

干燥和水饱和花岗岩的动态断裂特性

楼涛

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 利用霍布金森压杆实验研究了干燥和水饱和花岗岩试件的动态应力应变关系。实验得到了干燥和水饱和花岗岩试件的平均动态拉断强度,表明水饱和花岗岩试件和干燥花岗岩试件的抗拉强度与加载速率具有不同的关系。对实验中实测试件层裂片的厚度进行了计算分析,对岩石类介质的动态断裂准则提出了初步见解。

关键词 动态特性 霍布金森压杆 层裂 花岗岩

1 前言

在抗爆结构、军事设施、民用建筑等安全防护工程的设计中,需要开展地下爆炸应力波传播规律及地表运动规律的研究。人们发现岩石的含水量,对应力波的到达时间、作用时间及应力峰值等都有强烈影响^[1]。水饱和岩体发生层裂的应力幅值远高于干燥岩体发生层裂的应力幅值。在冲击载荷作用下,确定干燥和水饱和状态的岩石动态拉断强度,对深入研究岩体介质中爆炸应力波的破坏特性及地表层裂现象,都具有很重要的意义。

国内外学者曾在这一方面做了大量的工作^[2,3]。我单位曾开展了在静态和准静态下水饱和花岗岩和干燥花岗岩试件的抗拉强度的研究工作^[4]。发现水饱和花岗岩试件的抗拉强度与加载速率的密切相关性及干燥花岗岩试件对加载速率的不敏感性。

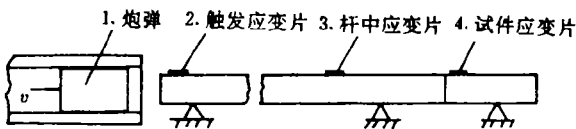


图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram

1. Projectile; 2. Strain gauge for trigger;

3. Strain gauge on the bar; 4. Strain gauge on the specimen

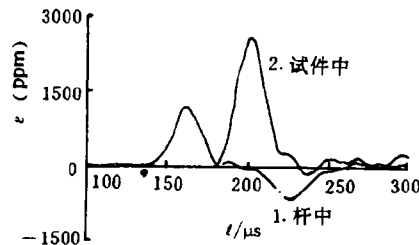


图2 岩面试件典型的应变-时间波形

Fig. 2 The typical strain-time

profile for rock specimen

1. In the bar; 2. In the specimen

本试验使用的花岗岩试件,比较均一,具有中细粒结构。试件端面平行度及端面与轴线垂直度都达到技术要求。岩石试件用肉眼观察无裂隙和缺陷。

干燥试件的制作是把试件放进烘箱,在 105℃ 的恒温下烘烤 24 小时以上。水饱和试件是把试件先置于 800Pa 左右的真空下,连续 6 小时释放出孔隙的空气,真空加水,在水中浸泡 48 小时以上得到的。

岩石试件的平均孔隙率为 0.5%。干燥试件的平均容重为 2.818g/cm³,平均纵波速度为 5543m/s;水饱和试件平均容重为 2.828g/cm³,平均纵波波速为 5885m/s。

实验是在我单位建立的分离式霍布金森压杆(SHPB)装置上完成的。该装置压杆直径为 40mm。见图 1。图 2 为采用的加载应变波形。

2 花岗岩试件的动态加载特性

以下计算分析中不计应力波在输入杆、岩石试件及输入杆与岩石试件界面处的能耗。对线弹性杆有

$$\sigma_{11}(t - t_1) = E_1 \varepsilon_{11}(t - t_1) \tag{1}$$

$$\sigma_{1R}(t - t_2) = E_1 \varepsilon_{1R}(t - t_2) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{2T}(t') &= \sigma_{11}(t - t_1) + \sigma_{1R}(t - t_2) \\ &= E_1 [\varepsilon_{11}(t - t_1) + \varepsilon_{1R}(t - t_2)] \end{aligned} \tag{3}$$

以上各式中: $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{1R}$ 分别为输入杆中的入射应变波和反射应变波(指输入杆与岩石试件界面处的反射波); $E_1, \sigma_{11}(t - t_1), \sigma_{1R}(t - t_2)$ 和 $\sigma_{2T}(t')$ 分别为输入杆的弹性模量,入射应力波,反射应力波和透射应力波; t_1 和 t_2 分别为输入杆入射应力波和反射应力波的到达时间。

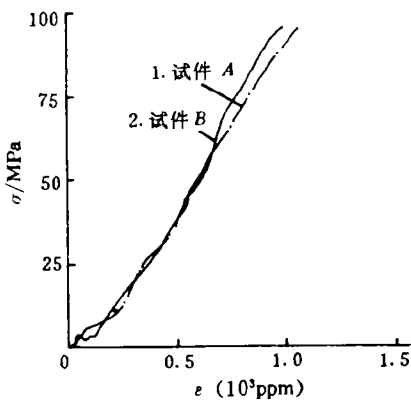


图 3 水饱和花岗岩试件的动态($\dot{\varepsilon} = 10^2 \text{s}^{-1}$)应力应变曲线

Fig. 3 The dynamic stress-strain relationship for waterlogged granite specimens ($\dot{\varepsilon} = 10^2 \text{s}^{-1}$)
1. Specimen A; 2. Specimen B

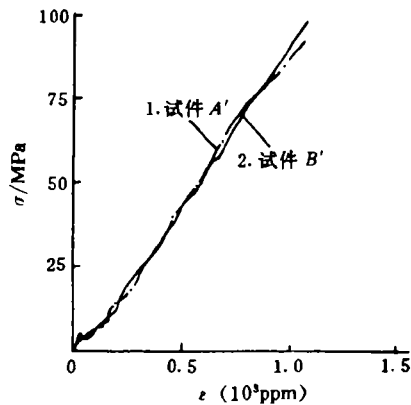


图 4 干燥花岗岩试件的动态($\dot{\varepsilon} = 10^2 \text{s}^{-1}$)应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain relationship for dry granite specimens
1. Specimen A'; 2. Specimen B'

对于处于弹性变形的岩石试件,有如下关系

$$\sigma_{2T}(t - t_3) = E_2(\varepsilon_{2T}, \dot{\varepsilon}_{2T})\varepsilon_{2T}(t - t_3) \quad (4)$$

式中: $E_2(\varepsilon_{2T}, \dot{\varepsilon}_{2T})$ 为岩石试件的动态弹性模量,它是应变(应力)和应变率的函数; $\dot{\varepsilon}_{2T}$ 为试件的应变率; ε_{2T} 为岩石试件中的应变; t_3 为试件中应力波的到达时间。因

$$\sigma_{2T}(t') = \sigma_{2T}(t - t_3) \quad (5)$$

则由(3)式和(4)式解得

$$E_2(\varepsilon_{2T}, \dot{\varepsilon}_{2T}) = \frac{\sigma_{2T}(t - t_3)}{\varepsilon_{2T}(t - t_3)} = E_1 \frac{\varepsilon_{11}(t - t_1) + \varepsilon_{1R}(t - t_2)}{\varepsilon_{2T}(t - t_3)} \quad (6)$$

试验中发现,当应变率变化不大时, E_2 的变化更小。所以我们认为 $E_2(\varepsilon_{2T}) = E_2(\varepsilon_{2T}, \dot{\varepsilon}_{2T})$ 。图 3 和图 4 是干燥和水饱和花岗岩试件的动态加载应力应变曲线。这些应力应变曲线在初始加载时都有较明显的起伏和非线性,起伏波动的原因是动态载荷作用下的岩石试件,其受力状态与静态下的受力状态有很大的不同。静态下岩石试件均匀受力,而在动态下,岩石试件的受力是处于一种复杂的波动过程,(6)式的各应变变量变化不可能严格同步,故出现 E_2 值的波动起伏。加载开始的非线性体现了岩石试件的微裂隙的闭合过程,这同静加载类似。

表 1 花岗岩试件在不同应变率下的弹性模量^[4,5]

Table 1 The elastic modulus of granite specimens under different strain rates^[4,5]

应变率/(1/s)	干燥花岗岩 E/MPa	水饱和花岗岩 E/MPa
$\sim 10^{-6}$	6.35×10^4	7.57×10^4
$\sim 10^{-1}$	7.25×10^4	8.21×10^4
$\sim 10^2$	8.4×10^4	9.3×10^4

注:应变率为 $10^2 1/s$ 时的动态弹性模量是对图 3 和图 4 作直线近似得到的。

由表 1 可得出两点看法:第一、随应变率的增加花岗岩试件的弹性模量也略有增加。第二、干燥花岗岩试件的弹性模量要略低于水饱和和花岗岩试件的弹性模量。说明了应变率和含水量对花岗岩试件的变形刚度都有影响。它说明

多组分构成的存在微裂隙的地质介质的变形具有时间弛豫特性。

3 花岗岩试件的动态断裂强度

花岗岩试件中的入射压缩应力波与在试件自由端反射回来的拉伸波相互作用,如其产生的净拉应力区满足一定的动态断裂准则,则花岗岩试件产生单层或多层层裂。

表 2 的值是由最大拉应力准则得出的^[5],其误差较大,但能体现动态断裂强度随应变率变化的趋势。目前还找不到恰当确定岩石类介质动态断裂强度的模型和公式。由于实测应变波形的上升时间可与波的正相作用时间相比拟。所以,这与击波型应变波形的断裂分析有很大的不同。从目前的研究来看^[2],拉伸波作用下的岩石试件,从裂缝的产生,扩张到完全断裂是有时间过程的。层裂的产生、不仅与应力幅值有关,还与应力幅值的持续时间有关。

表 2 不同含水量下花岗岩试件的动态断裂强度

Table 2 The dynamic tensile strength for granite specimens in different moisture contents

岩 类	应变率 (1/s)	拉断应变 (ppm)	平均应变 (ppm)	拉断应力 (0.1MPa)	平均应力 (0.1MPa)
干燥/水饱和	5×10^1	421/422		354/392	
干燥/水饱和	5×10^1	596/454	495/441	501/422	416/410
干燥/水饱和	5×10^1	446/429		375/399	
干燥/水饱和	5×10^1	517/459		434/427	
干燥/水饱和	1.0×10^2	473/799		397/743	
干燥/水饱和	1.0×10^2	469/682	473/755	394/634	398/699
干燥/水饱和	1.0×10^2	455/771		382/717	
干燥/水饱和	1.0×10^2	496/768		417/702	

表 2 的动态断裂强度比静态下和准静态下的断裂强度(见表 3)高出许多。一个主要原因是低应力作用下,试件的断裂将以绕晶的形式扩张,而在较高应力作用下,裂缝将以绕晶或/和穿晶的形式扩张,而穿晶断裂比绕晶断裂要耗散更多的能量。对于干燥花岗岩,拉伸波作用下的裂缝扩张阻力与裂缝尖端应力集中的程度成正比,即可用库伦摩擦来描述这一过程。应变率超过某一范围后,裂缝穿晶和绕晶扩张所需的能量与应变率关系不大,所以体现岩石试件的拉断强度相差无几。而对于水饱和花岗岩,微裂隙和晶体面填充着的水,起着粘性的作用,使裂缝扩张的阻力与裂缝扩张速度成正比。在高应变率下,水的吸附力作用和粘性作用加大,从而体现了试件的拉断应变阈值随应变率的增加而增加。另一个主要原因是在动态问题中,惯性效应不再忽略。

以上分析可得出结论:水饱和花岗岩试件的断裂强度与应变率密切相关,说明了吸水型介质的含水量对断裂强度有显著影响;干燥花岗岩试件的断裂强度对应变率也是敏感的,但应变率超过某一范围后,断裂强度对应变率则不甚敏感。

表 3 静态和准静态下花岗岩试件的断裂强度^[4]Table 3 The tensile strength for granite specimens in static and quasi-static experiments^[4]

岩 类	应变率 (1/s)	拉断应变 (ppm)	平均应变 (ppm)	拉断应力 (0.1MPa)	平均应力 (0.1MPa)
干燥/水饱和	1.9×10^{-8}	286/215		153/148	
干燥/水饱和	1.9×10^{-8}	241/156	255/177	152/133	155/135
干燥/水饱和	1.9×10^{-8}	237/160		158/124	
干燥/水饱和	2.5×10^{-1}	212/311		185/279	
干燥/水饱和	2.5×10^{-1}	280/331	253/324	206/290	185/266
干燥/水饱和	2.5×10^{-1}	258/330		166/228	

4 对描述岩石介质动态断裂准则的初步见解

国内外许多学者,一般都关心材料的静态和准静态断裂准则的研究,关于动态断裂准

则的研究文章尚少。下面的尝试性计算是基于实验结果^[5],初步研究了花岗岩的动态断裂准则应有怎样的特征。

实验证实,花岗岩试件的纵波速约为 5.5km/s。另外,假定层裂面为光滑平面并平行于原来的自由面。利用实验中花岗岩试件的裂片厚度来反推计算试件在产生如此厚度的层裂片处,其应变应是多少。设试件的入射应变波形为 $\varepsilon(t)$, (压应变为正)。有

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon(t) & t_0 \leq t \leq t_N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$\varepsilon(t)$ 在自由面反射的波形 $\varepsilon_r(t')$ 为:

$$\varepsilon_r(t') = \begin{cases} -\varepsilon(t) & t_0 \leq t \leq t_N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$t' = t_N + t_0 + \Delta t - t \quad (9)$$

$$\Delta t = 2t_1 - t_N - t_0 - 2l/c \quad (10)$$

以上各式中: t_0 、 t_N 、 t_1 分别为入射波(右行)波尾,波前(到达时间)、波峰处的时间尺度; l 为层裂片的厚度, c 为岩石的波速。

第一次层裂后,对波形作了修正,见图 5。图中直线 AB 替代直线 AC (AB 也可以用其它曲线)是出于物理上的考虑:(1)使得第一次层裂后,不产生连续的无厚度的层裂片。如 AC 存在,则反射波 $OACD'$ 一直满足产生第一次层裂的条件;(2)为使新层裂面处的反射波不产生突变的拐点,所以取 AB 的斜率的绝对值等于 AD 的斜率(也即 AD' 的斜率)。我们的目的不求计算的精度要多高,而是看一下趋势。见表 4。

表 4 计算的断裂应变(绝对值)

Table 4 The calculated dynamic tensile failure strains (absolute value)

第一层裂片厚度 /(mm)	计算的应变 (ppm)	第二层裂片厚度 /(mm)	计算的应变 (ppm)
38	410	16	358
50	1161(755)	22	486(755)
45	1131(771)	13	466(771)

注:()中的值为表 2 中的值。

这些计算是初步的,计算模型是新建立的,还不够完善。反计算结果表明:层裂所需的应变值,第一次比第二次要高得多。表 4 中反计算的动态断裂强度与由最大拉应力准则得出的动态断裂强度有一定的差别,这说明由最大拉应力准则确定多次层裂的动态断裂强度有一定的缺陷。分析表 4,有以下倾向性意见:花岗岩试件的动态断裂不仅与作用应力的有关,还与作用应力的持续时间有关。作用的应力值较高时,所需的应力的时间较短;应力幅值较低时,所需的应力的时间较长。所以认为花岗岩试件的动态断裂准则类似于下式^[2]:

$$\text{对于 } \dot{\varepsilon} < 10^{-2} \text{s}^{-1}, \quad \sigma_c = \text{const} \quad (11)$$

$$\text{对于 } \dot{\varepsilon} \geq 10^{-2} \text{s}^{-1}, \quad \sigma_c \propto \varepsilon^n \quad (12)$$

式中 σ_c 为动态断裂应力。(11)式说明了静态情况下的断裂强度为一常数。(12)式说明了

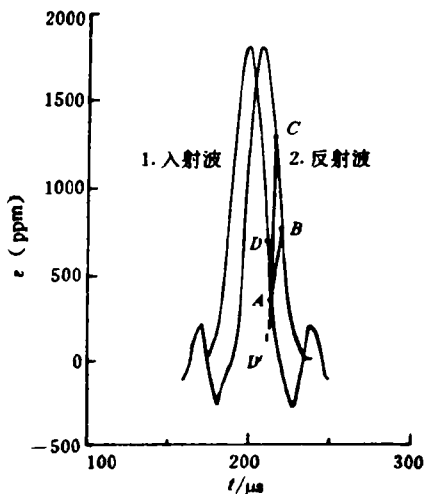


图5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

1. Incident pulse; 2. Reflected pulse

动态情况下的断裂强度与应变率密切相关,即材料破坏的时间累积效应。 σ_c 和 ϵ (或还与其它的参数相关)的函数表达式的研究,还有大量的工作要做。

5 讨论

通过试验发现,由于岩石的非均匀性,使岩石试件动态特性的一致性稍差。所以文中所得出的一些粗浅的看法,有待进一步证实。特别是岩石类动态断裂准则的研究,还需大量的实验和理论计算数据。这也是我们以后工作的方向。

谨对林俊德研究员的有益指导,表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Lin Junde, Stress Waves Produced by Explosion in Granite. In: Zheng Zhemin, Ding Jing. Proceedings of International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects. Beijing; Science Press. 1986. 282~287
- 2 Grady D E, Lipkin J. Criteria for Impulsive Rock Fracture. Geophysical Research Letters, 1980, 7(4); 255~258
- 3 Rubbin A M, Ahrens T J. Dynamic Tensile-Failure-Induced Velocity Deficits in Rock. Geophysical Research Letters, 1991, 18(2); 219~222
- 4 屈传柱. 花岗岩的轴直接拉伸试验. 第一届全国岩石动力学会议, 1988.
- 5 Lou Weitao, et al. Dynamic Abruption Strength of Dry and Waterlogged Granites. In: Zhang Guanren, Huang Shihui. Proceedings of the 2nd International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Chengdu; Sichuan University Press. 1992. 391~395

DYNAMIC FRACTURE BEHAVIOUR OF DRY AND WATERLOGGED GRANITES

Lou Weitao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024)

ABSTRACT: The stress-strain relations are investigated and the average dynamic abruption strength is obtained for dry and waterlogged granite specimens using split Hopkinson pressure bar in this paper. The result shows that the dynamic tensile strength related to the loading rates for waterlogged granite specimens is different from that for dry ones. Finally, the dynamic fracture criterion for rocks has been analysed roughly using the spalling thickness of the specimen in the experiment.

KEY WORDS dynamic behaviour, SHPB, spall, granite