

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.06.005

静动态压缩下千枚岩长径比效应影响研究

许江波¹, 余洋林², 孙国政¹, 孙浩琿^{1,3}, 赖杰⁴, 王磊⁵

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 陕西建工第十二建设集团有限公司, 陕西安康 725000; 3. 葛洲坝集团交通投资有限公司, 武汉 430000; 4. 火箭军工程大学作战保障学院, 西安 710025; 5. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘要: 为了研究长径比效应对层状千枚岩力学特性、能量耗散及破坏模式的影响, 文中选用 4 种倾角 ($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) 下不同长径比 ($L/D=0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0$) 的千枚岩分别进行了静载单轴压缩和分离式霍普金森杆 (SHPB) 试验。结果发现, 静载压缩试验条件下, 不同倾角下千枚岩随长径比的增大, 峰值强度和峰值应变均减小。通过单轴动态压缩试验, 发现 4 种层理倾角千枚岩动态抗压强度与试样长径比呈二次函数关系, 随着长径比的增加, 动态抗压强度出现一个峰值后逐渐降低; 千枚岩峰值应变与试样长径比呈指数函数关系下降; 对动态冲击压缩试验进行能量分析, 发现不同工况的千枚岩在同一冲击气压下, 入射能、反射能、透射能均呈现出先缓慢上升再快速上升最后趋于稳定的三段式变化; 随着试样长径比增大, 千枚岩反射能比先增大后减小, 透射能比先减小后增大; 采用能量比值法进行对比分析, 发现在长径比 $L/D=1.2$ 时, 千枚岩的反射能比达到最大, 透射能比达到最小; 对千枚岩的宏观破坏模式进行分析, 发现动态冲击压缩下千枚岩的宏观破坏模式受长径比影响较大, 长径比越小破坏越完全; 长径比越大, 破坏越不充分。

关键词: 层状千枚岩; 分离式霍普金森杆试验; 长径比效应; 能量耗散; 破坏模式

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)06-043-15

Influence of phyllite aspect ratio under static and dynamic compression

XU Jiangbo¹, YU Yanglin², SUN Guozheng¹, SUN Haohui^{1,3}, LAI Jie⁴, WANG Lei⁵

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. Shaanxi Construction No.12 Construction Group Co., Ltd., An'kang 725000 Shaanxi, P. R. China; 3. Gezhouba Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430000, P. R. China; 4. College of Combat Support, Rocket Force of University, Xi'an 710025, P. R. China; 5. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China)

Abstract: This study investigates the influence of aspect ratio on the mechanical properties, energy dissipation, and failure mode of layered phyllite. Uniaxial compression and split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests were conducted on phyllite specimens with varying aspect ratios ($L/D=0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0$) at four inclination

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024GXBYBXM-372, 2024QCY-KXJ-176, 2023-CX-TD-35, 2023KXJ-159); 陕西省交通厅(22-38K, 23-39R)。

Supported by Key Research and Development Projects of Shaanxi Province(2024GXBYBXM-372, 2024QCY-KXJ-176, 2023-CX-TD-35, 2023KXJ-159), and Department of Transport of Shaanxi Province(22-38K, 23-39R).

作者简介: 许江波(1985—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方向研究, (E-mail) xujiangbo@yeah.net。

angles($\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$). Results from static uniaxial compression test reveal that the peak strength and the peak strain of phyllite decrease with increasing aspect ratio at different dip angles. Uniaxial dynamic compression tests show that the dynamic compressive strength of phyllite with four bedding dip angles exhibits a quadratic function relationship with the length-diameter ratio of the specimen under dynamic impact compression conditions. With increasing length-diameter ratio, the dynamic compressive strength reaches a peak and then gradually decreases. The peak strain of phyllite decreases exponentially with the aspect ratio of specimen. Energy analysis of dynamic impact compression test indicates a three-stage change in incident energy, reflection energy, and transmission energy of phyllite under different working conditions, from slow rise to rapid rise and finally to being stable. The reflection energy ratio of phyllite increases first and then decreases with the increase of the length-diameter ratio, while the transmission energy ratio shows the opposite trend. Comparative analysis using the energy ratio method reveals that the reflection energy ratio of phyllite reaches its maximum and the transmission energy ratio reaches its minimum when the aspect ratio is $L/D=1.2$. Macroscopic failure mode analysis indicates that the aspect ratio significantly affects the macroscopic failure mode of phyllite under dynamic impact compression, with smaller the aspect ratios resulting in more complete fractures and larger aspect ratios leading to less sufficient damage.

Keywords: layered phyllite; split Hopkinson pressure bar test; aspect ratio effect; energy dissipation; failure mode

随着交通基础工程建设的飞速发展,千枚岩地质工程也在不断增多,目前普遍采用岩石静力学理论研究其中的力学问题。但是在实际工程中,岩石经常承受动载荷(冲击、地震、爆破等),千枚岩作为一种非均质、各向异性的变质岩体加上本身固有的特点使其力学性能更易受到外荷载及环境因素的影响。因此,探讨层理类千枚岩动态条件下的动力学问题,对层理类岩石进行动态试验时如何选取合理尺寸和解决工程实际问题具有重大意义。

近年来,众多学者针对岩石的长径比效应进行了大量研究,发现岩石材料具有明显的长径比效应。针对岩石长径比效应的研究主要还是偏向于静载试验。Sanei等^[1]通过直剪试验研究了沉积岩长径比效应与抗剪强度之间的关系。Buzzi等^[2]研究了岩石结构抗剪强度与尺寸的关系。Liang等^[3]建立了节理网络的二维模型,研究了节理岩体弹性模量和单轴抗压强度的尺寸效应和各向异性。卢妮妮^[4]研究了节理岩体的单轴抗压强度与尺寸之间的关系。唐伟等^[5]发现了岩石强度、峰值应变和压缩模量与岩石尺寸的关系。王创业等^[6]通过红砂岩声发射试验,研究了长径比对试样破坏特征的影响。刘丹等^[7]建立了尺寸节理岩体模型,开展了数值模拟试验,探讨了峰值抗压强度与长径比之间的定性关系。伍法权等^[8]对直径20~50 mm的玄武岩和青砂岩展开长径比效应研究,分析了岩样中孔隙大小、形状和分布情况对尺寸效应变化的影响。

当前针对动态加载下岩石的长径比效应研究相对较少,缺乏统一的认识^[9-10]。王青元等^[11]利用所提出的模型对7个不同尺寸的岩样进行了单轴压缩蠕变数值模拟,分析了岩石长期强度的长径比效应影响。梁昌玉等^[12]对花岗岩进行动载试验,研究了花岗岩冲击破坏时的能量、动态抗压强度和峰值应变与长径比间的关系。余洋林等^[13]、许江波等^[14]对花岗岩和闪长岩进行单轴压缩试验,分析了单轴压缩下花岗岩和闪长岩各特征应力大小、损伤过程和破坏模式。平琦等^[15]对不同长径比石灰岩进行单轴冲击压缩试验,发现了石灰岩的动态抗压强度与试件长度间的关系。李地元等^[16]选取同直径不同长径比花岗岩进行了动静态压缩试验,发现试样长径比越小,花岗岩的动态抗压强度越小。许江波等^[17]研究了节理倾角和方位角对千枚岩抗拉峰值强度和动态拉伸模量影响以及不同方位角对千枚岩破坏模式的影响。武仁杰等^[18]对千枚岩进行动态压缩试验,研究了层理倾角对千枚岩的动力特性的影响关系。王磊等^[19]通过SHPB试验,开展了不同冲击气压下不同长径比的煤样动态剪切试验,分析了煤样动态剪切强度和加载率的长径比效应,建立了长径比效应理论模型。罗伊^[20]研究了砂岩在动载作用下试件尺寸对岩石强度的影响机理。

岩石内部裂纹发展贯通是一个能量的集聚与耗散的过程,从能量角度出发研究岩石的破坏过程已成为

当今研究的重点^[21-22]。谢和平等^[23]研究了岩石变形破坏过程中能量耗散、能量释放与岩石强度和整体破坏的内在联系。刘刚等^[24]研究了黄砂岩的强度、破坏形态及能量转化规律与尺寸间的关系。许江波等^[25]通过SHPB试验研究了千枚岩破坏过程中的能量耗散和强度特征。抓住岩石在不同尺寸下的能量演化规律,便能分析出尺寸效应影响岩石变形破坏的原因。

文中以层理千枚岩为研究对象,分析了静动载压缩条件下的千枚岩长径比效应影响,探索了层理千枚岩在动态冲击下岩样的动力力学特性、能量耗散及其破坏模式随岩样尺寸的演化规律,明确动态压缩试验下千枚岩的尺寸效应影响。

1 试验概况

1.1 试样制备

文中千枚岩岩样取自江西省九江市况家港G532线附近,通过改变定向取芯获取不同层理倾角的千枚岩试样,如图1所示。选取具有代表性层理倾角依次为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 。通过切割、打磨等工序加工成直径为50 mm,高度分别为25、30、40、50、60、80、100 mm的岩石试样,试样两端面平行度 <0.02 mm,端面平整度 <0.5 mm。最终加工成具有4种层理倾角(0° 、 30° 、 60° 和 90°)、7种不同长径比(0.5, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2)的千枚岩试样,如图2所示。

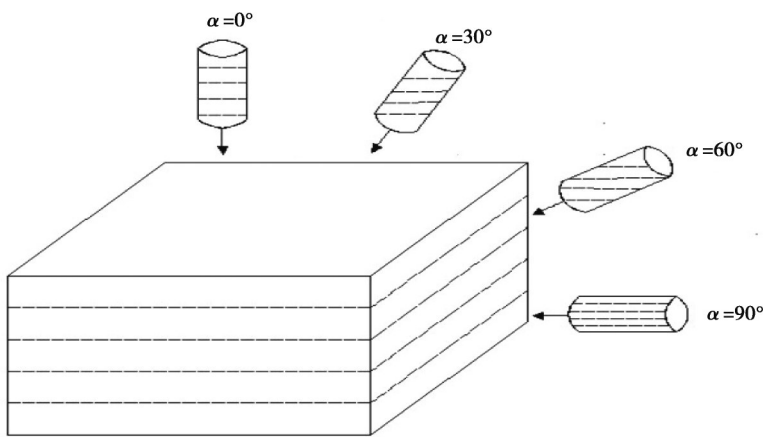


图1 千枚岩定向取芯示意图

Fig. 1 Schematic diagram of directional coring for phyllite



图2 千枚岩试样图

Fig. 2 Phyllite samples

1.2 试验系统

1.2.1 静载压缩试验方案

本次单轴压缩试验采用位移加载方式进行加载,以千枚岩试样受力0.2 MPa为标准,位移加载速度恒定为0.1 mm/min,直至试样完全破坏为止。试验装置如图3所示。

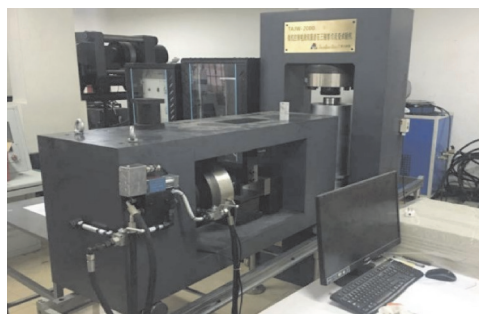


图3 岩石三轴剪切流变试验机(TAJW-2000)

Fig. 3 Rock triaxial shear rheological testing machine(TAJW-2000)

1.2.2 动载压缩试验方案

动载试验设备采用SHPB试验系统,所用杆直径为50 mm,入射杆长为2 000 mm,透射杆长为1 500 mm,吸收杆长为500 mm,材质均为弹性钢,屈服强度 $>1\ 200\ \text{MPa}$,钢杆弹性模量 $E=210\ \text{GPa}$,波速 $C_0=5\ 124\ \text{m/s}$,密度为 $7\ 800\ \text{kg/m}^3$ 。

对千枚岩试样分别进行 $0.25\ \text{MPa}$ 气压下的动态冲击压缩试验。在冲击加载过程中,要保持试件与入射杆和透射杆具有紧密的接触,使得应力波进行有效传播。在冲击加载过程中,为了观测千枚岩试件动态冲击过程中的破坏过程,采用高速摄像机进行同步拍摄,为防止试件破碎飞溅对试验人员及设备造成损伤,在试件和设备之间放置高强度的玻璃纤维进行遮挡。试验测试系统装置如图4所示。为避免岩石试验在实现应力-应变平衡之前过早破坏,减少波形弥散,影响岩石试样动力性能测试,选用直径为15 mm、厚度为1 mm的圆形紫铜片为波形整形片,整形前后波形如图5所示。

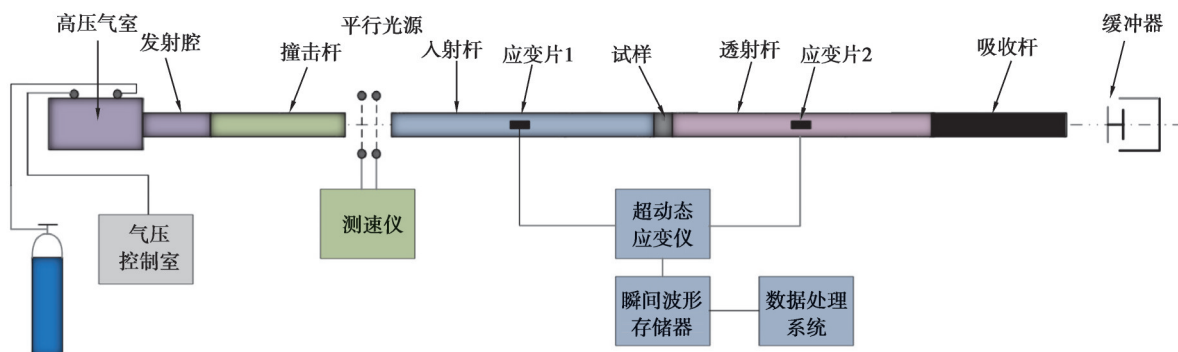


图4 SHPB试验测试系统图

Fig. 4 SHPB test system

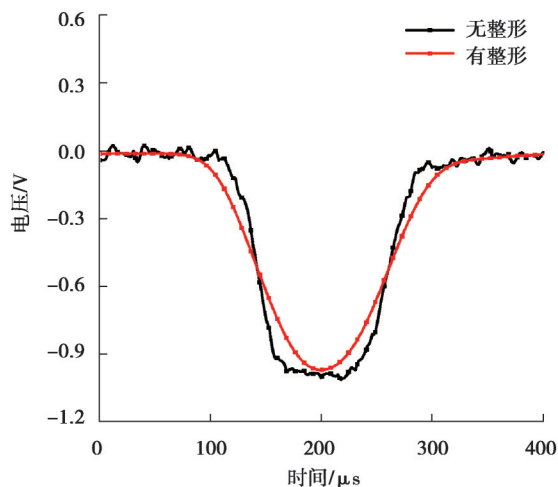


图5 整形前后波形图

Fig. 5 Waveforms before and after shaping

1.3 动态压缩试验原理

SHPB试验的基本原理是建立在2个基本假设基础上,即一维假设和均匀假设^[20]。根据SHPB应力均匀性假定,采用二波法确定试件材料的应变率 $\dot{\epsilon}$ 、应变 ϵ 和试件两端面应力值 σ_s ,得到材料的动态应力-应变关系。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_0}{l_s} \varepsilon_R(t), \\ \varepsilon = -2 \frac{C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt, \\ \sigma_s = \frac{A_0}{A_s} E \varepsilon_T(t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_0 为弹性波波速; l_s 为试样初始长度; ε_T 为入射应变; ε_R 为反射应变; ε_T 为透射应变; A_0 为杆件横截面积; A_s 为试样面积; E 为钢杆弹性模量。

在 SHPB 试验中进行能量分析时,根据能量守恒定律,假定入射杆、透射杆是完全刚性的,在传播过程中没有发生任何能量损失,在此基础上,可得到冲击过程中各部分能量的关系。

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \int \varepsilon_1 \sigma_1 S dl = SEc \int \varepsilon_1^2 dt \\ E_R &= \int \varepsilon_R \sigma_R S dl = SEc \int \varepsilon_R^2 dt \\ E_T &= \int \varepsilon_T \sigma_T S dl = SEc \int \varepsilon_T^2 dt \\ E_D &= E_1 - E_R - E_T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: S 为横截面面积; σ_1 为入射应力; σ_R 为反射应力; σ_T 为透射应力; E_D 、 E_1 、 E_R 、 E_T 分别为耗散能、入射能、反射能、透射能。

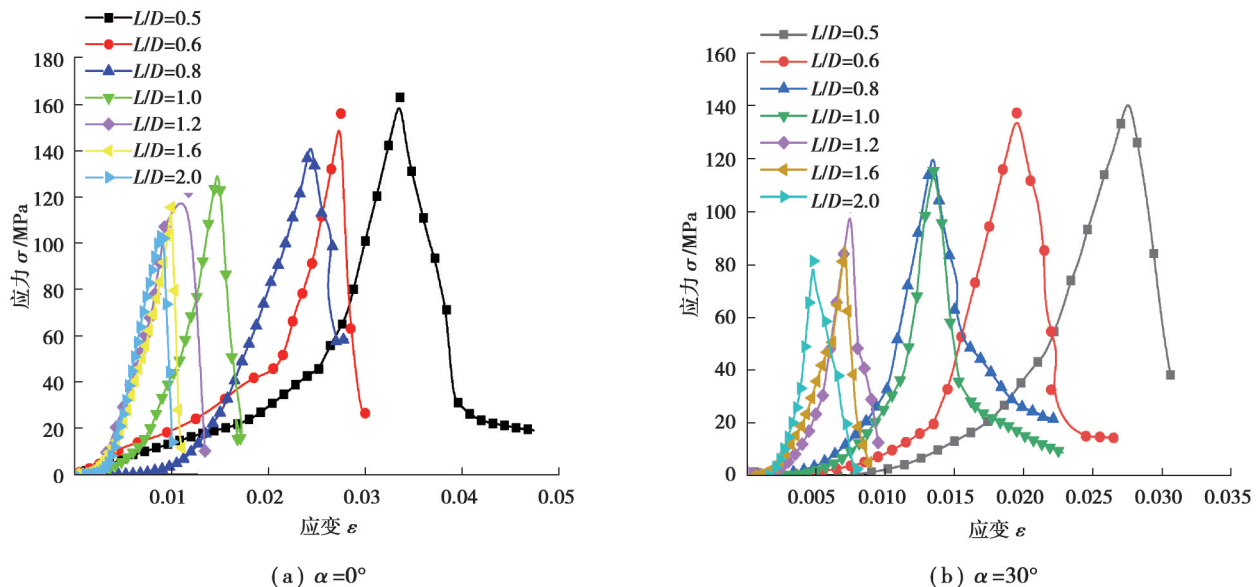
2 试验数据分析

2.1 长径比与应力-应变关系分析

2.1.1 静载下长径比与应力-应变关系分析

采用 TAJW-2000 岩石力学试验系统对千枚岩试样进行静态单轴加载试验,得到了千枚岩试样破坏时的基本力学参数。经过数据处理绘制出千枚岩试样的应力应变曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知,单轴压缩下,不同长径比千枚岩应力-应变曲线在刚开始加载时,应力增加较小,应变增加较快,此时岩石处于裂隙压密阶段。4 种倾角下千枚岩随着长径比的增大,岩石内部的裂隙压密阶段明显缩短。对比分析 4 种倾角下千枚岩的应力-应变曲线变化趋势,发现同一倾角下千枚岩的峰值强度和峰值应变均随试样长径比的增大而降低,这是由于长径比较小时,岩石材料的强度增加,但是刚度有所减小,变形能力增强,并且千枚岩试样明显受端部约束影响,该条件下峰值强度较高。随着长径比的增加,岩石材料内部缺陷叠加是导致材料强度降低,此时端部约束作用逐渐减弱,试样破坏程度较大。这与一般目前认为的“长度减小,强度增大”是一致的。



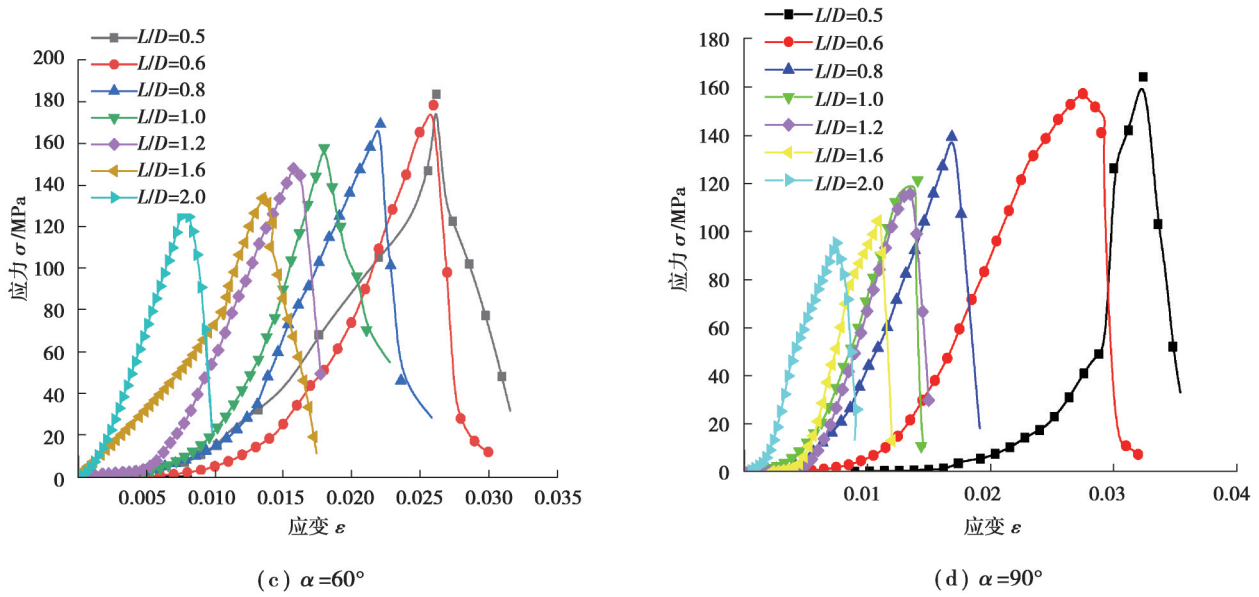


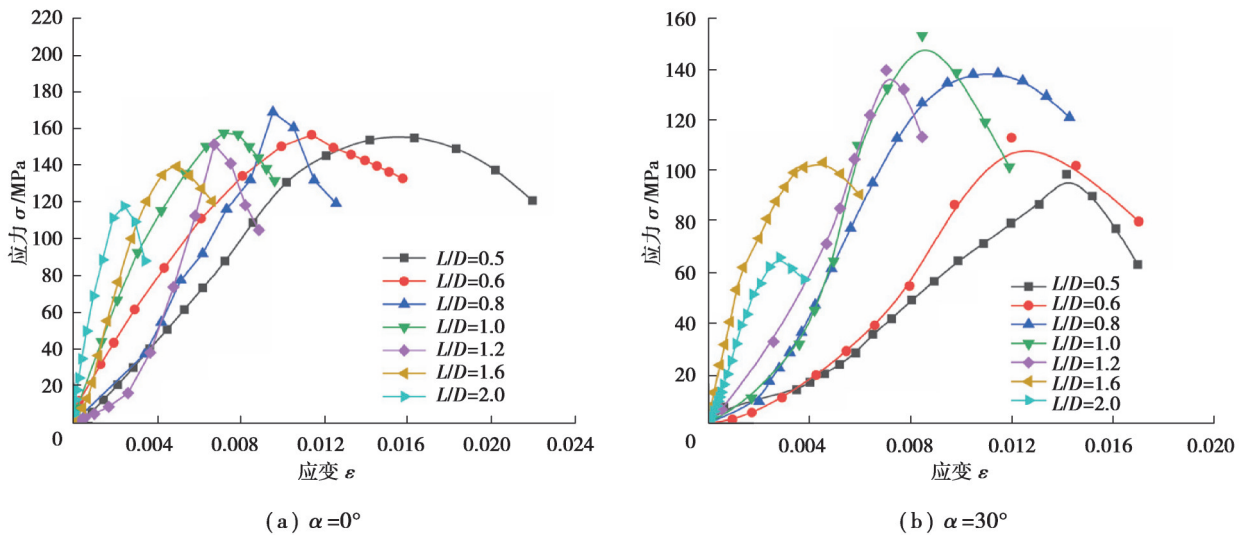
图6 静态压缩下不同长径比千枚岩应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of phyllite with different aspect ratios under static compression

2.1.2 动态压缩下长径比与应力-应变关系分析

动态压缩条件下,4种倾角下不同长径比千枚岩应力-应变曲线均可分为4个阶段:裂隙初始压密阶段、弹性变形阶段、塑性增强阶段和岩石破坏阶段。

由图7可知,0°、60°、90°倾角下千枚岩,长径比在L/D=0.5~0.8范围内,应力-应变曲线形态变化较大,曲线破坏时的峰值应变较大;当千枚岩长径比L/D=1.0~2.0范围内时,曲线形态变化较小。30°倾角下千枚岩应力-应变曲线形态大致可分为3类,试件长径比L/D=0.5~0.6时,曲线抗压强度较低,峰值应变较大,曲线较平缓;试件长径比L/D=0.8~1.0时,曲线峰值较高,曲线整体形态较好;试件长径比L/D=1.2~2.0时,曲线斜率较大,上升速度较快。研究发现,层理倾角的增加对千枚岩应力-应变曲线形态影响不大。4种倾角下千枚岩试样在长径比L/D=0.5~1.0范围内,应力-应变曲线形态变化较明显,但当试样长径比L/D>1.0时,千枚岩应力-应变曲线形态随试样长度的增加变化较小。分析得出,这是由于在同一冲击气压下,长径比L/D=0.5~1.0的试样处于高应变率范围,岩石在高应变率下更易达到应力平衡,此时岩石试样动态力学特性的尺寸效应显著。当试样长径比L/D>1.0时,岩石试样应变率变化较小,此时尺寸效应效果较小。



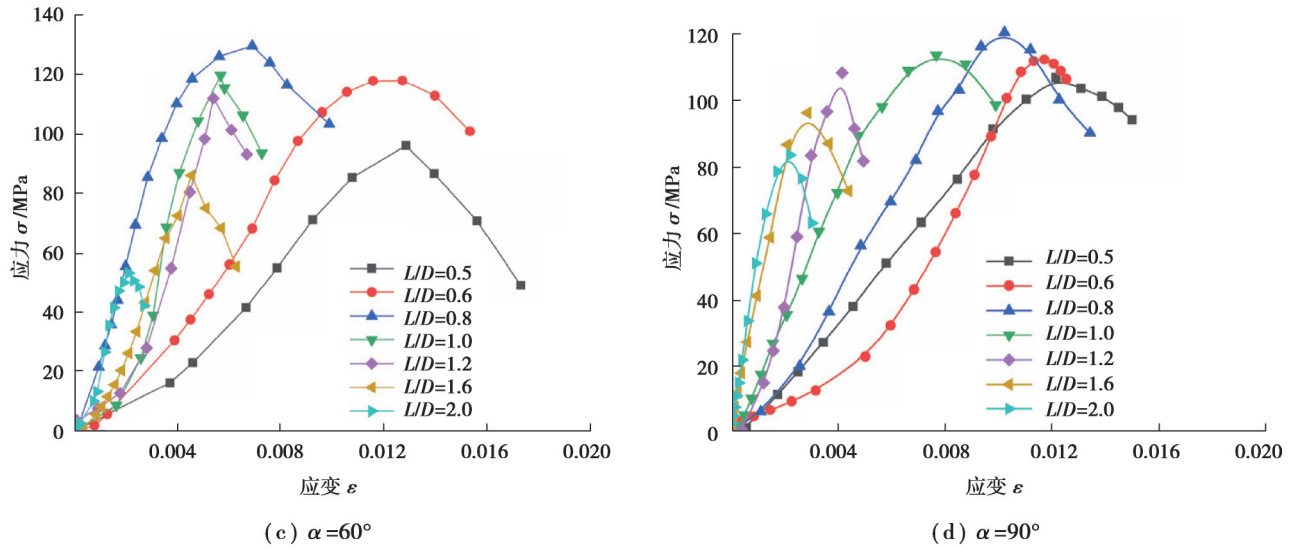


图 7 动态压缩下不同长度千枚岩应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of phyllite with different lengths under dynamic compression

2.2 长径比与抗压强度关系分析

2.2.1 静态压缩下长径比与抗压强度关系分析

分析不同长径比千枚岩单轴压缩下抗压强度,建立千枚岩单轴抗压强度与长径比的关系式为

$$\sigma = \sigma_0 * \exp \left[a + \frac{b}{(L/D) + c} \right], \tag{3}$$

式中:σ代表岩样的单轴抗压强度;σ₀为长径比为2时,岩样的抗压强度;L/D为试样长径比;a、b、c为与材料有关的常数。

4种倾角下千枚岩单轴抗压强度与长径比拟合的曲线如图8所示,由图8可知,相同倾角下千枚岩的单轴压缩强度随长径比的增大逐渐减小,60°倾角下千枚岩单轴压缩强度受长径比影响最大。研究发现,相同长径比下的千枚岩单轴压缩强度在层理倾角为0°时最大,在层理倾角为60°时最小。说明随着倾角的增加,千枚岩发生了沿倾角的剪切滑移破坏和张拉破坏,而当发生沿节理面的剪切滑移破坏时,其强度均有显著减少。

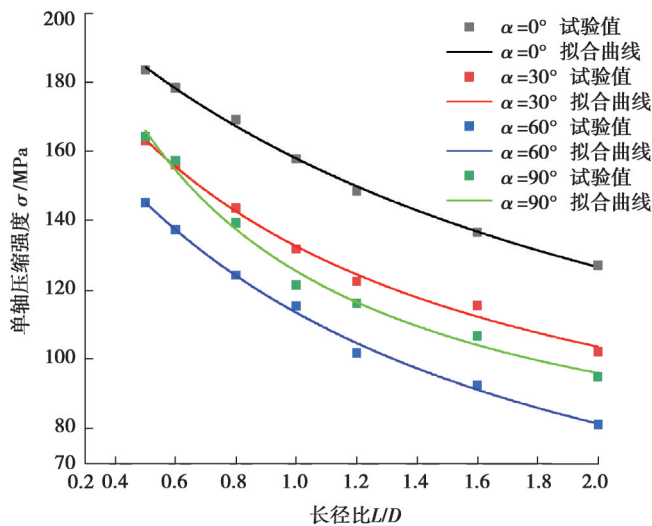


图 8 静态压缩下千枚岩单轴压缩强度与长径比关系图

Fig. 8 Relationship between uniaxial compressive strength and aspect ratio of phyllite under static compression

2.2.2 动态压缩下长径比与抗压强度关系分析

对单轴动态压缩条件下所得抗压强度与长径比之间关系进行曲线拟合,绘制散点图,如图9所示。

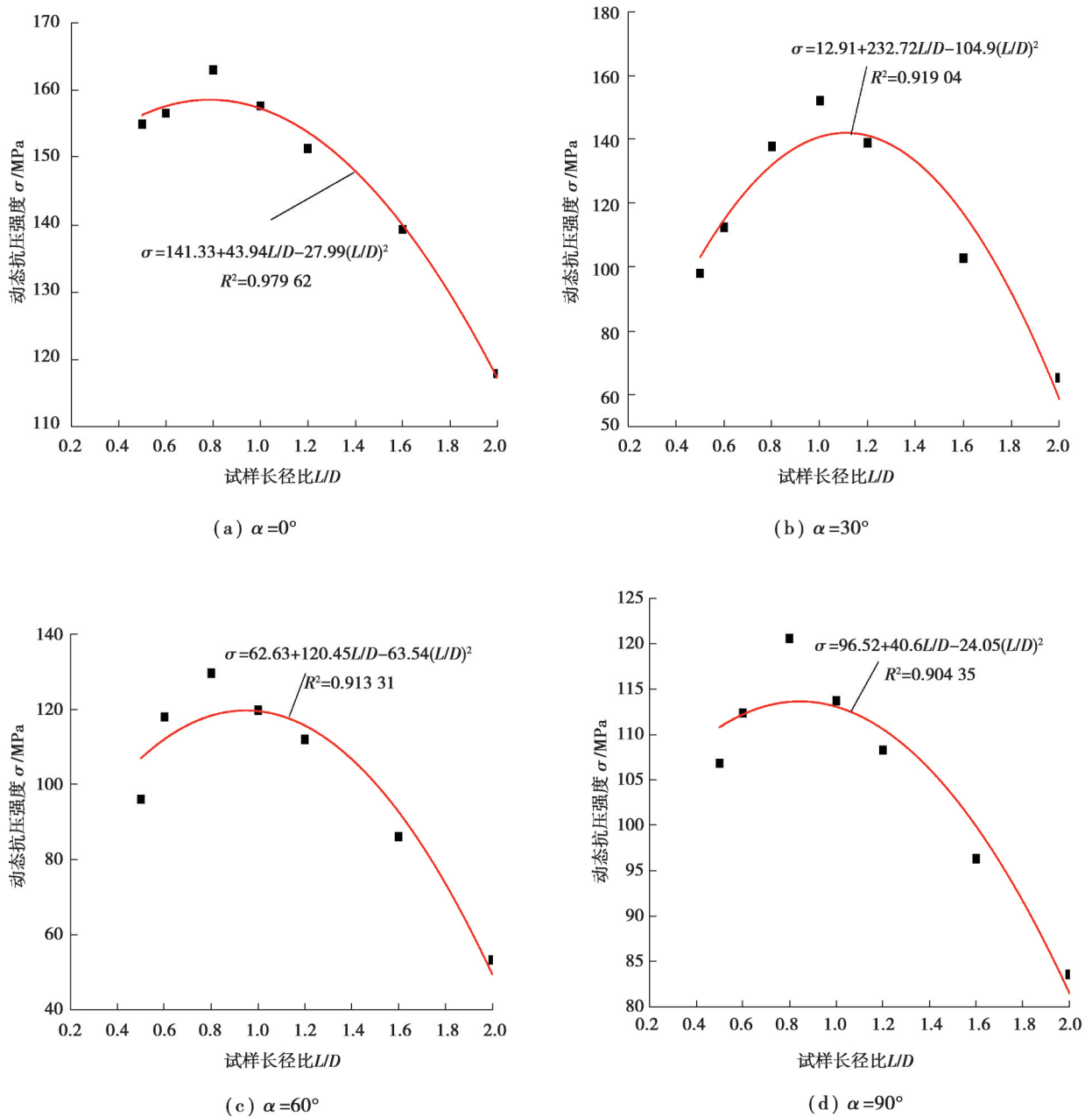


图9 动态压缩下千枚岩动态抗压强度与长径比关系

Fig. 9 Relationship between dynamic compressive strength and aspect ratio of phyllite under dynamic compression

由图9可知,4种层理倾角下千枚岩试样动态抗压强度随试样长径比增加均呈二次函数变化趋势,在固定冲击气压作用下,4种倾角下千枚岩试样随长径比变化均存在一个最大动态抗压强度值,将最大动态抗压强度处的长径比定义为最大强度长径比。在4种层理倾角下,当千枚岩试样长径比未达到最大强度长径比时,试样动态抗压强度随长径比的增加而增加,这是由于当试件长度较小时,尺寸效应强于应变率效应所致;当千枚岩试样长径比超过最大强度长径比时,由于试样长径比过大导致试样不稳定而提前发生破坏,使得岩石的动态抗压强度降低。此时,试样动态抗压强度表现出随着长径比的增加而降低的趋势。

2.3 长径比与峰值应变关系分析

2.3.1 静态压缩下长径比与峰值应变关系分析

静态压缩条件下,分析千枚岩单轴压缩下峰值应变与长径比的变化规律,得到千枚岩峰值应变与长径比

的关系式为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \exp[a + b(L/D)], \quad (4)$$

式中: ε 代表试样的峰值应变; ε_0 为长径比为2时岩样的峰值应变; L/D 为试样长径比; a 和 b 均为与材料有关的常数。

4种倾角下千枚岩单轴压缩下峰值应变与长径比拟合的曲线如图10所示,由图可知,随着长径比的增大,峰值应变逐渐减小。60°倾角下千枚岩单轴压缩下峰值应变受长径比影响最大。

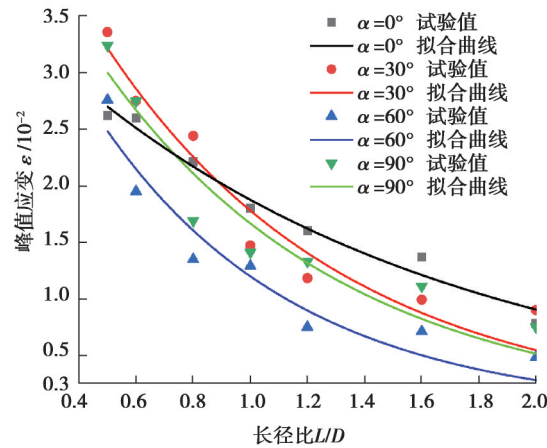
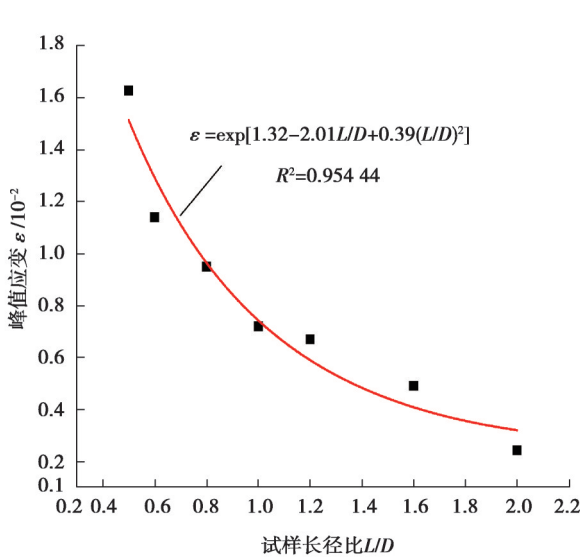


图 10 不同倾角下千枚岩峰值应变与长径比关系

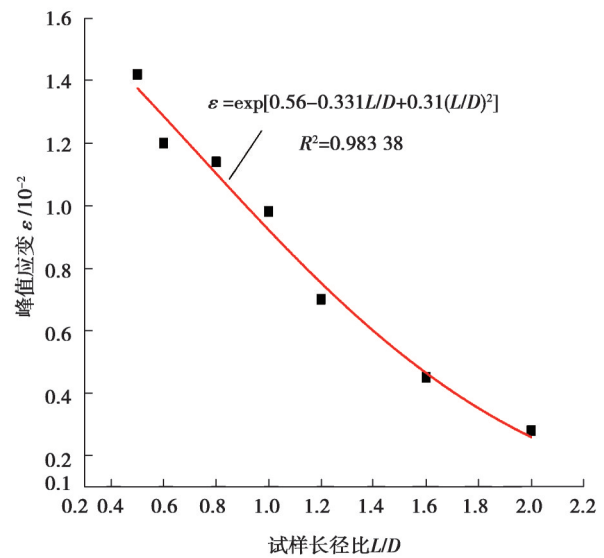
Fig. 10 Relationship between peak strain and aspect ratio of phyllite under different dip angles

2.3.2 动态压缩下长径比与峰值应变关系分析

动态压缩下对试验数据进行拟合,得到千枚岩在动态冲击下峰值应变与长径比拟合关系式。如图11所示,发现不同长径比千枚岩试样在同一气压冲击下,千枚岩峰值应变与试样长径比呈指数函数关系,峰值应变随试样长径比的增加而降低。在倾角为0°和60°、试样长径比 $L/D < 1.2$ 时,峰值应变随试样长径比的增加快速下降;当试样长径比 $L/D > 1.2$ 时,峰值应变随试样长径比的增大下降速度变缓。这是由于当试件长径比 $L/D < 1.2$ 时,试件长度较小,加载条件下,弹性较稳定应力平衡性好,峰值应变率尺寸效应明显;当 $L/D > 1.2$ 时,试件长度较大,加载条件下受力复杂,弹性不稳定所致。当峰值应变变化较小而倾角为30°和90°时,随长径比增大,峰值应变下降趋势并没有明显的拐点。



(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 30^\circ$

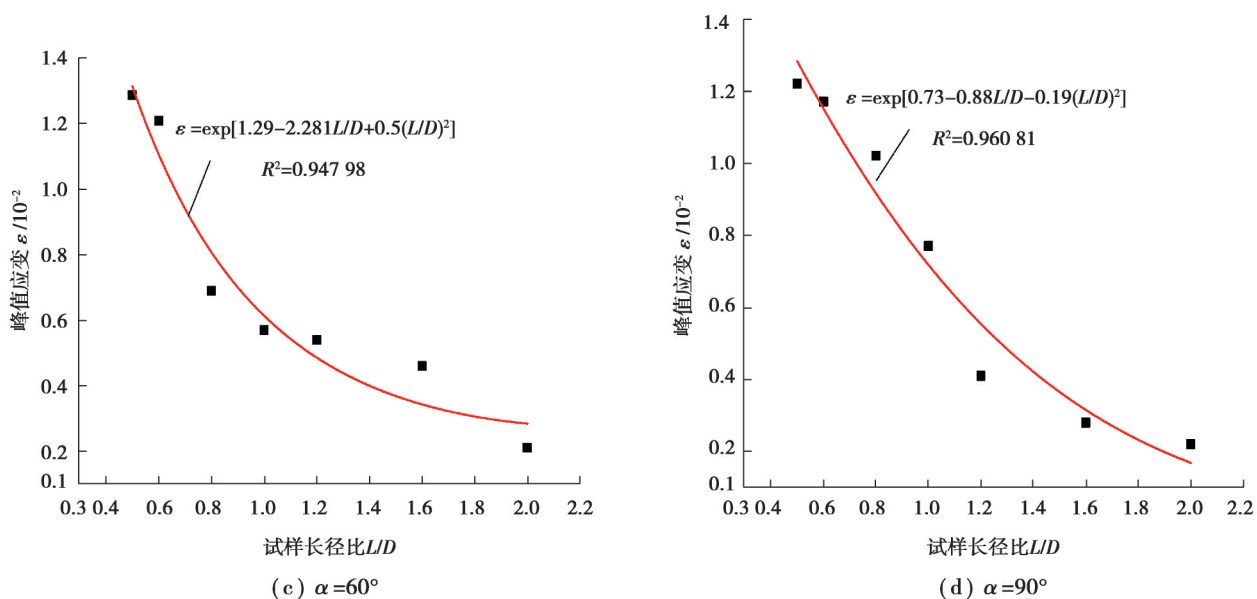


图 11 4种倾角下千枚岩峰值应变与长径比关系

Fig. 11 Relationship between peak strain and aspect ratio of phyllite under four dip angles





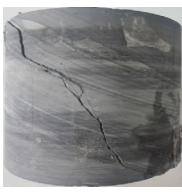
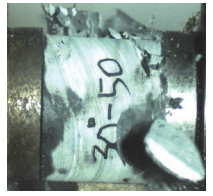


3 宏观破坏模式与能量分析

3.1 破坏特征分析

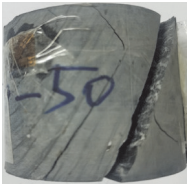
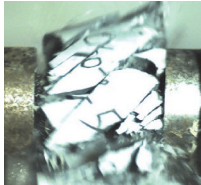

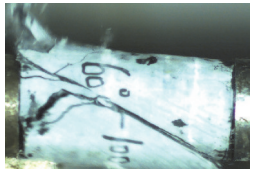

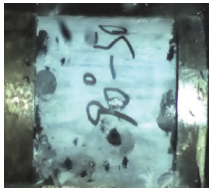

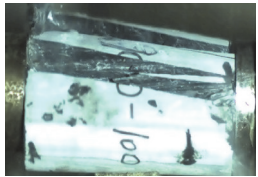
在千枚岩静动态试验压缩过程中,为了研究长径比对千枚岩宏观破坏模式的影响,利用(高速)相机对2种典型长径比(L/D=1.0、2.0,试样直径为50 mm)的千枚岩破坏形态进行记录,其结果如表1所示。表中试样编号如QJ00-50,QJ-千枚岩倾角,00-倾角角度,50-千枚岩岩样长度。

表 1 静动态下千枚岩宏观破坏形态

Table 1 Macroscopic failure modes of phyllite under static and dynamic conditions

编号	静态	动态	编号	静态	动态
QJ00-50			QJ00-100		
QJ30-50			QJ30-100		

续表 1

编号	静态	动态	编号	静态	动态
QJ60-50			QJ60-100		
QJ90-50			QJ90-100		

静态压缩下对千枚岩的宏观破坏模式进行分析,发现千枚岩的宏观破坏模式随层理倾角的变化主要发生如下破坏:千枚岩在 0° 倾角下,主要发生剪切破坏;在 30° 倾角下,主要发生剪切滑移破坏;在 60° 倾角下,主要发生剪切滑移及张拉破坏;在 90° 倾角下,主要发生张拉破坏。相同倾角不同长径比下,千枚岩破坏模式虽然略有不同,但差别较小,静态单轴压缩下千枚岩的宏观破坏模式主要由层理面倾角控制。

分析动态压缩下千枚岩的宏观破坏形态。发现当 $\alpha=0^\circ, L/D=1.0$ 时,千枚岩试样破坏面与层理面成一定倾角,发生局部剪切破坏,破坏区域较小;当 $L/D=2.0$ 时,试样在拉应力作用下发生纵向层裂拉伸破坏。当 $\alpha=30^\circ, L/D=1.0$ 时,发生沿层理面方向的剪切破坏;在 $L/D=2.0$ 时,千枚岩破坏类型为纵向层裂拉伸破坏。当 $\alpha=60^\circ$ 时,2种长径比千枚岩均发生沿层理面方向的剪切滑移破坏,这表明 60° 倾角下千枚岩破坏模式受倾角效应影响要比长径比效应大。当 $\alpha=90^\circ, L/D=1.0$ 时,千枚岩抗压强度较大,只是在局部区域发生轻微破坏, $L/D=2.0$ 均发生沿层理面的劈裂破坏。

综上所述,静态压缩条件下千枚岩宏观破坏模式受层理面倾角的影响较大,相同倾角下长径比的变化对千枚岩宏观破坏模式影响较小。动态压缩条件下,由于长度比较小,在较高应变率作用下,在主裂纹贯通之前,试件吸收的能量达到较高水平,使得较多的细观裂纹得到扩展,加剧破坏过程,导致试件破坏程度更小呈粉碎性破坏。试样长度较长时,由于压缩应力波传至透射杆端与试件接触面时,在试件中形成反射拉伸波,又由于试件较长,很容易在薄弱处出现垂直于轴向的断裂面,试件沿中点折断,破坏形式往往比较复杂^[27-28]。

3.2 能量耗散分析

由于同一冲击气压、不同层理、不同长径比千枚岩在动力冲击压缩下,入射能增长趋势和幅度基本一致。因此,文中将不同层理倾角、不同长径比千枚岩在动态冲击作用下反射能、透射能的变化过程进行比较分析,发现不同工况的千枚岩在相同冲击气压下,入射能、反射能、透射能都呈现出3阶段式变化,能量变化阶段由缓慢上升到快速上升最后趋于稳定。不同倾角和长径比下千枚岩试样能量增长变化过程基本一致,如图12所示。

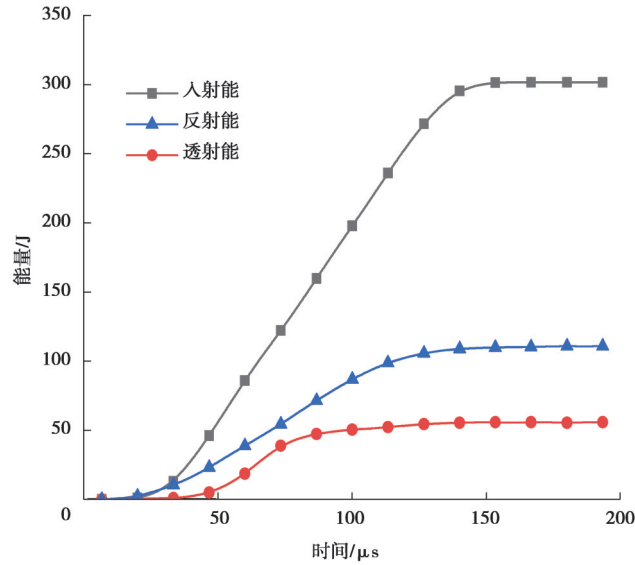


图 12 $\alpha=0^\circ$ 时长径比为 0.6 的千枚岩能量时程曲线

Fig. 12 $\alpha=0^\circ$ energy time-history curve of phyllite with aspect ratio of 0.6

为降低入射波能量差异对分析结果的影响,采用能量比值法进行对比分析, E_r/E_i 、 E_t/E_i 、 E_d/E_i 分别表示反射能、透射能和耗散能占总输入能量的比值,通过数据分析处理获得反射能比、透射能比、耗散能比在不同长径比下的占比情况,各能量比随长径比的变化曲线如图 13~图 15 所示。

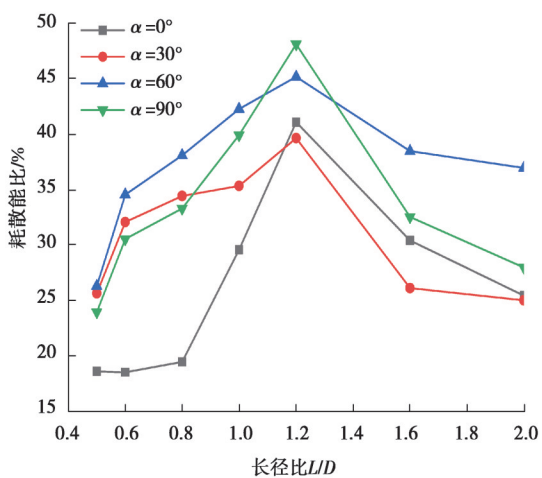


图 13 不同倾角下反射能比与长径比关系

Fig. 13 Relationship between reflection energy ratio and aspect ratio at different inclination angles

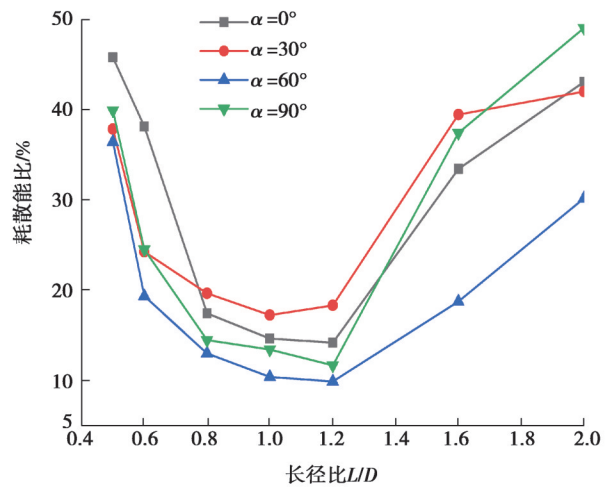


图 14 不同倾角下透射能比与长径比关系

Fig. 14 Relationship between transmission energy ratio and aspect ratio at different dip angles

由图可知,4种倾角下($\alpha=0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90°)千枚岩试样的反射能比随长径比增大呈现先增大后减小的趋势,千枚岩试样的透射能比随长径比增大呈现先减小后增大的趋势。在长径比 $L/D=1.2$ 时,千枚岩的反射能比达到最大,透射能比达到最小。层理千枚岩的反射能比和透射能比存在 1 个临界长径比,临界长径比 $L/D=1.2$ 。当千枚岩试样长径比未达到 1.2 时,千枚岩试样反射能比与长径比呈正相关,透射能比与长径比呈负相关;当千枚岩试样长径比超过 1.2 时,千枚岩试样反射能比与长径比呈负相关,透射能比与长径比呈正相关。千枚岩试样的耗散能比随长径比的增加呈现先增加后降低的趋势,在长径比 $L/D=0.8$ 时,各倾角下千枚岩试样的耗散能比达到最大值。对比 4 种倾角下千枚岩的反射能比、透射能比和耗散能比随长径比的变化规律,发现相同长径比下不同层理面倾角千枚岩的能量比也存在差异,表明层理倾角对千枚岩动态冲击过程能量

占比也存在一定的影响。

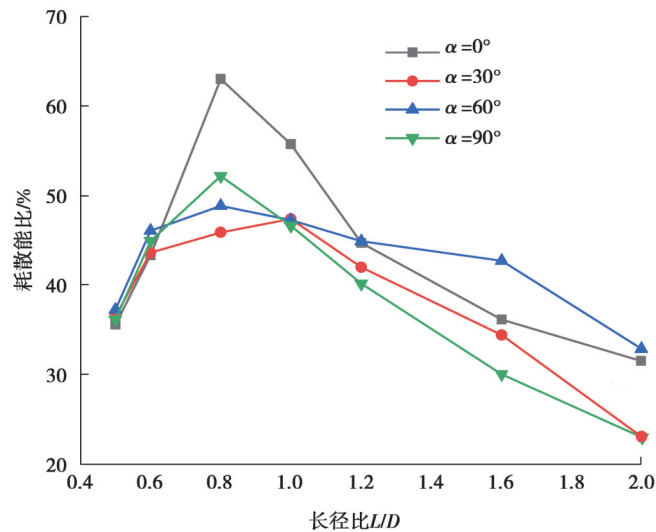


图 15 不同倾角下耗散能比与长径比关系

Fig. 15 Relationship between dissipative energy ratio and length-diameter ratio at different inclinations

4 结 论

通过对4种倾角下不同长径比千枚岩进行静态和动态单轴压缩试验。分析了静态压缩试验各倾角下不同长径比千枚岩的力学特性、力学参数随长径比的变化规律和宏观破坏模式。通过单轴动态压缩试验,得出了长径比效应对千枚岩的力学特性、能量耗散和宏观破坏模式的影响。

1)4种层理倾角下千枚岩试样动态抗压强度与试样长径比呈二次函数关系,随长径比的增大呈现先增大后减小的趋势。千枚岩峰值应变与试样长径比呈指数函数关系,随着长径比的增加快速下降。

2)对宏观破坏模式进行分析,发现当 $\alpha=0^\circ$ 时,千枚岩随试样长径比的增大破坏模式依次为压致张裂、剪切破坏和层拉破坏;当 $\alpha=30^\circ$ 时,千枚岩随试样长径比的增大破坏模式依次为剪切破坏、拉-劈复合破坏和层拉破坏;当 $\alpha=60^\circ$ 时,千枚岩发生剪切滑移破坏;当 $\alpha=90^\circ$ 时,千枚岩随试样长径比的增大依次发生劈裂破坏和剪切破坏。相比较静态压缩下千枚岩破坏模式,动态压缩下千枚岩宏观破坏模式不仅受层理倾角影响,而且还受长径比的影响较大。

3)进行能量分析时,发现入射能、反射能、透射能都呈现出由缓慢增长到快速增长最后趋于稳定的3阶段式变化。4种倾角下千枚岩试样的反射能比随长径比增大呈现先增大后减小的趋势,千枚岩试样的透射能比随长径比增大呈现先减小后增大的趋势。在长径比 $L/D=1.2$ 时,千枚岩的反射能比达到最大,透射能比达到最小。

参考文献

- [1] Sanei M, Faramarzi L, Fahimifar A, et al. Shear strength of discontinuities in sedimentary rock masses based on direct shear tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 119-131.
- [2] Buzzi O, Casagrande D. A step towards the end of the scale effect conundrum when predicting the shear strength of large in situ discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 105: 210-219.
- [3] Liang Z Z, Wu N, Li Y C, et al. Numerical study on anisotropy of the representative elementary volume of strength and deformability of jointed rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4387-4402.
- [4] 卢妮妮. 节理岩体力学性质尺寸效应离散元模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
Lu N N. Study on the size effect of mechanical properties of jointed rock mass by discrete element simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)

- [5] 唐伟, 赵晓豹, 雷继轅, 等. 不同围压下岩石抗压强度与变形参数尺寸效应的数值模拟[J]. 高校地质学报, 2016, 22(3): 580-588.
Tang W, Zhao X B, Lei J Y, et al. Numerical simulation on the size effect of compressive strength and deformation parameters of rock materials under different confining pressures[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(3): 580-588.(in Chinese)
- [6] 王创业, 常新科, 杜晓娅. 不同尺寸砂岩破坏全过程声发射主频分析[J]. 矿冶工程, 2019, 39(6): 10-14.
Wang C Y, Chang X K, Du X Y. Analysis of dominant frequency of acoustic emission through the whole failure process of different size of sandstone[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 10-14.(in Chinese)
- [7] 刘丹, 黄曼, 洪陈杰, 等. 基于代表性取样的节理岩体抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 766-776.
Liu D, Huang M, Hong C J, et al. Experimental study on size effect of compressive strength of jointed rock mass based on representative sampling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 766-776.(in Chinese)
- [8] 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 865-873.
Wu F Q, Qiao L, Guan S G, et al. Uniaxial compression test study on size effect of small size rock samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 865-873.(in Chinese)
- [9] Paterson M S, Wong T F. Experimental rock deformation the brittle field[M]. 2nd, completely rev. and updated ed. Berlin: Springer, 2005.
- [10] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611-614.
Liu B C, Zhang J S, Du Q Z, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.(in Chinese)
- [11] 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 981-990.
Wang Q Y, Zhu W C, Liu H L, et al. Size effect of long-term strength of sandstone under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 981-990.(in Chinese)
- [12] 梁昌玉, 李晓, 张辉, 等. 中低应变率范围内花岗岩单轴压缩特性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 528-536.
Liang C Y, Li X, Zhang H, et al. Research on size effect of uniaxial compression properties of granite under medium and low strain rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 528-536.(in Chinese)
- [13] 余洋林, 许江波, 费东阳, 等. 花岗岩单轴压缩力学特性试验及数值模拟[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(1): 85-92.
Yu Y L, Xu J B, Fei D Y, et al. Test and numerical simulation of mechanical properties of granite under uniaxial compression [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2022, 42(1): 85-92.(in Chinese)
- [14] 许江波, 余洋林, 费东阳, 等. 闪长岩单轴压缩力学特性试验及数值模拟研究[J]. 公路, 2021, 66(9): 329-335.
Xu J B, Yu Y L, Fei D Y, et al. Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of diorite under uniaxial compression[J]. Highway, 2021, 66(9): 329-335.(in Chinese)
- [15] 平琦, 张号, 苏海鹏. 不同长度石灰岩动态压缩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3891-3897.
Ping Q, Zhang H, Su H P. Experimental study on dynamic compressive mechanical properties of limestone with different lengths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3891-3897.(in Chinese)
- [16] 李地元, 肖鹏, 谢涛, 等. 动静态压缩下岩石试样的长径比效应研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 93-100.
Li D Y, Xiao P, Xie T, et al. On the effect of length to diameter ratio of rock specimen subjected to dynamic and static compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 93-100.(in Chinese)
- [17] 许江波, 崔易仑, 孙浩琿, 等. 节理千枚岩动力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 97-105, 113.
Xu J B, Cui Y L, Sun H H, et al. Study on dynamic characteristics of jointed phyllite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 97-105, 113.(in Chinese)
- [18] 武仁杰, 李海波, 李晓峰, 等. 不同冲击载荷下层状千枚岩压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3304-3312.
Wu R J, Li H B, Li X F, et al. Study on compressive mechanical properties of layered phyllite under different impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3304-3312.(in Chinese)

- [19] 王磊,陈礼鹏,袁秋鹏,等.不同冲击气压下煤样动态剪切强度的长径比效应[J].岩土工程学报,2024,46(1):131-139.
Wang L, Chen L P, Yuan Q P, et al. Length-diameter ratio effects of dynamic shear strength of coal samples under different impact air pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 131-139.(in Chinese)
- [20] 罗伊.岩石强度的动态尺寸效应机理研究[D].北京:北京建筑大学,2023.
Luo Y. Study on the mechanism of dynamic size effect on the strength of rock[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023. (in Chinese)
- [21] 张志镇,高峰.单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):953-962.
Zhang Z Z, Gao F. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-962.(in Chinese)
- [22] 孟庆彬,韩立军,浦海,等.应变速率和尺寸效应对岩石能量积聚与耗散影响的试验[J].煤炭学报,2015,40(10):2386-2398.
Meng Q B, Han L J, Pu H, et al. Experimental on the effect of strain rate and size on the energy accumulation and dissipation of rock[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2386-2398.(in Chinese)
- [23] 谢和平,鞠杨,黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3003-3010.
Xie H P, Ju Y, Li L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.(in Chinese)
- [24] 刘刚,肖福坤,秦涛.小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):3905-3917.
Liu G, Xiao F K, Qin T. Rock mechanical properties and acoustic emission law under small-scale effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3905-3917.(in Chinese)
- [25] 许江波,费东阳,孙浩琿,等.节理千枚岩能量传递与动力学特性[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(7):986-995.
Xu J B, Fei D Y, Sun H H, et al. Energy transfer and dynamic characteristics of jointed phyllite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(7): 986-995.(in Chinese)
- [26] 王礼立.应力波基础[M].2版.北京:国防工业出版社,2005.
Wang L L. Foundation of stress waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.(in Chinese)
- [27] 高富强,杨军,刘永茜,等.岩石准静态和动态冲击试验及尺寸效应研究[J].煤炭科学技术,2009,37(4):19-22,68.
Gao F Q, Yang J, Liu Y Q, et al. Research on rock parastatic and dynamic impact test and size effect[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(4): 19-22, 68.(in Chinese)
- [28] 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.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)