

大理岩动态拉伸强度及弹性模量的 SHPB 实验研究^{*}

李 伟, 谢和平, 王启智

(四川大学 土木工程及应用力学系, 成都 610065)

摘要: 提出了获取脆性材料动态拉伸强度及弹性模量的实验步骤及相关记录数据的分析方法。利用直径为 100mm 的分离式 Hopkinson 压杆径向冲击巴西圆盘和平台巴西圆盘试样, 测试了大理岩在高应变率加载下的动态力学性能。应力波加载下动态劈裂拉伸圆盘在试样中心产生了约 45/s 的拉伸应变率。分析了实验的有效性并考虑了试样两个端面应力波波形的影响以提高实验结果的精度。结果表明准静态下的公式可适用于动态劈裂拉伸实验; 大理岩的动态拉伸强度及弹性模量比静态时有明显的增加。

关键词: 平台巴西圆盘; 动态拉伸强度; 动态弹性模量; 分离式 Hopkinson 压杆; 大理岩
中图分类号: TU435 **文献标识码:** A

1 引言

由于岩石的抗拉强度远小于其抗压强度, 在受载时经常会发生拉伸破坏, 并且这种破坏往往与加载率有关, 因此动态拉伸强度是岩石力学性能的重要指标之一, 其测试方法的研究在地下工程, 军事防护工程, 炸药力学性能评估等许多实际问题中都有广泛的应用。考虑到直接拉伸试验受加载条件等限制, 因此岩石的拉伸强度一般由间接拉伸试验得出。国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics—ISRM)于 1978 年颁布了用巴西圆盘试样测量岩石拉伸强度的试验规范^[1], 即巴西试验, 它被包括中国在内的许多国家所采纳^[2,3]。美国材料试验学会(American Society for Testing Material—ASTM)标准也推广了这种试验方法^[4]。为避免在加载过程中出现由于局部应力集中而使施力点先破坏的不合理模式, 王启智等人在圆盘中引入了两个互相平行的平面作为加载面, 即平台巴西圆盘^[5], 这样更能保证实验的有效性。

高应变率下岩石动态力学性能的研究应该考虑波传播的影响。对动态劈裂拉伸实验完整的评价至少应考虑三个关键问题: 弹性行为的假设, 随时间变化试样内应力分布的情况以及破坏模式^[6]。分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson Pressure Bar—SHPB)装置是研究材料在高应变率下力学性能的主要设备, 该装置已经有了较多的应用^[7-15]。

本文研究了动态劈裂的实验方法以及动态冲击下大理岩的力学性质, 考虑了试样在动态冲击下两个端面应力分布的不均匀性, 并对实验结果的合理性进行了验证。

2 实验过程

2.1 试样及实验装置

实验采用大理岩巴西圆盘及平台巴西圆盘试样, 用 Hopkinson 压杆对试样实施径向冲击。实验装

^{*} 收稿日期: 2004—04—19; 修订日期: 2004—11—16

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(批准号: 40172094), 国家自然科学基金重大项目(批准号: 50490272)

通讯作者: 王启智(1946—), 教授、博士生导师。主要从事材料(混凝土、岩石等地质材料、复合材料)和结构的损伤、断裂、失效分析的教学和研究工作。E-mail: qzwang2004@163.com

置及试样加载方式如图 1 所示。

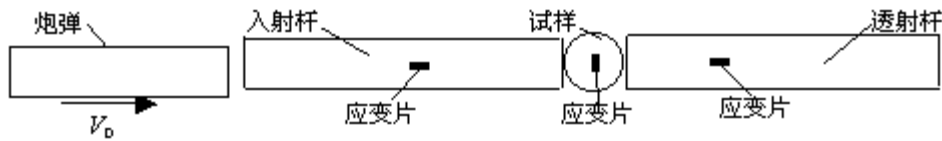


图 1 Hopkinson 压杆及巴西圆盘试样加载模型

Fig. 1 Hopkinson pressure bar and the loading model of Brazilian disc specimen

2.2 实验原理

由弹性理论可以知道^[16],巴西圆盘试样在准静态对径压缩下,如图 2 所示,试样加载直径上(施力点附近除外)的应力状态为:

$$\sigma_c = \frac{2P}{\pi DB} \frac{D^2}{r(D-r)} \quad (1)$$

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi DB} \quad (2)$$

其中 σ_c 为压缩应力; σ_t 为拉伸应力; D, B 分别为圆盘的直径和厚度; r 为从加载点到微单元点的距离。试样的拉伸强度可通过实验中所测得的最大载荷代入(2)式进行计算。本文取压应力为正。

文献[5]对巴西圆盘的改进如图 3 所示,这样可以有效改善施力点处的应力集中,同时可以选择合理的平台中心角来保证试样中心起裂。但由于此时试样的几何形状已经发生了改变,试样加载直径上的应力状态已经不能由(1),(2)两式来准确的反映,故文献[17]对中心角 $2\alpha=20^\circ$ 的平台巴西圆盘进行了数值标定,得到了中心角为 20° 的平台巴西圆盘试样拉伸强度的计算公式:

$$\sigma_t = -0.95 \frac{2P_{\max}}{\pi DB} \quad (3)$$

其中 $P_{\max}$ 为实验中测试到的最大载荷。

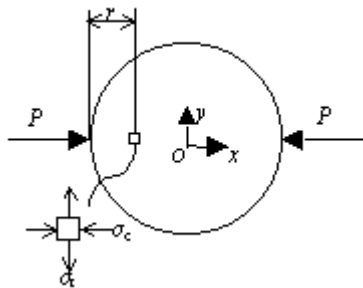


图 2 巴西圆盘对径压缩

Fig. 2 Diametral compression on the Brazilian disc

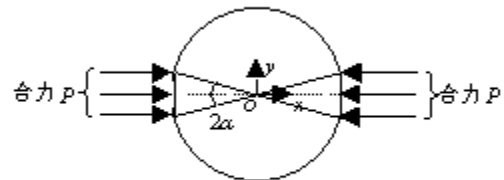


图 3 平台巴西圆盘对径压缩

Fig. 3 Diametral compression on the flattened Brazilian disc

2.3 实验记录

实验所用试样为产自四川雅安的白色大理岩,其泊松比为 0.3,杨氏模量为 $1.6 \times 10^4 \text{ MPa}$,密度为 2527 kg/m^3 。试样分为两种,直径和厚度分别为 75mm 和 30mm,其中 15 个为巴西圆盘试样,制作如图 2 所示;5 个为平台巴西圆盘试样,如图 3 所示,平台角 $2\alpha=20^\circ$ 。所采用 SHPB 杆直径为 100mm,入射杆长 450cm,透射杆长 250cm,炮弹长度为 500mm,炮弹越长,则试样内部应力状态均匀化就越快。实验中采样频率为 2MHz,采样长度为 10K,采样延时为 -4K。试样正反两面中心均贴有型号为 BF120-3AA 的电阻应变片,记录结果取其均值。为尽量减少约束对试样内应力分布状态的影响,实验中采用拉紧入射杆与透射杆的方法来固定试样,同时在试样与杆端面的接触处涂抹凡士林,从而减小摩擦力的作用。

考虑到大理岩属于脆性材料,其破坏应变很小,在高应变率下达到破坏的历时很短,在加载入射波

的上升沿就会破坏。因此文献[11]使用预留间隙法将入射杆撞击试样之前的高频振荡分量反射掉,使加载比较平缓的中后部的应力脉冲作用在试样上,同时也可以提高试样的应变率。本次实验考虑到试样的约束问题,利用软性介质(不干胶纸)来滤除高频振荡。

3 实验结果分析

本次实验对大理岩在 SHPB 冲击下的拉伸强度以及弹性模量的测试做了一些初步的探讨,表 1 为其中 5 组典型的实验数据,图 4 为相应试样破坏后的照片。

表 1 大理岩在不同炮弹撞击速度下的实验数据

Tab. 1 The experimental data of marble at different projectile speed

试样 编号	气压 /MPa	弹速 /m/s	厚度 /mm	直径 /mm	平台	入射波上升 时间/ μ s	入射波幅值 / μ ϵ	透射波幅值 / μ ϵ
1	0.125	2.01	30.52	74.53	无	184	312.1	39.05
2	0.125	2.07	30.35	75.4	无	188	321.8	36.6
3	0.4	6.83	29.85	75.65	有	84	1302.2	62.15
4	1.0	12.47	31.30	75.42	有	88	2009.5	147.25
5	0.2	3.75	29.70	75.52	有	372	469.85	56.05

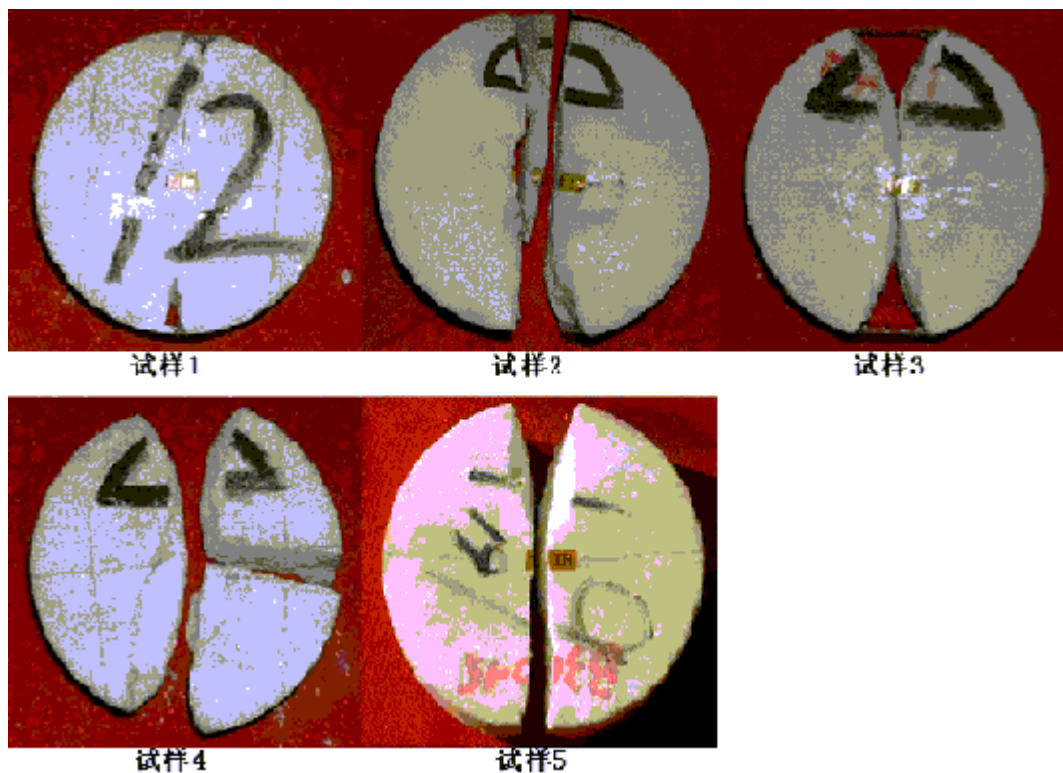


图 4 5 个试样的典型破坏情况

Fig. 4 Typical failure pattern of five specimens

由图 4 可以看出巴西圆盘试样大多存在有从接近力作用线和外表面圆弧交接处产生的次生裂纹,而平台巴西圆盘试样破坏的模式则较好。图 4 中试样 1 和试样 2 均出现了次生裂纹,这对于确定大理岩试样的拉伸强度是不利的。而试样 4 则由于撞击速度较大,且由于试样加工的原因及其自身构造,导致该试样破坏为 3 块。试样 3 与试样 5 的破坏模式比较理想,为便于分析,这里选择有较长入射波上升沿的试样(试样 5)进行研究。

试样 5 所对应的入射波形与反射波形如图 5 所示。由于沿径向加载导致了试样与入射杆及透射杆

的接触面积较小,而大理岩试样本身的密度和波速就比较小,从而使其波阻抗与压杆相比很小,故透射杆上的记录信号比较小。同时由于采用电阻应变片,其灵敏系数小,而此时的噪音信号已经与透射杆上的应变信号接近同量级,所以透射杆上的应变信号曲线记录不够光滑,如图6所示。由图5,图6可以看出透射杆上的应变信号仅为入射杆上应变信号的1/10左右。

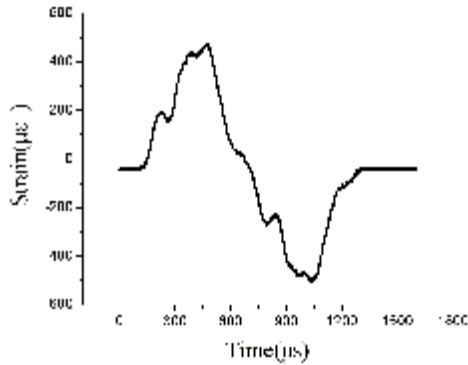


图5 入射波与反射波波形

Fig. 5 The incident and reflected waves

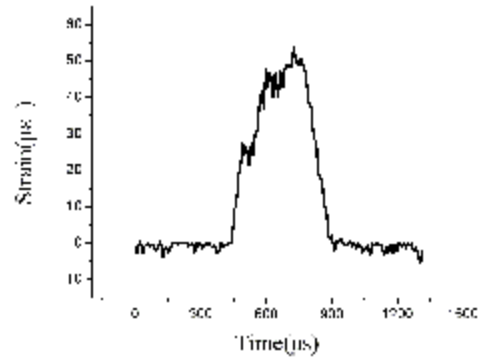


图6 透射波波形

Fig. 6 The transmit wave

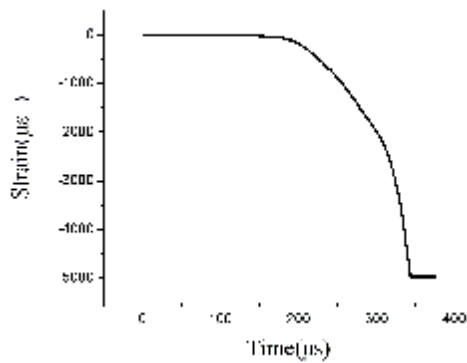


图7 试样中心拉伸方向的应变波形

Fig. 7 Tensile strain wave of the specimen center

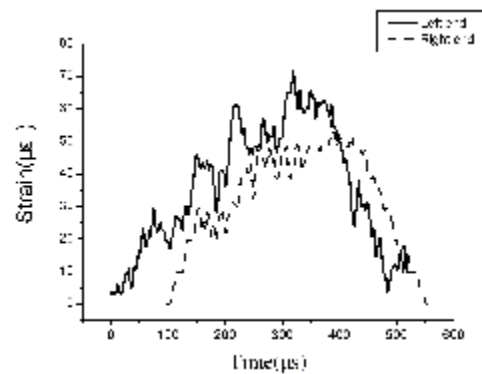


图8 试样左右两端面应变记录波形

Fig. 8 Strain wave record of the specimen's left and right end

图7为试样中心拉伸方向的应变记录,其下方直线是由于应变已经超出了瞬态应变仪所设定的量程而产生的,由图7可以得到试样中心拉伸方向的应变率为44.86/s。图8为试样两个端面的应变信号对比曲线,以试样左端面受到载荷作用的时刻为时间起点,由此可以看出,试样左右两个端面的信号记录在时间上相差97.5μs,这是由于试样对应力波传播的阻碍所造成的,而且波形并不完全相同,故本次实验中试样两端面的应力存在着不均匀性^[14]。

在通常的 SHPB 实验数据分析中,可以使用式(4)进行计算:

$$P(t) = \frac{EA}{2} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad (4)$$

其中 $P(t)$ 为试样端面作用力的合力; $\epsilon_i(t)$, $\epsilon_r(t)$, $\epsilon_t(t)$ 分别为压杆中的入射波,反射波和透射波; E 为压杆的弹性模量; A 为压杆的横截面积。由于动态圣维南原理及入射,反射波在试样与入射杆接触面处的叠加干涉,故应使用贴在压杆中部的应变片来捕捉不互相叠加的 $\epsilon_i(t)$, $\epsilon_r(t)$ 。同时由于压杆的细长性以及一维应力波的假设使得压杆中部应变片实测的波形可以很好的代表试样与入射杆及透射杆接触面上的实际加载波形。

考虑到试样左右两个端面应力分布的不均匀性,采用修正非均匀性效应的公式进行计算。具体按照文献[15]中的方法,以试样左端面受到载荷的时刻为起点时刻,将透射波形向左平移 τ_0 时间得到

$\epsilon_i^*(t)$ 。即 $\epsilon_i^*(t) = \epsilon_i(t + \tau_0)$, 其中 τ_0 表示弹性波传播过试样所需要的时间, 可以通过透射波的理论起点与实际起点的时间差得到, 同时又由于利用了三个实测波形进行计算, 故可以消除应力分布不均匀性的影响。

$$P(t) = \frac{EA}{2} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_i^*(t)] \quad (5)$$

注意到平台巴西圆盘的劈裂实验是平面问题, 为双向应力状态, 所以计算平台巴西圆盘的弹性模量时应该按照双向应力的虎克定律进行计算^[18]:

$$E = \frac{\sigma_y(t) - \mu\sigma_x(t)}{\epsilon_y(t)} \quad (6)$$

$$\sigma_y(t) = -0.964 \frac{2P(t)}{\pi DB}, \quad \sigma_x(t) = 2.973 \frac{2P(t)}{\pi DB} \quad (7)$$

这里对由文献[18]给出的计算弹性模量的公式做一点修正, 因为公式(6)右端为时间的函数, 同时考虑到在实际情况下, 试样在动态冲击下其内部组成会产生变化, 而这些变化必然会对材料的弹性模量产生影响, 因此弹性模量也应该是时间的函数, 所以将公式(6)做一改动, 即不取文献[18]中提出的“取应力—应变曲线中较直部分的斜率作为大理岩的弹性模量”, 而直接取弹性模量为时间的函数, 因此, 可以得到大理岩的弹性模量如(8)式所示:

$$E(t) = -1.856 \frac{2P(t)}{\pi DB \epsilon_y(t)} \quad (8)$$

由于公式(3)和公式(8)只能在准静态情况下使用, 故应首先确定试样内应力分布与准静态下应力分布相同的时间, 由有限元分析可知本次实验试样内部应力达到均匀的时间为 $75\mu s$, 即试样在破坏之前就已经达到了准静态应力平衡状态, 如图 9 所示。

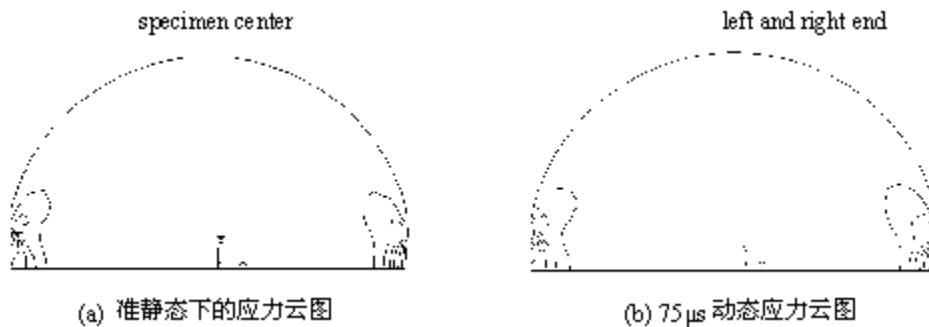


图 9 平台巴西圆盘准静态和动态平衡后的应力云图比较

Fig. 9 The stress distribution pattern of the flattened Brazilian disc

同时试样沿加载直径方向发生破坏的模式确保了巴西实验的有效性, 故可利用以上公式对数据进行处理。图 10 为试样的应力—应变曲线, 应力为试样中心产生的拉应力, 应变为贴在试样中心的应变片所记录的拉伸应变信号, 其范围从试样内部应力分布均匀时所对应的应变开始到试样破坏时所对应的应变结束。利用公式(3)计算平台巴西圆盘在该应变率下的拉伸强度为 20.55MPa , 也可以由图 10 的应力最大值通过简单的比例关系得到拉伸强度。

图 11 为弹性模量从试样内应力达到平衡到试样发生破坏这一段时间内随时间的变化图(经过曲线平滑处理)。可以看出大理岩的弹性模量大致有三个明显的变化趋势。AB 段($75\mu s \sim 80\mu s$): 弹性模量随时间的增加而直线增加, 试样内的颗粒由于外力的作用而被挤压, 导致微结构被压实, 从而使弹性模量增加, 其最大值约为 $11.42 \times 10^4\text{MPa}$; BC 段($81\mu s \sim 152\mu s$): 弹性模量随时间的增加开始下降, 这主要是因为试样在外力作用一段时间后, 内部微裂纹开始扩展, C 点所对应的弹性模量为 $1.87 \times 10^4\text{MPa}$ 。CD 段($153\mu s \sim 204\mu s$): 弹性模量趋于稳定, 其变化范围基本在 $1.4 \times 10^4\text{MPa} \sim 2.1 \times 10^4\text{MPa}$ 之间。

文献[18]中利用 INSTRON1342 型电液伺服机进行的低应变率下的拉伸强度为 4.47MPa , 弹性模量为 $2.09 \times 10^4\text{MPa}$; 试样 5 劈裂破坏时的试样中心拉伸方向的应变率为 $44.86/\text{s}$, 其拉伸强度为

20.55 MPa, 弹性模量的最大值为 11.42×10^4 MPa。由此可以看出后者的拉伸强度和弹性模量分别是前者的 4.60 倍和 5.46 倍。

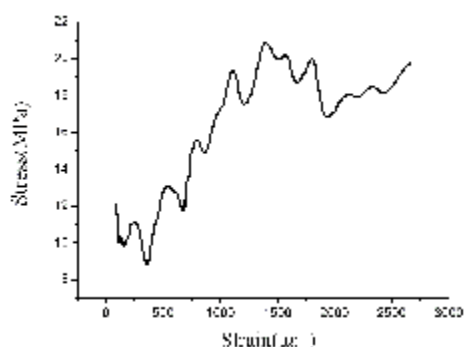


图 10 应力—应变曲线

Fig. 10 Stress and strain curve

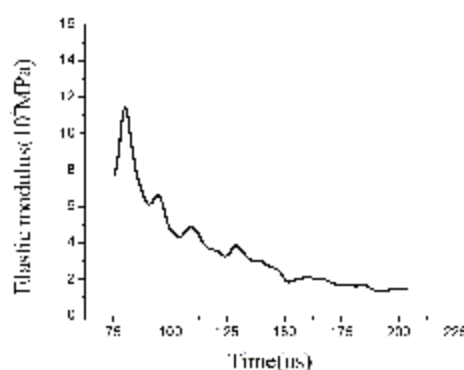


图 11 动态弹性模量曲线

Fig. 11 Dynamic elastic modulus curve of marble

4 结论

1) 在 SHPB 冲击下大理岩的拉伸强度有了明显的增加, 比 INSTRON1342 材料试验机加载下的拉伸强度高出 4.60 倍。其弹性模量变化较为复杂, 在试样内应力达到平衡后较短的时间内, 弹性模量随着时间的增加而直线增加, 最大值高出 5.46 倍, 随后弹性模量开始直线减小至与准静态下的相接近时开始趋于稳定。

2) 有限元计算表明大理岩的破坏出现在试样内部应力平衡之后, 且平衡后的应力分布与准静态下的应力分布基本相同, 同时试样沿加载直径方向发生破坏, 因此准静态的公式适用于本次劈裂拉伸实验。

3) 应力分布不均匀性在本次实验中是存在的, 对于结果的分析应该考虑它的影响。

本文的实验工作是在洛阳总参工程兵科研三所张守保副总等有关领导和同志的关心、帮助下顺利完成的。同时本文也得到了中国科技大学冲击动力学实验室胡时胜教授的热心帮助, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] ISRM. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials[J]. Int. J. Mech Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1978, 15: 99~103
- [2] GB/T50799—99. 工程岩体试验方法标准[S]. (Standard for Tests Method of Engineering Rock Masses (in Chinese))
- [3] SL264—2001. 水利水电工程岩石试验规程[S]. (Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering (in Chinese))
- [4] ASTM C496—85. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens[S]. Annual Book of ASTM Standards 4 (04.02), 1986: 337~342
- [5] Wang Q Z, Xing L. Determination of fracture toughness K_{IC} by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks [J]. Eng Fract. Mech., 1999, 64: 193~201
- [6] Rodriguez J, Navarro C, Sanchez-Galvez V. Splitting tests: An Alternative to Determine the Dynamic Tensile Strength of Ceramic Materials [J]. Journal de Physique IV 1994, 4: c8-101~c8-106
- [7] 胡时胜, 王道荣, 刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学, 2001, 18 (5): 115~118 (Hu Shisheng, Wang Daorong, Liu Jianfei. Experimental Study of Dynamic Mechanical Behavior of Concrete. Engineering Mechanics, 2001, 18(5): 115~118 (in Chinese))
- [8] 孟益平, 胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 108~112 (Meng Yiping, Hu Shisheng. Some Problems in Test of Concrete under Impact Compressive Loading. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1): 108~112 (in Chinese))
- [9] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 赵晓豹. 脆性材料 SHPB 实验技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1798~1802 (Wang Luming, Zhao Jian, Hua Anzeng, Zhao Xiaobao. Research on SHPB Testing Technique for Brittle Material.

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1798~1802 (in Chinese))
- [10] 刘剑飞, 胡时胜, 胡元育, 赵坚. 花岗岩的动态压缩实验和力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 618~621 (Liu Jianfei, Hu Shisheng, Hu Yuanyu. Research on Dynamic Compressive Testing and Mechanics Properties on Granite. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 618~621 (in Chinese))
- [11] 刘剑飞, 王道荣, 胡时胜. 用于脆性材料的 Hopkinson 压杆动态实验新方法[J]. 实验力学, 2001, 16(3): 283~290 (Liu Jianfei, Wang Daorong, Hu Shisheng. A Novel Experimental Method of Hopkinson Pressure Bar System for Brittle Material. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(3): 283~290 (in Chinese))
- [12] 徐明利, 张若棋, 张光炎. 确定 SHPB 实验中延迟时间的曲线拟合法[J]. 高压物理学报, 2003, 17(2): 153~156 (Xu Mingli, Zhang Ruochi, Zhang Guangying. Curve-Fitting Method for Determine the Delay-Time in SHPB Experiments. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(2): 153~156 (in Chinese))
- [13] 宋博, 宋力, 胡时胜. SHPB 实验数据处理的解耦方法[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(2): 167~171 (Song Bo, Song Li, Hu Shisheng. Coupling Solved Method for SHPB Experimental Data Processing. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(2): 167~171 (in Chinese))
- [14] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J]. 实验力学, 1992, 7(1): 23~29 (Zhou Fenghua, Wang Lili, Hu Shisheng. On the Effect of Stress Nonuniformness in Polymer Specimen of SHPB Tests. Journal of Experimental Mechanics, 1992, 7(1): 23~29 (in Chinese))
- [15] 徐明利, 张若棋, 张光炎. SHPB 实验中试件内早期应力平衡分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 235~240 (Xu Mingli, Zhang Ruochi, Zhang Guangying. Analysis of Early Stage Specimen Stress Equilibrium in SHPB Experiment. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 235~240 (in Chinese))
- [16] 铁摩辛柯, 古地尔著. 徐芝伦译. 弹性理论. 北京: 高等教育出版社, 1990 (Timoshenko S, Goodier J N. Theory of Elasticity[M]. New York: McGraw-Hill 1970. (in Chinese))
- [17] 王启智, 戴峰, 贾学明. 对“平台圆盘劈裂的理论和试验”一文的回复[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 175~178 (Wang Qizhi, Dai Feng, Jia Xueming. Reply to the Paper "Split Test of Flattened Rock Disk and Related Theory. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 175~178 (in Chinese))
- [18] 苏碧军, 王启智. 平台巴西圆盘试样岩石动态拉伸特性的试验研究[J]. 长江科学院院报. 2004, 21(1): 22~25 (Su Bijun, Wang Qizhi. An Experimental Study on Rock Tensile Strength with Flattened Brazilian Disk Specimen under Dynamic Loading. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(1): 22~25 (in Chinese))

Experimental Study for Dynamic Tensile Strength and Elastic Modulus of Marble using SHPB

LI Wei, XIE He-ping, WANG Qi-zhi

(Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: An experimental procedure and accompanying method for analyzing recorded data for deriving dynamic tensile strength and elastic modulus of brittle material is presented. The split Hopkinson pressure bar with a diameter of 100mm and the Brazilian disc and the flattened Brazilian disc specimens subjected to diametral impact compression were used. Mechanical properties of the marble at high strain rate loading were tested. The dynamic split tension disc was subjected to a stress wave loading that produced tensile strain rate nearing 45/s at the center of specimen. The difference between the stress waves acting on the two flat ends of the flattened Brazilian disc specimen was considered to improve the accuracy of measurements; also the validity of experiments was analyzed. The results show that the formulas for quasi-static situation can be used in the corresponding dynamic split tension test, and that the dynamic tensile strength and elastic modulus of marble are substantially higher than the counterparts under static loading condition.

Key words: flattened Brazilian disc; dynamic tensile strength; dynamic elastic modulus; split Hopkinson pressure bar; marble