

文章编号: 1001-1455(2009)04-0419-06

受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应*

叶洲元,李夕兵,万国香,周子龙,尹士兵,洪 亮

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙 410083)

摘要: 为了研究深部地下资源开发过程中矿岩破裂的能耗效应,通过利用自行研制的岩石动静组合加载试验机,对细砂岩进行了 2 个系列的三维动静组合加载试验,即固定围压改变轴向静压和固定轴向静压改变围压的冲击试验。试验结果表明:在固定围压条件下,随着轴向静压增加,砂岩试件破坏所消耗的动载荷能量密度逐渐降低;当轴向静压在对应的常规三轴抗压强度的 70% 以上,消耗的动载荷能量密度变为负值(岩石试件释放能量);轴向静压再进一步加大,负值逐渐接近 0,但始终在 0 以下。在轴向静压不变且较小的条件下,随着围压增大,岩石试件破坏所消耗的动载荷能量密度值一直在增大;但当轴向静压较大且在对应的常规三轴抗压强度的 70% 以上时,岩石试件在受到动力扰动后失去原平衡,能够自行破坏,并释放多余的能量。

关键词: 固体力学;吸能效应;动静组合载荷;细砂岩;SHPB

中图分类号: O347;TU45

国标学科代码: 130·1520

文献标志码: A

1 引 言

在深部地下资源开发过程中,深部岩体一开始就受到了很高的地应力场作用,而后资源开采对已承受较高地应力作用的岩体以动力扰动,致使岩石发生破坏、巷道垮塌,生产设备遭到毁坏,人员安全受到威胁。岩爆是其中的一个特例,它是处于高应力或极限平衡状态的岩体或地质结构体,在开挖活动等扰动下,其内部储存的应变能瞬间释放,造成开挖空间周围部分岩石从母岩体中急剧突出或弹射出来的一种动力学现象。关于破坏过程中能量耗散规律的研究主要限定在岩石受动载荷或静载荷作用的情形:谢和平等^[1-2]、李树忱等^[3]分别从分形理论、能量、力学和热力学等角度出发,研究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之间的关系。王学滨^[4]、龙明庆等^[5]分别利用单轴压缩破坏试验或循环加卸载破坏或常规三轴加卸载试验等试验,分析了不同阶段能耗,轴向及侧向塑性变形的耗散能量及其联系及实际吸收的能量与围压间的关系。李夕兵等^[6-10]从理论上采用脆性动态断裂准则和富氏分析方法,研究不同种波加载于岩石的能量耗散,并利用 SHPB 压杆装置进行了实验验证。高文学等^[11]利用一级轻气炮平面撞击试验机进行实验并计算冲击波作用过程的能量耗散。夏敬昌等^[12]对含有裂隙砂岩试件进行冲击试验,发现岩石耗散的能量随着岩石孔隙率的增加而增加。喻勇等^[13]利用拉伸式 Hopkinson 冲击装置(SHTB)研究了岩石直接拉伸破坏中的能量耗散及损伤特征,发现能量耗散越大,岩石内部损伤越严重。B. Lundberg^[14]对花岗岩和灰岩进行了 SHPB 冲击试验,发现当动载荷分别增加到花岗岩静态单轴抗压强度的 1.8 倍和灰岩静态单轴抗压强度的 1.3 倍时岩石吸收能量显著增加。D. N. Whittles 等^[15]利用室内试验和数值模拟研究发现单片碎片的平均破碎能随冲击能增加而增加。而对于涉及到动静组合载荷下岩石的能量耗散的研究^[16]较少,因此对于动静组合载荷下岩石的能量耗散问题值得深入研究。从这个角度出发,本文中利用自行研制的岩石动静组合加载试验系统,试图进行静载荷下岩石类材料的冲击试验(动静组合载荷试验),以期获得岩石在静压力作用下受动力扰动后的能耗试验结果,为深部开采、岩爆等问题提供实验依据。

* 收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-03-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490274); 国家自然科学基金项目(10472134);
高校博士点专项基金项目(20060533011)

作者简介: 叶洲元(1977—),男,博士。

2 SHPB 试验系统的改进

深部开采过程中,深部矿岩不仅受到诸如爆破等动力扰动,而且一开始就处在较高的地应力场中。为模拟深部矿岩受力环境,必须对常规的 SHPB 试验系统进行改进,使其能够加载静压。

图 1 为改进后的 SHPB 冲击试验装置^[17],在输入杆和输出杆端部处安设薄挡板 4 和轴压加载装置 11,利用金属框架 9 连接起来,即可以加载与冲击载荷方向一致的静载荷;在试件 7 安装外架设围压加载装置 10,即可以加载与冲击载荷方向垂直的围压。同时加载轴向静压和围压,从而可以进行三轴预应力下的冲击试验,改进的试验系统轴向静压及围压加载范围均为 0~200 MPa。所用 SHPB 试验系统杆件采用 40Cr 合金钢,密度为 7.81 g/cm³,弹性波速为 5.41 km/s,杆直径为 50 mm,输入杆和输出杆长度分别为 2.00 和 1.50 m,子弹采用锥形结构,可以消除振荡,实现稳定的半正弦波加载^[18-20],其材质和弹体最大直径分别与对应的输入、输出杆相同。

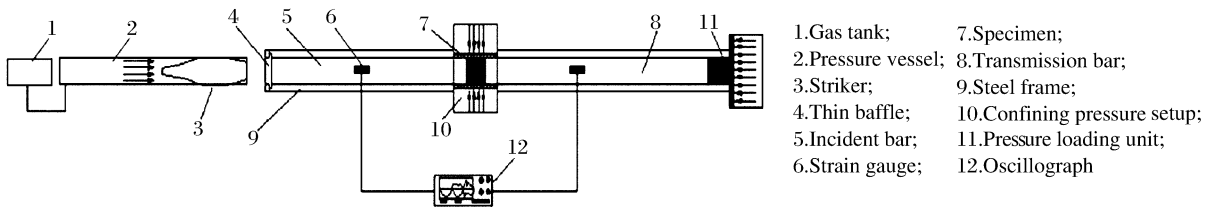


图 1 改进后的 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Configuration of the improved SHPB device

3 试验设计

3.1 试验原理

常规的 SHPB 试验基于一维应力和试件受力均匀的假设,而对于改进后的试验系统,当试件安装正确后受到三维静应力作用,入射杆和输出杆仍然受一维应力作用,服从一维应力波理论,故冲击过程中能量的耗散仍可采用常规的 SHPB 试验理论来计算。

3.2 试验方案

试验材料选用完整性和均匀性相对较好的细砂岩,试样采用 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,并对试件的两端及侧面进行了仔细研磨,不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm。试件表面光滑,没有明显缺陷,呈灰白色,平均体积密度为 2.62 t/m³,平均单轴抗压强度为 91.36 MPa,冲击强度为 153.78 MPa(平均应变率为 107.85 s⁻¹)。进行相应的常规三轴围压试验,围压 p_w 为 2、4、6 和 8 MPa 时,抗压强度 f_c 分别为 102.77、110.45、119.39 和 133.53 MPa。

试验时,SHPB 端部气体压力室气压始终不变,而根据静载荷的变化情况将试验分为 2 部分:围压不变轴向静压改变和轴向静压不变围压改变。第 1 部分试验根据围压 p_w 分成 4 个系列,分别为 2、4、6 和 8 MPa,每个系列围压对应不同大小的轴向静压;第 2 部分试验根据轴向静压 p_z 分成 5 个系列,分别为 22.5、36.0、72.0、81.0 和 90.0 MPa,每个系列轴向静压对应不同水平围压,2 部分试验参数具体见表 1。每组试验重复 3~5 次。

表 1 动静组合载荷试验方案

Table 1 The test scheme under dynamic and static loads

p_w/MPa	p_{z1}/MPa	p_{z2}/MPa	p_{z3}/MPa	p_{z4}/MPa	p_{z5}/MPa	p_{z6}/MPa	p_{z7}/MPa
2	22.5	36.0	72.0	81.0	90.0		
4	22.5	36.0	72.0	81.0	90.0	103.5	
6	22.5	36.0	72.0	81.0	90.0	103.5	112.5
8	22.5	36.0	72.0	81.0	90.0	103.5	121.5

试验过程中,将试件装入围压压力盒中,并将冲击杆与之配合好,先加载围压,再加载轴向静压,手动加压到设计值,最后施加冲击载荷。冲击载荷是由高压氮气作为推动力推动锥形冲头通过入射杆施加给试件,锥形冲头撞击入射杆产生半正弦应力波。由于气压和冲头到入射杆的距离均恒定,因此冲头撞击入射杆时的速度一般是定值。图 2 为试验中典型的动态冲击应力波波形曲线。

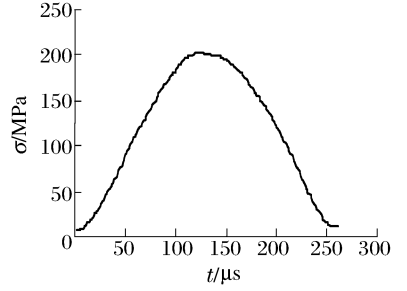


图 2 典型半正弦应力波波形曲线
Fig. 2 Typical curve of half-sine stress

4 试验结果及分析

从图 3(a)可以看出,在围压不变的条件下,随着轴向静压增加,砂岩试件破坏的能耗密度逐渐降低,并变为负值,轴向静压再进一步加大,负值逐渐接近 0,但始终在 0 以下。以围压为 6 MPa 为例,轴向静压分为 7 个水平,分别为 22.5、36.0、72.0、81.0、90.0、103.5 和 112.5 MPa,分别占围压为 6 MPa 时的常规三轴抗压强度的 18.8%、30.2%、60.3%、67.8%、75.4%、86.7% 和 94.2%。当轴向静压从 22.5 MPa 增大到 81.0 MPa 时,砂岩试件破坏的能耗密度一直在降低。在 81.0 MPa 到 90.0 MPa 之间,能耗密度成为负值,并且负值在减小,这说明试件不吸收能量,反而释放出能量,其释放的能量来自于静载荷提供给试件的并储存在试件内部的体积应变能。轴向静压从 90.0 MPa 继续增大至

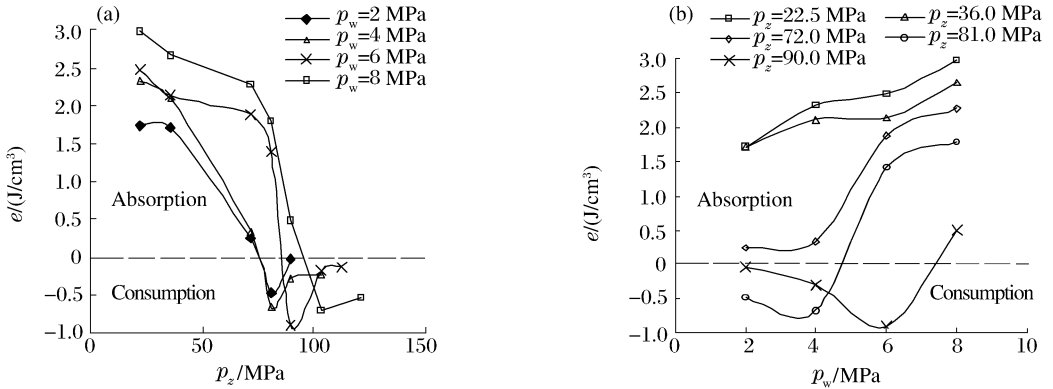


图 3 吸耗能密度

Fig. 3 Density of energy absorption/consumption

112.5 MPa,试件破坏的能耗密度逐渐增大,但一直是负值,说明在冲击过程中试件释放的能量逐渐减少。这是因为当轴向静压进一步增大,试件内部形成较大的裂隙,试件被分割成几部分沿着裂隙面移动,从而提前释放了一部分体积应变能,因此冲击过程中,试件释放的能量减少。当围压固定在 6 MPa 轴向静压改变时,轴向静压在 90 MPa,即为对应常规三轴抗压强度的 75.4% 时,试件释放的能量最多。

图 4 中砂岩试件静态常规三轴抗压全应力应变曲线峰前部分可分为 4 段:在 OA 段,随着压力增大,砂岩试件中原始裂隙逐渐闭合,弹性模量增强;AB 段,有微量新裂纹产生,弹性模量几乎不变;这 2 段内,大量的应变能被保存在试件内部,其中绝大部

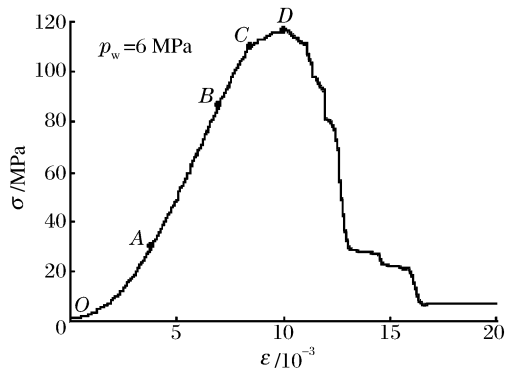


图 4 砂岩常规三轴抗压全应力应变曲线

Fig. 4 Complete stress-strain curve of sandstone under conventional triaxial compression

分为弹性应变能。BC段,新裂纹产生较多,弹性模量降低,在此部分也有部分应变能被保存,但弹性应变能慢慢减少,塑性应变能逐渐增多;CD段,裂纹急剧增加,被保存的应变能中,塑性应变能占了绝大部分。因此,在BC段存在1个点,在此点,试件内部弹性应变能最多。根据试验统计,该点在轴向静压为对应围压的常规三轴抗压强度的70%~80%之间。若再继续加载静压,砂岩试件破碎耗能少,碎片块度较大;若在该点施加冲击载荷,砂岩试件内部裂纹迅速扩展贯通,形成的碎片块度较小。因此,动静组合加载试验中,当围压为2 MPa时,轴向静压分别为22.5、36.0、72.0、81.0和90.0 MPa,分别占围压2 MPa时的常规三轴抗压强度的21.9%、35.0%、70.1%、78.8%和87.6%,试件在轴向静压为81.0 MPa,即为对应常规三轴抗压强度的78.8%时,释放的能量最多。同样的,当围压分别为4和8 MPa时,轴向静压对应分别为81.0和103.5 MPa时,释放的能量最多,分别为73.7%和77.5%。可见,当试件受到三轴静载荷和轴向冲击载荷时,当轴向静压为对应围压的常规三轴静态抗压强度的70%~80%之间,试件破坏过程中释放的能量最多。

在图3(b)中,对于轴向静压分别为22.5、36.0和72.0 MPa时,随着围压增大,岩石试件能耗密度值一直在增大;对于轴向静压分别为81.0和90.0 MPa时,岩石试件能耗密度值先为负值,后又变为正值。22.5和36.0 MPa分别在不同围压下试件的弹性范围内,虽然在三轴压缩载荷下具有一定的弹性变形能,但还需要更多的能量才能发生破坏。因此岩石试件在这种情况下破坏需要吸收更多的能量,即轴向静压22.5和36.0 MPa对应的不同围压下的能耗曲线呈上升趋势。72.0 MPa分别占围压为2、4、6和8 MPa下常规三轴抗压强度的70.1%、65.2%、60.3%和53.9%,其损伤程度逐渐降低,因此也需要吸收更多的能量才能发生破坏。但由于损伤程度较低,本身储备的能量较少,不能靠自身能量破坏,故其值都是正值,也即是轴向静压72.0 MPa对应的不同围压下的能耗曲线呈上升趋势。81.0和90.0 MPa分别占围压为2、4、6和8 MPa下常规三轴抗压强度的78.8%、73.3%、67.8%、60.7%和87.6%、81.5%、75.4%、67.4%,其损伤程度较轴向静压为72.0 MPa时严重。因此,轴向静压为81.0 MPa、围压分别为2和4 MPa时,岩石试件本身储备了足够的使其本身破坏的能量,只需要借助外力扰动,迫使原先的平衡被打破,岩石试件就能自行破坏,并释放出多余的能量。而围压分别为6和8 MPa时,在轴向静压相同时,岩石试件受到的约束较围压分别为2和4 MPa时的大,损伤程度较低,本身储备的能量不够使其破坏。并且在轴向静压为对应围压下常规三轴抗压强度的70%~80%之间,试件破坏过程中释放的能量最多,这也印证了由图3(a)得到的结论。轴向静压为90.0 MPa、围压分别为2、4、6和8 MPa时的情形和轴向静压为81.0 MPa时的类似。

5 结论

(1)在输入杆和输出杆端部处安设轴压加载装置,可以加载与冲击载荷方向一致的静载荷;在试件安装处架设围压加载装置,可以加载与冲击载荷方向相互垂直的围压,同时加载轴向静压和围压,即可实现不同三向压缩静载荷下动静组合加载。

(2)在固定围压的条件下,随着轴向静压增加,砂岩试件破坏的能耗密度逐渐降低,并可以变为负值(岩石释放能量),轴向静压再进一步加大,负值逐渐接近0,但始终在0以下。经试验知,当轴向静压在对对应围压的常规三轴抗压强度的70%~80%之间,岩石释放的能量最大。

(3)在轴向静压不变条件下,当轴向静压较小时,随着围压增大,岩石试件能耗密度值一直在增大;但当轴向静压较大且在对应的常规三轴抗压强度的70%以上,岩石试件在受到动力扰动后失去原先平衡,能够自行破坏。

(4)当轴向静压在对应的常规三轴抗压强度的70%以上,岩石体内储存了大量的体积应变能。在冲击作用下,岩石自身能够提供足够的能量使其破坏,并释放出多余的能量。

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):3003-3010.

XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. 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.

- [2] 谢和平,彭瑞东,鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3565-3570.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(21):3565-3570.
- [3] 李树忱,李术才,朱维申,等. 能量耗散弹性损伤本构方程及其在围岩稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2646-2653.
LI Shu-chen, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. Damage constitutive equations for energy dissipation and its applications to stability analysis of surrounding rock mass of caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(15):2646-2653.
- [4] 王学滨. 岩样单轴压缩轴向及侧向变形耗散能量及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):847-853.
WANG Xue-bin. Dissipated energies and stabilities of axial and lateral deformations of rock specimens in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(5):847-853.
- [5] 尤明庆,华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(6):778-781.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis on failure process of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(6):778-781.
- [6] 李夕兵,古德生. 岩石在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨[J]. 爆炸与冲击,1994,14(2):129-139.
LI Xi-bing, GU De-sheng. Energy dissipation of rock under impulsive loadings with different waveforms[J]. Explosive and Shock Waves, 1994,14(2):129-139.
- [7] 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,1994:51-68.
- [8] 胡柳青,李夕兵,赵伏军. 冲击载荷下岩石破裂损伤的能耗规律[J]. 岩石力学与工程学报,2002,22(增刊):2304-2308.
HU Liu-qing, LI Xi-bing, ZHAO Fu-jun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impaction loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,22(增刊):2304-2308.
- [9] 李夕兵,赖海辉,古德生. 不同加载波下矿岩破碎的能耗规律[J]. 中国有色金属学报,1992,2:10-14.
LI Xi-bing, LAI Hai-hui, GU De-sheng. Energy consumption of ore rocks under different loading waveforms[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1992,2:10-14.
- [10] Li X B, Lok T S, Zhao J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005,38:21-39.
- [11] 高文学,刘运通. 冲击载荷作用下岩石损伤的能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1777-1780.
GAO Wen-xue, LIU Yun-tong. Energy dissipation of rock dam age under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1777-1780.
- [12] 夏昌敬,谢和平,鞠杨,等. 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 Chang-jing, XIE He-ping, JU Yang, et al. Experimental study of energy dissipation of porous rock under impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(9):1-5.
- [13] 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 Zong-xian, 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.
- [14] Lundberg B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 1976,13:187-97.
- [15] Whittles D N, Kingman S, Lowndes I, et al. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation[J]. Minerals Engineering, 2006,19:1418-29.
- [16] 李夕兵,左宇军,马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,24(16):2814-2824.
LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(5):741-746.

- [17] LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, Lok Tat-seng, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2008,45(5):739-748.
- [18] Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(7):1055-1060.
- [19] 李夕兵,古德生,赖海辉. 冲击载荷下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形[J]. 爆炸与冲击,1993,13(2):125-130.
LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB[J]. Explosion and Shock Waves, 1993,13(2):125-130.
- [20] 李夕兵,周子龙,王卫华. 运用有限元和神经网络为 SHPB 装置构造理想冲头[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24:4215-4218.
LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, WANG Wei-hua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24:4215-4218.

Impact energy-absorption property of rock under tri-axial compression

YE Zhou-yuan* , LI Xi-bing, WAN Guo-xiang, ZHOU Zi-long,
YIN Tu-bing, HONG Liang
(School of Resources and Safety Engineering, Central South University,
Changsha 410083, Hunan,China)

Abstract: By means of the improved SHPB with axial pre-pressure and confining pressure, a series of experiments on sandstone were carried out to investigate the energy consumption in rock fracturing during the course of deep underground resources exploitation. In the experiments, the cylindrical sandstone specimens were subjected to the static-dynamic coupling loads with fixed confining pressure or fixed axial static pressure. Under fixed confining pressures, the dynamic load energy densities consumed by the breakage of the sandstone specimens decrease gradually with the increase of axial static pressures. When the axial static stress is above 70% of the corresponding static tri-axial compressive strength, the dynamic load energy density consumed is below 0, namely, the sandstone specimens release energy. With the further increase of the axial static stress, the negative dynamic load energy density consumed approaches gradually to 0 and keeps below 0. If the axial static stress fixed is low, the dynamic load energy density consumed by the sandstone specimens increases continuously with the increase of the confining pressure. When the axial static stress fixed is great and above 70% of the corresponding static tri-axial compressive strength, the sandstone specimen can be fractured by itself and release the rest energy after losing the former balance by dynamic disturbance.

Key words: solid mechanics; energy absorption; static-dynamic coupling loads; sandstone; SHPB

* Corresponding author: YE Zhou-yuan

E-mail address: yezhouyuan@126.com