

文章编号: 1001-4888(2008)05-0417-10

中心直裂纹平台巴西圆盘 复合型动态断裂实验研究

汪坤, 王启智*

(四川大学 土木工程及应用力学系, 成都 610065)

摘要: 制作了中心直裂纹平台巴西圆盘(cracked straight through flattened Brazilian disc — CSTFBD)试样, 利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar — SHPB)加载, 进行了岩石纯 I 型和复合型(I + II 型)动态断裂实验。由于加载角(载荷方向与裂纹线的夹角)在制作试样时已经通过裂纹线与试样平台的位置关系确定, 因此在实验中可以方便而准确地实施加载。比较了纯 I 型加载和复合型加载下压杆上记录的入射波、反射波和透射波的波形。采用实验与数值相结合的方法, 将实验得到的动态载荷输入有限元程序, 得到了纯 I 型试样的动态断裂韧度和复合型试样的两种动态应力强度因子的时间历程。计算了加载角为 15° 的试样应力强度因子的复合比($K_I(t)/K_{II}(t)$), 此计算值与文献结果吻合较好, 验证了实验方法的有效性。

关键词: 中心直裂纹平台巴西圆盘; 分离式霍普金森压杆; 复合型动态断裂; 动态断裂韧度

中图分类号: O346.4; O347.3

文献标识码: A

0 引言

岩石等脆性材料的抗拉强度远小于其抗压强度, 因此拉伸破坏是此类材料破坏的一种主要形式^[1]。实际工程中, 由于岩石断裂破坏引起的灾难很多, 造成巨大的经济损失和人员伤亡, 更严重的是由于这种破坏难于预报, 给预防带来了极大的困难。许多学者已经论证了研究岩石类脆性材料断裂问题的重要性^[2,3]。

岩石断裂韧度是用来表征岩石材料抵抗裂纹扩展的能力, 是描述岩石材料破坏机理的一个重要物理量, 目前对于岩石类材料断裂韧度的研究大多限于静态载荷工况^[4,5]。实际上岩石的破坏往往在瞬间发生, 比如采矿和隧道工程开挖中的岩爆、山体滑坡等自然灾害, 因此研究岩石动态断裂问题更为重要^[6]。

岩石动态断裂是一个相当复杂的问题, 国内目前比较有代表性的工作有: 王启智等人^[7]利用边切槽圆盘试样进行的动态载荷下岩石断裂韧度方面的研究, 张宗贤等^[8]用短圆棒试样对岩石动态断裂韧度的研究, 刘瑞堂等^[9,10]对三点弯曲试样动态应力强度因子及钢的动态断裂韧度分析, 夏源明等^[11]对高加载速率下有机玻璃中心直裂纹巴西圆盘动态断裂韧度实验研究。但以上的研究都是针对纯 I 型动态断裂, 对于复合型动态断裂问题, 目前的研究成果很少。

本文利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar — SHPB)实验装置进行复合型动态断裂实验。中心直裂纹巴西圆盘试样由于构形简单, 能方便地用 SHPB 实验装置进行加载, 并能通过

* 收稿日期: 2008-02-18; 修订日期: 2008-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10472075)和中科院山地所开放基金项目(2007)

通讯作者: 王启智, 男, 教授, 博导。E-mail: qzwang2004@163.com

改变加载角实现纯 I 型、纯 II 型和复合型动态断裂,因此可以用这种试样测试材料动态断裂韧度和计算复合型动态应力强度因子。王启智等人^[12]针对原来的巴西圆盘试样作了改进,在加载端加工了加载平台,这样将载荷由原来的集中力变为均布力,大大减缓了加载端应力集中的不利影响。因此本文也将中心直裂纹巴西圆盘试样改进为中心直裂纹平台巴西圆盘(cracked straight through flattened Brazilian disc—CSTFBD)试样,根据文献^[12]的研究结果,取平台圆心角 $2\beta=20^\circ$ 。加载角是载荷方向和裂纹线的夹角,在加工裂纹时根据所需要的加载角 θ (见图 1)先确定好平台的位置,再加工出平台,这样实验时让压杆端面紧贴试样平台就能方便而准确地确定加载角,试样示意图如图 1。

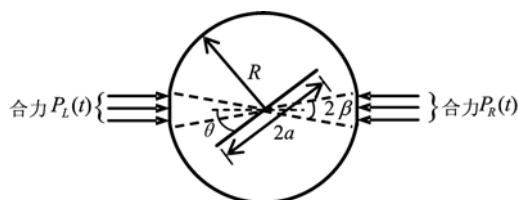


图 1 CSTFBD 试样示意图

Fig. 1 A sketch of CSTFBD specimen

与本文类似的研究目前我们看到的仅有日本学者山内良昭等^[13,14]利用 SHPB 装置对石墨等 4 种材料的中心直裂纹巴西圆盘进行了 I-II 复合型动态断裂韧度实验,计算了动态应力强度因子随加载角 θ 的不同而变化的趋势,他们的试样没有我们设计的平台。我们先前的工作是用数值分析方法研究材料、裂纹长度、载荷对试样 I-II 复合型动态应力强度因子的影响^[15,16]。本文通过实验与数值分析相结合的方法对复合型裂纹试样动态应力强度因子做了分析,利用实验记录得到数值模拟时需要的载荷一时间曲线,将其输入有限元程序进行计算,得到了应力强度因子的复合比。由于本文实验得到的载荷近似斜坡载荷,可与文献^[15,16]中斜坡载荷下的复合比进行比较,发现二者非常吻合,证明了本文实验方法的有效性。本文的研究成果也为今后研究纯 II 型动态断裂韧度打下了基础。

1 实验方法

1.1 实验装置

SHPB 是目前测试材料动态力学性能时被广泛采用的高加载速率的动态加载装置^[17,18],其加载装置和 CSTFBD 试样示意图如图 2 所示。

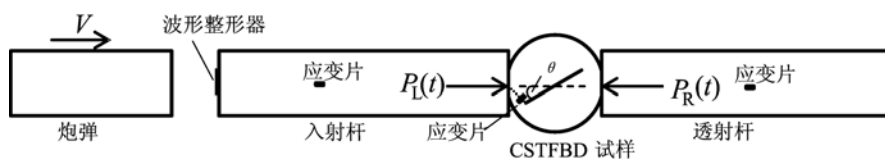


图 2 SHPB 加载装置和 CSTFBD 试样示意图

Fig. 2 A sketch of SHPB loading system and CSTFBD specimen

SHPB 实验原理是炮弹撞击入射杆,在入射杆内产生入射波 $\epsilon_i(t)$,经试样与入射杆接触端反射后产生反射波 $\epsilon_r(t)$,部分入射波经过试样后产生透射波 $\epsilon_t(t)$,各种应变波分别由贴在入射杆和透射杆上的应变片测得。本次实验采集到的各种应变波正值表示压应变,负值表示拉应变。入射波和反射波的迭加可以得到试样左端的合力 P_L ,试样右端的合力 P_R 由透射波计算得出。计算载荷 $P(t)$ 由左右端载荷求平均得到,计算公式如下:

$$P_L(t) = EA[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \quad (1)$$

$$P_R(t) = EA\epsilon_t(t) \quad (2)$$

$$P(t) = \frac{P_L + P_R}{2} = \frac{EA}{2}[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中, E 、 A 分别为压杆的弹性模量和横截面积。

实验中采用拉紧入射杆与透射杆的方法来固定试件,同时在试件与杆端面的接触处涂抹凡士林,使试样平台与压杆端面接触良好。SHPB 试验装置见图 3(a),CSTFBD 试样的加载和应变片的粘贴方式见图 3(b)。图 3(b)中应变片贴在裂尖附近,其粘贴方法为应变片轴线与裂尖到平台中心的连线垂直,这种贴片方式可以保证试样裂纹扩展时撕断应变片。裂纹在扩展过程中,最终总是向着平台中部位置扩展,对此将在下面 2.2 节给出更详细的描述。

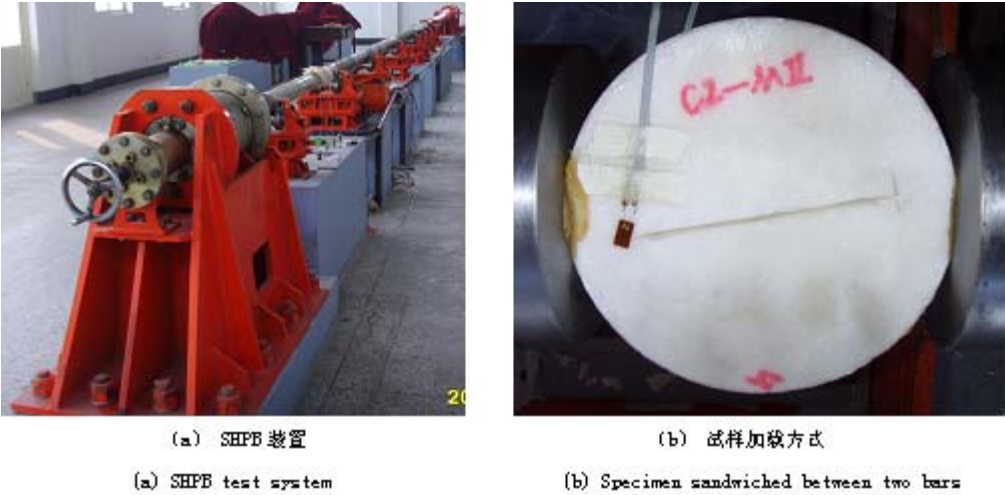


图 3 SHPB 压杆装置及试样加载方式

Fig. 3 SHPB test system and the specimen sandwiched between bars

本实验中采用的压杆直径为 100mm。在大直径 SHPB 冲击实验中,常规的矩形加载波容易造成应变波形高频振荡,由于大直径 SHPB 压杆的横向惯性作用比较严重,因此其弥散现象也较为明显^[19]。根据左宇军等的研究结果^[20],三角形波可以有效地降低大直径 SHPB 压杆的弥散效应。为此通常采取在炮弹和入射杆之间加一片或几片圆形软介质材料作为脉冲整形器(也称为波形整形器)。波形整形器同心地粘贴在入射杆被炮弹撞击一方的端面上,贴好后在上面盖上与入射杆同直径同种材料的垫片,减轻炮弹对入射杆的破坏,如图 4 所示。本次实验选用纸片作为波形整形器,由于波形整形器的作用,原先高频振荡的矩形波就变为比较光滑的三角形波。

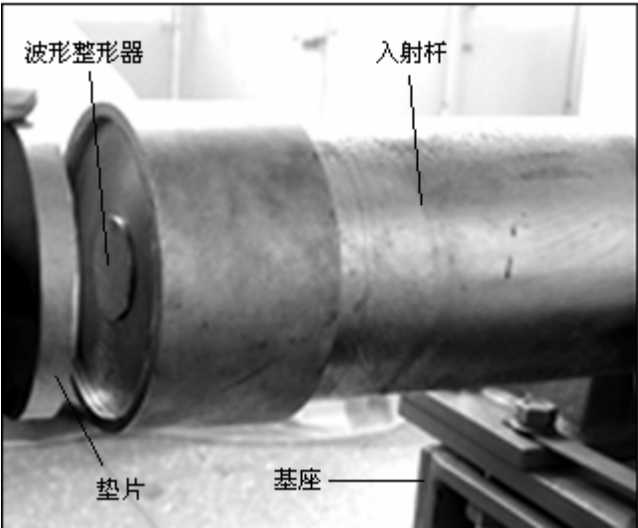


图 4 波形整形器的粘贴

Fig. 4 Stick of pulse shaper

1.2 试样制作

裂纹和试样平台的加工均在万能卧式铣床上进行,每个试样都先加工出人字形切槽,如图 5(a),采

用钢锯条将人字形切槽加工成直裂缝(图 5(b)),为了使裂尖足够尖锐,将锯条的锯齿磨薄后精加工出裂尖(图 5(c))。最后根据平台和裂纹线的位置关系加工平台。

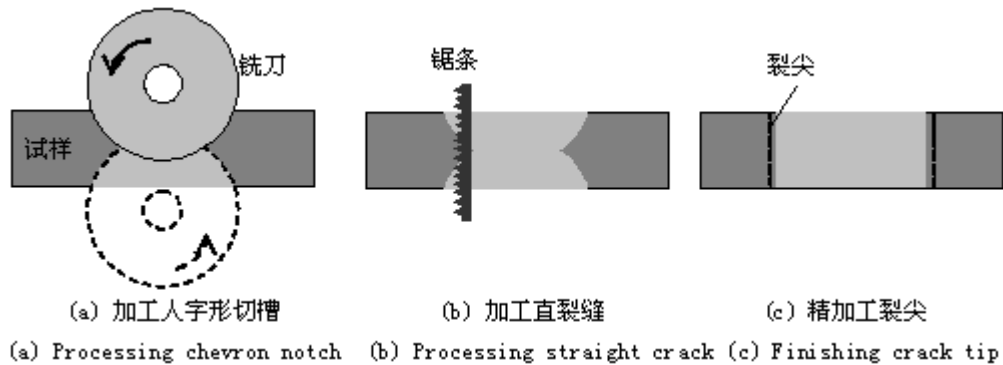


图 5 CSTFBD 试样加工方法

Fig. 5 Preparation of a CSTFBD specimen

本次实验分别设计了两种不同大小的复合型中心直裂纹试样和纯 I 型中心直裂纹试样,试样材料为产自四川雅安的白色大理岩,其杨氏弹性模量和泊松比分别为 16GPa 和 0.3,密度为 2730kg/m^3 ,其几何尺寸如表 1。

表 1 CSTFBD 试样几何参数

Tab. 1 Geometric parameters for CSTFBD specimens

试样编号	$2R/\text{mm}$	$2a/\text{mm}$	$\alpha=a/R$	$\theta/^\circ$
C1M I	80.35	63.40	0.79	0
C1M II	80.40	62.00	0.77	15
C2M I	122.35	88.70	0.72	0
C2M II	120.00	86.10	0.72	15

对于加载角为 θ 的复合型裂纹试样,文[13,14]中给出无量纲裂纹长度 $\alpha=a/R=0.5$ 时, θ 值约等于 23° 就得到纯 II 型裂纹,但文[13,14]没有考虑其它无量纲裂纹长度下的情况。我们用数值分析验证了文[13,14]的结论,并对不同 α 、不同 θ 下的圆盘试样作了讨论,指出无量纲裂纹长度 α 越大,其纯 II 型加载角越小^[15,16]。由于试样加工条件的限制,用圆形刀具在有一定厚度的试样上加工出人字形切槽并用锯条将切槽拉直后,试样的无量纲裂纹长度 α 较大(见表 1),根据文献[15,16]的研究结果,本文取 $\theta=15^\circ$ 进行研究,这样也可以使本文的结果与文献[15,16]进行对比。

2 实验记录及分析

2.1 压杆和试样上的应变波

在表 1 中,C1M I、C2M I 为纯 I 型裂纹试样,C1M II、C2M II 为复合型裂纹试样。图 6 中给出了代表性的 C1M I 和 C1M II 试样进行实验时入射杆和透射杆上应变片记录的应变波,由于实验过程中试样都是在入射波第一次达到峰值之前就已经发生破坏,所以在此只取第一个入射波、反射波和透射波进行说明。

从图 6 可以看出,纯 I 型和复合型裂纹试样的入射波和透射波形状大致相同,只是波形的幅值略有不同。

图 3 中试样上的应变片用来测量试样的起裂时刻,该应变片记录的信号如图 7 所示。

图 7 中给出了两类试样裂尖附近的波形曲线,图 7(b)中小的局部突起为随机误差所致,总体看来,两种试样上波形十分接近。为确定试样起裂时刻,可以对以上两种信号对时间求导,这样就可得出试样上应变信号发生急剧变化的时刻,这一时刻就是试样的起裂时刻,如图 8 中 t_f 所示。

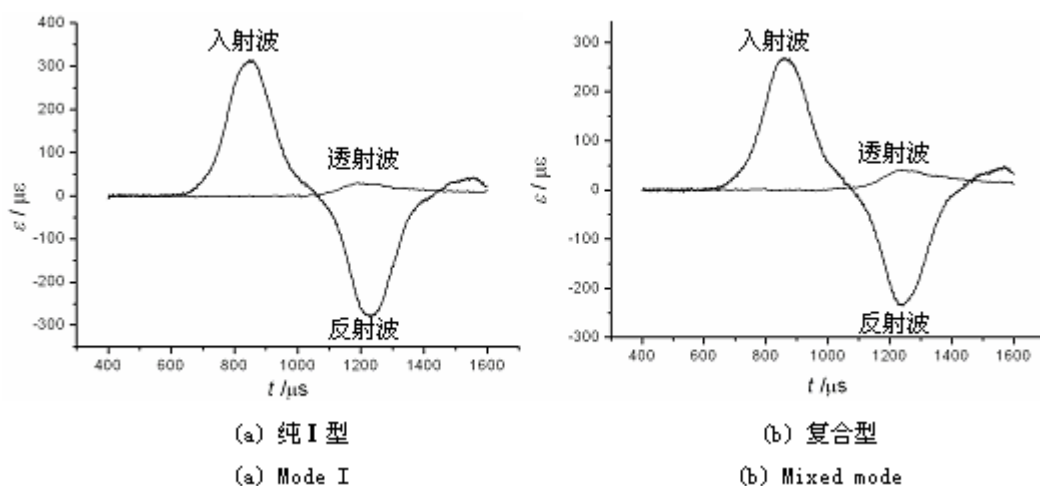


图6 入射杆和透射杆上的应变波形

Fig. 6 Strain waves in the input bar and transmission bar

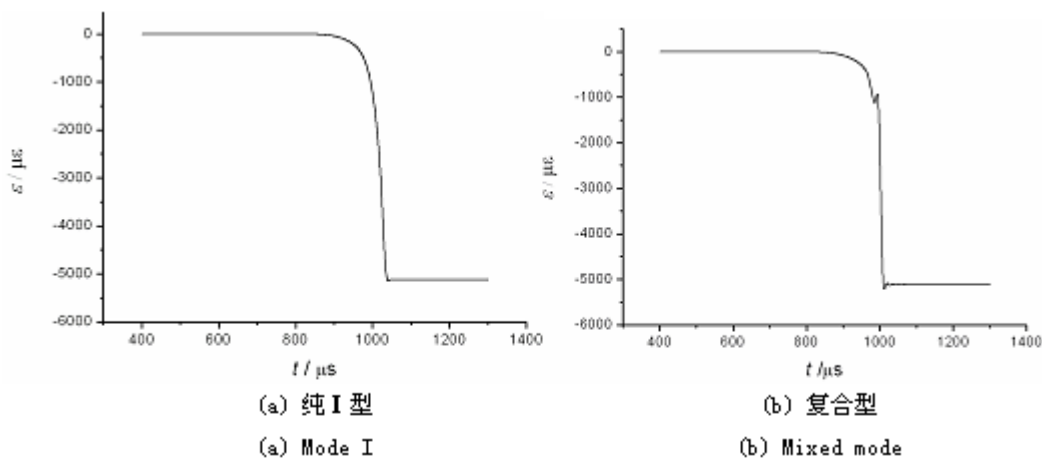


图7 纯I型和复合型试样上裂尖附近应变波形

Fig. 7 Strain wave near the crack tip of mode I specimen and mixed mode specimen respectively

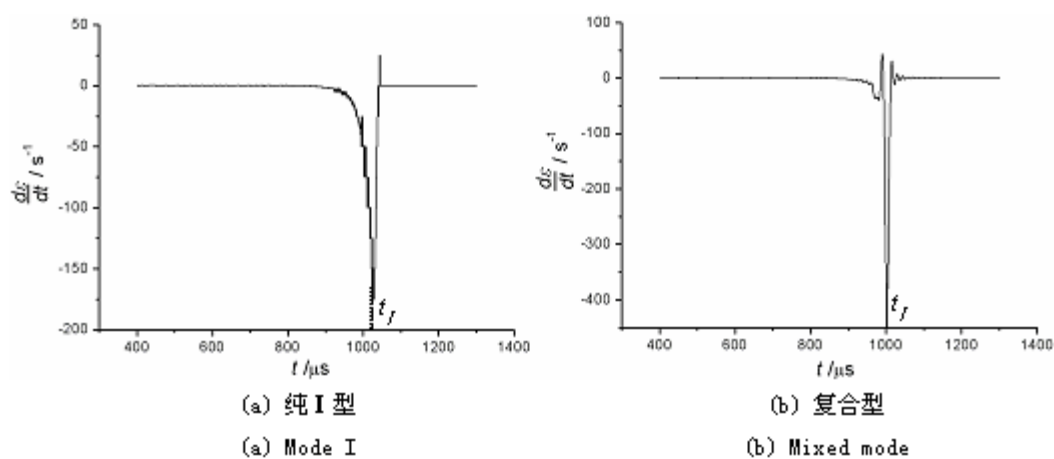


图8 纯I型和复合型试样破坏应变率

Fig. 8 Failure strain rate of mode I specimen and mixed mode specimen

图8中两种波形的差异主要是由于图7中记录的试样裂尖附近的波形的差异所致,如果图7(b)中没有出现小的突起,则图8中两图应该非常相似。

2.2 两类试样破坏模式比较

试样加载后断裂破坏情况如图 9 所示,从图 9 可以看出,裂纹断裂面都穿过了应变片,说明应变片的粘贴是有效的。对于复合型试样(图 9(b)),在试样加载端一般出现三角形区域断裂情况,并且 2 号断裂面贯穿平台边缘与裂尖的连线。经过分析认为,当裂纹受到冲击扩展后,形成 1 号断裂面,而此时由于时间较短,试样未脱离压杆,三角形区域受到挤压,类似一个小的悬臂梁受均布压力作用,并在平台边缘与圆弧面交界处形成应力集中区域,使试样从平台边缘与圆弧面交界处起裂向裂纹裂尖扩展,形成 2 号断裂面。图 9(a)中纯 I 型试样在加载的其中一端也出现三角形断裂区域,可能是冲击力过大造成。

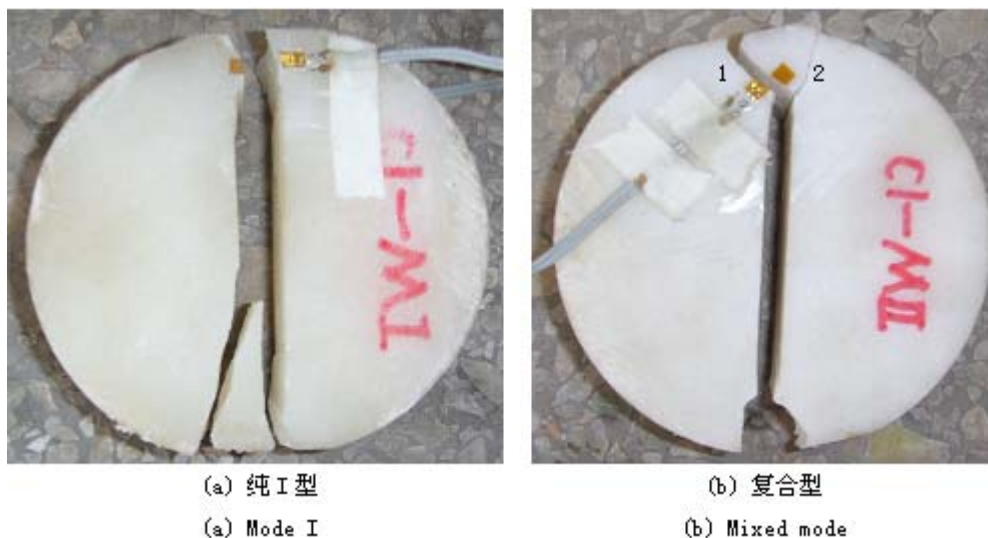


图 9 纯 I 型和复合型试样破坏情况

Fig. 9 Failure pattern of mode I specimen and mixed mode specimen

3 有限元计算动态应力强度因子

3.1 计算公式和模型

图 10、图 11 分别给出了裂纹尖端坐标和裂尖单元示意图。本文利用位移法求动态应力强度因子值,用有限元法计算出裂纹尖端动态位移,进而利用位移法计算动态应力强度因子,根据线性插值外推的方法得到裂尖($r=0$)的应力强度因子时间历程 $K_I(t)$ 和 $K_{II}(t)$,见式(4)、(5)。

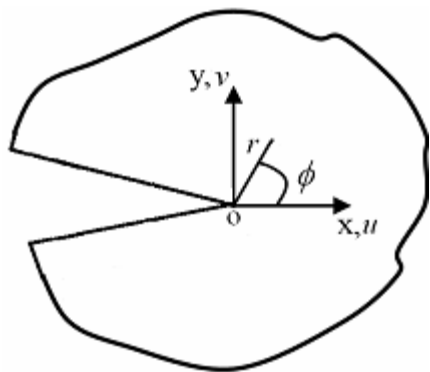


图 10 裂尖坐标

Fig. 10 Coordinate system on the crack tip

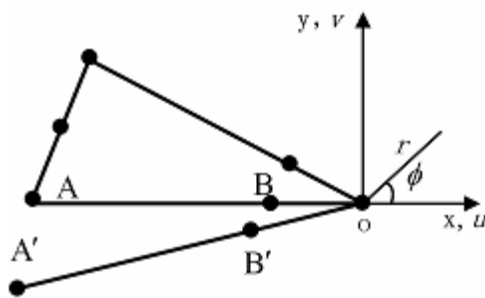


图 11 四分之一节点奇异单元

Fig. 11 Singular element with quarter points

$$K_I(t) = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+k} \frac{8v(t) \left| \frac{BB'}{r_{OB}} - \frac{v(t)}{r_{OB}} \right|_{AA'}}{6 \sqrt{r_{OB}}} \quad (4)$$

$$K_{II}(t) = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+k} \frac{8u(t)|_{BB'} - u(t)|_{AA'}}{6\sqrt{r_{OB}}} \quad (5)$$

其中 $u(t)|_{BB'} = u(t)|_B - u(t)|_{B'}$, 其余类同。 $G = E_s/2(1+\nu_s)$, $k = 3-4\nu_s$ (平面应变), $k = (3-\nu_s)/(1+\nu_s)$ (平面应力)。 E_s, ν_s 分别为试样的弹性模量和泊松比, 本文用平面应力状态进行分析。利用式(4)、(5)可以求得任意加载角下任意时刻的应力强度因子。

采用大型有限元软件 ANSYS 计算动态载荷下圆盘裂尖的应力强度因子, 用 APDL 语言编制程序, 所用单元为带厚度的平面应力单元—— PLANE82 单元。对于纯 I 型和复合型试样均采用全模型的建模方法, 网格划分及约束施加如图 12 所示。

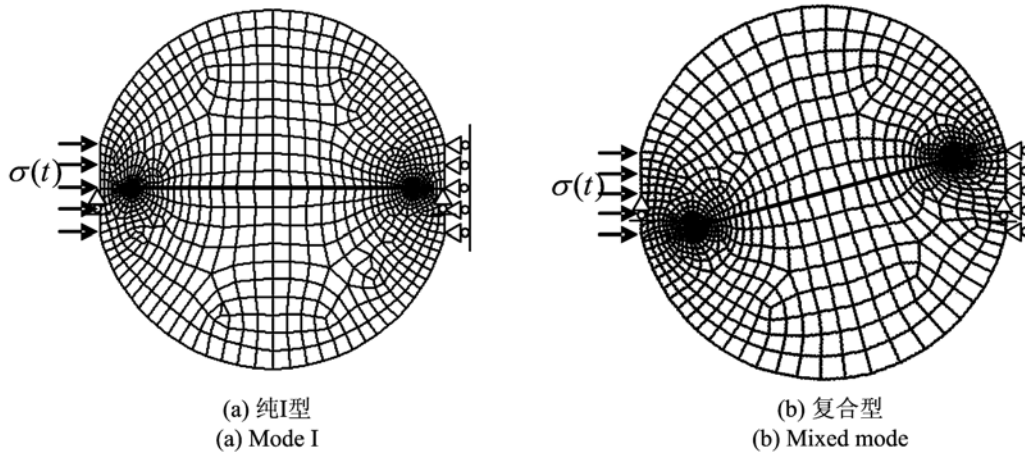


图 12 CSTFBD 的有限元模型

Fig. 12 Finite element mode of CSTFBD

用式(3)计算合力 $P(t)$ 时, 所用压杆杨氏弹性模量 E 为 210 GPa, 然后将合力 $P(t)$ 转换成面力 $\sigma(t)$ 加载, 转换公式为:

$$\sigma(t) = P(t)/A_s \quad (6)$$

式(6)中 A_s 为平台面积。

上面两个模型所需单元数和节点数大致相同, 单元数为 1500 个左右, 节点数为 4500 个左右, 对裂尖附近单元进行细化。经过收敛性验证, 这样的网格划分可以保证足够的计算精度。

根据实验时的真实约束情况, 采用数值计算时对远离入射杆的平台水平方向位移进行全约束, 另外, 试样受到冲击载荷破坏瞬间, 平台与入射杆和透射杆并不会发生相对位移, 因此可以对两平台中点竖直方向上位移进行约束, 以限制试样刚体位移。

3.2 计算结果

由于采用了滤波片进行滤波, 拉伸了入射波的上升沿, 使计算所得的动态载荷近似于斜坡载荷, 载荷形式如图 13 所示。

经以上载荷计算的应力强度因子历程如图 14 所示。

从图 14 可以看出, 对于纯 I 型试样而言, 应力强度因子计算的结果与实际相符, II 型应力强度因子随时间在 0 轴上下有很小的波动, 其断裂韧度的大小与文献[15]中数值相吻合。图 14(a)中由于载荷(图 13(a))开始时波动较为明显, 所以 $K_I(t)$ 在 t 较小时也出现大的振荡。对于加载角为 15° 的 CSTFBD 试样, II 型应力强度因子占据主导地位。当无量纲裂纹长度 $\alpha = 0.77$ 时, 即 C1M II 试样, 计算得出其 I、II 型复合比 $K_I/K_{II} = 0.04$, 对无量纲裂纹长度 $\alpha = 0.72$ 的 C2M II 号试样, 用同样的分析方法得到其复合比为 0.10, 这两个试样已非常接近纯 II 型加载。图 14(b)中 $K_I(t)$ 在试样破坏前较长一段时间内在 $0 \sim -1$ 范围内波动, 说明试样加载角已经超过纯 II 型加载角, 略微减小加载角后可得到纯 II 型加载, 这与文献[15, 16]中结论一致, 从而证明了本次实验以及计算方法的正确性。

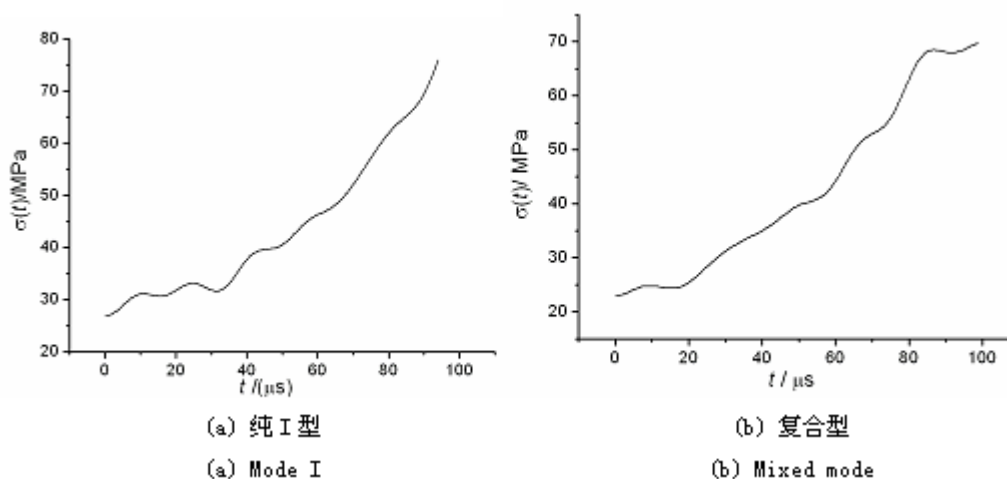


图 13 纯 I 型和复合型试样的动载荷曲线
Fig. 13 Load history of mode I specimen and mixed mode specimen

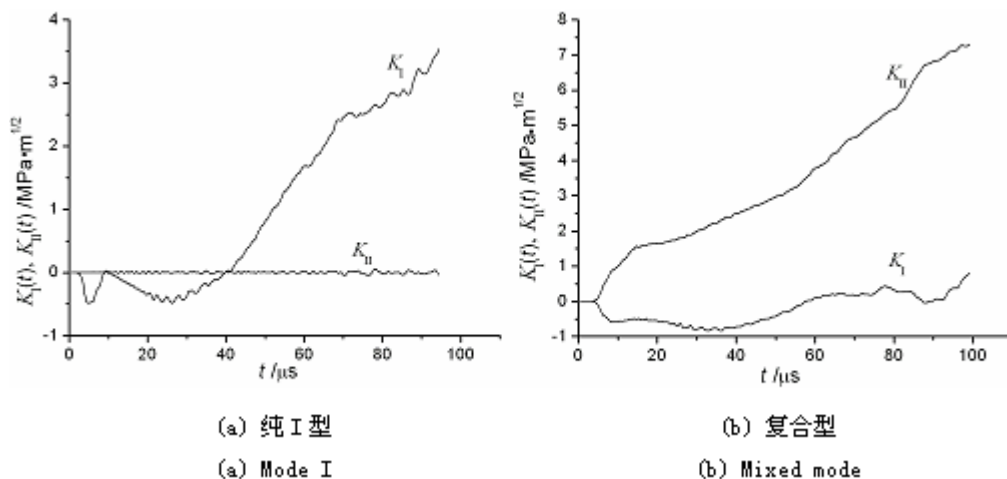


图 14 纯 I 型和复合型试样的应力强度因子时间历程曲线
Fig. 14 Stress intensity factor history of mode I specimen and mixed mode specimen

4 结论

(1) 加工好圆盘的中心直裂纹后,根据裂纹线与平台位置关系加工平台。因此中心直裂纹平台巴西圆盘(CSTFBD)试样在实验中可以方便而准确地定位加载角。

(2) 用有限元法计算了纯 I 型和加载角为 15° 时的 CSTFBD 试样的应力强度因子时间历程曲线和复合比,并将此复合比与文献[15,16]做了比较,证实了本文实验方法的有效性。

(3) 对无量纲裂纹长度 $\alpha=0.77$ 和 $\alpha=0.72$ 的复合型裂纹试样应力强度因子复合比的讨论中可以看出,当无量纲裂纹长度越大,加载角 $\theta=15^\circ$ 时就越接近纯 II 型加载,只要略微减小此角度便可获得纯 II 型加载。这一结果与我们先前的数值研究成果^[15,16]一致,可供今后制作纯 II 型 CSTFBD 试样时参考。

参考文献:

- [1] 谢和平,陈忠辉著.岩石力学[M].科学出版社,2004(Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock Mechanics. Science Press, 2004 (in Chinese))
- [2] Nasser M H B, Mohanty B, Young R P. Fracture Toughness Measurements and Acoustic Emission Activity in Brittle Rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163:917-945.

- [3] Lim I L, Johnston I W, Choi S K. Stress Intensity Factors for Semi-circular Specimens under Three-point Bending [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1993, 44(3):363—382.
- [4] Jia Z, Castro-Montero A, Shah S P. Observation of Mixed Mode Fracture with Center Notched Disk Specimens [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1):125—137.
- [5] Al-shayea N A, Khanb K, Abduljawwad S N. Effects of Confining Pressure and Temperature on Mixed-mode (I—II) Fracture Toughness of a Limestone Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37:629—643.
- [6] 李伟,谢和平,王启智. 大理岩动态拉伸强度及弹性模量的 SHPB 实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(1):75—82 (Li Wei, Xie Heping, Wang Qizhi. Experimental Study for Dynamic Split Tension of Marble Disc Using SHPB. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 75—82 (in Chinese))
- [7] 李战鲁,王启智,李伟. 边切槽圆盘试样的岩石动态断裂韧度实验[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(2):54—57 (Li Zhanlu, Wang Qizhi, Li Wei. Experiment on Dynamic Rock Fracture Toughness Using Edge-notched Disc Specimen. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(2):54—57 (in Chinese))
- [8] Zhang Z X, Kou S Q, Yu J, Yu Y, Jiang L G, Lindqvist P A. Effects of Loading Rate on Rock Fracture [J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, (36):597—611.
- [9] 刘瑞堂,姜凤春,刘殿魁. 三点弯曲试样应力强度因子的动态响应[J]. 应用力学学报, 2001, 18(3):116—120 (Liu Ruitang, Jiang Fengchun, Liu Diankui. The Dynamic Response of Stress Intensity Factor of Three-point Bending Specimen. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(3):116—120 (in Chinese))
- [10] 沙桂英,刘殿魁,刘瑞堂,姜凤春. 应力波载荷作用下线弹性断裂过程的动态分析方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1):56—60 (Sha Guiying, Liu Diankui, Liu Ruitang, Jiang Fengchun. Dynamic Analyses Method of Linear-elastic Fracture under Stress Wave Loading. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 56—60 (in Chinese))
- [11] Zhou Jun, Wang Yang, Xia Yuanming. Mode-I Fracture Toughness of PMMA at High Loading Rates [J]. Journal of Material Science, 2006, 41:8363—8366.
- [12] 王启智,吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度—第二部分:实验结果[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):199—204 (Wang Qizhi, Wu Lizhou. Determination of Elastic Modulus, Tensile Strength and Fracture Toughness of Brittle Rocks By Using Flattened Brazilian Disk Specimen-Part II: Experimental Results. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 199—204 (in Chinese))
- [13] 山内良昭,中野元博,岸田敬三. 混合モード冲击下における中央切欠円板の動的エネルギー解放率の評価[J]. 日本機械学会論文集. 1997, 63(616): 2586—2591 (Yoshiaki Yamauchi, Motohiro Nakano, Keizo Kishida. Evaluation of Dynamic Energy Release Rate for Center-Notched Disk under Mixed-Mode Loading. Transaction of Japanese Society of Mechanical Engineering, 1997, 63(616): 2586—2591 (in Japanese))
- [14] 山内良昭,中野元博,岸田敬三等. 中央切欠円板を用混合モード冲击下における脆性材料の破壊じん性の測定[J]. 材料, 2000, 49(12):1324—1329 (Yoshiaki Yamauchi, Motohiro Nakano, Kerzo Kishida, Tatsuya Okabe. Measurement of Fracture Toughness for Brittle Materials under Mixed-Mode Impact Loading Using Center-Notched Disk Specimen. Journal of Society of Materials Science, Japan, 2000, 49(12):1324—1329 (in Japanese))
- [15] 韦重耕,王启智. 径向冲击中心直裂纹巴西圆盘的复合型动态断裂分析[J]. 动力学与控制学报. 2007, 5(1): 75—82 (Wei Chonggeng, Wang Qizhi. A Dynamic Fracture Analysis of Center-Cracked Brazilian Disc Specimens Under Mixed Mode Diametric Impact Loading. Journal of Dynamics and Control, 2007, 5(1): 75—82 (in Chinese))
- [16] 汪坤,冯峰,王启智. 中心直裂纹平台巴西圆盘复合型动态应力强度因子[J]. 力学与实践, 已录用, 2009, Vol. 31 (Wang Kun, Feng Feng, Wang Qizhi. Mixed Mode Dynamic Stress Intensity Factors of Cracked Straight Through Flattened Brazilian Disc Specimens. Mechanics in Engineering, to be published in 2009, Vol. 31 (in Chinese))
- [17] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991, 11:40—47 (Hu Shisheng. Split Hopkinson Pressure Bar Techniques. The Weapon Material Science and Engineering, 1991, 11:40—47 (in Chinese))
- [18] 刘剑飞,王道荣,胡时胜. 用于脆性材料的 Hopkinson 压杆动态试验新方法[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))
- [19] 王礼立. 应力波基础(第2版)[M]. 国防工业出版社, 2005 (Wang Lili. Foundation of Stress Waves (2nd edition).

National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese))

- [20] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 谭志宏. 岩石类介质 SHPB 试验加载波形的数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(6): 859—862 (Zuo Yujun, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, Tan Zhihong. Numerical Analysis of Loading Waveform in SHPB Tests of Rock-like Medium. Journal of Northeastern University (natural science edition), 2007, 28(6): 859—862 (in Chinese))

Experimental Study of Mixed Mode Dynamic Fracture for Cracked Straight Through Flattened Brazilian Disc

WANG Kun, WANG Qi-zhi

(Dept. of Civil Eng. and Applied Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Cracked straight through flattened Brazilian disc (CSTFBD) specimens were prepared for mode I and I+II mixed mode dynamic fracture tests, which were loaded by split Hopkinson pressure bar (SHPB). The loading angle was predetermined by the relationship between the loading direction and the crack line, so that the specimens could be loaded conveniently and accurately. The incident wave, reflected wave and transmission wave in the bars were compared respectively between mode I test and I+II mixed mode test. The dynamic load history was obtained from the test, which was inputted to the finite element analysis to calculate the dynamic stress intensity factor for mixed mode specimen and dynamic fracture toughness for mode I specimen. The mixed mode stress intensity factor ratio ($K_{\text{I}}(t)/K_{\text{II}}(t)$) with 15° loading angle was also calculated and compared with the value adopted from references. Favorable agreement between them shows the validity of experimental method presented in this paper.

Keywords: cracked straight through flattened Brazilian disc (CSTFBD); split Hopkinson pressure bar (SHPB); mixed mode dynamic fracture; dynamic fracture toughness