

压缩载荷下碳/环氧复合材料的动力学响应行为

Behavior Characterization of Dynamic Mechanical Response for
Carbon/Epoxy Composites Under Compressive Load

曹茂盛, 周 伟, 雷义龙, 荣吉利
(北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)
CAO Ma-sheng, ZHOU Wei, LEI Yi-long, RONG Ji-li
(School of Material Science and Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 以铺层顺序为[45/0/- 45/0/- 45/90/0] s 的新型碳纤维增强改性环氧树脂复合材料为研究对象, 采用分离式 Hopkinson (SHPB) 压杆装置为加载手段, 在高速冲击载荷条件下, 对复合材料层合板在厚度方向和平面内纵向的动态压缩性能进行实验研究, 分别得到在四种不同应变率下的应力-应变关系; 并借助 SEM 对复合材料断口损伤形貌进行表征。结果表明: 在高应变率条件下, 层合板厚度方向的动态压缩强度及失效应变明显大于平面内加载方向; 基体开裂、分层及剪切断裂是复合材料在动态压缩条件下的主要损伤及断裂模式。
关键词: 动态压缩; 高应变率; 损伤形貌
中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)04-0015-04

Abstract: The compressive tests were performed to obtain the dynamic mechanical properties of a novel carbon fiber reinforcement epoxy composites at high strain rate range. The dynamic compressive properties were investigated utilizing the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) apparatus through the normal direction as well as the in-plane direction under high velocity impact loading. Based on the test results, the dynamic stress-strain relation was obtained at four different strain rates loading, respectively. At the same time, the fractography of the samples was characterized by the SEM method. The results showed that the dynamic compressive strength and the failure strain of the laminated samples in the normal direction were higher than that in the in-plane direction at high strain rates. The main damage and fracture modes were matrix crack, delamination and shear fracture under the dynamic compressive loading.
Key words: dynamic compress; high strain rate; damage morphology

纤维增强复合材料具有高的比强度、比模量及其优良的可设计性, 广泛应用于航空、航天、军事、汽车等领域。在工程应用中, 复合材料可能遭受到诸如子弹撞击等不同形式的高速冲击, 因此对其在高应变率下的动态学性能研究, 引起人们的广泛关注^[1-4]。20 世纪 70 年代, Sierakowski 等^[5]首先研究了高应变率压缩载荷下, 钢/环氧复合材料的动态力学行为。在应变率为 $10^{-3} \sim 450\text{s}^{-1}$ 的范围内, Ochola 等^[6]通过对碳纤维和玻纤复合材料应变率效应的研究, 得出了失稳应变随应变率增加而减小的结论。Hsiao 和 Daniel^[7]实验发现碳/环氧复合材料的应变率相关性对动态载荷敏感。Woldesenbet 等^[8]也研究了石墨/环氧在应变率范围内的尺寸效应。目前, 对于复合材料的动态力学性能研究, 主要还是在高应变率下的不同影响因素, 比

如纤维体积分数^[9]和试样尺寸^[10]等, 而在高应变率下的压缩冲击损伤行为及响应机理方面的研究较少。本工作通过对铺层顺序为[45/0/- 45/0/- 45/90/0] s 的新型碳/环氧复合材料进行动态冲击加载, 揭示了其动力学响应行为, 并结合断口损伤形貌分析, 对其压缩损伤机理进行初步探讨。

1 实验过程及原理

1.1 实验材料制备

该材料共有 13 层, 呈准各向同性, 铺层顺序为 [45/ 0/- 45/ 0/- 45/ 90/ 0] s, 沿平面内纵向加载的长方体试样, 尺寸为 10 52mm × 4 32mm, 沿厚度方向加载的圆柱形试样, 横截面尺寸为 $\phi 12.0\text{mm} \times 3.9\text{mm}$,

如图 1 所示。图 2 为试样原始形貌的金相图,基体区内树脂分散均匀,表面无大的树脂颗粒,纤维排列平直,无皱褶或断丝,宏观形貌表明层间结合状况较好。

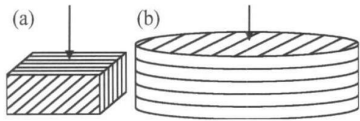


图 1 试样形状和加载方向

(a)平面方向加载;(b)厚度方向加载

Fig. 1 Specimen geometry and loading direction for carbon/epoxy materials (a)in-plane direction loading;(b)normal direction loading

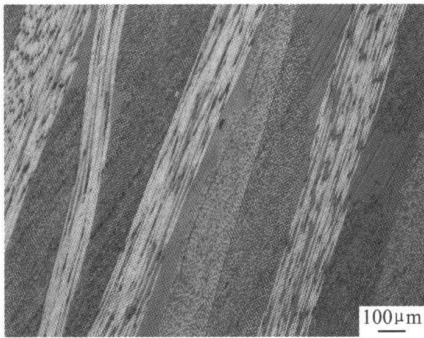


图 2 试样的原始形貌

Fig. 2 The original morphology of the sample

1.2 实验装置工作原理

图 3 为 SHPB 压杆装置的工作原理图。

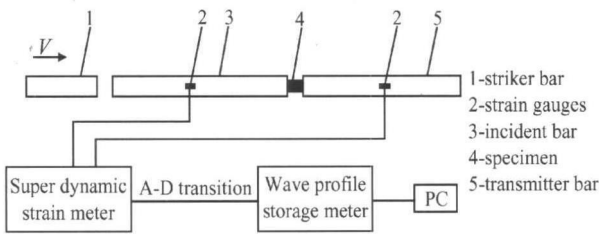


图 3 SHPB 装置工作原理图

Fig.3 The schematic diagram of the SHPB apparatus

当输入杆中的压力脉冲到达试样时,一部分被界面反射,而另一部分穿过试样到达透射杆。由于加载脉冲的作用时间比短试样中波的传播时间要长得多,使得试样中的应力很快趋向均匀化,因而可以忽略试样内部的波的传播效应。利用装在压杆上的电阻应变片,能够记录下 3 个脉冲(入射、反射、透射)连续应变-时间曲线,根据一维应力波理论,得到材料动态应力-应变关系。可以推导出屈服应变 ϵ_s , 应变率 $\dot{\epsilon}$, 屈服强度 σ_s 的基本方程如下:

$$\epsilon_s = - \frac{2C_0}{l_0} \int_0^{\epsilon_s} \epsilon dt \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon} = - \frac{2C_0}{l_0} \epsilon \tag{2}$$

$$\sigma_s = \frac{EA}{A_s} \epsilon \tag{3}$$

式中: C_0 为弹性波速; l_0 和 A_s 分别是试样的原始长度和横截面积; A, E 分别为压杆的横截面积和弹性模量; ϵ_r, ϵ_t 分别为反射波、透射波的应变值。

2 结果与分析

2.1 碳/环氧材料沿平面内纵向和厚度方向加载

图 4 为平面内纵向加载时,碳/环氧材料在四种不同应变率下的动态应力-应变曲线。在图 4a 中,应变率分别为 740, 843, 1001, 1110s⁻¹ 时,最大应力值分别为 514, 532, 498, 538MPa, 其对应的应变分别为 0.033, 0.033, 0.026, 0.025, 而模量值分别为 13333, 14124, 17398, 25151MPa。由此可见随应变率增加,材料强度有少许增加,而应变则显示出降低的趋势,同时材料的初始模量显著增强。与应变率在 740s⁻¹ 时的初始模量相比较, 1110s⁻¹ 时的模量增加了 88.6%。由此表明在高应变率动态冲击下,该材料表现出明显的率敏感效应。图 4b 中,在应变率分别为 2170, 2201, 2260, 2490s⁻¹ 的动态载荷下,该材料对应的最大应力值分别为 681, 732, 738, 784MPa, 而在此峰值应力下的应变分别为 0.077, 0.082, 0.074, 0.079, 模量值分别为 7470, 6220, 7172, 6773MPa。可知,随着应变率的增大,材料的强度值增加较少,应变先增加后降低,但是初始模量呈逐渐降低趋势。与平面向加载相比较,该材料在峰值应力下的平均应变增加了 1.7 倍,应力仅增加 41%,初始模量显著降低。由图 2 可知,在材料中,改性树脂在基体区内分散均匀,界面结合性能较好,在图 4 中由测试值可得到该试样有较高的强度,与前者较好的相符。因此试样在冲击压缩加载时,失稳强度较高,表明该材料有较良好的力学承载性。

2.2 碳/环氧材料的断口损伤分析

图 5、6 分别为沿平面内纵向及厚度向压缩加载后,该材料试样的断口损伤形貌。在图 5a 中,可观察到明显的基体开裂。在材料的富树脂区,基体有较大的塑性变形。起始微裂纹沿纵向扩展,最终导致材料失稳损坏。由图 5b 可发现材料有明显的分层及剪切现象出现。这可能是由于在平面加载过程中,基体承担较大载荷,纤维的定向排列发生破坏,这时强度较弱的纤维/基体界面首先发生损伤。改性基体在断裂过程中,因为其优良的弹塑性,使得变形过程吸收冲击能量增加,有效延缓了基体开裂扩展和界面分层。在图

6a 中, 沿厚度向加载时试样主要发生了剪切断裂, 也可观察到有大量纤维断裂。由图 6b 可看到纤维界面处结合状况良好, 同时伴随有少量的基体开裂。结合

图 4 中的应力-应变曲线可知, 沿厚度方向加载的试样强度较大, 这可能是因为纤维主要承载, 而沿纵向时基体强度较弱, 故材料的失稳强度和应变较低。

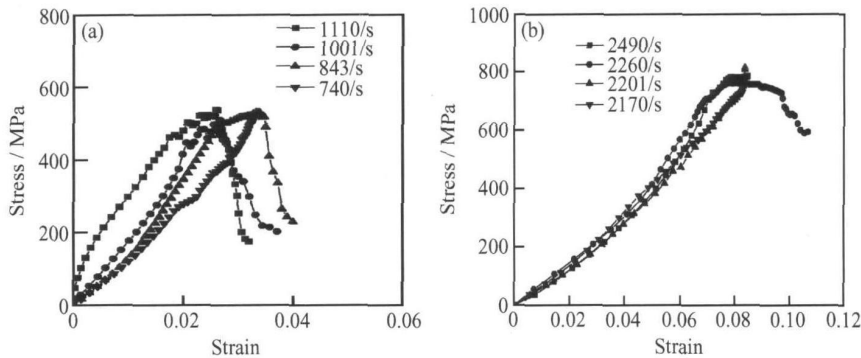


图 4 不同应变率下碳/环氧材料的动态应力-应变曲线 (a)平面内纵向加载;(b)厚度方向加载
Fig. 4 The dynamic stress-strain curves of carbon/epoxy materials at different strain rates
(a) in-plane direction loading; (b) normal direction loading

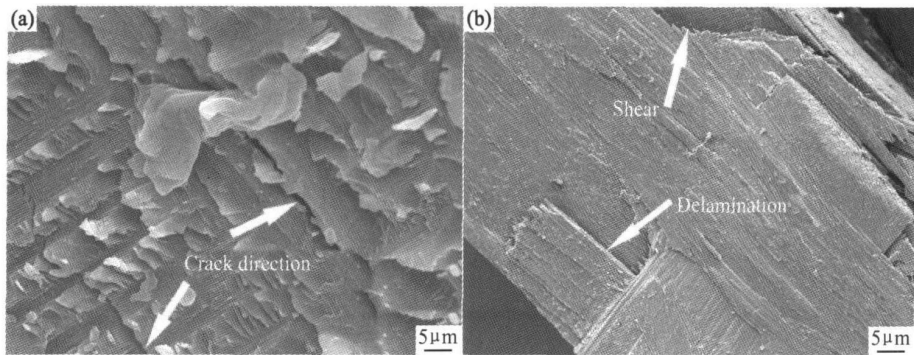


图 5 沿平面内纵向加载时试样损伤断口 SEM 形貌 (a) 基体开裂;(b) 分层断裂
Fig. 5 SEM micrographs of carbon/epoxy materials along the in-plane direction under dynamic impact test (a) matrix crack; (b) delamination fracture

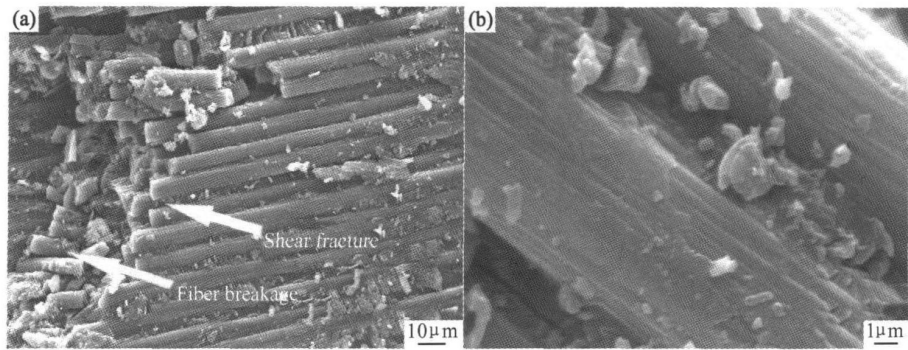


图 6 沿厚度向加载时试样断口损伤形貌 SEM 图 (a) 剪切断裂;(b) 纤维/基体界面
Fig. 6 SEM micrographs of carbon/epoxy materials along the normal direction under dynamic impact test (a) shear fracture; (b) fiber/matrix interface

3 结论

(1) 沿平面内纵向和厚度方向加载时, 可比较得出该材料的动力学行为在不同应变率下有很大差异。与

沿平面内纵向加载相比较, 在厚度方向加载时, 强度和应变都显著增加, 而初始模量值则有较大的下降。

(2) 通过试样断口损伤形貌分析, 试样沿厚度方向加载时, 主要表现为剪切断裂, 其失稳强度明显要大于

沿平面内纵向加载时的强度。此结论与动态应力-应变曲线相吻合。

(3) 试样沿平面加载时, 因为基体承担主要载荷, 故在纤维/基体界面的薄弱处较易发生损伤, 高应变速率下, 载荷来不及从界面转移到纤维, 就已经产生了断裂。沿厚度方向加载时与之相比较, 最大应力增加较少, 但平均应变增加了约 1.7 倍, 因此初始模量值有较大的降低。

参考文献

- [1] ALIYU A A, DANIEL I M. Effects of strain rate on delamination fracture toughness of graphite/epoxy [M]. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 1985. 336–348.
- [2] JEONG K S, LEE D G, KWAK Y K. Experimental investigation of the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite thin beams [J]. Composite Structures, 1995, 33(2): 77–86.
- [3] SHEN H S, ZHENG J J. Dynamic response of shear deformable laminated plates under thermomechanical loading and resting on elastic foundations [J]. Composite Structures, 2003, 60(1): 57–66.
- [4] WENLUNG L, KRIZ, RONALD D. Shear waves in fiber reinforced composites with interfacial cracks [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(13): 1425–1449.
- [5] SIERAKOWSKI R L, NEVILL G E, ROSS C A, et al. Dynamic compressive strength and failure of steel reinforced epoxy compos-

ites [J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5(3): 362–377.

- [6] OCHOLA R O, MARCUS K, NURICK G N, et al. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates [J]. Composite Structure, 2004, 63: 455–467.
- [7] HSIAO H M, DANIEL I M. Strain rate behaviour of composite materials [J]. Composites Part B, 1998, 29: 521–533.
- [8] WOLDESENBET E, VINSON J R. Specimen geometry effects on high strain rate testing of graphite/epoxy composites [J]. AIAA J, 1999, 37(9): 1103–1106.
- [9] BENEDIKT B, RUPNOWSKI P, KUMOSA M. Visco-elastic stress distributions and elastic properties in unidirectional composites with large volume fractions of fibers [J]. Acta Materialia, 2003, 51: 3483–3493.
- [10] WISNOM M R. Size effects in the testing of fibre-composite materials [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59: 1937–1957.

基金项目: 十一五国防基础科研计划资助项目(A2220061080); 武器装备预研基金资助项目(5141240205BQ0154); 国家自然科学基金资助项目(10672020)

收稿日期: 2006-11-25; 修订日期: 2007-09-12

作者简介: 曹茂盛(1961–), 男, 教授, 从事材料科学与工程方向研究, 联系地址: 北京理工大学材料科学与工程学院(100081)。

美国通用电气公司 CF34 风扇叶片缺陷的细节原因

美国国家运输安全委员会(NTSB)于2008年3月6日向FAA的建议中提到了两起由配装CF34的CRJ200发动机失效引发的安全注意事项。在这两起事故中, 由于风扇叶片断裂导致异常噪音与振动, 其中一次导致发动机起火。对叶片的检查显示失效原因是制造过程导致材料缺陷。风扇叶片供应商 Teleflex Aerospace Manufacturing Group, 在将生产转移至墨西哥后接收到一个大的钛合金坯段铝含量超标。美国通用电气公司 GE 认为这导致了硬点聚集形成了一个排列的硬区域, 长时间的使用将导致裂缝。GE 补充到: “更高的铝浓度导致更高的硬点数量, 从而对裂缝更加敏感。”有缺陷的叶片在2002年末到2006年末期间生产。多元公司 Teleflex 将其 Teleflex Aerospace Manufacturing Group 部门在2007年卖给了英国的 GKN 公司。Teleflex Aerospace 对卖出去的部门不予评价。GKN 公司北美航宇部门目前未就此做出评价。

发动机制造商鉴别了总数13000片叶片存在缺陷, 粗略估计装在1500台CF34-3B1发动机上。美国国家运输安全委员会(NTSB)向FAA发出了六份建议, 其中包括要求GE确定在4717循环以内合理的最大使用时间, 并要求在超过使用限制前更换这些叶片。在ASA航空公司的事故中, 一个风扇叶片在4717循环及5845小时后失效, 国家运输安全委员会(NTSB)认为“该叶片在服役期内过早失效。”美国国家运输安全委员会(NTSB)还要求FAA要求GE对这些叶片的制造过程进行额外测试, 并对CF34-1A3发动机进行设计修改以确保发动机剧烈振动不会导致发动机起火。委员会还建议加拿大运输部要求庞巴迪对CRJ100/200发动机节流阀齿轮箱保持特性进行修改, 以确保能够承受由于风扇叶片脱离或类似事件导致的载荷。