

# 摆锤冲击荷载下岩石动态荷载位移 全过程曲线的实验技术

唐春安 徐小荷

本文介绍了摆锤冲击压杆测定岩石动态荷载一位移全过程曲线的实验技术。实验中对荷载和位移进行直接测量,其中位移采用非接触式的光电测量方法,经实验验证效果很好。文中给出了在所给装置上获得的部分岩石材料的动态荷载一位移全过程曲线。

所有结果均由微型机直接采样进行处理。

## 一、引言

在钻探、凿岩和爆破等岩体工程中,岩石材料由于动态响应表现出一些与静态不同的性质。研究岩石的动态本构关系及破坏机理,对于岩石力学的发展及工程实用等方面具有十分重要的意义。

在静态方面,对于岩石本构关系的研究,自从1965年 Cook 等人第一次获得岩石的荷载一位移全过程曲线以来<sup>[1]</sup>,人们对于岩石材料在低应变率下的变形特性和强度特性有了较深入的认识。最主要的是认识到了岩石材料在达到极限荷载之后,仍具有一定的残余承载能力。

然而,在动态方面,虽然早在1949年 Kolsky, H. 就提出了分段式霍普金森压杆(缩写为 SHPB)技术<sup>[2]</sup>,用来测定一维应力状态下高速变形时的应力—应变关系曲线,后来又有许多学者对此项技术做了论证、改进和发展。它所测的动态岩石本构关系(仅破坏之前的)都是通过测量入射杆和透射杆上的入射波  $\epsilon_i(t)$ 、反射波  $\epsilon_r(t)$  和透射波  $\epsilon_t(t)$ ,用一维波动理论的基本关系计算而得到的。这些基本关系是<sup>[3]</sup>

$$\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{2c_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r) dt = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_r dt \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{A}{A_1} E \epsilon_s = \frac{A}{A_1} E (\epsilon_i + \epsilon_r) \quad (3)$$

式中,  $E$ —压杆杨氏模量;  $c_0$ —压杆弹性波速;  $A$ —压杆截面积;  $A_1$ —试件初始截面积。

由式(2)和(3)消去时间参数  $t$ , 即得试件的动态应力应变曲线。

但是,由于上式中的  $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$  和  $\epsilon_t(t)$  的测定点在杆中的位置不同,曲线的实际时间

起点是不一样的,因此在记录设备上不能得到一一对应的关系。这给计算带来很大困难,主要是如果各曲线的起点对得不准,计算误差就很大。因此,对试件的动态荷载和变形的直接测量就显得很有意义。

另外,目前对动态情况下岩石本构性质的研究,还局限于岩石破坏前的性质。文献资料中还没有见到有关岩石动态应力应变全过程曲线试验以及在冲击状态下直接对岩石试件的荷载、位移进行测试的报导。

高应变率情况下岩石材料力学性能研究在实验上的主要困难是试验中必须计及试验装置和试件的惯性,即应力波传播效应,以及必须解决微秒量级动态力学量的测试技术问题。对于直接测定冲击荷载下的岩石荷载位移全过程曲线,最大的难点是解决瞬间微量变形(即位移)的测量。本文介绍了在这些方面所做的实验研究工作。

## 二、摆锤冲击压杆(简称PIPB)技术

摆锤冲击压杆技术的原理见图1。其中AB为摆锤,质量20kg,直径100mm。导杆CD长3.3m,直径32mm。

根据一维波动理论,当摆锤以速度 $v_*$ 冲击导杆时,导杆中就有一峰值为 $mv_*$ 的按指数衰减的入射波<sup>[4]</sup>

$$p = mv_* e^{-\frac{t}{M}} \quad (4)$$

传至试件DE。式中

$M$ —摆锤质量;  $m$ —导杆波阻,  $m = \rho a A$ ;  $\rho$ —导杆密度;  $a$ —导杆中的纵波速度;  $A$ —导杆的横截面积。

实际上,入射波有一前沿上升时间,这是因为摆锤与导杆在撞击初始,撞击面只是局部接触,存在局部变形。我们采用文献[5]考虑撞击面有局部变形的入射波电算方法,其理论计算结果绘于图2。

为了同时测定施于试件上的荷载及其产生的变形,在导杆与试样接触的一端,装有一个硬化处理的平端压头,其上贴有12片

电阻应变片以组成惠茨通电桥的两臂用以测定荷载。并在压头上紧靠试件的一侧钻有一小方孔用以测量位移(试件变形),用光电池作为位移测量的传感元件,其测试原理见图3。光源的光线通过透镜变成平行光,并通过压头上的方孔照在光电池上。由于光电池由两片组成差动电路,当压头移动时,通过方孔的平行光使其中一片光电池的受光面积增加,而另一片光

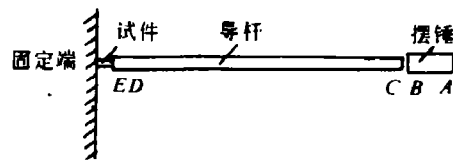


图1. 摆锤冲击压杆原理图

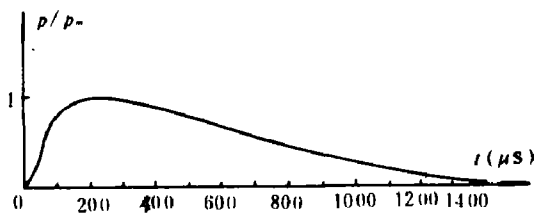


图2 电算入射波形

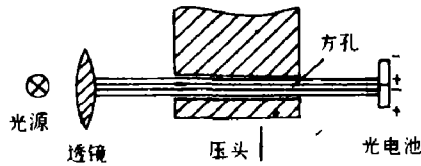


图 3 位移测试原理图

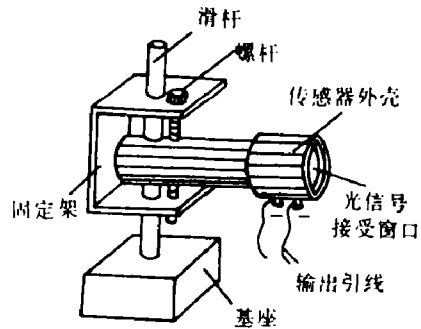


图 4 位移传感器外形图(自制)

电池的受光面积则减少,其输出电压之差为每片光电池电压变化量的两倍。自制的光电位移传感器外形见图 4 所示。传感器可以横放也可以竖放,视实验情况而定。其中滑杆和螺杆起调节位置作用,以适应试件长度的变化。同时其螺距也作标定的标尺之用。传感器的标定,只需旋转螺杆(每圈0.25mm),记下相应的电压值变化量,就可直接得到标定结果。

对于光电池用于瞬态微量位移测量的可靠性,已用导杆处于自由端典型状态下的测试结果作了验证(见图 5)。由一维波动理论知道<sup>[6]</sup>,在自由端情况下,杆端的受力总和为零,而位移是以  $2l/a$  为周期的一个个台阶(此处  $l$  为杆长),台阶的高度取决于入射波的大小。图 5 的测试结果验证了这个事实,也就证实所测得的动态性能数据是有效的。

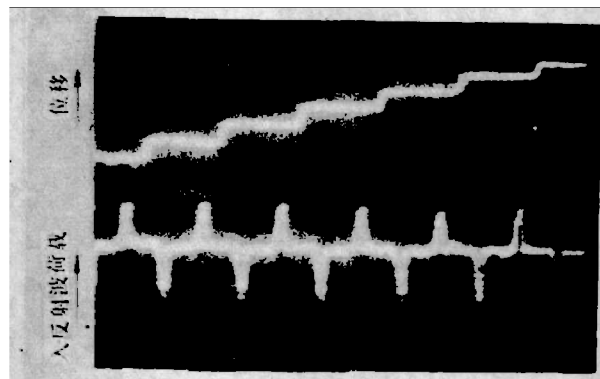


图 5 相应于自由端情况的位移

直接对施加于试件上的荷载及其变形进行测量的优点是,不需要烦琐的计算便可直接获得荷载—位移全过程曲线,也就提高了测试的精度,简化了试验过程。

使用摆锤冲击压杆装置的另一优点是在冲击能量一定的情况下,试件处于固定端(见图 1)比处于分段式霍普金森压杆中间位置能够获得更大的荷载。根据一维波动理论,固定端的总受力为入射波力值的两倍。

此外,需引入两个假设: 1. 变形是一维的; 2. 应力和应变在试件内均

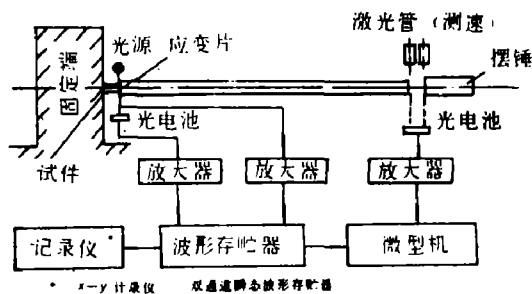


图 6 实验测试系统

匀分布。

在试件高径比大于2时,通常假设1近似满足。对于假设2由于在本装置中试件长度 $l_0$ 与应力脉冲宽度(大于6000mm)相比足够短,因而可近似认为试件处于均匀变形状态。

摆锤冲击压杆试验装置的测试和记录系统如图6所示。荷载、位移信号分别经交流和直流放大器放大以后,同时进入双通道瞬态波形存储器记录(记录速度为每字 $1\mu\text{s}$ ),再由X-Y记录仪慢速画出关系曲线,并由微型机采样进行数据处理。采样和数据处理程序A/DDD由CP/M支持下的CBASIC2和汇编语言混合编写。

### 三、几种岩石材料的动态荷载—位移全过程曲线

用以上介绍的摆锤冲击压杆系统对几种岩石的动态荷载—位移全过程曲线进行了实际测定。图7是石灰岩在冲击下的荷载和位移波形照片,下面波形为荷载,上面波形为位移。可

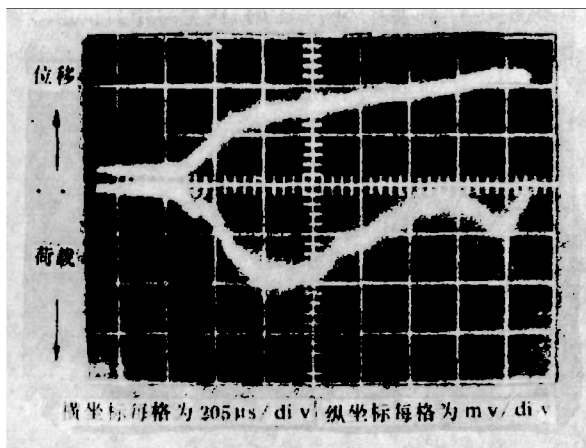


图7 荷载、位移示波记录

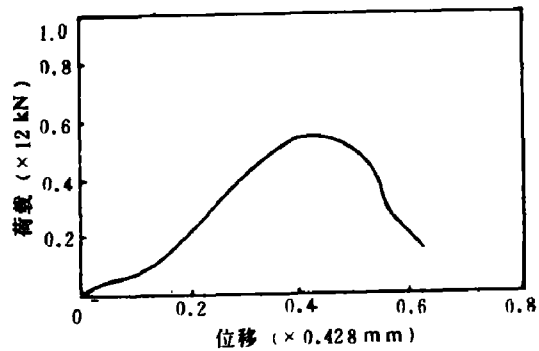


图8 石灰岩的动态荷载—位移全过程曲线

见荷载的上升时间在 $450\mu\text{s}$ 左右。图8是相应的石灰岩的荷载—位移全过程曲线。由荷载达到最大时的位移 $u=0.2\text{mm}$ ,可以粗略地估计其平均应变速率 $\dot{\epsilon}=4.4\text{s}^{-1}$ 。可见其应变速率之高为一般试验机所不可比拟(静载试验时的应变速率一般为 $\dot{\epsilon}=10^{-5}\sim 10^{-7}\text{s}^{-1}$ )。

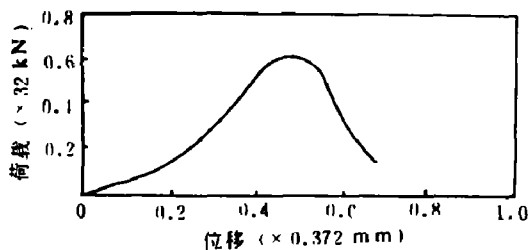


图9 混合岩的动态荷载—位移全过程曲线。

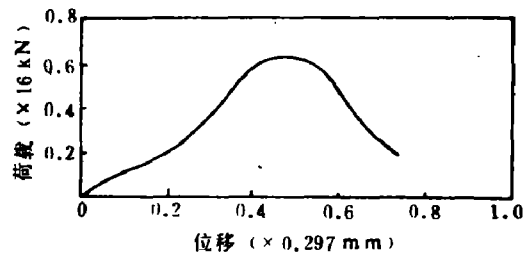


图10 闪长岩的动态荷载—位移全过程曲线

图9、10、11、分别为混合岩、闪长岩和石灰岩的动态荷载—位移全过程曲线。

最后还须指出, 由于我们是将岩石试件放在导杆与固定端之间, 试件不需借助强力粘合剂固定, 而且位移是采用非接触式测量, 使得实验准备和实验过程极为简单, 大大提高了实验研究的工作效率。

#### 四 结 语

随着对静载条件下岩石荷载一位移全过程曲线研究的不断深入,

岩石在动态情况下的荷载一位移全过程曲线的研究, 已是岩石动力学中最基本最关键的课题之一。

摆锤冲击压杆直接测定岩石动态荷载一位移全过程曲线的实验技术, 为这种研究提供了简单易行的测试手段。由于是对荷载和位移直接进行测量, 避免了烦琐的数据计算, 并且位移是采用非接触式的光电测量方法, 频率响应高, 使用可靠方便。可以说, 它是一种很有前途的岩石和其它材料的动态实验技术。

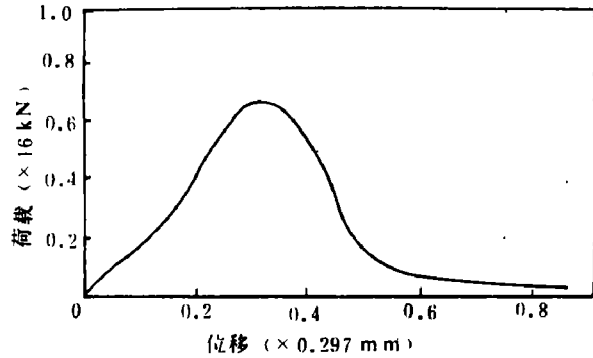


图11 石灰岩的动态荷载一位移全过程曲线

本文的实验准备工作得到了宋守志、王连孝等同志的帮助, 特此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 周思孟、吴玉山、林卓英, 刚性试验机及其对岩石破坏性质的研究, 复杂岩石中的建筑物学术会议论文, (1985).
- [2] 胡时胜、王礼立, 一种用于材料高应变率试验的装置, 振动与冲击, 1 (1986).
- [3] 王礼立、胡时胜, 钛合金 TB-2 在高应变率下的动态应力应变关系, 爆炸与冲击, 5 (1) (1985).
- [4] 徐小荷等著, 冲击凿岩的理论基础与电算方法, 东北工学院出版社, (1986).
- [5] 徐小荷, 撞击凿入系统的数值计算方法, 岩石力学与工程学报, 3 (1) (1984).
- [6] 考尔斯基著, 王仁译, 固体中的应力波, 科学出版社, (1959).

**EXPERIMENTAL TECHNIQUES OF MEASURING  
ROCK COMPLETE LOADING-DISPLACEMENT  
CURVE UNDER PENDULUM IMPACT**

Tang Chunan    Xu Xiaohe

**Abstract**

The experimental techniques of measuring the rock complete loading displacement curve under the pendulum impact are introduced in this paper. In the test, the loading and the displacement are measured directly. the photoelectric method is used for measuring the displacement. The complete loading-displacement curves gotten by us of some rocks are given in this paper.

All the results are treated directly by microcomputer.