

岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件

周子龙^{1, 2}, 李夕兵¹, 岩小明¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 江西铜业集团公司 博士后工作站, 江西 贵溪 335400)

摘要: 从分析霍布金逊压杆测试中试样变形应力、入射应力、反射应力和透射应力的相互关系入手, 获得满足试样恒应变率变形所需的加载条件, 即只有当加载应力和试样的变形应力具有相同的变化规律时, 试样变形才处于恒应变率状态。试验结果表明, 整形器法和异形冲头法都能在一定程度上实现试样的恒应变率测试, 双试样法实际是整形器法的一个特例。整形器法更适合于理想弹性岩类的测试, 异形冲头法对具有幂函数型本构曲线岩类和未知本构特征材料的测试有利, 并且可重复性好。能产生半正弦波的异形冲头法可减小波形弥散对测试结果的影响。

关键词: 岩石力学; 霍布金逊压杆; 恒应变率; 加载条件

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)12 - 2445 - 08

LOADING CONDITION FOR SPECIMEN DEFORMATION AT CONSTANT STRAIN RATE IN SHPB TEST OF ROCKS

ZHOU Zilong^{1, 2}, LI Xibing¹, YAN Xiaoming¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Postdoctoral Work Station of Jiangxi Copper Corporation, Guixi, Jiangxi 335400, China)

Abstract: The relationships among specimen stress, incident stress, reflected stress and transmitted stress were analyzed; and the loading condition for specimen deformation at constant strain rate was found out, i. e., only when the loading stress and deformation stress in specimen have the same changing pattern, the specimen deforms at a constant strain rate. The tests show that constant strain rate of specimen can be achieved by pulse shaper method and special shape striker method. Double specimen method is actually a special case of pulse shaper method. Pulse shaper method is favorable for tests of perfect elastic brittle material. And special shape striker method is useful for the split Hopkinson pressure bar(SHPB) tests of materials with power function constitutive relation or materials with no foregone constitutive information. Special shape striker method has more repeatability than pulse shaper method. Special shape striker method with half-sine incident wave can reduce the influences caused by wave dispersion.

Key words: rock mechanics; split Hopkinson pressure bar(SHPB); constant strain rate; loading condition

1 引言

岩石的率相关特性及不同应变率下的力学行为研究对认识岩石变形机制、指导岩石钻凿和工程爆

破有着重要意义, 是岩石力学和工程爆破领域长期关注的焦点^[1, 2]。基于 MTS, INSTRON、气动加载机、凸轮塑性计、飞轮、霍布金逊压杆(SHPB)、膨胀环、平板撞击等试验设备, 人们对岩石在 $10^{-9} \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ 应变率段的力学特性进行研究发现, 应变率

收稿日期: 2009 - 03 - 20; **修回日期:** 2009 - 05 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50904079, 50490274); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB714002); 中国博士点学科基金资助项目(200805331143)

作者简介: 周子龙(1979 -), 男, 博士, 1998 年毕业于中南大学采矿与岩土工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学及岩土工程灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: zlzhou@mail.csu.edu.cn

是影响岩石力学特性的重要因素, 岩石强度与应变率表现出指数相关关系^[3~8], 高应变率下岩石的强度可以是低应变率下岩石强度的数倍到数十倍; 同时, 对某些岩石来说, 应变率不仅影响它的强度大小, 还决定着岩石的峰前本构演化路径, 不同应变率对应着不同的应力应变路径(见图 1, 其中, 虚线为非恒应变率下获得的试样应力-应变曲线; 实线为恒应变率下岩石的应力-应变曲线, $\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2 > \dot{\epsilon}_3$), 如果试验中不能保证试样的恒应变率变形, 获得的应力-应变曲线将包含岩石在多个应变率状态下的变形信息, 测得的应力-应变曲线存在较大振荡, 如图 1(b)中虚线所示。因此, 对于应变率相关岩类, 特别是对具有图 1(b)本构特性的岩类, 在试验中保证加载过程中试样的全程恒应变率变形, 有着重要的意义。

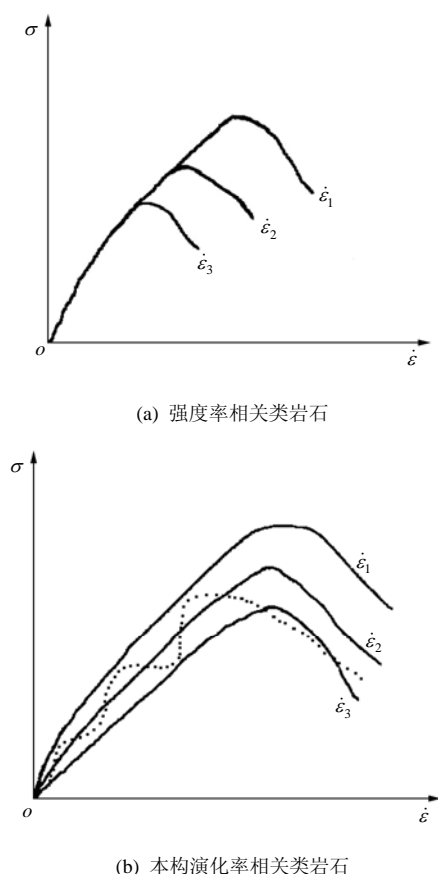


图 1 岩石的率相关本构特性示意图

Fig.1 Schemes of strain rate dependency of rock

SHPB 是一种用于材料中高应变率($10^0 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)段动态测试的试验装置, 最初大量应用于金属材料的动态测试, 因为它具有结构简单、操作方便、可重复性好等优点, 在 20 世纪 80 年代末, 被引入到

岩石、陶瓷、混凝土等脆性材料的动态力学特性(动本构、吸能规律、破碎特性)测试当中^[9~11]。但由于岩石类材料极易脆性破坏, 在开展 SHPB 试验时存在如下问题:

(1) 大尺寸试样所带来的应力平衡、均匀化与波形弥散问题。岩石类地质材料的颗粒较大, 要使试样能代表岩石的真实力学特性就必须具备较大的表观尺寸, 大尺寸试样就需要大杆径装置, 由此引起的波形弥散、惯性效应、应力不平衡或不均匀现象更加严重, SHPB 测试技术的基本适用条件受到更大挑战。

(2) 试样在应力平衡前的过早破坏问题。岩石类脆性材料破坏应变极小, 在用传统矩形波加载时, 试样往往在达到应力平衡之前已经破坏。根据 SHPB 原理, 试样未达到应力平衡之前的测试数据不能用于结果计算。

(3) 试样的恒应变率加载与变形问题。岩石类材料往往是应变率高度敏感性材料, 其强度与应变率有指数关系, 只有岩石变形过程处于同一应变率时, 所得的结果才能作为本构关系使用, 然而试验中却很难保证试样的恒应变率变形。

以上 3 个问题是目前国际上研究的热点与焦点, 问题(1)决定着 SHPB 装置的适用性问题, 问题(2)关系着测试结果的可用性问题, 问题(3)则关系着测试结果的准确性问题。实际上, 三者相辅相成, 要用 SHPB 进行岩石动态测试, 问题(1), (2)就必须解决, 同时, 要使试验结果有意义并尽量精确, 就必须解决问题(3)。

针对岩石 SHPB 测试中的这些难题, 国内外学者开展了一系列探索研究。为了开展岩石、混凝土等动态特性研究, C. A. Ross 等^[12, 13]先后研制了大杆径 SHPB 系统。为了克服传统矩形加载波对脆性材料测试的不利影响, 刘孝敏和胡时胜^[14]通过加工变断面入射杆实现入射波的缓慢上升; 李夕兵等^[15~18]则通过设计特殊形状冲头达到入射波形的人为控制; 同时 S. Nemat-Nasser 等^[19]提出的整形器法也得到了良好应用, D. J. Frew 等^[20~22]对铜质或其他软材料垫片进行了试验研究。对于大杆径带来的波形弥散、应力不均匀问题, 实际是所有 SHPB 装置存在的共性问题, 只是在大杆径 SHPB 中表现得更加明显, 是人们长期研究的热点^[13~28]。对于 SHPB 测试中试样的恒应变率加载与变形问题, 则是

近年来认识到岩石类材料应变率效应对试验结果的致命影响后才引起了高度重视^[3~8]。李夕兵等^[15, 20, 26]在试验中进行了大量探索研究, 获得了岩石近似恒应变率变形的测试结果, 但对隐藏在这些现象背后的内在条件仍有待揭示, 以期指导岩石 SHPB 测试并获得精确的测试结果。

本文从分析 SHPB 测试中试样外部应力与内部应力的物理意义和转化关系入手, 将试样变形应变率用外加应力进行表达, 进而获得试样恒应变率变形的加载条件, 为深入认识和理解率相关材料 SHPB 测试提供了理论依据。

2 SHPB 测试中试样应变率对试验结果的影响

2.1 SHPB 测试原理与试样恒应变率变形的判定

SHPB 测试装置(见图 2)通常由入射杆、透射杆、吸收杆、冲头、冲头发射机构、数据采集处理系统组成, 试样夹于入射杆、透射杆之间。试验时冲头以一定的速度撞击入射杆, 产生的应力波沿入射杆传播, 当应力波到达试样与弹性杆交界面后, 一部分被反射回入射杆, 另一部分则发生透射, 进入透射杆, 最后传入吸收杆。贴在入射杆和透射杆上的应变片采集应力(应变)波信号并传入数据采集处理系统进行处理, 获得试样的应力-应变关系、应变率历程、能量吸收等结果。

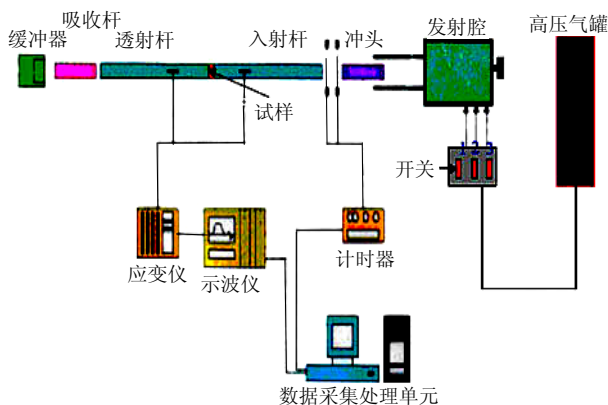


图 2 典型的 SHPB 试验装置

Fig.2 Typical SHPB testing device

在 SHPB 测试装置中取如图 3 所示的入射杆、试样、透射杆部分进行分析(图中: $\sigma_I(t)$, $\sigma_R(t)$ 和 $\sigma_T(t)$ 分别为某一时刻 t 试样两边弹性杆中的入射、反射和透射应力; $v_I(t)$, $v_R(t)$ 和 $v_T(t)$ 分别为某一

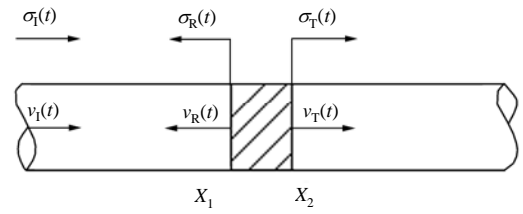


图 3 应力波在试样与弹性杆交界面的传播

Fig.3 Wave propagation at interfaces between specimen and elastic bars

时刻 t 试样两边弹性杆中的入射、反射和透射的质点速度), 在试样与弹性杆界面, 二者紧密接触, 力和质点速度相等; 对于试样, 左右端面的应力均值为其平均应力, 即

$$\sigma(t) = [\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)]A_e / (2A_s) \quad (1)$$

由端面质点速度差与试样长度比可分别得到试样应变、应变率:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} \int_0^t [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] \quad (3)$$

式中: ρ_i , C_i , A_i ($i = e, s$) 分别为弹性杆或试样的密度、弹性波速与截面积, 下标区分弹性杆与试样; L_s 为试样长度。

当应力波在试样中来回折反射数个来回后, 试样达到应力平衡(均匀), 则下式成立:

$$\sigma_s(t)A_s = [\sigma_I(t) + \sigma_R(t)]A_e = \sigma_T(t)A_e \quad (4)$$

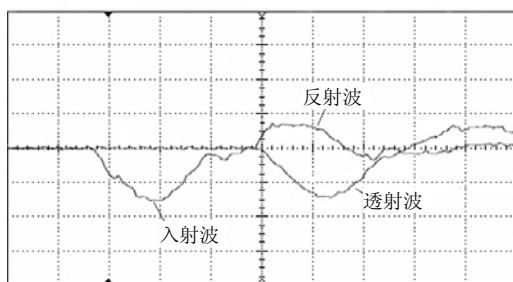
由式(3)可知, 此时有

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2\sigma_R(t)}{\rho_e C_e L_s} \quad (5)$$

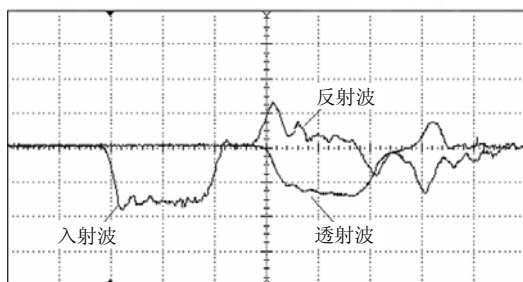
式(4)中, 试样变形的应变率由反射应力波的时间历程唯一确定, 也就是说, 如果 SHPB 试验获得的测试信号中, 反射波保持不变(存在反射平台), 则可认为试样变形过程是在恒应变率下发生。

2.2 SHPB 试验中试样非恒应变率变形对测试结果的影响分析

在开展能产生矩形波的圆柱形冲头试验和能产生半正弦波的异形冲头试验的基础上, 选取 2 组有代表性的测试信号进行分析。图 4(a)是用异形冲头试验所得的信号, 它的反射波具有较好的平台段, 可知试样变形过程处于一个恒定的应变率状态, 由式(5)求得的平台段应变率为 78 s^{-1} 。由此信号得到的应力-应变关系显示于图 5 中, 可以看出: 曲线



(a) 半正弦波试验所得信号



(b) 传统矩形波试验所得信号

图 4 2 次试验所得测试信号

Fig.4 Experimental signals from two tests

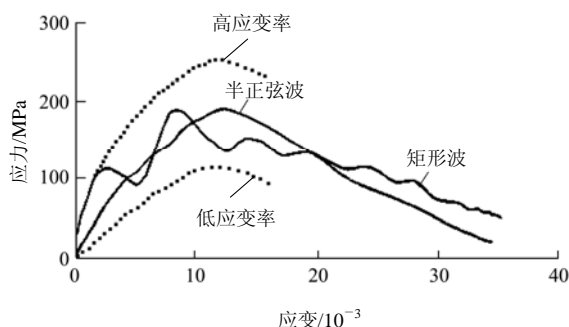


图 5 由图 4 测试信号获得的应力 - 应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain curve obtained from signals in Fig.4

光滑无明显突跃和振荡,可看作是一定应变率(78 s^{-1})下岩石的动态本构关系曲线。图 4(b)为圆柱形冲头试验所得的一组信号,从图中可以看出,反射信号的应力波幅值变化较大,由式(5)计算发现前段最大应变率值达到 130 s^{-1} ,后段应变率迅速变小至 30 s^{-1} ,并经历多次振荡,这样的反射波表明试样变形经历了多个应变率状态。得到的相应应力 - 应变关系也显示于图 5 中,从图 5 还可以看出,曲线振荡很大。为了更进一步说明这一现象,矩形冲头所得的应力 - 应变曲线振荡可以解释为:在试样加载开始段,试样在矩形波陡峭的波峰加载下,应变率急速增大,试样应力 - 应变演化处于较高应变率的

本构轨迹上;而后,随着试样的局部破坏,阻抗减小,传入其中的应力波幅值和能量减小,试样出现短时卸载与再次加载,加载率不断变化,试样应变率也随之振荡,试样在多个应变率区段徘徊。这种情况下得到的岩石应力 - 应变关系曲线包含了多个应变率段的岩石力学行为,不能简单地看作某一应变率下岩石的动态本构曲线。

3 满足试样恒应变率变形的加载条件

从前面分析可见,岩石 SHPB 测试中,试样应变率历程是否恒定直接关系着测试结果作为岩石本构关系的可信度,因此,必须找到影响试样应变率恒定的控制因素,才能从根本上指导 SHPB 试验。根据 SHPB 试验原理,对一次试验来说,弹性杆和试样在测试时是一定的,而反射波与透射波依赖于入射波,随着入射波的变化而变化。也就是说,在弹性杆和试样确定的情况下,反映试样应变率状态的反射波依赖于入射应力,通过不断改变入射波可获得具有平台特征的反射波,从而实现试样的恒应变率变形。因此,对试样变形、入射波、反射波和透射波的关系进行分析,可望找到试样恒应变率变形的内部规律。

3.1 试样应变率与入射应力的关系分析

对于 SHPB 试验,做如下假设:

(1) 弹性杆的各项参数(截面、波速等)不受试验中小变形的影响。

(2) 试样最初长度为 l^* ,最初截面积为 A^* ,达到应力平衡时试样的应力为 σ_0 ,应变为 ε_0 。需要说明的是,对于 SHPB 试验,其正确性的前提之一一是要求试样两端应力均匀,后面的分析始于这一条件得到满足后试样的变形。至于试样在不同入射应力波下如何达到应力均匀及达到应力均匀需要的时间可以参考相关研究成果^[3, 29]。为了与物理实际一致,不致引起歧义,这里区分了试样初始形状和它达到应力均匀时形状的改变,并用不同符号进行标识。

(3) 假定试样的应力应变关系具有图 6 所示的一般形式。将其进行 n 段折线逼近,任一段变形满足:

$$\sigma_s = \sigma_{i-1} + E_i(\varepsilon_s - \varepsilon_{i-1}) \quad (6)$$

式中: E_i 为试样的弹性模量,是密度、应变率等变

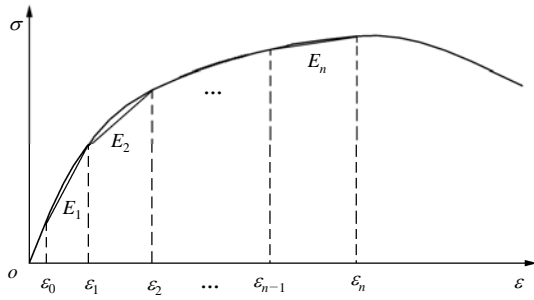


图 6 假定的岩石试样应变 - 应变曲线

Fig.6 Assumed stress-strain curve of rock specimen

量的函数, 在 ε_{i-1} 与 ε_i 之间的微段为常数。在任一段, 试样的起始长度为 l_{n-1} , 截面积为 A_{n-1} , 本段结束时试样长度为 l_n , 截面积为 A_n 。

对试样应力平衡后的第一段进行分析, 这时试样的应力 - 应变关系为

$$\sigma_s = \sigma_0 + E_1(\varepsilon_s - \varepsilon_0) \quad (7)$$

根据式(4), (5)可知试样应变率为

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{2}{\rho_e C_e l_0}(\sigma_1 - \sigma_T) = \frac{-2\sigma_R}{\rho_e C_e l_0} \quad (8)$$

根据 SHPB 原理, 有

$$\sigma_T A_e = \sigma_s A_s = A_s[\sigma_0 + E_1(\varepsilon_s - \varepsilon_0)] \quad (9)$$

试样体积不可压缩, 则有

$$A^* l^* = A_0 l_0 = A_s l_s = A_s l^*(1 - \varepsilon_s) \quad (10)$$

由式(7)~(10)可得

$$\sigma_1 = \frac{\rho_e C_e l_0}{2} \dot{\varepsilon}_s - \frac{A^* E_1}{A_e} + \frac{A^*(\sigma_0 - E_1 \varepsilon_0 + E_1)}{A_e} \frac{1}{1 - \varepsilon_s} \quad (11)$$

对式(11)进行级数展开得

$$\sigma_1 = \frac{\rho_e C_e l_0}{2} \dot{\varepsilon}_s - \frac{A^* E_1}{A_e} + \frac{A^*(\sigma_0 - E_1 \varepsilon_0 + E_1)}{A_e} (1 + \varepsilon_s + \varepsilon_s^2 + \varepsilon_s^3 + \dots) \quad (12)$$

对于岩石类脆性材料, 其动态破坏时的应变值一般小于 0.01, $\dot{\varepsilon}_s$ 很小, 略去式(12)中的高次项及小项, 整理得

$$\sigma_1 \doteq \frac{\rho_e C_e l_0}{2} \dot{\varepsilon}_s + \frac{A^*}{A_e} [\sigma_0 + E_1(\varepsilon_s - \varepsilon_0)] \quad (13)$$

同理可得第二段入射应力波与试样变形关系为

$$\sigma_1 \doteq \frac{\rho_e C_e l_1}{2} \dot{\varepsilon}_s + \frac{A^*}{A_e} [\sigma_1 + E_2(\varepsilon_s - \varepsilon_1)] \quad (14)$$

第 n 段:

$$\sigma_1 \doteq \frac{\rho_e C_e l_{n-1}}{2} \dot{\varepsilon}_s + \frac{A^*}{A_e} [\sigma_{n-1} + E_n(\varepsilon_s - \varepsilon_{n-1})] \quad (15)$$

从以上推导可以发现, 对任意段, 均有如下关系:

$$\sigma_1 \doteq \frac{\rho_e C_e l_{n-1}}{2} \dot{\varepsilon}_s + \frac{A^*}{A_e} \sigma_s \quad (16)$$

在试样变形全过程中有

$$\sigma_1 \doteq \frac{\rho_e C_e l}{2} \dot{\varepsilon}_s + \frac{A^*}{A_e} \sigma_s \quad (17)$$

式中: l 为试样变形过程中试样的长度, 为一随时间变化的量。

试样发生恒应变率变形, 应满足:

$$\ddot{\varepsilon} = 0 \quad (18)$$

对式(16)求导可得

$$\dot{\sigma}_1 \doteq \frac{A^*}{A_e} \dot{\sigma}_s + \frac{\rho_e C_e}{2} \dot{l}_s \dot{\varepsilon}_s \doteq \frac{A^*}{A_e} \dot{\sigma}_s + \frac{\rho_e C_e}{2} \varepsilon_s \dot{\varepsilon}_s \doteq \frac{A^*}{A_e} \dot{\sigma}_s \quad (19)$$

式(19)即为实现试样恒应变率变形时入射应力所需满足的条件。可以看出, 要在一次试验中得到恒定应变率下试样的力学特性, 必须保证入射应力与试样的变形应力历程具有相同的变化规律。式(16)也更清楚地显示了影响试样变形应力的因素包括试样的初始形状、弹性杆的材料参数和试样所处的应变率状态, 但对试样应力规律有控制作用的是试样所处的应变率状态。

3.2 试样恒应变率变形加载条件的试验验证

近年来, 为了实现 SHPB 试验中试样的恒应变率变形, 研究者开展了不停的探索, 其中整形器法和异形冲头法分别在试验中获得了试样一定程度上的恒应变率测试^[15, 20, 26]。为了检验式(19)给出的加载条件的正确性, 分别取 2 种方法的试验测试结果进行验证分析。因为试样的应变率情况由反射波反映, 因此选取具有平台反射波的试验结果进行分析。弹性杆和被选中的代表性结果对应的试样的材料参数如表 1 所示。

对式(19), σ_1 为加载波(入射波); σ_s 根据式(4)由 σ_T 等效代替, 即由透射波反映。

表 1 验证分析中的材料参数
Table 1 Material parameters in verification

介质	长度/mm	直径/mm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	静态弹性模量/GPa
弹性杆	2 000.0	50.0	7 697	250
整形器	2.0	10.0	8 600	118
试样 1	25.2	49.8	2 590	42
试样 2	25.3	50.0	2 620	42

首先取黄铜整形器方法试验中得到的一组信号(试样 1)进行分析,为便于对比,将入射波、反射波、透射波移至同一起点并置于坐标同一侧,如图 7 所示。可以看到, T_1 时间段,入射波和透射波保持近似线性增加,并具有几乎相同的变化速率,在此时间段内反射波显示出极好的平台现象,即试样在这段时间内处于恒应变率变形状态,表明了式(19)的正确性。

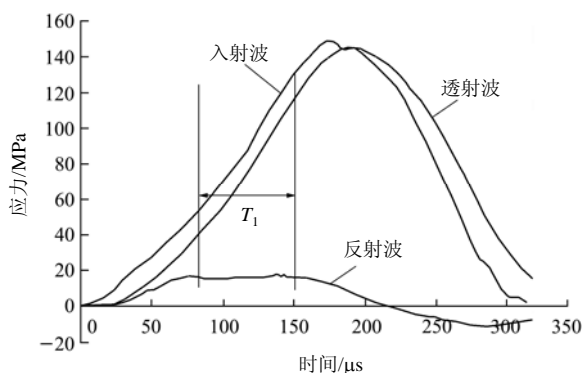


图 7 整形器方法试验结果的验证分析

Fig.7 Validation from results with pulse shaper method

图 8 为异形冲头方法试验(试样 2)结果的验证分析,时间 t_1 为应力波穿过试样所需时间, $t_1 + t_2$ 为试样达到应力平衡所需时间,在 t_3 与 t_4 的 2 段近似线性段,入射波与透射波变化率一致,对应段的反射波保持恒定,试样应变率基本不变。值得注意的是, t_5 段给出了一个十分重要的信息,这一段里,入射波和透射波为非线性段,但因为两者具有相近的变化规律,对应的反射波仍然比较平直。也就是说,不管试样应力本构多么复杂,只要入射应力与试样应力变化历程一致,则试样应变率将保持恒定,即式(19)给出的条件。

3.3 关于双试样 SHPB 法的探讨

值得一提的是, S. Ellwood 等^[30]在研究 SHPB 测试中消除波形振荡问题时提出的双试样法测试技

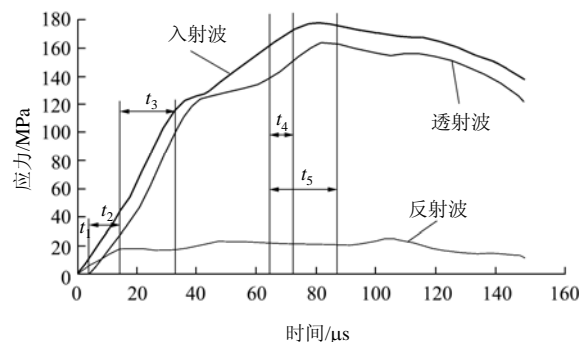


图 8 异形冲头方法试验结果的验证分析

Fig.8 Validation from results with special shape striker method

术也在某种程度上反映了本文所提出的加载条件的正确性。双试样法是在入射杆前部放一个与所测试样一样的试样,这样,由试样 1 透射出的应力波携带了试样的本构特性,这一应力波再作用于试样 2,对式(19)的满足程度就大大提高。陶俊林等^[31]用双试样法对几种金属材料进行了尝试,对特种钢和 Wmo 材料获得了恒应变率结果。事实上,双试样法与整形器法有形似之处,只是这里的整形器就是试样本身。

用岩石也开展了双试样试验,但效果没有预期的好,其原因主要为:(1) 岩石材料非均质性强,个体差异大,很难保证 2 个试样在力学行为上的完全一致,即使加工 2 个几何形状完全相同的试样都十分困难,再保证其内部组成、力学行为完全相同,往往不大现实。(2) 岩石材料极易脆性破坏,试样 1 在应力波到来后很快发生了破裂,透射波信号快速衰减,到达试样 2 时已经不能使它产生与试样 1 同等的加载速率,2 个试样应变率不在一个量级,结果自然很难一致。(3) 根据式(19),双试样法要获得理想的恒应变率加载,仍要保证试样 1 的加载波与试样应力历程的相似性要求,如果不能满足这一条件,试样 1 的响应将是多个应变率段的结果,这一信息被携带在试样 2 的入射波中,自然不会使第二个试样发生恒应变率响应。

4 岩石 SHPB 试验中加载波的选取

需要说明的是,式(19)给出的加载条件是由式(17), (18)得到的必要条件,而非充分条件。这一条件揭示了 SHPB 试验中试样恒应变率变形的内在要求,使人们对 SHPB 试验中试样的内部变形和外部响应关系的理解更加深刻,也使 SHPB 试验中加载波的选取更有目的性和针对性。但由于式(19)并

非充分条件, 将之用于 SHPB 试验中加载波的直接选取仍存在困难, 这主要是因为每次试验之前, 岩石的本构特征是未知的, 此时加载波的选取就只能在尝试中不断改进。在具体试验中, 应注意以下几点:

(1) 异形冲头法和整形器法都可以通过不断改变试验条件(冲头冲击速度、整形器大小、整形器个数、冲头形状)实现试样在一定区段上的恒应变率变形, 但要实现加载全程的试样恒应变率变形仍需要大量改进。在未找到更好的获得试验恒应变率加载方法的情况下, 可采用这 2 种方法开展尝试试验。

(2) 异形冲头法和整形器法没有优劣之分, 存在各自的优缺点。单层整形器法得到的波形通常为线性上升式陡坡波, 由式(19)可知, 该式适合于弹脆性岩类的测试或用于岩石弹性段本构的获取; 多层多材质整形器可改变加载波形, 但整形器响应过程异常复杂, 增大了试验的可控难度。同时整形器法中整形垫片的变形受冲头冲击速度的影响, 进而使加载波的幅值和延时参数变数增加, 因此, 可重复性不容易保证。异形冲头法由特定形状的冲头撞击入射杆产生加载波, 应力波的延时固定、幅值可由冲头撞击速度直接决定, 得到的波形可重复性好; 根据需要可制作不同形状的异形冲头产生不同形状的加载波满足试验要求; 半正弦波的应力变化规律具有幂函数外形, 当用于幂函数型本构岩类的测试时, 如果选择合理, 可在很长加载段获得试样的恒应变率变形; 难点在于满足加载应力条件的特定冲头的设计与制造, 以及试验中不同形状冲头的更换。

(3) 能产生半正弦波的异形冲头法在减小波形弥散方面具有独特优势, 对未知本构特征的材料尝试试验有利。由应力波理论可知, 任意形状的应力波都是由不同频率的幅值的谐波分量组成, 这样, 应力波在 SHPB 长杆中传播时将产生波形畸变, 也即波形弥散问题, 进而引起测试结果误差。半正弦波由于谐波分量简单, 在传播过程中不发生弥散, 对测试有利^[26]。另外, 半正弦波具有丰富的曲率段, 对应着不同的应力率段, 这样, 在试样本构未知的情况下, 半正弦波丰富的应力率段中总有一部分与岩石的变形应力率历程吻合或相近, 因此在试验中更显优势。

5 结 论

理论与试验相结合, 对岩石 SHPB 测试中试样

恒应变率变形的加载条件进行研究, 得到如下结论:

(1) 岩石类应变率敏感材料的 SHPB 测试中, 试样所处的应变率状态直接决定其应力 - 应变变化, 只有恒应变率条件下测得的应力 - 应变曲线才能视作岩石的动态本构关系。

(2) 当加载应力和试样应力历程具有相同的变化规律时, 试样变形才将处于恒应变率状态。

(3) 异形冲头法和整形器法都可以在一定程度上获得试样的恒应变率变形; 异形冲头法对具有幂函数型本构岩类的测试有利, 整形器法更适合于理想弹脆性岩类的测试; 异形冲头法可重复性较整形器法好; 能产生半正弦波的异形冲头法还可减小波形弥散对试验结果的影响。

参考文献(References):

- [1] KUMAR A. The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite[J]. *Geophysics*, 1968, 33(3): 501 - 510.
- [2] OKUBO S, NISHIMATSU Y, HE C. Loading rate dependence of class II rock behavior in uniaxial and triaxial compression tests—an application of a proposed new control method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(6): 559 - 562.
- [3] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 1 - 20.(LI Xibing, GU Desheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 1 - 20.(Chinese))
- [4] 戚承志, 苗启松, 钱七虎. 考虑强度 - 应变率依赖性的岩石弹塑性动力模型[J]. *世界地震工程*, 2002, 18(3): 52 - 56.(QI Chengzhi, MIAO Qisong, QIAN Qihu. Dynamical model of rocks with consideration of strength-strain rate dependence[J]. *World Earthquake Engineering*, 2002, 18(3): 52 - 56.(in Chinese))
- [5] ZHAO J, LI H B. Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 861 - 866.
- [6] ZHU W C. Numerical modeling of the effect of rock heterogeneity on dynamic tensile strength[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, 41(5): 771 - 779.
- [7] CHO S H, OGATA Y, KANEKO K. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(5): 763 - 777.
- [8] ZHOU Z L, MA G W, LI X B. Dynamic Brazilian splitting and spalling tests for granite[C]// *Proceedings of the 11th Congress of the ISRM2007*. Lisbon, Portugal: Taylor and Francis Group, 2007:

- 1 127 - 1 130.
- [9] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. *J. America Ceram Soc.*, 1994, 77(1): 263 - 267.
- [10] TEDESCO J W, ROSS C A. Strain-rate dependent constitutive equations for concrete[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 1998, 120(4): 398 - 405.
- [11] ZHAO H. A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20(4): 293 - 299.
- [12] ROSS C A, THOMPSON P Y, TEDESCO J W. Split Hopkinson pressure bar tests on concrete and mortar in tension and compression[J]. *ACI Materials Journal*, 1989, 86(5): 475 - 481.
- [13] JEROME E L. Feasibility of a 6-inch split Hopkinson pressure bar[R]. AD - A243473, 1991.
- [14] 刘孝敏, 胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 110 - 114.(LIU Xiaomin, HU Shisheng. Wave propagation characteristics in cone bars used for variable cross-section SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 110 - 114.(in Chinese))
- [15] 李夕兵, 古德生. 冲击载荷下岩石动态应力应变全图测试中的合理加载波形[J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(2): 125 - 131.(LI Xibing, GU Desheng. Reasonable loading wave for obtaining stress-strain curves of rock under dynamic impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(2): 125 - 131.(in Chinese))
- [16] 刘德顺, 彭佑多, 李夕兵, 等. 冲击活塞的动态反演设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 1998, 34(4): 78 - 95.(LIU Deshun, PENG Youduo, LI Xibing, et al. Inverse design and experimental study of impact piston[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1998, 34(4): 78 - 84.(in Chinese))
- [17] LOK T S, LI X B. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 2001, 14(3): 262 - 269.
- [18] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 运用有限元和神经网络为 SHPB 装置构造理想冲头[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(23): 4 215 - 4 219.(LI Xibing, ZHOU Zilong, WANG Weihua. Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4 215 - 4 219.(in Chinese))
- [19] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[C]// *Proceedings of the Royal Society of London. [S. l.]: [s. n.], 1991: 371 - 391.*
- [20] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93 - 106.
- [21] 赵习金, 卢芳云, 王 悟, 等. 入射波整形技术的试验和理论研究[J]. *高压物理学报*, 2004, 18(3): 231 - 236.(ZHAO Xijin, LU Fangyun, WANG Wu, et al. The experimental and theoretical study on the incident pulse shaping technique[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(3): 231 - 236.(in Chinese))
- [22] 胡金生, 唐德高, 陈向欣, 等. 提高大直径 SHPB 装置试验精度的方法[J]. *解放军理工大学学报*, 2003, 4(1): 71 - 74.(HU Jinsheng, TANG Degao, CHEN Xiangxin, et al. Method of enhancing experimental precision for big radial size SHPB equipment[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2003, 4(1): 71 - 74.(in Chinese))
- [23] CHENG Z Q, CRANDALL J R, PILKEY W D. Wave dispersion and attenuation in viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. *Shock and Vibration*, 1998, 5(5/6): 307 - 315.
- [24] ZHAO H, GARY G. A three-dimensional analytical solution of the longitudinal wave propagation in an infinite linear viscoelastic cylindrical bar: application to experimental techniques[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1995, 43(8): 1 335 - 1 348.
- [25] BACON C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar[J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(4): 242 - 249.
- [26] LI X B, LOK T S, ZHAO J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1 055 - 1 060.
- [27] LI X B, ZHOU Z L, ZHAO Y S. Approach to minish scattering of results for split Hopkinson pressure bar test[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(3): 404 - 407.
- [28] MENG H, LI Q M. Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(5): 537 - 555.
- [29] WU X J, GORHAM D A. Stress equilibrium in the split Hopkinson pressure bar test[J]. *Journal de Physique*, 1997, 7(3): 91 - 96.
- [30] ELLWOOD S, GRIFFITHS L J, PARRY D J. Materials testing at high constant strain rates[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1982, 15(3): 280 - 282.
- [31] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载试验方法研究[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(5): 413 - 418.(TAO Junlin, TIAN Changjin, CHEN Yuze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2004, 24(5): 413 - 418.(in Chinese))