变增大说明试样破碎程度加剧。由图 5(b) 可知, 不同应变率下试样的破坏应变与层理角度的关系和动态抗压强度与层理角度的关系相似, 呈 U 形分布。0°层理试样的破坏应变最大, 90°层理试样的破坏应变居中, 45°层理试样的破坏应变小于其他角度试样。并且, 当平均应变率为 175.42 s⁻¹ 时, 0°和 90°层理试样的破坏应变显著增大, 表明当应变率足够高时, 试样破坏时的层理效应减弱, 试样破坏主要受基质体控制。

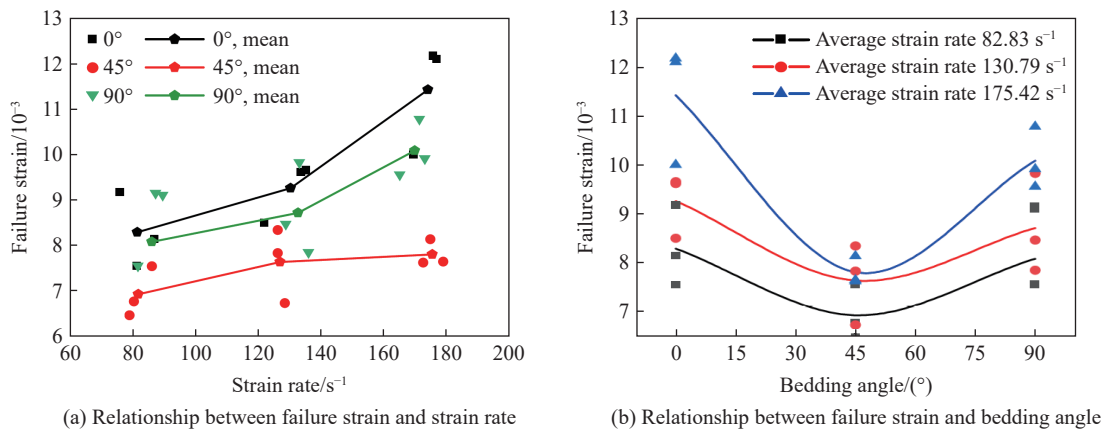


图 5 各层理角度下石墨矿石的破坏应变

Fig. 5 Failure strains of graphite ore at various bedding angles

2.3 动态弹性模量变化特征

弹性模量是反映岩石抵抗弹性变形能力的重要参数。在动荷载作用下, 石墨矿石的应力-应变变化具有明显的非线性特征, 因此选择峰值应力的 40% 和 60% 时的应力差与应变差之比来计算煤岩的动态弹性模量:

$$E = \frac{\sigma_{0.6} - \sigma_{0.4}}{\varepsilon_{0.6} - \varepsilon_{0.4}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{0.6}$ 和 $\sigma_{0.4}$ 分别为峰值应力 60% 和 40% 时的应力, $\varepsilon_{0.6}$ 和 $\varepsilon_{0.4}$ 分别为 $\sigma_{0.6}$ 、 $\sigma_{0.4}$ 所对应的应变。

如图 6 所示, 弹性模量随层理角度的增加呈现先减小后增大的趋势, 90°层理试样的弹性模量最大, 45°层理试样的弹性模量最小, 此现象与强度和应变规律相似, 表明试样强度低, 更容易产生破坏, 层理面降低了试样的性能, 使得弹性模量降低, 这也说明岩石各个参数的变化不是独立的, 岩石参数的变化存在相互影响。

2.4 能量耗散特性

图 7 给出了 0.3 MPa 冲击气压下能量-时间的变化曲线, 可以看出, 试样破坏时, 能量演化过程大致分为 3 个阶段: 第 1 阶段试样较完整, 内部裂隙较少, 在外力作用下, 试样内部原生裂隙被压实, 吸收能较少, 反射能占比较高; 第 2 阶段为裂纹扩展阶段, 能量与时间增长呈线性关系, 反射能增速变缓, 吸收能增速变快, 说明此时试样吸能效率增大; 第 3 阶段为平台稳定阶段, 此阶段能量整体维持在一个水平^[21]。

为进一步分析不同层理角度对石墨矿石能量吸收效率的影响, 定义吸收能与入射能之比为能量利用率 ω , 即:

$$\omega = W_s(t) / W_i(t) \quad (3)$$

式中: $W_s(t)$ 为吸收能, $W_i(t)$ 为入射能。

图 8 给出了不同平均应变率下能量利用率与层理角度的拟合关系曲线, 可以看出, 同一层理角度下, 应变率越高, 石墨矿石的能量利用率越低, 能量利用率总体在 0.20~0.45, 并且随着层理角度的增大, 石墨矿石的能量利用率先降低后升高, 0°层理试样的能量利用率最高; 90°层理时, 由于冲击荷载方向与层理角度相同, 试样破碎变为由层理面主导, 导致 90°层理试样的能量利用率降低。

试样吸收能主要包括裂纹扩展和岩石破碎耗能 W_d 、试样碎片飞散动能、热能和其他耗能。其中破碎耗能占吸收能的 90% 以上, 因此忽略其他能耗, 以破碎耗能近似等于吸收能, 即 $W_s = W_d$ 。为避免试样尺寸差异的影响, 采用能耗密度反映单位体积石墨矿石的能量吸收能力:

$$w_\eta = \frac{W_s}{V} \quad (4)$$

式中: w_η 为能耗密度, W_s 为吸收能, V 为试样体积。

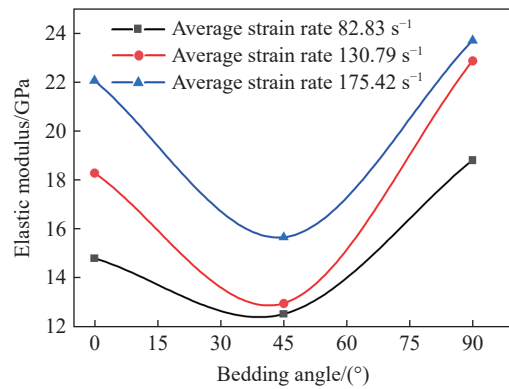


图 6 不同应变率下石墨弹性模量随层理角度的变化
Fig. 6 Elastic modulus of graphite ore varied with bedding angle at different strain rates

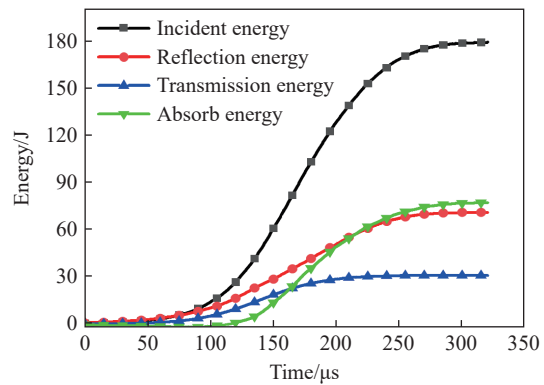


图 7 0.3 MPa 冲击气压下能量-时间的变化曲线
Fig. 7 Energy-time curves under 0.3 MPa impact pressure

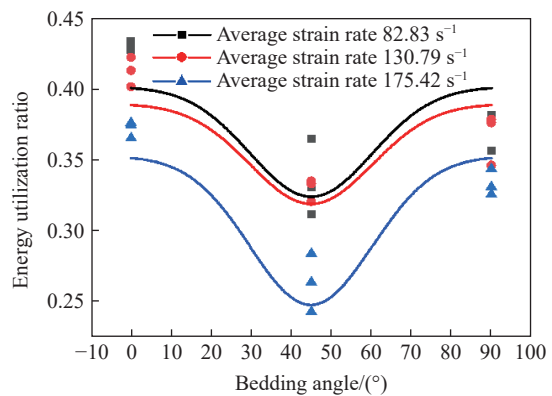


图 8 能量利用率与层理角度的关系
Fig. 8 Relationship between energy utilization ratio and bedding angle

图 9 给出了不同平均应变率下能耗密度与层理角度的关系曲线。可以看出, 石墨矿石的能耗密度随层理角度的增大呈先减小后增大的趋势, 能耗密度在 45°层理时取得最小值, 在 0°层理时取得最大值。同时, 随着平均应变率升高, 能耗密度也随之增大, 这说明等体积试样消耗了更多的能量, 试样破碎度更高。

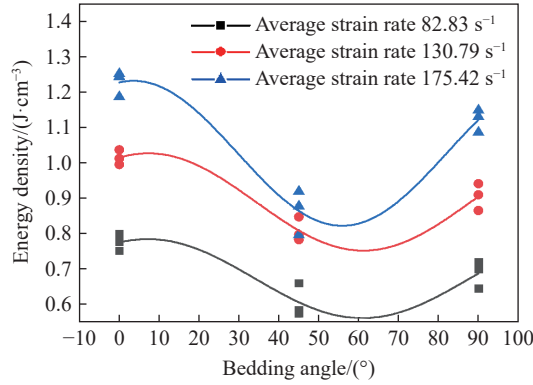


图 9 能耗密度与层理角度的关系

Fig. 9 Relationship between energy dissipation density and bedding angle

2.5 破碎粒径与耗能特征

使用 40.00、20.00、10.00、5.00、2.50、1.25 和 0.63 mm 标准方孔石子筛对每次冲击压缩实验后的试样进行筛分, 因篇幅限制, 仅展示 0.4 MPa 冲击气压作用下筛分后的碎块块度, 如图 10 所示。

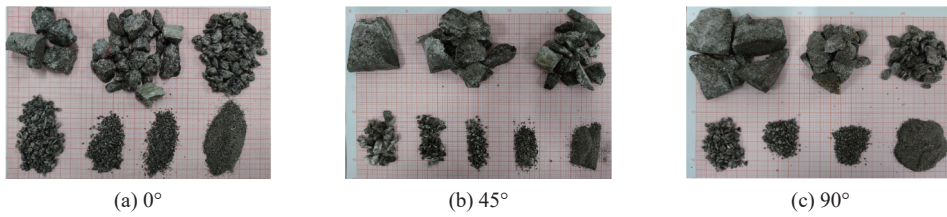


图 10 不同层理角度冲击破碎尺寸统计

Fig. 10 Statistics of particle size at different bedding angles

采用破碎粒径平均尺寸 d_s 表示矿石的破碎程度, 直观描述石墨试样冲击破碎后破碎块度分布情况, 表示为^[22]:

$$d_s = \frac{\sum \eta_i d_i}{\sum \eta_i} \quad (5)$$

式中: d_i 为不同孔筛筛上矿石的平均尺寸, η_i 为对应碎块质量的百分比。

绘制不同层理角度石墨矿石试样的能耗密度与平均破碎尺寸的关系曲线, 能耗密度越大, 说明试样破碎时吸收的能量越多, 岩石会产生更多的破碎面和更小的破坏尺寸。如图 11 所示, 破碎粒径平均尺寸随能耗密度的增大而减小。层理角度为 0°时试样破坏程度最大, 碎块的平均尺寸最小; 层理角度为 45°时主要沿层理面发生破坏, 导致试样能耗密度较低, 破碎后粒径较大。其拟合关系式表示为:

$$\begin{cases} d_s^{(0)} = 835.95 - 284.96 \ln(w_\eta + 16.46) & R^2 = 0.70 \\ d_s^{(45)} = 17.23 - 13.39 \ln(w_\eta - 0.27) & R^2 = 0.93 \\ d_s^{(90)} = 16.23 - 10.30 \ln(w_\eta - 0.38) & R^2 = 0.88 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $d_s^{(0)}$ 、 $d_s^{(45)}$ 和 $d_s^{(90)}$ 分别为 0°、45°和 90°层理时的试样的平均破碎尺寸, mm。

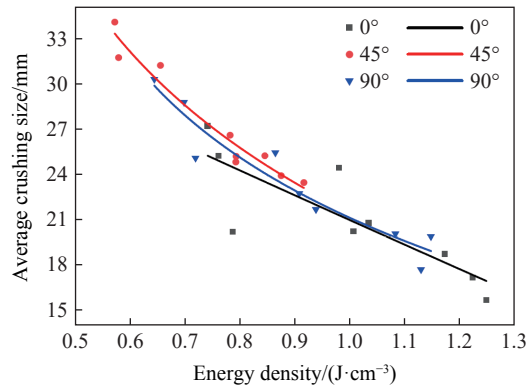


图 11 不同层理角度试样的能耗密度与平均破碎尺寸的关系

Fig. 11 Relationships between energy dissipation densities and average particle sizes of samples with different bedding angles

3 石墨矿石宏观破裂特征及破坏模式

3.1 石墨矿石微观成分及结构

本次实验岩样取自湖北某石墨矿山, 为石墨片岩型矿石, 该矿区层理结构面发育, 矿岩层理特征明显。利用 XRD、X 荧光光谱仪(XRF)和 SEM 对石墨矿石试样进行矿物成分和微观结构分析, 如图 12 所示。测试结果表明, 其成分主要为云母 43%、石英 40%、长石 5%、方解石 4%、石墨 3%、黄铁矿 3%、绿泥石 1%、磁铁矿 1%。由图 12 可知, 白云母呈条状集中分布, 定向排列; 长石呈他形粒状, 总体定向排列, 接触边界较平直, 部分绢云母化; 石英呈他形粒状, 分布具有明显的定向性, 接触界限呈参差状; 磁铁矿和黄铁矿呈长轴粒状定向排列分布。石墨鳞片相互交错形成含空隙的胶结结构, 在层理面上集中分布, 定向排列, 与周围矿物接触界限明显, 接触边界呈港湾状。

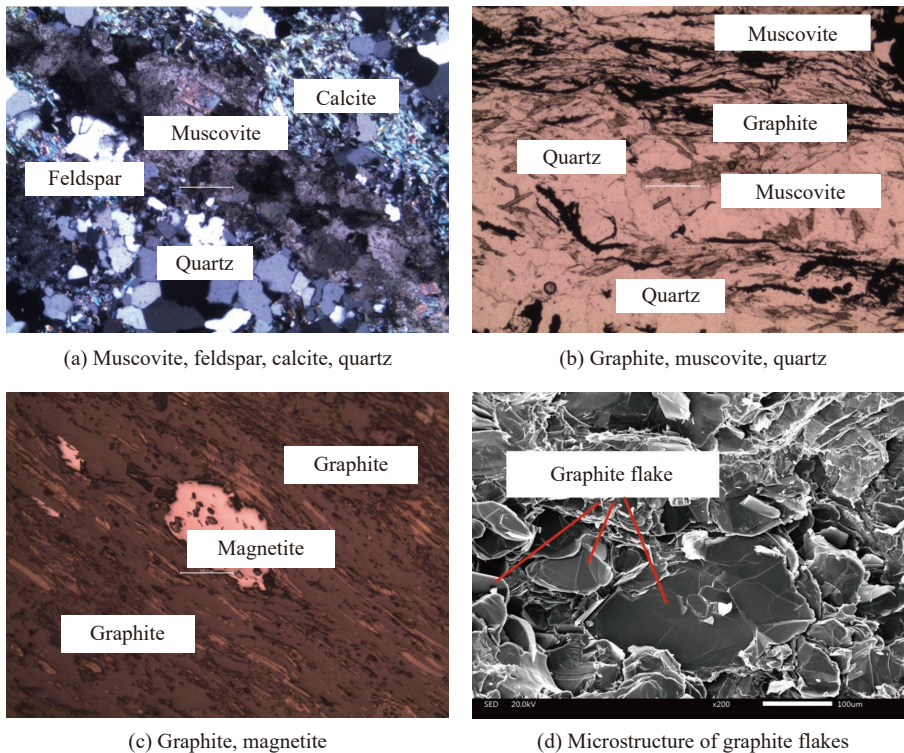


图 12 矿石成分及微观结构特征

Fig. 12 Ore compositions and microstructure characteristics

由上述分析可知, 石墨矿石具有非均匀性, 由多种强度不一的矿物或破碎物质组合形成层状或带状薄层, 其中矿物多呈定向排列, 云母呈条状结构定向排列分布, 为不稳定晶粒结构, 易发生变形破坏; 长石多沿裂隙边缘发生蚀变; 石英表面光滑具有波状消光, 边缘痕迹清晰, 裂痕不规则, 呈参差状, 这导致石英最小内能面不连续, 在荷载作用下易发生穿晶破坏; 所有矿物在层理面形成脆弱结构, 矿石破碎度较高。石墨自身具有极好的润滑性, 矿物层间抗滑能力较弱, 而石墨鳞片本身强度弱于周围其他矿物, 这导致对石墨矿石施加荷载时, 层间互相滑动较容易, 鳞片易被周围矿物撕裂, 导致破坏程度加深。并且石墨鳞片受垂直于结晶层的荷载作用时易从内部断裂, 导致石墨矿石层理面强度弱化严重^[23-24]。

3.2 石墨矿石宏观破坏形态

从图 13 可以看出, 石墨矿石试样冲击破坏过程中, 由于试样与杆件接触边界存在约束, 试件两端横向变形受到限制, 此时试样中部相对自由, 受荷载作用快速压缩, 在试样中部破裂面易发生张拉和剪切作用并存的混合破坏。从整体的破坏形式上看, 试样从靠近入射杆一端出现裂纹, 并沿试样轴向扩展, 宏观破坏沿着层理产生, 这导致试样在破坏后呈片状。0°层理时, 试样主要以冲击应力波贯穿层理面和基质体的轴向破坏为主, 同时在试样中部区域层理面上产生拉破坏。45°层理时, 试样以沿层理面的剪切破坏为主, 此时由于应力波传播速度高于裂纹扩张速度, 试样局部产生压剪破坏。90°层理时, 试样以沿层理面的轴向劈裂破坏为主, 局部存在少量压剪破坏。

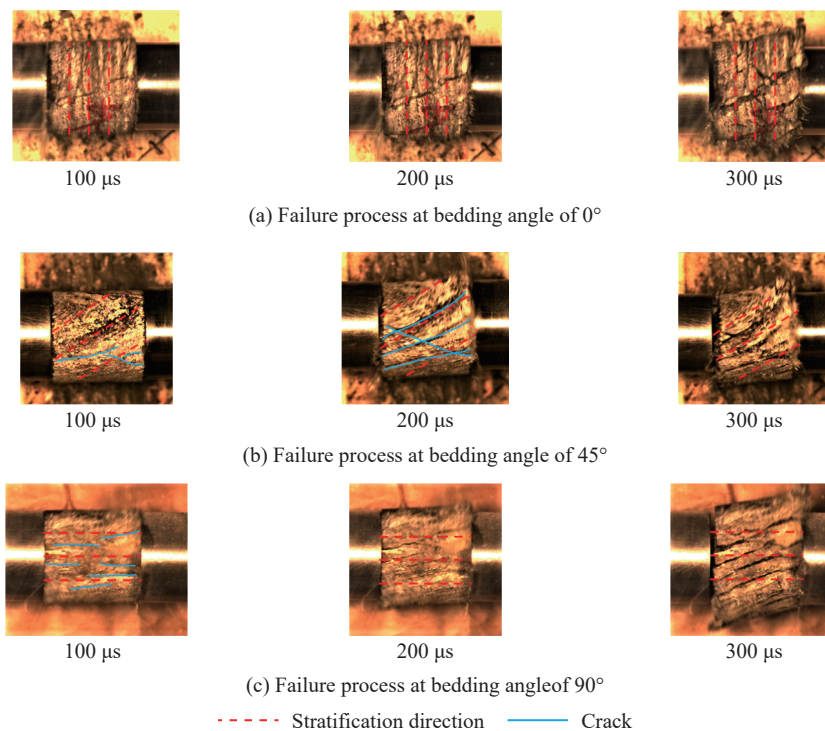


图 13 石墨矿石试样破坏实物照片

Fig. 13 Failure photos of graphite ore

总体来说, 层理面的存在造成石墨矿的破坏模式表现出各向异性。不同层理角度石墨矿石试样的破坏模式主要分为 3 种: 0°层理试样为贯穿层理面和基质体的张拉破坏; 45°层理试样主要为沿层理面的剪切破坏, 同时沿基质体产生剪切微裂隙; 90°层理试样主要是沿层理面的张拉破裂。

3.3 石墨矿石微观破裂特征

通过对石墨矿石宏观破坏模式的分析可知, 试样破坏主要沿层理面产生, 并且不同层理角度试样的破坏模式表现为各向异性。为进一步探究石墨矿石的动态破碎特征, 对试样断口进行电镜扫描, 扫描图像如图 14 所示。

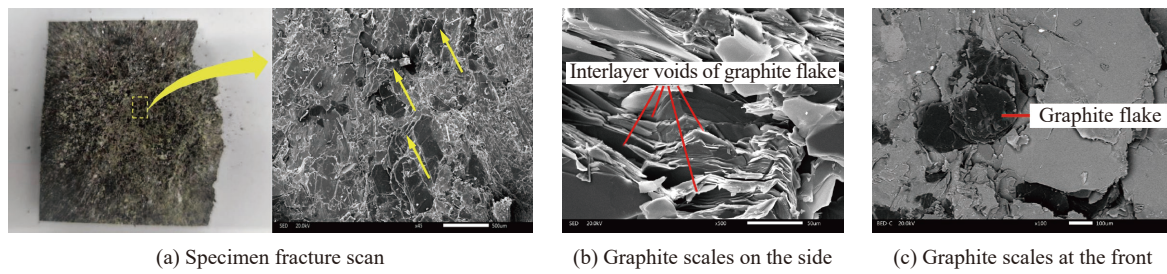


图 14 试样断面微观扫描图像

Fig. 14 Microscopic scanning of specimen cross-section

由图 14 可知, 石墨鳞片在层理面上集中分布并沿层理面定向排列(图 14(a)), 鳞片在层理面上相互交错形成具有空隙的胶结集合体。在冲击荷载作用下, 试样沿层理弱面产生破坏, 破坏后呈片状碎块, 从石墨矿石微观结构分析, 石墨鳞片本身具备强度低和自润滑性的特点, 胶结集合体在应力作用下容易相互错动和滑移撕裂。并且石墨鳞片与其他矿物接触界限相互交错, 应力波在石墨鳞片接触界限上发生相互反射和透射, 导致鳞片边缘易生成裂纹, 当存在一定层理角度时, 应力易使鳞片发生台阶状断裂和穿晶破坏(图 14(c))。

对 0.5 MPa 冲击荷载作用下破坏后的试样断口进行扫描, 得到的断口扫描照片如图 15 所示。可以看出, 0°层理时, 冲击荷载垂直入射, 石墨鳞片在剪切作用下从内部起裂, 发生剪性滑移破裂, 破坏程度较大。当存在一定层理角度时, 应力使层理产生滑移断裂, 此时石墨鳞片主要发生以剪性破坏为主的穿晶破坏, 并且由于其他矿物硬度高于石墨, 在二者接触面发生撕裂, 进一步加剧石墨鳞片的破坏, 岩粉较多。90°层理时, 裂隙最先从鳞片间的空隙产生, 使鳞片发生分离, 此时以张拉破坏为主, 剪性穿晶破坏较少, 石墨鳞片完整性较高。

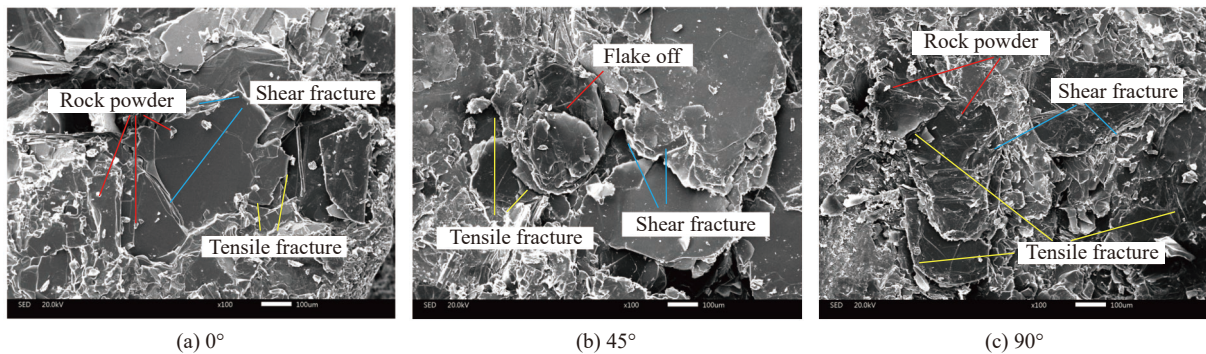


图 15 石墨碎块断口扫描照片

Fig. 15 Scanning photos of graphite fragment fracture surfaces

3.4 致裂机理

通过对石墨矿石宏微观破坏特征分析可知, 不同层理角度的石墨矿石试样的破坏模式主要分为拉伸破坏、剪切破坏和混合破坏 3 类, 试样裂纹扩展主要受基质体和层理面共同控制。0°层理时(图 16(a)), 冲击荷载与层理面垂直, 试样主要发生贯穿层理面的张拉破坏, 裂隙直接贯通基质体, 由于端部受杆件约束, 在试样中部沿层理弱面产生次生环形裂纹。当存在一定的层理角度时(图 16(b)), 层理弱面改变了试样内部的应力状态, 此时主要发生层理面控制的沿层理面方向的剪切破坏, 同时沿主裂隙末梢生成次生裂隙, 该破坏形式最易产生压剪层裂, 试样破坏程度较高^[25]。90°层理时(图 16(c)), 应力波与层理面平行, 且传播速度远大于裂纹扩展速度, 因为层理面胶结强度更低, 此时试样主要发生沿层理面的张拉劈裂破坏, 应力波作用时, 矿物品粒更易产生沿晶断裂, 裂纹沿层理弱面扩展并贯通, 最终形成沿冲击荷载

方向的拉伸劈裂。因此, 石墨矿石试样随层理面与冲击荷载夹角增大的破坏形式可总结为张拉破坏—剪切破坏—张拉劈裂破坏的演化过程。

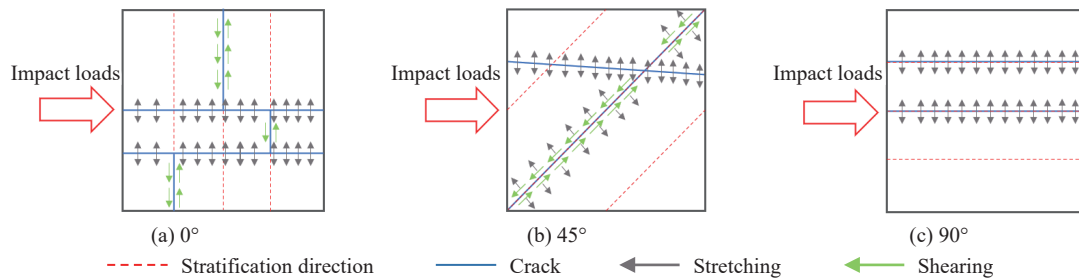


图 16 不同层理角度试样的破坏形式

Fig. 16 Failure forms of specimens at different layer bedding angles

4 结 论

(1) 对不同层理角度的石墨矿石试样开展了冲击压缩实验, 发现随着层理角度的增大, 试样的动态强度、破坏应变和弹性模量先减小后增大, 总体呈 U 形变化, 存在显著的层理劣化效应, 且 45°层理时劣化作用最强。

(2) 层理石墨矿石在冲击荷载作用下的破坏模式主要有 3 类: 拉伸破坏、剪切破坏和混合破坏。大层理角度和小层理角度试样以拉伸破坏为主, 中等层理角度试样更易发生剪切和混合破坏, 90°层理试样主要沿层理面产生劈裂拉伸破坏, 可有效减少石墨鳞片的内部断裂。

(3) 不同层理角度石墨矿石的能量耗散特性变化规律与强度特征类似。能量利用率和能耗密度随着层理角度的增大也呈现先减小后增大的趋势。45°层理能有效促进层理裂隙发育直至发生破坏, 破坏后块度最大。0°层理能有效抑制能量透射, 导致试样破坏程度最高, 碎块的平均尺寸最小。

(4) 通过矿石和试样断口的微观分析, 发现层理面上矿物多呈晶粒形态定向排列, 因而石墨鳞片不仅受应力波作用导致内部断裂, 当层理角度合适时, 也容易被其他坚硬矿物撕裂。因此, 将层理面与应力波传播方向垂直, 诱导石墨鳞片接触面在拉应力作用下断裂, 可有效减少鳞片自身破坏, 在实际生产中可采取调整爆破应力波传播方向、减小峰值应力和扩大拉应力破坏范围的方式减少石墨鳞片破坏。

参考文献:

- [1] 高惠民, 张凌燕, 管俊芳, 等. 石墨、石英、萤石选矿提纯技术进展 [J]. *金属矿山*, 2020(10): 58–69. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202010006.
GAO H M, ZHANG H Y, GUAN J F, et al. Graphite, quartz and fluorite purification technology trends [J]. *Metal Mine*, 2020(10): 58–69. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202010006.
- [2] 张苏江, 王楠, 崔立伟, 等. 国内外石墨资源供需形势分析 [J]. *无机盐工业*, 2021, 53(7): 1–11. DOI: 10.19964/j.issn.1006-4990.2021-0086.
ZHANG S J, WANG N, CUI L W, et al. Analysis of supply and demand situation of graphite resources at home and abroad [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2021, 53(7): 1–11. DOI: 10.19964/j.issn.1006-4990.2021-0086.
- [3] 孙华星, 赵恒勤, 刘磊. 晶质石墨碎磨中鳞片保护的研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(6): 20–26. DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.06.003.
SUN X H, ZHAO H Q, LIU L. Advanced in the protection of crystalline graphite flake during grinding [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(6): 20–26. DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.06.003.
- [4] 温森, 赵现伟, 常玉林, 等. 基于 SHPB 的复合岩样动态压缩破坏能量耗散分析 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 483–492. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.020.
WEN S, ZHAO X W, CHANG Y L, et al. Energy dissipation of dynamic failure of mixed rock specimens subject to SHPB compression [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 483–492. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.020.

- [5] 孙清佩, 张志镇, 李培超, 等. 黑色页岩动荷载破坏的层理效应及损伤本构模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(7): 1319–1331. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1333.
SUN Q P, ZHANG Z Z, LI P C, et al. Study on the angle effect and damage constitutive model of black shale under dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1319–1331. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1333.
- [6] 李地元, 高飞红, 刘濛, 等. 动静组合加载下含孔洞层状砂岩破坏机制探究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2127–2140. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0051.
LI D Y, GAO F H, LIU M, et al. Research on failure mechanism of stratified sandstone with pre-cracked hole under combined static-dynamic loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2127–2140. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0051.
- [7] WANG W, ZHAO Y, TENG T, et al. Influence of bedding planes on mode I and mixed-mode (I-II) dynamic fracture toughness of coal: analysis of experiments [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 173–189. DOI: 10.1007/s00603-020-02250-9.
- [8] 杨国梁, 毕京九, 郭伟民, 等. 加载角度对层理页岩裂纹扩展影响的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(9): 093101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0097.
YANG G L, BI J J, GUO W M, et al. Experimental study on the effect of loading angle on crack propagation in angle shale [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9): 093101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0097.
- [9] 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(4): 849–867. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0236.
WANG Y B, FU D R. Effect of angle angle on dynamic fracture behavior of natural rock materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(4): 849–867. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0236.
- [10] 叶海旺, 严立德, 雷涛, 等. 冲击荷载下石墨矿石破碎能耗特征 [J]. *爆破*, 2023, 40(1): 30–36. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.004.
YE H W, YAN L D, LEI T, et al. Crushing energy dissipation characteristics of graphite ore rock under impact loads [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 30–36. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.004.
- [11] 叶海旺, 李兴旺, 雷涛, 等. 石墨矿石品位对其动力学特性的影响研究 [J]. *爆破*, 2022, 39(4): 25–31, 52. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.004.
YE H W, LI X W, LEI T, et al. Study on effect of graphite ore grade on its dynamic mechanical properties [J]. *Blasting*, 2022, 39(4): 25–31, 52. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.004.
- [12] 叶海旺, 温颖, 雷涛, 等. 不同品位石墨矿岩冲击破坏模式与能耗特性研究 [J]. *金属矿山*, 2023(3): 65–72. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202303008.
YE H W, WEN Y, LEI T, et al. Impact failure modes and energy dissipation characteristics of graphite rock with different grades [J]. *Metal Mine*, 2023(3): 65–72. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202303008.
- [13] 梁中勇, 杨胜波, 崔宇, 等. 层理白云岩力学特性及隧道围岩位移特征研究 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(6): 121–127. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.06.014.
LIANG Z Y, YANG S, CUI Y, et al. Study on mechanical properties of bedded dolomite and displacement characteristics of tunnel surrounding rock [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(6): 121–127. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.06.014.
- [14] 刘磊, 李睿, 秦浩, 等. 高温后深部矽卡岩动力学特性及微观破坏机制研究 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1166–1174. DOI: 10.11779/CJGE202206022.
LIU L, LI R, QIN H, et al. Dynamic mechanical properties and microscopic damage characteristics of deep skarn after high-temperature treatment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1166–1174. DOI: 10.11779/CJGE202206022.
- [15] 包含, 陈志洋, 兰恒星, 等. 矿物定向排列致各向异性岩石渐进破坏强度特征——以黑云母石英片岩为例 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2060–2070. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1833.
BAO H, CHEN Z X, LAN H X et al. Progressive failure strength characteristics of anisotropic rocks caused by mineral directional arrangement: a case of biotite quartz schist [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2060–2070. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1833.
- [16] 包含, 裴润生, 兰恒星, 等. 基于循环加卸载的矿物定向排列致各向异性岩石损伤演化规律——以黑云母石英片岩为例 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0410.

- BAO H, PEI R S, LAN H X et al. Damage evolution of biotite quartz schist caused by mineral directional arrangement under cyclic loading and unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0410.
- [17] 武仁杰, 李海波. SHPB 冲击作用下层状千枚岩多尺度破坏机理研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 083106. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0187.
- WU R J, LI H B. Study on multi-scale failure mechanism of stratiform thousand rocks under SHPB impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 083106. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0187.
- [18] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI X B. Foundation and application of rock dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [19] FAN X R, LUO N, YUAN Y S, et al. Dynamic mechanical behavior and damage constitutive model of shales with different angle under compressive impact loading [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(17): 1752. DOI: 10.1007/S12517-021-08089-W.
- [20] 罗宁, 索云琛, 张浩浩, 等. 循环冲击层理煤岩动力学行为及破坏规律研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(4): 043102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0253.
- LUO N, SUO Y C, ZHANG H H, et al. Study on dynamic behavior and failure law of angle coal rock by cyclic impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 043102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0253.
- [21] WU H, DAI B, CHENG L, et al. Experimental study of dynamic mechanical response and energy dissipation of rock having a circular opening under impact loading [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 38(2): 1111–1124. DOI: 10.1007/s42461-021-00405-y.
- [22] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of *in-situ* stress [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 53: 129–141. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.001.
- [23] 段炳鑫, 陈宏强, 赵华平, 等. 冀西北地区古元古代含石墨变质地层岩石矿物地球化学特征与成矿机制研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2023, 42(2): 191–204. DOI: 10.20086/j.cnki/yskw/2023/0202.
- DUAN B X, CHEN H Q, ZHAO H P, et al. Geochemical characteristics and metallogenic mechanism of the Paleoproterozoic graphite-bearing metamorphic strata in Northwestern Hebei Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2023, 42(2): 191–204. DOI: 10.20086/j.cnki/yskw/2023/0202.
- [24] 赵斌, 王芝银, 伍锦鹏. 矿物成分和微观结构与岩石材料力学性质的关系 [J]. *煤田地质与勘探*, 2013, 41(3): 59–63, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.03.014.
- ZHAO B, WANG Z Y, WU J P. Relation between mineralogical composition and microstructure to the mechanical properties of rock materials [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2013, 41(3): 59–63, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.03.014.
- [25] 杨立云, 刘振坤, 周莹莹, 等. 爆炸应力波在含层理介质中传播规律的实验研究 [J]. *爆破*, 2018, 35(2): 1–5, 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.001.
- YANG L Y, LIU Z K, ZHOU Y Y, et al. Study on propagation law of explosive stress wave in layered media [J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 1–5, 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.001.

(责任编辑 蔡国艳)