

# 岩石对冲击载荷的动态响应

章 根 德

用Split-Hopkinson压力杆方法研究岩石的动态特性时,发现应力波通过破裂岩石试件产生的衰减和岩石动态强度的降低。本文考虑到修正的必要性,根据实验数据给出了一种分析和计算岩石动态强度的新方法。文中也给出了灰色砂岩和石灰岩的动态强度和动态应力—应变关系,此外还分析讨论了影响动态强度的一些因素。

研究爆炸产生的压缩应力波对工程结构物的作用,常提出这样的问题:岩石介质在应力波作用下有什么样的动态特性?一些研究表明,某些岩石,虽然它们的静态或准静态力学性质是十分相似的,但它们的动态特性却很不相同<sup>[1][2]</sup>。岩石的动态特性,与加载的历史,加载的应力率或应变率,岩石内裂纹的生成与扩展等有很大的关系。

为了研究岩石在高应变率下的动态特性,常采用Split—Hopkinson压力杆方法。它经过Kolsky<sup>[3]</sup>和Davies<sup>[4]</sup>等人的发展,已成为高应变率试验的一种常规方法。这个方法就是将一个短试件夹在二根钢杆之间,并使一应力脉冲通过整个系统。从钢杆上的应变片就能测得短试件二个端面的应力及位移。

Split—Hopkinson压力杆方法采用平均化意义下的应力与应变的概念。但是,实验中发现,当输入的应力波幅值大于岩石的初始破裂应力时,由于应力波通过破裂岩石试件会产生应力波幅值的衰减,平均化意义下的应力与应变的概念便失去了现实意义。必须根据岩石的动态破裂特性进行修正。

本文给出了灰色砂岩,石灰岩两种岩石的动态应力应变关系,并且对影响动态破裂强度的各种因素进行了讨论。当加载应变率不太高时( $< 3 \times 10^2$ 1/秒),可以采用静态破裂强度来代替动态破裂强度进行工程设计。

## 实 验 装 置

实验采用霍布金生压力杆系统,严格满足一维应力的试验条件,如图(一)所示。

关于实验装置的细节,文献[5]作了详细的报导。由火药枪驱动子弹打击入射杆,输入应力脉冲。应力波连续通过输入杆、岩石试件和输出杆。在入射杆、输出杆与岩石试件上都贴了应变片。测得的应变,通过动态应变仪,由示波器记录下来。

子弹与波导杆的长径比的选择,要使应力波沿杆截面均匀分布<sup>[6]</sup>,避免弯曲波的干扰。波导杆及岩石试件上的应变片都对称配置,并整个系统保持严格同心,以减少弯曲效应的影响。

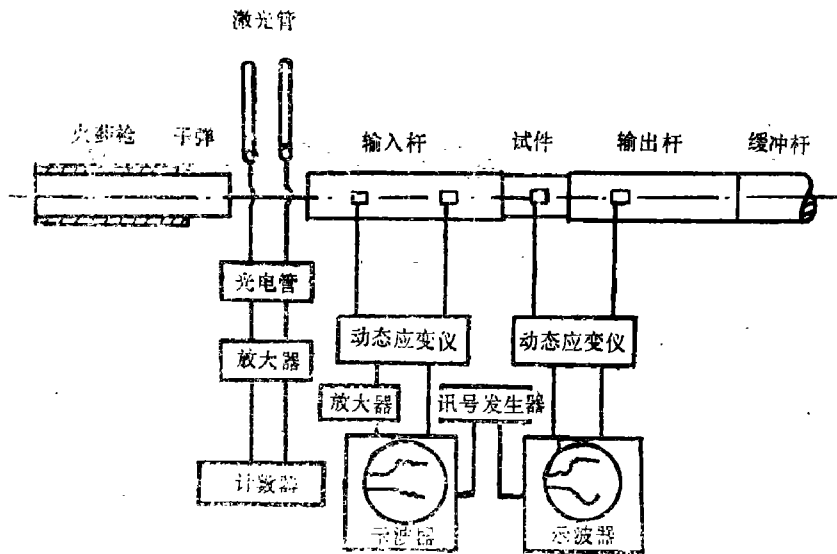


图1 霍布金生压力杆系统示意图

## 岩石试件

实验中采用了灰色砂岩、石灰岩两种岩石。岩石试件的直径与钢杆相同，试件的长度分别为： $l = d/2, d, 2d$ 三种。岩石试件的静态强度由静态压缩试验得到。

## 实验原理

利用霍布金生压力杆来研究材料的动态特性，常采用平均化意义下的应力、应变的概念。其原理如下：

由于波导杆在实验过程中始终保持弹性，由测得的入射应变 $\epsilon_I$ ，反射应变 $\epsilon_R$ 和透射应变 $\epsilon_T$ ，就能给出钢杆与试件的接触面位移 $u$ 。如图（二）所示。

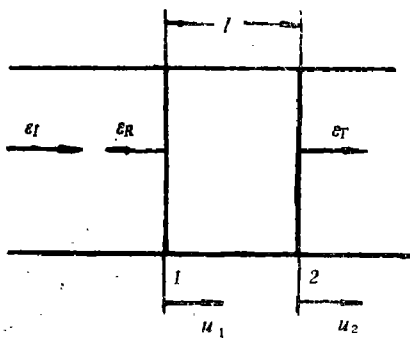


图2 波导杆与试件接触面的位移

根据弹性波传播的理论，在钢杆中，

$$u = C_0 \int_0^t \epsilon dt' \quad (1)$$

这里， $u$ 是 $t$ 时刻的位移。 $C_0$ 是钢杆中的弹性压缩波波速。 $\epsilon$ 是应变。于是

$$u_1 = C_0 \int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_R) dt' \quad (2)$$

这里， $u_1$ 是入射杆与试件的接触面1的位移。 $\epsilon_I$ 是入射应变波形，沿 $x$ 轴正方向。 $\epsilon_R$ 是反射应变波形，沿 $x$ 轴负方向。

同样，

$$u_2 = C_0 \int_0^t \epsilon_T dt' \quad (3)$$

这里,  $u_2$  是输出杆与试件接触面 2 的位移,  $\varepsilon_T$  是透射应变脉冲。

根据接触面上应力与位移的连续性假设, 由公式 (2) 与 (3) 就能得到试件的平均应变,

$$\varepsilon_S = \frac{1}{l_0} (u_1 - u_2) = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt' \quad (4)$$

这里,  $\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{l_0} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T)$  称为试件的平均应变率。

由于试件的直径与钢杆直径相同, 故两个接触面上的应力分别为,

$$\sigma_1 = E(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (5)$$

$$\sigma_2 = E \cdot \varepsilon_T \quad (6)$$

这里,  $E$  为钢杆的弹性模量。

假设应力沿试件是线性分布的, 则试件的平均应力为,

$$\sigma_S = 1/2 E (\varepsilon_I - \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (7)$$

根据公式 (4) 与 (7) 求得试件的平均应变  $\varepsilon_S$  与平均应力  $\sigma_S$ , 就能得出在平均化概念下岩石试件的动态应力应变关系。

Conn 曾指出, 关于试件的平均应变与平均应变率的概念是缺乏根据的<sup>[7]</sup>。我们在实验中比较了试件的平均应变与试件中点的真实应变, 发现它们符合得很差, 如图 (三) 所示。为此, 我们在实验中就没有采用平均应变的假设, 而直接用岩石试件中点的真实应变来作动态的应力应变曲线。

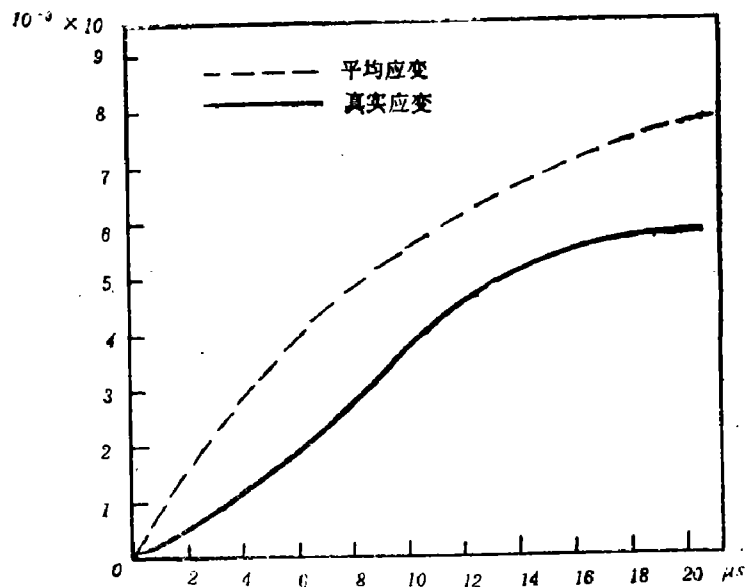


图3 应变—时间曲线, 试件中点的真实应变与平均应变的比较

试件中应力线性分布的假设要求试件在受力变形过程中始终保持连续、均匀、各向同性。但是, 对岩石试件, 当入射的应力波幅值超过岩石的初始破裂应力时, 由于岩石试件中产生的破裂会导致应力波衰减。这时, 应力沿试件长度不再呈线性分布, 而是沿试件长度按指数规律衰减<sup>[8]</sup>;

$$\sigma_l = \sigma_0 + \sigma_e e^{-al} \left[ 1 - e^{-al} \frac{\sigma_1 - \sigma_l}{\sigma_0} \right] \quad (8)$$

岩石试件中应力沿长度线性分布与应力按指数规律衰减的比较如图(四)所示。

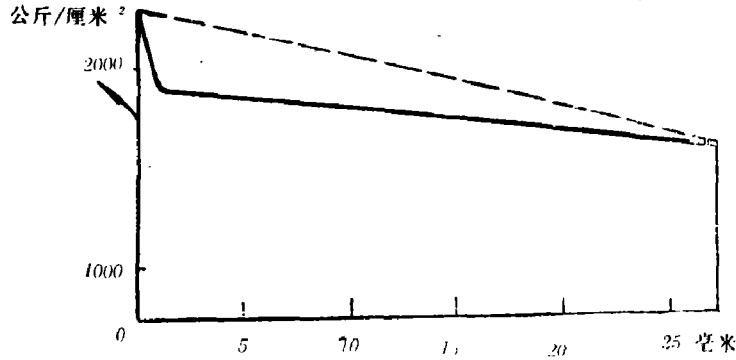


图4  $l/d=2$ 的砂岩试件,应力沿试件长度线性分布(用“---”所示)与由于破裂传播应力沿试件长度呈指数衰减(用“——”所示)的比较

由于破裂传播引起应力波的衰减,试件中点的真实应力往往比按线性分布的假设所求得的数值低。所以,根据应力沿试件线性分布的假设,所求得的岩石动态破裂强度会偏高。在实验结果的分析中,必须考虑裂纹的扩展和传播引起的应力波衰减效应,进行修正。这一点, Hakalehto<sup>[9]</sup>和 Lindholm<sup>[10]</sup>在他们的报告中都曾明确地指出过。鉴于这种修正的必要性,本文所给出的结果,都根据岩石中破裂传播所引起的应力波衰减效应进行了修正。

## 实验结果

由示波器记录下来的入射、反射和透射的应变波形如图(五)所示。由于实验过程中波导杆始终保持弹性,由应变波形就能换算成岩石试件两个端面的应力。根据文献[8],从公式(8)就能求得岩石试件中的应力分布。岩石试件中点的应变波形如图(六)所示。由此,就能作出岩石试件的动态应力应变曲线。

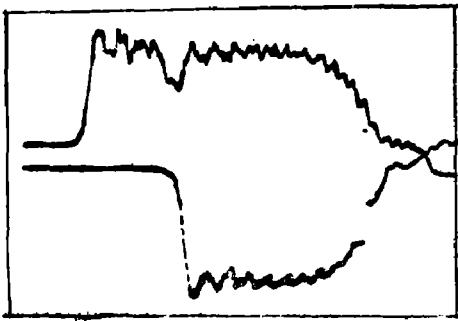


图5 示波器记录下来的入射、反射和透射应变波形

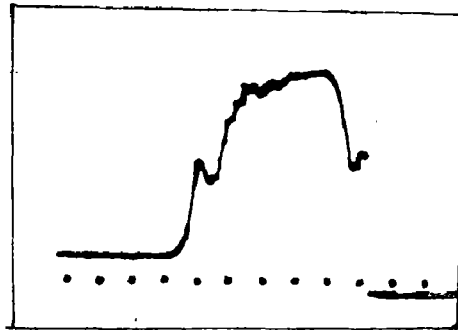


图6 示波器记录下来的试件中点的应变波形

两种岩石的动态与静态的应力应变曲线分别如图（七）、图（八）所示。

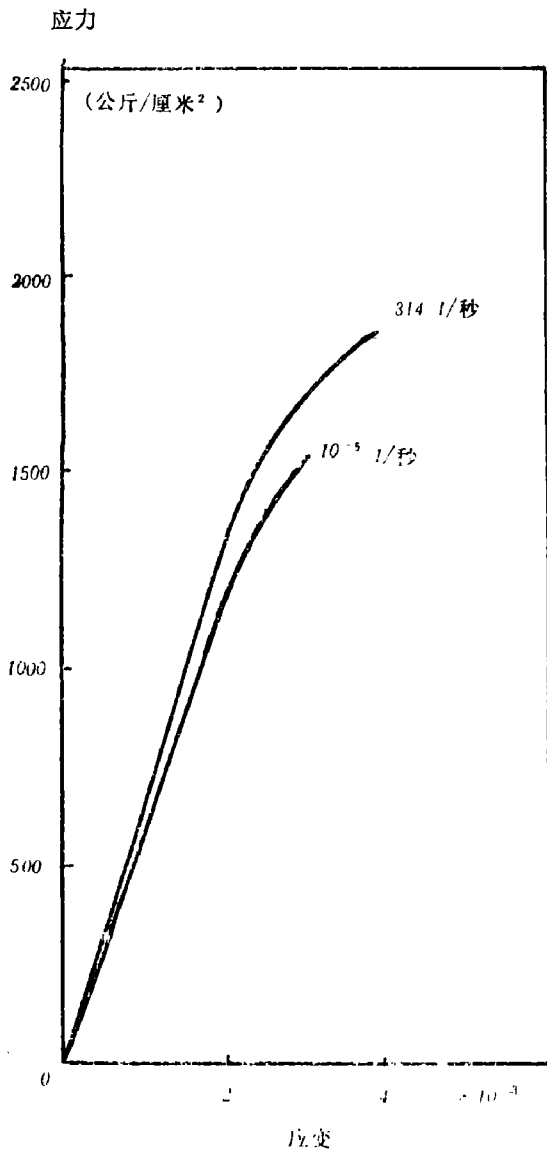


图7  $1/d=2$  的砂岩试件, 动态的与静态的应力应变曲线的比较

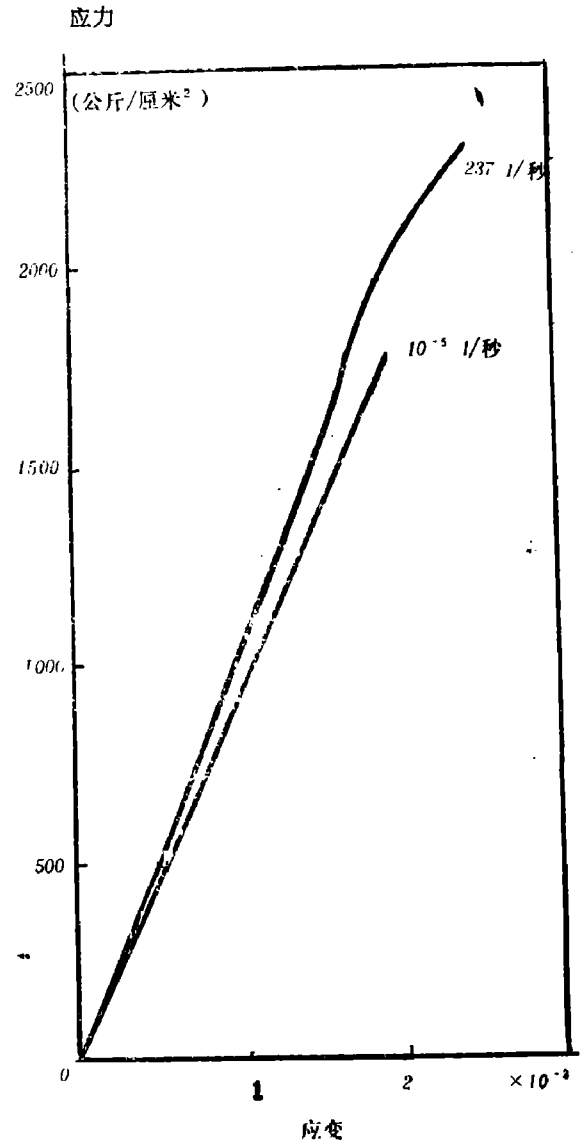


图8  $1/d=1$  的石灰岩试件动态的与静态的应力应变曲线的比较

由岩石的静态压缩试验得到灰色砂岩、石灰岩两种岩石的静态压缩模量与破裂强度如下(应变率约 $10^{-5}$  1/秒)：

岩石种类	测量项目	压缩模量 (kg/cm <sup>2</sup> )	破裂强度 (kg/cm <sup>2</sup> )
灰色砂岩		$5.6 \times 10^6$	1440
石灰岩		$9.0 \times 10^6$	1780

两种岩石的动态压缩模量与破裂强度如下 (应变率  $2 \times 10^2 \sim 4 \times 10^2$  1/秒) :

岩石种类	测量项目	动态压缩模量(kg/cm <sup>2</sup> )	动态破裂强度(kg/cm <sup>2</sup> )
灰色砂岩		$5.9 \times 10^5$	1710
石灰岩		$9.2 \times 10^5$	2230

## 讨论与结论

1. 霍布金生压力杆实验中许多研究者都采用了试件中应力线性分布的假设。Christenson<sup>[1]</sup>曾通过数值计算论证了短试件中的应力分布是线性的。这对于铜、铝等金属材料的短试件来说,无疑是正确的。但对于岩石试件,当入射的应力波幅值超过岩石短试件的初始破裂应力时,试件中的应力分布在通过数次反射达到均匀化之前,由于裂纹的扩展与传播,短试件的材料介质已不满足连续、均匀和各向同性的假设,连续介质的特征线理论已不能运用了。此时,再用连续介质力学的特征线理论来论证应力线性分布的假设,已实属谬误。在我们的实验中,考虑到岩石试件由于破裂传播引起应力幅值衰减,由电子计算机计算得到的岩石短试件的应力分布,如图(四)所示。很明显,它不再呈线性分布了。所以,按应力线性分布的假设来计算岩石的动态破裂强度,往往会偏高。对于我们所测试的岩石试件,约偏高15%左右。所以,用霍布金生压力杆来测量岩石的动态破裂强度,必须考虑试件中破裂传播引起应力波幅值衰减的影响,进行修正。

2. 由于端面摩擦的影响,采用不同长径比的岩石试件,往往会得到不同的动态破裂强度。例如对于灰色砂岩,  $l/d = 1$  的试件的动态破裂强度比  $l/d = 2$  的试件约高14%。

对于长径比小的试件,动态破裂强度相对地比较高。其主要原因是试件端面的摩擦力所致。由于摩擦力是径向剪力,作用于试件上,相当于在试件上加了一对夹紧力。径向剪力在试件上造成了三维应力状态,破坏了一维应力的理想条件。在这种情况下,破裂的成核和传播受到了向内夹紧力的障碍。这些影响都倾向于增加试件能承受的最大载荷,显示了动态破裂强度的增加。

为了在试验结果中消除端面摩擦的影响,常常采用在试件端面上涂润滑剂,例如硫化钼之类,以减少摩擦。再者,合理地选择试件的长径比,选用  $l/d > 1.33$ ,  $l/d \approx 1.5$  一般就能消除端面摩擦的影响<sup>[1][12]</sup>。

3. 惯性力的影响。试件在动态加载时,由于存在应变加速度  $\ddot{\epsilon}$ , 试件中会出现纵向的与横向的惯性力作用。惯性力<sup>[13][14]</sup>表示为:

$$\sigma_m = \rho_s \left( \frac{1}{6} l^2 - \frac{1}{2} a^2 v_s^2 \right) \ddot{\epsilon} \quad (9)$$

式中,  $\rho_s$  为短试件材料的密度;  $l$  为短试件的长度;  $a$  为短试件的半径;  $v_s$  为短试件材料的泊桑比。

(9) 式中括号内第一项为纵向惯性,第二项为横向惯性。纵向惯性的存在,使得破裂传播的加速运动要克服惯性,会提高动态破裂强度。由于横向惯性的存在,动态应力应变曲

线会变成窄带形的区域<sup>[1][10]</sup>。

为了消除惯性影响，一种办法是适当地选择长径比，使 $l/a = \sqrt{3} v_s$ 。于是 $\sigma_m = 0$ 。但对于岩石试件来说， $v_s$ 的范围在0.15~0.3之间，即 $l/a$ 要在0.26~0.5之间。但试件这样短，端面摩擦的影响就显著增加，所以这个办法对岩石这样摩擦系数比较大的材料通常是行不通的。

另一方面，从试件的平均应变率的公式 $\dot{\epsilon} = \frac{C_0}{l_0} (\dot{\epsilon}_l - \dot{\epsilon}_R - \dot{\epsilon}_T)$ ，可知 $\ddot{\epsilon} = \frac{C_0}{l_0} (\ddot{\epsilon}_l - \ddot{\epsilon}_R - \ddot{\epsilon}_T)$ 。在应变波形的水平段， $\dot{\epsilon}_l = \dot{\epsilon}_R = 0$ 。惯性力自然就消失。因此，实验数据从应变波形的水平段取值，是避免惯性影响的一个较为可靠的办法。

4. 应变率的影响。实验结果表明，岩石的动态破裂强度（ $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^2 \sim 4 \times 10^2$  1/秒）比静态破裂强度（ $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$  1/秒）提高约20%。应变率对动态破裂强度的影响，可以表示成为下列公式<sup>[15]</sup>：

$$\dot{\epsilon} = K \cdot N(\sigma) \cdot C \cdot v(\sigma)$$

这里， $N(\sigma)$ 是破裂核的数目。 $v(\sigma)$ 是破裂传播速度。 $C$ 是裂纹的平均长度。 $K$ 是方位常数。

增加应变率意味着增加破裂核的数目 $N$ ，或增加破裂传播速度 $v$ 。这就意味着需要更高的破裂应力，也就是提高了动态破裂强度。应变率增加一个量级，动态破裂强度对玄武岩提高2.15%，对花岗岩提高2.4%。

不仅应力，而且破裂的有效平面能动态也比静态高。这是因为动态破裂时表面加速分离需要较大的能量。并且，动态破裂过程中产生的微小子波在边界反射也带走了部分能量。然而，并不是所有的岩石都具有这样的特性。例如，Solenhofer石灰岩的破裂强度与应变率的关系<sup>[1]</sup>，当应变率低于 $2 \times 10^2$  1/秒时，动态破裂强度与静态相比几乎没有什么增加，而从 $3 \times 10^2$  1/秒开始，出现了突然的提高。如图（九）所示。这表明，应变率对破裂强度的影响是反映了岩石的一种特性，不能一般而言，要通过实验来确定。

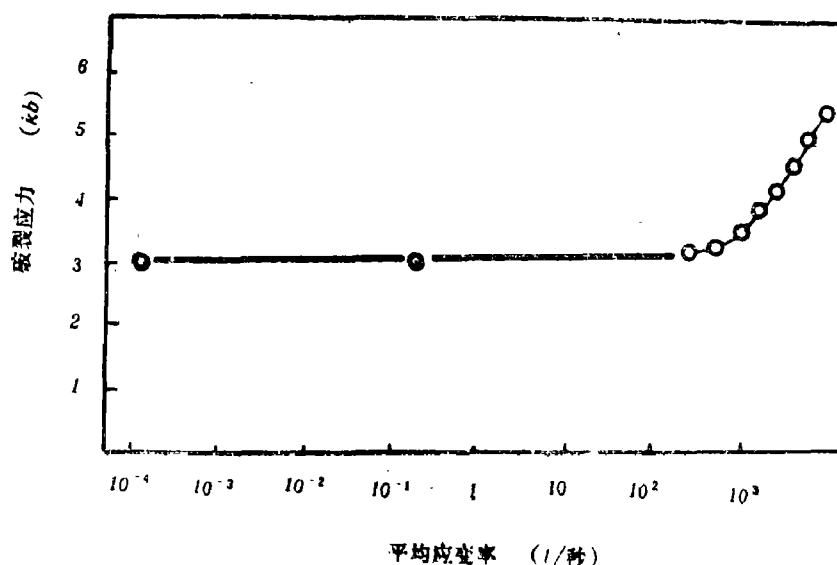


图9 Solenhofer石灰岩的破裂强度对应变率对数的依赖关系

从工程安全角度来说,应变率不太高时(小于 $3 \times 10^2$  1/秒),采用静态破裂强度来代替动态破裂强度是适宜的。这是因为:在此应变率范围内,动态破裂强度与静态相比增加不大(小于20%);而且,动态加载时,岩石介质虽然没有最终破裂,但由于加载应力超过了初始破裂应力,还是出现了大量的裂纹,在载荷消除后,裂纹仍然存在;这样多次加载必然降低强度。所以,从长期使用的安全性来考虑,采用静态破裂强度来进行工程设计是既简便而又可行的。

中国科学院力学研究所研究员郑哲敏同志审阅了本文,谨致谢意。

### 参 考 文 献

- (1) Green, S. J. and Per Kins, K. D., Basic and Applied Rock Mechanics, Tenth Symposium on Rock Mechanics, ch. 2, New York (1972).
- (2) Maiden, C. J., and Green, S. J., "Compressive Strain-rate Tests on Six Selected Materials at Strain-rate from  $10^3$  to  $10^4$  in/in/sec." *J. Appl. Mech.*, **33** (9) (1966).
- (3) 考尔斯基, H., (王仁等译), 固体中应力波, 人民出版社(1958)。
- (4) Davies, R. M., "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", *Phil. Trans. Roy. Soc A*: **240** (1948), 375-457.
- (5) 段祝平等, "高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究——一维杆实验方法及其应用", *力学进展*, **10** (1) (1980), 1-16.
- (6) Conway, H. D. and Jakubowski, M., "Axial Impact of Short Cylindrical Bars", *J. Appl. Mech.*, **36** (1969), 809.
- (7) Conn, A. F., "On the Use of Thin Wafers to Study Dynamic Properties of Metals", *J. Mech. Phys. Solids.*, **13** (5) (1965).
- (8) 章根德, "岩石在动载荷作用下的脆性破裂", *岩土工程学报*, **3** (2) (1981), 43-49。
- (9) Hakalchto, K. D., "The Behaviour of Rock under Impulse Loads", *Acta*, NO. 81 (1969).
- (10) Lindholm, L. M., "The Dynamic Strength and Fracture Properties of Dresser Basalt", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, **11** (5) (1974).
- (11) Christensen, R. J., "Split-Hopkinson Bar Tests on Rock under Confining Pressure", *Exp. Mech.*, **12** (11) (1972).
- (12) Grosvenor, N. E., "Specimen Proportion—Key to Better Compressive Strength Tests", *Min. Eng.*, **14** (11) (1963).
- (13) Davies, E. D. H. and Hunter, S. C., "The Dynamic Compression Testing of Solid by the Method of the Split-Hopkinson Bar", *J. Mech. Phys. Solids.*, **11** (1963).
- (14) Barthoff, C. D. and Kurnes, C. H., "Feasibility of Two-Dimensional Numerical Analysis of the Split-Hopkinson Pressure Bar System", *J. A. P.*, **41** (1) (1974).
- (15) Kumar, A., "The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite" *Geophysics*, **33** (1968)



## DYNAMIC RESPONSE OF ROCK TO IMPULSE LOADS

Zhang Gende

### Abstract

The attenuation of stress wave transmitted through a fractured rock specimen and the decrease of dynamic strength of rock have been found in studying the dynamic behavior of rock by the method of the Split-Hopkinson bar. Taking account of necessary correction, a new method is given for analysing and calculating the dynamic strength of rock from experimental data. In this paper the dynamic strength and dynamic stress-strain curves for sandstone and limestone are also shown. Moreover, a number of factors which influence the dynamic strength are analysed and discussed.