DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0483-08

应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响*

李祥龙[1],王建国[2],张智宇[1],黄永辉[3]

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明 650093;
2.云南农业大学建筑工程学院,云南 昆明 650201;
3.昆明理工大学电力工程学院,云南 昆明 650500)

摘要:采用相似材料模拟实验方法并借助 SHPB(split Hopkinson pressure bar)实验系统,探究应变率及节理倾角对节理岩石动态力学性状的影响,包括应力应变曲线特征、破坏模式、能量传递及耗散规律。该实验结果表明:应变率升高,动态弹性模量增大,试件破碎块度变小,完整试件裂纹缺陷沿着平行于压应力方向扩展;节理角度越大,峰值强度越低,但当应变率升高到一定程度,节理角度对岩石破坏形态的影响不再明显;不同试件的入射能、反射能、透射能和耗散能均随应变率升高呈非线性增加,含倾斜角度节理试件的能量耗散率随应变率的变化幅度明显大于完整试件。

关键词:固体力学;动力响应;SHPB;节理岩石;节理倾角;应变率;耗散能

中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

应变率对岩石等材料动态力学性质的显著影响,一直是研究的热点。洪亮等[1]通过实验发现岩石动态强度的应变率依懒性具有很强的尺寸效应,与静载条件相反;刘军忠等[2]、刘传雄等[3]、刘石等[4]、宫凤强等[5-6]、刘晓辉等[7]分别利用 SHPB 实验研究了角闪岩、混凝土材料、绢云母石英片岩、砂岩、煤岩在不同应变率条件下的动态力学性能及破坏机理,并探讨了实验材料的本构关系;许金余等[8]、刘军忠等[9]还在改进的 SHPB 装置上研究了循环冲击作用下,主动围压对岩石动力学特性的影响。而在矿山开采、巷道掘进、边坡治理或硐室开挖等工程中,节理岩石的动力灾害问题是关注的重点。刘红岩等先将最新的数值流行方法运用到节理岩石的建模及冲击荷载下的节理裂纹扩展分析中[10],随后又采用相似材料模型实验并借助 SHPB 装置分析了节理特征(包括节理角度)对岩石动态强度及破坏模式的影响[11],但并未考虑动载条件下的能量传递特征及耗散规律。本文中,拟在刘红岩等[11]实验的基础上,通过进一步的 SHPB 冲击实验,探究应变率对不同倾角节理岩石动态力学性状的影响规律。

1 实 验

为了考察应变率对不同倾角节理岩石动力学性状的影响,这里以完整试件和 15°、30°贯通节理试件为例。岩石试件用水泥、砂子、水按照 1∶2∶0.5 的质量配比制作,其中水泥采用 PO 42.5 普通硅酸盐水泥,砂子采用粒径不大于 0.63 mm 的普通河砂,搅拌均匀后注模,振动排出气孔,凝固硬化 24 h 后脱模,在标准养护室养护 28 d,得到水泥砂浆样品。本实验中的贯通节理均用可以调整切割角度的型材切割机切割形成,用环氧树脂将不同部分按设计要求有机粘接。冲击实验在 SHPB 实验装置上完成[12],子弹尺寸为∅50 mm×800 mm,输入杆和输出杆尺寸均为∅50 mm×2 500 mm,通过改变实验装置的驱动气压实现不同的加载速度,应变率的计算应用三波法公式[13]。

* **收稿日期**:2015-06-09;**修回日期**:2015-08-13
基金项目:国家自然科学基金项目(51304087);云南省基金项目(KKSY201404056);
爆炸科学与技术国家重点实验室开发基金项目(KFJJ15-14M)
第一作者:李祥龙(1981—),男,博士,副教授,lxl00014002@163.com。

本次实验各试件的基本几何参数及其撞击速度如表 1 所示，表中 N 为试件编号，p 为加载气压，v 为撞击速度，D 为试件直径，l 为试件长度，β 为节理角度，n 为节理数。下文将从应力应变关系曲线、断裂破坏模式和破碎吸收能 3 方面分析应变率对不同角度节理岩石动力学特性的影响，并和完整岩石试件的实验结果进行对比。

表 1 不同撞击条件下试件几何参数

Table 1 Geometry parameters of specimens under different impact conditions

N	p/MPa	v/(m·s^{-1})	D/mm	l/mm	β/(°)	n	贯通程度
X7	0.55	3.283	48.20	100.51			完整
X6	0.55	3.903	48.63	100.22			完整
X4	0.58	4.867	48.53	99.85			完整
X11	0.58	5.023	48.25	100.06			完整
X3	0.60	5.445	48.46	99.91			完整
X5	0.60	5.993	48.73	100.13			完整
B10	0.54	2.510	48.61	100.41	15	1	径向贯通
B12	0.55	3.356	48.61	100.40	15	1	径向贯通
B4	0.55	3.794	48.68	100.33	15	1	径向贯通
B13	0.55	4.082	49.66	100.21	15	1	径向贯通
B5	0.58	5.082	48.75	100.73	15	1	径向贯通
B6	0.60	6.004	48.55	100.51	15	1	径向贯通
C11	0.55	3.563	48.48	101.89	30	1	径向贯通
C4	0.55	3.913	48.73	99.98	30	1	径向贯通
C1	0.55	4.167	48.67	101.39	30	1	径向贯通
C5	0.58	5.116	50.12	99.81	30	1	径向贯通
C6	0.60	5.581	48.74	101.41	30	1	径向贯通
C3	0.60	5.699	49.64	100.91	30	1	径向贯通

2 实验结果分析

2.1 完整试件的动态本构关系及破坏形态

由图 1 可以看出，不同应变率 $\dot{\varepsilon}$ 下完整岩石动态应力应变(σ-ε)曲线初始段近似为斜直线且上升斜率不同，随着应变率的升高，斜率增大：一方面说明在这一阶段岩石具有较好的线性变形特征；另一方面也说明砂浆模拟的岩石材料的动态弹性模量随着应变率的升高而变大，即该岩石材料动态弹性模量的应变率相关性较强。从材料的微结构特征来看，完整试件起初处于弹性受压阶段，使得应力应变曲线近似于直线逐渐上升，不同应变率下试件应力上升到某一值后，应力应变曲线开始变得平缓。在试件应力到达峰值之前，曲线出现不同程度的波动，这可能是由试件内部的局部破坏和应力不均匀造成的。峰值点后应力应变曲线的下降形式与应变率密切相关，表征了试件的破坏程度。

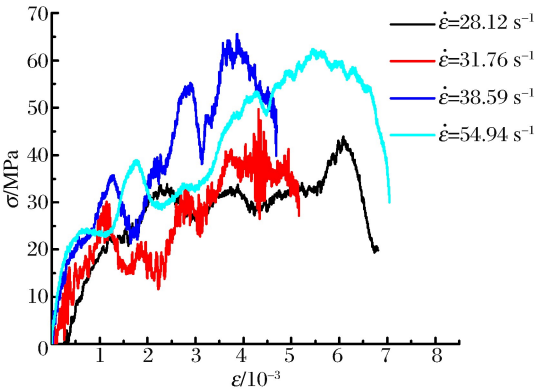

图 1 不同应变率下完整试件的动态应力应变曲线

Fig. 1 Dynamic stress-strain curves of intact specimens at different strain rates

由图 2 中不同应变率下试件的破坏形态来看，随应变率的升高，碎块的尺寸明显减小，数量增多，表现出较强的应变率相关性。当应变率 $\dot{\varepsilon}$=28.12 s^{-1}时，试件受单向压缩作用，基本没有形成破坏。应变率升高到 31.76 s^{-1}时，已有裂纹缺陷开裂，并沿着平行于压应力的方向扩展，具有明显的方向性。当 $\dot{\varepsilon}$=38.59 s^{-1}时，多条裂纹贯通，形成轴向劈裂破坏；$\dot{\varepsilon}$=54.94 s^{-1}时，试件破坏更严重，块度更小，更碎。



图 2　不同应变率下完整试件的破坏形态

Fig. 2　Failure patterns of intact specimens at different strain rates

2.2　15°节理试件的动态本构关系及破坏形态

由图 3 可以看出，不同应变率下 15°节理岩石试件动态应力应变曲线初始段与完整试件相同，说明其动态弹性模量也表现出明显的应变率相关性。从材料的微结构特征来看，在压应力作用的初始阶段，节理岩石仍以弹性受压为主，使得应力应变曲线起初近似于直线逐渐上升，但是弹性受压阶段结束后，应力应变曲线开始变得平缓，整体呈水平趋势。与完整试件的应力应变曲线相比，15°节理试件在同等应变率条件下的应力峰值均明显低于完整试件，且弹性段之后的应力应变曲线波动更频繁。这说明除试件内部的局部破坏和应力不均匀影响外，岩石径向贯通节理的存在使得岩石在不同应变率下的峰值应力均显著降低，且变形过程中应力波动更频繁。这是由于倾斜节理使得岩石受压过程中沿节理面出现了一部分剪切作用所致。同样，节理岩石应力峰值点后应力应变曲线的下降形式与应变率和试件的破坏程度关系紧密。

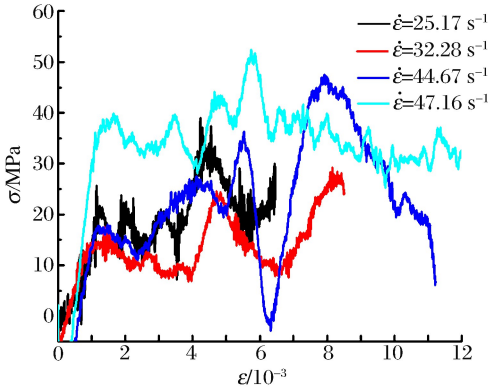

图 3　不同应变率下 15°节理试件的动态应力应变曲线

Fig. 3　Dynamic stress-strain curves of 15° jointed specimens at different strain rates

观察图 4 中 15°节理试件的破坏形态，随应变率的升高，破碎更明显，碎块数量增多，也表现出较强的应变率相关性。当 $\dot{\varepsilon}$=25.17 s^{-1}时，试件未出现裂纹，且节理连接完好，没有形成破坏。当应变率稍微提高到 32.28 s^{-1}时，试件沿着节理面错开，两端均未出现裂纹，此时主要以节理面间的剪切应力为主。当 $\dot{\varepsilon}$=44.67 s^{-1}时，节理面错开且两端试件都沿轴向破坏，这是由轴向压缩应力和节理面上的剪切应力共同作用所致。当 $\dot{\varepsilon}$=47.16 s^{-1}时，入射杆作用端试件破坏较轻，与透射杆连接的试件破碎严重（反射波的拉伸作用），连同节理面一起破裂，一小部分节理面还未错开，说明该应变率条件下压缩应力作用强于剪切应力，在试件受力破坏中占主导地位。

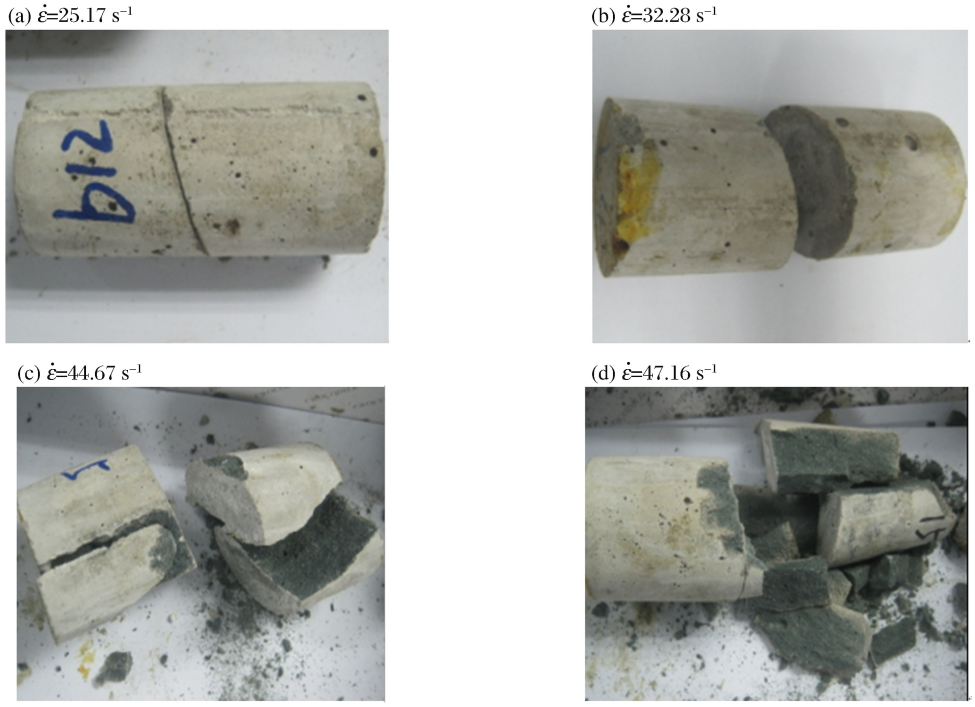

图 4 不同应变率下 15°节理试件的破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of 15° jointed specimens at different strain rates

2.3 30°节理试件的动态本构关系及破坏形态

由图 5 可以看出，不同应变率下 30°节理岩石动态应力应变曲线初始段斜率是不同的：应变率由 30.12 s^{-1}升高到 42.34 s^{-1}，动态弹性模量逐渐增大，当应变率升高到 50.85 s^{-1}时，反而变小。在同等加载应变率条件下，与 15°节理试件的应力应变曲线相比，30°节理试件的应力峰值又明显低于 15°节理试件，弹性段之后的应力应变曲线波动更频繁，再次说明岩石径向贯通节理的存在影响峰值应力的大小。在一定的应变率范围内，相同应变率条件下，节理倾角增大，岩石的峰值应力降低，这是由于较大的节理倾斜角使得岩石受压过程中沿节理面出现了剪切滑移破坏所致。

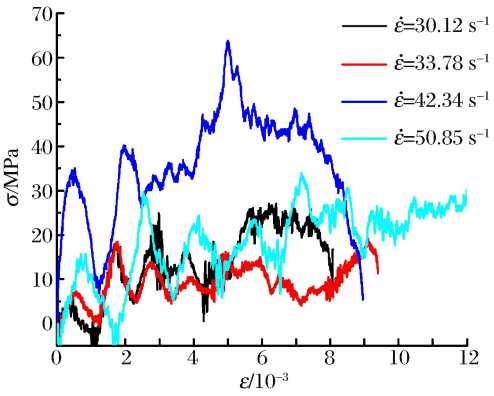

图 5 不同应变率下 30°节理试件的动态应力应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of 30° jointed specimens at different strain rates

由图 6 容易看出，随应变率的升高，30°角节理试件的破坏形式明显不同。$\dot{\varepsilon}$=30.12 s^{-1}时，试件未出现裂纹，只是沿着节理面错开，如图 6(a)所示，这是节理面间的剪切应力作用所致。当应变率升高到 33.78 s^{-1}时，试件沿着节理面错开的同时透射杆端试件沿径向劈开，如图 6(b)所示，说明随着应变率的升高，压缩应力的作用已经凸显。当 $\dot{\varepsilon}$=42.34 s^{-1}时，压缩应力作用已经占据主导，节理面还未错开，试件就已经受压沿轴向完全劈裂，如图 6(c)所示。而当应变率继续升高到 50.85 s^{-1}时，更大的加载压应力使得节理试件破坏更迅速，块体也更碎，如图 6(d)所示，由于结构内部的相互作用持续时间变短，反而使其峰值应力略有减小，这也解释了为什么图 5 中 $\dot{\varepsilon}$=50.85 s^{-1}时的应力应变曲线反而低于 $\dot{\varepsilon}$=42.34 s^{-1}时的应力应变曲线。

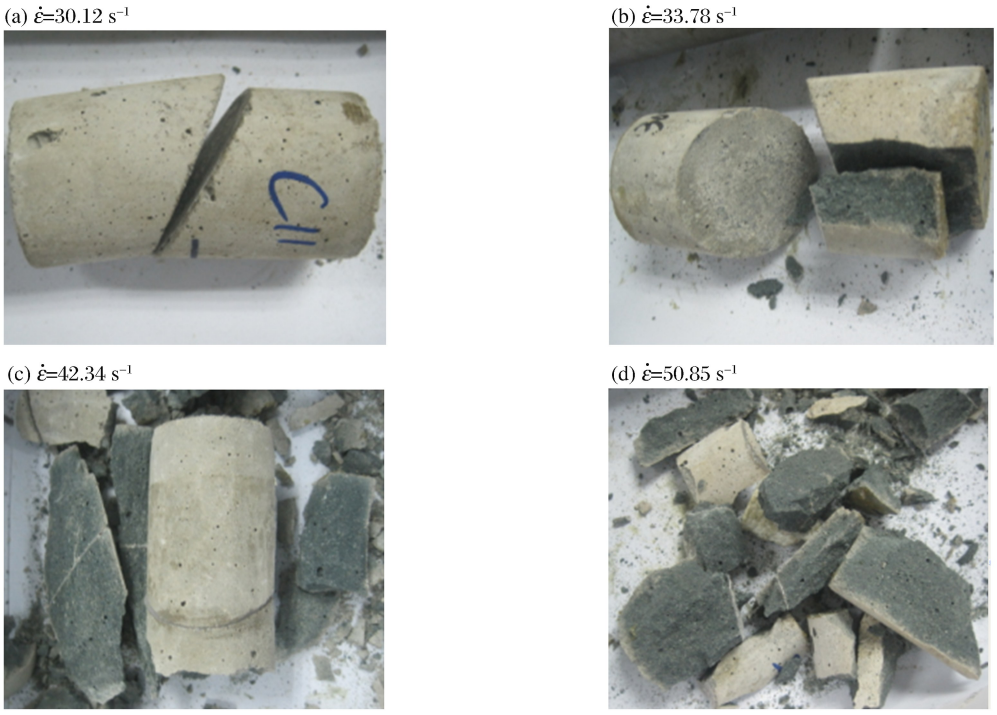

图 6　不同应变率下 30°节理试件的破坏形态

Fig. 6　Failure patterns of 30° jointed specimens at different strain rates

2.4　破坏能量

岩石破碎吸收能也是衡量不同结构岩石破坏难易程度的一个关键因素[14-16]，在 Hopkinson 压杆实验技术中，应力波所携带的能量和试样能耗的计算参考文献[7,17]，计算结果见表 2，并对表中数据进行图解分析，表中 E_i 为入射能，E_r 为反射能，E_t 为透射能，E_d 为耗散能，E_d/E_i 为能量耗散率 。

表 2　SHPB 动态冲击下不同试件的能量分布

Table 2　Energy distribution of different specimens subjected to SHPB dynamic impact

N	v/(m·s^{-1})	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	E_i/J	E_r/J	E_t/J	E_d/J	E_d/E_i
X7	3.283	28.12	55.67	22.74	14.49	18.45	0.331 4
X6	3.903	31.76	81.57	22.38	34.53	24.66	0.302 3
X4	4.867	38.59	119.16	40.23	34.17	44.76	0.375 6
X11	5.023	39.73	133.50	63.58	24.65	45.27	0.339 1
X3	5.445	45.39	158.32	72.45	30.49	55.38	0.349 8
X5	5.993	54.94	189.25	100.90	26.25	62.10	0.328 1
B10	2.510	20.07	29.57	21.15	2.40	6.02	0.203 6
B12	3.356	25.17	55.72	32.23	8.55	14.95	0.268 3
B4	3.794	32.28	71.95	51.08	3.82	17.05	0.237 0
B13	4.082	35.71	80.92	38.58	9.48	32.86	0.406 1
B5	5.082	44.67	136.01	77.57	7.25	51.19	0.376 4
B6	6.004	47.16	186.31	88.15	15.01	83.16	0.446 4
C11	3.563	30.12	67.56	45.77	4.74	17.05	0.252 4
C4	3.913	33.78	74.81	58.23	1.64	14.93	0.199 6
C1	4.167	37.26	85.59	40.69	7.08	37.82	0.441 9
C5	5.116	42.34	134.49	58.05	23.26	53.18	0.395 4
C6	5.581	50.85	161.88	117.04	7.23	37.62	0.232 4
C3	5.699	52.79	163.74	85.63	9.31	68.81	0.420 2

图 7～9 分别给出了完整试件、15°节理试件、30°节理试件的入射能、反射能、透射能和耗散能随应变率的变化关系曲线。可以看出，4 种能量随应变率的升高均呈非线性增长。然而，不同类型试件的增长率是不同的，随着应变率的升高，完整试件除反射能近似直线增加外，其余各能量的增长率逐渐减小；15°节理试件各能量的增长率则逐渐提高；而 30°节理试件的反射能增长率逐渐增大，其余能量的增长率则逐渐减小。说明岩石节理（该实验条件下贯通但无充填的节理）及其节理角度（一定角度变化范围内）虽然对动荷载作用下岩石的能量传递有显著影响，但并未改变各能量的变化趋势。

值得注意的是，尽管各试件在动态冲击下的耗散率随着应变率的升高而升高，但是入射能也是同时增加的，因此对 SHPB 动态冲击条件下试件能量耗散的大小利用能量耗散率[18]来表征更恰当。不同类型试件的能量耗散率随应变率的变化情况见图 10。可以看出，完整试件耗散率随应变率的增加幅度较小，15°和 30°节理试件增幅较大，但变化过程均有波动，这一方面受岩石节理的影响，包括不同的节理倾角，另一方面，试件本身的离散性也会导致能量在不同试件中的传播存在差异，有待进一步研究。

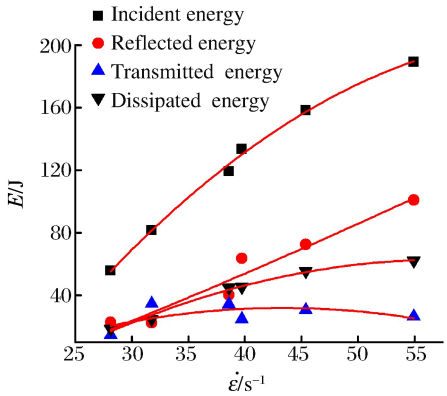

图 7 完整试件能量随应变率的变化曲线

Fig. 7 Energy-strain rate curves of intact specimens

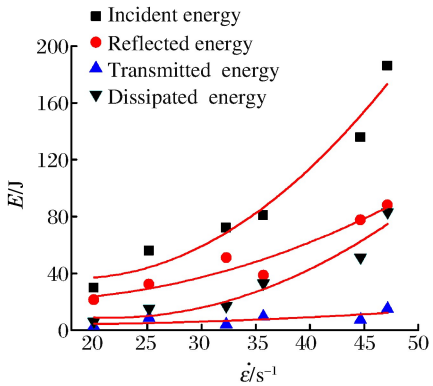

图 8 15°节理试件能量随应变率的变化曲线

Fig. 8 Energy-strain rate curves of 15° jointed specimens

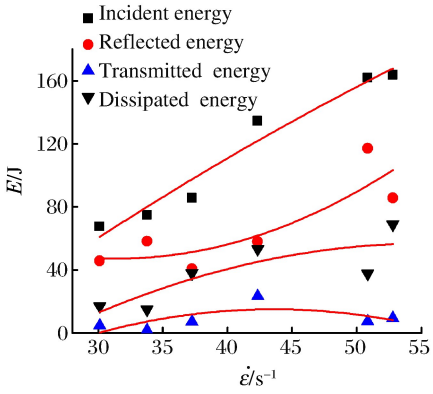

图 9 30°节理试件能量随应变率的变化曲线

Fig. 9 Energy-strain rate curves of 30° jointed specimens

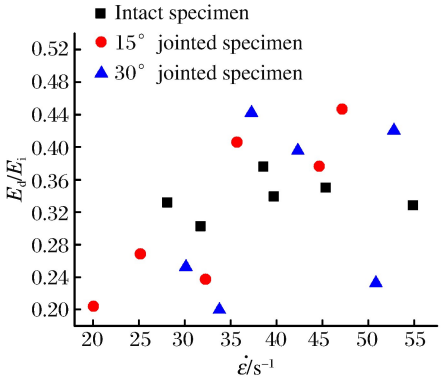

图 10 能量耗散率与应变率的关系曲线

Fig. 10 Energy dissipation rate varying with strain rate

3 结 论

（1）完整岩石和不同倾角节理岩石的动态弹性模量及破坏形态都有很强的应变率相关性。应变率升高，动态弹性模量增大，试件破碎块度变小，裂纹均沿着平行于压应力方向扩展。

（2）节理倾斜角度影响试件的动态峰值强度和破坏形态，在本实验条件内，节理角度越大，峰值强度越低，但当应变率升高到一定程度，节理角度对岩石破坏形态的影响不再明显。

（3）不同试件的入射能、反射能、透射能和耗散能随应变率升高呈非线性增加，含倾斜角度节理试件的能量耗散率随应变率的变化幅度明显大于完整试件，其随节理角度的变化关系有待进一步研究。

参考文献：

[1] 洪亮，李夕兵，马春德，等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(3)：526-533.
Hong Liang, Li Xibing, Ma Chunde, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(3):526-533.

[2] 刘军忠，许金余，吕晓聪，等. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(10)：2113-2120.
Liu Junzhong, Xu Jinyu, Lü Xiaocong, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of amphibolites under impact compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(10):2113-2120.

[3] 刘传雄，李玉龙，吴子燕，等. 混凝土材料的动态压缩破坏机理及本构关系[J]. 振动与冲击，2011，30(5)：1-5.
Liu Chuanxiong, Li Yulong, Wu Ziyan, et al. Failure mechanism and constitutive model of a concrete material under dynamic compressive loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(5):1-5.

[4] 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. SHPB experimental study of sericite-quartz schist and sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(9):1864-1871.

[5] 宫凤强，陆道辉，李夕兵，等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩土力学，2013，34(9)：2433-2441.
Gong Fengqiang, Lu Daohui, Li Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(9):2433-2441.

[6] 宫凤强，李夕兵，刘希灵. 三轴 SHPB 加载下砂岩力学特性及破坏模式试验研究[J]. 振动与冲击，2012，31(8)：29-32.
Gong Fengqiang, Li Xibing, Liu Xiling. Tests for sandstone mechnical properties and failure model under triaxial SHPB loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(8):29-32.

[7] 刘晓辉，张茹，刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报，2012，37(9)：1528-1534.
Liu Xiaohui, Zhang Ru, Liu Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(9):1528-1534.

[8] 许金余，吕晓聪，张军，等. 循环冲击作用下围压对斜长角闪岩动态特性的影响研究[J]. 振动与冲击，2010，29(8)：60-63，72.
Xu Jinyu, Lü Xiaocong, Zhang Jun, et al. Research on dynamic mechanical performance of amphibolite under cyclical impact loadings at different confining pressures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(8):60-63,72.

[9] 刘军忠，许金余，吕晓聪，等. 主动围压下岩石的冲击力学性能试验研究[J]. 振动与冲击，2011，30(6)：120-126.
Liu Junzhong, Xu Jinyu, Lü Xiaocong, et al. Experimental study on rock's mechanical capabilities under impact loading with confining pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(6):120-126.

[10] 刘红岩，王贵和. 节理岩体冲击破坏的数值流形方法模拟[J]. 岩土力学，2009，30(11)：3523-3527.
Liu Hongyan, Wang Guihe. Simulation of impact failure of jointed rock mass by numerical manifold method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(11):3523-3527.

[11] 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，2014，37(3)：659-665.
Liu Hongyan, Deng Zhengding, Wang Xinsheng, et al. Similar material test study of dynamic failure of jointed rock mass with SHPB[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,37(3):659-665.

[12] 高全臣，陆华，王东，等. 多孔隙流固耦合砂岩的冲击损伤效应[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：629-634.
Gao Quanchen, Lu Hua, Wang Dong, et al. Impact damage effect of porous sandstone coupling with fluid[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):629-634.

[13] Wang T T, Shang B. Three-wave mutual-checking method for data processing of SHPB experiments of concrete [J]. Journal of Mechanics, 2014,30(5):5-10.

[14] 陈腾飞，许金余，刘石，等. 岩石在冲击压缩破坏过程中的能量演化分析[J]. 地下空间与工程学报，2013，9(s1)：

1477-1482.

Chen Tengfei, Xu Jinyu, Liu Shi, et al. Research on rock energy evolution in the process of impact compression failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(s1):1477-1482.

[15] 金解放,李夕兵,殷志强,等.轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响[J].岩土力学,2013,34(11):3096-3102,3109.

Lin Jiefang, Li Xibing, Yin Zhiqiang, et al. Effects of axial compression and confining pressure on energy dissipation of sandstone under cyclic impact loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 201,34(11):3096-3102,3109.

[16] 刘婷婷,李建春,李海波,等.应力波通过非线性平行节理的能量分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8):1610-1617.

Liu Tingting, Li Jianchun, Li Haibo, et al. Energy analysis of stress wave propagation across parallel nonlinear joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(8):1610-1617.

[17] 黎立云,徐志强,谢和平,等.不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究[J].煤炭学报,2011,36(12):2007-2011.

Li Liyun, Xu Zhiqiang, Xie Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(12):2007-2011.

[18] 鞠杨,李业学,谢和平,等.节理岩石的应力波动与能量耗散[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2426-2434.

Ju Yang, Li Yexue, Xie Heping, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(12):2426-2434.

Experimental study for effects of strain rates and joint angles on dynamic responses of simulated rock materials

Li Xianglong[1], Wang Jianguo[2], Zhang Zhiyu[1], Huang Yonghui[3]

(1. *Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650093, *Yunnan, China*;
2. *College of Civil and Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming* 650201, *Yunnan, China*;
3. *Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *Yunnan, China*)

Abstract: By using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique, impact experiments were carried out on the jointed rock specimens simulated by cement-based mortar specimens. The dynamic responses of the simulated jointed rock material with different joint angles at different strain rates were analyzed including stress-strain curve characteristics, failure modes, energy transmission and dissipation. The experimental results show that, with the increase of strain rate, the dynamic elastic moduli increase, and the specimens become more fragile. The peak intensity decreases with the increase of the joint angles whereas when the strain rate increases to a certain extent, the influence of the joint angles on the rock damage formation is no longer obvious. The incident energy, the reflective energy, the transmission energy, and the dissipation energy of the different specimens nonlinearly increase with the increase of the strain rate. The energy dissipation rates of the specimens with inclination joint angles are higher than those of the intact specimens with the increase of the strain rate.

Key words: solid mechanics; dynamic response; SHPB; jointed rock; joint angle; strain rate; dissipation energy

(责任编辑 张凌云)