

文章编号: 1673-3193(2024)04-0550-07

# 碳纤维复合材料层合板的动态力学性能及失效机制

林作泓<sup>1</sup>, 高玉波<sup>1</sup>, 卢涛<sup>2</sup>

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051; 2. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了进一步明确碳纤维增强复合材料(CFRP)在冲击加载下的动态力学行为, 采用电子万能试验机 and 霍普金森压杆(SHPB)试验装置, 研究了铺层方式为 $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 的CFRP在厚度和面内方向的静/动态力学性能。结果表明, CFRP复合材料主要发生脆性破坏, 在不同方向纤维铺层之间相互纠缠, 有效支撑基体, 可避免材料发生瞬间坍塌失效。受微裂纹扩展和加载速率关系的影响, 复合材料呈现出明显的正相关应变率效应, 虽然加入了不同铺层纤维, 但材料失效破坏仍主要由基体决定。沿厚度方向加载, 裂纹主要以沿 $45^\circ$ 角扩展的剪切破坏为主, 断面在剪应力作用下出现了大量纤维的拔出和断裂。沿面内加载方向, 纤维间的粘结层发生脆性断裂, 与加载方向一致的纤维发生了屈曲失稳, 裂纹穿透纤维层导致脱层。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料层合板; 力学性能; 失效机理; 应变率效应

**中图分类号:** O347.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.04.017

**引用格式:** 林作泓, 高玉波, 卢涛. 碳纤维复合材料层合板的动态力学性能及失效机制[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 550-556.

LIN Zuohong, GAO Yubo, LU Tao. Dynamic mechanical property and failure mechanism of carbon fiber composite laminates[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(4): 550-556.

## Dynamic Mechanical Property and Failure Mechanism of Carbon Fiber Composite Laminates

LIN Zuohong<sup>1</sup>, GAO Yubo<sup>1</sup>, LU Tao<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to further determine the dynamic mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under impact loading, the static/dynamic mechanical properties of CFRP composite with stacking sequence  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  in thickness and in-plane direction were investigated using an electronic universal testing machine and a split-Hopkinson pressure bar (SHPB) test device. Results showed that the CFRP were failed mainly in brittle mode, and the fiber layers in different directions were entangled with each other, which can effectively support the matrix and avoided the instantaneous collapse failure of the material. Due to the relationship between the microcrack propagation and the loading rates, the strain rate effect of the composite was obviously positive correlation. Although different fiber layers were added, failure of the composite was still mainly controlled by the matrix material. Loading along the thickness direction, the cracks mainly spread along the  $45^\circ$  angle of shear failure, and many fibers were

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(12172337); 山西省基础研究计划资助项目(20210302123022)

作者简介: 林作泓(1998-), 男, 硕士生, 主要从事材料动态力学性能研究。

通信作者: 高玉波(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事冲击动力学方向的研究。E-mail: gaoyb@nuc.edu.cn.

pulled out and fractured under the shear stress loading. Along the in-plane loading direction, the bonding layer between the fibers was brittle fracture, and the fibers with the same loading direction were buckling and unstable, and cracks penetrated the fiber layer and then cause delamination.

**Key words:** carbon fiber reinforced polymer laminates; mechanical property; failure mechanism; strain rates effect

## 0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有比强度高、比刚度大、耐腐蚀和低密度等特性,近年来被广泛用于航空航天、军事防护、土木工程和车辆工程等领域。实际应用中,CFRP复合结构会遭受冲击载荷的作用,如飞机结构鸟撞、船体的水雷爆炸、民用结构的弹道冲击、装甲结构和汽车碰撞等<sup>[1-2]</sup>。碳纤维复合材料具有独特的细观结构与力学性能,目前为止对它们在冲击载荷作用下的力学行为与损伤模式的认识还不够完整与成熟。因此,有必要对CFRP复合材料的动态力学性能进行系统研究,以评价复合材料装甲的防护性能,并为复合材料装甲结构设计提供理论和技术支持。

CFRP复合结构的抗冲击性能主要受其动态力学性能影响<sup>[3-4]</sup>。张赛等<sup>[5]</sup>发现碳纤维复合材料表现出线弹性变化规律,无明显的塑性形变现象。Ochola等<sup>[6]</sup>研究了碳纤维增强材料(CFRP)的应变率敏感性,结果表明,随着应变速率的增大,复合材料动态强度逐渐增大,破坏应变则逐渐减小。Kapoor等<sup>[7]</sup>研究发现,随着应变率的增加,编织凯夫拉增强聚丙烯复合材料的峰值应力增加了3倍,韧性增加了近10倍,峰值应力应变增加了2倍之多。Song等<sup>[8]</sup>研究了编织碳纤维/环氧树脂复合材料的面外和面内压缩力学性能。结果表明,复合材料的压应力和破坏应变均具有一定的应变率敏感性,且面外强度高于面内方向。潘成龙<sup>[9]</sup>对CFRP单向板在3个主方向进行试验,结果表明,3个方向上抗压强度随着应变率的增加而增大,同时纤维方向压缩强度远大于另外两个方向,这是因为除了基体外还有纤维也承受压力。

目前,CFRP复合材料的冲击失效机理和各向异性效应尚无明确的结论。田芩<sup>[10]</sup>研究了碳纤维纬编织物增强复合材料的拉伸、弯曲和冲击性能,发现主要存在基体开裂、纤维与树脂的脱粘和纤维断裂3种破坏形式,且随着层数和厚度的增加,复合材料的力学性能有上升趋势。周菊

萍等<sup>[11]</sup>认为单向混杂碳纤维复合材料层合板的力学性能与失效模式随混杂比和铺层方式而不同。Chen等<sup>[12]</sup>发现冲击压缩、裂纹诱发卸载、裂纹偏转引起的三相破坏机理可大大提高复合材料层合板的强度和韧性。Wang等<sup>[13]</sup>研究发现,CF/PPS复合材料在面内压缩载荷作用下的主要破坏模式为分层伴剪切破坏,面外压缩载荷作用下主要为翘曲纤维束断裂;对于缎纹编织复合结构,试件主要以剪切破坏模式破坏。Song等<sup>[8]</sup>认为高应变率下主要发生分层破坏,准静态加载时面内方向即发生剪切变形也存在分层失效。Tian等<sup>[14]</sup>报道了碳/环氧复合材料层压板的性能在3个主要方向上都具有独特的特征。然而,到目前为止关于CFRP复合材料的应变率敏感性的定量表征和破坏机理的研究相对较少,而这对复合材料的工程结构应用有着重要的影响。

综上所述,本文针对CFRP复合材料在 $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 堆积顺序下的静/动态力学性能,采用电子万能试验机和SHPB加载装置分别对复合材料进行准静态和动态压缩试验,获取材料在不同应变率和不同加载方向下的应力应变曲线、动态强度及其应变率效应,引入脆性材料应变率效应理论,解释CFRP在不同方向上抗压强度随应变率的变化机理。同时,对回收试验后的试样进行观察,分析厚度和面内方向下材料的失效模式。

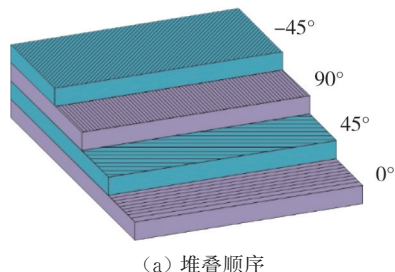
## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

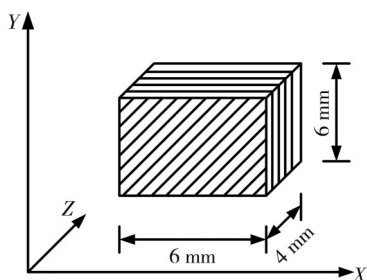
CFRP碳纤维增强树脂基复合材料层合板由江苏博实碳纤维科技有限公司提供。该层合板采用T700S碳纤维增强9A16环氧树脂预浸料经高温压制而成。堆叠顺序为 $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 的准各向同性铺层,如图1所示,材料性能参数如表1所示。

将CFRP层合板使用水切割分成长方体试样,具体为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 尺寸的长方体,如图1所示。其中,斜线代表层合板的平面纤维铺层,垂直于平面纤维铺层的方向为厚度方向。为了消除试

样-压杆接触面的摩擦效应对试验结果的影响,使用200目和1000目的砂纸对试样表面进行精细化打磨,最终确保试样与压杆接触面之间的平行度、垂直度和粗糙度,并在各接触界面之间使用润滑剂以减小摩擦力对测试结果的影响。



(a) 堆叠顺序



(b) 试样尺寸说明

图1 CFRPs的堆叠顺序和试样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic of CFRPs stacking sequence and specimen size

表1 层合板基本材料参数

Tab. 1 Basic material parameters of laminates

参数	参数值
基体型号	9A16
纤维类型	HS Carbon
纤维结构	单向
纤维单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	200
预浸料单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> )	308
纤维体积分数/%	55
纵向拉伸强度/MPa	2 000
纵向压缩强度/MPa	1 100
固化层厚度/mm	0.25
层间剪切强度/MPa	60
密度ρ/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 600

### 1.2 准静态试验

准静态压缩试验在电子万能试验机装置上进行,分别沿CFRP厚度方向和面内方向进行准静态压缩加载,设置固定加载应变率为0.001 s<sup>-1</sup>,如图2所示。根据聚合物基复合材料多向层合板无开孔压缩试验方法,试样是长度为140 mm,宽度为12 mm的矩形条状层压板,由于试样和静压机压头直径相差较大,为保护静压机压头,在试样与压头之间增加高强钢垫块,并通过保护罩对

静压试验后产生的破碎试样进行有效回收。为保证试验结果的可信度,每个应变率至少进行5次重复试验。

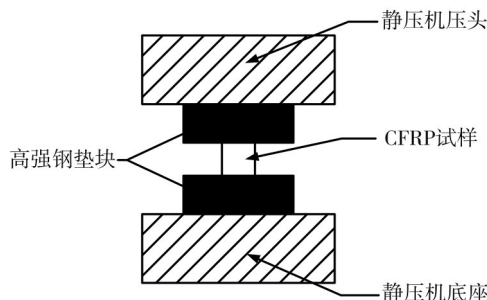


图2 准静态加载示意图

Fig. 2 Schematic of quasi-static loading

### 1.3 动态压缩试验

一维应力波下的动态压缩试验在中北大学冲击动力学试验室的Φ14.5 mm霍普金森压杆装置上进行,该装置由发射管、激光测速仪、冲击杆、入射杆、传输杆和数据采集系统组成,如图3所示。

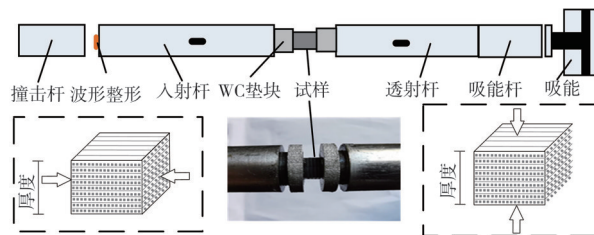


图3 SHPB压杆示意图及加载方向

Fig. 3 Schematic of SHPB compression bar and loading direction

弹丸撞击速度由高压气室控制,试样采用Φ5 mm×5 mm的圆柱体。压杆直径14.5 mm,撞击杆长度250 mm,入射杆、透射杆长度均为1 300 mm。压杆由高强度钢制成,杨氏模量为205 GPa,密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.30,屈服强度为1 200 MPa,波速为5 200 m/s。

为了避免试样对压杆端部的损坏,在压杆和试样之间插入一对波阻抗匹配的碳化钨(WC)垫块,尺寸为Φ10.3 mm×5 mm。同时,采用二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)润滑压杆、垫块和试样之间的接触面,以降低界面摩擦对测试结果的影响。将应变片对称粘贴在入射杆和透射杆中间,分别记录入射波(ε<sub>i</sub>)、反射波(ε<sub>r</sub>)、透射波(ε<sub>t</sub>)。在进行准静态试验后,发现CFRP材料的破坏主要为脆性失效,为了实现对试样加载的常应变率加载,增加试样的加载时间(入射波上升沿时间),试验中使用直径为6 mm、厚度为2 mm的紫铜作为波形整形器。

基于一维应力波理论<sup>[15]</sup>, 试样在加载过程中的应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 可分别表示为

$$\sigma(t) = \frac{E_0 A_0}{A_s} \epsilon_i, \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \epsilon_r dt, \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{2C_0}{L_s} \epsilon_r, \quad (3)$$

式中:  $A_0$ 、 $C_0$ 和 $E_0$ 分别为压杆横截面积、体积声速和弹性模量;  $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$ 和 $\epsilon_t(t)$ 分别为入射杆、反射杆和透射杆的应变信号;  $A_s$ 和 $L_s$ 分别为试样的横截面积和初始长度。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 典型信号

图 4 为 CFRP 复合材料动态压缩试验的典型信号。由图 4 可知, 经过紫铜波形整形器对入射波脉冲的整形, 上升时间增加约为 120  $\mu\text{s}$ , 并呈典型的三角形波。研究表明, 单调递增入射波适用于破坏前表现为线性应力-应变行为的材料, 可使试件保持动态平衡和常应变率加载状态<sup>[16]</sup>。

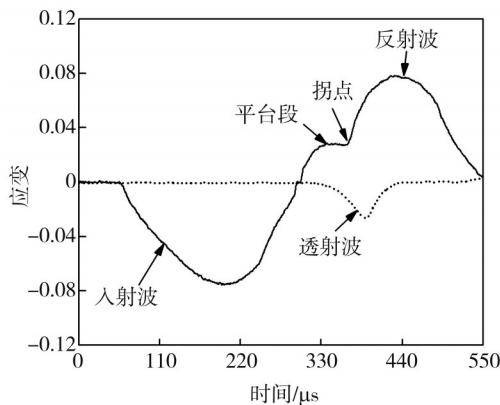


图 4 动态压缩试验典型信号

Fig. 4 Typical signal of dynamic compression tests

在加载时间为 320~395  $\mu\text{s}$  时, 反射波出现明显的平台阶段, 由应变率和反射波幅值之间关系(式(3))可知, 此时试样处于常应变率加载状态。在 395  $\mu\text{s}$  时, 反射波出现一个明显的拐点, 随后出现一个急剧上升的信号, 对应于试样波阻抗的急剧下降, 这说明复合材料的破碎是瞬间发生的, 为典型脆性失效, 且主要受基体控制。随后, 残余应力波完全传回入射杆, 反射波不断上升。

透射脉冲信号对应试样的受力历程, 由图 4 可知, 由于入射脉冲上升沿较为缓慢, 对试样加载的

应力随时间缓慢增大, 在某一时刻达到峰值, 且峰值信号较为明显, 表明此时试样达到强度极限出现破碎并瞬间失效, 随后应力随时间开始降低。

### 2.2 应力-应变关系

图 5 和图 6 分别为不同应变速率下 CFRP 层合板沿厚度和面内方向加载下的应力-应变曲线。在准静态加载条件下, 材料的应力-应变呈线性关系, 在最高点瞬间降低, 可认为  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的层合板静态加载下主要发生脆性破坏, 塑性变形不明显。然而, 在动态加载条件下 (应变率大于  $960 \text{ s}^{-1}$ ), 无论是厚度方向还是平面方向, 弹性阶段后应力-应变曲线却包含一个非线性阶段。由此可知, 动态加载下层合板破坏并不是瞬间发生的, 这和静态加载有着本质区别。主要原因可能是动态加载下  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的不同方向纤维之间相互纠缠, 不会瞬间屈曲, 可以完成对基体的有效支撑, 从而避免基体发生瞬间坍塌。

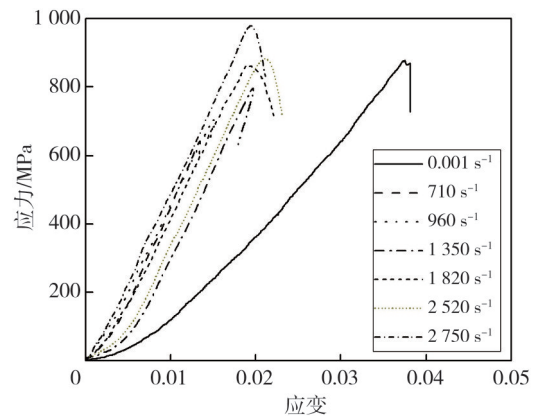


图 5 CFRP 层合板厚度方向的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of CFRP laminates at thickness direction

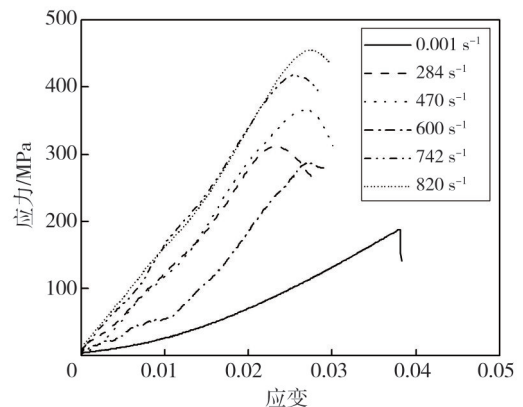


图 6 CFRP 层合板面内方向的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of CFRP laminates in in-plane direction

与面内方向不同的是,在厚度方向上,当加载应变率低于 $960\text{ s}^{-1}$ 时,动态抗压强度反而会低于准静态材料强度,且应力应变曲线有回弹趋势,可见增加 $\pm 45^\circ$ 的铺层纤维对层合板整体强度的贡献明显。

不管是在厚度方向还是面内方向,CFRP层合板的动态抗压强度均随应变率的增加而增加,应变率敏感性呈明显的正相关性。本文认为CFRP层合板的应变率效应是由材料微结构力学特性决定的。纤维与基体热膨胀系数不匹配会导致初始裂纹的产生。在准静态加载下,微裂纹有足够的时间扩展和贯穿。但在动态加载条件下,应力波速度大于裂纹扩展速度。惯性对微裂纹产生和扩展的影响逐渐增大,因为裂纹需要一定的时间才能成核。这种效应阻碍了亚临界裂纹在基体中的扩展,使得材料主要沿主裂纹尖端方向传播。同时,惯性效应随加载速率的增大而增大,最终导致材料应变率敏感性增大。

### 2.3 应变率敏感性

研究发现,陶瓷类材料<sup>[7]</sup>在中、高应变率范围内的强度可表示为

$$\sigma_c \propto \dot{\epsilon}^N, \quad (3)$$

式中: $N$ 为应变率敏感系数,主要受裂纹扩展速度和应力强度因子控制。

本文 $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 堆积顺序的CFRP层合板动态失效也具有脆性失效特征,故尝试用式(3)对试验结果进行拟合,结果如图7和图8所示。结果表明,沿厚度方向应变率系数 $N_t=0.3044$ ,沿面内方向应变率系数 $N_i=0.3233$ ,两个加载方向的材料应变率敏感系数均约为 $1/3$ ,与陶瓷类材料接近,说明两者的动态失效机制是相同的,虽然加入了纤维,但还是受基体控制。

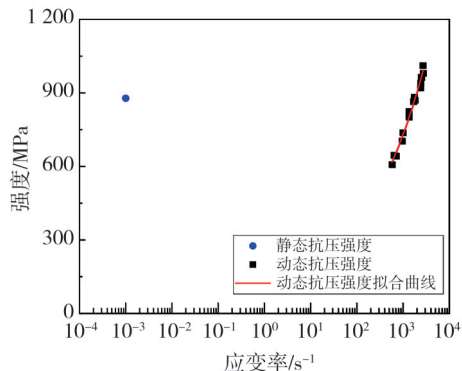


图7 CFRP层合板厚度方向的压缩强度

Fig. 7 Compression strength of CFRP laminates at thickness direction

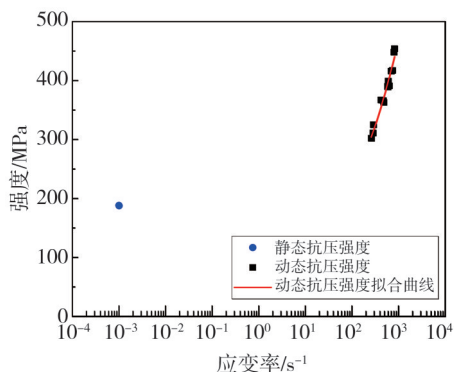


图8 CFRP层合板面内方向的压缩强度

Fig. 8 Compression strength of CFRP laminates at in-plane direction

Yokoyama等<sup>[18]</sup>和Zhu等<sup>[19]</sup>研究发现,在准静态加载条件下, $[0^\circ/90^\circ]_{ms}$ 堆积顺序CFRP层压板沿厚度方向的抗压强度比单向板高约8倍,而动态加载高了3.3倍。在本研究中, $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ 堆积顺序的CFRP层合板压缩强度与 $[0^\circ/90^\circ]_{ms}$ 堆积顺序接近。由此说明,相比单向板,多向铺层的层合板强度会明显增加。另外,本文中层合板沿厚度方向的抗压强度明显高于沿平面方向的抗压强度。准静态加载时,该比值约为4.6倍。而在动态加载条件下,该值(约1.5)随着应变率的增大而逐渐减小,由此可见,应变率效应对面内方向强度的影响更大。同时,动态加载的破坏应变随应变率的增加变化不大,且明显低于准静态加载工况。

### 2.4 损伤与失效机理

图9为动态压缩试验后回收的试样。由图9(a)可知,准静态加载下,裂纹主要沿厚度方向以 $45^\circ$ 角扩展,故认为以剪切破坏为主。在动态加载条件下,裂纹在低应变率下不能沿厚度方向完成对样品的贯穿。样品被分解成一个主层压块和许多不同形状的小层压块,并伴随着纤维束的剥离。随着加载应变率增加,裂纹穿透越深,试样的断裂层数越多,纤维的破坏和剥离越严重。当加载应变率达到 $2520\text{ s}^{-1}$ 时,试件完全破碎断裂。

从图9(b)可以看出,纤维层在面内方向发生塑性变形之前,层合板基体就发生了剥离。纤维间的粘结层发生脆性断裂,裂纹穿透纤维层,导致试样剪切破坏和脱层。其中, $\pm 45^\circ$ 束和 $\pm 90^\circ$ 束均发生脱层破坏。随着加载应变率的增大,纤维层逐渐破碎破坏,破碎层数也逐渐增加。

观察失效变形特征,总结出沿厚度方向和面内方向CFRP层合板的裂纹扩展机制,如图10所示。

由此可知,  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的 CFRP 层合板沿厚度和面内方向的失效机制不同。沿厚度方向如图 10(a) 所示, CFRP 层合板在多方向铺层纤维的约束下, 裂纹沿加载方向  $45^\circ$  产生剪切破坏, 断面在剪应力作用下出现了大量纤维拔出和断裂现象。沿面内方向裂纹扩展机制如图 10(b) 所示, 试样与加载端接触位置有基体压溃, 与加载方向一致的纤维发生了屈曲失稳, 进而导致裂纹沿压溃点贯穿整个试样, 并出现大面积脱层。

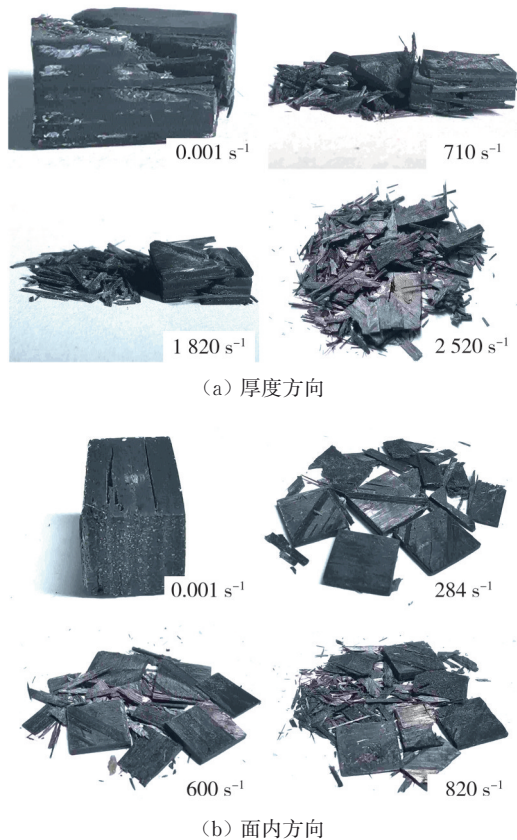
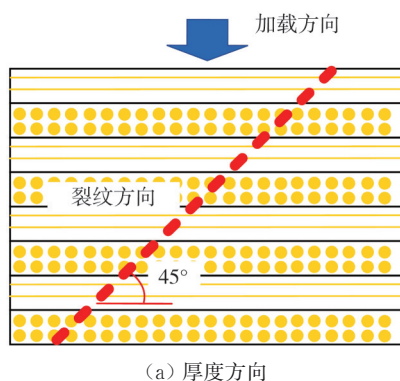
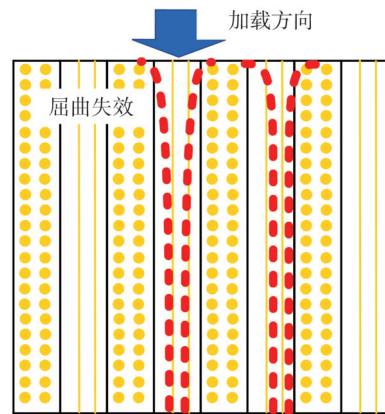


图 9 动态压缩加载下 CFRP 层合板的失效模式  
Fig. 9 Failure mode of CFRP laminates under dynamic compression loading



(a) 厚度方向



(b) 面内方向

图 10  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的 CFRP 层合板裂纹扩展机制  
Fig. 10 Crack propagation mechanism of CFRP laminates with  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  stacking sequence

### 3 结 论

本文针对  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的 CFRP 复合材料层合板进行了静/动态力学性能研究, 分析了材料的应力应变关系、动态强度及其应变率效应、失效机制等, 主要结论如下:

1) 静态加载下,  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的层合板静态加载下主要发生脆性破坏, 塑性变形不明显。动态加载下, 无论是厚度方向还是平面方向, 弹性阶段后的应力-应变曲线均呈现非线性特征。在不同方向纤维铺层之间相互纠缠, 有效支撑基体, 从而避免了基体发生瞬间坍塌。

在厚度方向上, 动态抗压强度反而会低于准静态材料强度, 且应力应变曲线有回弹趋势, 可见增加  $\pm 45^\circ$  的铺层纤维对层合板整体强度的贡献明显。

2) 受微裂纹扩展和加载速率之间关系的控制, 不管是在厚度方向还是面内方向, CFRP 层合板的动态抗压强度均随应变率的增加而增加, 呈明显正相关性。两个加载方向材料应变率敏感系数均约为  $1/3$ , 与陶瓷材料接近, 说明两者的动态失效机制是相同的, 虽然加入了纤维, 但还是受基体控制。

3) 相比单向板, 多向铺层的层合板强度会明显增加。层合板沿厚度方向的抗压强度明显高于沿平面方向的抗压强度, 且应变率效应对面内方向强度的影响更大。

4)  $[-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$  堆积顺序的 CFRP 层合板沿厚度和面内方向的失效机制不同。沿厚度方向加载, 裂纹主要以沿  $45^\circ$  角扩展的剪切破坏为

主,断面在剪应力作用下出现了大量纤维拔出和断裂。沿面内加载方向,纤维间的粘结层发生脆性断裂,与加载方向一致的纤维发生了屈曲失稳,裂纹穿透纤维层导致脱层。

#### 参考文献:

- [1] WANG C X, REN T F, MIAO Y G, et al. High-velocity impact response of CFRP panels reinforced with stiffeners[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112392.
- [2] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J, VARAS D, et al. Experimental analysis of ice sphere impacts on unidirectional carbon/epoxy laminates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 1-10.
- [3] ZHAO J Z, GUO L C, ZHANG L, et al. Experimental investigations on the in-plane dynamic compressive behavior and upper limit of constant strain rate for 2D twill weave carbon fiber reinforced composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 220: 108993.
- [4] ZHANG Y B, SUN Li Y, LI L J, et al. Effects of strain rate and high temperature environment on the mechanical performance of carbon fiber reinforced thermoplastic composites fabricated by hot press molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 134: 105905.
- [5] 张赛, 孟宪明, 任鹏飞, 等. 基于不同工况的碳纤维复合材料力学性能研究[J]. *新技术新工艺*, 2022, 420(12): 79-84.  
ZHANG Sai, MENG Xianming, REN Pengfei, et al. Research on the mechanical property of carbon fiber composite laminates based on different working conditions[J]. *New Technology & New Process*, 2022, 420(12): 79-84. (in Chinese)
- [6] OCHOLA R, MARCUS K, NURICK G, et al. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates[J]. *Composite Structures*, 2004, 63(3/4): 455-467.
- [7] KAPOOR R, PANGENI L, BANDARU K A, et al. High strain rate compression response of woven Kevlar reinforced polypropylene composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 89: 374-382.
- [8] SONG Z H, WANG Z H, MA H W, et al. Mechanical behavior and failure mode of woven carbon/epoxy laminate composites under dynamic compressive loading[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 60: 531-536.
- [9] 潘成龙. 不同形式载荷作用下碳纤维复合材料的力学行为研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [10] 田琴. 碳纤维纬编针织物增强复合材料层合板的力学性能[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- [11] 周菊萍, 李鹏, 王一超. 单向混杂碳纤维增强复合材料在三点弯曲载荷下的力学性能[J]. *复合材料科学与工程*, 2023, 350(3): 112-119.  
ZHOU Juping, LI Peng, WANG Yichao. Mechanical properties of unidirectional hybrid carbon fiber reinforced composites under three-point bending load[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023, 350(3): 112-119. (in Chinese)
- [12] CHEN X, LI Y L, ZHI Z, et al. The compressive and tensile behavior of a 0/90 C fiber woven composite at high strain rates[J]. *Carbon*, 2013, 61: 97-104.
- [13] WANG S Y, WEN L H, XIAO J Y, et al. Influence of strain rate and temperature on mechanical properties of carbon woven-ply PPS thermoplastic laminates under dynamic compression[J]. *Polymer Testing*, 2020, 89: 106725.
- [14] TIAN C L, PI A G, HUANG F L. Experimental study on the compressive properties of a kind of carbon/epoxy composite[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 66-68: 130-134.
- [15] GAO Y B, GE Y X, XU P, et al. Dynamic fracture mechanism and fragmentation analysis of fine grained  $Al_2O_3/SiC$  composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 826: 141976.
- [16] NEMAT-NASSER S, ISAACS J, STARRETT J. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1991, 435(1894): 371-391.
- [17] LANKFORD J. The role of tensile microfracture in the strain rate dependence of compressive strength of fine-grained limestone-analogy with strong ceramics[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(2): 173-175.
- [18] YOKOYAMA T, NAKAI K, ODAMURA T. High strain-rate compressive characteristics of a unidirectional carbon/epoxy laminated composite: effect of loading directions [C]// *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*. Dordrecht: Springer, 2007: 681-682.
- [19] ZHU P, LU J H, JI Q H, et al. Experimental study of in-plane mechanical properties of carbon fibre woven composite at different strain rates[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2016, 21(5/6): 542-554.