

冲击载荷下岩石的损伤特性分析

贺红亮 Thomas J. Ahren^{a)} Allan M. Rubin^{b)}

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都523信箱 610003)

(^{a)}加州理工学院, 地震实验室, 加利福尼亚, 帕萨迪纳 91125)

(^{b)}普林斯顿大学, 地球科学系, 新泽西, 普林斯顿)

摘要 把岩石类脆性材料受冲击波加载造成的损伤与弹性纵波速度的变化联系起来, 定义了损伤度 D , 并且以辉长岩(Gabbro)和石灰岩(Limestone)为例, 测量了冲击波加载后靶体的损伤度分布。同时对冲击加载后含损伤的辉长岩, 测量了一维准静压下弹性纵波速度的变化和抗压强度, 分析了含损伤材料的静力学行为。

关键词 岩石 冲击波 损伤

中图分类号 O346.5

1 引言

损伤度是描述含损伤材料力学性质的一个重要参量, 许多学者已经提出了各种模型, 把损伤度同材料的宏观力学量和微观物理量联系起来, 并逐渐发展了一门连续介质损伤力学理论^[1~3]。但是在实验上如何定量测量损伤度, 这仍是目前人们普遍关心的问题。对岩石类脆性材料而言, 人们很早就认识到岩石的弹性纵波和剪切波速度是与岩石中的微裂纹相关的^[6,7], 并且已经在理论上和实验中有了一定的工作积累(例如 O'Connell 和 Budiansky^[8]、以及 Hadley^[9]等人的工作), 这些基础工作使得我们有可能把岩石类脆性材料的冲击波损伤同弹性纵波或者剪切波速度联系起来, 探讨实验上测量冲击波损伤的可行性。我们以辉长岩和石灰岩为例, 就冲击波加载下该类材料损伤度的实验测量原理和方法进行了初步探索。

2 实验原理和方法

2.1 损伤度的定义

设含损伤材料的体积模量 K 和剪切模量 G 分别为^[1~3]

$$K = (1 - D)K_0 \quad (1)$$

$$G = (1 - D)G_0 \quad (2)$$

式中 K_0 和 G_0 分别为未损伤材料的体积模量和剪切模量, D 为损伤度。 D 的取值范围是 $0 \leq D \leq 1$, 其中 $D = 0$ 表示材料没有损伤, $D = 1$ 表示材料完全损伤, 已经破裂。

另一方面,材料的弹性纵波速度 c_p 等于

$$c_p = \sqrt{[(K + 4G)/3]/\rho} \quad (3)$$

$$c_p = \sqrt{[K + (4G/3)]/\rho} \quad (3)$$

式中 ρ 为材料密度。如果忽略材料损伤前、后的密度差异,根据(1)、(2)和(3)式,损伤度 D 可以表示为

$$D = 1 - (c_p/c_{p0})^2 \quad (4)$$

式中 c_{p0}, c_p 分别为材料损伤前、后的弹性纵波速度。由于材料损伤前、后的弹性纵波速度可以通过超声波测量得到,因而根据(4)式有可能实现材料损伤度的实验测量。

2.2 弹性纵波速度测量

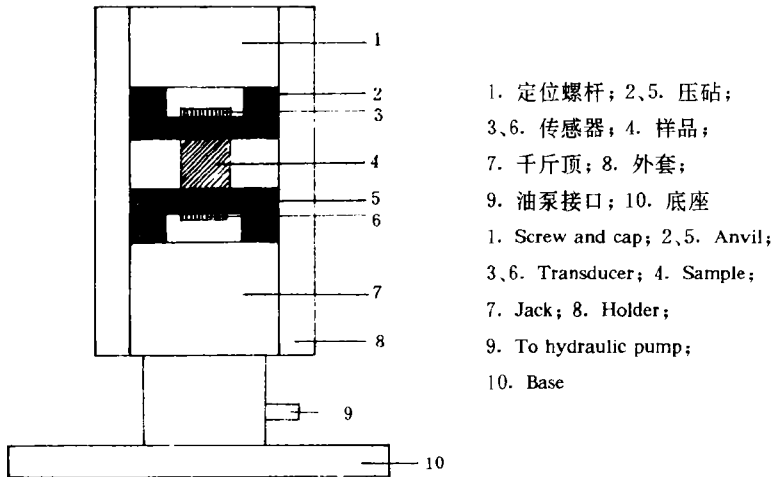
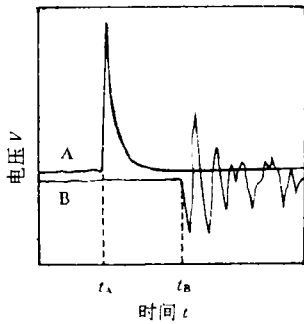


图 1 弹性纵波速度超声测量装置

Fig. 1 Experimental set-up for elastic longitudinal wave velocity measurement



A —— 输入脉冲; B —— 接收信号
A —— Input pulse; B —— Received pulse

图 2 典型测量信号

Fig. 2 Typical oscillogram of elastic velocity measurement

图 1 是我们建立的弹性纵波速度测量装置。冲击波加载后回收的样品经适当地制样,放置于两个压头之间。每一个压头背面贴有一片 PZT 压电陶瓷,其中一片用作超声波发射,另一片用作接收,由示波器记录输入和接收的脉冲信号。实验中使用的 PZT 片振动频率为 1 MHz,属弹性纵波发生器,由一台单脉冲信号源提供输入脉冲,输出电压 150 V。图 2 是典型的示波器记录信号,迹线 A 是输入脉冲信号,迹线 B 是接收端 PZT 片的响应信号。时间差($t_B - t_A$)包含了两个 PZT 片的响应时间,以及弹性纵波在压头和样品中传播所需的时间,故测量时首先测出不放样品时($t_B - t_A$)的时间差(设为 t_0),然后再测出放入样

品后($t_b - t_a$)的时间差(设为 Δ),这样计算的样品中弹性纵波传播速度为

$$c_p = \frac{L}{\Delta - \Delta_0}$$

式中 L 为被测样品的长度。

2.3 冲击波加载实验

选用两种岩石(辉长岩和石灰岩)进行了三维冲击波加载,实验条件是:

- (1) 20 cm×20 cm×20 cm 的辉长岩受直径 3.2 mm,质量 0.143 g 的钢弹丸高速碰撞,碰撞速度 5.2 km/s。
- (2) 20 cm×20 cm×12 cm 的石灰岩受直径 5.6 mm,质量 3.2 g 的钢皮铅心子弹碰撞,弹速 1.2 km/s。

3 实验结果和讨论

3.1 三维冲击波加载下靶体的损伤分布

冲击碰撞后的靶体回收,并清除靶坑内残余的松散碎块,然后从靶体上半部(5 cm)沿碰撞中心切割出一片厚度 1 cm 的薄片(见图 3)。将该薄片进一步切割成尺寸 1 cm×1 cm×1 cm 的小试样,分别测量了 x, y, z 三个方向的弹性纵波速度。图 3 中设 x, y, z 坐标系的原点为碰撞中心,定义被测样品离碰撞中心的距离 $R = (x^2 + z^2)^{1/2}$ 。

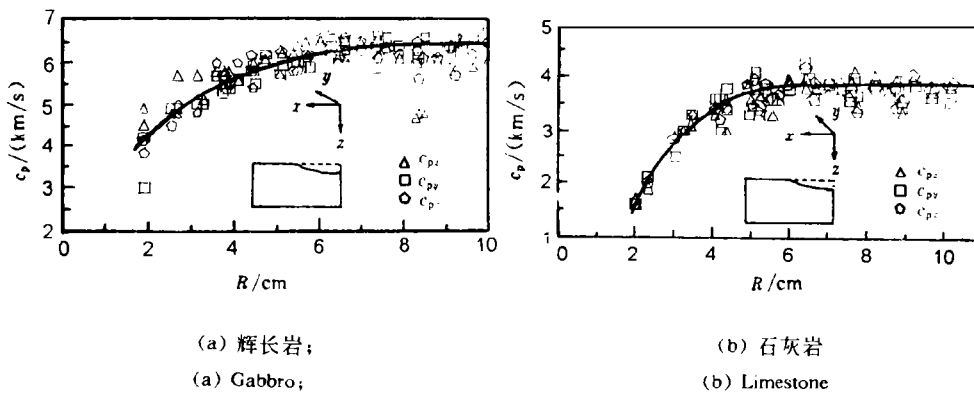


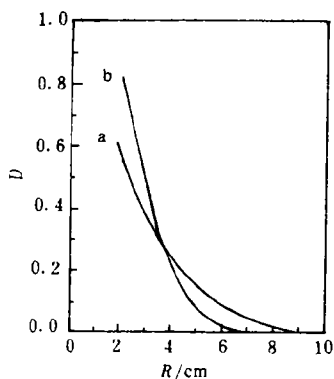
图 3 弹性纵波速度随离碰撞中心距离 R 的变化

c_{px}, c_{py}, c_{pz} 分别代表图中 x, y, z 方向的波速;实线是肉眼光滑曲线

Fig. 3 Plot of all velocity measurements as a function of distance from the crater center

c_{px}, c_{py}, c_{pz} refer to velocities in x, y, z directions, respectively; Hard-wire is smooth curve for naked eye

未受冲击的辉长岩和石灰岩弹性纵波速度各为 $6.7 \pm 0.2 \text{ km/s}$ 和 $3.9 \pm 0.1 \text{ km/s}$ 。从图 3 (a)、(b) 的结果可以看到靠近碰撞中心的区域弹性纵波速度降低很严重,随着离碰撞中心距离的增加,弹性纵波速度逐渐增加,趋近未受冲击材料的速度值。图 3 (a)、(b) 中实线是肉眼光滑拟合的 $c_p - R$ 变化关系,根据 (4) 式我们将实线表示的弹性纵波速度变化换算成损伤度分布,结果见于图 4。靶体损伤度随着碰撞中心距离 R 的增加而减少,其中在半径大约 5 cm 的范围内靶体损伤最严重。



(a) 辉长岩; (b) 石灰岩
(a) Gabbro; (b) Limestone

图 4 损伤度 D 随离碰撞中心距离 R 的分布

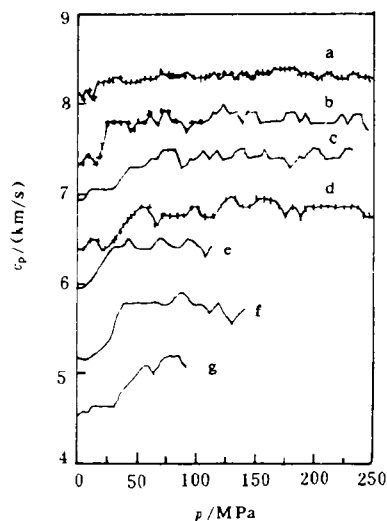
Fig. 4 Damage parameter versus distance from the crater center

3.2 一维准静压下含损伤辉长岩的弹性纵波速度和抗压强度

对切割出来的辉长岩试样(尺寸 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$)用图 1 的装置沿 z 方向加压,进一步探讨了含损伤辉长岩的弹性纵波速度随外加压力的变化关系,以及它们的抗压强度,结果见图 5。图 5 中, D_0 表示加载前的损伤度, $c_p \pm x$ 表示图中的 c_p 值在测量值基础上向上或向下平移了 x , σ_f 表示抗压强度。

未受冲击的辉长岩弹性纵波速度在外加压力作用下略有增加(图 5 曲线 a)。因为岩石是多孔介质,这种现象可以归结为岩石内部的孔隙塌陷和闭合,如早年 Birch^[6] 的实验结果。与未受冲击的试样相比,冲击加载后的含损伤辉长岩,其弹性纵波速度在外加压力

作用下明显地增加,尤其在 $0 \sim 50\text{ MPa}$ 这段压力范围内。更高压力下,速度趋于平稳并逐渐达到未受冲击试样的速度值。冲击波加载脆性材料形成的损伤主要以微裂纹成核、长大为特征,大量微裂纹存在是造成冲击波加载后辉长岩弹性纵波速度下降的主要原因。根据图 5 的实验结果,我们认为:含损伤辉长岩试样的弹性纵波速度在外加压力作用下大幅度增加是由于内部微裂纹重新闭合所致,并且闭合所需的外加压力约为 50 MPa 。



a) 未冲击损伤; $c_p + 1.5$; $\sigma_f = 251\text{ MPa}$
 b) $D_0 = 0.003$; $c_p + 1.0$; $\sigma_f = 245\text{ MPa}$
 c) $D_0 = 0.018$; $c_p + 0.5$; $\sigma_f = 232\text{ MPa}$
 d) $D_0 = 0.067$; c_p ; $\sigma_f = 257\text{ MPa}$
 e) $D_0 = 0.104$; $c_p - 0.5$; $\sigma_f = 114\text{ MPa}$
 f) $D_0 = 0.245$; $c_p - 1.0$; $\sigma_f = 140\text{ MPa}$
 g) $D_0 = 0.190$; $c_p - 1.5$; $\sigma_f = 99\text{ MPa}$

图 5 一维准静压加载下,含损伤辉长岩的弹性纵波速度及抗压强度

Fig. 5 Elastic longitudinal wave velocity as a function of uniaxial stress for shock damaged gabbro

另外,比较具有不同损伤度的辉长岩试样,还可发现 $D_0 > 0.1$ 的试样,尽管外加压力可以使其弹性纵波速度得到部分恢复,但它们的抗压强度已大大下降,实验测得 $D_0 > 0.1$ 的试样抗压强度只有 $100 \sim 150$ MPa,而 $D_0 < 0.1$ 的试样抗压强度为 $230 \sim 260$ MPa,与未受冲击的试样强度相当。

弹性纵波速度以及抗压强度的这些差异反映出可能在 $D_0 > 0.1$ 的试样中,冲击损伤形成的微裂纹已经发展到接近相互贯通的状态,在外加压力作用下它们虽然能得到部分闭合,但由于基体已经被严重裂解,材料的强度很低;而在 $D_0 < 0.1$ 的样品中,冲击波损伤形成的微裂纹基本上还处于成核和长大的初级阶段,在外加压力作用下,它们可以重新闭合,并且材料的弹性纵波速度和抗压强度不受很大影响。

4 结 论

对岩石类脆性材料的冲击波损伤实验测量原理和方法,以及冲击波损伤对材料静力学性质的影响进行了初步研究:

1. 定义了损伤度 $D = 1 - (c_p/c_{p0})^2$, 其中 c_{p0}, c_p 分别为材料损伤前、后的弹性纵波速度。
2. 以辉长岩和石灰岩为例进行了冲击波加载实验,测量了靶体的损伤度分布。
3. 根据一维准静压结果推测冲击波加载在辉长岩中的微裂纹可以在 $0 \sim 50$ MPa 的外加压力下重新闭合,其中损伤度小于 0.1 时,微裂纹重新闭合后弹性纵波速度和抗压强度几乎不受影响;而损伤度大于 0.1 时,弹性纵波速度和抗压强度无法恢复。

参 考 文 献

- 1 Davison L, Stevens A L. Thermomechanical Constitution for Spalling Bodies. *J Appl Phys*, 1973, 44:588~674
- 2 Curran D R, Seaman L, Shockey Dynamic Failure of Solids. *Physics Reports*, 1987, 147(5,6):253~388
- 3 Grady D E, Kipp M E. Dynamic Rock Fragmentation. In: Atkinson B K eds, *Fracture Mechanics of Rock*, San Diego, California: Academic Press. 1987, 429~475
- 4 邢修三. 脆性断裂统计理论. *物理学报*. 1980, 29(6):718~731
- 5 白以龙, 柯孚久, 夏蒙芬. 固体中微裂纹系统演化的基本描述. *力学学报*, 1991, 23(3): 290~298
- 6 Birch F. The Velocity of Compressional Waves in Rock to 10 Kilobars, 1. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(4):1083~1102
- 7 Simmons G. Velocity of Shear Waves in Rocks to 10 Kilobars, 1. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(6): 1123~1130
- 8 O'Connell R J, Budiansky B. Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids. *Journal of Geophysics Research*, 1974, 79(35):5412~5426
- 9 Hadley K. Comparison of Calculated and Observed Crack Densities and Seismic Velocities in Westerly Granite. *Journal of Geophysics Research*. 1976, 81(20):3484~3494

AN ANALYSIS OF SHOCK-INDUCED DAMAGE IN ROCKS

He Hongliang, Thomas J. Ahren^{a)}, Allan M. Rubin^{b)}

(*Laboratory for shock Wave and Detonation Physics Research,
Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengdu, 610003*)

(^{a)}*Lindhurst Laboratory of Experimental Geophysics, Seismological Laboratory, California
Institute of Technology, Pasadena, CA 91125*)

(^{b)}*Department of Geological Sciences, Princeton University, Princeton, New Jersey*)

ABSTRACT A definition of shock damage parameter, $D = 1 - (c_p/c_{p0})^2$, is proposed for rock-like brittle materials, where c_{p0} and c_p are elastic longitudinal wave velocities of unshocked and shocked materials, respectively. Following this definition, damage distributions in shocked Gabbro and Limestone were experimentally measured, in which c_p values were measured by an ultrasonic transmission technique. For shock damaged gabbro, the characteristics of elastic longitudinal wave velocity and compressive strength under quasistatic uniaxial loading are also studied. In all the tested samples (with different initial damage parameter) a large increment of elastic velocities are observed under the stresses ranging from 0 to 50 MPa. We suspect this behaviour is due to a microcracks (induced by the shock loading) re-closing process. After microcracks re-closing, the shocked gabbros with initial damage $D_0 < 0.1$ have nearly the same elastic wave velocities and compressive strengths as the unshocked ones. For the samples with initial damage $D_0 > 0.1$, however, their values are much reduced and could not be rebounded to the intrinsic values.

KEYWORDS Rock, Shock wave, Damage.