

文章编号: 1000-324X(2007)02-0311-04

C/C 复合材料压缩破坏的应变率效应研究

袁秦鲁¹, 李玉龙¹, 李贺军², 李淑萍², 郭领军²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘要: 利用电子万能试验机与整形修正的 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 研究了碳布叠层 / 碳复合材料在四种不同应变率下的压缩性能, 对其在准静态、动态载荷下的压缩破坏机理进行了初步的探讨. 研究表明: C/C 复合材料的压缩破坏强度具有较强的应变率效应, 与准静态 (10^{-4} /s) 相比, 复合材料的动态 (1.5×10^2 /s) 压缩强度可提高 70% 左右; 复合材料在准静态、动态载荷下力学性能的差异可归结为纤维与基体界面特性的应变率效应以及不同应变率下破坏模式的不同.

关键词: C/C 复合材料; 动态压缩; 应变率效应

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Strain Rate Sensitivity of C/C Composites under Compression

YUAN Qin-Lu¹, LI Yu-Long¹, LI He-Jun², LI Shu-Ping², GUO Ling-Jun²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To understand the strain rate sensitivity of compressive strength of carbon cloth/carbon (C/C) composites, quasi-static and dynamic compressive experiments were conducted in its x - y plane by means of electric universal test machine and Split Hopkinson Pressure Bar with pulse shapers. The experimental results show that the dynamic compressive fail strength of C/C composites has strong strain rate sensitivity and it increases with strain rate. Compared with the quasi-static compression, the dynamic compressive strength is higher by 70% or so. Meanwhile, the samples are failed by shearing under quasi-static loading, and by crushing under dynamic loading. The different mechanical behaviors from the experimental results indicate that it may be related to the strain rate sensitivity of interfaces characteristic of C/C composites and the change of the failure modes.

Key words C/C composites; dynamic compression; strain rate sensitivity

1 引言

碳 / 碳 (C/C) 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、航天以及能源领域都有着非常重要的应用, 研究工作者对 C/C 复合材料的制备工艺以及力学性能都进行了研究. 但是关于 C/C 复合材料力学性能的研究, 文献基本上都关注于其在准静态载荷下的拉伸、弯曲以及压缩性能^[1-3], 而对于 C/C 复合材料在动态、高应变率载荷下的压缩性能, 则研究的较少. 本工作在测

试碳布叠层 / 碳复合材料准静态压缩性能的基础上, 利用整形修正的 SHPB 技术测试了其在高应变率载荷下的动态压缩性能, 初步讨论了它的破坏机理.

2 试验方法

试验所用的 C/C 材料由西北工业大学超高温复合材料实验室提供, 为采用 CVI 工艺制备的碳布叠层 / 碳复合材料, 表观密度为 1.55 g/cm^3 左右,

收稿日期: 2006-05-09, 收到修改稿日期: 2006-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (90405016)

作者简介: 袁秦鲁 (1973-), 男, 博士生. 通讯联系人: 李玉龙, 教授. E-mail: liyulong@nwpu.edu.cn.

尺寸为 $\phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$.

复合材料的静态压缩实验设备为长春试验机研究所生产的 CCSS88010 电子万能试验机. 复合材料的动态压缩试验装置为 SHPB 压杆系统, 它目前被广泛地应用于测试材料在高应变率 ($10^2 \sim 10^4/\text{s}$) 载荷下的力学性能. 其原理如图 1 所示: 气压驱动撞击杆以一定的速度撞击输入杆, 从而在输入杆中产生压缩应力脉冲, 当该压缩应力脉冲传播到输入杆与试件接触面时, 一部分应力脉冲反射回输入杆, 而另一部分则透射给试件, 对试件实施冲击加载并使其破坏. 利用贴在入射杆、透射杆上的应变片分别测得的反射脉冲、透射脉冲电压信号, 将这两个电压信号转化成应变信号, 用间接的方法推算出夹在两杆之间的试件的动态应力 - 应变关系. 根据一维应力波理论, 试样所受的应力 $\sigma_s(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 及应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 可分别用以下三式求得:

$$\sigma_s = E \left(\frac{A_b}{A_s} \right) \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = - \left(\frac{2C_0}{l_s} \right) \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = - \left(\frac{2C_0}{l_s} \right) \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (3)$$

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, $\varepsilon_T(t)$ 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, $\varepsilon_R(t)$ 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.

在准静态、动态压缩实验中, 复合材料的压缩变形方向均为碳布叠层的厚度方向.

3 试验结果与讨论

在两种不同应变率的压缩载荷下, 碳布叠层 / 碳纤维复合材料的应力应变曲线如图 2 所示: 与准静态 ($10^{-4}/\text{s}$) 的压缩强度相比, 在动态载荷 ($5 \times 10^2/\text{s}$) 下, 复合材料压缩强度有着明显的变化, 从不到 200MPa 提高到 300MPa 左右, 表明其压缩强度具有明显的应变率效应; 同时复合材料在高应变率载荷下的破坏应变与准静态的相比, 尽管有所下降, 但其幅度与压缩强度的提高相比, 则非常小. 比较复合材料两种不同应变率的应力应变曲线, 可以看出: 在准静态载荷下, 复合材料的应力应变曲线具有明显的伪塑性、非线性特征; 而当压缩应变率提高到 $5 \times 10^2/\text{s}$ 时, 复合材料应力应变曲线的伪塑性特征减弱, 压缩强度之前的应力应变曲线具有更加明显的线性特征. 图 3 为碳布叠层 / 碳纤维复合材料的压缩强度随应变率对数的变化规律, 其中压缩强度分别为不同应变率下的三次实验数据, 压缩应变率分别为 $10^{-4}/\text{s}$ 、 $10^{-2}/\text{s}$ 、 $5 \times 10^2/\text{s}$ 和 $1.5 \times 10^3/\text{s}$, 该图直观揭示了复合材料压缩强度的应变率效应, 当应变率为 $10^{-4}/\text{s}$ 时, 其最大压缩强度不到 200MPa, 而当应变率增加到 $1.5 \times 10^3/\text{s}$ 时, 其最大压缩强度增加到近 350MPa, 表明复合材料的压缩强度具有强的应变率效应.

碳布叠层 / 碳纤维复合材料在准静态压缩破坏后的形貌如图 4 所示: 尽管由于面内碳纤维束的存在, 使复合材料破坏主裂纹发生了较为明显的偏折, 复合材料的静态压缩破坏仍表现为典型的剪切破坏, 剪切角大约在 40° 左右, 断面上不仅可以观察到破碎的碳纤维、基体碳屑, 还可以观察到露头、

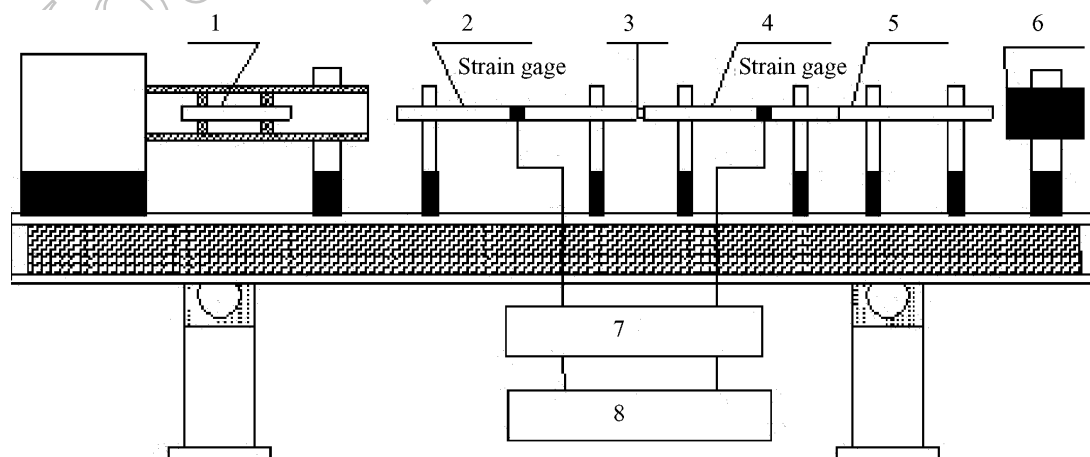


图 1 分离式 Hopkin50n 压杆系统

Fig. 1 Schematic illustration of split hopkinson pressure bar system

1. Strike bar; 2. Incident bar; 3. Sample; 4. Transmitted bar; 5. Momentum trap bar; 6. Buffer; 7. Amplifier; 8. Computer

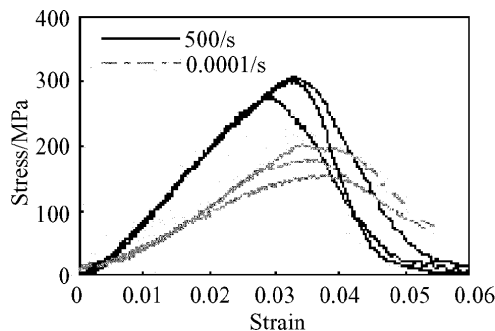


图 2 两种应变率下 C/C 复合材料的压缩应力 - 应变曲线

Fig. 2 Compressive experimental stress-strain curves of the C/C composites at two strain rates

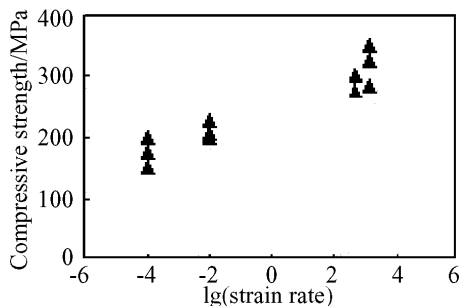


图 3 材料的压缩强度 - 应变率对数关系

Fig. 3 Curves of compressive strength of the C/C composites vs logarithm strain rate

不露头受剪切而断裂的碳纤维束. 复合材料在动态压缩破坏后的形貌如图 5 所示: 基质碳和碳纤维粉碎成大小不一的碎片状, 因断裂而长度尺寸不等的碳纤维束清晰可见, 且较大的复合材料碎片间具有较明显的劈裂特征.

微裂纹的形成与扩展对陶瓷基复合材料的力学性能起着支配性的作用^[4], 陶瓷基复合材料的损伤机理主要为基体上产生微裂纹以及微裂纹在界面处的扩展, 这两种损伤机理的结合决定了陶瓷基复合材料的力学行为^[5]. C/C 复合材料界面强度与力学性能关系的研究^[6]亦表明界面强度对复合材料的拉伸, 压缩以及剪切等性能起着决定性的作用, 而 C/C 复合材料中, 为了利用增强纤维与基体间的脱毡、滑移以及拔出等机制改善材料的韧性, 碳纤维与基体之间的界面并不要求强界面. CVI 法制备的 C/C 复合材料的基本微观特征在于其碳基体上存在大量的微裂纹以及微孔洞, 在压缩过程中, 随着载荷的增加, 由于应力集中的作用, 裂纹会首先在这些微裂纹及微孔洞处形核并扩展, 当裂纹扩展到达纤维与基体界面时, 界面的强度对裂纹偏转及纤维束的损伤有着重要的作用, 当界面强度较弱时, 纤维与基体的脱粘使扩展到

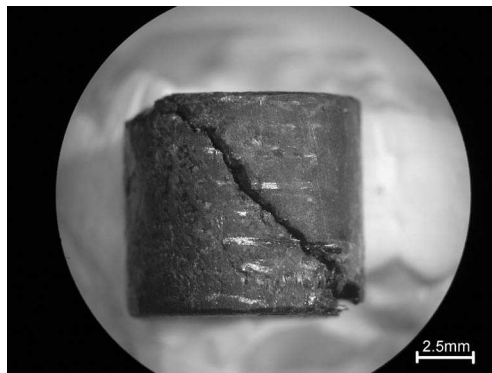


图 4 C/C 复合材料在准静态 (10^{-4} s) 压缩破坏后宏观形貌照片

Fig. 4 Macrostructure morphologies of the C/C composites at static compressive loads

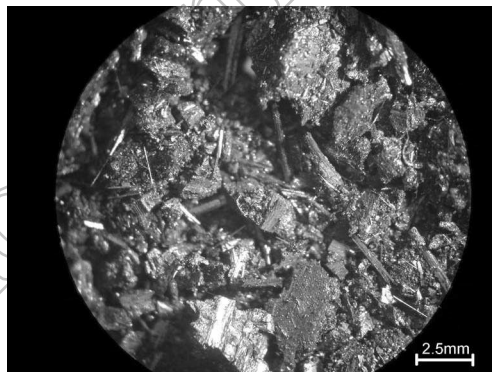


图 5 C/C 复合材料在动态 (500/s) 压缩破坏后断面的宏观形貌照片

Fig. 5 Macrostructure morphologies of the C/C composites at dynamic compressive loads

界面处的裂纹在界面处发生偏转, 使得下一个纤维束的损伤破裂面更有可能与前一个纤维的损伤破裂面处于不同的平面上, 造成复合材料在压缩时易于发生较大剪切角的剪切破坏, 因此, 在静态载荷下, 碳布叠层 / 碳复合材料典型的剪切破坏是由其较弱的界面强度所决定的. C/C 复合材料是两种脆性材料的复合, 其应力应变曲线的非线性特征以及伪塑性行为主要来自于界面间的脱粘、滑移、拔脱等机制, 故在动态载荷下, 复合材料应力应变曲线非线性特征、伪塑性行为的弱化可以被归结为与界面强度的应变率效应有关, 即在动态高应变率载荷下, 纤维与基体间界面的脱粘、滑移、拔脱变得更加困难. 界面强度的应变率效应使邻近裂尖处纤维束上的应力集中程度无法被降低, 使扩展到界面处的平行于压缩轴的裂纹倾向于垂直剪切破坏碳纤维束, 而不是在界面处发生偏折, 从而使复合材料的动态压缩破坏具有劈裂特征, 即剪切角较小, 而小的剪切角往往使复合材料具有较高的压缩强度. 此外, 材料破坏后碎片的数

量与材料损伤过程中的裂纹形核并扩展的数量有关,故 C/C 复合材料在动态载荷下的粉碎也意味着它在损伤过程中有更多的微裂纹形核并扩展,这减轻了局部的应力集中,消耗了更多的能量,从而使复合材料的承载能力得以改善,最终导致复合材料在动态载荷下具有更高的压缩强度.

4 结论

1. 在准静态载荷下,碳布叠层 / 碳复合材料的破坏具有明显的剪切破坏特征,而在动态载荷下,其破坏具有较明显的劈裂特征.

2. 碳布叠层 / 碳复合材料的压缩强度具有强烈的应变率效应,而破坏应变的应变率效应并不明显,与准静态 ($1.0 \times 10^{-4}/\text{s}$) 相比,当压缩应变率为 $1.5 \times 10^3/\text{s}$ 时,复合材料的压缩强度可提高 70% 左右.

3. 碳布叠层 / 碳复合材料的压缩强度的应变率效应可归因于复合材料界面强度的应变率效应,以及破坏模式的不同.

参考文献

- [1] 孙万昌,李贺军,白瑞成,等 (SUN Wan-Chang, *et al*). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2005, **20** (3): 671-676.
- [2] Luo Ruiying, Yang Caili, Cheng Jiwei. *Carbon*, 2002, **40** (12): 2221-2228.
- [3] 李江鸿,熊翔,张红波,等. 中南大学学报, 2005, **36** (3): 375-379.
- [4] Evans A G, Zok F W. *Journal of Materials Science*, 1994, **29** (15): 3857-3896.
- [5] Marshall D B, Cox B N, Evans A G. *Acta Metall*, 1985, **33** (11): 2013-2021.
- [6] Hiroshi Hatta, Ken Goto, Takuya Aoki. *Composites Science and Technology*, 2005, **65** (15-16): 2550-2562.