

岩石应力计动态匹配试验的新方法 ——一维碰撞试验

张 挺

(中国科学院力学研究所, 北京)

提 要

本文介绍了一种用于岩石应力计动态匹配试验的新方法。它基于霍布金生(Hopkinson)压杆原理。该方法的特点是: 简单易行, 耗费低, 不仅能用于测定应力计的动态匹配系数, 而且能实验测定应力计在岩石介质中的动态测量性能。该方法也可用于实验室测量一维应力波在岩石和混凝土试件中传播时的衰减规律。文中介绍了实验装置的设计原则, 测量系统和试验结果。

一、前 言

对于岩石介质中的动态应力测量来说, 很难设计一种和介质力学性质完全匹配的应力计。一般应力计总是工作在不匹配状态, 结果使介质中的原应力场发生畸变, 导致应力测量值中出现所谓“匹配误差”。为了修正这种应力测量误差及评价应力计在介质中的测量性能, 通常要进行“匹配试验”, 也就是通过实验测定应力计在不同介质中的应力测量误差的分布规律。

设应力计的弹性模量为 E_g , 介质的弹性模量为 E_s , 介质中原应力场强度为 σ_0 , 埋设后的应力计的测量值为 σ_t , 定义匹配系数为

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \quad (1)$$

匹配试验的目的是测定 $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = f\left(\frac{E_g}{E_s}\right)$ 关系。

国内外很多研究人员对应力计埋设在无限介质中由于力学性质不匹配而产生的静态匹配误差进行了理论分析和实验研究^[1-3], 并获得了结论性意见。但对于应力计埋设在岩石(或固体)介质中的动态测量性能的评价和分析, 目前在理论上和实验研究方面都还没有完全解决。本文提出的一维碰撞试验是实验研究的一个初步尝试。作者认为, 该方法试验装置简便、经济, 在技术上容易实现, 具有一定特点。它不仅能获得应力计在岩石介质中的动态匹配性能资料, 而且还能用来在实验室测定一维应力波在岩石、混凝土材料中传播时的衰减规律。

二、原 理

图1为霍布金生压杆试验装置简图。在一维应力条件下,对于两根相同材料杆的弹性碰撞而言,下列关系成立:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho c v \quad (2)$$

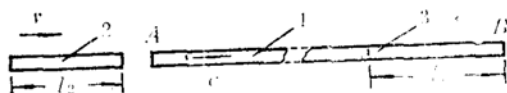


图1 霍布金生压杆试验装置简图(单位: mm)

1—试样; 2—撞击杆; 3—测量断面

$$\sigma = E_d e \quad (3)$$

$$E_d = \rho c^2 \quad (4)$$

式中 ρ , c 分别为杆材料的密度和声速, E_d 为动态弹性模量。 ρ , c 可以通过所述的试验测定。因此, 试件中的应力强度可以利用不同的撞击速度 v 来进行控制。

应力波的波长或持续时间 T , 决定于撞击杆的杆长 l_2 和测量断面距试件自由端 B 的距离 l_i (图1)。

$$T = 2l_2/c \quad (l_i > l_2 \text{ 时}) \quad (5)$$

$$T = 2l_i/c \quad (l_i < l_2 \text{ 时}) \quad (6)$$

综上所述, 在一维碰撞试验中, 应力幅值和持续时间都是可以控制的, 在碰撞对心良好、实现完全弹性碰撞的条件下, 通过实验测定的 ρ , c , v 值可以直接计算杆中的真实应力值。在上述理想条件不成立时, 可以通过该断面的纵向应变的测量值 e_i 以及材料的动态弹模 E_d 而获得该断面的“真实”应力值 σ_{ti} 。

采用不同性质的材料制作试件, 并在试件中埋设应力计, 利用一组一维碰撞试验获得的试件中的“真实”应力 σ_{0i} 和应力计的应力测量值 σ_{ti} , 就能获得动态匹配系数

$$\alpha = \frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{0i}} = f\left(\frac{E_g}{E_s}\right)$$

利用一维应力杆表面粘贴的电阻应变片可以测量杆中的“真实”应力历史 $\sigma_0(t)$, 而应力计的输出响应 $\sigma_i(t)$ 是埋设在介质中同一断面的应力计对 $\sigma_0(t)$ 的响应。通过两个波形的对比(或分析、计算)可以评价应力计埋设在介质中的动态测量性能。

三、测量系统及方案设计

为了获得动态匹配系数曲线 $\alpha = f\left(\frac{E_d}{E_s}\right)$ (或经验公式) 以及评价应力计在介质中的动态测量性能。实验中需要测量的参数是: ρ , c (从而获得介质的动态弹模 $E_d = \rho c^2$), $\varepsilon_0(t)$ (由它获得 $\sigma_0(t) = E_d \varepsilon_0(t)$) 及 $\sigma_t(t)$ 。因此, 该试验装置的测量系统主要由应变计测量系统和应力计测量系统组成。为了同时测定应力波在试件材料中传播时的衰减规律, 在试件的四个不同断面分别埋设了应力计, 并在对应断面的表面粘贴了电阻应变计。利用不同断面的应力计或应变计的输出波形记录可以同时测量应力波在杆中传播的波速 c 。

图2为一维碰撞试验的测量系统图。试验用的应力计为作者研制的压电式应力计^[4,5]它的响应时间小于 $7\mu s$, 测量仪器为FDH-4型电荷放大器(通频带为 $0.3\text{Hz}—100\text{kHz}$)。应变计测量系统采用笔者研制的超动态应变计^[6](工作频带为 $10\text{Hz}—1\text{MHz}$)。记录设备为TCJ-2000A型双通道瞬态记录仪。

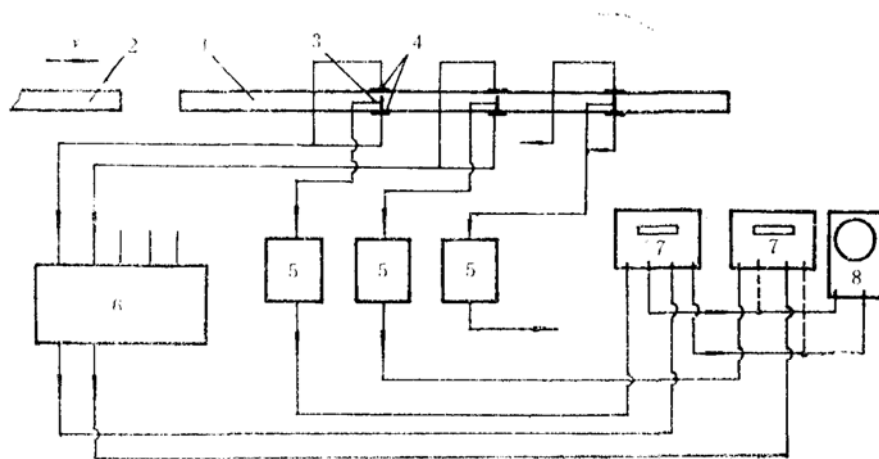


图2 一维碰撞试验测量系统图

1——试件; 2——撞击杆; 3——应力计; 4——应变片; 5——电荷放大器;
6——多通道动态应变计; 7——双通道瞬态记录仪; 8——阴极射线示波器

试验装置及测量系统的设计要点是:

1. 试件采用不同配方的薄胶泥, 即加不同填料的混凝土浇筑而成。考虑到一维应力条件的实现和加工的方便, 以及消除边缘效应对应力计测量结果的影响等因素, 试件被设计成 $100 \times 100 \times 3500\text{mm}$ 的方截面细长杆(图3)。制作过程中, 应确保试件平直、均匀、密实(不允许含有气泡、气孔), 撞击杆和试件碰撞端面平整并垂直于杆的轴线。模具设计应考虑上述要求, 采用钢板模或加固的木模。试件的相应断面, 应预留埋设应力计的孔。

2. 为了检验应力计在固体介质中的动态测量性能, 外载荷的波长应考虑到应力计自身固有的响应时间, 使之在载荷持续期内能呈现完整的响应。应力计的二次仪表和记录器的工作频带, 应优于应力计自身的工作频带(或它的固有频率), 以免测量仪表的频率特性所产生的差被引入测量结果中。

3. 可采用外力加速撞击杆的加载方式, 使撞击杆在获得一定的速度后再撞击试件。加载装置应保证撞击端实现平面撞击条件。撞击杆和试件的长度设计, 应根据所要求的波长用式(5)或(6)估算。

4. 试验装置设计应保证: ①实现平面撞击条件且撞击对心良好。②试件安置时应避免受弯矩作用, 甚至产生弯曲变形, 以致在受撞击后的试件中产生不必要的弯曲波而影响了测量结果的精度。考虑到端部横向效应和可能出现的撞击偏心对测量结果的影响, 应该将应力计埋设在距离撞击端5—10倍试件直径或最大横向尺寸以远处为好。

5. 考虑到薄胶泥材料的抗拉强度较低, 在冲击载荷幅值大于材料抗拉强度、而试件长度等于或大于应力波波长时, 在自由端反射形成的拉伸波可能导致试件破坏, 可在试件自由端安置一根可自由飞行的波导杆以卸去拉伸载荷。

四、测量实例及试验结果

图3为试验装置布置图。图4(a), (b)分别为应力计测量系统图和应变计测量系统图。

试验所用试件尺寸为 $100 \times 100 \times 3500$ mm。试件材料配方重量比为: 500#水泥: 河砂(过筛): 水 = 22:33:8。

为了防止试件在拆模和吊装时由于受力不均, 以及试件自重的作用可能断裂或出现裂

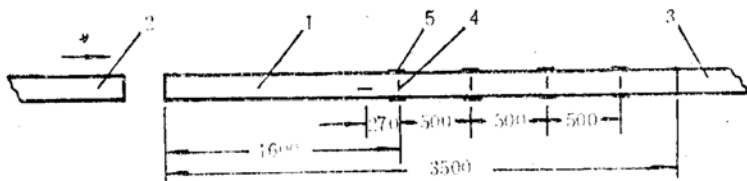


图3 一维碰撞试验装置布置图(单位mm)

1——试件; 2——撞击杆; 3——波导杆; 4——应力计; 5——应变片

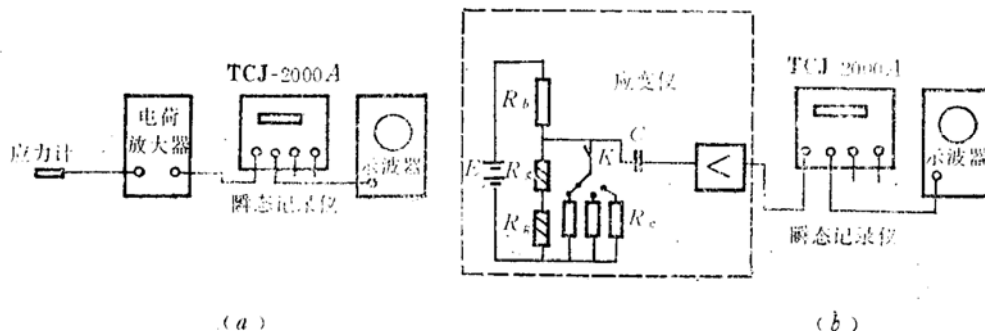


图4 测量系统图

(a) 应力计测量系统图 (b) 应变计测量系统图

纹, 在试件内距杆壁5 mm处配置了一圈由10号和8号铅丝制作的网, 其截面积与试件截面积之比为1:177。

试件密度为 2.29 g/cm^3 , 声速为 3516 m/s , 动态弹模为 $2.89 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

试验中采用了钢锤撞击和杆-杆撞击两种加载方式。采用后一种加载方式时, 在试件自由端增设了波导杆。图5和图6分别为锤撞击和杆撞击时, 采用应力计测量的试件中不同断面

的应力波波形记录。图7是采用应力计和应变计测量的杆中同一断面上的应力波波形。

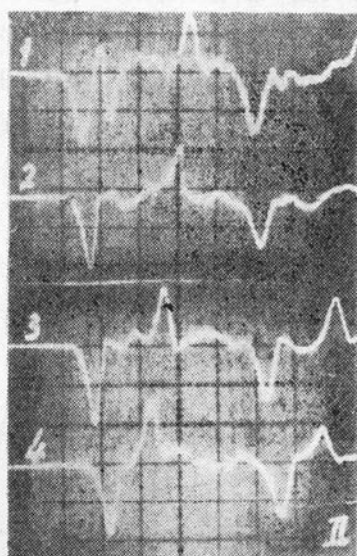


图5 锤撞击时试件中的应力波形(200μs/格)

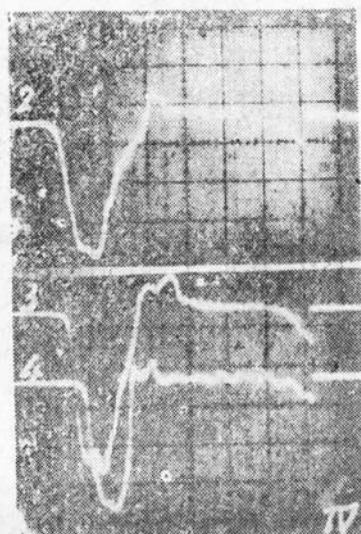


图6 杆撞击时试件中的应力波形(200μs/格)

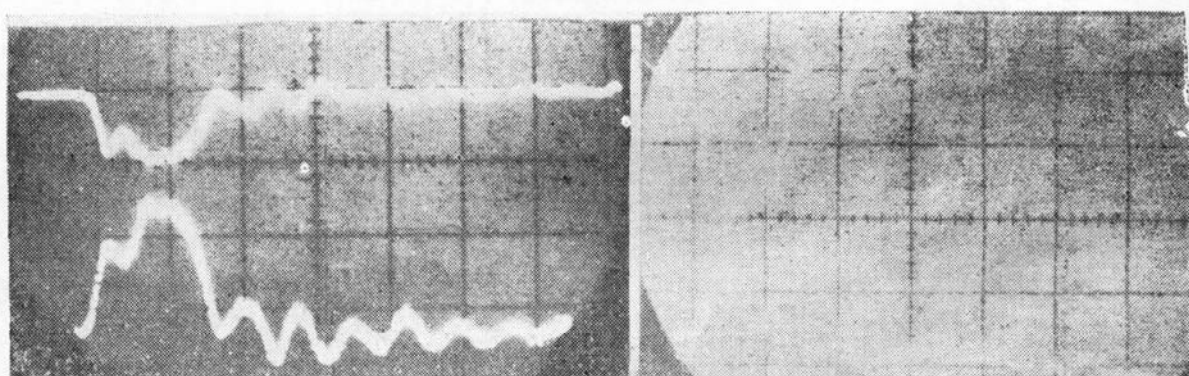


图7 应力计和应变计测量的同一断面应力波形(200μs/格)

由于试件和撞击杆端面的加工质量以及撞击偏心等因素的影响和试验条件的限制,较难实现理想碰撞条件。测量结果反映出载荷不甚理想,但对于试验中采用的应力计和它的动态匹配试验来说仍能满足试验要求。

表1列出了利用碰撞试验获得的应力计在该材料中的某一组匹配系数实验值。匹配系数的平均值为: $\bar{\alpha} = 1.743$

根据静态匹配试验获得的经验公式^[4,5]为

$$\alpha = 1.38 + 0.151e - 0.012e^2 \pm 0.165$$

式中 $e = E_g/E_s$, 对于所述材料, $e = \frac{E_g}{E_s} = \frac{1.25 \times 10^{11} \text{ Pa}}{2.89 \times 10^{10} \text{ Pa}} = 4.32$, 故由经验公式计算的 α 值为: $\alpha_e = 1.808 \pm 0.165$ 。可见动态试验实测的 α 值落在经验公式的误差带内。正如文献[3]中分析的结果一样,当载荷的波长远大于应力计在波传播方向上的特征尺寸时,可视为准静态问题处理。

表2列出了同一组应力计的应力测量值经修正后的结果与对应的应变计测量系统的测量结果的对比。

表1

一维碰撞试验测定的匹配系数

序号	应变计系统测量的杆中应力 $\sigma_0 (\times 10^5 \text{Pa})$	应力计电荷输出 Q_t (pC)	应力计静单轴应力灵敏度 $s_0 (\times 10^{-5} \text{pC/Pa})$	应力计测量的应力值 $\sigma_t = Q_t/s_0 (\times 10^5 \text{Pa})$	匹配系数 $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_0}$
33 ₍₁₎	20.70	954.5	26.64	35.83	1.731
33 ₍₂₎	48.90	2303.3	26.64	86.45	1.768
33 ₍₃₎	37.59	1727.3	26.64	64.84	1.724
33 ₍₄₎	38.94	1818.1	26.64	68.25	1.753
33 ₍₅₎	10.24	500.0	26.64	17.82	1.740

注: 表中 s_0 是应力计采用机械加载标定的灵敏度

表2

应力计系统、应变计系统测量结果对比

序号	33 ₍₁₎	33 ₍₂₎	33 ₍₃₎	33 ₍₄₎	33 ₍₅₎
应力计测量值 $\sigma_\sigma (\times 10^5 \text{Pa})$	19.82	47.82	35.87	37.75	9.85
应变计测量值 $\sigma_\epsilon (\times 10^5 \text{Pa})$	21.23	49.99	38.49	39.82	10.45
相对误差 $\frac{\sigma_\sigma - \sigma_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \times 100 (\%)$	-6.6	-4.3	-6.8	-5.2	-6.0

本试验中, 在试件的不同断面埋设了几个应力计, 在进行动态匹配试验的同时还测定了应力波在该介质中传播时的衰减规律(一维应力条件)。从所进行的有限的试验中, 可以观察到, 一维杆中应力波传播的衰减规律呈指数衰减型, 即

$$\sigma_i/\sigma_0 = e^{-\beta l_i}$$

式中 σ_0 为撞击端初始输入应力; σ_i 为距撞击端距离为 l_i 处的端面上的应力; β 为系数。

对于上述材料制成的1#试件($100 \times 100 \times 3500 \text{ mm}$), 试验实测获得的衰减规律为^[4]

$$\sigma_i/\sigma_0 = e^{-3.66 \times 10^{-5} l_i}$$

二、结 论

上述试验结果虽然仅取自一种典型材料, 但根据文献[5]的分析, 并和试验所用的应力计的静态匹配试验结果对比^[4,5], 可以得到下列结论:

这种试验方法可以推广作为一种较简便可行的岩石应力计动态性能试验方法。它不仅可用来测定应力计的动态匹配系数, 而且可以实验鉴定应力计埋设在固体介质中的动态测量性能。该方法的特点是: ①装置简单, 投资少。若进一步改进试件制作工艺, 确保撞击杆和

试件的加工要求,例如采用钢板模浇铸试件并在撞击端铸入一块金属板以改善杆件端面的垂直度和平整度,实现平面碰撞条件的话,在试件中可产生上升时间很短(小于 $10\mu\text{s}$)的应力脉冲,而且其幅值和波长都易于调整。②采用杆件纵向应变测量方法可以较精确地测定杆中的应力波(包括波形和幅值),并以此作为输入函数来鉴定应力计埋设在介质中的动态性能。它不仅能鉴定加载时的动态性能,同时也可鉴定卸载时的动态性能,这点对于岩石类材料来说是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] 中国人民解放军司令部,非弹性介质压力测量(译文集),1974.
- [2] Loh, Y. C., Internal Stress Gauge for Cementitious Materials, *Proc. S. E. S. A.*, **XI**, 2. 1954.
- [3] William, B. Truesdale, Stress and Strain Gauges for Use in Soil Dynamics Research, *ISA Transactions* 7, 3. 1968.
- [4] 张挺等,压电式岩石应力计,中科院力学研究所研究报告,1983.
- [5] 张挺、金若冰,测量土、岩石介质中的动态应力用的压电式应力计,力学学报, Vol. 19, No. 3, 1987.
- [6] 中国科学院力学研究所二室六组,超动态应变仪,力学, 1. 1977.

A New Method of Dynamic Matching Test for Rock Stress Gauges—One-dimensional Impact Test

Zhang Ting

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

A new method of dynamic matching test for rock stress gauges is introduced in this paper. It is based on the principle similar to that of Hopkinson pressure bar. This method is simple, inexpensive and practical. It can be used not only to measure the dynamic matching coefficient of stress gauge but also to determine experimentally the dynamic measuring performances of stress gauge in solid media. The design principle of the equipment, the measuring systems and test results are described. This method can be also used to measure the decay of one-dimensional stress wave propagating in the rock or concrete specimen in laboratory.