

# 关于用反射体法研究岩石的动力学性质

寇绍全 杨根宏

(1986年1月7日收到)

本文简述了用反射体法研究受冲击加载和卸载时岩石力学性质的力学原理和试验方法。分析并确定了有关试验设备及记录仪器的特性参数,如所需记录仪器的高频响应,炮管内的真空度、弹靶碰撞时所允许的最大倾斜角以及试件、反射体、应力探头的最小厚度和直径。

## 一、前言

现场试验和理论分析都说明,压力在几千兆帕斯卡以下,弹性极限以上(即中等压力段)时,岩石的力学性质对爆破及防护工程中应力波的能量吸收及其伴随的衰减效应是至关重要的。然而,其研究工作却开展甚少。

在高压段,如果研究的材料无相变,且无时间有关的效应,则因剪切强度与研究的应力幅值相比可以忽略,被研究的材料可以当成理想流体,被击波压缩后的材料完全处于热力学平衡状态。状态方程常取 Mie - Grüneisen 形式,用实验得到的加载曲线来确定方程中的待定参数。总体说来,理论上比较简单、清楚。

在中压和低压段,孔隙和裂隙的影响突出了,压实以及在力和变形关系图上加载和卸载曲线间有滞回,剪切影响不可忽略,其特性不能用 Mie - Grüneisen 状态方程来描述。这时,除加载曲线外,必须有更多的资料才能给出在  $P$ 、 $V$ 、 $E$  空间描述的状态面。因而,与对高压段性质的研究相比,研究岩石在中等压力下的性质会遇到更多的困难。

六十年代中期起,国际上对多孔材料,弹塑性材料,有相变的材料发生了浓厚的兴趣<sup>(1-5)</sup>,为在中等压力下岩石性质的研究积累了经验。近年来,我国一些单位也相继建立了轻气炮,压缩空气炮,为这段力学性质的研究创造了条件。如何用平板撞击的方法既经济又准确地得到中压段岩石的力学性质成了一个十分关注的问题。本文将就反射体法对这一问题的研究进行分析讨论。

## 二、实验的力学原理

进行平板撞击时,波前为冲击波。研究冲击波时,我们假定:(1)介质的性质和几何条件使整个截面上应力分布是均匀的;(2)平板撞击时为正碰撞,只在一个方向上有变形。因此,截面积不变化。

以上两点在设计炮、弹、靶及测试探头的过程中予以保证。(3) 波前和波后分别存在着热力学平衡。波阵面以常速  $U$  传播。波阵面后一个很薄的区域内应力可以不是常数, 但这个区域必须以同样的速度前进, 其体积保持不变, 即假定为定常击波。

令  $\sigma$  为垂直于波前的压应力,  $E$  为单位质量的内能,  $\rho$  为密度,  $U$ 、 $u$  分别为实验室坐标中的击波速度和质点速度。下标 1、2 分别表示波前、波后的量。则有

$$\rho_1(u_1 - U) = \rho_2(u_2 - U) \quad (1)$$

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \rho_1(u_1 - U)(u_1 - u_2) \quad (2)$$

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_1) \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (3)$$

实验测得其中任意两个未知量, 可得其余三个。实验的目的之一是要得到从初态 1 出发的一切可能的击波跳跃终态的轨迹即 Hugoniot 曲线。由式 (1) 和 (2) 可得

$$u_2 - u_1 = \pm [(\sigma_2 - \sigma_1)(V_1 - V_2)]^{1/2} \quad (4)$$

式中  $V$  代表比容。由 (4) 式可见, 一条  $\sigma - V$  平面上的曲线可以变换成  $\sigma - u$  平面上的两条曲线, 正号为右行击波, 负号为左行击波。

假定波后卸载是等熵的, 此时有特征关系

$$\Delta\sigma = \pm \rho c \Delta u \quad (5)$$

$$dx = cd t \quad (6)$$

或者

$$u_2 - u_1 = \pm \int \frac{1}{\rho c} d\sigma = \pm \int \frac{V}{c} d\sigma \quad (7)$$

(4) 式和 (7) 式建立了  $\sigma - V$  与  $\sigma - u$  两平面之间的变换关系。 $\sigma - u$  平面内, 相应于应力增加的状态变化必然在从初态出发的 Hugoniot 线上, 相应于应力减少的变化必然在从初态出发的卸载绝热线上, 交界面应力和质点速度则相应于两条对应曲线的交点。

### 三、实验方法

反射体法的关键在于充分利用标准材料。标准材料至少有两个特点, (1) 抗压弹性极限高, 在弹性极限以下, 应力变形关系的线性度好。(2) 材料性能稳定。目前可供选择的标准材料有熔融硅、兰宝石、碳化钨等, 其抗压强度分别为 1372.9, 12003.3, 3922.7 MPa。

#### 1. 标准材料的标定

弹与靶用同一种待标定的材料。测弹速和击波速度, 物理量间有关系

$$\begin{cases} \sigma_2 = \rho_0 U u_2 \\ \sigma_2 = -\rho_0 U (u_2 - u_1) \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} \sigma_2 = \frac{1}{2} \rho_0 U u_1 \\ u_2 = \frac{1}{2} u_1 \end{cases}$$

其中  $u_1$  为弹速,  $\sigma_2, u_2$  对应于 Hugoniot 线上一个点。改变弹速, 从而改变  $\sigma_2, u_2$ , 可得整个 Hugoniot 曲线。

## 2. 岩样 Hugoniot 加载曲线的测定

有两种可供选择的方法。

(1) 测应力和弹速。试件作靶板, 应力探头装在弹的头部。在图 1 中, 1—2 为已知的应力探头的 Hugoniot 曲线,  $u_1$  为弹速,  $\sigma_2$  为测得的应力。改变  $u_1$ , 则改变  $\sigma_2, u_2$ , 从而可得整个 Hugoniot 曲线。

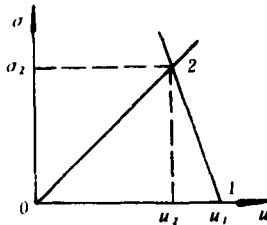


图 1 测应力和弹速确定 Hugoniot 曲线

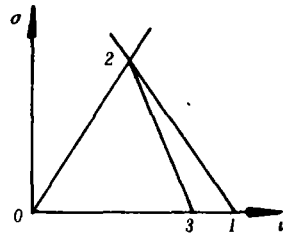


图 2 测自由表面速度确定 Hugoniot 曲线

(2) 测自由表面速度。试件作弹, 靶用标准材料。其原理如图 2。图中 2—3 和 0—2 线的斜率由已知的标准材料的性质确定,  $u_3$  为测得的自由面速度, 由此可以定出岩石 Hugoniot 曲线上的一个点 (2 点)。1 为初始状态, 由弹速确定。

## 3. 岩样 Hugoniot 弹性极限的测定

在相应于 Hugoniot 弹性极限的应力时, 岩石可压缩性会突变, 在  $\sigma-u$  平面上曲线会出现尖拐, 高于这个应力的应力波会诱发弹性前驱波。通过测自由表面速度  $u_3$  和前驱波速度  $U$  来测定 Hugoniot 弹性极限 (HEL)。靶为试件。图 3 中  $\sigma-u$  图上 0—2 线的斜率为  $\rho_0 U$ 。假定自由面上遵循镜面反射规则,  $u_2 = (1/2)u_3$ 。让弹速稍高于达到 Hugoniot 弹性极限的速度 (通过粗估得到), 图中 2—3 线的斜率为  $-\rho_0 U$ , 因而可以确定 2 点。2 点对应于 HEL。

## 4. 卸载曲线的测定

试件作弹, 靶为标准材料, 称为反射体。测反射体背面的自由面速度。其原理如图 4。测得对应于 3、5、7……区的自由面速度后 2、4、6……等点可得。这些点在材料从 2 点开始的卸载绝热线上。换用不同的反射体, 调整弹速, 使卸载的开始应力保持不变, 即可补充卸载线上的点。

如果在反射体的非碰撞面放置应力探头，可测得有应力探头作为反射面的 3、5、7……的应力值，由此也可以得到卸载线。

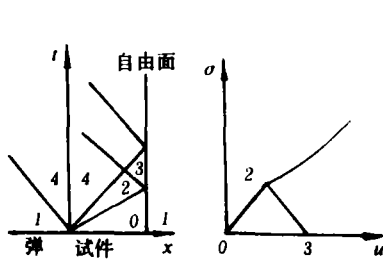


图3 H E L 的测定

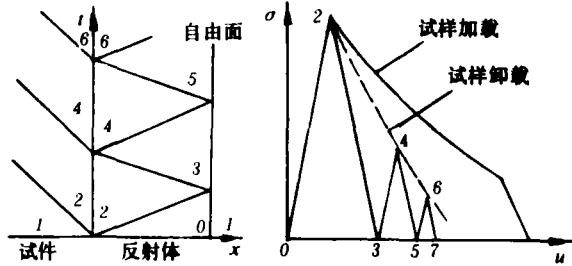


图4 用反射体法测卸载曲线

### 5. 二次击波加载

有时从击波跳跃终态出发的第二次 Hugoniot 加载是必须的。测量二次击波加载的原理如图 5。在图 5 的  $\sigma-u$  图中，应力探头记录得  $\sigma_2, \sigma_4, \sigma_6$  等。利用反射体的性质可得 3、5、7、……的力学参量，即为二次击波加载的 Hugoniot 曲线上的点，其出发点分别为 3、5。

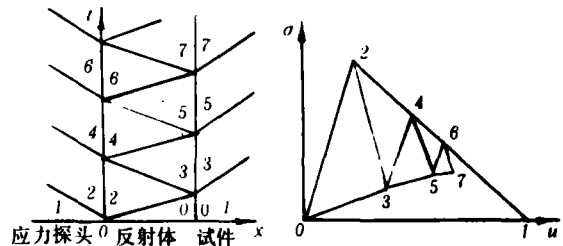


图5 用反射体法测二次击波加载

## 四、试件参数选择及设备参数校核

按照第二部分所简单描述的理论来分析处理试验结果，对测量仪器，试件尺寸及加工精度，实验方法及设备必须有一定要求。要准确地提出这些要求是一件难事。原因是，第一，岩石性质是未知的，第二、有些问题（如斜碰撞）本身还是一个在研究的课题。然而，通过简单分析，为实验准备工作提供必要的的数据，然后在试验过程中不断调整这些要求，是有可能得到满意结果的。

### 1. 记录仪器的高频响应

对于石灰岩、砂岩等颗粒很细的岩石，若颗粒尺寸为  $200 \sim 300 \mu m$ ，其击波厚度约为  $1 mm$  的量级。在这些岩石的完整岩样中，波速约为  $5 mm / \mu s$ 。因此，波的上升时间约为  $0.2 \mu s$ 。要反映上升时间为  $\Delta t$  的波形，仪器的上限频率要满足  $f > 0.35 / \Delta t$ 。可见，要记录上升时间为  $0.2 \mu s$  的波形，高频响应为  $1 MC$  的记录仪器是不够的。由于整个过程持续时间不长，对仪器的低频响应要求不高。试件的平面度，平行度，碰撞倾斜度等会影响波形的上升时间。为减少误差，我们把这些因素引入的上升时间控制到因材料固有性质引起的上升时间同一量级。因而，要求记录仪器的高频响应至少应为  $10 MC$ 。

### 2. 炮管真空度

(1) 考虑空气击波的附加压力对实验精度的影响。由于炮管内有空气，弹在管中运动时会形成空气击波。击波先于炮弹打在靶上，在靶上形成一附加应力，从而影响实验精度。

炮管内的真空度可以达到  $1.33 \sim 0.13 \text{ Pa}$  ( $10^{-2} \sim 10^{-3}$  托)。以真空度为  $1.33 \text{ Pa}$  为例, 取温度为  $300^\circ \text{K}$  (相当于  $27^\circ \text{C}$ ), 相应的分子浓度为  $3.22 \times 10^{16}$  个/ $\text{cm}^3$ , 对应的分子平均自由程为  $4 \sim 5 \text{ mm}$ , 一般来说小于炮管特征尺寸 (如直径  $100 \text{ mm}$ )。因此, 仍旧可以把炮管中的空气当成连续介质, 且遵循理想气体定律。炮弹压缩空气形成击波, 其规律可用方程 (1) — (3) 来描述, 式中的  $\sigma$  代之以压力  $P$ , 且有状态方程

$$E = C_V T \quad (8)$$

$$P = \rho R T \quad (9)$$

其中  $T$  是绝对温度,  $C_V$  为气体的定容比热,  $R$  为气体常数。把击波对靶板的冲击当成一维问题, 由于击波压力相对于靶板的杨氏模量小得很多, 可把靶当刚壁处理。取  $K = C_p / C_V = 1.4$ , 则有

$$\bar{u}_1^2 = 25(\bar{P}_2 - 1)^2 / (42\bar{P}_2 + 7) \quad (10)$$

$$\bar{P}_r = \bar{P}_2(8\bar{P}_2 - 1) / (\bar{P}_2 + 6) \quad (11)$$

其中

$$\bar{u}_1 = u_1 / a_1 \quad \bar{P}_2 = P_2 / P_1 \quad \bar{P}_r = P_r / P_1 \quad (12)$$

$P_r$  为击波在靶板上的反射压力,  $a_1$  为波前声速,  $u_1$  为弹速, 也是空气击波的波后质点速度。从 (10) 式可得

$$\bar{P}_2 = \frac{1}{25} (21\bar{u}_1^2 + 25 + \bar{u}_1 \sqrt{441\bar{u}_1^2 + 1225}) \quad (13)$$

基于物理上的考虑, 略去了根号前的负号。由于理想气体的声速满足关系式

$$a / a_1 = (P / P_1)^{(K-1)/2K} \quad (14)$$

取一个大气压,  $15^\circ \text{C}$  时, 声速为  $340 \text{ m/s}$ , 则压力为  $1.33 \text{ Pa}$  时,  $a_1$  约为  $70 \text{ m/s}$ 。利用式 (11) 和 (13) 可得表 1。从表 1 可以看出, 反射压力与在这种速度下岩石对碰的压力相比约为  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ , 可见, 真空度达  $1.33 \text{ Pa}$  后空气击波在靶板上一次反射所形成的附加压力可以忽略不计。

表 1 弹前击波在靶上的反射压力

$u_1 (\text{m/s})$	$u_1$	$P_r (\text{MPa})$	石灰岩对碰撞时的压力 ( $\text{MPa}$ )
7	0.1	$1.67 \times 10^{-6}$	$4.90 \times 10$
1000	14.3	$3.53 \times 10^{-3}$	$5.88 \times 10^3$
1500	21.4	$7.94 \times 10^{-3}$	$9.81 \times 10^3$

对于靶紧贴炮口, 炮弹出口就打在靶上的情形, 击波在靶板上的反射无疑是可以近似地

当一维处理的。靶紧贴炮口还容易保证碰撞的垂直度。但由于击波速度总大于弹速，击波遇靶后会反射回来再次与靶相遇，从而形成多次反射，使压力迅速增加。消除多次反射的方法是在炮的出口端与靶之间留一段距离，且将靶摆在具有与炮相同真空度的扩散室内。击波出炮口后，碰靶前，柱面稀疏波将从侧向传入。稀疏波在中心汇聚后再反射将使压力进一步降低。当靶离炮口足够远时，击波在碰靶前就可以被稀疏得很弱，或者击波在到达靶时，炮的中心轴附近，一个小区域内仍可用上述办法处理，当波从靶板反射回来，再度经侧向稀疏波稀疏后就变得很弱了。在这些情况下，可以忽略多次反射，从而使上面的估计给出了最大可能的扰动压力。至于炮口与靶板之间的合适距离，既可以通过较细致的理论分析得到，也可以通过试验求得，其要求是既保证炮弹对靶碰撞的垂直度，又保证击波压缩后的气体有足够的扩散。

(2) 由于空气击波打击靶板，靶板要运动。其整体运动距离  $S$  应小于测量仪器的测量所允许的移动范围。击波先于弹打在靶上的时间

$$\Delta t = \frac{l}{u} - \frac{l}{U} \tag{15}$$

$u$  为弹速， $U$  为击波速度， $l$  为弹出发点与靶的距离。击波打在靶上，经过  $\Delta t$  后，靶运动距离为

$$S = \frac{PA}{2m} \left( \frac{1}{u} - \frac{1}{U} \right)^2 l^2 \tag{16}$$

式中  $m$  为靶的质量， $P$  为作用在靶上的压力，其值为入射击波压力加反射击波压力。 $A$  为靶板的迎风面，取为炮管的横截面积。因波前质点速度为零，则有关系式

$$u/U = \frac{2}{K+1} (1 - a_1^2/U^2) \tag{17}$$

当  $u = 1500 \text{ m/s}$ ， $a_1 \approx 70 \text{ m/s}$  时， $U = 1790 \text{ m/s}$ 。设靶重为  $500 \text{ g}$ ， $l$  为  $20 \text{ m}$ ，炮管直径  $100 \text{ mm}$ ，弹速  $1500 \text{ m/s}$ ，代入(16)式可得  $S \approx 0.32 \text{ mm}$ 。

通过上述粗略估计得到的靶板运动距离是偏大的，因为靶在扩散室内，作用在靶上的压力很快会衰减，不会一直以峰压作用在靶上。然而  $0.32 \text{ mm}$  毕竟偏大。如果不允许靶板在击波作用下有整体位移，可将靶板粘结在靶架上。仍旧考虑  $u = 1500 \text{ m/s}$ ，粘结剂需提供  $58.1 \text{ N}$  的力来平衡上述击波的加载。假设靶板厚  $5 \text{ mm}$ ，将靶板的周边柱面与靶架粘结，则粘结剂要承受  $0.04 \text{ MPa}$  的剪应力。这个值是远远小于环氧树脂的强度的。

### 3、对碰撞倾斜度的要求

弹与靶间的倾角虽经严格控制，然而小的倾角势在难免。这种倾角不仅会产生二维流动，违背平面应变的假设，而且在记录上会附加一个反映时间。若波横向掠过传感器的时间与记录系统的上升时间接近，这样的倾角是允许的。

设碰撞倾角  $\alpha$ ，撞击速度为  $u$ ，试件中扰动传播速度为  $U$ ，其阵面与垂直于靶轴的平面的夹角为  $\beta$  (图 6)，则有

$$u/\sin \alpha = U/\sin \beta \tag{18}$$

成立。波掠过传感器所需的时间为

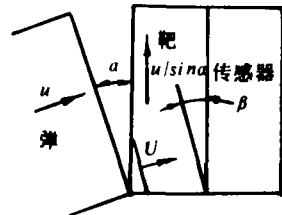


图 6 弹靶斜碰撞示意图

$$\Delta t = \frac{\phi}{U / \sin \beta} \quad (19)$$

$\Delta t$  等于或小于记录仪器的上升时间  $0.035 \mu\text{s}$  (相应于高频响应为  $10 \text{ MC}$ )。令有效测量范围为  $\phi 10 \text{ mm}$ , 则

$$a \leq \sin^{-1} (0.0035 u) \quad (20)$$

$u$  的单位是  $\text{mm} / \mu\text{s}$ 。因此, 不同弹速对倾角要求不同。与几个典型弹速对应的最大允许倾角列入表 2。

表 2 不同弹速所允许的最大倾角

$u (\text{mm} / \mu\text{s})$	0.01	0.1	0.5	1.0	1.5
$a (\text{mrad})$	0.035	0.35	1.75	3.5	5.25

#### 4. 对试件平面度和两端面平行度的要求

我们利用式 (20) 来讨论两平面的不平行度。此时  $u$  应代之以击波速度  $U$ 。用弹性波速  $5 \text{ mm} / \mu\text{s}$  来近似击波速度, 则  $a \leq 17 \text{ mrad}$ 。若直径为  $10 \text{ mm}$ 。则不平行度小于  $0.1 \text{ mm}$  即可。实际上都高取  $1 \sim 2$  个量级, 即允许不平行度为  $0.01 \sim 0.001 \text{ mm}$ 。

表面不平整带来的误差应小于允许的时间误差  $0.035 \mu\text{s}$ , 因而不同弹速对平整度要求不同。例如弹速为  $10$ 、 $100$ 、 $1000 \text{ m/s}$  对应的光洁度应分别为  $0.15$ 、 $1.5$ 、 $15 \mu\text{m}$ 。

从前面的分析还可以看出, 根据现有设备、加工能力, 弹速在  $1000 \text{ m/s}$  以上, 用  $100 \text{ MC}$  高频响应的记录仪器试验精度可提高一个量级。然而, 若弹速小于  $100 \text{ m/s}$  时, 目前的设备及加工精度连与  $10 \text{ MC}$  的记录仪器相当的要求也难以满足。

#### 5. 标定标准材料时试件的厚度

标定标准材料时, 如果用计数器 E 324, 测量的时间精度为  $\pm 0.01 \mu\text{s}$ , 希望得到的波速能有两位有效数字, 则石英玻璃厚度应大于或等于  $5.72 \text{ mm}$ , 兰宝石至少要  $11.1 \text{ mm}$ 。计算时石英玻璃和兰宝石的声速分别取为  $5.72 \text{ mm} / \mu\text{s}$  和  $11.1 \text{ mm} / \mu\text{s}$ , 为省材料弹可以较薄, 以方便加工为宜。

#### 6. 试件、反射体、应力探头厚度及直径的确定

如果计及均方根和, 由于碰撞时的倾斜, 弹、反射体、应力探头的表面不平整度, 以及反射体两个表面的不平行度, 记录仪器的频率响应等八种因素可能引进加载的上升时间约为  $0.099 \mu\text{s}$ 。仍假设岩样中击波厚度为  $1 \text{ mm}$ , 其上升时间约为  $0.2 \mu\text{s}$ 。于是总的上升时间约为  $0.22 \mu\text{s}$ 。记录波形的平台上升时间至少应与波的上升时间相当, 这就要求波反射一个来回至少要  $0.44 \mu\text{s}$ 。如果反射体是石英玻璃, 其厚度应为  $1.26 \text{ mm}$ 。假定在直径为  $10 \text{ mm}$  的圆内保持一维应变, 如果每炮要测 3 个卸载点, 反射体直径应大于或等于  $32.7 \text{ mm}$ 。若按岩石中波速为  $5 \text{ mm} / \mu\text{s}$  计, 试件厚度应大于  $4.4 \text{ mm}$ 。

应力探头要足够长, 要使从另一端反射回来的波干扰记录信号前, 能完成三个卸载点的

测量, 则探头长度应大于或等于  $5.1\text{ mm}$ 。

如果计及击波通过后材料的变形, 试件尺寸还会大些。设岩石的初始密度与变化后的密度比为  $0.95$ , 这相应于  $2.5 \times 10^3\text{ MPa}$  (石灰岩) 左右的压力。考虑卸载声速大于加载声速, 为  $5.5\text{ mm}/\mu\text{s}$ , 则试件厚度应大于  $4.96\text{ mm}$ 。

按 Sandia 实验室的报导<sup>[1]</sup>, 为消除侧向稀疏的影响, 他们取探头的保护环的宽度为探头厚的  $1.5$  倍。照这种取法, 我们的探头直径应为  $40.2\text{ mm}$ 。

表 3 列出了试件、反射体、应力探头的合理尺寸。Sandia 试验室<sup>[1]</sup>曾做过凝灰岩的试

表 3 试件、反射体、应力探头的尺寸

名称	材料	厚度(mm)	直径(mm)
试件	石灰岩或砂石	$\geq 4.96$	$> 32.7 \sim 40.2$
反射体	石英玻璃	$1.26$	$32.7 \sim 40.2$
应力探头	石英晶体	$\geq 5.1$	$> 32.7 \sim 40.2$

件, 其厚为  $4.00\text{ mm}$ 。反射体用石英玻璃, 厚  $1.27\text{ mm}$ 。传感器用石英晶体, 厚  $6.35\text{ mm}$ , 需记更长的时间时, 用到过  $1.27\text{ cm}$ 。

要选直径为  $30 \sim 40\text{ mm}$  的石英晶体是有一定困难的。现在国外采用别的材料如石英玻璃来做保护环就是为着克服这种困难。如果直径小于表 3 中的值, 能记录的卸载点也就减少。

### 参 考 文 献

- [1] Lysne, P. C., Boade, R. R., et al, *J. Appl. Phys.*, **40** (9) (1969), 3786.
- [2] Asay, J. R., *J. Appl. Phys.*, **46** (1) (1975), 1971.
- [3] McQueen, R. G., Marsh, S. P., *J. Appl. Phys.*, **31** (7) (1960), 1253.
- [4] Boade, R. R., *J. Appl. Phys.*, **39** (1968), 5693.
- [5] Lysne, P. C., Halpin, W. J., *J. Appl. Phys.*, **39** (1968), 5489.



**ON THE STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOR  
OF ROCK BY SHOCK  
REVERBERATION TECHNIQUE**

Kou Shaoquan Yang Genhong

**Abstract**

Principles and methods for measuring dynamic behavior of rock under shock loading and unloading by shock reverberation technique are described briefly. Emphasis is on the determination of some characteristic parameters of related experimental facilities and measurement instruments, such as the required high frequency response of electric measurement system, the proper vacuum in the gun tube, the permitted tilt angle during the impact between projectile and target, the least thickness and diameter of the specimen, reverberation and stress transducer.