

不同长径比石灰岩动态压缩 SHPB 试验研究

张 号^{1,2}, 平 琦^{1,2}, 苏海鹏^{1,2}

(1. 安徽理工大学 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

摘 要:为了研究不同长径比石灰岩应力-应变曲线、动态单轴抗压强度、动态弹性模量、峰值应变随应变率增大的变化规律,采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置,对 2 组不同长径比石灰岩试样,进行 7 种不同应变率等级下的冲击加载试验。结果表明:随着应变率的增大,应力-应变曲线在峰值点后表现出不同的变化规律,呈现明显的率相关性;2 组试样动态单轴抗压强度均随应变率的增大呈幂指增大,且长径比为 1.0 的试样强度的应变率敏感性强于长径比为 0.5 的试样,有明显的尺寸效应;动态弹性模量和峰值应变均随应变率的增大而增大,相同应变率下,长径比为 1.0 的试样动态弹性模量大于长径比为 0.5 的试样;试样的动态压缩破坏形态在相同应变率下,长径比为 0.5 的试样破坏程度比长径比为 1.0 的大,应变率较低时呈轴向劈裂破坏,应变率较高时呈颗粒状粉碎破坏。

关键词:应力-应变关系;长径比;尺寸效应;SHPB 试验;岩石动力学

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)08-0038-06

Study on dynamic compression SHPB test of limestone with different length diameter ratios

ZHANG Hao^{1,2}, PING Qi^{1,2}, SU Haipeng^{1,2}

(1. Province and Ministry Joint Key Lab of Mining Response and Disaster Control in Deep Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. MOE Engineering Research Center of Mine Underground Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study the stress-strain curve, dynamic uniaxial compression strength, dynamic elastic modulus, peak strain and variation law with the strain rate increased of the limestone with different length-diameter ratios, a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test device was applied to the impact loading test under seven different strain rate grades on the two group limestone samples with different length-diameter ratios. The results showed that with the strain rate increased, the stress-strain curve would have different variation law after the peak reached and would have obvious rate dependence. The dynamic uniaxial compressive strength of the two group samples would have a power increased with the strain rate increased. The strength of the sample with a length diameter ratio of 1.0 would have a strong sensitivity of the strain rate than the sample with a length diameter ratio of 0.5 and would have a obvious size effect. The dynamic elastic modulus and the peak strain would be increased with the strain rate increased. Under the same strain rate, the dynamic elastic modulus of the sample with a length diameter ratio of 1.0 would be higher than the sample with a length diameter ratio of 0.5. Under the same strain rate of the dynamic compression failure state of the sample, the failure degree of the sample with a length diameter ratio of 0.5 would be higher than the sample with a length diameter ratio of 1.0. When the strain rate was low, the sample would have a axial split failure. When the strain rate was high, the sample would have a partical fine failure.

Key words: stress-strain relationship; length diameter ratio; size effect; SHPB test; rock dynamics

收稿日期:2018-03-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.08.006

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674008);安徽省自然科学基金资助项目(1808085ME134);安徽省博士后科研基金资助项目(2015B058);安徽省质量工程资助项目(2016jyxm0283)

作者简介:张 号(1995—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail:zhanghao9409@126.com

引用格式:张 号,平 琦,苏海鹏. 不同长径比石灰岩动态压缩 SHPB 试验研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(8):38-43.

ZHANG Hao, PING Qi, SU Haipeng. Study on dynamic compression SHPB test of limestone with different length diameter ratios[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8): 38-43.

0 引 言

岩石动态力学性质不仅与岩石组成成分、晶粒大小和连接方式、节理裂隙有关,还与试样形状大小等因素有关。在房建、桥隧、水利工程中,由于实际岩体结构形状各异且尺寸通常较大,受试验条件限制,很难进行工程结构的现场试验或相同尺寸的模型试验,通常只能进行缩小尺寸模拟,因此如何通过缩小尺寸模型试验结果来反映实际大型工程中的岩体材料的真实性质参数,是工程力学和材料学的研究热点之一。目前国内外研究专家及学者对岩石抗压强度的尺寸效应研究已取得了丰富的成果。在静态尺寸效应研究领域:刘宝琛等^[1]通过研究分析前人做过的 7 种岩石单轴压缩试验数据,得出了岩石强度随着试样尺寸的增加呈指数型减小;张明等^[2]提出了一种基于最弱链模型和缺陷的 Poisson 分布假设综合体积和材料因素,给出了建立准脆性材料破坏概率和强度尺寸效应的统计模型和一般表达式;梁昌玉等^[3]从能量相互转化的观点解释了中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的原因,得出了花岗岩破坏时吸收的总能量、弹性应变能以及损伤应变能均随着试样尺寸的增加而降低的结论;杨圣奇等^[4-5]认为岩石材料强度尺寸效应是由试样端部摩擦效应所致而非根源于材料的非均质性,并提出了大理岩尺寸效应的理论模型;吕兆兴等^[6]认为非均质性是导致岩石材料强度尺寸效应的根源,这与杨圣奇形成不同的观点;JC 耶格等^[7]采用大量的岩石试样试验研究,得出岩石试样的强度与尺寸的关系式: $\sigma_m = kv^{-1/m}$,其中 v 为岩石试样的体积, k 、 m 为与岩石材料相关的常数;尤明庆等^[8]发现大理岩强度随着高径比的增加而减小;John A Hudson 等^[9]研究了静态加载条件下,定直径不同高度的岩石单轴压缩强度与尺寸的关系,得出随着长径比的增加,抗压强度降低;在动态冲击荷载下,岩石尺寸效应的研究有:洪亮等^[10]研究了应变率在 $100 \sim 450 \text{ s}^{-1}$ 动态条件下,长径比 1:2 的不同直径和长度的岩石试样强度变化规律,得出了与静态条件下的强度-尺寸变化规律相反的结论,即岩石抗压强度随着尺寸的增加而增加,并且应变率越大,岩石抗压强度增加越明显。

从文献[11-14]可以看出,岩石的静态尺寸效应研究比较多,且已趋于成熟,达成了统一的结论:在静态加载条件下,岩石强度随着尺寸的增加而减

小;但是在动态加载条件下的岩石尺寸效应研究较少,且结果还没有趋于一致,目前还在探索阶段。笔者采用直径为 50 mm,长径比为 0.5 和 1.0 的 2 组石灰岩试样为研究对象,分别对 2 组试样在不同冲击气压下进行冲击加载试验,进而研究不同长径比的石灰岩试样动态力学性能差异。

1 试 验

1.1 试样制作与加工

试验试样取材于安徽淮南舜耕山一采石场的石灰岩岩块,挑选同一层理处,外观结构完整、均质的岩块标记好层理方向运回实验室。运输过程中做好保护措施,不要对岩块造成损伤。运回实验室的岩块按照《煤和岩石物理力学性质测定方法》规范^[15]要求:试样两端面不平行度 $\leq \pm 0.3 \text{ mm}$,端面垂直试样轴线偏差 $\leq \pm 0.25^\circ$;并保证取芯方向垂直于层理方向,通过取芯、切割、打磨、等多道工序得到试验岩石试样。第 1 组试样直径为 50 mm,长度为 25 mm 即长径比 0.5,第 2 组试样直径为 50 mm,长度为 50 mm 即长径比 1.0。

1.2 试验装置及原理

试验装置采用安徽理工大学省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室瓦斯煤岩动静组合加载系统,是一种改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)系统。

该系统目前可以实现冲击动载 $0 \sim 500 \text{ MPa}$ 的加载试验,试样的应变率为 $1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$;冲头、入射杆、透射杆和吸收杆均为 40 Cr 合金钢,其弹性极限达 800 MPa;入射杆和透射杆直径均为 50 mm,采用试样与杆等径方式进行冲击加载。采用异型冲头放置于发射腔内发射,运用产生的半正弦应力波可以实现恒应变率加载。试样被夹持在入射杆和透射杆之间,冲击荷载是由高压氮气作为推动力推动异型冲头通过入射杆施加给试样,异型冲头撞击入射杆产生半正弦波,在入射杆中传播,当入射波传到与试样接触面时,整个试样将被压缩,同时,由于杆与试样之间的波阻抗差异,入射波被部分反射为反射波重新返回入射杆,而另一部分则透过试样作为透射波进入透射杆;由入射杆和透射杆上贴的应变片、前置放大器分别将入射波、反射波以及透射波记录在数字示波器上。根据该数据,基于一维应力波理论和应力均匀性假设理论,利用三波法进行数据处理,可以计算出试件在冲击过程中的应力、应变和应变

率^[16-21]。计算原理方程为

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \\ \varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为压杆的弹性模量; A 、 A_s 分别为压杆和试样的横截面积; C_0 为压杆的纵波波速; l_s 为试样的长度; ε_1 、 ε_R 、 ε_T 分别为入射、反射和透射应变; σ_s 、 $\dot{\varepsilon}_s$ 、 ε_s 分别为试样的应力、应变率和应变。

1.3 试验方案

用加工好、符合试验标准的 2 组直径为 50 mm, 长径比分别为 0.5 和 1.0 的石灰岩试样为研究对象,

表 1 不同长径比石灰岩试样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of limestone samples with different aspect ratios

试样编号	D/mm	L/mm	L/D	P/MPa	σ_0/MPa	$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	E_d/GPa	$\varepsilon_0/10^{-3}$
SG02-025-04B	49.65	25.43	0.51	0.4	144.72	49	14.79	1.74
SG02-025-05B	49.62	25.51	0.51	0.5	173.66	84	23.37	4.36
SG02-025-06B	49.75	25.04	0.50	0.6	195.35	109	34.41	5.30
SG02-025-07A	49.76	25.88	0.52	0.7	200.58	144	42.33	5.77
SG02-025-08B	49.61	24.96	0.50	0.8	223.84	159	50.79	5.86
SG02-025-09A	49.45	25.54	0.50	0.9	218.46	186	58.62	6.78
SG02-025-10A	49.57	24.85	0.50	1.0	249.43	193	62.95	7.44
SG02-050-04B	49.73	50.69	1.02	0.4	146.41	25	22.62	1.84
SG02-050-05B	49.47	50.74	1.02	0.5	164.92	54	37.59	3.31
SG02-050-06C	49.56	50.47	1.01	0.6	184.91	81	46.84	3.64
SG02-050-07C	49.79	49.80	1.00	0.7	193.97	117	50.25	4.21
SG02-050-08A	49.62	50.71	1.02	0.8	226.55	132	56.75	5.52
SG02-050-09B	49.38	50.59	1.02	0.9	249.45	173	63.21	7.65
SG02-050-10B	49.76	50.38	1.01	1.0	272.22	183	67.08	4.11

注: D 和 L 分别为试样的直径与长度; P 为冲击气压; σ_0 为试样的动态单轴抗压强度; $\dot{\varepsilon}$ 为试样的应变率; ε_0 为试样的峰值应变; E_d 为石灰岩试样的动态弹性模量。

2.1 石灰岩试样应力-应变分析

不同应变率等级下不同长径比石灰岩试样典型应力-应变曲线如图 1 所示, 在峰值点前, 应力-应变曲线先近似于直线, 说明在这一阶段石灰岩试样具有较好的线弹性, 当应力增加到一定数值后, 应力-应变曲线向下弯曲, 随着应力逐渐增加而曲线斜率也就越变越小, 这是由于高应力作用下岩石内部形成细微裂隙和局部破坏的缘故; 在峰值点后, 应力-应变曲线均表现出不同的变化规律, 呈现明显的率相关性, 当冲击气压 $P \leq 0.6$ MPa 时, 由于应变率相对较低, 试样破坏程度较弱还具有一定弹性, 应力-应变曲线陡峭下降, 当 $P \geq 0.7$ MPa 时, 由于应变率相对较高, 岩石试样已经完全破碎已从侧向飞

分别对 2 组试样用 0.4~1.0 MPa 内 7 个不同等级的冲击气压(0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 MPa) 进行加载试验, 每个冲击气压等级选择 3 个平行试样, 分析石灰岩试样的应力-应变曲线、动态单轴抗压强度、动态弹性模量、峰值应变随着应变率增大的变化规律, 研究尺寸效应对石灰岩试样力学性质的影响。

2 试验结果分析

采用 $\phi 50$ mm 分离式霍普金森压杆(SHPB) 试验装置, 对 2 组不同长径比的石灰岩试样分别在 7 种应变率等级下各进行 7 组冲击加载试验, 得出了不同长径比石灰岩试样典型应力-应变曲线。表 1 给出了部分不同长径比石灰岩试样的力学参数和试验结果。

移入射与透射杆使得岩石试样与钢杆之间的接触面成为自由状态, 沿负斜率近似平缓下降。

2.2 石灰岩试样动态抗压强度与应变率关系分析

所有试验数据冲击气压与动态抗压强度关系如图 2a 所示, 可以看出随着冲击气压的增大, 2 组试样的单轴动态抗压强度也增大; 部分典型试验数据动态单轴抗压强度 σ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的变化趋势与拟合曲线如图 2b 所示, 拟合关系表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{25} = 42.678 35 \dot{\varepsilon}^{0.317 85}; R^2 = 0.936 27 \\ \sigma_{50} = 45.141 81 \dot{\varepsilon}^{0.334 67}; R^2 = 0.938 68 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_{25} 、 σ_{50} 分别为 $D=50$ mm 下 $L=25$ mm 和 $L=50$ mm 的石灰岩试样动态单轴抗压强度; $\dot{\varepsilon}$ 为石灰

岩的应变率。

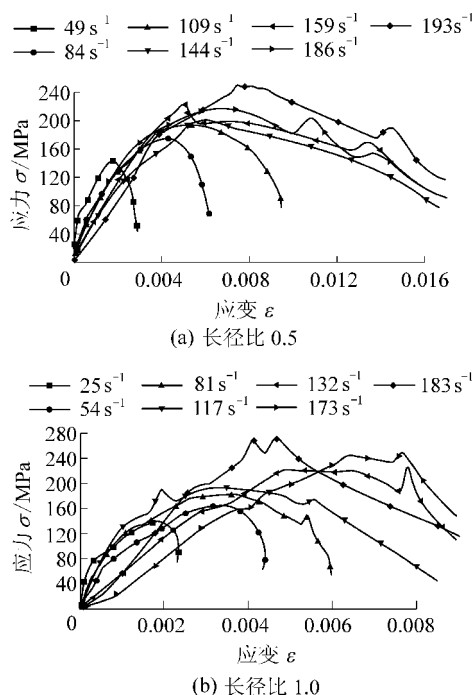


图 1 不同长径比石灰岩试样典型应力-应变曲线

Fig.1 Typical stress-strain curves of limestone samples with different aspect ratios

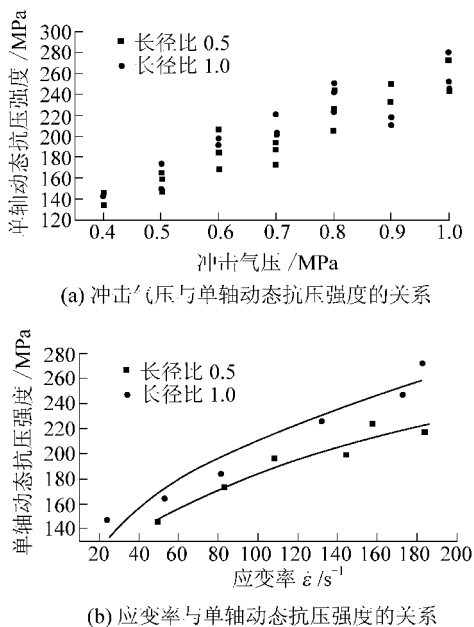


图 2 冲击气压、应变率与单轴动态抗压强度之间的关系

Fig.2 Relationship between impact gas pressure, strain rate and uniaxial dynamic compressive strength

由式(2)可以看出,石灰岩试样动态单轴抗压强度随应变率增加近似呈幂指数增大,呈现出较强的率相关性。

从图 2b 看出,2 组试样的单轴动态抗压强度均随着应变率的增大而增大,显现出明显的应变率效应,且长径比为 1.0 的试样单轴动态抗压强度随着应变率的增大速度快于长径比为 0.5 的试样,说明长径比为 1.0 的试样应变率敏感性强于长径比为 0.5 的试样。从图 2b 中还可以看出,长径比为 1.0 的曲线在长径比为 0.5 的曲线上方,说明在相同应变率下,长径比为 1.0 的试样单轴动态抗压强度大于长径比为 0.5 的单轴动态抗压强度,单轴动态抗压强度呈明显的尺寸效应,这是由于在动态加载条件下大体积试样在破坏前能够储存更多的弹塑性应变能的原因。

2.3 石灰岩试样动态弹性模量-应变率曲线分析

由于无法准确确定在冲击动力学实验室所得的压缩曲线的平均模量的起始点和终点,动态弹性模量 E_d 常取变形模量作为衡量指标进行对比。参考 FAIRHURST C E 和 HUDSON J A 提出的草案,变形模量公式为 $E_{50} = \sigma_{50} / \varepsilon_{50}$; 式中, E_{50} 为变形模量, σ_{50} 为试样动态抗压强度的 1/2, ε_{50} 为 σ_{50} 时的轴向应变^[19]。石灰岩动态弹性模量与应变率的关系曲线如图 3 所示。2 组试件的动态弹性模量,都随着应变率的增大而增大,且在同一应变率下,长径比为 1.0 的试样动态弹性模量大于长径比为 0.5 的动态弹性模量,这是由于应变率较大时,试样在极短的时间从压密阶段进入弹性阶段,使得试样的非线性压缩阶段变短,从而使弹性阶段的应力-应变曲线斜率增大,表现出岩石的动态弹性模量增大。拟合关系式为

$$\begin{cases} E_{25} = e^{(1.9628 + 0.0171\dot{\varepsilon} - 0.00003\dot{\varepsilon}^2)}; R^2 = 0.9893 \\ E_{50} = e^{(2.9966 + 0.0118\dot{\varepsilon} - 0.00003\dot{\varepsilon}^2)}; R^2 = 0.9454 \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_{25} 、 E_{50} 分别为长径比为 0.5、长径比为 1.0 的试样动态弹性模量。

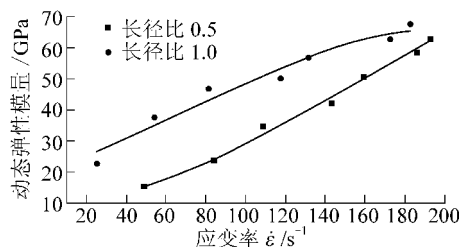


图 3 石灰岩应变率与动态弹性模量的关系曲线

Fig.3 Curves of dynamic modulus of elasticity and strain rate of limestone

2.4 石灰岩试样峰值应变-应变率曲线分析

石灰岩试样动态加载条件下,峰值应变与应变率的关系曲线如图 4 所示,从图 4 中可以看出,2 组

试样峰值应变均随着应变率的增大而增大,2条曲线在中间都有一个缓慢上升的阶段。长径比为0.5的试样在应变率 $\dot{\epsilon} = 110 \sim 155 \text{ s}^{-1}$ 范围内存在此阶段,平均峰值位移为 $5.69 \times 10^{-3} \text{ mm}$;长径比为1.0的试样在应变率为 $45 \sim 110 \text{ s}^{-1}$ 范围内存在此阶段,平均峰值位移为 $3.72 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

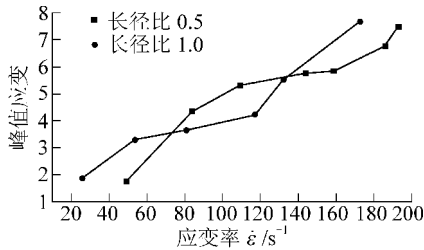


图4 石灰岩峰值应变与应变率的关系曲线

Fig.4 Curve of limestone strain rate and peak strain

2.5 不同应变率下试样的动态破坏形态分析

不同应变率下2组长径比不同的石灰岩试样的

破坏形态如图5所示。从断裂破坏形态来看,长径比为0.5和长径比为1.0的试样随应变率的增大破坏形态非常相似,应变率较低时呈轴向劈裂破坏,应变率较高时呈颗粒状粉碎破坏。在相同应变率下,长径比 $L/D=0.5$ 的试样破坏程度比长径比为1.0的大,这是由于试样与压杆接触面的摩擦力改变了试样的端部应力状态,在试样上下两端面附近形成了三维压缩应力区,长径比较小时整体受三维应力区的影响,长径比较大时试样中部应力较接近一维应力状态所致。

石灰岩试样的变形破坏特性可以从岩石的微观构造方式和能量耗散的角度给出合理的解释:在较低应变率下试样的破坏主要由原生裂纹的滑移产生破坏,新生成的细小裂纹还不能及时的扩展贯通,此时微小裂纹较少,所以试样破坏后碎块的尺寸相对较大;而随着应变率的增大,在主裂纹贯通之前,试样吸收了较高水平的能量,使得许多的细小裂纹得到扩展一起参加破坏过程,最终导致试样破坏块度更小。

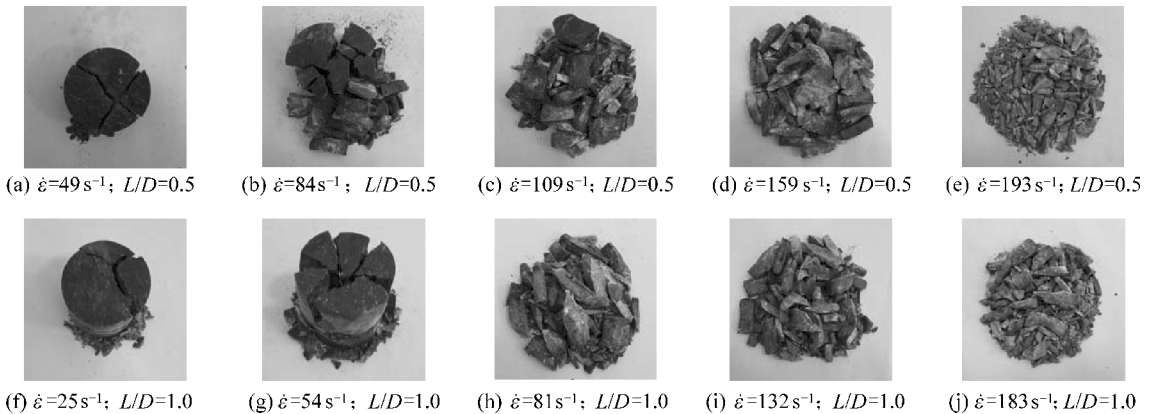


图5 不同应变率 $\dot{\epsilon}$ 下2组长径比 L/D 不同的石灰岩试样的破坏形态

Fig.5 Fracture morphology of limestone specimens with two aspect ratios at different strain rates

3 结论

1)随着应变率的增大,应力-应变曲线在峰值点前规律相似,峰值点后表现出不同的变化规律,呈现明显的率相关性。

2)2组试样动态单轴抗压强度都随着应变率的增大呈乘幂增大,且长径比为1.0的试样抗压强度的应变率敏感性强于长径比为0.5的试样,呈现出明显的尺寸效应。

3)动态弹性模量和峰值应变均随着应变率的增大而增大,相同应变率下,长径比为1.0的试样动态弹性模量大于长径比为0.5的试样;峰值应变与

应变率的关系曲线,两种长径比不同的2组试样两条曲线在中间都有一个缓慢上升的阶段。

4)试样的动态压缩破坏形态,相同应变率下,长径比为0.5的试样破坏程度比长径比为1.0的大;应变率较低时呈轴向劈裂破坏,应变率较高时呈颗粒状粉碎破坏。

参考文献 (References):

- [1] 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 Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of sizeeffect or compression strength of rock [J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.
- [2] 张 明, 卢裕杰, 杨 强. 脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1782-1789.
ZHANG Ming, LU Yujie YANG Qiang. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1782-1789.
- [3] 梁昌玉, 李 晓, 吴树仁. 中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的能量特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3472-3480.
LING Changyu, LI Xiao, WU Shuren. Research on energy characteristics of size effect of granite under low intermediate strain rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3472-3480.
- [4] 杨圣奇, 苏承东, 明平美, 等. 岩石强度尺寸效应研究方法和机理的研究[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2002, (5): 323-325.
YANG Shengqi, SU Chengdong, MING Pingmei, et al. Study on the method and mechanism of size effect of rock strength[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2002, (5): 323-325.
- [5] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112-118.
YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112-118.
- [6] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升. 岩石的非均质性对其材料强度尺寸效应的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 917-920.
LYU Zhaoxing, FENG Zengzhao, ZHAO Yangsheng. Influence of rock inhomogeneity on strength-size effect of rock materials [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 917-920.
- [7] J C 耶格, N G W 库克. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 243-246.
- [8] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3754-3760.
YOU Mingqing, SU Chengdong. Marble specimen length on the uniaxial compression test of [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3754-3760.
- [9] JOHN A HUDSON, GROUCH S L, FAIRHURST C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology, 1972, 6(3): 155-189.
- [10] 洪 亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 55-80.
- [11] 石永奎, 马源鸿, 尹延春. 尺寸效应对煤层冲击倾向性测试结果的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 23-26.
SHI Yongkui, MA Yuanhong, YIN Yanchun. Research on size effect affected to seam bum-prone test results [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 23-26.
- [12] 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 Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Experiment on influence of strain rate and size effect on rock energy accumulation and dissipation [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2386-2398.
- [13] 孟庆彬, 韩立军, 浦 海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 233-243.
MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Experimental study on the effect of size effect and strain rate on rock mechanical properties [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 233-243.
- [14] 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 Fuqiang, YANG Jun, LIU Yongqian, et al. Research on rock parastatic and dynamic impact test and size effect [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(4): 19-22, 68.
- [15] GB/T 235617—2009. 煤与岩石物理力学性质测定方法[S].
- [16] 平 琦, 骆 轩, 马芹永, 等. 冲击载荷作用下砂岩试件破碎能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4197-4203.
PING Qi, LUO Xuan, MA Qinyong, et al. Broken Energy Dissipation Characteristics of Sandstone Specimens Under Impact Loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4197-4203.
- [17] 刘 石, 许金余, 刘军忠, 等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2011, 30(9): 1864-1871.
LIU Shi, XU Jinyu, LIU Junzhong, et al. The SHPB experimental study of Sericite quartz schist and sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1864-1871.
- [18] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 51-55.
- [19] 杜 晶. 不同长径比下岩石冲击动力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 38-39.
- [20] 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 Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. The energy analysis of rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603-2608.
- [21] 凌建明, 孙 钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304-312.
LING Jianming, SUN Jun. The mesoscopic crack damage and aging characteristics of brittle rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 304-312.