

高压物理学报

基于3D-DIC对爆炸作用下碳纤维层合板的变形研究

刘青青 郭保桥 石晨 陈鹏万

Deformation of Carbon Fiber Laminates under Explosion Based on 3D-DIC

LIU Qingqing, GUO Baoqiao, SHI Chen, CHEN Pengwan

引用本文:

刘青青, 郭保桥, 石晨, 等. 基于3D-DIC对爆炸作用下碳纤维层合板的变形研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190739

LIU Qingqing, GUO Baoqiao, SHI Chen, et al. Deformation of Carbon Fiber Laminates under Explosion Based on 3D-DIC[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190739

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190739>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维金属层合板的抗爆性能及失效机理

Anti-explosion Performance and Failure Mechanism of Fiber-Metal Laminates

高压物理学报. 2019, 33(1): 014202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180567>

CFRP层合板低速冲击响应及损伤特性研究

Low-Velocity Impact Behavior and Damage Characteristics of CFRP Laminates

高压物理学报. 2019, 33(4): 044202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180699>

拉伸载荷下含孔复合材料层合板的力学性能及失效机理

Mechanical Property and Failure Mechanism of Composite Laminates Containing a Circular Hole under Tension

高压物理学报. 2017, 31(4): 373 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.004>

高应变率变形图像去模糊及数字图像相关测量

Dynamic Deformation Image Deblurring and Image Processing for Digital Imaging Correlation Measurement

高压物理学报. 2017, 31(4): 426 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.00.011>

冲击荷载下植物纤维增强高聚物复合材料的力学性能

Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites under Impact Loading

高压物理学报. 2019, 33(2): 024204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180656>

爆炸冲击作用下铝蜂窝板失稳研究

Instability of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel under Blast Loading

高压物理学报. 2017, 31(2): 193 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.02.013>

基于3D-DIC对爆炸作用下 碳纤维层合板的变形研究

刘青青, 郭保桥, 石晨, 陈鹏万

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对3种不同铺层的碳纤维复合材料层合板, 设计了开放式爆炸加载实验, 研究不同的炸药质量和爆炸距离下层合板的动态力学行为。基于两台高速相机, 搭建了高速三维变形场的实验测量系统, 记录层合板在爆炸作用下动态变形过程。通过三维数字图像相关方法(3D-DIC)软件计算得到层合板在冲击波作用下的动态位移场和应变场。研究发现: 层合板在弱冲击波作用下只发生弹性变形, 正交铺层和准均质铺层均表现出良好的抗冲击能力; 在强冲击波作用下层合板会产生分层、基体开裂、纤维断裂等形式的损伤, 铺层顺序对损伤形式有很大影响。

关键词: 碳纤维层合板; 三维数字图像相关方法; 爆炸; 损伤; 破坏

中图分类号: O347.1; TB332

文献标识码: A

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)由于具有比强度高、质量轻、比模量高、耐腐蚀等优点, 在很多领域得到广泛应用^[1]。在航空领域, CFRP的使用量更是衡量飞行器先进程度的重要指标。军用飞机在战斗过程中, 导弹、高射火炮等武器产生的冲击波和高速破片对飞机的安全造成严重威胁。相对于金属材料, 碳纤维增强树脂复合材料的脆性更强, 爆炸产生的冲击波对CFRP机体结构更容易造成损伤。飞机在服役期间, CFRP的老化和损伤会导致材料力学性能减退, 在面对破片高速撞击或冲击波作用时, 其力学性能受到挑战。

爆炸冲击过程在时间上是一个强烈非线性的复杂过程, 爆炸产生的冲击波和高速运动的飞片会带来极大的破坏作用^[2]。爆炸冲击载荷作用下材料和结构的响应与防护是爆炸力学研究的热点, 但研究爆炸条件下材料和结构的变形与破坏存在较大困难, 动态变形与破坏测试更是实验测量领域的难点。

基于应变计的电测法是变形测量的传统方法^[3], 但是这种方法只能获得少数几个点的信息, 无法获得被测表面的位移场和应变场等, 因而难以对爆炸和冲击过程进行全面分析。数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)^[4-8]是一种基于物体表面散斑图像灰度分析的光测方法, 通过比较变形前后物体表面的两幅数字图像, 从而获得物体运动和变形信息。由于测量过程简单, 且能获得整个被测表面的位移场和应变场信息, 所以非常适合包括高速变形场测量在内的现场实时测量。DIC技术自20世纪80年代建立以来^[4], 在理论和算法上不断改进和完善, 已经发展得相对成熟^[9-11], 并且在力学研究的许多方面得到了成功的应用。美国南卡大学的Sutton等^[12]使用高速3D-DIC研究爆炸载荷下平板动态变形过程, 成功地量化测量了爆炸过程中平板的爆炸应变, 得出了玻璃纤维复合板的动态屈服强度曲线; 美国桑迪亚国家实验室的Cooper等^[13]也成功将高速3D-DIC技术应用到壳体爆炸领域中; 英

* 收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11472047)

作者简介: 刘青青(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事碳纤维复合材料在冲击作用下力学行为研究。

E-mail: 1154571045@qq.com

通信作者: 郭保桥(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事实验力学和冲击动力学研究。

E-mail: baoqiao_guo@bit.edu.cn

国帝国理工大学的 Arora 等^[14]用高速 3D-DIC 方法测量了不同组成结构的三明治板材在爆炸冲击下的变形场,分析了三明治结构承受爆炸冲击的能力。本工作把 3D-DIC 测量方法引入 CFRP 在开放式爆炸加载作用下的动态变形与破坏情况研究中,分析爆炸条件和铺层顺序对层合板损伤形式的影响,为 CFRP 的实际使用提供理论参考。

1 实验材料及方法

1.1 材料参数

CFRP 采用 T300 系列单向纤维布,基体为环氧树脂,采用真空热压工艺压制成型。层合板铺层方式如表 1 所示,以下简称 A、B、C 型。每种铺层的层合板尺寸为 400 mm×400 mm×3 mm,每层厚度 0.125 mm,共 24 层,层合板密度为 1.76 g/cm³,纤维体积分数为 72%,层合板的力学性能参数如表 2 所示,其中 E 、 G 、 ν 分别是弹性模量、剪切模量和泊松比。在层合板的周边开有直径为 12 mm 的圆孔,通过法兰盘安装在设计好的固定装置上,实验过程中对试验件采用四周完全固定的方式进行夹持,层合板用于测量的尺寸为 300 mm×300 mm×3 mm,安装示意图如图 1 所示。

表 1 碳纤维层合板铺层方式
Table 1 Lamination of carbon fiber laminates

Material type	Laying method	Thickness/mm
A	$[0^\circ]_{24}$	3.00
B	$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ]_3$	3.00
C	$[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]_3$	3.00

表 2 复合材料单层板的弹性力学参数
Table 2 Elastic parameters of composite laminates

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
131.00	10.20	10.20	6.30	6.30	3.91	0.25	0.25	0.38

1.2 实验装置及方法

爆炸实验装置如图 2 所示,3D-DIC 测量系统由两台 Fastcam SA5 高速相机组成,为了实现在爆炸条件下两台高速相机的图像同步采集,该测量系统还包括同步触发装置、照明装置、用高强度有机玻璃制作的系统防护装置,其中两台高速相机呈一定角度聚焦并观测试样表面的同一区域。当实验开始时,启动同步触发装置,同步触发电雷管和 3D-DIC 观测系统,两台相机同时记录一系列成对的变形图片,并以 8 bit 的形式输出储存。

基于 3D-DIC 测量原理^[7-10],通过对比激光喷射散斑、滚轮散斑质量后,采用黑色马克笔人工制作散斑的方法,在实验之前对材料制作了高质散斑场。实验过程中采用压缩型 TNT 圆柱状炸药,当量分别为 20 g 和 35 g。炸药在层合板的正后方,即炸药的圆心与层合板的几何中心在一条直线上。由于拍摄速度越快,图像分辨率越低,因此在保证图像分辨率和拍摄速度的情况下,采用的拍摄频率为 35 000 幅/秒,图像的分辨率为 320×568 像素。实验所用炸药的质量以及炸药中心到层合板的距离如表 3 所示。

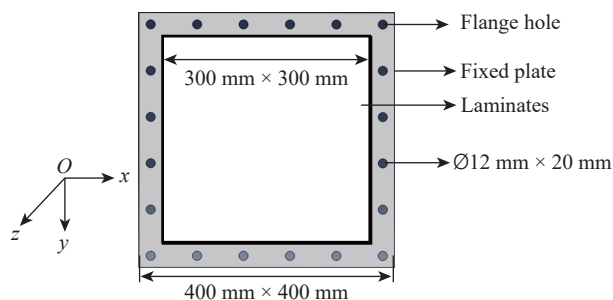


图 1 层合板的安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the installation of laminate

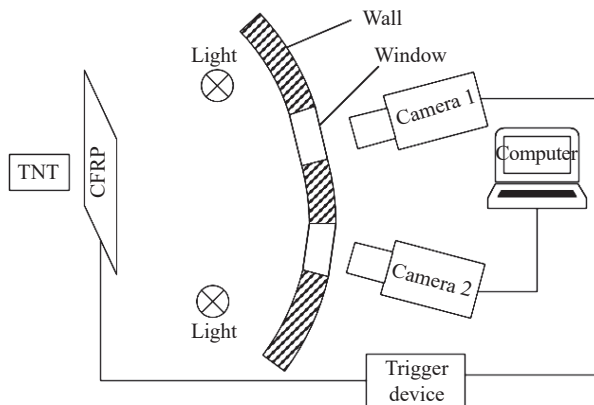


图 2 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system

表 3 不同类型的层合板实验参数

Table 3 Experimental parameters of different types of laminates

Test No.	Laminate type	Explosive mass/g	Explosion distance/mm
1	A	20	350
2	B	20	350
3	B	35	210
4	C	20	350
5	C	20	100

2 实验结果分析

使用 VIC-3D 软件处理测量系统采集到的样品板表面散斑图像时,两个相机的共同观测区域被称为相机视场(Field of View, FOV), DIC 计算所选择的相关匹配区域被称为相关计算区域(Area of Interest, AOI),样品变形图像的计算区域选择如图 3 所示。其中 AOI 的尺寸为 320×568 像素,计算所选的相关子区的大小为 29×29 像素,步长为 3(每隔 2 个像素点计算一步)。为了便于对板变形过程进行分析和比较,在计算区域提取中心点 A 作为特征点,过中心点平行于 y 轴方向的直线 BC 作为特征直线,对其变形数据进行深入分析。

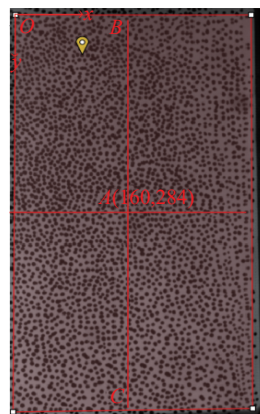


图 3 计算区域选择

Fig. 3 Calculation area selection

2.1 弱冲击波作用下层合板的动态力学响应分析

对 A 型、B 型、C 型 3 种不同类型的层合板均进行了 TNT 当量为 20 g、炸药球心到层合板中心距离为 350 mm 的爆炸实验。宏观分析层合板损伤情况如表 4 所示。

如图 4 所示, A 型板为单向铺层,抵抗冲击波的能力最弱,在炸药产生的冲击波刚接触层合板的瞬间,层合板中心点位置即发生了剧

表 4 层合板宏观损伤情况

Table 4 Macroscopic damage of the laminates

Test No.	Macroscopic form of destruction
1	2 penetrating cracks and 5 obvious cracks
2	No visible crack
4	No visible crack

烈的变形。随着冲击波强度的增大,层合板在中心处产生沿纤维方向的断裂并且被直接穿透。在冲击过程中,单向铺层的层合板沿纤维方向的刚度最大,垂直于纤维方向的刚度最小,致使分层和裂纹扩展沿纤维方向比垂直纤维方向的速度快,材料均在沿纤维方向产生最长裂纹。由于夹持装置给予材料一定的预紧力作用,在靠近夹持装置的位置,层合板出现了裂纹,并直接被穿透。爆炸结束后,总共产生了5条明显可见的裂纹,其中中心处和靠近夹持装置处裂纹最为严重,导致材料直接断裂,断裂的方向均为沿纤维方向。

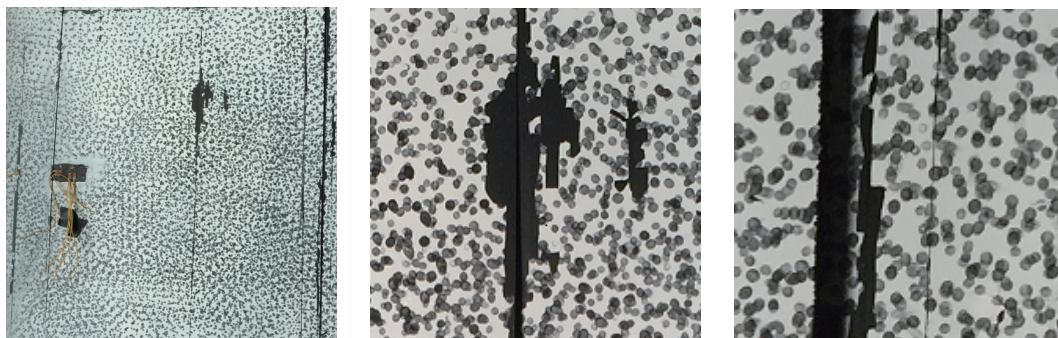


图4 A型层合板表面破坏损伤形态

Fig. 4 Damage form on the surface of plate A

经过3D-DIC软件对采集的图像进行处理,得到A型层合板的离面位移场,如图5所示。在时间 $t=1.57\text{ ms}$ 时,冲击波刚开始接触层合板,中心点位移 w 开始增大;仅过了 0.2 ms ,层合板中心和靠近夹持装置的部分已经沿纤维方向被穿透,可见单向铺层的层合板抗冲击强度很弱。实验数据处理结果与肉眼观察得到的层合板的损伤情况相同。

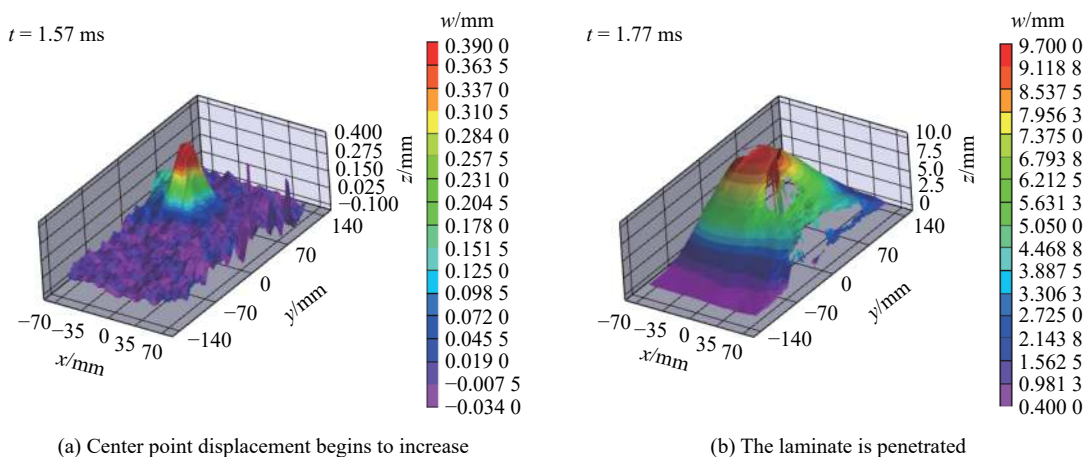


图5 A型板位移场变化

Fig. 5 Variation of the displacement field of the plate A

B型层合板的位移场变化规律如图6所示,其破坏情况与A型板完全不同。如图6(b)所示,爆炸过程中,由于冲击波高速传播,部分散斑脱落,但对整个层合板变形的分析没有太大影响。爆炸结束后,材料没有产生任何肉眼可见的裂纹和损伤。分析结果显示:当 $t=0.17\text{ ms}$ 时,炸药产生的冲击波刚开始接触层合板,中心点位移急剧上升;在 $t=0.74\text{ ms}$ 时,层合板达到最大离面位移 14.9 mm ;随后位移进入振荡状态,但最大和最小位移逐渐减小,振荡幅度越来越小,直到慢慢变为零。由此可见,层合板可以完全吸收此爆炸条件下冲击波产生的能量。由图6(f)可知,整个冲击波传播过程非常迅速,当 $t=31.7\text{ ms}$ 时,层合板的位移已几乎变为零,材料未发生损伤,整个受冲击过程只在弹性范围内变化。

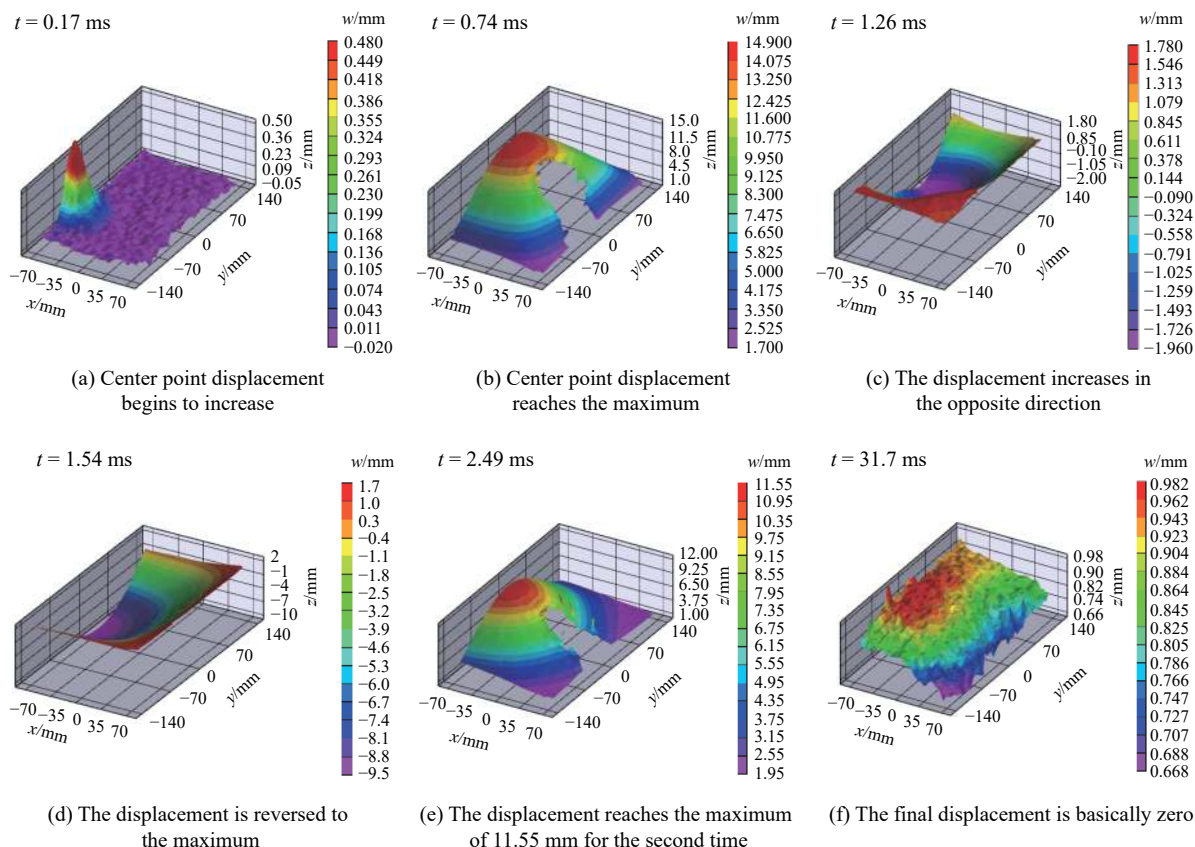


图 6 B 型层合板位移场变化图

Fig. 6 Displacement field change of plate B

选取 B 板中心点, 其位移变化曲线如图 7 所示。触发雷管引爆炸药后, 冲击波开始传播, 中心点位移沿直线上升, 最大值为 14.9 mm。随后, 冲击波沿中心向四周扩散, 中心点位移逐渐减小, 但是冲击波形成的反射波使层合板的位移沿反方向增大, 最大值为 9.5 mm。冲击波第二次传播, 使中心点的位移沿正方向增大, 第二次达到最大位移 11.55 mm, 如此循环往复。整个过程中材料没有发生任何塑性变形, 只发生了弹性变形。

C 型板的整个变形过程与 B 型板非常相似。由于爆炸有所延迟, C 型板在 $t=1.23$ ms 时才开始产生变化, 最大位移和 B 型板相同。图 8 为两种板中心点最大主应变随时间变化的曲线。二者的变化规律相同, 反映出 CFRP 良好的抗冲击能力。C 型板的最大主应变高于 B 型板, 最大值相差 0.001 2, 可见

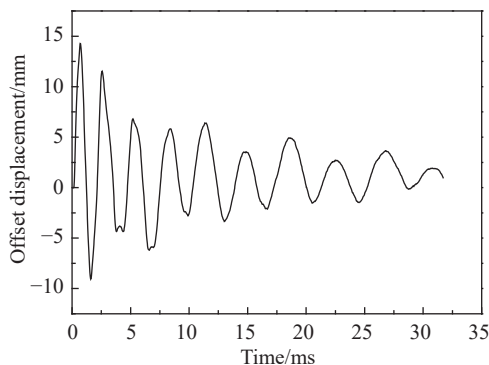


图 7 中心点的位移随时间变化曲线

Fig. 7 Displacement curve over time of a point near the center

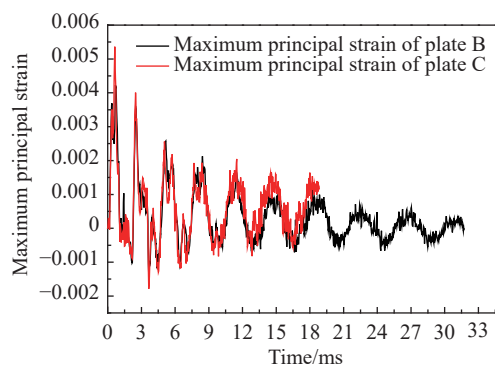


图 8 B、C 型板中心点最大主应变随时间变化的曲线

Fig. 8 Curve of maximum principal strain over time at the center point of plates B and C

B型板的弹性性能优于C型板,在不发生破坏的情况下对冲击能量的吸收更强,与层合板的设计原则^[15],即在表面铺设织物或 $\pm 45^\circ$ 层可以改善层合板抗压缩和抗冲击性能的理论相符。

选取对B型板和C型板过中心点竖直方向的线段,分析其位移变化规律,如图9所示。在中心点位移上升的第一阶段,B、C两种铺层的层合板变形规律虽然很接近,但并不完全相同。B型板的离面位移曲线上升速度小于C型板,说明B型板吸收冲击能量的性能优于C型板,和图8得到的主应变的比较结果一致。

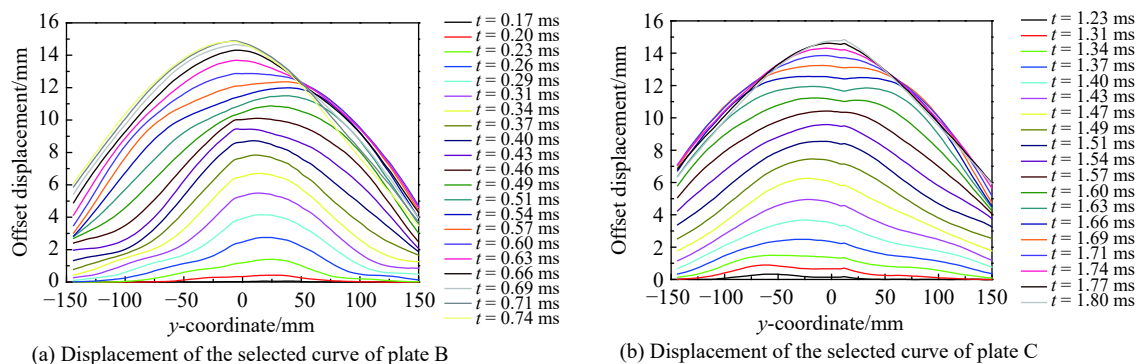


图9 B型和C型板所选曲线的位移变化对比

Fig. 9 Comparison of displacement changes of selected curves from plates B and C

2.2 强冲击波作用下层合板的损伤分析

为了进一步分析炸药质量和距离对层合板破坏的影响,以及层合板在强度更高的冲击波作用下的损伤机理,对B型板进行了TNT当量为35 g、炸药圆心到层合板中心点距离为210 mm的爆炸实验,对C型板进行了TNT当量为20 g、炸药距离为100 mm的爆炸实验,分析其损伤及破坏情况。

实验结果如图10所示,层合板均产生了一定程度的损伤破坏,其中B型层合板的损伤情况更为严重,出现了纤维断裂、基体开裂、纤维拔出、脱粘、分层等损伤。C型层合板在不改变炸药质量、只缩短距离的条件下,出现了分层损伤,由于受一定的预紧力作用,在边缘出现了分层和翘曲,表面有沿纤维方向的断裂,但是没有纤维拔出,在实验过程中出现了散斑脱落。

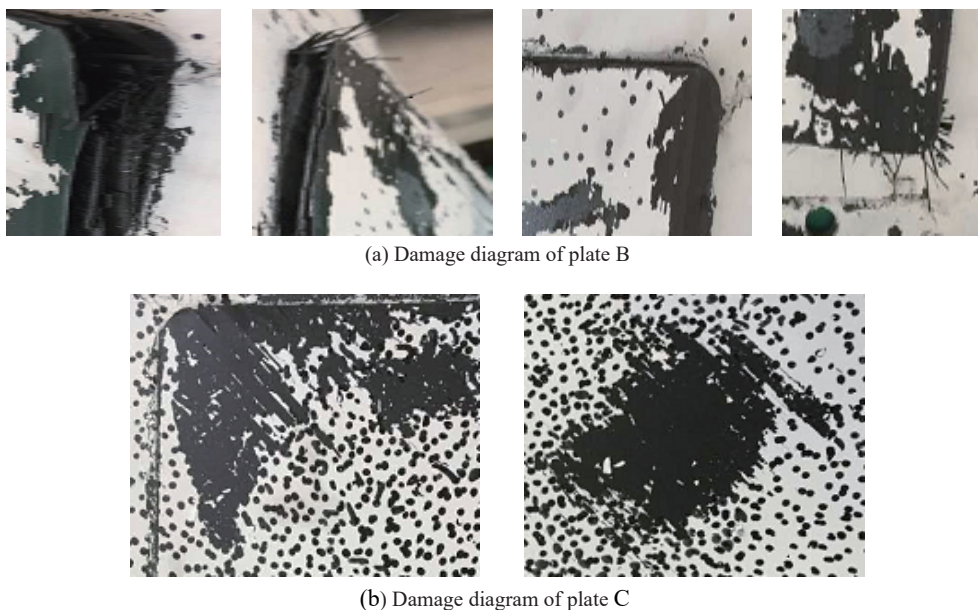


图10 B型和C型板损伤表面形态

Fig. 10 Surface damage morphology of plates B and C

图11为B型板中心点的位移变化曲线。当 $t=1.17\text{ ms}$ 时,冲击波接触层合板,中心点位移沿直线迅速上升,但在 $t=1.57\text{ ms}$ 时,层合板的周边已经出现分层、脱粘。此时层合板内部已经发生了损伤,纤维渐渐拔出,所以位移沿曲线上升到最大值。当 $t=1.77\text{ ms}$ 时,位移达到最大值 24.3 mm 。随后层合板的位移下降,往复循环3次后,位移处于相对稳定的状态,不再有大范围的波动,说明层合板内部出现了严重的纤维断裂、分层、脱粘等破坏,爆炸结束形成如图10所示的形态。正如文献[16]所说,层合板的失效过程是损伤不断累积、刚度逐渐退化、应力不断重新分布的动态过程,所以在实际应用中,对层合板的设计尤为重要。

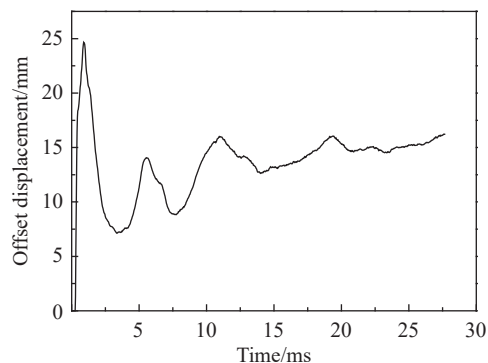


图11 中心点位移随时间变化曲线

Fig. 11 Displacement curve of center point over time

3 结 论

(1)复合材料层合板在受高速冲击过程中,首先产生沿纤维方向的微小裂纹,随着冲击波的传播,裂纹逐渐增长,从而产生分层,分层面的基体挤裂导致纤维断裂,铺层不同,产生的裂纹方向不同。

(2)正交铺层和准均质铺层的层合板在受到高速冲击波作用时,弹性范围内变化规律相同,均表现出良好的抗冲击波能力,在非弹性范围内前者容易发生纤维拔出、分层等损伤,45°铺层在首末位置有利于改善层合板的抗冲击性能。

(3)把高速3D-DIC测量方法引入爆炸冲击的测量研究中,通过实验测量得到材料的三维变形场,分析CFRP在极端载荷下的动态力学响应,可为CFRP在冲击波作用下的安全防护及可靠性提供指导。

参考文献:

- [1] DVORAK G J, LAWS N. Mechanics of composite materials [M]. Washington D. C.: Scripta Book Co., 1975.
- [2] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
YAN S Y, ZHAO H Y. Explosion mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [3] 张如一, 沈观林, 李朝弟. 应变电测与传感器 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
ZHANG R Y, SHEN G L, LI C D. Strain electrical measurement and sensor [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [4] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1981, 21(3): 427-431.
- [5] MA S P, JIN G C. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 16(4): 366-373.
- [6] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195-203.
WANG H W, KANG Y L, XIE H P. Research progress in digital speckle correlation methods and applications [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195-203.
- [7] PAN B, ASUNDI A, XIE H M, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 865-874.
- [8] PAN B, LI K. A fast digital image correlation method for deformation measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7): 841-847.
- [9] MICHAEL A M A, ORTEU J J, SCHREIER H W. Two-dimensional and three-dimensional computer vision [M]//Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer US, 2009.
- [10] PAN B, QIAN K, XIE H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(6): 062001.

- [11] PAN B. Recent progress in digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1223–1235.
- [12] TIWARI V, SUTTON M A, MCNEILL S R, et al. Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 862–874.
- [13] COOPER M A, SKAGGS M N, REU P L. High-speed stereomicroscope digital image correlation of rupture disc behavior [M]// *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics: Volume 3*. Springer International Publishing, 2016.
- [14] ARORA H, HOOPER P, DEAR J. The effects of air and underwater blast on composite sandwich panels and tubular laminate structures [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 52(1): 59–81.
- [15] 王耀先. 复合材料力学与结构设计 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
WANG Y X. Composite mechanics and structural design [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2012.
- [16] 张丽, 李亚智, 张金奎. 复合材料层合板在低速冲击作用下的损伤分析 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(5): 1170–1174.
ZHANG L, LI Y Z, ZHANG J K. Damage analysis of composite laminates under low velocity impact [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(5): 1170–1174.

Deformation of Carbon Fiber Laminates under Explosion Based on 3D-DIC

LIU Qingqing, GUO Baoqiao, SHI Chen, CHEN Pengwan

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: An open explosion loading experiment was designed for three differently laminated carbon fiber composite laminates to study the dynamic mechanical behavior of the laminates under different explosive masses and explosive distances. Based on two high-speed cameras, an experimental measurement system for high-speed three-dimensional deformation field was built, and the images of the dynamic deformation process of the laminates under the action of the explosion were recorded. The dynamic displacement field and strain field of the laminates under the shock wave were calculated by 3D-DIC software. The results show that the laminates only undergo elastic deformation under low shock wave, and the orthogonal layer and the quasi-homogeneous layer have good impact resistance; under the action of high shock wave, the laminates will cause damage in the form of delamination, matrix cracking, fiber breakage, etc. The order of the layup has a great influence on the form of damage.

Keywords: carbon fiber reinforced laminate; 3D-DIC; blasting loading; damage; failure