

冲击荷载下岩石动态断裂韧度 测定的实验技术

唐春安 徐小荷

(东北工学院)

摘要 本文介绍了一种研究岩石动态断裂特性的实验技术。该方法采用自行设计的杆式冲击试验机,在加载率 $K_I > 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下对三点弯曲试件进行冲击加载。实验中,通过一套光电转换装置测量试件切口张开位移随时间的变化。由双通道的瞬态波形存储器记录荷载和切口张开位移,得到了冲击条件下的荷载-切口张开位移曲线,通过张开位移速率的转折点来确定起裂点并计算动态断裂韧度 $K_{I,d}$ 。本中给出了长宽高为 $180 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ 的大理岩试件的典型荷载-切口张开位移曲线和示波照片。试验结果可由微型机直接进行处理。

关键词 断裂韧度, 动态, 张开位移, 应力波。

一、前言

近年来,岩石断裂力学的发展已经有了一个较好的开端^[1]。尤其是在岩石断裂韧度的测试方面,由于能够借鉴金属材料断裂韧度测试的成熟经验,因此发展很快,建立了许多相应的方法^[2]。但是,这些方法大多是针对静态加载而言。然而,岩石材料象许多结构材料一样,具有明显的加载率敏感性,其动态断裂韧度相对静态而言有哪些同异点,同样也是岩石断裂力学不可避免的研究课题之一;更重要的是,在探讨爆炸应力波作用下岩石的破坏特性时,需要用岩石的动态断裂韧度来表征岩石在波动过程中的裂纹发生和发展,即当岩石的裂纹或缺陷受到了达到或超过其临界值的应力波作用时,便产生宏观裂纹并随后逐渐发展,导致动态断裂^[3]。同时,岩石动态断裂韧度是岩石动力学的基本力学参数之一。它也是光面爆破和控制爆破的理论研究和工程设计的主要参数。因此,确定岩石的动态断裂韧度具有重要的意义,有必要建立一套方法准确可靠地获得岩石材料的动态断裂韧度值。

本文介绍了在自制的多功能杆式冲击试验机上,令常规三点弯曲试件,在长杆冲击荷载作用下断裂。采用动态应变测量技术,记录冲击杆端的应变波形,获得了作用于试件上荷载 P 随时间的变化历史。并运用自制的一套光电装置记录试件切口张开位移 V 随时间的变化历史。从而可获得荷载-切口张开位移 $P-V$ 曲线,通过切口张开位移速率来确定临界点,并求出动态断裂韧度 $K_{I,d}$ 值,其加载率 K_I 大于 $10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

二、实验装置及测试方法

实验装置及测试系统见图1所示。采用自行设计的杆式冲击试验机,实现对三点弯曲试件的冲击加载。

1. 荷载的测定

通常用于金属断裂韧性测试的摆锤 (Charpy) 冲击试验机, 由于摆锤相对冲击荷载的波长要短, 因此当应变片布置在冲击杆的锤头上时, 由于多次入、反射应力波的影响, 使所测的冲击波形上叠加过多的干扰杂波 (见图 2⁽³⁾)。如果把应变片贴在试件上, 则势必使贴、焊应变片的工作量大大增加, 也给标定工作带来困难。因此, 通常人们只好把应变片贴在支座上, 这又使得支座的刚度不能太大, 否则会影响对荷载的灵敏度。但这又是对支座没有变形的假设很不利的, 影响了测试的精度。

对于岩石试件, 以上方法就更为困难。

由于我们采用了远远超过冲击荷载波长的长冲击杆, 冲击的荷载波传播到杆尾再反射回冲击端所需时间为 $2l/a = 2 \times 1500 \times 10^{-3} \text{ (m)} / 5100 \text{ (m/s)} = 588 \mu\text{s}$ (其中 l 为杆长, a 为纵波速度), 远大于本试验中岩石试件破裂所需时间 ($< 100 \mu\text{s}$)。因此, 我们将应变片贴在杆的冲击端扁平表面上, 避免了使冲击波形上叠加反射杂波的可能性, 所测的荷载波形极为理想 (见图 3)。

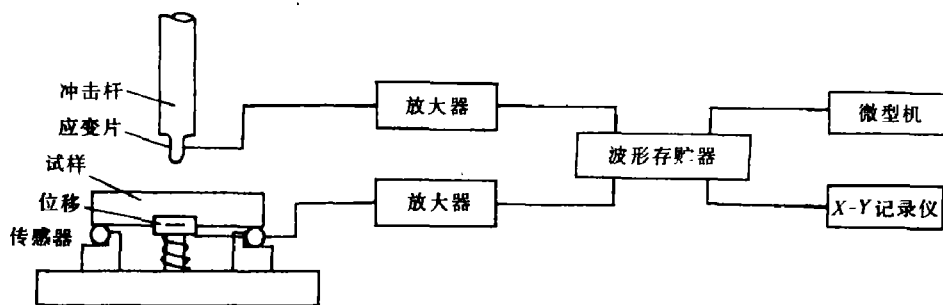


图1 实验装置及测试系统示意图(杆式冲击试验机为自制)

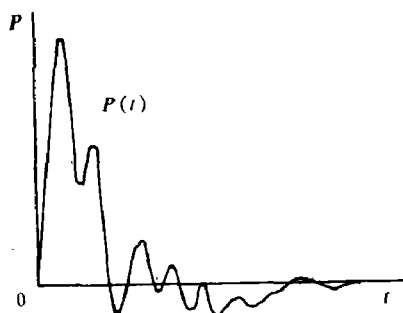


图2 引自文献(3)的荷载波形

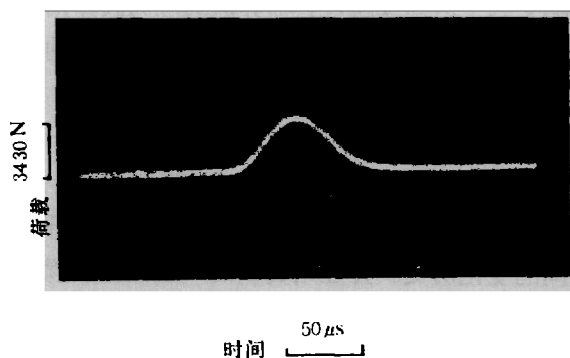


图3 本试验所测的荷载波形

2. 动态切口张开位移的测量

在应力波加载情况下, 一般机械接触式的夹式引伸仪不能满足切口张开位移的测试要求。我们运用光电转换原理, 通过光信号, 将试件张开位移量转化成电信号来测定切口张开位移随冲击荷载作用时间的变化。试验中解决了光缝与试件同步位移的问题 (见图 4)。因为在整

个测试过程中，试件产生挠度，但所测的切口张开位移必须处在试件的同一位置。当试件产生挠度 Δ 时，光缝照射位置A也需同步下移 Δ ，达到位置B。图5是同步机构的工作原理示意图。当试件受冲击产生弯曲挠度时，光缝同步机构在试件的压迫下克服弹簧的微小支承力（对试件的阻力可忽略不计），与试件同步运动。随着荷载的增加，切口张开位移增加，由光缝通过切口的光通量增加，引起光电池（2CR型硅光电池）光照面积增加。由于光电池所产生的光电流与光照面积成正比，因此，通过500倍的放大，并输入瞬态波形存储器，就可将由光信号转化成电信号的切口张开位移随时间的变化记录下来（见图6）。

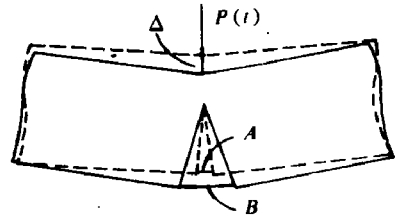


图4 试件产生挠度 Δ 时张开位移的变化

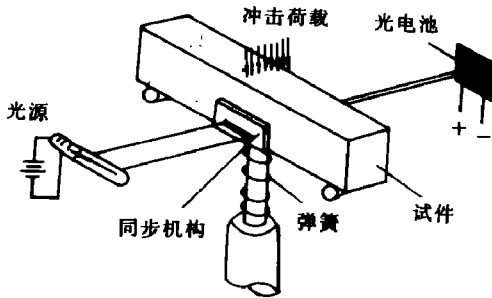


图5 切口张开位移测试原理

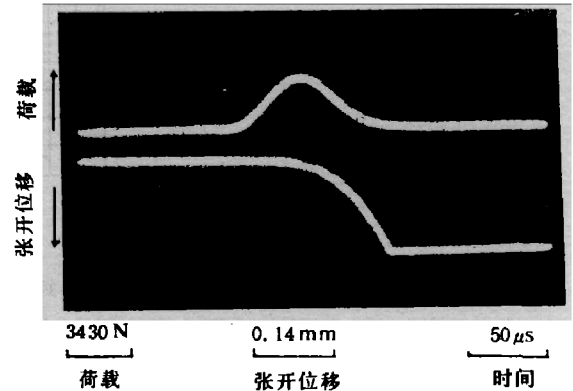


图6 荷载和切口张开位移示波记录（1* 试件）（大理岩，180×40×40mm）

有关2CR型硅光电池用于瞬态微量位移测量的可靠性，已在文献〔4〕中论述，此不赘述。

3. 测试记录系统

如图1所示，荷载和位移信号分别经两台交流放大器（频率响应为200 kHz）放大后，同时进入一台双通道瞬态波形存储器寄存，存贮空间为 2×1024 byte，记录速度为 $0.25 \mu\text{s}/\text{字}$ ，记录数据可由x-y记录仪慢速绘出，也可直接进入微型机进行处理。

三、实验结果及讨论

图7是由x-y记录仪描绘的相应于图6的荷载-切口张开位移（P-V）曲线及它们之间的对应关系。试验所用的试件为常规三点弯曲试件，大理岩，尺寸为 $180 \times 40 \times 40$ mm。切口深 $a = 15$ mm，先用厚0.8 mm锯片开宽切口，再用0.2 mm锯片在高速锯床上开细切口，深1 mm。试验时支座跨距 $s = 160$ mm。

1. 临界起裂点和临界荷载的确定

由图7，从荷载 $P(t)$ 曲线上可以看出，荷载的上升沿基本为直线，相当于等荷载率加载。切口张开位移 $V(t)$ 曲线则表明，试件的切口张开位移，在荷载上升到 C_1 之前变化很小，

即张开位移速率 $\dot{V}(t)$ 很小。此时的张开位移主要是裂纹顶端的弹性张开引起的。当荷载达到 C_r 时,荷载开始偏离线性,此时张开位移 $V(t)$ 明显开始增加,即张开位移速率 $\dot{V}(t)$ 在 C_r 点发生转折。我们认为这个转折点反映了断裂过程中客观存在的临界起裂点。由图知,起裂对应的时刻为 $28\mu\text{s}$ 。

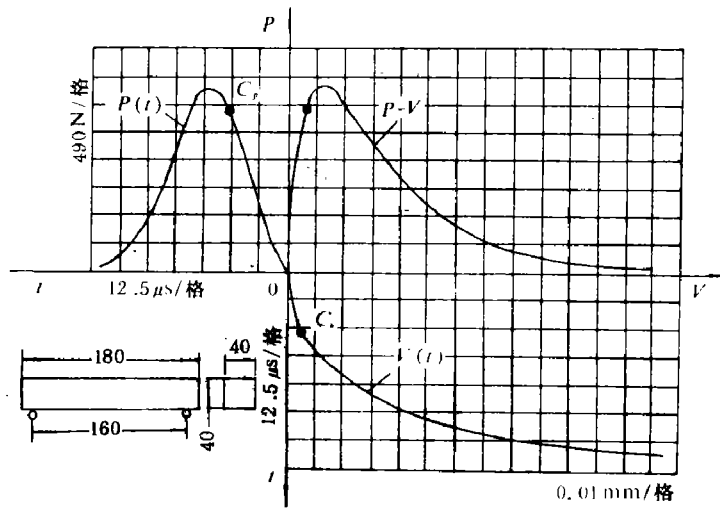


图 7 由示波记录得到的荷载-位移($P-V$)曲线

对于静态而言,临界点确定的办法很多。有人认为应选初始切线斜率95%的割线与 $P-V$ 曲线的交点 P_c 作为临界荷载 P_0 ^[5]。也有人建议用声发射急增点 P_N 或最大荷载值 P_m ^[6]。但是这些方法中哪一种适应于动态加载情况还尚待研究,至少声发射方法对于动态加载来说是不适应的。本文认为,用切口张开位移速率 $\dot{V}(t)$ 的急增点(即起裂点)所对应的荷载作为临界荷载 P_0 ,更能反映出材料的固有特性。

对图7而言, $P_0 = 2842\text{ N}$ (冲击速度 3 m/s)。

2. 动态断裂韧度 K_{I_d} 的确定

求出 P_0 后, K_{I_d} 比照静态 K_{I_c} 计算公式进行计算^[7]:

$$K_{I_d} = \frac{P_0 S}{B W^{3/2}} f(a/W) \quad (1)$$

式中 P_0 ——临界荷载(N), S ——跨距(mm), a ——初始切口深度(mm), B ——试件厚度, W ——试件高度,且

$$f(a/W) = (a/W)^{1/2} [2.9 - 4.6(a/W) + 21.8(a/W)^2 - 37.6(a/W)^3 + 38.7(a/W)^4] \quad (2)$$

对于本例, $a/W = 0.375$,故 $f(a/W) = 1.85$,连同 $P_0 = 2842\text{ N}$, $S = 160\text{ mm}$, $B = 40\text{ mm}$ 和 $W = 40\text{ mm}$ 一起代入式(1),得: $K_{I_d} = 83.1\text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 。

由加载率(平均)定义

$$\dot{K}_{I_d} = K_{I_d} / t \quad (3)$$

式中 t 为荷载达到 P_0 时的时间(即起裂时间) $t=28\mu\text{s}$,故 $K_{Id}\approx 3\times 10^6\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

如按 P_{max} 计算 K_{Id} ,则得: $K_{Id}=93.1\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 。

为了说明测定方法的可靠性,同一组大理岩试件的另外两个测定结果已示于图8。其最大荷载值分别为3022 N和2947 N,与图6相比,其离散性是很小的。足以说明,使用本方法测定岩石的动态断裂韧度是可靠的。

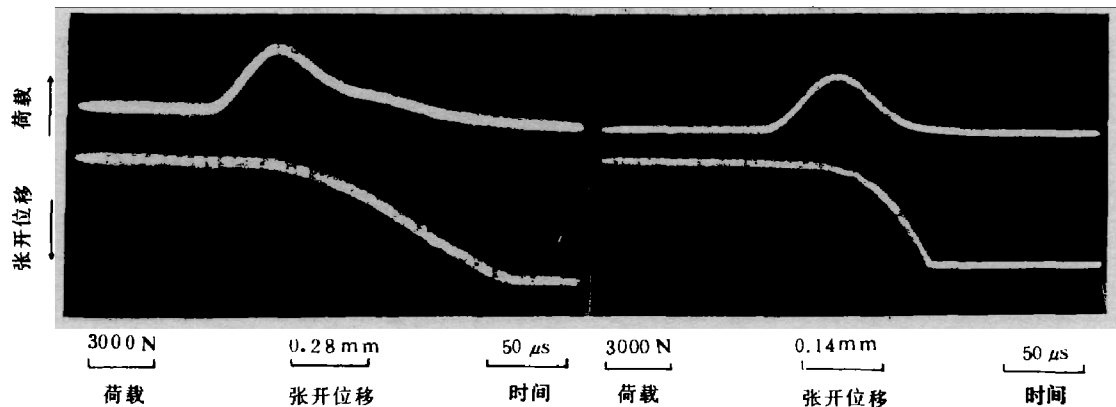


图8 大理岩荷载—切口张开位移示波记录(2^{*}、3^{*}试件)

四、结 语

随着岩石断裂力学的发展,岩石动态断裂力学必将随之发展。岩石在动态荷载下的断裂韧度,是岩石动态断裂力学中主要的课题之一。杆式冲击试验机及荷载、切口张开位移的动态测试方法,为这种研究提供了简单易行的测试手段。

运用本试验装置和方法具有如下优点:

1. 由于采用了长冲击杆,消除了反射应力波叠加的可能性,克服了摆锤(Charpy)试验机在摆锤上测定荷载引起冲击波形受干扰杂波的影响,能测出极为理想的荷载波形;
2. 由于应变片不贴在支座或试件上,不仅避免了试件贴片、标定的繁杂工作,而且也提高了测试精度,并且操作也极为简单;
3. 2CR型硅光电池对光信号有较高的响应速度,完全能胜任微秒量级瞬态切口张开位移测量的要求;由于是非接触式测量,除了按静态的常规标准外,不需对试件进行任何处理因此实验准备简单;
4. 由于采用常规三点弯曲试件,因此与静态测定结果具有可比性。

最后,还需说明,由于采用了长冲击杆,运用一维应力波理论,还能很容易地计算试件的挠度随时间的变化,从而可计算J积分。因篇幅所限,将在另文中介绍。

本文的实验工作也得到了黄土芳副教授的指导,王连孝同志协助了实验的准备工作,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 郑雨天编, 岩石断裂力学基础, 东北工学院教材, (1983).
- [2] 孙宗履编, 岩石断裂韧度, 中南工业大学教材, (1984).
- [3] 史巨元、冯怀同, 多功能摆锤式冲击试验机, 试验机与材料试验, (4) (1985).
- [4] 唐春安、徐小荷, 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, 爆炸与冲击, 7(2)(1987), 111.
- [5] Schmidt, R. A., Fracture-Toughness Testing of Limestone, *Experimental Mechanics*, 16(5) (1976).
- [6] 郑雨天、张 兴、石海鱼, 岩石断裂韧度测定的研究, 水利学报, (9) (1984).
- [7] 许春铁, 岩石断裂韧度的裂纹尺寸效应及其与劈裂抗拉强度的相关性, 东北工学硕士学位论文, (1985).

EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR MEASURING DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS OF ROCK UNDER STRESS WAVE LOADING

Tang Chunan Xu Xiaohe

(Northeast Institute of Technology)

ABSTRACT An experimental technique for measuring dynamic fracture toughness under stress wave loading is described. With a Bar Impact Testing Machine, the three point bending specimen was fractured under impact loading, the loading rate K_1 being approximately $10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2} \cdot \text{s}^{-1}$. An accurate measurement as a function of time was made by using a transient waveform storage, the load applied on the specimen and the groove-opening displacement were recorded. The critical value of the fracture parameter can be determined from the displacement rate according to which the dynamic fracture toughness K_{Ia} was obtained.

The load-displacement curve of a marble specimen with size of $180 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ is given in the paper. All the results were treated directly by microcomputer.

KEY WORDS fracture toughness, dynamic, opening displacement, stress-wave.