

# 多因素耦合效应对层状千枚岩动力特性的影响

许江波<sup>1</sup>, 孙国政<sup>1</sup>, 侯鑫敏<sup>1</sup>, 余洋林<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西建工第十二建设集团有限公司, 陕西 安康 725000)

**摘 要:** 为了研究不同长径比和倾角下应变率对层状千枚岩动力特性的影响, 选用4种倾角( $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ )两种长度( $L=25, 50$  mm)的层状千枚岩为研究对象, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行不同冲击气压( $p=0.150, 0.175, 0.200, 0.225$  和  $0.250$  MPa)的动态压缩试验. 研究了两种长径比层状千枚岩不同应变率下动力特性的影响, 分析了层状千枚岩层理倾角、长径比和应变率之间的耦合效应对层状千枚岩强度特征的影响关系. 结果表明: 动态压缩下两种不同长径比层状千枚岩动态抗压强度随层理倾角增加呈现先减小后增大趋势, 动态峰值强度和峰值应变均随应变率增大而增大, 层状千枚岩动态抗压强度与应变率呈幂函数关系; 动态峰值强度关于倾角 $\alpha$ 和长径比 $L/D$ 呈二元函数关系, 在 $\alpha=60^\circ$ 时, 层状千枚岩动态抗压强度的长径比效应最为显著, 在 $L/D=1$ 时, 倾角效应最为显著; 不同倾角下, 峰值应变在 $0^\circ$ 倾角下长径比效应最为显著, 在 $90^\circ$ 倾角下长径比效应最弱; 动态冲击下层状千枚岩动态抗压强度和峰值应变的应变率效应均强于长径比效应.

**关键词:** 岩石力学; 层状千枚岩; SHPB 试验; 动力特性; 多因素耦合

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)03-0372-10

## Influence of Multi-factor Coupling Effect on Dynamic Characteristics of Layered Phyllite

XU Jiang-bo<sup>1</sup>, SUN Guo-zheng<sup>1</sup>, HOU Xin-min<sup>1</sup>, YU Yang-lin<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Construction No. 12 Construction Group Co., Ltd., Ankang 725000, China. Corresponding author: XU Jiang-bo, E-mail: xujiangbo@yeah.net)

**Abstract:** In order to study the effect of strain rate on the dynamic characteristics of phyllite under different length-diameter ratio and dip angle, the samples with four dip angles ( $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  and  $90^\circ$ ) and two lengths ( $L=25, 50$  mm) were selected as research objects. The dynamic compression tests under different impact pressures ( $p=0.150, 0.175, 0.200, 0.225$  and  $0.250$  MPa) were carried out by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) system. The dynamic characteristics of phyllite with two aspect ratios at different strain rates were studied, and the influence of the coupling effect between the bedding dip angle, aspect ratio and strain rate on the strength characteristics of phyllite was analyzed. The results show that under dynamic compression, the dynamic compressive strength of phyllite with two different aspect ratios decreases first and then increases with the increase of bedding angle, and the dynamic peak strength and peak strain increase with the increase of strain rate. The relationship between dynamic compressive strength of phyllite and strain rate follows a power function. The relationship between peak strength and bedding angle  $\alpha$  and  $L/D$  is binary function. When  $\alpha=60^\circ$ , the aspect ratio effect on the dynamic compressive strength of phyllite is the most significant, and when  $L/D=2$ , the dip angle effect is the most significant. Under different bedding dip angles, the aspect ratio effect of peak strain is the most significant at  $0^\circ$  dip angle, and the weakest at  $90^\circ$  dip angle. The strain rate effect on dynamic compressive strength and peak strain of phyllite under dynamic impact is stronger than that of aspect ratio effect.

**Key words:** rock mechanics; layered phyllite; SHPB test; dynamic characteristics; multi-factor coupling

近年来,随着交通基础设施建设的飞速发展,出现了越来越多的千枚岩岩质隧道,如木寨岭、乌鞘岭隧道.在实际建设过程中,岩石常常承受冲击、地震、爆破等动荷载的影响,加之层状千枚岩本身固有的构造特点,其力学性能更容易受到外部荷载和环境因素的影响,给千枚岩隧道的建设带来了很大挑战.因此研究层状千枚岩的动力学问题具有重要的理论和工程实践意义.

近几年众多学者在岩石动力学方面展开了一系列的研究,有关岩石材料在不同加载速率、长径比、应变率等多因素条件下的力学性质研究也取得了许多成果.Zhang等<sup>[1]</sup>总结了在高应变率下岩石结构特征(如微观结构、尺寸和形状)和试验条件(如围压、温度和含水饱和度)等各种动态力学性能的影响.Hao等<sup>[2]</sup>通过建立不同状态方程和强度的岩石材料在冲击作用下的数值模型,模拟分离式霍普金森压杆(SHPB)试验,研究了在 $1\sim 1\,000\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内,状态方程和强度、侧向惯性约束和端部摩擦约束效应对各自动态增长因子的影响.Li等<sup>[3]</sup>采用SHPB装置,研究了节理粗糙度对岩体中波能量衰减的影响.Kao等<sup>[4]</sup>利用SHPB试验系统研究了砂岩尺寸效应与应变率效应之间的关系.Zhong等<sup>[5]</sup>研究了不同片理面倾角结构煤岩在不同介质应变率下的力学特性和破坏行为.Mishra等<sup>[6-7]</sup>利用SHPB试验系统,研究了多种岩石在不同应变率下的动态应力-应变响应,确定了岩石强度的动态增加系数并提出了相关方程;研究了不同应变率下对岩石矿物峰值应力和动弹性模量的影响.Si等<sup>[8]</sup>通过常规和改进的三轴SHPB试验系统对砂岩进行了不同应变率下的动态单轴和三轴试验,得到了砂岩强度参数与应变率之间的关系,建立了高应变率、低围压下砂岩的动态摩尔-库仑和霍克-布朗强度准则.Qi等<sup>[9]</sup>从理论上研究了试样尺寸和应变率对岩石抗压强度的耦合影响,将静态和动态下试样尺寸与应变率耦合效应公式进行叠加,得到应变率和试样尺寸效应对岩石抗压强度耦合效应的统一公式.Zhou等<sup>[10]</sup>采用多功能岩石力学试验系统和SHPB系统对不同长径比的岩石试样进行动、静态加载试验,结果表明,岩石强度受到尺寸和应变率的影响.许江波等<sup>[11]</sup>通过SHPB装置研究了不同节理倾角层状千枚岩在同一冲击气压下的强度衰减特性.Qi等<sup>[12]</sup>提出了一种新的黏性中间近似模型,该模型能较好地描述岩体

在较大应变率范围内的强度.Zou等<sup>[13]</sup>研究了试样尺寸和几何形状对大理岩结构抗压强度、破坏应变和弹性模量等动态力学性能的影响.Xie等<sup>[14]</sup>采用改进的SHPB试验系统对节理和无节理完整砂岩试件进行冲击试验,研究节理岩体的动力学特性,分析了相交人工节理对砂岩试样动力学特性及破坏机理的影响.Xu等<sup>[15]</sup>采用SHPB试验系统进行动态压缩试验,研究了花岗岩在不同应变率和温度下的动力学特性.

综上所述,目前的研究只集中于花岗岩、大理岩和砂岩等岩石在单一条件下的动力学特性,尚缺乏不同条件下(倾角、应变率、长径比)层状千枚岩动力学影响方面的研究.加之在实际工程中,层状千枚岩的强度特征和破坏变形往往受到长径比、层理倾角和应变率等多个因素的共同影响.基于此,本文采用SHPB装置对4种层理倾角( $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ )下2种长度( $L=25, 50\text{ mm}$ )的千枚岩进行了5种不同冲击气压( $p=0.150, 0.175, 0.200, 0.225$ 和 $0.250\text{ MPa}$ )的试验.研究两种长径比层状千枚岩不同应变率下的动力学特性,分析层状千枚岩层理倾角、长径比和应变率之间的耦合效应对层状千枚岩强度特征的影响关系,进而为层理类岩石进行动力学试验时尺寸的合理选取和遇到的工程问题提供理论参考.

## 1 试样及试验设备

### 1.1 试样制备

选取4种倾角( $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ,取样图如图1所示)下相同直径( $D=50\text{ mm}$ )2种不同长度( $L=25, 50\text{ mm}$ )的层状千枚岩试件进行不同等级的冲击气压加载试验.试件如图2所示.

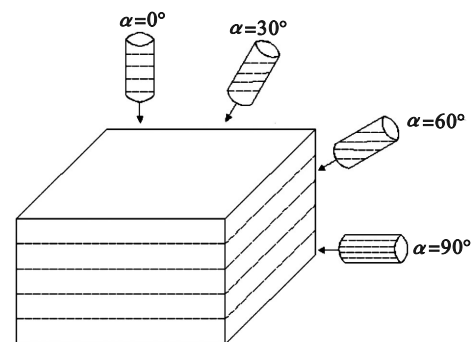


图1 层状千枚岩定向取芯示意图

Fig. 1 Directional coring for layered phyllite



图2 层状千枚岩试样

Fig. 2 Layered phyllite samples

## 1.2 试验系统

SHPB试验系统所用杆直径为50 mm,入射杆长2 000 mm,透射杆长1 500 mm,吸收杆长500 mm,材质均为弹性钢,屈服强度大于1 200 MPa,钢杆弹性模量 $E=210$  GPa,波速 $c_0=5 124$  m/s,密度

为 $7 800$  kg/m<sup>3</sup>,对层状千枚岩试样分别进行5种不同冲击气压( $p=0.150, 0.175, 0.200, 0.225$ 和 $0.250$  MPa)的动态压缩试验.

## 2 试验数据分析

利用SHPB试验装置,对不同倾角和长径比条件下的千枚岩进行了5种不同冲击气压下的动态压缩试验,试验结果如表1所示.表中 $D$ 和 $L$ 分别表示试样的直径和长度; $L/D$ 为试样的长径比; $p$ 为试验的冲击气压; $\sigma_0$ 为试样动态抗压强度; $\varepsilon_{\max}$ 为试样峰值应变; $\dot{\varepsilon}$ 为试样的应变率.

表1 4种层理倾角2种不同长度层状千枚岩试样参数

Table 1 Parameters of layered phyllite samples with 4 bedding inclination angles and 2 different lengths

倾角/(°)	试样编号	$L/\text{mm}$	$L/D$	$p/\text{MPa}$	$\sigma_0/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\max} \times 10^3$	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$
0	QJ00-25-01	25	0.52	0.150	125.97	6.04	92
	QJ00-25-02	25	0.52	0.175	136.11	9.85	112
	QJ00-25-03	25	0.52	0.200	142.14	10.78	125
	QJ00-25-04	25	0.52	0.225	148.17	12.37	136
	QJ00-25-05	25	0.52	0.250	154.93	16.30	151
	QJ00-50-01	50	1.01	0.150	92.71	7.86	69
	QJ00-50-02	50	1.01	0.175	120.73	9.57	86
	QJ00-50-03	50	1.02	0.200	150.14	10.81	105
	QJ00-50-04	50	1.01	0.225	170.52	12.63	113
	QJ00-50-05	50	0.99	0.250	184.29	13.42	127
30	QJ30-25-01	25	0.51	0.150	117.68	5.16	92
	QJ30-25-02	25	0.51	0.175	123.96	6.96	112
	QJ30-25-03	25	0.51	0.200	128.01	8.59	125
	QJ30-25-04	25	0.51	0.225	134.98	9.84	136
	QJ30-25-05	25	0.51	0.250	137.79	11.44	151
	QJ30-50-01	50	1.03	0.150	92.71	7.02	69
	QJ30-50-02	50	1.03	0.175	117.39	8.28	86
	QJ30-50-03	50	1.03	0.200	124.11	9.08	105
	QJ30-50-04	50	1.03	0.225	135.98	9.88	113
	QJ30-50-05	50	1.03	0.250	156.54	10.93	127
60	QJ60-25-01	25	0.51	0.150	89.33	5.14	92
	QJ60-25-02	25	0.50	0.175	106.24	6.95	112
	QJ60-25-03	25	0.50	0.200	112.39	9.29	125
	QJ60-25-04	25	0.50	0.225	116.39	9.49	136
	QJ60-25-05	25	0.50	0.250	122.98	10.58	151
	QJ60-50-01	50	1.02	0.150	58.39	5.16	69
	QJ60-50-02	50	1.02	0.175	81.46	6.60	86
	QJ60-50-03	50	1.03	0.200	99.55	8.63	105
	QJ60-50-04	50	1.01	0.225	106.59	9.65	113
	QJ60-50-05	50	1.01	0.250	127.37	10.61	127
90	QJ90-25-01	25	0.52	0.150	125.54	8.10	92
	QJ90-25-02	25	0.52	0.175	131.77	10.95	112
	QJ90-25-03	25	0.52	0.200	138.17	11.56	125
	QJ90-25-04	25	0.53	0.225	142.60	12.73	136
	QJ90-25-05	25	0.53	0.250	150.96	13.09	151

续表 1

倾角/(°)	试样编号	L/mm	L/D	p/MPa	$\sigma_0$ /MPa	$\epsilon_{\max} \times 10^3$	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$
90	QJ90-50-01	50	1.03	0.150	106.51	6.70	69
	QJ90-50-02	50	1.04	0.175	121.09	7.40	86
	QJ90-50-03	50	1.04	0.200	142.03	9.20	105
	QJ90-50-04	50	1.04	0.225	153.25	11.15	113
	QJ90-50-05	50	1.03	0.250	166.56	13.06	127

2.1 应变率与冲击气压关系分析

采用测速仪测量出不同冲击气压下子弹的出膛速度,其结果如表2所示.

表2 冲击气压与子弹速度和试样应变率关系  
Table 2 Relationship between impact air pressure and bullet velocity and strain rate of sample

冲击气压 p/MPa	子弹速度 v/(m·s <sup>-1</sup> )	应变率/s <sup>-1</sup>	
		L=25 mm	L=50 mm
0.150	6.8	92	69
0.175	7.4	112	86
0.200	8.5	125	105
0.225	9.2	136	113
0.250	9.3	151	127

对5种不同冲击气压下试样的应变率关系进行趋势拟合,得到应变率与冲击气压的关系曲线图,如图3所示.拟合结果表明,动态压缩过程中试样的应变率与冲击气压符合以下线性关系: $\dot{\epsilon} = a + kp$ .

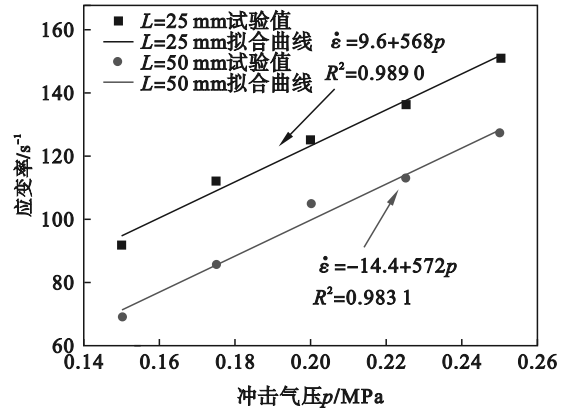


图3 冲击气压与应变率关系

Fig. 3 Relationship between impact pressure and strain rate

2.2 层状千枚岩应力-应变关系分析

利用三波法<sup>[16]</sup>将动态数据采集系统采集到的电信号进行处理和分析,得到不同应变率和长径比下层状千枚岩的应力-应变曲线,如图4和图5所示.

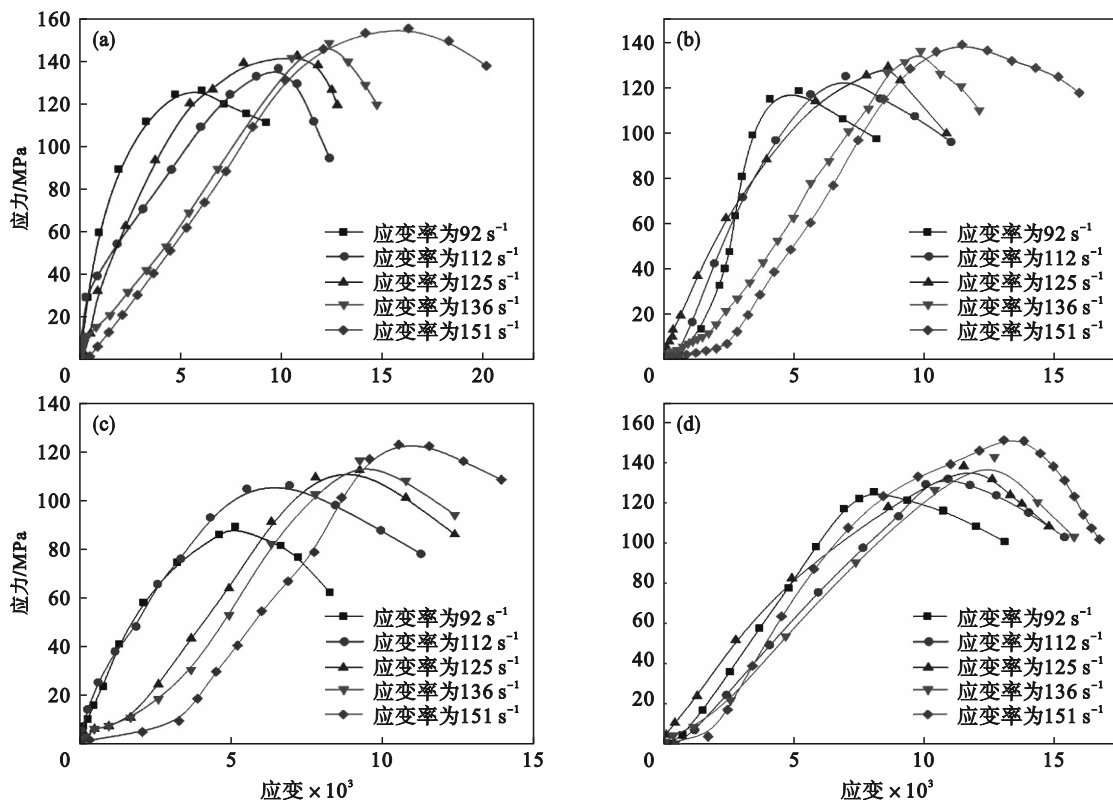


图4 L=25 mm层状千枚岩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of layered phyllite at L=25 mm

(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

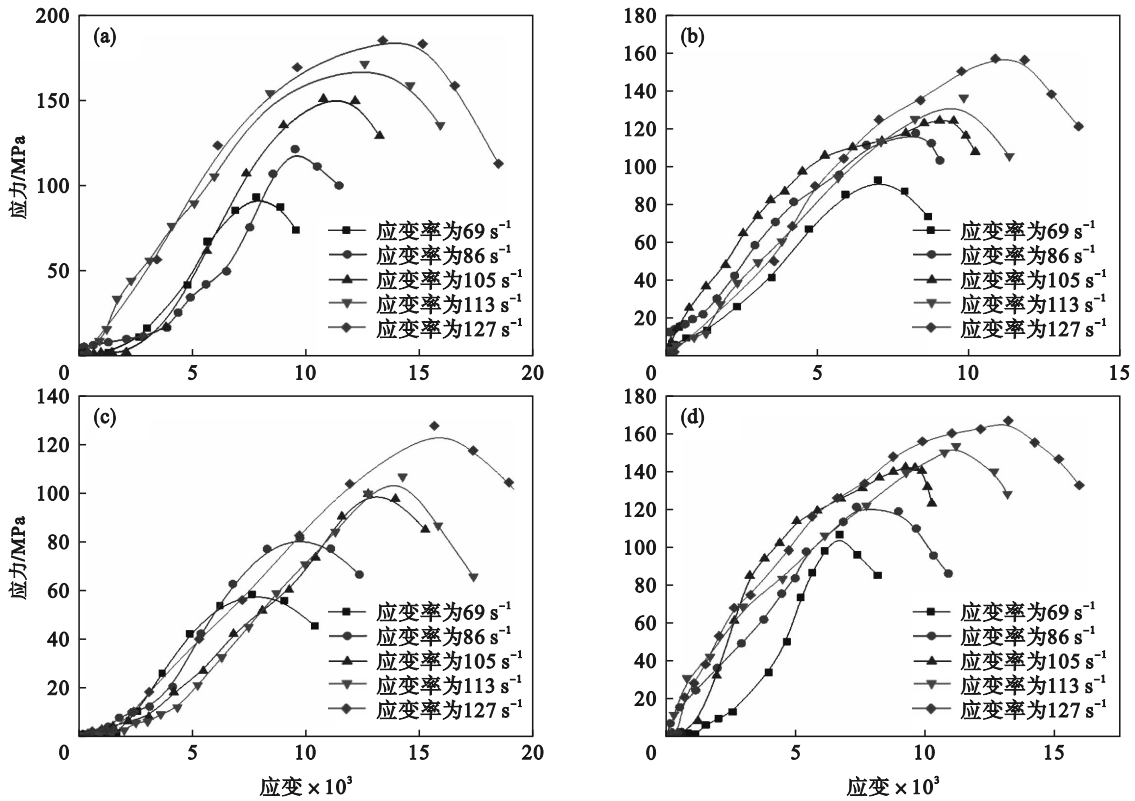


图 5  $L=50$  mm 层状千枚岩应力-应变曲线  
 Fig. 5 Stress-strain curves of layered phyllite at  $L=50$  mm  
 (a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

由图 4 和图 5 可见,不同长径比、倾角条件下,4 组层状千枚岩应力-应变曲线变化趋势基本一致.在曲线的初始阶段,部分曲线显示明显的下凹现象.这是因为层状千枚岩是一种各向异性和非均质的材料,其试样内部沿层理面分布着微裂隙,在高冲击气压下微裂隙的压密闭合表现得更加迅速,裂隙在冲击气压下压密闭合之后,进入弹性阶段且持续时间较短,微裂隙的存在对抗压强度影响较小,对应的岩石试样基本未发生损伤.进入塑性强化阶段后,层状千枚岩应力-应变曲线开始呈现非线性关系,此阶段层状千枚岩岩石试样内部裂隙逐渐增多.在曲线的峰后阶段,从应力-应变曲线的变化上来看,应力达到峰值后,随着应变的不断增加,应力不再增加,应力发生卸载,曲线呈现下降趋势,此阶段层状千枚岩岩石试样呈现出明显的破坏特征.但是由于应变率的影响,应力-应变曲线在峰值点和峰后阶段表现出不同变化规律.低应变率条件下,层状千枚岩试样较早产生破坏,破坏程度较弱还具有一定弹性,峰后曲线下降较快;高应变率条件下,层状千枚岩试样抗压强度较高,峰后曲线下降缓慢.

### 2.3 层理倾角与抗压强度关系分析

根据动态压缩试验所得数据,分析不同倾角下千枚岩的动态抗压强度的变化关系,得出不同

倾角与动态抗压强度的关系曲线如图 6 所示.

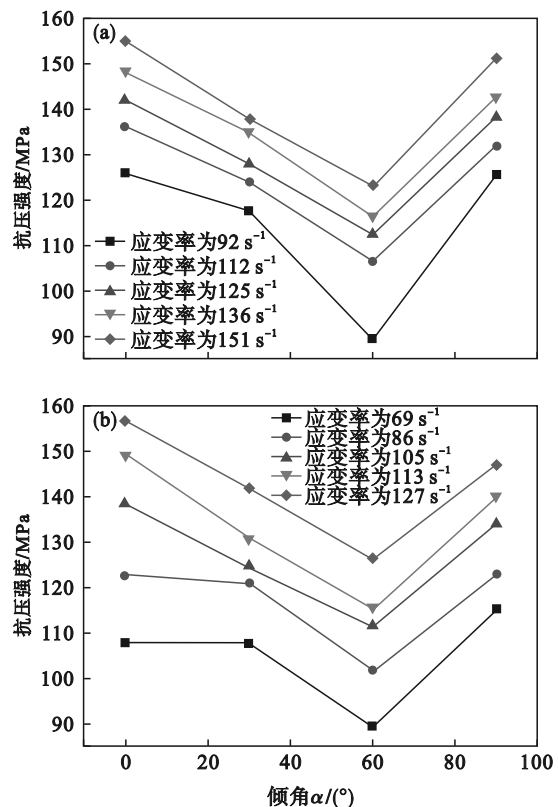


图 6 千枚岩倾角与强度关系曲线  
 Fig. 6 Relationship curves between phyllite dip angle and strength  
 (a)— $L=25$  mm; (b)— $L=50$  mm.

根据图6研究发现,两种不同长度千枚岩的动态抗压强度均在倾角为60°时发生了改变,当0°≤α≤60°时,抗压强度随着倾角的增大而减小,当60°<α≤90°时,动态抗压强度随着层理倾角的增大而增大,在倾角为60°时达到了最小值,这与静态压缩强度结果基本一致<sup>[17]</sup>.这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,其强度均有显著减小.结合层理倾角对层状千枚岩的动力响应,并与武仁杰等<sup>[18]</sup>研究结果对比可知,千枚岩层理倾角的变化对千枚岩的动态抗压强度影响较大,不同长径比的千枚岩动态抗压强度均随着层理倾角的增大呈现出先减小后增大的变化趋势.与此同时应变率变高,各倾角层状千枚岩动态抗压强度均显著增大,呈现出很好的应变率效应.

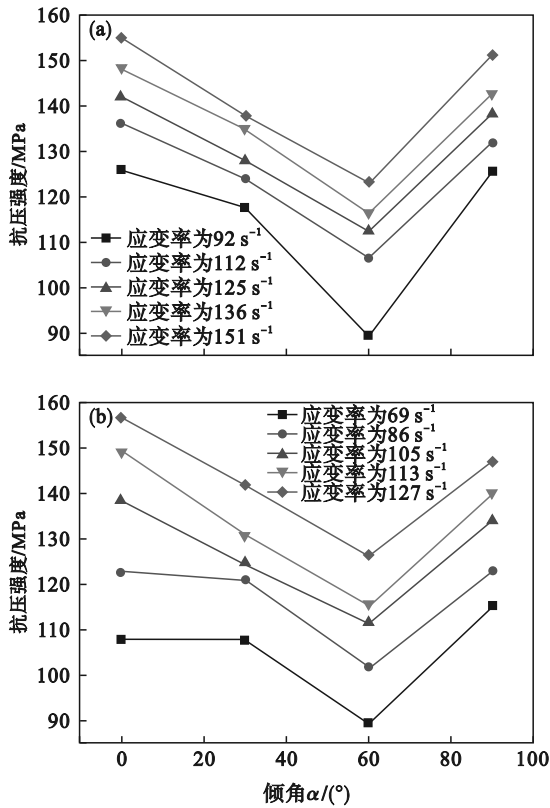


图6 千枚岩倾角与强度关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between phyllite dip angle and strength

(a)— $L=25\text{ mm}$ ; (b)— $L=50\text{ mm}$ .

### 2.4 应变率与抗压强度关系分析

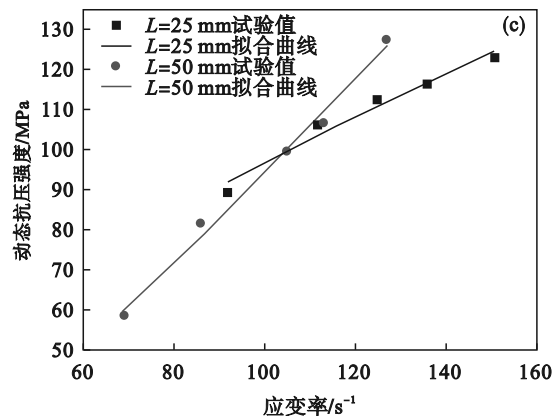
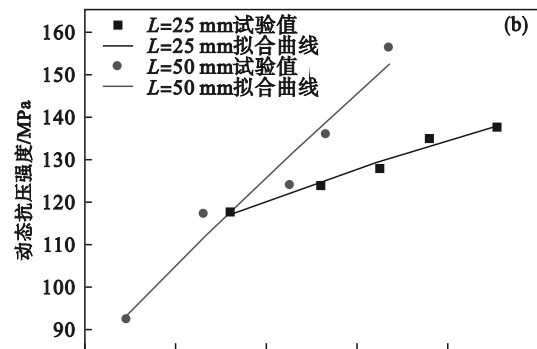
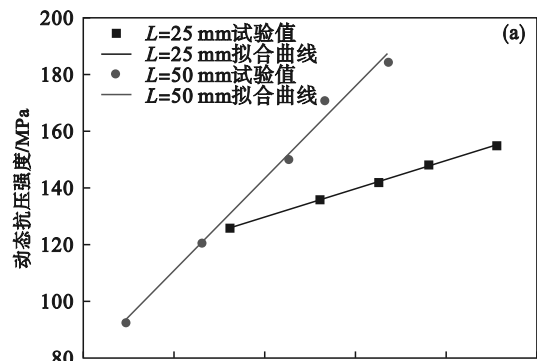
根据 SHPB 试验数据,绘制2种长度下( $L=25, 50\text{ mm}$ )层状千枚岩动态抗压强度与应变率的散点图,如图7所示,并对散点图中动态抗压强度与应变率的关系进行曲线拟合,得到拟合曲线的表达式为

$$\begin{aligned} \text{当}\alpha=0^\circ\text{时,} & \begin{cases} \sigma_{25} = 18.780\dot{\epsilon}^{0.420}, R^2 = 0.9983; \\ \sigma_{50} = 0.775\dot{\epsilon}^{1.133}, R^2 = 0.9907. \end{cases} \\ \text{当}\alpha=30^\circ\text{时,} & \begin{cases} \sigma_{25} = 25.807\dot{\epsilon}^{0.334}, R^2 = 0.9745; \\ \sigma_{50} = 3.189\dot{\epsilon}^{0.799}, R^2 = 0.9524. \end{cases} \\ \text{当}\alpha=60^\circ\text{时,} & \begin{cases} \sigma_{25} = 5.685\dot{\epsilon}^{0.615}, R^2 = 0.9727; \\ \sigma_{50} = 0.343\dot{\epsilon}^{1.220}, R^2 = 0.9922. \end{cases} \\ \text{当}\alpha=90^\circ\text{时,} & \begin{cases} \sigma_{25} = 22.705\dot{\epsilon}^{0.375}, R^2 = 0.9744; \\ \sigma_{50} = 4.189\dot{\epsilon}^{0.760}, R^2 = 0.9937. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{25}, \sigma_{50}$ 分别表示 $L=25\text{ mm}$ 和 $L=50\text{ mm}$ 层状千枚岩试样动态抗压强度; $\dot{\epsilon}$ 表示试样的应变率.

由式(1)试验结果拟合曲线可得,在4种倾角下,2种长度的层状千枚岩动态抗压强度与应变率呈幂函数关系.单轴动态抗压强度与应变率的变化规律符合如下线性关系:

$$\sigma_f = a\dot{\epsilon}^b \quad (2)$$



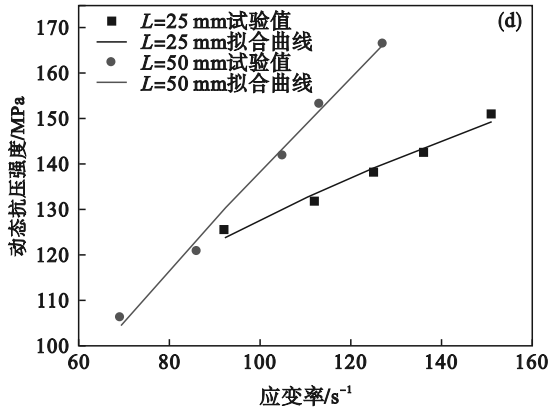


图 7 4 种倾角下层状千枚岩动态抗压强度与应变率关系

Fig. 7 Relationship between dynamic compressive strength and strain rate of layered phyllite under four dip angles

(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

式中： $\sigma_f$ 为岩石单轴动态抗压强度(MPa)； $a$ 和 $b$ 分别为动态强度参数。

由图 7 可见,岩石动态抗压强度 $\sigma_f$ 与应变率 $\dot{\epsilon}$ 呈正比例关系,动态抗压强度随应变率的增大而增大,呈现出较明显的应变率效应.当应变率达到 $100\text{ s}^{-1}$ 左右后, $L=50\text{ mm}$ , $L/D=1$ 的曲线明显在 $L=25\text{ mm}$ , $L/D=0.5$ 的曲线上,这表明在相同应变率下,长试样抗压强度强于短试样抗压强度,动态抗压强度表现出明显的长径比效应,这与静态抗压强度长径比效应刚好相反.研究发现这是由于动态加载条件下长试样在破坏前能够吸收储存更多的弹塑性应变能. $L=25\text{ mm}$ 和 $L=50\text{ mm}$ 下 4 种倾角层状千枚岩动态抗压强度与应变率的比例系数 $a$ 分别为 18.780 0, 25.806 5, 5.684 6, 22.705 和 0.775 0, 3.188 6, 0.342 5, 4.188 7.研究发现在倾角为 $60^\circ$ 时, $L=25\text{ mm}$ 和 $50\text{ mm}$ 的比例系数 $a$ 为最小值 5.684 6 和 0.342 5,这说明 $60^\circ$ 倾角时层状千枚岩对应变率敏感性最低.这是由于倾角为 $60^\circ$ 时,抗压强度达到最小值,层状千枚岩试样极易发生破坏.

### 2.5 应变率与峰值应变关系分析

图 8 是 $L=25\text{ mm}$ 和 $L=50\text{ mm}$ 时层状千枚岩峰值应变与应变率的关系图。

由图 8a 可见,在 $L=25\text{ mm}$ 时, $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 倾角下层状千枚岩峰值应变在应变率为 $112\sim 125\text{ s}^{-1}$ 范围内时存在一个平缓上升阶段,而 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 倾角下层状千枚岩峰值应变随应变率变化趋势没有该现象.其中 $0^\circ$ 倾角层状千枚岩在应变率为 $92\sim 151\text{ s}^{-1}$ 范围内,峰值应变的变化幅值最大.如图 8b 所示,在 $L=50\text{ mm}$ 时,层状千枚岩峰

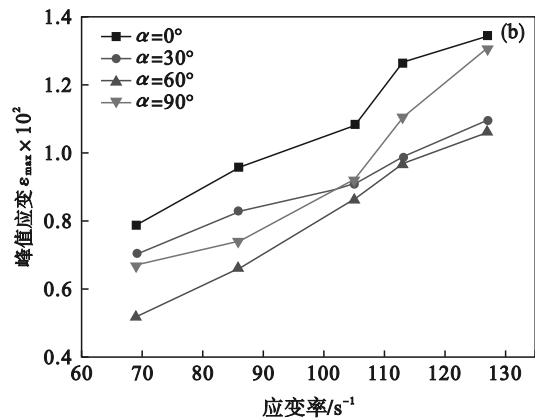
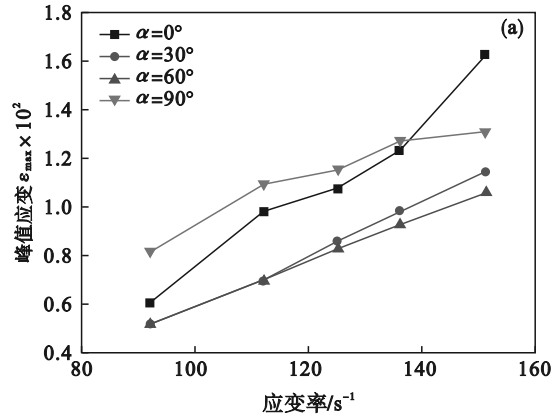


图 8 层状千枚岩峰值应变-应变率关系

Fig. 8 Relationship between peak strain and strain rate of layered phyllite

(a)— $L=25\text{ mm}$ ; (b)— $L=50\text{ mm}$ .

值应变未存在明显的平缓阶段.在应变率为 $69\sim 105\text{ s}^{-1}$ 范围内,层状千枚岩峰值应变在 $0^\circ$ 倾角下最大,其次分别为 $30^\circ$ , $90^\circ$ 和 $60^\circ$ 倾角条件下.

综上所述,得出两种长度下不同倾角层状千枚岩试样峰值应变与应变率呈正相关.其峰值应变均随着应变率的增加而增加,这与目前的认知是一致的.这是因为随着载荷应变率的增加,冲击荷载作用时间变短,试件没有足够的时间用于能量积累.试件只有通过提高应力的办法来平衡外部能量,进而产生较高的峰值应变。

## 3 应变率与倾角、长径比的耦合分析

### 3.1 应变率与倾角、长径比耦合作用对峰值强度的影响

为了探究倾角、长径比和应变率之间的耦合作用对层状千枚岩力学特性的影响关系,采用 Matlab 对峰值强度 $\sigma_{\max}$ 、峰值应变 $\epsilon_{\max}$ 关于倾角 $\alpha$ 、长径比 $L/D$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 进行拟合分析. $\sigma_{\max}$ 关于

倾角 $\alpha$ 和长径比 $L/D$ 拟合后的二元函数空间效果如图9所示。

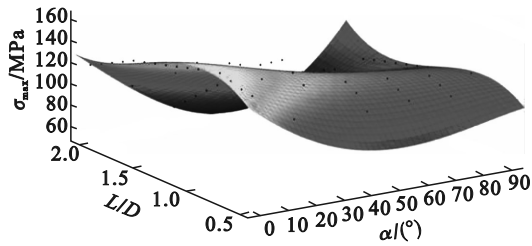


图9 参数 $\sigma_{max}$ 关于 $\alpha$ 和 $L/D$ 的二元函数曲面图

Fig. 9 Surface of the parameter  $\sigma_{max}$  as a function of  $\alpha$  and  $L/D$

从图9可以看出,随着 $\alpha$ 增大, $\sigma_{max}$ 先减小后增大,于 $\alpha=60^\circ$ 处出现拐点,该点处 $\sigma_{max}$ 取得最小值,这表明相同应变率条件下,层理倾角对峰值强度影响较大.随着 $L/D$ 增大, $\sigma_{max}$ 先增大后减小,于 $L/D=1$ 处出现拐点, $L/D=1$ 即为长径比临界值,该点处 $\sigma_{max}$ 取得最大值.一般来说,较大的岩体具有较高的强度,而较小的岩体则相反.岩体的强度通常与其内部的微观裂隙有关,较大的岩体由于其内部的微观结构更复杂,因此在抵抗外力时更能分散应力,从而具有较高的峰值强度.而较小的岩体由于其内部结构较简单,无法分散过多应力,容易发生破碎和变形.当层状千枚岩的长径比小于临界值时,同一倾角下千枚岩的峰值强度随试样长径比的增大而增大.随着长径比的增大,试样抵抗外力时分散应力的能力越强,从而具有更大的峰值强度.随着长径比的增大,峰值强度逐渐趋于稳定.当层状千枚岩的长径比大于临界值时,由于试样长径比过大导致试样受力不稳定提前发生破坏,此时同一倾角下千枚岩的峰值强度随试样长径比的增大而降低,并且在倾角 $\alpha=60^\circ$ 时,层状千枚岩动态压缩峰值强度随长径比变化起伏最大,表明层状千枚岩在倾角 $\alpha=60^\circ$ 时,长径比效应最为显著.不同长径比下,层状千枚岩动态压缩峰值强度随倾角变化幅度比较明显:峰值强度随着层理倾角的增大而逐渐减小,耦合结果与刘丹等<sup>[19]</sup>研究结论一致.并且当长径比 $L/D=1$ 时,层状千枚岩动态峰值强度随倾角变化程度最大,表明层状千枚岩在长径比 $L/D=1$ 时,倾角效应最为显著.

$\sigma_{max}$ 关于长径比 $L/D$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 的二元函数拟合效果如图10所示。

由图10可见, $\alpha=0^\circ, 30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 关于长径比 $L/D$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 的二元函数图形整体呈倾斜的曲面; $\alpha=90^\circ$ 时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 关于

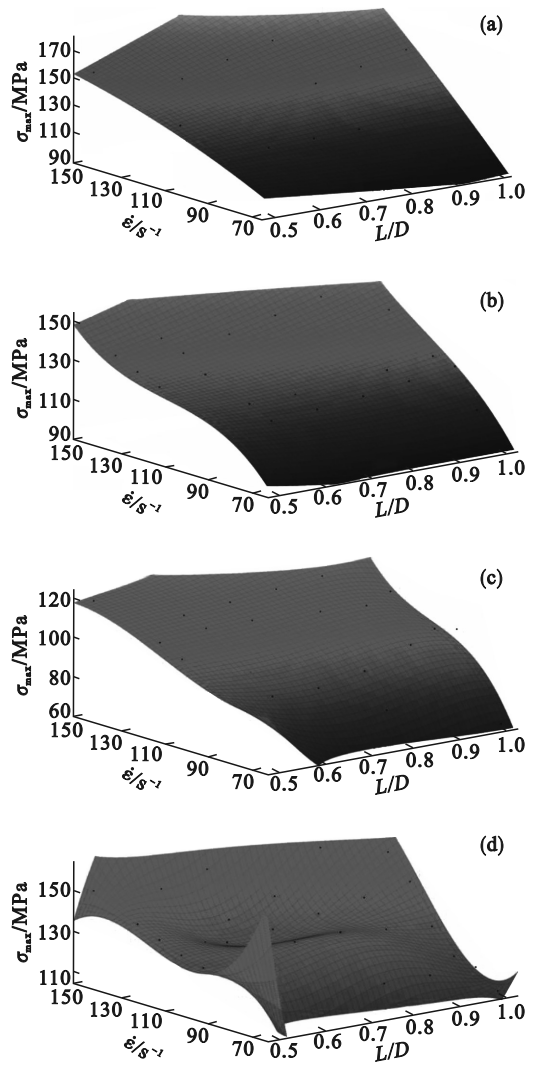


图10  $\sigma_{max}$ 关于 $L/D$ 和 $\dot{\epsilon}$ 二元函数曲面图

Fig. 10 Surface of the parameter  $\sigma_{max}$  as a function of and  $L/D$

(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

长径比 $L/D$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 的二元函数图形呈阶梯状曲面.在4种倾角下, $\sigma_{max}$ 随着长径比增大波动幅度较小;随着应变率增大增长幅度较大,即低应变率条件下,千枚岩试样破坏均受层理面控制,强度差异性不大;而在高应变率下各角度层状千枚岩不再受层理面控制,破坏机制的改变导致试样峰值强度变大,承载能力获得较大的提升<sup>[20]</sup>,此时层状千枚岩的应变率效应强于长径比效应.在 $\alpha=0^\circ, 30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,长径比从0.5增加到1.0时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 均呈增长趋势;在 $\alpha=90^\circ$ 时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 随 $L/D$ 增大存在两种变化趋势:①应变率为70~110  $s^{-1}$ ,长径比从0.5增长到1.0时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 表现出先升高后降低的趋势,即低应变率条件下,峰值强度随着长径比的增大先增大再减小;②应变率为110~150  $s^{-1}$ ,长径比从0.5增大到1.0时,峰值强度 $\sigma_{max}$ 均呈增长趋势,即高应变率

下,峰值强度均随长径比的增大而增大.两种情况均呈现出明显的长径比效应和应变率效应,并且在层理倾角为 $90^\circ$ 时,层状千枚岩的长径比和应变率耦合效应最为明显.

### 3.2 应变率与倾角、长径比耦合作用对峰值应变的影响

峰值应变 $\varepsilon_{\max}$ 关于倾角 $\alpha$ 和长径比 $L/D$ 拟合后的二元函数空间效果如图 11 所示.

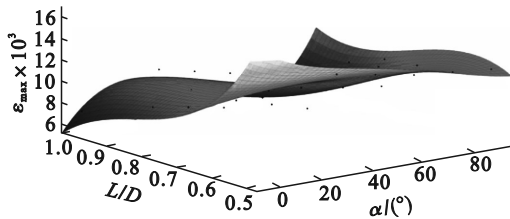


图 11  $\varepsilon_{\max}$  关于  $\alpha$  和  $L/D$  的二元函数曲面图

Fig. 11 Surface of the parameter  $\varepsilon_{\max}$  as a function of  $\alpha$  and  $L/D$

由图 11 可以看出,随着 $\alpha$ 增大,长径比在 $0.5\sim 0.6$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 呈缓慢递减趋势;长径比在 $0.6\sim 1.0$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 表现出先升高后降低然后再升高的趋势.这表明层状千枚岩冲击压缩下峰值应变 $\varepsilon_{\max}$ 在层理倾角和长径比方面存在耦合效应.在长径比为 $0.5\sim 0.6$ 范围内, $\varepsilon_{\max}$ 沿长径比增大方向的变化程度比 $\alpha$ 增大方向的变化程度大,说明此时峰值应变的长径比效应大于倾角效应.长径比在 $0.6\sim 1.0$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 沿长径比增大方向的变化程度较 $\alpha$ 增大方向的变化程度小,说明此时 $\varepsilon_{\max}$ 的倾角效应大于长径比效应. $\varepsilon_{\max}$ 沿长径比增大方向呈降低趋势,在不同倾角下,峰值应变随长径比的增大而减小,耦合结果与平琦等<sup>[21]</sup>在长径比与峰值应变的研究结果保持一致,且随着长径比的增大下降幅度存在差异,在 $\alpha=0^\circ$ 时,峰值应变随长径比的增大下降幅度最大;在 $\alpha=90^\circ$ ,峰值应变随长径比的增大下降幅度最小.这表明峰值应变在 $0^\circ$ 倾角下尺寸效应最为显著,在 $90^\circ$ 倾角下尺寸效应最弱.

$\varepsilon_{\max}$ 关于长径比 $L/D$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 拟合后的二元函数空间效果如图 12 所示.

由图 12 可见,4种倾角下,沿 $L/D$ 增大方向, $\varepsilon_{\max}$ 呈递增趋势;在不同应变率下, $\varepsilon_{\max}$ 增长幅度也存在差异,在低应变率下, $\varepsilon_{\max}$ 增长幅度较小;在高应变率下, $\varepsilon_{\max}$ 增长幅度较大,4种试样峰值应变均随着应变率的增大而增大,都存在一个缓慢上升的过程;也就是说应变率对峰值应变的长径比效应存在加强作用,应变率越大,峰值应变的长径比效应越明显.当 $\alpha=0^\circ$ 时,沿 $\dot{\varepsilon}$ 增大方向,

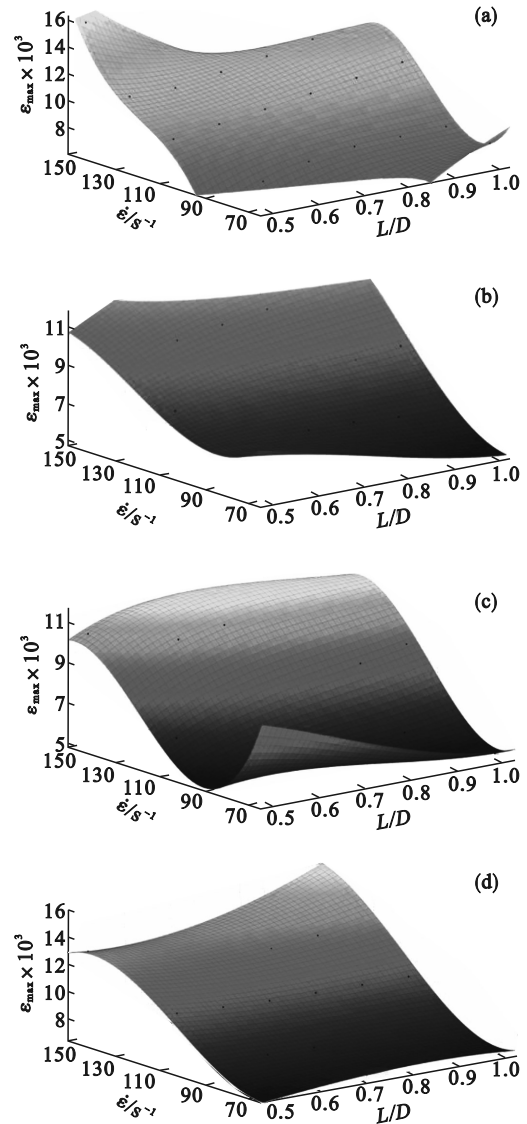


图 12  $\varepsilon_{\max}$  关于  $L/D$  和  $\dot{\varepsilon}$  的二元函数曲面图

Fig. 12 Surface of the parameter  $\varepsilon_{\max}$  as a function of  $\dot{\varepsilon}$  and  $L/D$

(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

$\varepsilon_{\max}$  随长径比变化趋势不一致,长径比在 $0.5\sim 0.7$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 逐渐增大;长径比在 $0.7\sim 0.85$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 先增大后减小;长径比在 $0.85\sim 1.0$ 内, $\varepsilon_{\max}$ 沿 $\dot{\varepsilon}$ 增大方向先减小后增大再减小.当 $\alpha=0^\circ$ 和 $90^\circ$ 时, $\varepsilon_{\max}$ 逐渐增大.当 $\alpha=60^\circ$ 时, $\varepsilon_{\max}$ 先减小后增大再减小.同时发现,4种倾角下,峰值应变沿 $\dot{\varepsilon}$ 增大方向的变化幅度大于沿 $L/D$ 增大方向的变化幅度,说明动态冲击下峰值应变的应变率效应强于长径比效应.

## 4 结 论

1) 2种典型长度层状千枚岩在动态压缩下,动态抗压强度随倾角的增大呈现先减小后增大趋势,应力-应变曲线峰值强度和峰值应变均随

应变率增大而增大。

2) 层状千枚岩动态抗压强度与应变率呈幂函数关系. 在两个长度上具有不同倾角的层状千枚岩试样的峰值应变与应变率呈正相关。

3) 不同倾角下,层状千枚岩动态压缩峰值强度随长径比变化存在明显差异性. 在 $\alpha=60^\circ$ 时,层状千枚岩动态抗压强度长径比效应最为显著;在 $L/D=1$ 时,层状千枚岩动态抗压强度倾角效应最为显著. 在4种倾角下层状千枚岩的应变率效应强于长径比效应,且在 $\alpha=90^\circ$ 时,层状千枚岩的长径比和应变率耦合效应最为显著。

4) 层状千枚岩冲击压缩下峰值应变 $\varepsilon_{\max}$ 在倾角和长径比方面存在耦合效应. 长径比在0.5~0.6内,峰值应变的长径比效应强于倾角效应. 动态冲击下4种倾角层状千枚岩峰值应变的应变率效应均明显强于长径比效应。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Q B, Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1411-1478.
- [2] Hao Y, Hao H. Numerical investigation of the dynamic compressive behavior of rock materials at high strain rate [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(2): 373-388.
- [3] 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(2): 403-420.
- [4] Kao S M, Zhao G M, Xu W S, et al. Experimental study of the association between sandstone size effect and strain rate effect [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(9): 3597-3608.
- [5] Zhong K, Zhao W S, Qin C K, et al. Experimental study on the mechanical behavior and failure characteristics of layered coal at medium strain rates [J]. *Energies*, 2021, 14(20): 1-15.
- [6] Mishra S, Meena H, Parashar V, et al. High strain rate response of rocks under dynamic loading using split Hopkinson pressure bar [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(1): 531-549.
- [7] Mishra S, Chakraborty T, Matsagar V, et al. High strain-rate characterization of Deccan trap rocks using SHPB device [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(5): 04018059.
- [8] Si X F, Gong F Q, Li X B, et al. Dynamic Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria of sandstone at high strain rates [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 115: 48-59.
- [9] Qi C Z, Wang M Y, Wang Z F, et al. Study on the coupling effect of sample size and strain rate on rock compressive strength [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 5103-5114.
- [10] Zhou J, Zhao G M, Meng X R, et al. Experimental investigation of the size effect of rock under impact load [J]. *Minerals*, 2022, 13(1): 13010043.
- [11] 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 Jiang-bo, Fei Dong-yang, Sun Hao-hui, et al. Energy transfer and dynamic characteristics of jointed phyllite [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(7): 986-995.)
- [12] Qi C Z, Wang M Y, Qian Q H. Strain-rate effects on the strength and fragmentation size of rocks [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(12): 1355-1364.
- [13] Zou C J, Wong L N Y. Size and geometry effects on the mechanical properties of Carrara marble under dynamic loadings [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1695-1708.
- [14] Xie X K, Li J C, Zheng Y L. Experimental study on dynamic mechanical and failure behavior of a jointed rock mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 168: 105415.
- [15] Xu J H, Kang Y, Wang Z F, et al. Dynamic mechanical behavior of granite under the effects of strain rate and temperature [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(2): 04019177.
- [16] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Wang Li-li. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)
- [17] 刘红岩, 邓正定, 王新生, 等. 节理岩体动态破坏的 SHPB 相似材料试验研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 659-665. (Liu Hong-yan, Deng Zheng-ding, Wang Xin-sheng, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 659-665.)
- [18] 武仁杰, 李海波, 李晓锋, 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(sup2): 3304-3312. (Wu Ren-jie, Li Hai-bo, Li Xiao-feng, et al. Dynamic mechanical properties of layered phyllite subject to different impact loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(sup2): 3304-3312.)
- [19] 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 Dan, Huang Man, Hong Chen-jie, 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.)
- [20] Li X F, Li H B, Zhang Q B, et al. Dynamic fragmentation of rock material: characteristic size, fragment distribution and pulverization law [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 199: 739-759.
- [21] 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(sup2): 3891-3897. (Ping Qi, Zhang Hao, Su Hai-peng. Study on dynamic compression mechanical properties of limestone with different lengths [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(sup2): 3891-3897.)