

文章编号:0253-9993(2011)12-2007-05

不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究

黎立云¹,徐志强¹,谢和平^{1,2},鞠 杨¹,马 旭¹,韩智超¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083; 2. 四川大学 建筑与环境工程学院,四川 成都 610065)

摘 要:对砂岩试件进行了动态霍普金森杆冲击破坏实验和静态加压破坏实验。对于动态冲击实验,得到了不同冲击速度下岩石试件破坏时的总吸收能、总耗散能和相对应的损伤变量。对于静态加压实验,得到了破坏时的总吸收能。并对两种实验条件下的破坏总吸收能进行了对比分析。实验结果表明,对于砂岩试件,若在单轴压缩下和动态冲击下得到同等程度的破坏,前者会比后者消耗更多的能量。

关键词:动态冲击;破坏总吸收能;静态加载;耗散能;损伤变量

中图分类号:TD315.1 **文献标志码:**A

Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities

LI Li-yun¹, XU Zhi-qiang¹, XIE He-ping^{1,2}, JU Yang¹, MA Xu¹, HAN Zhi-chao¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The dynamic impact experiments and static loading experiments for sandstones were conducted. In dynamic impact experiments, the dissipated energy and the total absorbed energy were calculated during sandstone failure process under the different impact velocity. In the static load experiments, the total absorbed energy of sandstones when failure was calculated. Besides, the failure absorbed energy under dynamic impact and static load was contrasted and analyzed. The experiment results show that, in order to achieve the same damage degree, the sandstone can dissipate more energy under static uni-axial load than that under dynamic impact.

Key words: dynamic impact; failure absorbed energy; static loading; dissipated energy; damage variable

近期在煤爆、岩爆及煤与瓦斯共采领域的研究中,都要研究煤体或岩体的能量释放问题,也即煤体或岩体的结构失稳问题。岩石变形破坏是能量释放与能量耗散的综合结果^[1-2]。可释放应变能是煤体或岩体结构破坏的原动力^[3-7],耗散能则与煤体或岩体结构在塑性区内的损伤程度相关^[5]。岩石材料的力学行为不仅与其物理和化学性能有关,还和外部加载条件如加载速率、载荷条件有关^[5-7]。课题组前期关于能量的研究表明,岩体材料在破坏时的总吸收能、总耗散能及总可释放应变能在单向及双向受压条件下都不相同;而对单向加压而言,动态下破坏是

否会比静态下破坏需要消耗更多的能量?本文旨在通过不同速度下的动态冲击实验与静态实验相比较,弄清这一问题。本文的对比实验研究结果表明,动态下破坏时,尽管岩石的强度趋于更高,但试件破坏所需消耗的总能量并不一定比静态下高;在达到相同损伤或相同破碎程度条件下,静态压缩破坏比动态冲击压缩破坏反倒要消耗更多的能量。本文在完成砂岩试件单轴静态压缩与 SHPB 动态冲击实验的基础上,得到了动态冲击和静态加载下砂岩的应力应变曲线,破坏时的总吸收能,总可释放应变能与总耗散能值,并对两种加载条件下的能量特点进行了对比分析,得

收稿日期:2011-09-11 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201201,2010CB226802,2010CB226804)

作者简介:黎立云(1959—),女,湖南长沙人,教授。E-mail:lly@cumtb.edu.cn

到了砂岩试件在动态冲击与静态加载至破坏过程中总破坏吸收能或总耗散能的不同特点。

1 破坏吸收能与耗散能的计算原理

霍普金森杆技术基于一维弹性应力波理论和均匀假定基础,其中应力波 $\sigma(t)$ 所携带的能量通过式(1)得到^[8-10],即

$$W = \frac{A_e c_e}{E_e} \int_0^t \sigma^2(t) dt \quad (1)$$

其中, A_e 为输入与输出杆的横截面积; E_e 为输入与输出杆材料的弹性模量; c_e 为一维应力波速度。并且弹性阶段内,应力波的速度 c_e 可以用压杆的质量密度 ρ_e 和弹性模量 E_e 表示,有

$$c_e = \sqrt{E_e / \rho_e} \quad (2)$$

于是,应力波能量公式简化为

$$W = \frac{A_e}{\rho_e c_e} \int_0^t \sigma^2(t) dt \quad (3)$$

根据以上公式, SHPB 动态冲击中岩石的总耗散能 W_d ^[10] 可表示为

$$W_d = W_i - (W_r + W_t) \quad (4)$$

其中, W_i 、 W_r 和 W_t 分别为入射能,反射能和透射能。可通过式(3)来计算,只是不同的应力波 $\sigma(t)$ 由图1所示不同的应变波 $\varepsilon(t)$ 来推算。

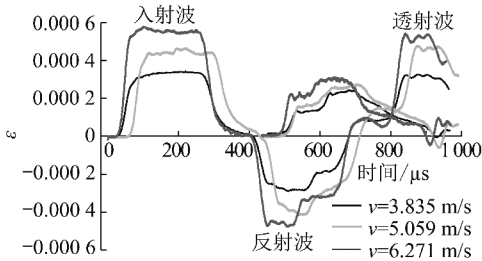


图1 动态冲击应变时程曲线

Fig. 1 Strain and time curves under impact

分离式霍普金森杆实验基于一维弹性应力波假设和均匀性假设,主要通过输入与输出杆的入射波,反射波和透射波的变化反映试件的应力应变响应特征。应力波穿过试件过程中,由于试件内部存在裂隙,节理并且伴随着裂纹的不断生成扩展,应力波所携带的能量逐渐衰减,入射波所携带的能量减去反射波和透射波携带能量之和,即动态冲击下试件破坏所消耗的能量。消耗的能量主要用于试件的损伤和破坏,有一小部分转化为热能、声能和电磁辐射能。

在动态实验和静态实验中,破坏总吸收能密度 u 为岩石应力应变曲线围成的面积:

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

在静态加载条件下总耗散能密度 u_d 为总吸收能

密度 u 减去可释放应变能密度 u_e ^[1-2],即

$$u_d = u - u_e \quad (6)$$

当试件静态破坏后, u_e 几乎为零,则 $u_d \approx u$ 。动态与静态应力应变曲线下的面积 u 的计算列于表1、2中。

表1 动态冲击下损伤变量的变化

冲击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	总吸收能密度 $u/(J \cdot m^{-3})$	总耗散能密度 $w_d/(J \cdot m^{-3})$	损伤变量 d
3.835	206 337.47	22 794.15	0.11
4.259	232 340.01	43 779.39	0.19
4.731	313 594.27	40 661.69	0.13
5.059	342 171.81	73 316.40	0.21
5.572	346 093.00	67 267.98	0.19
5.935	353 263.64	125 249.25	0.35
6.271	459 809.40	207 604.99	0.45
7.024	490 956.42	256 711.41	0.52
7.312	545 868.57	363 984.37	0.67

表2 单轴静态加载下砂岩总耗散能

试件	抗压强度/MPa	总耗散能/J	总耗散能密度 $u_d \approx u/(J \cdot m^{-3})$
1	37.12	42.89	218 437.0
2	26.33	31.93	162 618.2
3	24.34	27.92	142 195.4
4	36.67	43.45	221 289.0

表1中动态加载下总耗散能密度 w_d 为 W_d 除以试件体积。

2 SHPB 动态冲击实验

2.1 实验简介

SHPB 冲击实验采用了砂岩作为试件,试件为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形,保证试件两端面不平整度在 0.02 mm 以内。在冲击速度为 $3.80 \sim 7.31 \text{ m/s}$ 范围内对试件进行冲击,实验采用的子弹(撞击杆)直径为 50 mm ,长度为 400 mm ,输入杆和输出杆的直径也为 50 mm ,长度为 $2 000 \text{ mm}$,材质均为钢杆。实验后的试件如图2所示。

2.2 SHPB 动态冲击下砂岩能量耗散规律

砂岩试件在 $3.8 \sim 5.0 \text{ m/s}$ 的冲击速度范围内没有出现宏观裂纹,在速度为 5.5 m/s 的冲击下,试件侧面在垂直于冲击方向上出现了贯通裂纹。冲击速度为 5.9 m/s 时,圆柱形试件受到冲击作用而破坏,并且靠近入射杆的一侧破碎程度较高,说明应力波在穿过试件的过程中,在前端由于试件的裂纹扩展和试

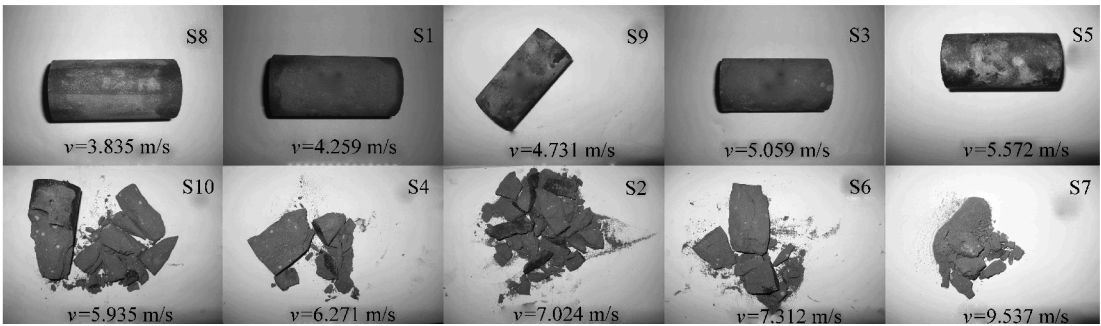


图 2 冲击后的试件

Fig. 2 Specimens after impact

件破坏吸收应力波的能量,应力波发生了衰减,以致在试件末端无法为试件的破碎提供足够能量。当试件受到较高动态冲击过程时,沿冲击方向产生多个裂纹,并且沿冲击方向的裂纹对试件的破坏起主导作用。冲击速度为 3.835、5.059 和 6.271 m/s 情况下的砂岩试件应变波形曲线如图 1 所示,透射波反映岩石试件中的平均应力变化,反射波反映了试件中的应变变化。随着子弹冲击速度的提高,应变波形的幅值也越大,子弹及试件所携带的能量也越高。

根据 SHPB 动态冲击中岩石试件的耗散能计算公式,分别得到不同冲击速度下作用下的入射能、反射能、透射能和耗散能随冲击速度变化趋势如图 3 所示,尽管砂岩在动态冲击下的耗散能随着冲击速度的提高而增加,如图 4 所示,但是入射能同时也随着增加,所以对 SHPB 动态冲击下岩石试件能量耗散的强弱可以利用能量耗散率 N 来进行表征, N 为耗散能与入射能的比值,能量耗散率与冲击速度呈弱幂函数关系或说呈基本线性关系,如图 5 所示。

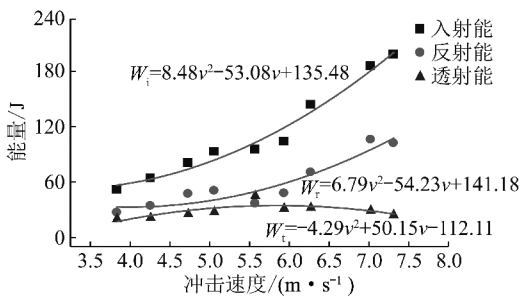


图 3 入射能、反射能和透射能变化曲线

Fig. 3 Incidence, reflectance and penetrance

Energy vs. impact velocity

2.3 动态冲击下砂岩损伤变量计算

损伤变量的描述有多个角度,如弹性模量的变化和声波传播速率的变化;能量耗散角度对损伤变量进行表征也是一种有效方式^[11-14]。

设 d 为损伤变量^[13-14],对于冲击实验,有

$$d = w_d / u \quad (7)$$

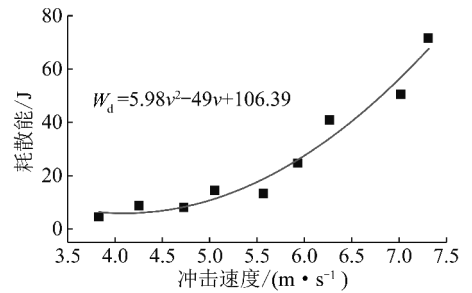


图 4 耗散能与冲击速度关系曲线

Fig. 4 Dissipated energy vs. impact velocity

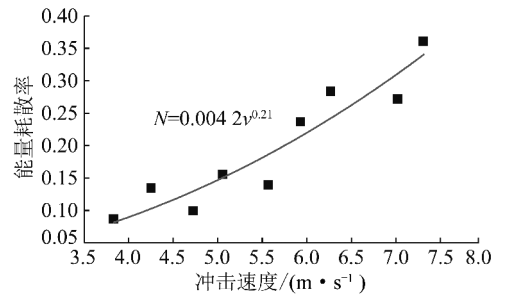


图 5 能量耗散率与冲击速度关系曲线

Fig. 5 Energy dissipation rate vs. impact velocity

本文对 SHPB 动态冲击下的砂岩试件的损伤变量进行了计算,并总结了损伤变量随冲击速度变化的规律(表 1 和图 6),得出损伤变量随冲击速度呈弱幂函数增加的关系,损伤变量值越高,相应砂岩试件的损伤破碎程度也越高。

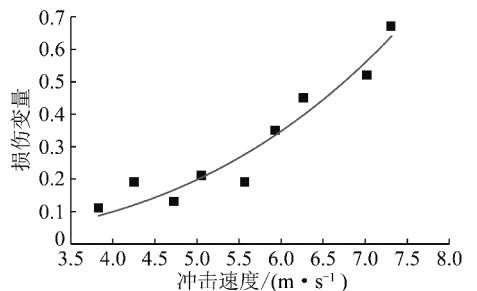


图 6 损伤变量与冲击速度变化曲线

Fig. 6 Damage variable vs. impact velocity

岩石材料在低应变率条件下的破碎主要由单个

裂纹作用而形成,即低应变率条件下单个裂纹对岩石材料的破坏起主导作用;而高应变率加载下材料的损伤破碎是主要由多条裂纹共同作用而形成。

3 砂岩静态加载实验

静态加载实验中,砂岩试件与 SHPB 动态冲击中的试件完全相同,加载速率为 0.15 mm/min,直接加载至破坏。

图 7 是砂岩石单轴压缩应力-应变全程曲线,根据砂岩的应力应变全程曲线可将砂岩的变形破坏分为 5 个阶段^[15]:

- (1) 孔隙裂隙压密阶段(OA);
- (2) 弹性变形阶段(AB);
- (3) 微弹性裂隙稳定发展阶段(BC);
- (4) 非稳定破裂发展阶段(CD);
- (5) 破裂后阶段(DE)。

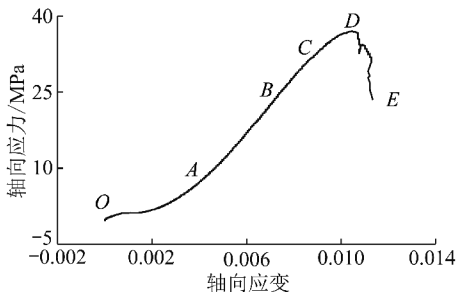


图 7 静态加载应力-应变曲线

Fig. 7 Stress vs. strain under static load

4 个砂岩试件的抗压强度最小为 24.34 MPa,最大为 37.12 MPa,砂岩试件应力应变曲线围成的面积即砂岩在受载破坏过程中岩体单元的总破坏吸收能密度。由于此能量全部用于了岩石的静态破坏,也可以说是静态破坏时的总耗散能。

4 静态加载与动态冲击破坏时各能量的比较

对静态加载与动态冲击下砂岩破坏所耗散的总能量和总能量密度进行对比,见表 2 和表 3。

由表 2、3 可以看出,静态加载下砂岩的强度小于动态冲击下的强度,动态冲击速度越高,砂岩的强度越高。动态冲击时的峰值应力约为静态加载下的 1.9 倍。对同样的砂岩试件在静态加载与动态冲击下分析得,砂岩试件在静态加载下破坏其总吸收能或总耗散能为 30~40 J,动态冲击下砂岩试件的总耗散能随冲击速度的变化而不同,耗散能随着冲击速度的提高而增大,当冲击速度在 3.8~7.3 m/s 范围内时,耗散能的变化范围在 4.5~71.2 J。通过对比可以知道,单轴压缩下砂岩试件耗散能约等于动态冲击下时

速度 5.9~7.0 m/s 范围时试件的耗散能。再通过对比实验时得到的试件破坏后的图像(图 2),发现当动态冲击速度为 5.9~7.0 m/s 时的试件破碎程度远高于单轴压缩下试件的破碎程度。单轴压缩下破坏的试件只出现了宏观断裂面和大块的剥落,并未有破碎出现。SHPB 动态冲击下的砂岩试件被破坏为碎块;并且速度越高,破碎程度越大。

表 3 SHPB 动态冲击下砂岩试件破坏总耗散能

Table 3 Energy dissipated under SHPB dynamic impact

冲击速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	抗压强 度/MPa	总耗散 能/J	总耗散能密度 w_d / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
3.835	50.70	4.48	22 794.2
4.259	52.65	8.60	43 779.4
4.731	54.43	7.98	40 661.7
5.059	57.04	14.40	73 316.4
5.572	59.40	13.21	67 268.0
5.935	60.02	24.59	125 249.3
6.271	64.49	40.76	207 605.0
7.024	66.35	50.41	256 711.4
7.312	61.14	71.47	363 984.4

因此,砂岩分别在单轴压缩与动态冲击下若得到同等程度的破坏,则单轴压缩下的砂岩需要耗散更多的能量。或者说,在总耗散能密度相同的条件下,动态冲击下的破碎程度会高于静态加压下的破碎程度。文献[7]的实验也表明,岩石试件在低速反复加卸载下破坏,其总吸收能或总耗散能密度会高于一次性加压破坏下的总吸收能密度。或者说加载速度越慢,使材料破坏需要消耗的总能量会更多一些。

需说明的是,动态冲击下破坏时,其试件的总吸收能密度 u 是高于静态下破坏时的总吸收能密度 u 的(见表 1 第 2 列与表 2 第 4 列的比较),但动态冲击时,试件内有很高的可释放应变能,会通过反射波和透射波释放出去。而静态破坏实验中,总吸收能基本全部用于破坏。所以本文只侧重比较了破坏所需消耗的实际能量。

5 结 论

(1) 砂岩在动态冲击下,对冲击速度的改变响应明显,冲击速度越高,砂岩破碎程度越高,并且砂岩在受到冲击过程中的耗散能越多。

(2) 动态冲击下的砂岩试件,随着冲击速度的提高,损伤变量 d 越大,并且损伤变量 d 随着冲击速度或耗散能密度呈弱幂函数增加的关系。

(3) 动态破坏下的总吸收能密度 u 高于静态下

破坏时的总吸收能密度 u 。但前者含有很高的可释放应变能密度;而后的总吸收能密度 u 几乎全用于破坏。

(4) 对静态加载与动态冲击下的砂岩力学响应特性比较可知,静态加载下砂岩的强度小于动态冲击下的强度,动态冲击速度越高,砂岩的强度越高。动态冲击时的峰值应力约为静态加载下的 1.9 倍。如果砂岩试件在静态加载与动态冲击下达到同等程度的破碎,对静态加载下的破坏,砂岩需要消耗更多的能量。

参考文献:

- [1] 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):3 003-3 010.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. 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): 3 003-3 010.
- [2] 谢和平,鞠 杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1 729-1 740.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 729-1 740.
- [3] 邹德蕴,姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):159-163.
Zou Deyun, Jiang Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 159-163.
- [4] 孙振武,代 进,杨春苗,等. 矿山井巷和采场冲击地压危险性的弹性能判据[J]. 煤炭学报,2007,32(8):794-798.
Sun Zhenwu, Dai Jin, Yang Chunmiao, et al. Elastic energy criterion of rock burst in roadway and coalface of mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 794-798.
- [5] 黎立云,鞠 杨,赵占文,等. 静态加载下岩石结构破坏时的能量分析[J]. 煤炭学报,2009,34(6):737-740.
Li Liyun, Ju Yang, Zhao Zhanwen, et al. Energy analysis of rock structure under static and dynamic loading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 737-740.
- [6] 黎立云,王荣新,马 旭,等. 双向加压下岩石能量耗散规律的实验研究[J]. 煤炭学报,2010,35(12):2 033-2 038.
Li Liyun, Wang Rongxin, Ma Xu, et al. The energy variety analysis of rock under biaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2 033-2 038.
- [7] 黎立云,谢和平,鞠 杨,等. 岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J]. 工程力学,2011,28(3):35-40.
Li Liyun, Xie Heping, Ju Yang, et al. Experimental investigations of releasable energy and dissipative energy within rock[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 35-40.
- [8] Kolsky H. Stress waves in solids[J]. Journal of Sound and Vibration, 1964, 1(1): 88-110.
- [9] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society (Section B), 1949, 62: 676.
- [10] Lundberg B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(6): 187-197.
- [11] 喻 勇,张宗贤,俞 洁,等. 岩石直接拉伸破坏中的能量耗散及损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(4):386-392.
Yu Yong, Zhang Zongxian, Yu Jie, et al. Energy dissipation and damage characters in rock direct tensile destruction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 386-392.
- [12] 陆菜平,窦林名,谢耀社,等. 煤样三轴围压钻孔损伤演化冲击实验模拟[J]. 煤炭学报,2004,29(6):659-662.
Lu Caiping, Dou Linming, Xie Yaoshe, et al. Experimental simulation of drilling impact of coal sample in three-axle enclosed pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 659-662.
- [13] 夏昌敬,谢和平,鞠 杨. 冲击载荷下孔隙岩石能量耗散的实验研究[J]. 工程力学,2006,23(9):1-5.
Xia Changjing, Xie Heping, Ju Yang. Experimental study of energy dissipation of porous rock under impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 1-5.
- [14] 金丰年,蒋美蓉,高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):1 976-1 980.
Jin Fengnian, Jiang Meirong, Gao Xiaoling. Defining damage variable based on energy dissipation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 1 976-1 980.
- [15] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.