

大理岩和砂岩动态本构的实验研究

席道瑛 郑永来 张 涛

(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 探讨了在 Hopkinson 压杆装置上进行岩石长杆冲击实验。用多组埋入式聚偏四氟乙烯薄膜应力计,进行了波衰减的测量,获得了大理岩、砂岩在干燥、饱水、饱油情况下的衰减系数。对实测波形运用拉格朗日分析和路径线方法获取了大理岩、砂岩动态本构关系。

关键词 路径线 Lagrange 分析 动态本构 应力波衰减

中图分类号 T315.1

1 引言

波传播法是研究岩石动态力学性能的一种重要实验手段。运用拉格朗日分析方法可直接求出 σ - ϵ 关系,但采用拉格朗日分析法进行岩石动态响应的研究还不普遍。

Grady^[1]首先引入路径线法,将这一方法用于处理球面波的一维流动实验数据,得到了花岗岩的动态应力-应变关系。Aidun^[2,3]等用曲面拟合法对 Carrara 大理岩的冲击相变波形进行了处理。楼涛^[4]利用现场点爆炸的岩体球面应力波径向质点速度波形,运用拉氏分析方法,得到了花岗岩体球面应力波传播速率相关的应力-应变关系。波在传播过程中的衰减一直是近些年研究的热点,为了更好地研究波在岩石长杆试件中传播时,应力波在传播过程中的变化特征,衰减信息,我们设计了在 Hopkinson 压杆装置上进行的波传播试验,并采用测量应力-时间历史波形的方法,获取实验结果并对此进行拉氏分析。

2 实验方法和技术

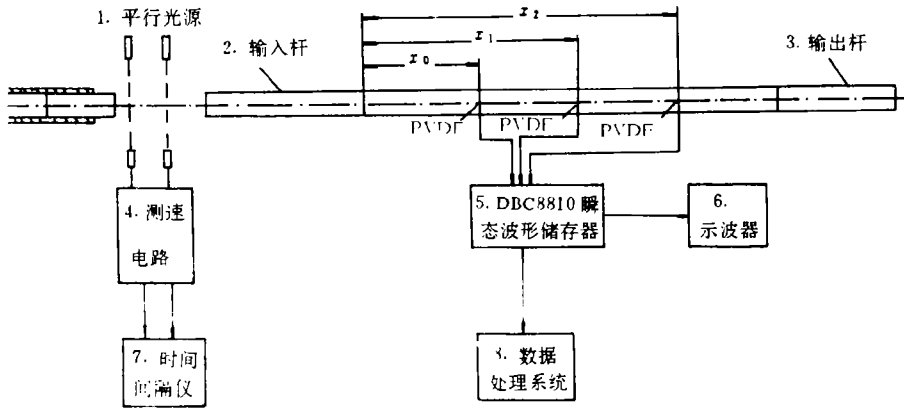
选取云南大理采集的大理岩和安徽董铺的砂岩作为样品,将其加工成直径为 13.4 mm,长度为 60 mm 的短试件,将 5 个短试件用 SA103 耐冲击胶粘接成长为 300 mm 的中长试件。将 4 个中长试件粘接成一长度为 1200 mm 的细长杆岩石试件,并将试件夹在装置的输入输出杆之间,如图 1 所示,采用的实验技术和测量系统可参考文献[5]。

该装置采用直径 14 mm 的 Hopkinson 压杆进行了波传播实验,将细长杆的 3 个接头处埋入 PVDF 聚偏四氟乙烯薄膜应力计片,测量波在传播中的应力-时间历史波形。当进行冲击压缩实验时,将 PVDF 应力计输出的信号,直接输入瞬态波形存储器,再输入微机,利用 PVDF 的标定结果^[5],获得岩石的应力-时间历史波形。

云南大理的汉白玉大理岩和安徽董铺的石英砂岩颗粒结构比较均匀,但从细观角度观察,仍然存在微小的裂隙和孔洞。要将其加工成细长杆进行波传播试验,还是非常困难的,为此特设计了用大理岩、砂岩的短接试件来代替岩石的细长杆试件进行波传播的研

究。经实验验证^[5],接头对应力波传播及衰减影响甚微,用短试件代替细长杆试件是可行的。同时还证实,采用PVDF压电薄膜作应力计的测量方法是可靠的,测量精度约为1%。

在长杆岩石试件的不同位置(即不同的拉格朗日坐标 h)埋入传感器,用300 mm长的铝棒子弹撞击600 mm长的输入杆,在输入杆上产生一应力波,该应力波在砂岩中传播时,传感器(PVDF量计片)随岩石材料的质点一起运动,并记录下质点的应力随时间变化的历史。然后对这些拉格朗日坐标 h 上的传感器的记录进行拉格朗日分析^[6],而获得岩石的本构关系。



1. Parallel light source; 2. Input bar; 3. Output bar;
4. Velocity measurement circuit; 5. DBC8810 waveform memory;
6. Oscilloscope; 7. Chronometer; 8. Data processing system;

图1 长试件实验装置图

Fig. 1 Schematic apparatus for long specimen

设不同位置上埋设的应力传感器(PVDF量计片)记录的应力波形为 $\sigma(h, t)$,在一维条件下,连续介质运动时,应满足连续、运动及能量三个拉格朗日守恒方程。

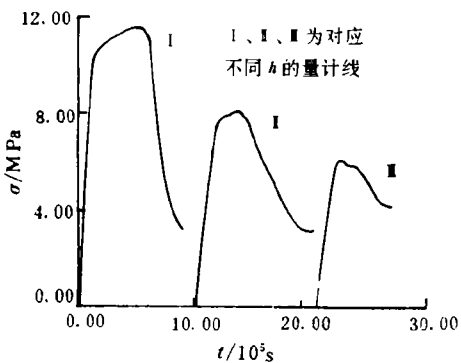
由拉氏量计测得参数 σ 的一组波形,它们构成参量 $\sigma(h, t)$ 的流场三维图象。根据该流场图可构成多条路径线,路径线与沿 h 的量计线(I、II、III)一起构成差分网格,即可方便地取得应力—时间历史波形,应力—应变关系。

在岩石细长杆上,对3个PVDF应力量计测点进行了应力测量^[5],其波形由图2、3、4、6所示,相应的应力—应变关系曲线示于图7~10。

将图2、图3的波形进行对比,随着传播距离的增大,发现饱煤油的大理岩的应力—时间波形比干燥大理岩的应力—时间波形有展宽的趋势。饱煤油大理岩应力—时间波形的前沿达到极值后,梯形波与横轴平行的部分(平台)明显地变为随时增长的斜线部分。而干燥大理岩到第三个波形时,应力波的前沿直接转为下降后沿,这就说明饱油大理岩的波形随传播距离的增大比干燥时的波形展得更宽。说明波的形态随着波在岩石中传播距离的增大,与输入梯形波波形差得越远;干燥大理岩的衰减比饱油大理岩的衰减大。从表1的衰减系数结果也可以看出这一点。

表1 岩石的衰减系数
Table 1 Attenuation of the rocks

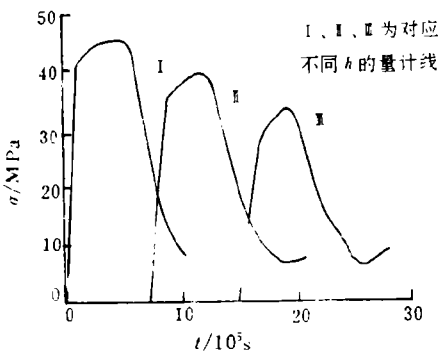
岩石名称	衰减系数		平均衰减系数 a
	$\alpha_1(x_1-x_0)$	$\alpha_2(x_2-x_1)$	
干燥大理岩	1.11	0.89	1.00
饱煤油大理岩	0.42	0.50	0.46
干燥砂岩	0.41	0.64	0.53
饱煤油砂岩	0.72	1.01	0.84



I、II、III — Gage curve

图2 干燥大理岩应力—时间记录

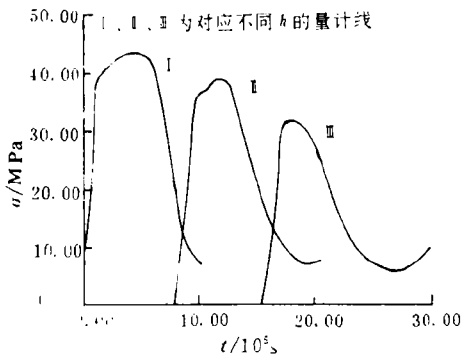
Fig. 2 Dry marble stress—time curve



I、II、III — Gage curve

图3 饱煤油大理岩应力—时间记录

Fig. 3 Kerosene-saturated marble stress—time curve



I、II、III — Gage curve

图4 干燥砂岩的应力—时间记录

Fig. 4 Dry sandstone stress—time curve

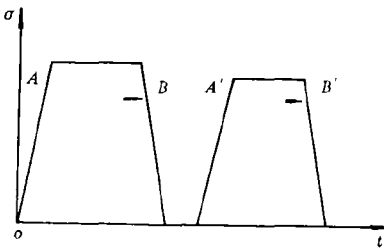
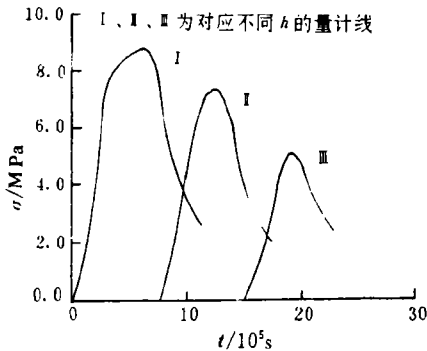


图5 卸载波追赶加载波示意图

Fig. 5 The schematic of unloading wave run after the hard loading wave

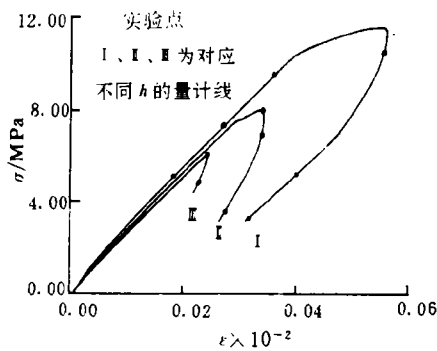
从图4、图6的波形,可以看出输出波形随传播距离的增大与输入梯形波差得更远。可能由于砂岩孔隙度(2.93%)比大理岩孔隙度(1.73%)几乎增大了一倍,也就是说粘滞系数较大的饱和油在砂岩中占有的体积相对饱和油在大理岩中所占有体积就大得多,所以砂岩中波的振幅衰减占了主导地位,波形态变化就变得不那么突出。

图4干燥砂岩三个波的比较,从I→II→III,波的主要部分变窄,由于卸载波波速大于加载波波速,存在着卸载波对加载波的追赶,如图5所示。由于B点的卸载波追赶A点的加载波,造成波形随传播距离增大而变窄,最后当卸载波追赶上加载波时,导致波幅的衰减,引起应力-应变曲线上的滞迴现象,如图9所示。



I、II、III——Gage curve

图6 饱煤油砂岩应力-时间记录
Fig. 6 Kerosene-saturated sandstone stress-time curve



• Experimental point;

I、II、III——Gage curve

图7 干燥大理岩应力-应变曲线
Fig. 7 Dry marble stress-strain curve

由图6的饱油砂岩的波形可见,无论是波形的前沿和后沿都随传播距离的增大而变缓,变缓的程度比干燥的砂岩都更强,由表1可知,幅度的衰减也最厉害。这就说明饱油砂岩比干燥砂岩的卸载波对加载波的追赶更快,所导致的 $\sigma-\epsilon$ 曲线的滞迴由图10所示。

饱油砂岩在卸载波对加载波的追赶中,在卸载波未赶上加载波之前,波幅保持不变,但是由于卸载模量大于加载模量,使波形随传播距离增大而越变越窄。因而导致由第一个波随时间增长的斜线部分变为第二第三个波即II、III的尖峰后卸载,较长的斜线部分和较短的平台都消失。在干燥砂岩中可能由于卸载波对加载波的追赶速度比饱油时慢,所以,前两个波随时间增长的部分依然存在,在III的尖峰值后下降。两者的差异很可能是由于固体颗粒之间的摩擦和液体在 $\sigma(t)$ 的作用下,相对于固体颗粒而运动(液体的运动速度快),则固体颗粒与液体之间也发生摩擦,或因微裂隙在压应力 $\sigma(t)$ 作用下,裂隙闭合造成裂隙面间的摩擦等,导致在岩石杆中传播的梯形波的衰减。

从图7~10可见,大理岩和砂岩的 $\sigma-\epsilon$ 曲线具有如下的三个特点:①除干燥大理岩和饱油砂岩的三条加载线几乎重合外,其它 $\sigma-\epsilon$ 曲线的加载线斜率不断变化,加载段从 σ 很小时就分开了,这可能是岩石本身的结构构造致密程度的不均匀造成的,可见大理岩的结构构造相对于砂岩均匀而致密。②卸载曲线的斜率几乎都大于加载曲线的斜率,这就说明卸载模量大于加载模量。③呈现极为明显的滞迴效应。

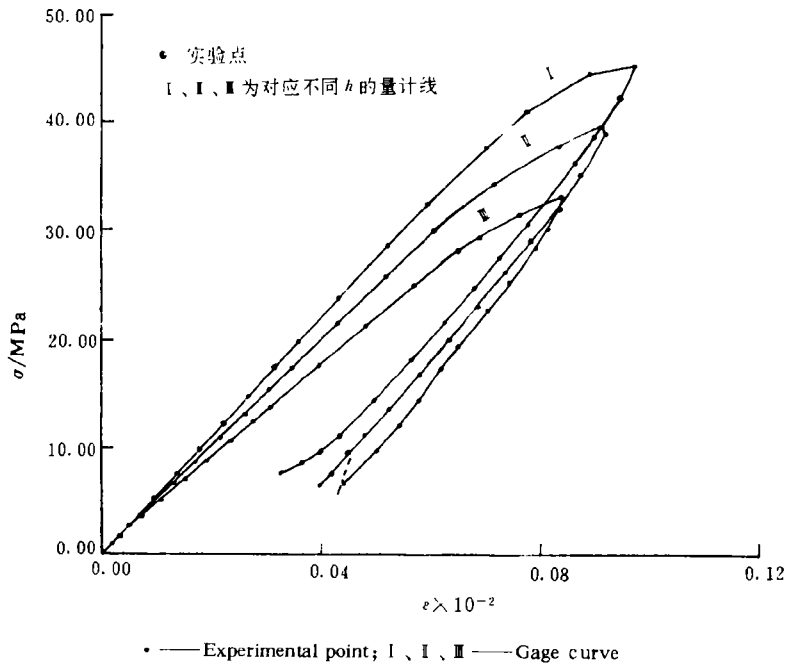


图 8 饱煤油大理岩应力—应变曲线

Fig. 8 Kerosene-saturated marble stress—strain curves

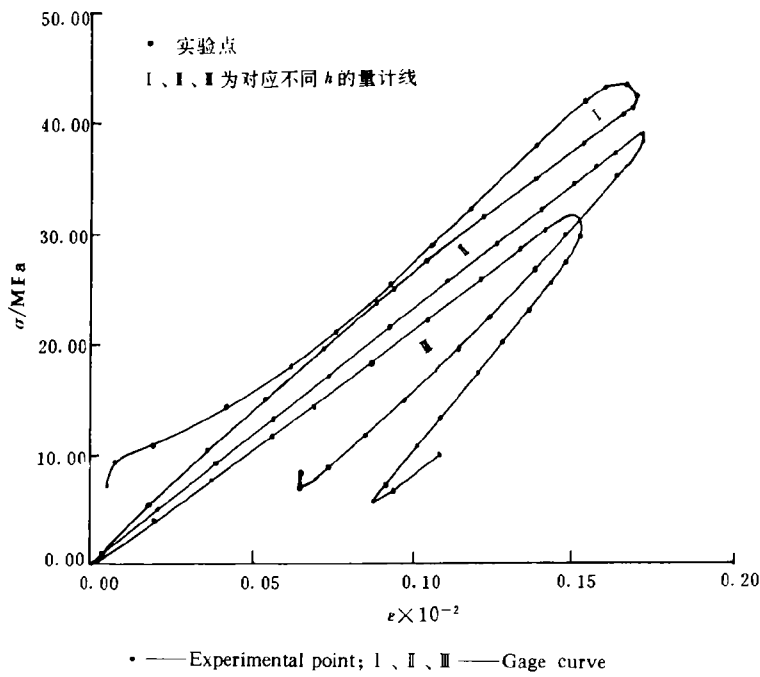


图 9 干燥砂岩应力—应变曲线

Fig. 9 Dry sandstone stress—strain curves

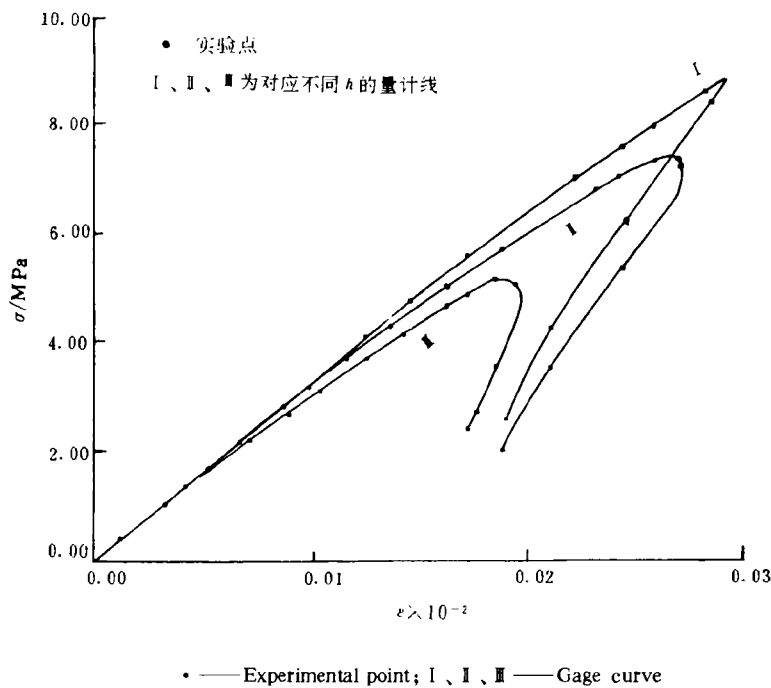


图 10 饱煤油砂岩应力—应变曲线

Fig. 10 Kerosene-saturated sandstone stress—strain curves

图 7~10 的应力—应变曲线滞迴是由可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形组成,后者可能主要为裂隙面间的摩擦错动引起。金属的塑性是位错的迁移,而岩石的塑性与此不同。根据摩擦学原理^[7]得知,施加外力使静止的物体开始滑动时,物体产生一极小的预位移,而达到新的静止位置,预位移大小随切向力而增大。物体开始作稳定滑动时的最大预位移为极限位移,与之对应的切向力为最大静摩擦力,当达到极限位移后,摩擦系数将不再增加。

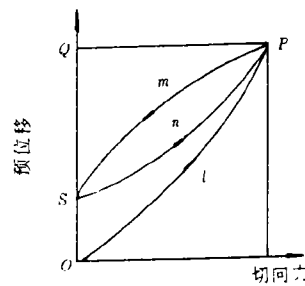


图 11 预位移的弹性

Fig. 11 Predisplacement elastic

由图 11 可知,当施加切向力时,物体沿 OIP 到达 P 点,其预位移为 OQ,当切向力消除时,物体沿 PmS 位移到 S 点,出现的残余位移量为 OS,如果对物体重新施加原来的切向力,则物体将沿 SnP 移到 P 点。岩石在加载过程中,内部的裂隙面间的滑移分两个过程,这两个过程都将留下一段残余变形。其一是裂隙面间的剪切力达到最大静摩擦力前的预位移,它对岩石的初始变形贡献很大;其二是剪切力超过最大静摩擦力的滑动。初始加载时,裂隙面因受到剪切方向力的作用,必然产生预位移,卸载时,裂隙面沿相反方向移动,余下一定的残余位移量。许多裂隙的残余位移量累

积的结果,必将导致岩石样品整体卸载时留下一定量的残余变形,即塑性。其过程二留下的残余变形量将大于过程一留下的残余变形量。另外,岩石中孔洞、裂隙的塌陷也将造成残余变形等。上述几个方面的因素构成了岩石的塑性变形,导致应力—应变曲线的滞迴。所以岩石内部裂隙面间的摩擦预位移与摩擦滑动引起了卸载滞迴,在应力波传播过程中导致了应力波波幅的衰减。

从图2、3、4、6明显看出,应力波在岩石中传播时,随着传播距离的增大波幅在衰减。根据平面应力波衰减特征^[5,8],求得衰减系数(见表1)。

从表1所示数据可见,同种岩石在不同情况下,衰减系数不同。初步分析认为标本之间固有特性的差异引起部分衰减量的不同以外,影响波衰减的主要原因可能为饱和液体的粘滞系数。

3 小 结

冲击波在长杆岩石试件中传播时的衰减测量是很有意义的。由于冲击载荷、加载速率、输入波形等比较好控制,可侧重于岩石破坏机理以及波传播的衰减机理的研究。初步分析认为,岩石中饱和液体的粘滞系数对波的衰减影响较大。

较详细地从岩石固有的特性探讨了 $\sigma-\epsilon$ 曲线滞迴的主要原因。因为摩擦预位移和残余位移量导致岩石的塑性变形,它与金属的塑性有本质的差别,同时由于岩石中的天然孔洞和裂缝受力后塌陷也造成部分残余变形。

我们采用拉格朗日分析和路径线方法及实测应力波形为基础,建立了动态应力应变的本构关系,这样获得的本构关系能真实地反映岩石的固有特性。

参 考 文 献

- 1 Grady D E. Experimental Analysis of Spherical Waves Propagation. *J Geophys Res*, 1993, 78: 1299
- 2 Aidun J B. Study of Shear and Compression Waves in Shocked Calcium Carbonate; ph. D Thesis. Washington State Univ, 1989
- 3 Aidun J B, Gupta M. Analysis of Lagrangian Gauge Measurements of and Nonsimple Plane Waves. *J Appl Phys*, 1991, 69: 6998
- 4 楼涛涛. 花岗岩体应力波传播计算的动态本构关系. *爆炸与冲击*, 1989, 9(3): 220~227
- 5 席道瑛, 郑永来. PVDF 压电计在动态应力测量中的应用. *爆炸与冲击*, 1995, 15(2): 174~179
- 6 席道瑛, 郑永来, 张涛. 应力波在砂岩中的衰减. *地震学报*, 1995, 17(1): 62~67
- 7 温诗铸. *摩擦学原理*. 北京: 清华大学出版社, 1990
- 8 席道瑛, 谢 端. *岩石矿物学杂志*, 1988, 7(3): 258~263

THE EXPERIMENTAL RESEARCH IN DYNAMIC CONSTITUTIVE LAWS OF MARBLE AND SHALE

Xi Daoying, Zheng Yonglai, Zhang Tao

(University of science and technology of China, Hefei, 230026)

ABSTRACT By use of Hopkinson bar apparatus, the paper studies the shock waves experiment of long rock testing samples. Wave attenuation has been measured with PVDF gauges, the attenuation constants of marbles and shales in the conditions of dry, water-saturated and oil-saturated have been obtained. The measured waves have been analysed using Lagrange and path curve methods and we get the dynamic constitutive relations of marble and shale.

KEY WORDS path curve, Lagrange analyse, dynamic constitution, stress wave attenuation