



# 一维高静载频繁动态扰动时 含铜蛇纹岩能量演化规律

王 春<sup>1,2</sup>, 程露萍<sup>1,2</sup>, 王 文<sup>1</sup>, 刘 涛<sup>2</sup>, 韦永恒<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 焦作 454000;  
2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 采用预加载高轴压、0.4 MPa 的冲击气压频繁冲击的方式模拟深部岩石所处的高静载条件下受爆破开挖扰动影响的力学环境, 进行一维高静载频繁动态扰动试验。然后基于试验结果探讨冲击扰动前后含铜蛇纹岩伴随主要能量的种类, 并在预加载压时岩石内部损伤不计、冲击扰动后轴压值不变、岩石破碎后内部储能为零的假设条件下, 推演各种能量的演算方法, 并分析演化规律。结果表明: 冲击扰动前后主要伴随的能量为弹性能、入射能、弹塑性能、反射能、透射能、复合释放能; 弹塑性能随扰动冲击次数的增加呈幂函数的形式减小; 反射能、透射能分别与入射能的比值和复合释放能都随扰动冲击次数的增加而增大, 但前者呈线性趋势发展, 后者呈对数趋势变化; 冲击扰动过程中岩石处于释放能量的状态, 且随扰动冲击次数的增加, 释放的能量总体上先增大后减小。

**关键词:** 高静载; 动态扰动; 弹塑性能; 冲击次数; 单位体积耗能; 复合释放能

文章编号: 1004-0609(2019)-02-0334-09

中图分类号: TU45

文献标志码: A

岩石是深部岩体工程作业的对象, 不同于土体, 其具有硬度大、强度高的性质, 凿岩爆破仍然是岩体工程施工的主要手段, 尤其是深部金属矿山的开采活动, 还面临着高静压力的问题<sup>[1-2]</sup>。高静压力促使岩石内部存储能量, 凿岩爆破诱发岩石释放或吸收能量, 最终造成岩石在能量的驱动下发生破坏, 即岩石由变形到破坏的整个过程中都伴随着能量的转换<sup>[3-7]</sup>。研究岩石变形破坏过程中能量的演化规律, 有助于解释岩石的损伤、断裂、失稳及岩体工程灾害发生的机制<sup>[8]</sup>, 国内外学者在此方面进行了大量的研究。FERRO<sup>[9]</sup>、BADGE 等<sup>[10]</sup>研究了加载频率、振幅对岩石释放能量的影响以及尺度效应对岩石耗能密度的影响。谢和平等<sup>[11-12]</sup>利用热力学理论, 研究了岩石变形破坏过程中能量耗散的规律, 并基于能量耗散与释放的原理提出岩石强度与整体破坏的准则。邓华锋等<sup>[13]</sup>研究了循环加卸载过程中岩石的能量耗散规律, 重点研究了残余应变对能量参数的影响。许江等<sup>[14]</sup>通过循环加卸载孔隙水压力试验, 研究了孔隙水压力对岩石耗能能的影响。赵国彦等<sup>[15]</sup>分析了不同路径下岩石峰前卸荷破坏

的能量特征, 发现初始围压对应变能演化速率的影响与卸荷路径有关。关于冲击荷载作用下, 岩石能量的演化规律, 也有部分学者进行了探讨。平琦等<sup>[16]</sup>、陈腾飞等<sup>[17]</sup>通过分析冲击荷载作用下岩石能量耗散的规律, 得出破碎耗能密度与入射能量呈线性正比关系, 冲击速度越大, 可释放的弹性应变能和结构破坏能就越多。平琦等<sup>[18]</sup>、邹洋等<sup>[19]</sup>采用 SHPB 试验系统进行了巴西劈裂试验, 分析了动态劈裂拉伸条件下岩石能量的耗散规律。综上所述, 国内外学者进行了不同力学条件下岩石能量演化规律的研究, 取得了丰硕的研究成果, 但涉及高静载频繁动态扰动条件下含矿物岩石能量演化规律方面的研究还未涉及。

研究高静压、频繁冲击荷载作用下岩石能量的演化规律, 在深部岩体工程的开挖破岩、围岩支护、岩爆预测等方面具有十分重要的工程应用前景。为紧密联系工程实践, 选用冬瓜山铜矿井下 900 m 深处出矿巷道附近的含铜蛇纹岩进行一维高静载频繁动态扰动试验, 探讨扰动冲击过程中伴随的各种能量的变化规律, 可为矿山的开采、支护、灾害预测等提供理论参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604093)

收稿日期: 2017-11-28; 修订日期: 2018-03-23

通信作者: 王 春, 讲师, 博士; 电话: 15716363691; E-mail: wczyl15728@163.com

# 1 实验

## 1.1 试验装置及原理

### 1.1.1 试验装置

一维高静载频繁动态扰动试验装置选用 SHPB 动静组合加载试验装置<sup>[20-22]</sup>。该装置主要由入射杆、透射杆、缓冲杆、纺锤型冲头、加压装置、数据采集系统组成,其结构示意图见图 1。制造杆件的材料为 40Cr 合金钢,且单轴抗压强度为 800 MPa,纵波波速 5447 m/s,弹性模量为 240 GPa。试验采用高压氮气发动纺锤型冲头,冲击 2 m 长的入射杆,产生恒应变率加载的半正弦应力脉冲,透射波经 1.5 m 长的透射杆传播,0.5 m 长的缓冲杆和轴压加载装置可吸收透射杆中的部分能量,提高试验精度。试验过程中的数据由 DL-750 示波器及 CS-1D 超动态应变仪进行采集。

### 1.1.2 试验原理

根据一维应力下弹性波在细长杆中传播无畸变及弹性波在岩样与杆件接触的两界面经多次反射后,两界面的应力应变趋于平衡的原理,由粘贴在入射杆、透射杆上的应变片  $A_1$ 、 $A_2$  分别测出冲击过程中入射波、反射波、透射波对应的电压信号。测得的电压信号转换成相应的入射应力、反射应力、透射应力后,可根据如下公式推算出岩样的动态应力、动态应变率、动态应变<sup>[24]</sup>:

$$\sigma_s(t) = \frac{A}{2A_s} [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{C}{El} [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_s(t) dt \quad (3)$$

式中:  $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 、 $\sigma_T(t)$  分别为冲击过程中的入射应力、反射应力、透射应力,取压应力为正;  $\sigma_s(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_s(t)$ 、 $\epsilon_s(t)$  分别为岩样的动态应力、应变率、应变;  $A$ 、 $A_s$  分别为弹性杆、岩样截面积;  $E$ 、 $C$  分别为弹性杆的弹性模量、纵波波速;  $l$  为岩样的长度。

## 1.2 岩样制备

岩样取自冬瓜山铜矿深部出矿巷道附近的围岩,取样位置埋深约 900 m。由于出矿巷道围岩含有少量铜矿物,故取出的岩样为含铜蛇纹岩。岩样多呈黑绿色或暗灰绿色,表面可见非均匀的裂纹缺陷及点星铜矿物,但总体结构致密。为确保试验结果精确,按照岩石力学测试要求,将岩样加工成直径 50 mm,高度为 100 mm、50 mm 的两种类型。高径比为 2:1 的用于单轴压缩试验测定含铜蛇纹岩的单轴抗压强度,高径比 1:1 的则用于动力学试验测试。为确保岩样内含铜矿物的量相近,试验选用密度相近且两端面平行度及不垂直度均小于 0.02 mm 的岩样进行测试。

## 1.3 试验方案

一维高静载频繁动态扰动试验的基本思路是先给岩样施加一定的高轴压,然后采用尽可能小的冲击气压进行频繁的冲击扰动,模拟深部岩石处于高静载条件下受频繁爆破开挖影响的力学环境。为模拟高静载条件,岩样预加载的轴压需尽可能接近岩石的单轴抗压强度,故需先利用 Instron1346 型电液伺服材料试验机测定含铜蛇纹岩的单轴抗压强度;为模拟频繁动态扰动条件,采用 SHPB 试验系统最小的冲击气压 0.4 MPa 施加冲击荷载,每次冲击后须调整轴压值,确保与设定值一致。具体的试验方案:选择密度相近的岩样,其中高度 100 mm 的岩样 3 块,高度 50 mm 的岩样 12 块,其目的是确保岩样含铜品位相近;经单轴压缩试验测定 3 块岩样的单轴抗压强度分别为 30.97、76.10 和 51.95 MPa;以单轴抗压强度的平均值为依据,设定一维高静载频繁动态扰动试验预加载的轴压分别为 30、40、45 和 50 MPa,分别对应单轴抗压强度均值的 56.60%、75.46%、84.89% 和 94.33%,每个轴压选 3 个岩样进行试验,确保试验数据有效,然后选择典型的试验数据进行分析。

## 1.4 试验结果

基于试验原理,整理分析相应的试验结果发现,在一维高静载条件下,含铜蛇纹岩能承受的累计扰动

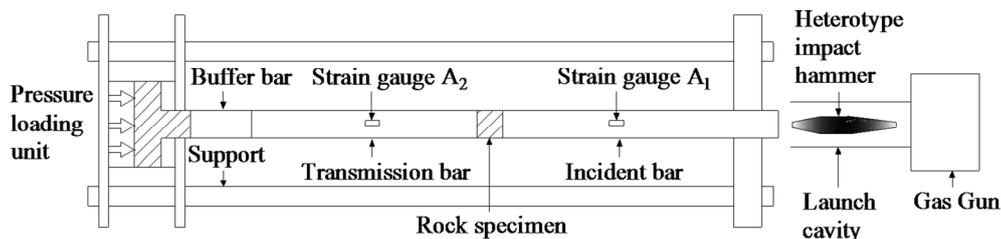


图 1 试验加载结构示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 1 Structure diagram of test load<sup>[23]</sup>

冲击次数随轴压的增大而减小；高轴压促使岩样内部微裂纹完全闭合，致使动态应力-应变曲线无压密阶段；冲击应力卸荷时，如果岩样内部存储的弹性力大于扰动冲击应力，动态应力-应变曲线在峰值应力后

出现回弹现象，否则动态应变一直增大，无回弹现象产生<sup>[25]</sup>。试验过程中岩样能承受的累计扰动冲击次数见表 1，一维高静载频繁动态扰动时含铜蛇纹岩动态应力-应变曲线见图 2。由于冲击次数较多，图 2 仅列

表 1 一维高静载频繁动态扰动试验结果

Table 1 Results of one-dimensional high static load frequent dynamic disturbance test

Test group	Specimen No.	Accumulative impact times	Mean accumulative impact times	Axial compression/MPa	Impact air pressure/MPa
1	spt1-1	30	26	30	0.4
	spt1-2	26			
	spt1-3	22			
2	spt2-1	21	24	40	0.4
	spt2-2	26			
	spt2-3	24			
3	spt3-1	16	14	45	0.4
	spt3-2	11			
	spt3-3	14			
4	spt4-1	6	5	50	0.4
	spt4-2	4			
	spt4-3	5			

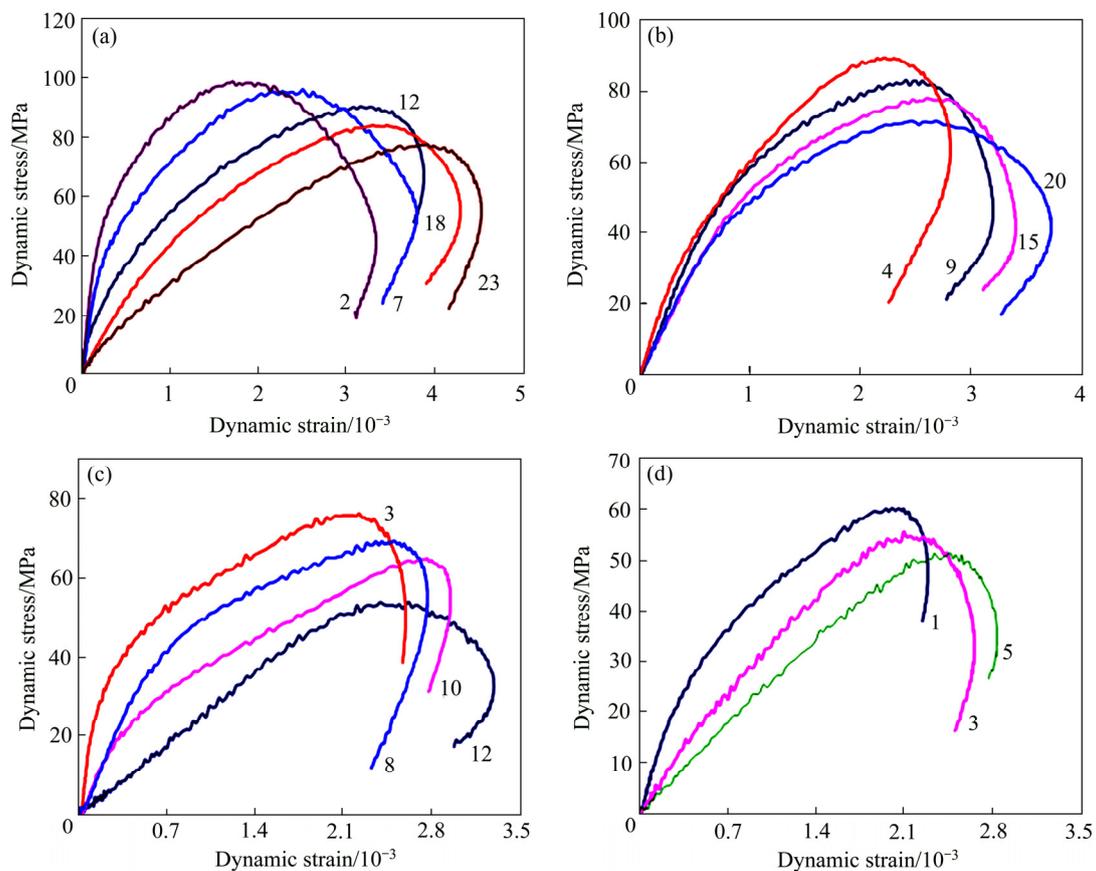


图 2 一维高静载频繁动态扰动时含铜蛇纹岩动态应力-应变曲线

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of copper-bearing serpentine under one-dimensional high static load and frequent dynamic disturbance with different specimens: (a) No. spt 1-2; (b) No. spt 2-3; (c) No. spt 3-3; (d) No. spt 4-1

出每组试验的典型动态应力-应变曲线, 图中数字代表岩样承受的第  $n$  次扰动冲击。

## 2 试验中能量种类探讨

### 2.1 基本假设

一维高静载频繁动态扰动试验过程中伴随着多种能量的转换, 部分能量无法通过计算得出, 如声能、热能、新裂纹产生耗能、岩样震动耗能等。为定量研究冲击扰动前后岩样内部能量的变化规律, 须在一定假设的基础上才能基于能量守恒定律进行探讨, 具体假设条件如下:

1) 预加载轴压时, 岩样内部只存储弹性能, 即不计岩样内部的损伤, 岩样变形服从胡克定律;

2) 每次冲击扰动后, 预加载的轴压值不发生变化, 岩样未完全破碎时, 内部存储的能量主要为弹性能, 消耗的能量主要为塑性能, 故假设冲击扰动后岩样内部伴随储弹性能、塑性能, 且二者可近似用弹性能的计算方法求解;

3) 岩样完全破碎后, 此时预加载的轴压为零, 岩样内部存储的能量也为零;

4) 岩样内无法进行定量计算的粉碎能、碎片弹射能、裂纹扩展能、热能、声能、摩擦能等假设为岩样释放的能量, 用复合释放能表示。

### 2.2 能量探讨

在一维高静载频繁动态扰动试验中, 难以监测各种能量的转换规律, 但基于一定假设基础, 针对主要能量的演化规律进行推演, 可得出岩样内部能量转换的基本规律。一维高静载频繁动态扰动试验过程中, 岩样承受多次冲击扰动, 每次冲击扰动后岩样伴随的能量都产生变化, 为确保能量探讨的可靠性, 针对每次冲击扰动前、扰动后的能量种类进行探讨。同时, 基于能量守恒定律, 设定每次冲击扰动前岩样伴随的总能量等于冲击扰动后的总能量(含岩样耗能)。

#### 2.2.1 冲击扰动前能量探讨

在假设 1) 的基础上, 每次冲击扰动前的主要能量为岩样内部存储的弹性能及冲击荷载作用时产生的冲击动能, 即入射能。

① 弹性能: 预加载轴压时, 岩样发生弹性变形, 内部存储一定的弹性能, 不计此时岩样内部的损伤, 可利用弹性势能的计算公式进行计算, 见式(4):

$$W = \frac{1}{2} E \Delta H^2 \quad (4)$$

式中:  $W$  为岩样内部存储的弹性能;  $E$  为弹性系数, 其值取静载作用下岩样的弹性模量的值;  $\Delta H$  为岩样在高静载作用下产生的压缩变形量。

预加载轴压时岩样变形服从胡克定律, 结合单轴压缩作用下应力、应变计算的原理, 可推导出式(5):

$$\begin{cases} E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \\ \sigma = \frac{F}{A_s} \\ \varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4), 得

$$W = \frac{(FH)^2}{2EA_s^2} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别表示压应力及相应的压缩应变;  $F$  为冲击扰动前预加载的高静载;  $H$ 、 $A_s$  分别为岩样的高度、横截面积。

② 入射能: 试验过程中, 纺锤型冲头冲击入射杆产生正弦应力波, 相对应的冲击动能便是入射能, 其是岩样变形、破碎、岩块弹射等所需能量的主要来源, 计算公式如下:

$$W_1 = \frac{AC}{E} \int_0^\tau \sigma_1^2(t) dt \quad (7)$$

式中:  $W_1$  为入射能;  $\sigma_1$  为冲击过程中的入射应力;  $A$ 、 $C$ 、 $E$  分别为弹性杆的横截面积、纵波波速、弹性模量;  $\tau$  为应力脉冲延续的时间。

#### 2.2.2 冲击扰动后能量探讨

在假设 2) 至 4) 的基础上, 每次冲击扰动后的主要能量为岩样内部存储的弹性能、产生的塑性能, 以及冲击荷载作用后产生的反射能、透射能、复合释放能。

① 弹塑性能: 每次冲击扰动后, 岩样伴随着弹性变形、塑性变形, 若岩样未完全破坏, 其内部存储着导致岩样发生弹性变形、塑性变形的弹塑性能, 若岩样完全破坏, 则弹塑性能为零。弹塑性能由预加载的轴压及冲击荷载共同产生, 可分两部分进行探讨。预加载轴压促使岩样内部产生的能量类似于试验前预加载轴压产生的弹性能, 仍可用式(6)进行计算; 冲击扰动促使岩样产生弹塑性变形, 基于假设 2) 内部产生的能量采用类似弹性能的计算方法求解, 即由式(4)及式(5)推导, 得

$$W = \frac{1}{2} E (\varepsilon H)^2 \quad (8)$$

将式(8)中的  $E$ 、 $\varepsilon$  分别用动态变形模量  $E_d$ 、最终

动态应变  $\varepsilon_z$  替换便可得冲击扰动时岩样内部产生的弹塑性能。将二者进行叠加即为冲击扰动后岩样内部弹塑性能  $W_{ts}$ ，计算公式如下：

$$W_{ts} = \frac{(FH)^2}{2EA_s^2} + \frac{1}{2}E_d(\varepsilon_z H)^2 \quad (9)$$

② 反射能、透射能：每次冲击扰动时，入射应力脉冲传至岩样受冲击面，部分应力脉冲经岩样受冲击面反射回来，伴随的能量为反射能；部分应力脉冲透过岩样继续传播，伴随的能量为透射能；二者的计算公式如下：

$$W_R = \frac{AC}{E} \int_0^{\tau} \sigma_R^2(t) dt \quad (10)$$

$$W_T = \frac{AC}{E} \int_0^{\tau} \sigma_T^2(t) dt \quad (11)$$

式中： $W_R$ 、 $W_T$  分别为反射能、透射能； $\sigma_R$ 、 $\sigma_T$  分别为冲击过程中的反射应力、透射应力。

③ 复合释放能：基于假设 4)，复合释放能是冲击扰动过程中岩样伴随的无法精确监测或计算的各种能量，如粉碎能、碎片弹射能、热能、声能等，但冲击扰动前后的能量是守恒的，故可认为岩样的复合释放能  $W_{fs}$  为冲击扰动前后能量的差值，其计算公式如下：

$$W_{fs} = W_q - W_h = W + W_I - W_R - W_T - W_{ts} \quad (12)$$

式中： $W_q$ 、 $W_h$  分别为冲击扰动前、后的总能量。

### 3 能量演化规律

#### 3.1 弹塑性能变化规律

每次冲击扰动后，岩样内部存储弹性能的能力可反映岩石抵抗外界荷载的能力，储能能力越大说明岩石越致密、坚硬，抵抗外界荷载的能力越强。图 3 所示为每次冲击扰动后岩样内部存储的弹塑性能随扰动冲击次数的变化规律。

如图 3 所示，当预加载的轴压一定时，弹塑性能随扰动冲击次数的增加呈幂函数的形式降低，说明岩石内部损伤加剧，抵抗外部荷载的能力降低，进一步说明频繁的扰动冲击诱发了岩样内部新微裂纹的萌发、扩展，甚至贯通；随预加载轴压值的增大，弹塑性能总体呈减小的趋势发展，其原因是预加载的轴压趋于岩样的单轴抗压强度，甚至达到了岩石的屈服极限，造成了岩样内部的损伤，轴压越大损伤就越严重，

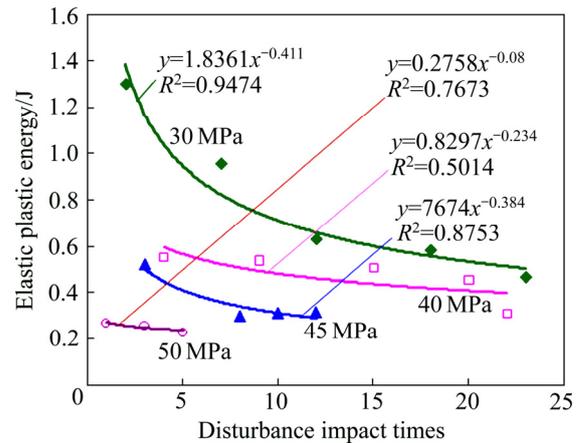


图 3 弹塑性能随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 3 Change law of elastic plastic energy with disturbance impact times

导致岩样存储弹性能的能力降低，承受同强度扰动冲击荷载的能力降低。图 3 中还显示，轴压较高或最后几次冲击时，岩样内部存储的弹性能趋于稳定，此时岩样内部损伤严重，微裂纹贯通量大，微裂纹之间的摩擦力增强了岩石储能的能力，但当外部总荷载超出岩石抗冲击能力时，瞬间发生宏观破坏，内部存储的弹性能全部释放出去，破碎的岩块弹射出去，并伴随着清脆的破裂声。

#### 3.2 入射能、反射能与透射能

一维高静载频繁动态扰动试验冲击时伴随入射能、反射能、透射能，若仅考虑三者的情况下，入射能为反射能和透射能之和，但预加载的轴压使岩样内部存储一定的能量，冲击后岩样内部伴随着能量的转换，都影响着入射能、反射能、透射能的变化规律。若单一考虑三者中的一种能量与扰动冲击次数的关系，则忽略了岩样内部于试验前后存储的能量，为减小这一误差，分别对反射能、透射能与入射能的比值进行分析，得出能量比随扰动冲击次数的变化关系，仍可反映岩石在冲击过程中内部特征的演化。

如图 4 所示，反射能与入射能的比值随扰动冲击次数的增加呈增大的趋势发展，说明反射能占入射能的比例逐渐增大，进一步说明岩石内部特征发生了改变。频繁的扰动冲击诱发了岩石内部微裂纹的不规则发展，造成岩石致密性降低，应力波传播困难；岩样受冲击端面在频繁冲击荷载的作用下，也萌发了裂纹纹路，导致入射杆与岩样端面的接触质量降低，但端面可反射应力波的总面积相对增大。因此，同一强度冲击气压频繁冲击扰动时，岩样反射的能量占入射能

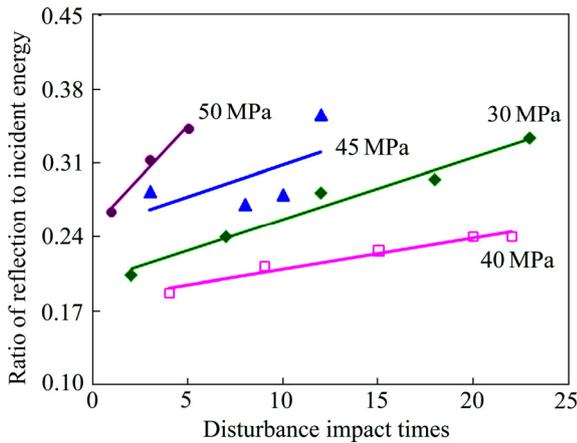


图 4 反射能与入射能比值随扰动冲击次数的变化规律  
 Fig. 4 Change law of ratio of reflection to incident energy with disturbance impact times

的比值逐渐增大。图 4 中还显示, 预加载的轴压越高, 反射能与入射能的比值总体上越大, 说预加载的轴压同样可使岩石内部构造发生变化, 增加应力波在岩样内继续传播的难度。

如图 5 所示, 透射能与入射能的比值随扰动冲击次数的增加也呈增大的趋势发展, 说明透射能占入射能的比例也逐渐增大。究其原因, 每次冲击扰动前, 岩样都预加载了高静载, 内部存储了一定的能量; 冲击扰动后, 岩样未发生宏观破坏时, 预加载的高轴压一定程度减小, 若岩样发生宏观破坏, 则预加载的轴压值降为零, 说明冲击扰动后岩样内部存储的能量释放了一部分, 其影响了入射能、反射能、透射能三者之间的比例关系。透射能与入射能的比值随扰动冲击次数的增加, 说明岩石释放的部分能量透过岩石进行

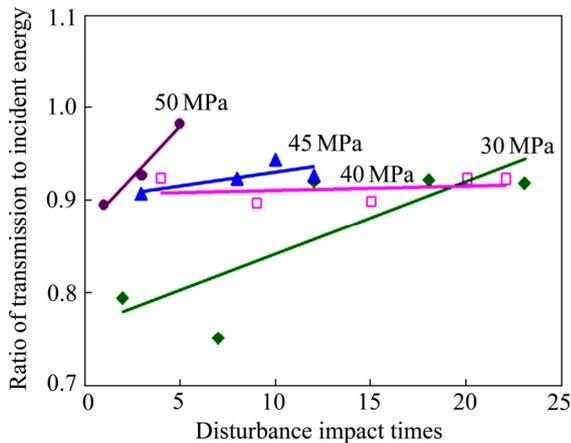


图 5 透射能与入射能比值随扰动冲击次数的变化规律  
 Fig. 5 Change law of ratio of transmission to incident energy with disturbance impact times

传播, 增加了透射能的总量。且由于岩石释放能量透过岩石传播的部分难以监测, 无法采用直接法进行分析, 但图 5 中透射能与入射能的比值离散型较大, 尤其是轴压为 30 MPa 时, 说明冲击扰动过程中, 岩石释放能量转换为透射能的离散型也较大。

### 3.3 岩样单位体积耗能

每次冲击扰动后岩石内部构造发生变化, 伴随着能量的吸收和释放, 若仅考虑入射能、反射能、透射能、岩石耗能, 其遵循能量守恒定律。当岩石吸收能量时, 入射能大于反射能与透射能之和, 可用正值表示; 当岩石释放能量时, 入射能小于反射能与透射能之和, 可用负值表示。因此, 单次冲击扰动后岩石的耗能可用如下公式进行计算:

$$W_v = \frac{W_I - W_R - W_T}{V_s} \quad (13)$$

式中:  $W_v$  为岩石单位体积耗能;  $V_s$  为岩样的体积。

如图 6 所示, 每次冲击扰动后岩石单位体积耗能为负值, 说明岩石处于释放能量的状态, 其原因是每次冲击后岩石内部都产生一定的损伤, 储能的能量降低, 同时由于冲击扰动的影响, 预加载的轴压产生一定的降低, 二者共同促使岩石释放内部存储的部分能量。图 6 中还显示, 随扰动冲击次数的增加, 岩石释放的能量总体上呈先增大后减小的趋势发展, 其原因是开始几次冲击时岩样内部微裂纹逐渐发展、贯通, 冲击后由于预加载轴压值的减小, 微裂纹进行不同程度的恢复, 最终造成岩样单位体积释放的能量增多; 但随扰动冲击次数的增加, 岩样表面产生裂隙, 部分岩屑剥离并弹射出去, 此时岩样吸收的能量主要转化为岩屑的动能, 造成单位体积释放能减小。轴压

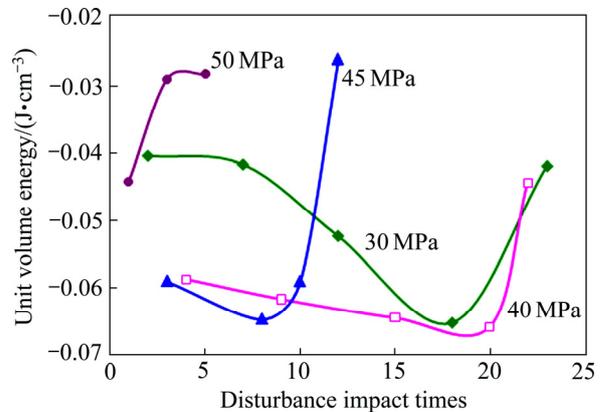


图 6 岩石单位体积耗能随扰动冲击次数的变化规律  
 Fig. 6 Change law of unit volume energy consumption of rock with disturbance impact times

50 MPa 时, 岩石单位体积释放能一值减小, 是因为预加载的轴压过高, 岩样处于破坏的临界状态, 冲击扰动诱发破坏加速, 岩样吸收的能量主要转化为岩样破坏所需的能量, 该条件下岩样能承受的扰动冲击次数较少, 也说明了这一特征。

### 3.4 复合释放能变化规律

根据每次冲击扰动前后的各种能量可推算出复合释放能的大小, 复合释放能越多, 说明转换为非岩石内部的能量越多, 进一步说明岩石储能的能力越弱, 损伤越严重。图 7 列出了不同预加载轴压条件下复合释放能随扰动冲击次数的变化规律。

图 7 中显示, 当预加载轴压一定时, 复合释放能随扰动冲击次数的增加而增大(其数值呈对数趋势减小)。影响复合释放能大小的因素多而复杂, 如岩石损伤的程度、岩屑剥离的速度、摩擦产生的热量等, 综

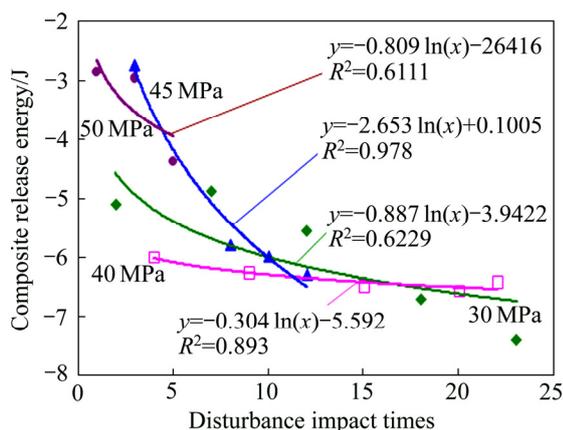


图 7 复合释放能随扰动冲击次数的变化规律

Fig. 7 Change law of composite release energy with disturbance impact times

合考虑各种因素, 可认为总能量不变的情况下, 岩石内部存储的能量越少, 则转换为其它形式的能量就越多。随扰动冲击次数的增加, 岩石损伤加剧, 剔除剥离岩屑的体积, 岩样的总体积也相对减小, 因此内部储能的能力降低, 复合释放能随扰动冲击次数增加而增大的现象便产生。反之, 可根据复合释放能的变化规律, 预测岩样内部损伤的程度。

## 4 结论

1) 在预加载轴压时岩石内部损伤不计及每次冲击扰动后预加载轴压不变的假设上, 探讨了试验中伴

随的主要能量, 即冲击扰动前的弹性能、入射能, 冲击扰动后的弹塑性能、反射能、透射能、复合释放能, 同时分析了各种能量的计算方法。

2) 冲击扰动后, 弹塑性能随扰动冲击次数的增加呈幂函数的形式降低, 而反射能、透射能分别与入射能的比值则随扰动冲击次数的增加呈增大的趋势发展。

3) 仅考虑入射能与反射能、透射能的差值分析岩石单位体积耗能的变化规律, 得出高静载条件下岩石受冲击扰动时处于释放能量的状态, 且释放的能量随扰动冲击次数的增加先增大后减小。

4) 探讨冲击扰动前后总能量的差值, 得出预加载的轴压一定时, 复合释放能随扰动冲击次数的增加而增大, 且呈对数的趋势变化。

## REFERENCES

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 姜耀东. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.  
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, JIANG Yao-dong. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 高魁, 刘泽功, 刘健, 邓东生, 高新亚, 康亚, 黄凯峰. 深孔爆破在深井坚硬复合顶板沿空留巷强制放顶中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1588-1594.  
GAO Kui, LIU Ze-gong, LIU Jian, DENG Dong-sheng, GAO Xin-ya, KANG Ya, KUANG Kai-feng. Application of deep borehole blasting to gob-side entry retaining forced roof caving in hard and compound roof deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1588-1594.
- [3] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 彭瑞东. 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): 1729-1740.  
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, PENG Rui-dong. Energy mechanism of deformation and failure of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729-1740.
- [4] 张志镇, 高峰. 3种岩石能量演化特征的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 416-422.  
ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng. Experimental investigations on energy evolution characteristics of coal, sandstone and granite during loading process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 416-422.
- [5] 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.

- [6] 满 轲, 周宏伟. 不同赋存深度岩石的动态断裂韧性与拉伸强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1657-1663.  
MAN Ke, ZHOU Hong-wei. Research on dynamic fracture toughness and tensile strength of rock at different depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1657-1663.
- [7] LOCKNER D A, BYERLEE J D. Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, 67(2): 247-258.
- [8] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 杨小彬, 赵同彬. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352-1356.  
SONG Yi-min, JIANG Yao-dong, MA Shao-peng, YANG Xiao-bin, ZHAO Tong-bin. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1352-1356.
- [9] FERR G. On dissipated energy density in compression for concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(11): 1510-1530.
- [10] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 200-209.
- [11] 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.
- [12] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨, 周宏伟. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 2603-2607.  
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, ZHOU Hong-wei. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 2603-2607.
- [13] 邓华锋, 胡 玉, 李建林, 王 哲, 张小景, 胡安龙. 循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(s1): 2869-2875.  
DENG Hua-feng, HU Yu, LI Jian-lin, WANG Zhe, ZHAGN Xiao-jing, HU An-long. The evolution of sandstone energy dissipation under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(s1): 2869-2875.
- [14] 许 江, 杨红伟, 李树春, 姜永东. 循环加、卸载孔隙水压力对砂岩变形特性影响实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 892-899.  
XU Jiang, YANG Hong-wei, LI Shu-chun, JIANG Yong-dong. Experimental study of effects of cyclic loading and unloading pore water pressures on deformation characteristic of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 892-899.
- [15] 戴 兵, 赵国彦, 杨 晨, 董陇军. 不同应力路径下岩石峰前卸荷破坏能量特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 367-374.  
DAI Bing, ZHAO Guo-yan, YANG Chen, DONG Long-jun. Energy evolution law of rocks in process of unloading failure under different paths[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 367-374.
- [16] 平 琦, 骆 轩, 马芹永, 袁 璞. 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 Qin-yong, YUAN Pu. Broken energy dissipation characteristics of sandstone specimens under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(s2): 4197-4203.
- [17] 陈腾飞, 许金余, 刘 石, 王 鹏, 方新宇. 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 Teng-fei, XU Jin-yu, LIU Shi, WAGN Peng, FANG Xin-yu. 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.
- [18] 平 琦, 马芹永, 袁 璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 401-407.  
PING Qi, MA Qin-yong, YUAN Pu. Energy dissipation analysis of stone specimens in SHPB tensile test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 401-407.
- [19] 邹 洋. 岩石动静组合加载巴西盘劈裂试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
ZHOU Yang. Experimental study of rock brizilian disk test under coupled static-dynamic loads[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [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(23): 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]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4215-4218.
- [21] LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, ZHAO Yang-sheng. Approach to minish scattering of results for split Hopkinson pressure bar test[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3): 404-407.
- [22] LI X I, ZHOU Z I, LOK T S, LIANG H, YIN T B. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739-748.
- [23] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1178-1190.  
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling Preliminary

- experimental study of characteristics of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1178–1190.
- [24] 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: 12.
- LI Xi-bing, GU De-sheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 12.
- [25] 王 春, 唐礼忠, 程露萍, 邓丽凡, 陈 源. 一维静载与频繁扰动共同作用下含铜蛇纹岩动力学特性[J]. 振动与冲击, 2016, 35(9): 219–226.
- WANG Chun, TANG Li-zhong, CHENG Lu-ping, DENG Li-fan, CHEN Yuan. Dynamic characteristics of copper-bearing serpentine under combined action of one-dimensional static load and frequent disturbance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9): 219–226.

## Energy evolution law of copper-bearing serpentine under one-dimensional high static load and frequent dynamic disturbance

WANG Chun<sup>1,2</sup>, CHENG Lu-ping<sup>1,2</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, WEI Yong-heng<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The mechanical environment of deep rock under high static load and frequent dynamic disturbance was simulated with preloading high axial compression and impacting frequently. The one-dimensional high static load frequent dynamic disturbance test was carried out with 0.4 MPa impact pressure. Based on the experimental results, the types of main energy of copper-bearing serpentine before and after the impact disturbed were discussed. Some hypothetical conditions were considered, such as the internal damage of rock was ignored when preloading axial compression, the axial pressure values were invariant after impact disturbance, the internal storage energy was zero after rock specimen break into cuttings, when the calculation methods and evolution laws were analyzed. The results show that the main accompanying energies before and after the impact disturbed are elastic energy, incident energy, elastic plastic energy, reflection energy, transmission energy and composite release energy. The elastic plastic energy increases with increasing disturbance impact times of rock specimen in a power function with a negative exponent. The ratio of reflection with incident energy, the ratio of transmission with incident energy and the composite release energy all increase with increasing of impact disturbance times, but the former shows a linear trend and the latter shows a logarithmic trend. The rock in the impact disturbance process is in the state of releasing energy, and the released energy in general increases firstly and then decreases with increasing of impact disturbance times.

**Key words:** high static load; dynamic disturbance; elastic plastic energy; impact times; unit volume energy consumption; composite release energy

**Foundation item:** Project(51604093) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2017-11-28; **Accepted date:** 2018-03-23

**Corresponding author:** WANG Chun; Tel: +86-15716363691; E-mail: wczyl15728@163.com

(编辑 王 超)