

文章编号: 1001-1455(2007)06-0541-05

碳布叠层/碳复合材料动态压缩性能测试研究*

袁秦鲁¹, 李玉龙¹, 李贺军²

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用带有波形整形器的 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 技术测试了碳布叠层/碳复合材料在应变率为 500、1 500 s⁻¹ 时的动态压缩性能。研究表明: 利用轧制紫铜作为整形器材料不仅可以有效地实现对碳布叠层/碳复合材料的常应变率压缩加载, 而且有助于改善试样两端的应力平衡, 从而保证测试数据的可靠性; 此外, 与准静态压缩相比较, 在动态压缩载荷下, 碳布叠层/碳复合材料的压缩强度有较强的应变率效应, 且复合材料压缩强度的动态增加函数可以用 Cowper-Symonds 幂函数的形式来表示。

关键词: 固体力学; 动态压缩; SHPB; C/C 复合材料; 应变率效应

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·1575

文献标志码: A

1 引言

碳/碳复合材料是一种先进的复合材料, 具有高的比模量、比强度以及优异的高温性能, 在航空、航天以及能源领域有着非常重要的应用。例如, 碳/碳复合材料已经被用作为航天飞机、超音速飞机以及涡轮叶片的热屏蔽材料, 而在这种应用条件下, 结构材料与高速物体之间的撞击是不可避免又非常关键的问题^[1]。鉴于此, 碳/碳复合材料的动态力学特性对于热屏蔽的材料设计是必不可缺的。而关于碳/碳复合材料力学性能研究基本上都关注在准静态载荷下的拉伸、弯曲以及压缩性能^[2]。自 Kolsky 提出 SHPB 这种材料动态性能测试技术以来, 使用 SHPB 测试金属及其复合材料的高应变率流变行为已相当的普遍^[3]。随着科学技术的发展, 自 20 世纪 90 年代以来, 利用 SHPB 测试陶瓷、水泥、树脂及其复合材料的高应变率力学行为也有不少的报道, 其中 S. Sarva 等^[4]测试了 SiC 陶瓷的单轴动态压缩强度, L. Ninan 等^[5]测试了离轴树脂基复合材料的动态压缩性能, D. L. Grote 等^[6]测试了混凝土的动态压缩强度, 然而目前尚未见到利用该项技术测试碳/碳复合材料的高应变率压缩力学行为的报道。

本文中利用带有波形整形器的 SHPB 技术测试碳布叠层/碳复合材料在应变率为 500、1 500 s⁻¹ 时的动态压缩性能。与准静态压缩相比, 碳布叠层/碳复合材料的动态压缩强度会有明显的应变率效应。

2 实验

SHPB 压缩试验中, 试样的设计要求一般包括三点: (1) 试样的变形要均匀, 这意味着摩擦和惯性效应可以忽略; (2) 试样中应力是处处平衡的; (3) 试样处于单轴压缩应力状态下。C. E. Cichanowski^[7]对具有不同离轴角的复合材料的 SHPB 压缩试验的三维有限元模拟表明, 与复合材料试样的长径比 l/d 为 4:1 相比, 当复合材料的长径比为 1:1 时, 离轴角的变化引起的剪应力对试样中应力均衡的影响较小。同时, H. Meng 等^[8]的研究结果表明, 与试样的长径比为 0.3、0.5 相比, 当试样的长径比为 1.0 时, 改变试样与压杆接触端面处摩擦系数的产生的有限元重构应力应变曲线与输入应力应变曲线间的偏差最小。对编织复合材料而言, 为了使测试的结果具有代表性, 试样中应尽可能的包含足够多的单胞数量。考虑到以上几点, 在实验中, 碳布叠层/碳在复合材料的试样为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱形试样。

* 收稿日期: 2006-06-05; 修回日期: 2006-08-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(90405016)

作者简介: 袁秦鲁(1973—), 男, 博士研究生。

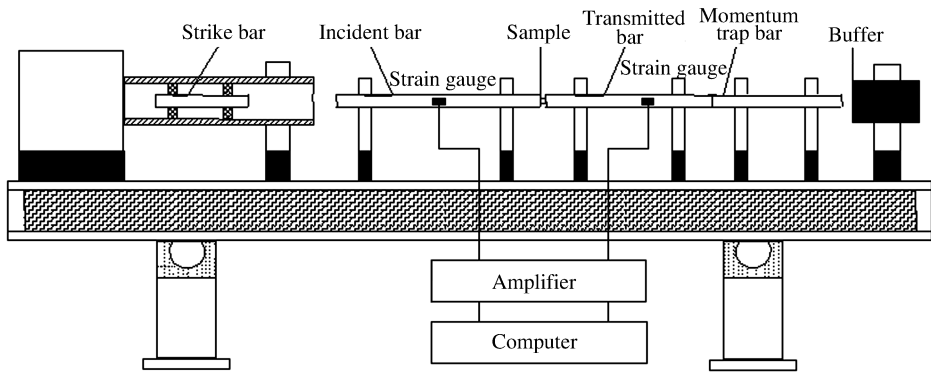


图 1 分离式 Hopkinson 压杆系统

Fig.1 Schematic illustration of split Hopkinson pressure bar system

理想的 SHPB 实验(如图 1)要满足三个基本假设:(1)冲击波在弹性杆中应是一维应力波传播;(2)试样两端受力平衡、试样变形均匀;(3)压杆的横向惯性和试样与压杆间的摩擦效应可以忽略。假设(1)要求压杆的横向尺寸远小于波长;假设(2)取决于应力波在试样中透射-反射的次数以及试样与压杆波阻抗的比值;假设(3)应通过控制试样、压杆端面的表面粗糙度、使用润滑剂以及合理设计试样的尺寸来逼近。在 SHPB 实验中,根据一维应力波理论,试样所受的应力、应变率和应变可用下式表达

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_b}{A_s} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -\frac{2c_0}{l_s} \epsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = -\frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \quad (3)$$

式中: E 为高强钢压杆的弹性模量, c_0 为压杆的弹性波波速, $\epsilon_T(t)$ 为透射杆上应变片采集到的由透射波产生的弹性应变信号, $\epsilon_R(t)$ 为入射杆上应变片采集到的由反射波产生的弹性应变信号, A_b 、 A_s 分别为压杆和试样的横截面积, l_s 为试样的初始长度。

碳布叠层/碳复合材料与高强钢制压杆间波阻抗比 β 较大(13左右),破坏应变较小,且其压缩应力-应变曲线具有类线性特征。故传统 SHPB 的方波加载模式不仅不利于保证试样的大部分变形历程处于应力平衡状态,而且也无法实现对试样的常应变率加载。而常应变率是防止二维效应以及惯性效应的一个重要条件^[9],是评价材料动态力学性能时需要考虑的一个关键性参量。常应变率加载的实现取决于入射波、透射波的波形。透射波的波形是材料性质的反映,它是一个待测的量。当材料确定时,透射波的波形亦确定,因而要实现常应变率加载只能根据透射波的波形对入射波的波形进行修正。本文中先通过波形整形器技术拉长入射脉冲,对复合材料试样两端的应力平衡进行改善,确定复合材料透射波的基本波形。然后在有限元模拟计算的基础上,通过一系列的实验摸索进一步确定选择波形整形器的尺寸、子弹弹速等因素对反射波波形的影响,实现对碳布叠层/碳复合材料的动态常应变率压缩加载。

本文中所使用的波形整形器材料为轧制态紫铜板,其中,应变率为 500 s^{-1} 时的整形器几何尺寸为 $\varnothing 7.5 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$,应变率为 1500 s^{-1} 时的整形器几何尺寸为 $\varnothing 6.0 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 。SHPB 测试系统中的压杆直径为 12.7 mm ,其中入射杆长度为 120 cm ,透射杆长度为 100 cm 。复合材料的压缩方向为碳布层的厚度方向。

3 实验结果与讨论

3.1 试样两端的应力平衡

试样两端的应力平衡是采用 SHPB 进行实验的首要条件,是采用两波公式处理实验数据的前提。在加载过程中,试样两端与压杆间的接触力随时间的变化可用下式计算

$$p_1 = AE(\epsilon_1 + \epsilon_R) \tag{4}$$

$$p_2 = AE\epsilon_T \tag{5}$$

而试样两端的应力平衡状态可以用下式来检验

$$R = 2 \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} \tag{6}$$

一般认为,当 R 的绝对值小于 0.05 时,就可以认为试样两端应力平衡要求已被实现。

由式(4)~(6)求得的试样两端接触应力、应力平衡指标 R 随加载时间的变化,如图 2~3 所示。

碳布叠层/碳复合材料的弹性波波速在 1.6 km/s,对于长度为 10 mm 的试样,按理论计算当应力波在试样中透射和反射四个来回时所需的时间为约 48 μ s。从图 2 可以看出,应力平衡点 48 μ s(R 的绝对值小于 0.1)所对应的透射波电压值为 11.9 mV,而其峰值电压为 19.1 mV。同时,从图 3 中可以看出,从试样两端的应力平衡点到试样破坏所经历的时间在 35 μ s 左右,以上均表明测试数据的有较大的有效性范围。

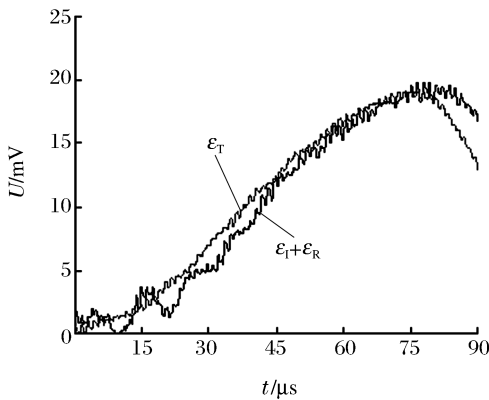


图 2 试样两端的应力随时间的变化曲线
Fig. 2 Variations of contact forces with time for C/C composites specimen

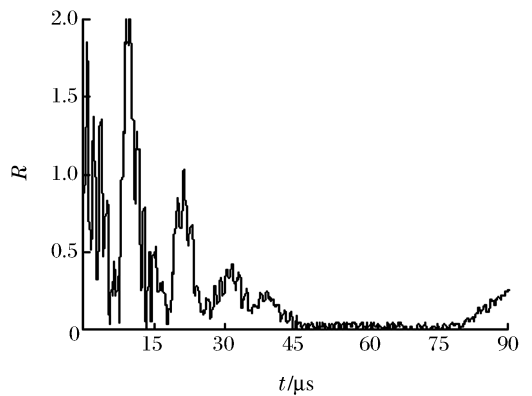


图 3 试样两端的应力平衡指标 R 随时间的变化曲线
Fig. 3 Variations of R with time for C/C composites specimen

3.2 常应变率加载

图 4 是碳布叠层/碳复合材料在应变率为 500 s^{-1} 下的压缩实验的原始波形图,根据公式(2),图中反射波上的平台意味着在动态压缩实验过程中成功地实现了常应变率加载。而图 5 进一步反映了试样在动态加载过程中的应力、应变率与应变的关系,可以看出,在应力大于 80 MPa、应变大于 0.007 以后,直到试样破坏(破坏应变为约 0.04),其变形的发生基本处于常应变率状态下,从而保证了实验数据的可靠性。

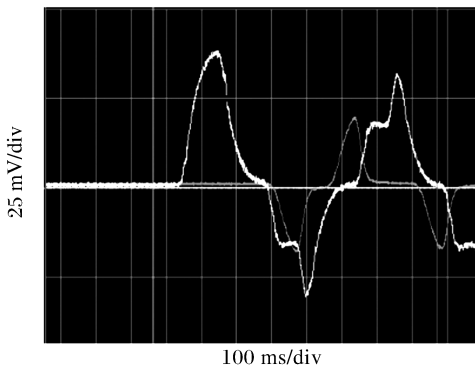


图 4 复合材料 SHPB 测试结果

Fig. 4 Typical SHPB test results of the composite

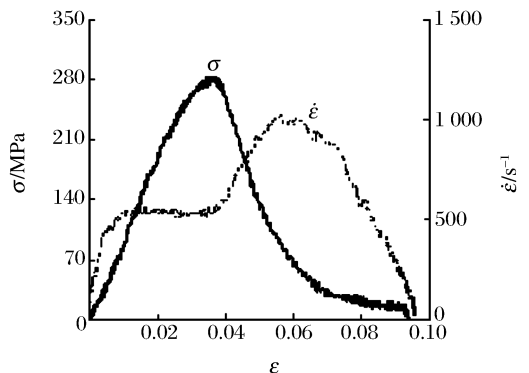


图 5 应力-应变和应变率-应变曲线

Fig. 5 The curves of stress vs strain and strain rate vs strain

3.3 碳布叠层/碳复合材料的应变率效应

在四种不同应变率的压缩载荷下,典型的碳布叠层/碳复合材料的应力-应变曲线如图 6 所示。与准静态(10^{-4} s^{-1})载荷下的压缩强度相比,在动态载荷($1.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)下,复合材料压缩强度有着非常明显的变化,从不到 200 MPa 提高到近 350 MPa,增加了近 80%,这表明碳布叠层/碳复合材料的压缩强度具有非常明显的应变率效应。图 7 为复合材料的压缩强度随应变率的变化情况,从图中可以清楚地看到复合材料的压缩强度是应变率的函数,随应变率的增加而增加。选复合材料在应变率为 10^{-4} s^{-1} 时的平均压缩强度作为参考值,碳布叠层/碳复合材料的平均压缩强度随应变率的变化可以表示为 $\sigma_D = \sigma_s f_{di}$,其中 σ_D 为对应应变率下的压缩强度, σ_s 为压缩强度的参考值, f_{di} 为压缩强度的动态增加函数,若利用 Cowper-Symonds 幂函数定义复合材料压缩强度的动态增加函数 f_{di} ,则有

$$f_{di} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (7)$$

式中: D 、 P 为材料常数,经过对实验数据进行拟合,上式可以表示为

$$f_{di} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{6\ 900} \right)^{\frac{1}{7.2}} \quad (8)$$

拟合曲线与实验数据的比较如图 8 所示,较理想地反映了碳布叠层/碳复合材料的压缩强度随应变率的变化。

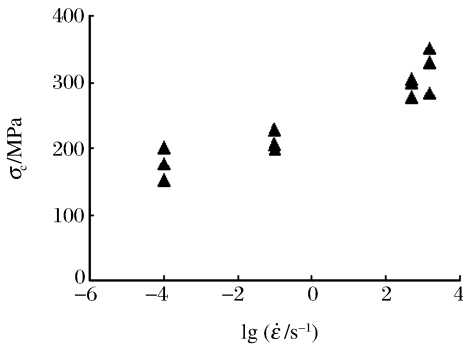


图 7 四种应变率下 C/C 复合材料的压缩强度
Fig. 7 Compressive strength of C/C composites at four different strain rates

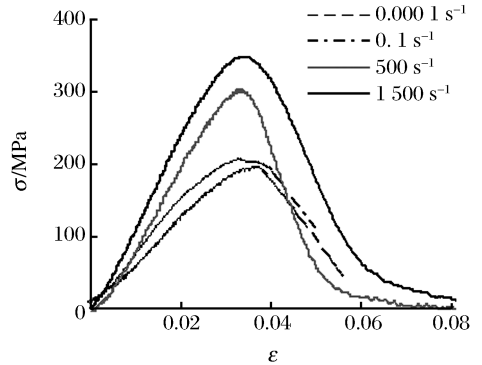


图 6 四种应变率下材料的典型压缩应力-应变曲线
Fig. 6 Typical compressive stress-strain curves of composites at four strain rates

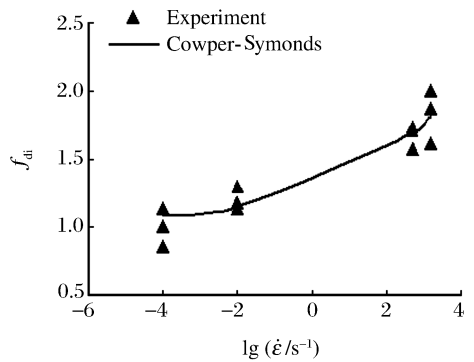


图 8 C/C 复合材料压缩强度的动态增加函数
Fig. 8 The dynamic increase functions of compressive strengths for C/C composites

4 结 论

- (1) 利用轧制紫铜作为整形器材料,通过合理的选择其尺寸、子弹的撞击速度以及长度,可以利用 Split Hopkinson Pressure Bar 实现对碳布叠层/碳复合材料的常应变率动态加载。
- (2) 碳布叠层/碳复合材料的压缩强度具有明显的应变率效应,与准静态载荷(10^{-4} s^{-1})下的压缩强度相比,当压缩应变率为 $1\ 500 \text{ s}^{-1}$ 时,其压缩强度可以提高 80% 左右。
- (3) 碳布叠层/碳复合材料压缩强度的动态增加函数 f_{di} 可以较理想地利用 Cowper-Symonds 幂函数的形式来表示。

参考文献:

- [1] Keisuke Fujii, Eiichi Yasuda, Takashi Akatsu, et al. Effect of characteristics of materials on fracture behavior and modeling using graphite-related materials with a high-velocity steel sphere[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003,28(9):985-999.
- [2] Hiroshi Hatta, Ken Goto, Takuya Aoki. Strengths of C/C composites under tensile, shear, and compressive loading: Role of interfacial shear strength[J]. *Composites Science and Technology*, 2005,65(15-16):2550-2562.
- [3] Field J E, Walley S M, Proud W G, et al. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004,30(7):725-775.
- [4] Sarva S, Nemat-Nasser S. Dynamic compressive strength of silicon carbide under uniaxial compression[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001,A317(1-2):140-144.
- [5] Ninan L, Tsai J, Sun C T. Use of split Hopkinson pressure bar for testing off-axis composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001,25(3):291-313.
- [6] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001,25(9):869-886.
- [7] Cichanowski C E. Development of test methodologies for high strain rate testing for off-axis out-of-plane composite materials[D]. Delaware: Center for Composite Materials, University of Delaware, 2004.
- [8] 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.
- [9] Samata S K. Dynamic deformation of aluminum and copper at elevate temperature[J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1971,19(3):117-135.

Experimental investigation on dynamic compressive behaviors of carbon cloth/carbon composites

YUAN Qin-lu¹, LI Yu-long^{1*}, LI He-jun²

(1. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;*

2. *School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnic University,
Xi'an 710072, Shaanxi, China)*

Abstract: Dynamic compressive behaviors of carbon cloth /carbon composites were experimentally studied at the strain rates of 500, 1 500 s⁻¹ by the split Hopkinson pressure bar with pulse shaper. Experimental results show that the pulse shaping technique ensures nearly constant strain-rate deformation experienced by specimens under dynamically equilibrated stresses so that accurate stress-strain curves at two high rates can be obtained. Compared with quasi-static compression, the dynamic compressive strength of carbon cloth/carbon composite has strong stain-rate sensitivity and it increases with strain rate. A phenomenological strain-rate-dependent material model of Cowper-Symonds power function was proposed to describe the stress-strain response of composites. The calculated results by the proposed model agree well with the experimental data at high and low strain rates.

Key words: solid mechanics; dynamic compression; SHPB; C/C composites; strain rate sensitivity

* Corresponding author: LI Yu-long

E-mail address: liyulong@nwpu.edu.cn

Telephone: 86-29-88494859