

## 高应变率下的矿岩特性研究

于亚伦\* 金科学\*  
(北京科技大学) (包头钢铁学院)

**摘要** 本文采用霍普金森杆 (S. H. P. B.) 装置对三种磁铁矿和一种花岗岩在应变率为  $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  范围内的力学特性进行了研究, 文中给出了矿岩在不同应变率下的动态破坏强度, 动态弹性模量、动态应力-应变曲线和分析结论。

**关键词** 应变率 动态破坏强度 动态本构方程。

### 1. 引言

在矿山工程中, 如凿岩、爆破作业等, 矿岩所承受的均为动载荷。理论和实验证明, 材料在承受动、静载荷作用时, 其力学特性有很大差异。为了指导爆破生产实践, 将爆破设计优化从依靠经验提高到优化设计的基础上。对一些主要矿岩品种进行动载试验是必要的。

### 2. 实验装置

本研究采用的高速冲击装置为霍普金森杆 (简称 S. H. P. B.), 如图 1 示。主要部分是位

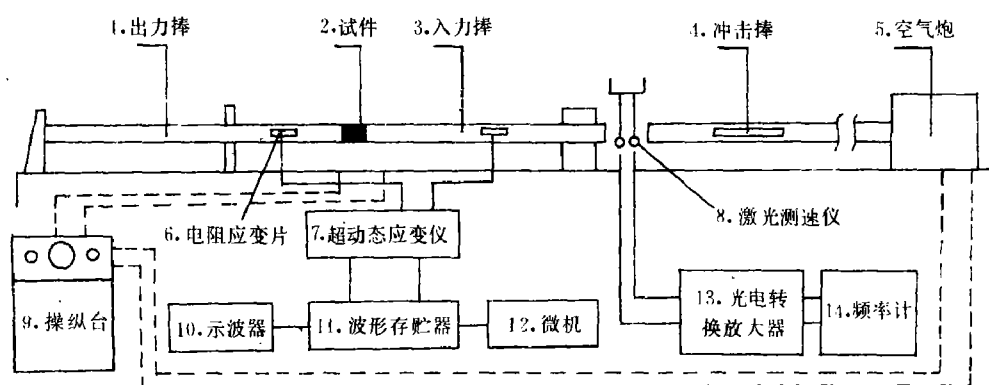


图1 霍普金森杆 (S. H. P. B.) 装置

Fig. 1 S. H. P. B. Apparatus

1. Output bar; 2. Specimen; 3. Input bar; 4. Impact bar; 5. Gas gun;  
6. strain gauge; 7. Ultra-dynamic strain gauge; 8. Velocity measuring  
instrument; 9. Operator's panel; 10. Oscilloscope; 11. Wave storage  
unit; 12. Computer; 13. Optoelectronic multiply amplifier; 14. Counter.

\* 文中花岗岩全分析, 矿岩显微镜鉴定系北京科技大学李西林同志完成。  
1988年5月收到原稿, 1989年4月收到修改稿。

于试件两端的入力棒、出力棒以及给予冲击棒一定冲击速度的发射装置。入、出力棒是用弹性极限强度很高的工具钢 T8 ( $HRC > 62$ ) 制成, 直径 30 mm。而且冲击棒是与入、出力棒同材质, 同直径, 其长度选择为 266 mm, 此时在入力棒上产生的应力波周期正好为  $100 \mu s$ 。入力棒、出力棒, 冲击棒和岩石试件的中心轴必须处于同一轴线上。

冲击系统采用高压氮气的急剧膨胀而加速冲击棒, 冲击速度  $\geq 40$  m/s。为了测定冲击棒的运动速度, 在入力棒前端安装有两台激光测速仪。

为了测定弹性棒内的应力波, 在入、出力棒上贴有金属箔式电阻应变片, 每个测点上的两枚电阻片组成惠斯顿电桥, 以消除因弹性棒弯曲而产生的测试误差。电阻片获取的信号通过超动态应变仪输给 BC-VI 型瞬态波形存贮器, 采用装有 A/D 转换器的微机系统进行数据处理。

### 3. 岩石试件

试件采用某露天铁矿的磁铁矿—石英磁铁矿和混合花岗岩。石英磁铁矿矿石品位 25~28%, 矿石结构以中、粗粒为主, 颗粒  $> 0.074$  mm 的约占 80~90%。混合花岗岩显微镜下观察, 是不等粒的花岗变晶结构, 矿物呈圆形粒状、镶嵌状。其化学全分析结果列于表 1。

试件的结构特征和物理力学参数列于表 2。

表 1 混合花岗岩化学全分析 (%)

Table 1 Chemical composition of migmatite (%)

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
69.66	0.73	12.99	3.75	1.75	痕	0.35	0.10	0.08	9.32

表 2 试件结构特征和物力参数

Table 2 Specimen structure characteristics and physical mechanical parameters

名称	结构、构造	主要矿物	比重	弹性模量 (MPa)	抗压强度 (MPa)
条带状石英磁铁矿	变晶粒状结构 条带状构造	磁铁矿、石英、 紫苏辉石	3.12		
辉石、石英、 磁铁矿	粗粒自行一半 自形辉石, 呈 浸染状	磁铁矿、辉石、 石英	3.24	$87 \times 10^3$	180
厚层状、块状 石英磁铁矿	石英颗粒较粗	磁铁矿、石英 含量较多	3.24	$74 \times 10^3$	178
混合花岗岩	粒状结构块状 构造	钾长石、石英、 斜长石、少量 黑云母	2.70	$56 \times 10^3$	140

试件的长度和直径均为 30 mm, 两端平行偏差  $< \pm 5/100$ 。

四种类型矿岩的显微镜鉴定如图 2~5 所示。

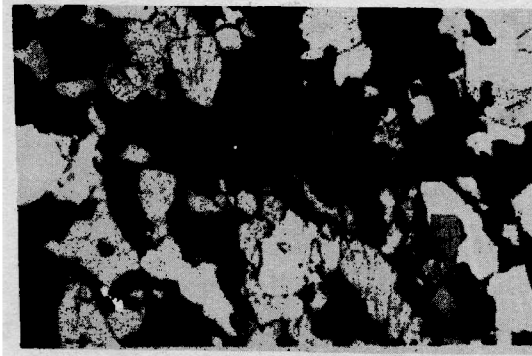


图2 条带状石英磁铁矿

Fig. 2 Banded quartz magnetite

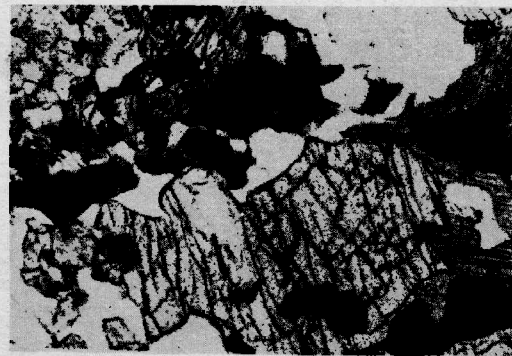


图3 辉石石英磁铁矿

Fig. 3 Augite quartz magnetite



图4 厚层状块状石英磁铁矿

Fig. 4 Thick bedded massive quartz magnetite

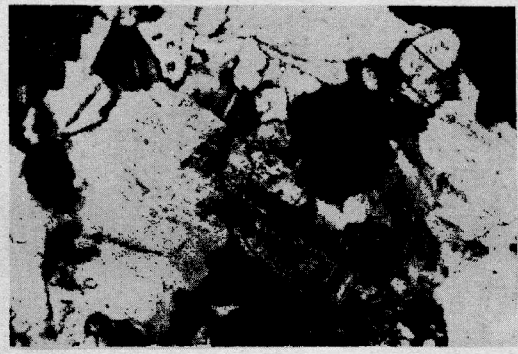


图5 混合花岗岩

Fig. 5 Migmatite

#### 4. 实验结果

##### 1. 矿岩的破坏强度和动弹模量

根据对多种磁铁矿和花岗岩试件测试结果, 其动破坏强度和动弹模量列于表3。

表3 动态破坏强度和动弹模量

Table 3 Dynamic compressive strength and dynamic Young's modulus

试件名称	$\dot{\epsilon}/$ ( $\times 10^3 \cdot s^{-1}$ )	动破坏强度* (MPa)	动弹性模量* (GPa)
条带状石英磁铁矿	0.7~1.6	229	77
辉石石英磁铁矿	0.3~1.0	488	89
厚层状块状石英磁铁矿	0.5~1.0	423	79
混合花岗岩	0.3~1.0	343	80

\* 动破坏强度, 动弹模量均为平均值。

2. 应力、应力率、应变、应变率与时间关系曲线，应力-应变曲线。

上述曲线分别示于图6~图11。从图6、图7看出，随着时间的增长，石英磁铁矿的应力和应力率呈下降趋势，只是在图7中波形尾部出现振荡现象。

不同类型石英磁铁矿的应变-时间曲线的形状与图8的典型波形相似。但是入射波幅愈

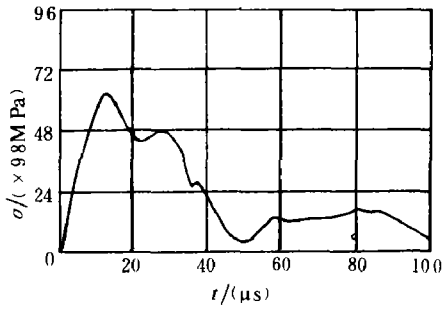


图6 石英磁铁矿应力-时间曲线

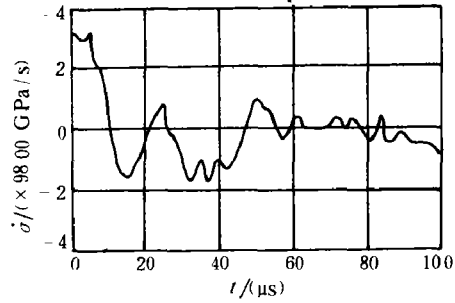


图7 石英磁铁矿的应力率-时间曲线

Fig. 6 Quartz magnetite stress-time curve Fig. 7 Quartz magnetite stress rate-time curve

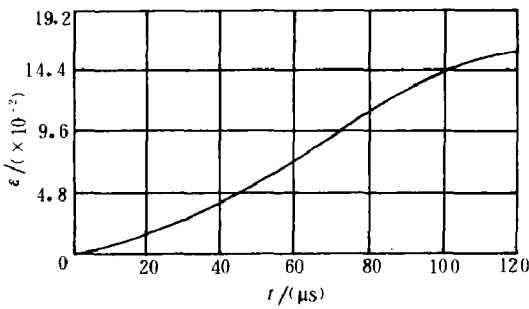


图8 石英磁铁矿的应变时间曲线

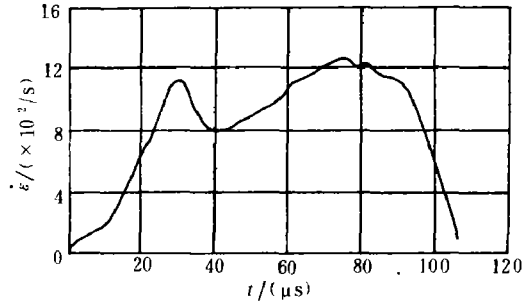


图9 石英磁铁矿的应变率-时间曲线

Fig. 8 Quartz magnetite strain-time curve Fig. 9 Quartz magnetite strain rate-time curve

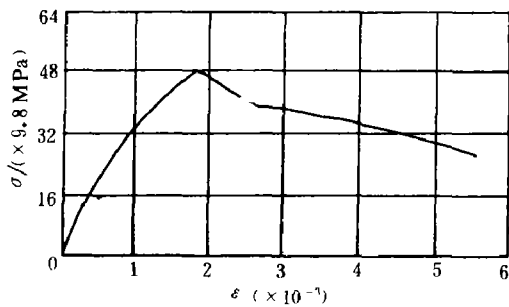


图10 混合花岗岩动态应力-应变曲线

Fig. 10 Migmatite dynamic stress-strain curve

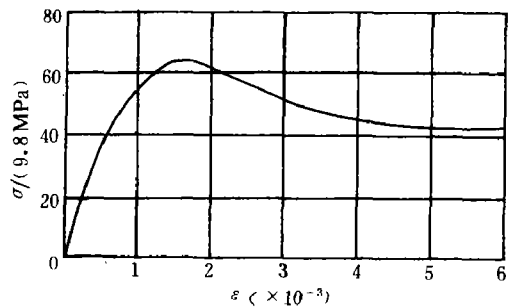


图11 石英磁铁矿动态应力-应变曲线

Fig. 11 Quartz magnetite dynamic stress-strain curve

大, 同时间对应的应变也愈大。

图10、图11分别示出混合花岗岩、石英磁铁矿的动应力-应变曲线。破坏前的应力-应变关系近似于直线关系。

### 3. 矿岩本构方程

由动态应力-应变曲线看出, 初期应力和应变呈线性关系, 一定值后发生变化。其形状和过应力模型理论所描述的应力-应变曲线极为相似, 故可用修正的过应力模型描述。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + D \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^\delta \quad (1)$$

移项 
$$\dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E} = D \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^\delta \quad (2)$$

式中:  $E$ ——动应力-应变曲线线性段斜率;  $\sigma_0$ ——动态线性应力极限;  $\sigma$ ——试件应力;  $D$ 、 $\delta$ ——待定系数。

式(2)两边取对数

$$\ln \left( \dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E} \right) = \ln D + \delta \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right) \quad (3)$$

设 
$$y = \ln \left( \dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E} \right); x = \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)$$

式(3)改写为 
$$y = A + Bx \quad (4)$$

式中: 
$$A = \ln D, B = \delta$$

因此, 求待定系数  $D$ 、 $\delta$  可转化为求回归方程。

几种矿岩的本构方程如下 (其中  $R$  为相关系数)

条带状石英磁铁矿

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + 328 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{1.55} \quad R = 0.95 \quad (5)$$

辉石石英磁铁矿

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + 97 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{1.9} \quad R = 0.98 \quad (6)$$

厚层状块状石英磁铁矿

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + 280 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{1.45} \quad R = 0.94 \quad (7)$$

混合花岗岩

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + 170 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{2.07} \quad R = 0.96 \quad (8)$$

### 参 考 文 献

- [1] 金科学, 高速应变率下的矿岩特性的研究, 北京钢铁学院硕士论文, (1987)。
- [2] 于亚伦, 木下重教, 川北稔, 高速冲击载荷下的岩石破碎特性, 金属矿山 (2) (1985), 28。
- [3] 陆岳屏等, 霍普金森压杆法测定砂岩、石灰岩动态破碎应力和杨氏模量, 岩土工程学报 5 (3) (1983), 28。

- [4] Lunbbery, B. A.. A Split Hopkinson Bar Study of Energy Absorption in Dynamic Rock Fragmentation *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Absts*, **13** (1976), 187.
- [5] Malvern, L. E., Jenking, D. A. et al Compressive Split Hopkinson Bar Testing of Concrete, Int. Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Eeffects, Beijing, (1986), 726.

## STUDIES ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF MAGNETITES AND GRANITE UNDER HIGH STRAIN RATES

Yu Yalun

*(University of Science & Technology Beijing)*

Jin Kexue

*(Baotou Institute of Iron & Steel Techology)*

**ABSTRACT** Split Hopkinson's Pressure Bar has been used to study the dynamic behavior of three kinds of magnetites and one granite at strain rates ranging from 300 to 1000s<sup>-1</sup>. Some results including the dynamic fracture strength, Young's modulus, stress-strain curve and constitutive equations of the rocks are given in this paper.

**KEY WORDS** strain rates, dynamic fracture strength, dynamic constitutive equation.