

# 裂纹扩展速度监测分析

陈静曦

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

**摘要** 介绍了两种简便、经济的裂纹扩展监测方法,并详细分析了这些方法在石膏板断裂实验中的实验结果,阐明了裂纹起裂速度与其动力过程和约束条件相关且为一变量,分析了这些测试方法所产生的误差,提出了修正方法。

**关键词** 裂纹扩展,起裂速度,监测

**分类号** O 346 1

## 1 引言

断裂力学的研究需要测定含裂纹试件的裂纹扩展规律,如:监测开裂点、测定裂纹扩展速率与开裂门槛值等。在这些实验中,需要即时测定裂纹长度或裂纹扩展量。研究者们通常是借助于高速摄影机进行这些工作,因此材料的选取也仅局限于有机玻璃类光学材料。对于岩石、混凝土、石膏等脆性材料的观测还不多,原因是一般的光学仪器和电子仪器难以直接测量非透明、非导电性介质中的裂纹。

人们在不断探索着各种测试手段和方法,以求解决研究工作中需要解决的问题。笔者在这方面的的工作主要是针对岩石这类脆性材料,选用了两种简便、经济的方法对裂纹进行监测,并对这些方法的优缺点进行分析总结。

## 2 监测方法及原理

### 2.1 裂纹片传感器测试法

这种传感器的工作原理很简单,它相当于一种含有平行线栅的应变片,把它贴在可能产生断裂的地方,用以测量裂纹的扩展情况。当裂纹扩展时,线栅就一条接一条地被拉断,每一瞬间所反应的电阻值就指示出裂纹尖端的位置,从而测得裂纹的扩展量和传播速度。

该方法对试件形状没有特殊要求,只要裂纹前缘处有一块可供贴片的区域即可。这种方法还可用于远距离测量,也可利用多点巡回检测技术对裂纹(或可能产生裂纹的部位)进行监测。

1997年9月29日收到初稿,1997年11月1日收到修改稿。

作者 陈静曦 简介:女,37岁,硕士,1982年毕业于中国科学技术大学近代力学系爆炸力学专业,现任副研究员,主要从事岩石动态断裂方面的研究。

### 2 2 铅笔芯传感器测试法

在脆性材料的断裂测试中，考虑其力学性能的匹配等因素，选铅笔芯做传感器是比较理想的。这是因为铅笔芯的导电性能好(铅笔芯电阻值为  $150 \Omega/\text{m}$  左右)，抗拉强度比较低(约  $0.8 \sim 1.0 \text{ MPa}$ )，用 502 胶容易粘结于岩石类材料的表面，具有与岩石类脆性材料相一致的力学特性，用于岩石类材料的测试是非常适合的。

铅笔芯传感器的测量原理基本上与裂纹片传感器的测量原理相同，也是利用铅笔芯等距离地排列在所需测点处，通过测量其并联电阻值的变化，可得知裂纹的扩展量和时间。由于它与岩石类材料的力学性能基本上是匹配的，所以，当岩石出现断裂时，铅笔芯传感器的滞后效应比较小，且使用成本也较低。

### 3 裂纹扩展试验

试验所用用试件为顶部带槽的矩形石膏板，尺寸为  $27 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ，刻槽深  $2 \text{ cm}$ ，宽  $0.1 \text{ cm}$ 。在刻槽口处放置一楔形劈块，利用  $10 \text{ t}$  动载机对劈块施加冲击荷载，在预制裂纹尖端处用 502 胶粘贴上裂纹片或铅笔芯组，利用 FDA S-4 型高速数据采集系统进行测量，并配联上微机进行数据处理。测量用的恒压电源由一组甲电池提供，通过测定传感器两端电压的变化与时间的关系，就可得到裂纹扩展结果。试验用的测量线路示于图 1。

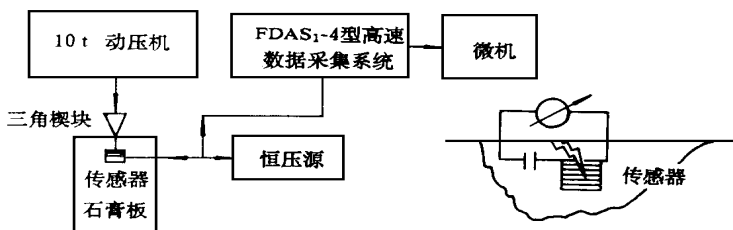


图 1 裂纹扩展实验测量线路图

Fig 1 Device of experiment for crack propagation

试验中所用的裂纹片传感器是国产型号为 TS5-10 型裂纹片，其电阻值为  $5.2 \Omega$ ，电阻丝的间距为  $1 \text{ mm}$ ，紧贴于裂纹尖端处，其测量结果见表 1。

表 1 裂纹扩展速度分布表(栅丝传感器测得)

Table 1 Distribution of crack propagation velocity (tested by sensor)

试件编号	栅丝间距 $\Delta l / \text{mm}$	栅丝条数	栅丝断开时间/ $\mu\text{s}$					速度分布/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
			$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
1#	1	5	0	0.96	2.64	3.00		1.042	595	735	
2#	1	5	0	1.92	4.48	7.04	10.24	521	391	391	313

根据前述原理, 试验中还选用 0.5 mm 的细铅笔芯依次粘贴于裂纹尖端处, 电阻值为 70  $\Omega$ , 利用瞬态波形采集处理仪进行数据采集处理, 其测量结果列于表 2。

表 2 裂纹扩展速度(铅笔芯传感器测得)

Table 2 Crack propagation velocity (tested by pencil core sensor)

试件编号	铅芯间距 /mm	铅芯条数	铅芯断开时间/ $\mu\text{s}$		平均速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
			$t_1$	$t_2$	
1 <sup>#</sup>	9	2	0	2.227	404.21
2 <sup>#</sup>	6	2	0	1.172	597.27

## 4 测量误差分析

任何一种测量方法都存在误差。利用这两种简单的传感器对裂纹的扩展进行监测时, 除其固有的系统误差外, 还有一些可以避免或减小的人为误差。

在试验中发现, 利用裂纹片作传感器时, 因电阻丝的抗拉强度比石膏高, 当裂纹开始张开时, 电阻丝却未断, 而是因其具有的延性特征被拉长。因电阻值  $R = \rho l / S$  ( $l$  为导线长度), 故仅发生  $\Delta R$  的改变。从前述测量方法及原理中, 我们已知断裂信号的判读是靠测量的电压差来表现的, 而  $\Delta R$  的变化为一连续值, 使电阻丝未断开前压差的变化为一斜线, 而不成阶梯状, 从而给断裂时间的判读带来了困难。

进行上述分析后, 我们在进行数据处理时, 就可以断定开裂点的应力应选在电压差开始变化处, 而不应选在已发生明显电压差的跳跃处。

利用铅笔芯作传感器来监测裂纹的扩展, 可以避免电阻丝片传感器所产生的误差。但是, 铅笔芯比较粗(0.5 mm), 它在粘接时, 两铅芯间的距离难以保证很小, 从而测量到的值更趋于平均, 在反映裂纹速度变化上是不太理想的。

在数据判读方面, 发现反映电压差变化的台阶有的也不干脆, 即压差的变化不是在某一时刻  $t$  发生, 而是有一过程  $\Delta t$ 。究其原因, 是因为铅芯虽然与石膏试件上的裂缝同时开裂, 但因裂纹间的张开程度还是不足以使铅芯断处脱离开, 因而电压差的变化出现明显的抖动。所以, 我们在利用铅芯作传感器时, 应考虑这一情况, 计算开裂的时间应以发生明显电压抖动点计起。

## 5 对裂纹扩展速度的讨论

多年来, 许多研究者都试图找到裂纹扩展速度所遵循的规律, 并且做了大量试验, 试验做出的结果离散度都很大, 本文实验也出现这类问题。

在表1中, 测得的为预制裂纹尖端处开裂的速度值, 从它的分布可以看出, 速度值初始较大, 随后减小。因测量在很小的范围( $< 1 \text{ cm}$ )内进行的, 故在小于1 cm 范围内裂纹开裂的速度为

试件 1#  $v_{平均} = 791\text{m/s}$

试件 2#  $v_{平均} = 408\text{m/s}$

可见, 裂纹开裂时速度的随机性很大, 显然它与试件材料、试验状态和过程等因素有关, 也与裂纹长度有关。即裂纹的开裂速度与其动力过程和约束条件等因素有关。曾有人报道过在阻止段前的裂纹速度大约为 $1\text{m/s}^{[1]}$ 。所以, 测量中测得的裂纹速度只能作为某一状态下的参考值<sup>[2]</sup>。

## 6 结论

(1) 在动态测量中利用铅笔芯作传感器对断裂信号进行监测是较为理想的, 但必须消除铅芯断而未开所引起的滞后效应。

(2) 若需测裂纹的扩展速度, 建议用裂纹片传感器来监测, 因为裂纹片可以测得在很小的间距( $< 1\text{mm}$ )内速度的变化值, 更接近于裂纹速度的瞬时值。

(3) 裂纹扩展速度是一个变化值, 在裂纹开裂处的裂纹速度梯度也很大, 并且与开裂时的材料所处加载、约束等条件有关, 带有随机性。对裂纹开裂速度的测量必须与其动力过程相联系。

## 参 考 文 献

1 Mostovoris P B C, Rippling E J M. Cracks and fracture. ASTM STP601, American Society for Testing and Materials, 1976, 234~ 244

2 陈静曦 应力波对岩石断裂的相关因素分析 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 148~ 154

# MONITORING ANALYSIS FOR THE VELOCITY OF CRACK PROPAGATION

Chen Jingxi

(Institute of Rock & Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

**Abstract** The two methods to monitor crack propagation are developed and a thorough analysis is made for the result of the two methods in break experiment of gypsum plate. It is expounded that the starting velocity of crack propagation is a variable and related to the dynamic process and restrained condition. Also, the error discussion and correction methods are both included.

**Key words** crack propagation, starting velocity of propagation, monitor