

石灰岩中应力波衰减机制的试验研究

寇绍全 虞吉林 杨根宏

(中国科学院力学研究所, 中国科学技术大学)

提要 本文提出了分析研究岩石杆中应力波衰减机制(初始微裂纹、节理、剪胀等因素的影响)的一种方法,并相应提出了减少波形振荡,提高试验精度的措施。利用这种方法,对这些因素引起应力波衰减的特点进行了初步探讨。此外还提出了在波传播时幅值无衰减的情况下,从一根杆试验中测得的应变波形,求得包括卸载在内的完整的动态滞回应力应变关系的方法。这个方法比 SHPB 法更方便。实验结果说明,完整致密的石灰岩只有在剪胀点以下方可当作弹性材料处理。

一、前 言

本文的目的在于探讨岩石中应力波的衰减机制,为研究岩石的动态本构关系打下基础。如所周知,探矿、工程爆破、防护工程、地震研究等都需要有应力波在岩石中衰减的知识。此外,应力波在不同岩石中具有不同的传播衰减特征,研究应力波衰减机制可以增加对这些岩石的本构关系的认识。因此,这个问题近年来一直受到人们的重视。

在实验室对材料进行一维应力动态试验,经常用三种方法:共振法,超声波法和冲击法。三种方法相比,冲击法的结果更接近实际情况,更有实用价值。它是采用大振幅单次应力脉冲,反映的是材料在高应变率下的行为。但是,由于岩石常有的非均匀性,应力应变关系加卸载间的滞回现象,在小应变时就脆性破裂等特点,考察岩石的动态性质比考察金属或其它一些材料困难得多。近二十多年来人们利用各种冲击加载手段对岩石在高应变率下的性质进行了不懈的探讨。比较流行的方法之一是 Hopkinson 压杆法。在应力波的传播和衰减试验中,通常有两种加载方式:一是用钢球撞击产生钟形脉冲^[1-3];一是用药球爆炸产生随时间成指数衰减的加载波形^[4]。这些研究结果说明波峰随距离大致是按指数衰减的,并得到了不同岩石杆中的衰减指数,使人们有了一些实际概念。然而衰减指数不仅与岩石性质有关,也受加载波形的影响。而影响岩石性质的因素及加载波形在实际问题中变化多端,以致衰减指数的普遍意义非常有限。如果我们能够分别考察各种衰减机制的影响,并且能将每一种机制用严格的数学形式表示出来,则有可能按不同具体情况综合考虑各种因素,得到比较接近实际的结果。

由于上述加载波形的加载部分与卸载部分跟得太紧,以致无法判别究竟是什么机制引起了波幅的衰减。解决的办法是用梯形波加载,使加载部分与卸载部分间有一平台,但这种波形常常在杆中激起强烈的振荡(见照片 1)。由于多数岩石的应力应变关系具有滞

迥的特点,应力峰值的振荡必然伴随能量损耗,给分析应力波的衰减机制带来困难.本文提出了减少甚至消除波形振荡的简单易行的办法和提高试验精度的措施,并利用梯形波加载初步观察到几种不同机制引起波的传播衰减的特征,为进一步研究创造了条件.

二、无振荡波形的获得及测试精度的提高

动态试验装置如图1所示.

该试验采用圆柱形和阶梯圆柱形两种铝弹.圆柱形弹长100mm,阶梯弹的截面积比为3:1,总长180mm,较粗的一段长100mm.用长400mm的铝杆(Ly-12Al)做波导杆和调试杆,因为铝在本实验的压力范围内表现了较好的弹性,且波阻抗与石灰岩试样非常接近.试件为石灰岩.有长试件和短试件两种,长试件(290—310mm)用于动态试验,短试件(23mm)用于静态试验.弹、波导杆和试件都具有相同的直径(14.9mm).所有试件的端面都经过仔细研磨以求平整和垂直于轴线.静态试验的试件的不平行度和不平整度都小于 $5\mu\text{m}$.所有接触面都用 MoS_2 润滑.

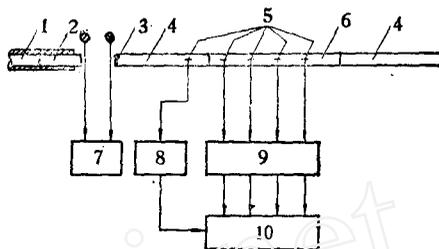


图1 一维应力波实验装置简图

- 1. 火药枪 2. 子弹 3. 胶布 4. 波导杆
- 5. 应变片 6. 岩石杆 7. 光电测速系统
- 8. 触发系统 9. 应变仪 10. 示波记录系统

应变测量采用 $2 \times 3\text{mm}$ 箔式电阻应变片.片间距为75和 $100(\pm 0.5)\text{mm}$ 两种.应变信号的放大和记录设备的频率响应不小于 1MHz .波形照片用HCZ-1型立体坐标量测仪读数,精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,为避免波过早地从试件端部反射而干扰测量记录,在岩石杆上接了一根同种试件的延长杆.为消除界面的影响,在我们的试件加工精度下,长杆试验中应变片高杆端不小于 30mm ,即两倍杆直径.

用铝弹直接打在铝杆端部,可以记录下铝杆中的应变波形(照片1).虽然测点距铝杆的打击端为17倍铝杆直径,波形振荡仍旧非常厉害.众所周知,振荡的原因在于杆的

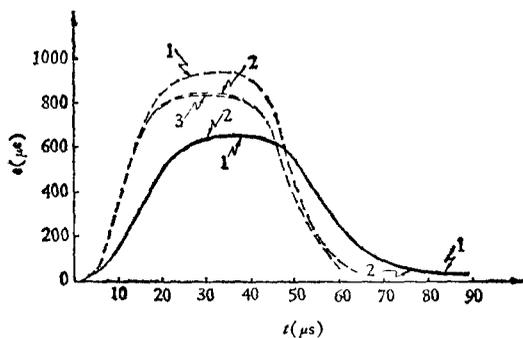


图2 铝杆和15#岩石杆中的应变波形
图中1、2、3为测点号

- 铝杆中的波形 打击速度 $V = 7.2\text{m/s}$
- 15#岩石杆中的波形 打击速度 $V = 10.6\text{m/s}$
- 测点距 $l_{12} = 264\text{mm}$ $l_{12} = l_{23} = 100\text{mm}$
- 时间平移 $T = 51.1\mu\text{s}$ 1, 2 测点间有一节理

的横向惯性效应^[5,6].要减少振荡必须减少加载波的高频成分.为此,我们改变了子弹撞击端的形状或在波导杆和子弹间加一层软垫.在波导杆和子弹间加一层胶布后,我们得到的波形见照片2、3、4和5.比较实验所得波形照片可以证明,只要在波导杆头部贴一层医用胶布,波形质量会有明显改善.

静态试验是在WD-5型材料试验机上进行的.恒速加载,应变率约为 $3 \times 10^{-5}/\text{s}$.为便于动静态比较,静态试验的一些试件是直接长试件上截下来的,这时两者用同样的试件号.

图 2 画出了铝杆中相距 264mm 两测点的波形。图中将第二测点的波形的时间座标平移了一个时间间隔 T ，以使两个波形前沿互相重合。由图 2 可见，铝杆中两个波形重合相当好，顶部没有振荡，波幅偏差小于 2%。经过多次试验得到铝杆中的平均波速为 5160m/s，其误差为 $\pm 1\%$ 。表 1 是三种方法所得结果的比较。各种方法所得模量的最大偏差小于 2%，这一方面说明 Ly-12Al 在本实验应力范围内表现出很好的弹性，材料性质与应变率无关，且试验满足一维应力条件；另一方面也说明实验精度比较高。

表 1 Ly-12Al 的力学性质 ($\rho = 2.77\text{g/cm}^3$)

实 验 方 法	静 态 ($\dot{\epsilon} \sim 10^{-2}\text{s}^{-1}$)	冲 击 法 ($\dot{\epsilon} \sim 10^2\text{s}^{-1}$)	共 振 法*	平 均
杨氏模量 $E (\times 10^3\text{kg/cm}^2)$	7.41	7.53	7.68	7.54
弹性波速 $\sqrt{E/\rho} (\text{m/s})$	5120	5160		
泊松比 ν	0.327			

* 由力学研究所蒋灿兴测得。

三、岩石杆中应力波的传播和衰减

本次试验所用岩样为深灰色石灰岩，个别试件中可见方解石脉夹杂，实测密度 $\rho = 2.69 \pm 0.01\text{g/cm}^3$ 。全部试件选自一个大块岩芯，但质地十分不均匀，以致静态实验结果强度值分散，破坏应力有的高达 2200kg/cm^2 ，有的低到 460kg/cm^2 。长杆材质较好，但也有不均匀性影响。尽管岩样的非均匀性给工作带来很多麻烦，但仍可以看到应力波在杆中传播和衰减的一些规律。波在这些试件中的传播特征大致可分成四类。

1. 弹性响应

图 3 是从 10# 杆中相距 200mm 的两个测点测得的应变波形，时间坐标的原点都取在

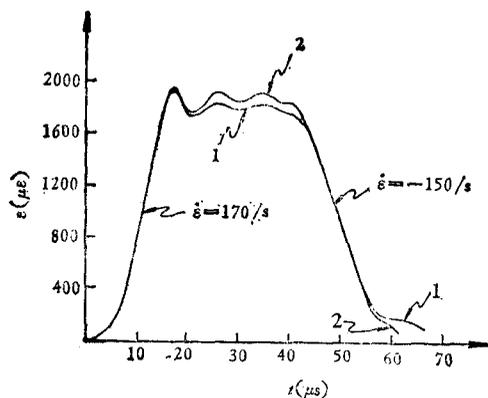


图 3 10# 岩石杆中的应变波形

打击速度 $V = 19.8\text{m/s}$, $l_{12} = 200\text{mm}$

波头上。两处波形的前沿和后沿都是重叠的。图 2 中画出了 15# 杆中三个不同测点的波形。2、3 两测点的波形重叠相当好。(1、2 两点间有节理，在下段讨论。)在 16# 杆中 2、3 间也有类似情况。以上三例的共同特点是：峰值基本上无衰减，波形无弥散。这是弹性波的特征。这些试件比较致密，无夹杂，外观无明显裂隙。这说明完整致密的石灰岩在低压区是可以当线弹性处理的。

静态试验中 3#、13#、24#、26# 试件在最大应力小于 1000kg/cm^2 时，无论轴向应力 σ 与轴向应变 ϵ 曲线或 σ 与横向应变 ϵ_θ 曲线的加卸载线都相互重合较好，表现为弹性，如图 6。从图 6、7 中我们还可以看到 σ - ϵ 曲线

直到破坏为止都表现为较好的线性, 而 $\sigma-\varepsilon_\theta$, $\sigma-\Theta$ 的线性范围则要小得多, 其中 $\Theta = \frac{\Delta V}{V_0}$ 表示体应变. 而且一旦它们偏离线性, 卸载后即出现残余应变. 因此, 岩石的弹性极限不应在 $\sigma-\varepsilon$ 图上定, 而应考察 $\sigma-\varepsilon_\theta$ 或 $\sigma-\Theta$ 图. 正如后面我们要指出的, 我们认为弹性极限以取剪胀开始点为好. 这是与金属材料不同的.

2. 波通过节理的衰减

15# 杆的 1、2 测点间有一节理, 节理的法向与杆轴的夹角为 36° . 由图 2 可见, 1、2 间的应变幅值衰减了约 10%. 26# 的 1、2 测点间有一与轴线成 60° 的节理, 波通过它后幅值明显衰减, 波形也有变化. 这些试件本身都是弹性的, 衰减可归结为节理的作用. 节理面间的摩擦机制^[7]可能是其原因之一. 但实际情况比较复杂, 有待进一步研究.

3. 波在具有滞迴应力应变关系的材料中的传播特征

图 4 所示的波在传播过程中前沿加载波基本上不变, 峰值平台无明显衰减, 后沿应变较大时卸载波传播得比加载波快. 在 18# 杆中也有类似现象.

从应变率无关假设出发, 我们可以从不同位置测得的两个应变波形得到岩石杆的动态应力应变关系.

加载时: $E = \rho \left(\frac{l}{T} \right)^2$, 卸载时: $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \rho \left(\frac{l}{T - \Delta T(\varepsilon)} \right)^2$. 由图 4 可见, T 不随 ε 的大小而变, 说明加载时 $\sigma-\varepsilon$ 保持直线关系. $\Delta T(\varepsilon)$ 表示相应于某个

ε 的卸载波通过距离 l 所需的传播时间与 T 的差. 一般情况下 ΔT 随应变大小而变, 因此卸载模量亦随应变大小而变. 表 2 是 11# 杆的应力应变关系, 与图 4 对应.

岩样静态试验结果与表 2 十分类似, 如 14# 试件加载时 $E_s = 6.53 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 卸

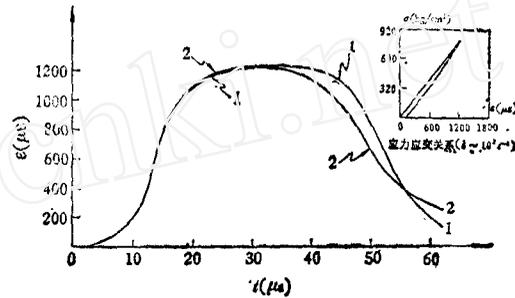


图 4 11# 岩石杆中的应变波形及相应的 $\sigma-\varepsilon$ 关系
打击速度 $V = 11.7 \text{m/s}$, $l_{12} = 150 \text{mm}$

表 2 11# 杆的加载和卸载模量

$\varepsilon(\mu\varepsilon)$	加载	卸											载			
	0-1200	1200	1120	1040	960	880	800	720	640	560	480	400	320	240		
$E(10^5 \text{kg/cm}^2)$	6.89	10.78	9.54	9.18	8.51	8.20	8.08	7.91	7.64	7.58	7.48	7.27	7.13	5.69		

表 3 岩样动态 ($\dot{\varepsilon} \sim 10^2 \text{s}^{-1}$) 与静态 ($\dot{\varepsilon} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$) 模量比较

试件号	13	13~2	14	16	备注
加载波速 (m/s)	5210	5220	5150	5030	1. 加载波速为实测结果; 2. 13~2 表示 13 号试件重复加载 3. 16# 静态试验用黄油润滑, 其余用 MoS_2
动态模量 $E_d(10^5 \text{kg/cm}^2)$	7.45	7.48	7.28	6.94	
静态模量 $E_s(10^5 \text{kg/cm}^2)$	6.83	6.88	6.53	6.70	
$\frac{E_d - E_s}{E_s}(\%)$	9.1	8.7	11.5	3.6	

载开始 $E_u = 6.94 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 到卸载结束时为 $5.88 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 中间连续过渡. 所不同的是静态加载时模量较低, 模量是与应变率有关的, 所以这种岩石实质上仍属应变率

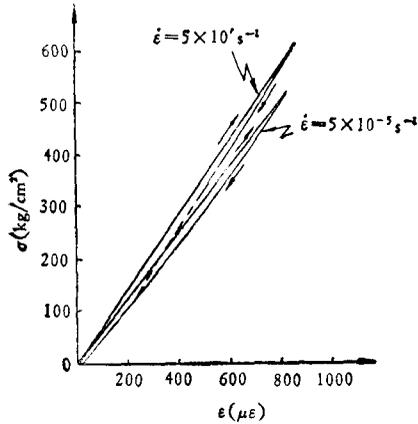


图5 14# 石灰岩的动静态应力应变关系的比较

有关材料, 见表3和图5. 从应变率无关假设前提出发得到的应力应变关系只是在某个应变率范围内的平均值.

由上述分析可见, 在应力应变关系出现滞迴时, 如果加载波后紧接着卸载波, 则因为卸载波比加载波快, 峰值很快会被衰减; 如果输入杆中的应力波是带有波顶平台的脉冲, 则脉冲的有效宽度会变窄. 最后卸载波赶上加载波导致波幅的衰减. 因此, 滞迴是岩石中应力波衰减的一种原因.

需要指出, 带有波顶平台的梯形应力波在杆中传播时, 峰值不随距离而衰减. 因而我们可以利用这种梯形脉冲获得岩石的包括加载段和卸载段的完整的应力应变关系. 用短试件的 SHPB 方法虽然也曾有人测过动态应力应变关系及破坏应力^[6], 可是沿试件应力均匀分布的条件限制了人们得到较准确的模量. 因而在这种情况下用梯形脉冲在长杆中传播的实验方法较 SHPB 好, 尤其可以得到卸载曲线.

需要指出, 带有波顶平台的梯形应力波在杆中传播时, 峰值不随距离而衰减. 因而我们可以利用这种梯形脉冲获得岩石的包括加载段和卸载段的完整的应力应变关系. 用短试件的 SHPB 方

4. 剪胀的影响

图6和7是3#试件静态压缩试验结果. 如果假设应力达到一定值时, 岩样开始出现

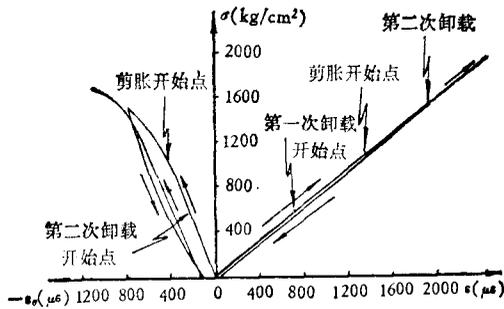


图6 3# 岩样静态 $\sigma-\epsilon$, $\sigma-\epsilon_0$ 关系曲线

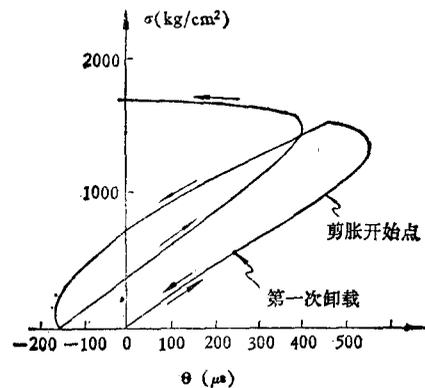


图7 3# 岩样静态 $\sigma-\theta$ 关系曲线

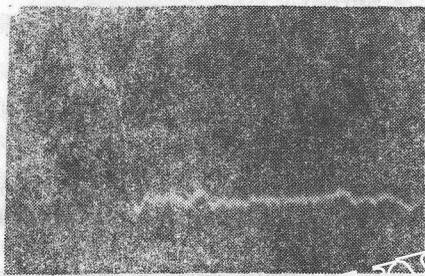
轴向排列的微裂纹, 且应力增加, 裂纹的数目及平均长度增加, 我们不难解释图中的现象. $\sigma-\theta$ 图上曲线开始偏离直线之点, 即新裂纹开始出现点被 Brace 等人^[7]称为剪胀开始点. 3# 岩样的剪胀点约为 1000kg/cm^2 . 超过剪胀点后, 压应力对体积变形有两个互相矛盾的影响: 一是压缩; 一是使之膨胀. 岩样的变形将从压力增加体积压缩变为压力增加体积膨胀, 最后达到破坏. 这种现象是与普通金属受压时不同的. 3# 岩样的破坏应力稍大于 1700kg/cm^2 . 岩样受压时体积膨胀的原因在于微裂纹的生成. 因此, 岩样在这阶段有一最大压缩量. 3# 试件在一维应力下最大压缩 $564 \mu\epsilon$, 相应的 $\sigma = 1300 \text{kg/cm}^2$, 约为破坏

应力的 77%。剪胀应力稍小于破坏应力的 2/3。一般说来^[10], 最大体积压缩时的应力为破坏应力的 72—95%, 剪胀应力为破坏应力的 1/3—2/3。2#, 26# 试件有类似现象。但 2# 试件剪胀开始较早。剪胀开始后, 卸载会出现残余变形。因此, 即或可以当弹性处理的岩样, 其弹性极限也只能是剪胀点, 而不是破坏应力。而破坏应力可以是剪胀应力的 1.5—3 倍。

当杆中传播的应力波幅较高时, 岩石会出现破裂, 发生剪胀。剪胀必然伴随着能量损耗, 因而是一种应力波衰减机制。对此我们进行了初步观察, 但还未得到确切的结果, 有待进一步研究。

四、结 论

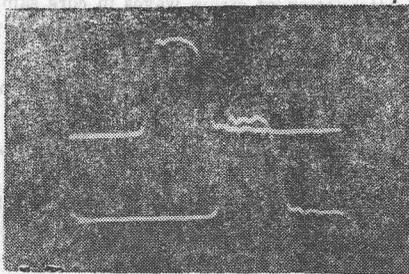
1. 过去人们总是用钟形或类似于三角形的脉冲来研究波的衰减, 所得信息较少。本



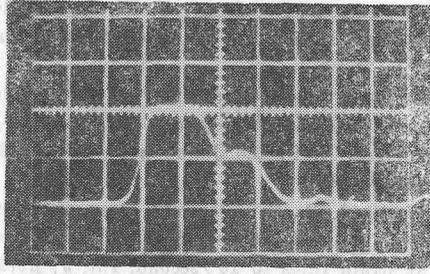
照片 1 平头弹直接撞击铝杆, 在铝杆中测得的波形照片, 打击速度 $V = 12.0\text{m/s}$



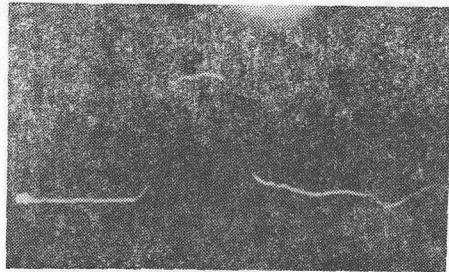
照片 2 波导杆端部有医用胶布, 阶梯弹以 $V = 10.5\text{m/s}$ 打击后, 导杆中的波形



照片 3 波导杆端部有医用胶布, 圆柱形弹以 $V = 17.6\text{m/s}$ 打击后, 导杆中的波形



照片 4 波导杆端部有医用胶布, 阶梯弹以 $V = 11.0\text{m/s}$ 打击后, 16# 岩石杆中的波形



照片 5 波导杆端部有医用胶布, 圆柱形弹以 $V = 12.8\text{m/s}$ 打击后, 17# 岩石杆中的波形

文利用梯形波来研究应力波在岩石中的传播,使我们可以把几种衰减机制进行分析研究。本文采用的减少波形振荡,提高试验精度的方法在用一维应力波研究材料性质的其它试验中也普遍有用。

2. 完整致密的石灰岩在低压部分可以当线弹性处理,静态和动态试验都证明了这点。但弹性极限不应定义为 $\sigma-\varepsilon_z$ 曲线斜率的减小点,而应定义为剪胀开始点的应力。也不能用破坏应力来近似,因为剪胀应力只有破坏应力的 $1/3-2/3$ 。

3. 用本文建议的梯形脉冲加载法可以很方便地得到加卸载间有滞迴现象的岩样包括卸载在内的动态应力应变关系。且所测石灰岩杆在一维应力下模量随应变率增加而增加。

4. 应力应变关系的滞迴,节理面的摩擦是剪胀点以下应力波的衰减机制。剪胀点以上由于岩石破裂引起的应力波的衰减尚待进一步研究。

郑哲敏、朱兆祥、王礼立等同志对该项工作给予了指导。白以龙同志对本文初稿提出了宝贵意见。吴本浔、李禾、于桂清、褚瑶、张柯等同志在试验中给了我们很大的支持和帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Goldsmith, W. and Austin, C. F., Some dynamic characteristics of rocks, *Stress Waves in Anelastic Solids*, ed. by H. Eckstein and W. Prager, Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag (1964), 277—303.
- [2] Goldsmith, W., Austin, C. F., Wang, C.-C. and Finnegan, S., *Stress waves in igneous rocks*, *J. Geophys. Res.*, **71** (1966), 2055—2078.
- [3] Ricketts, T. E. and Goldsmith, W., *Dynamic properties of rocks and composite structural materials*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **7** (1970), 315—335.
- [4] Fournery, W. L., Dally, J. W. and Holloway, D. C., *Attenuation of strain waves in core samples of three types of rocks*, *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, **33**, 1(1976), 121.
- [5] Bertholf, L. D., *Feasibility of two-dimensional numerical analysis of the split-Hopkinson pressure bar system*, *J. Appl. Mech.*, **41** (1974), 137—144.
- [6] Conway, H. D. and Jakubowski, M., *Axial impact of short cylindrical bars*, *J. Appl. Mech.*, **36** (1969), 809.
- [7] Walsh, J. B., *Seismic wave attenuation in rock due to friction*, *Geophysics*, **71**, 10, 2591—2599.
- [8] Perkins, R. D., Green, S. J. and Friedman, M., *Uniaxial stress behavior of porphyritic tonalite at strain rates to 10^3 /second*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **7** (1970), 527—535.
- [9] Walsh, J. B. and Brace, W. F., *Mechanics of rock deformation*, *Rock mechanics symposium*, AMD, **3** (1973), 1—24.
- [10] 寇绍全, 裂隙对岩石力学性质的影响, 《力学进展》, 总第 42—43 期 (1980), 89—98.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE ATTENUATION
MECHANISMS OF THE STRESS WAVE
PROPAGATION ALONG A
LIMESTONE BAR

Kou Shaoquan Yu Jilin Yang Genhong

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, University of Science and Technology of China)

Abstract

This article proposes a testing method by which different attenuation mechanisms of the stress wave propagation in a rock bar can be investigated separately. At the same time, methods to suppress local oscillations superposed on the strain profile and improve the experiment are also recommended. By using this method various characteristics of propagation and attenuation of the stress waves in a rock bar have been examined preliminarily. From informations about wave propagation a complete dynamic hysteretic stress-strain curve may be constructed. Therefore this leads to a more convenient way for constructing the stress strain curve than the SHPB method. The results in this study also suggest that it is reasonable to treat a hard, fine-grained limestone bar as an elastic one provided the stresses are such that dilatancy has not occurred.