

地震应力波的传播与岩石的动态响应*

章根德

(中国科学院力学研究所)

摘要

本文用 Split-Hopkinson 压力杆装置研究了应力波通过破裂岩石试件的衰减现象。给出了灰砂岩、石灰岩两种岩石动态的破裂强度与应力应变关系。结合受应力作用的岩样切片的微观观察,对应力裂纹、裂纹的动态分叉现象进行了分析讨论。

一、引言

研究大地震产生的应力波在岩石介质中传播与地震对矿山、岩石工程的破坏作用时,总向我们提出这样的问题,即地震波在岩石介质中传播时会有什么现象? 岩石介质对应力波会产生什么样的动态响应? 这些问题可以通过 Split-Hopkinson 压力杆装置来进行研究^[1,2]。实验表明,应力波会造成岩石介质的微破裂。微裂纹的生成与扩展会导致应力波的衰减。应力波能量的衰减相应地提高了岩石的动态破裂强度。对应力波作用后的岩样切片进行微观观察,可以看到应力引起的裂纹与空穴,以及裂纹在高速扩展时的动态分叉现象。

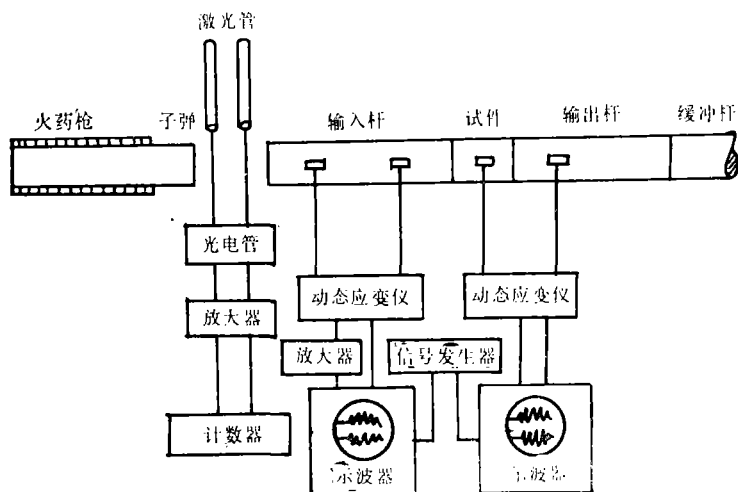


图1 Hopkinson 压力杆系统示意图

* 1982年3月17日收到。

二、实 验

实验采用 Hopkinson 压力杆系统,严格满足一维应力的试验条件,如图 1 所示:

关于实验装置的细节,文献 [3] 作了详细报道. 由火药枪驱动子弹打击入射杆,输入应力脉冲. 应力波连续通过输入杆、岩石试件与输出杆. 在入射杆、输出杆与岩石试件上都贴了应变片. 测得的应变,通过动态应变仪,由示波器记录下来.

实验的岩石试件采用了灰砂岩、石灰岩两种岩石. 试件的直径与钢杆相同,长度分别为 $l = d/2$ 、 d 、 $2d$ 三种. 岩石试件的静态强度由静态压缩试验得到.

之后,对受应力作用后的岩石试样切片进行了微观观察. 并且与未受应力作用的岩样的电子显微镜照片进行了比较.

三、应力波在岩石介质中的衰减

用 Hopkinson 压力杆装置进行岩石动态压缩试验时发现,当入射的应力波幅值很低时,应力波通过岩石后并不衰减. 当应力波幅值高于岩石初始破裂应力时,应力波会在岩石试件中产生微裂隙,微裂隙会导致应力波沿试件长度按指数规律衰减^[4]:

$$\sigma_l = \sigma_c + \sigma_c e^{-\alpha l} [1 - e^{-\alpha(\sigma_l - \sigma_c)/\sigma_c}] \quad (1)$$

式中

σ_c 为岩石的初始破裂应力

σ_l 为入射到岩石试件中的应力

σ_l 为距入射端 l 处的应力

α 为岩石试件中应力波衰减系数

如将岩石视为连续、均匀、各向同性的弹性体,则应力沿试件长度将会呈线性分布,如图 2 中虚线所示. 实际上,岩石试件中的微裂隙的生成与扩展会引起应力波的衰减. 岩石试件中的应力分布不再呈线性. 根据实验所得到的参数,用电子计算机计算得到的岩石试件中的应力分布,如图 2 中的实线所示.

观察大地震或强爆炸产生的应力波传播可以发现,在近区应力波衰减比较厉害. 在远区,当应力波幅值低于岩石的初始破裂应力后,应力波就几乎不再衰减了. 在记录到的

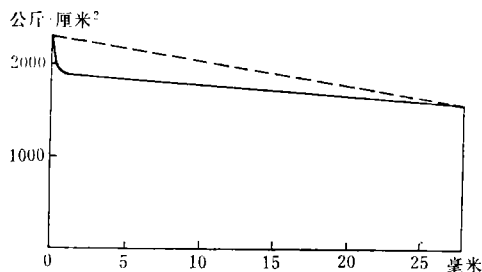


图 2 $l/d = 2$ 的砂岩试件,应力沿试件长度线性分布 (用虚线表示)与由于破裂传播应力沿试件长度呈指数衰减(用实线表示)的比较

波形中,可以看到一种波传播过程中的畸变现象。原来比较陡的波形,由于波头衰减较严重,后来就变得越来越平坦了。也就是说,应力波在传播过程中并不保持自相似。这种现象用弹性波理论是完全不能解释的。其原因,就在于应力波会在岩石介质中引起裂纹与空穴,如照片 1 和照片 2 所示。这些裂隙吸收了应力波的能量,导致了应力波幅值的衰减,且应力幅值越高,衰减越严重。这样,波在传播过程中就变得越来越平坦了。直到应力波不再引起岩石的微破裂,应力波才象弹性波那样不再衰减了。所以,要将地震波视为弹性波是有一定条件的,那就是地震应力波的幅值低于岩石介质的初始破裂应力。

四、岩石对应力波的动力响应

为了研究地震波对矿山及岩石工程的破坏作用,必须先知道岩石介质对地震应力波的动力响应。在以往,利用 Hopkinson 压力杆来确定岩石动态破裂强度时,都采用了短试件中应力分布线性化的假设^[5]。线性化假设,对金属材料短试件来说,无疑是正确的,但对岩石试件来说,当入射的应力波超过了岩石的初始破裂应力时,应力波的幅值就会衰减,试件中的应力分布就会如图 2 中的实线所示那样,不再呈线性分布。按照应力线性分布的假设来计算岩石的动态破裂强度,就会偏高 15% 左右。所以,必须根据实验所提供的应力波衰减参数加以修正^[6,7]。经过修正后,岩石的动态破裂强度(应变率 $2 \times 10^2 - 4 \times 10^3$ 1/秒)为:

灰砂岩: 1710 kg/cm^2 (1680 兆泊)

石灰岩: 2230 kg/cm^2 (2190 兆泊)

比岩石的静态破裂强度(应变率 10^{-5} 1/秒)分别提高了 19% 与 25%。

两种岩石的动态与静态的应力应变曲线分别如图 3、图 4 所示。

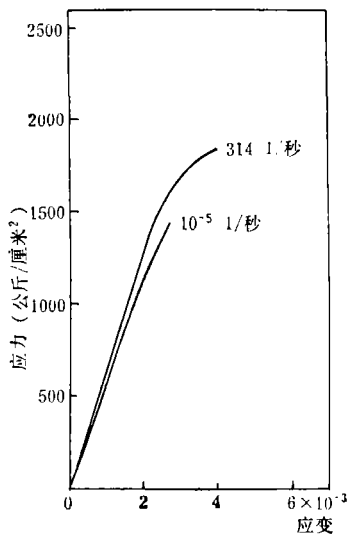


图 3 $l/d = 2$ 的砂岩试件,动态的与静态的应力应变曲线

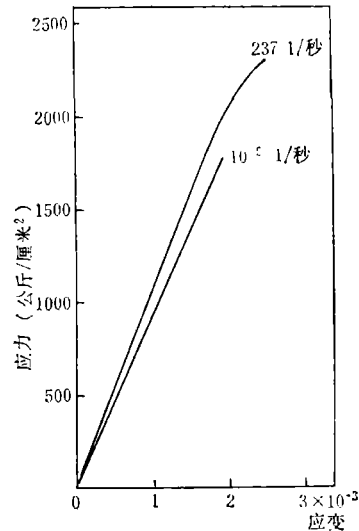


图 4 $l/d = 1$ 的石灰岩试件,动态的与静态的应力应变曲线

岩石的动态破裂强度是应变率的函数。应变率对动态破裂强度的影响,可表示为下列公式^[6]:

$$\dot{\epsilon} = K \cdot N(\sigma) \cdot C \cdot V(\sigma) \quad (2)$$

这里, $N(\sigma)$ 是破裂核的数目, $V(\sigma)$ 是破裂传播速度, C 是裂纹的平均长度, K 是方位常数。增加应变率意味着增加破裂核的数目或增加裂纹的传播速度 V 。这就需要更高的破裂应力,也就是提高了动态破裂强度。应变率增加一个量级,动态破裂强度对玄武岩提高 2.15%;对花岗岩提高 2.4%。对应变率不太高时(例如小于 10^3 1/秒),动态破裂强度比静态破裂强度增加约 20%。所以,从工程安全角度来看,在设计中用静态破裂强度来代替动态破裂强度是简易可行的。

五、岩石破裂隙的观察与分析

为了研究应力波通过破裂的岩石试件衰减的微观机理,对受应力作用的岩石试件切片作了电镜观察,并与同一岩芯上未受应力作用的岩石试样的微观照片进行了比较。微观电镜观察发现,受应力作用后的岩石试样上出现了较多的由应力所引起的裂纹与空穴,它们被称之为应力裂纹,如照片 1、照片 2 所示。

应力裂纹是在较短时间内在较大的应力作用下生成的。裂纹往往比较窄与直。裂纹中没有部分愈合与连桥现象。裂纹壁较平直,端部明显锐利,如照片 1(见书末图版,下同)所示。有时,应力引起的是边缘锋利的空穴,如照片 2 所示。

同一岩芯上未受应力作用的岩样切片上发现少量的原始裂纹。原始裂纹如照片 3 所示。原始裂纹的宽度一般比应力所引起的裂纹宽,裂纹壁弯曲曲地很不规则,裂纹宽度不断变化。整条裂纹似乎是由数段小裂纹或空穴连接起来。裂纹中常会出现部分愈合的现象。裂纹往往具有较钝的端部或局部过渡到消失。

岩石中的应力裂纹具有均匀分布的特点。应力裂纹所引起的应变,其数量级往往可以相当于弹性应变,达到百分之几的范围。它使岩石介质明显地显现出宏观体积的非弹性膨胀。应力裂纹的取向大致平行于最大压应力方向,这就使得原来是各向同性的岩石显现出应力各向异性^[9]。此时,岩石虽然并未出现强度破坏,但却明显出现强度破坏的宏观前兆,使得我们能够预言岩石的强度可以破坏。在震害中,利用膨胀现象、应力各向异性、波速比异常变化等来预报地震,就是根据岩石介质应力裂纹的这种特性。所以,用宏观与微观相结合的办法,建立了关于应力裂纹的正确力学模型。根据岩石力学实验与现场测试所提供的参数,定量地估算应力裂纹所引起的各种宏观异常,必将加深人们对地震过程的认识,为地震预报提供可靠的依据。

我们在受应力作用的岩石试样切片的微观照片上还发现了裂纹的动态分叉现象,如照片 4 所示。

从照片中可以看到,原来向前传播的一条裂纹分成两支,每支分叉裂纹与原来裂纹的传播方向——主裂纹延长线的夹角几乎相等。裂纹的分叉几乎是对称的。

这种现象很类似于大地震中的分叉裂缝。在观察大地震之后的地表裂缝时,我们可以看到,原来是一条延伸的裂缝,到了某处分成了两支。分叉裂缝不是从裂缝的起始端就

有的。所以,可以认为裂缝的分叉不是发生在大地震刚触发的时刻,而是发生在地震过程中,发生在地壳岩层的裂缝快速传播的过程中。它是一种岩石介质中高速传播裂纹的动态分叉现象。

造成裂纹动态分叉的原因是,裂纹在低速稳态扩展时,应力分量的奇异项 $\sigma_{\theta\theta}$ 是相当平坦地分布在裂纹前方较宽弧线上。 $\sigma_{\theta\theta}$ 的最大值方向就是裂纹扩展的方向。而当裂纹非稳态高速扩展时, $\sigma_{\theta\theta}$ 的最大值就不再沿着原来的裂纹线,而在与裂纹线成某一角度的两个分方向上。于是,裂纹就会分成两支,分别沿着 $\sigma_{\theta\theta}$ 最大值的方向传播。由于应力奇异项 $\sigma_{\theta\theta}$ 的分布是左右对称的,所以分叉裂纹也几乎是左右对称的。当然,由于岩石的非均匀性,有时会出现与对称分叉的某种程度的偏离。

诚然,大地震中所出现的动态分叉现象远比实验室的情况要复杂得多。目前,要用动态断裂力学来定量地计算还是相当困难的。但通过现象上的类比,我们至少可以从力学的角度对大地震的分叉现象作出正确的分析与判断。

六、结 论

地震波在岩石介质中的传播与岩石介质对应力波的动力学响应是一个波与介质相互作用的复杂问题。应力波引起岩石介质中破裂的生成与扩展;反过来,岩石介质中的裂隙又吸收应力波的能量,导致了应力波的衰减及动态破裂强度的降低。岩石介质受力变形直到破裂过程中的宏观现象总是和它的微观机理密切联系着的,所以,用宏观微观相结合的手法,借用岩石力学、断裂力学的研究成果认识地震全过程,对于我们深入了解地震的机制,从而作出正确的地震预报具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] R. M. Davies, A critical study of the Hopkinson Pressure Bar, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 240, 375—457, 1948.
- [2] E. D. M. Davies and S. C. Hunter, The dynamic compression testing of solid by the method of the Split-Hopkinson Bar, *J. Mech. Phys. Solids*, 11, 1963.
- [3] 段祝平等,高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究——一维杆实验方法及其应用,力学进展, 10, 1, 1—16, 1980.
- [4] 章根德,岩石在动态载荷作用下的脆性破裂,岩土工程学报, 3, 2, 43—49, 1981.
- [5] R. J. Christensen, Split-Hopkinson Bar tests on rock under confining pressure, *Exp. Mech.*, 12, 11, 1972.
- [6] L. M. Lindholm, The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 11, 5, 1974.
- [7] 章根德,岩石对冲击载荷的动态响应,爆炸与冲击, 2, 2, 1—9, 1982.
- [8] A. Kumar. The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite, *Geophysics*, 33, 1968.
- [9] D. S. William and D. James. Continuum theory of rock dilatancy, *Advances in Rock Mechanics Reports of Current Research*, 11, Part A, Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics Themes 1—2, Denver, 1974.
- [10] S. J. Green and K. D. Per Kins. Basic and applied rock mechanics, Tenth Symposium on Rock Mechanics, ch 2. New York, 1972.
- [11] C. J. Maiden and S. J. Green. Compressive strain-rate tests on six selected materials at strain-rate from 10^{-3} to 10^4 in./in./sec., *J. Appl. Mech.*, 33, 9, 1966.
- [12] K. D. Hakalchto, The behaviour of rock under impulse loads, *Acta*, 81, 1969.

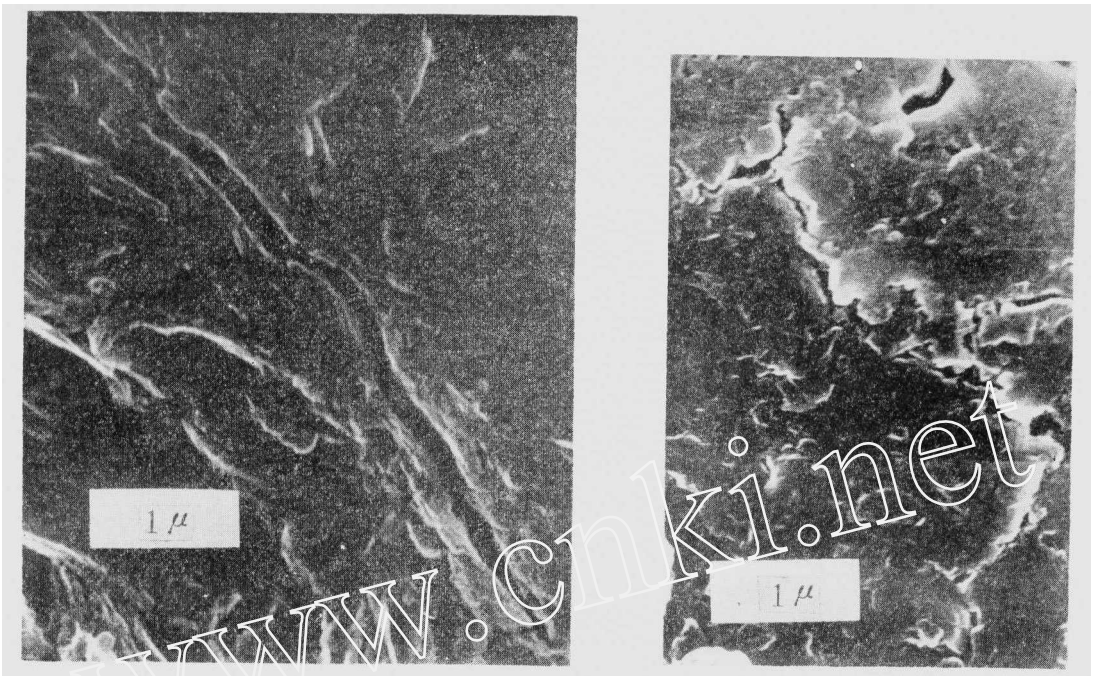
PROPAGATION OF SEISMIC STRESS WAVE AND THE DYNAMIC RESPONSE OF ROCKS

ZHANG GENDE

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

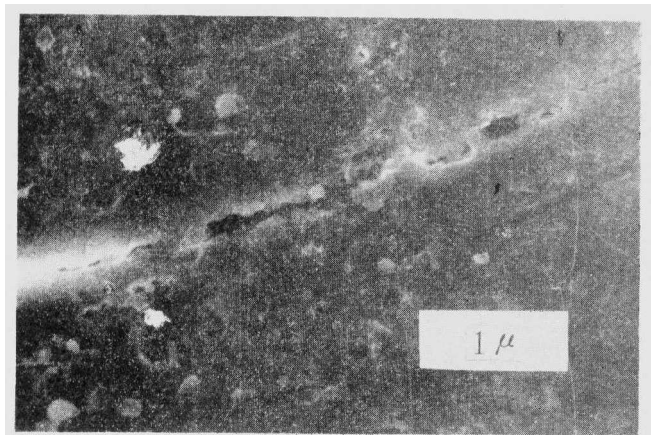
Abstract

In this paper, the attenuation phenomenon of stress wave transmitted through a fractured rock specimen has been studied by the method of the Split-Hopkinson bar. The dynamic strength and dynamic stress-strain curves for sandstone and limestone are given. Then, combining with microscopic observation of rock specimen sections under compressive loads, the phenomena of stress crack and the dynamic branch have been analysed and discussed.

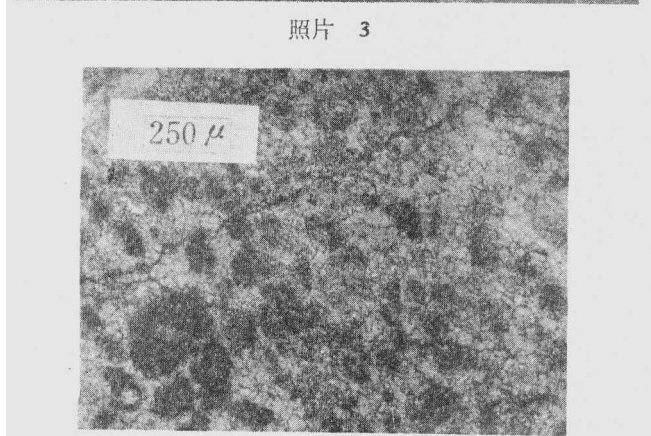


照片 1

照片 2



照片 3



照片 4