

基于 FBG 传感的 CFRP 层合板低速冲击响应监测

胡业发,王 彬,张锦光,宋春生,徐仕伟

(武汉理工大学 机电工程学院,湖北 武汉 430070)

摘 要:运用有限元分析软件 ABAQUS 对碳纤维复合材料(CFRP)层合板在低速冲击作用下的响应进行了模拟,发现了冲击过程中随着冲击能量的增大,层内最大应力随之增大的现象.实验利用光纤光栅(FBG)传感器受到应力作用后光栅中心波长随应力增大而增大的特性,对埋有 FBG 传感器的 CFRP 层合板进行低速冲击响应监测实验,并对解调仪采集的中心波长值进行分析,得到冲击能量与中心波长偏移峰值的关系.实验结果表明:埋有 CFRP 层合板中的 FBG 传感器能准确捕捉到瞬间冲击信号,并且 FBG 传感器中心波长偏移峰值能反映冲击能量的大小,随着冲击能量增大,中心波长偏移峰值增大,层内最大应力也随之增大.

关键词:CFRP 层合板;低速冲击响应;FBG 传感器;有限元分析;冲击能量

中图分类号:TH145 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.024

0 引言

碳纤维复合材料具有轻质高强、可设计性高的特点,广泛应用于多个领域,如汽车、飞行器 etc.然而,碳纤维复合材料在其生命周期内往往会受到各种低速冲击(冲击速度小于 25 m/s)的影响,如人为踩踏、设备碰撞等.由于复合材料结构本身对冲击作用比较敏感,这种冲击很容易在复合材料内部造成损伤.研究表明,低速冲击损伤会使结构的力学性能下降 35%~40%<sup>[1]</sup>.与高速冲击(如飞行器的鸟撞冲击<sup>[2]</sup>、防弹门的弹头撞击<sup>[3]</sup>)不同,低速冲击造成的损伤往往发生在复合材料结构的内部,肉眼很难直接观察到,因此,对于低速冲击过程必须要通过有效的手段进行监测.

近年来,国内外研究人员开始应用 FBG 传感器来进行冲击的监测.Tsuda 等<sup>[4]</sup>提出了运用 FBG 传感器组建的光纤传感系统对 CFRP 层合板冲击响应进行测量的方法,证明了埋入 FBG 传感器对复合材料板结构的整体性影响较小.Takeda 等<sup>[5]</sup>利用光栅研究了层合板在低速冲击作用下的损伤行为,并结合应变片和超声 C 扫描对光栅监测层合板内部应变的准确性及与实际损伤的相符性进行了验证.谷广伟等<sup>[6]</sup>通过

FBG 传感器对玻璃纤维复合材料层合板的冲击响应进行监测,发现波长变化可以反映层合板的应变情况.武雪等<sup>[7]</sup>将 FBG 传感器埋入碳纤维复合材料层合板中,对复合材料成型过程和单次冲击进行了监测研究.实验发现 FBG 传感器能有效监测层合板内部的应变.陆观等<sup>[8]</sup>搭建了基于 FBG 传感器应变敏感特性的复合材料板冲击监测系统,分析了基于经验模态分解的冲击信号特征提取方法,研究了基于信号特征提取的冲击信号方向判别.

文献[4-8]的研究方法多采用试验研究,缺少低速冲击过程的仿真分析,笔者在 ABAQUS 中对 CFRP 层合板在低速冲击下的响应过程进行了模拟.文献[4-8]中的研究证明了 FBG 传感器中心波长变化量能有效地反映冲击过程中层合板内部的应变.但是,针对 FBG 传感器中心波长偏移峰值与冲击能量关系的研究仍欠缺.笔者采用落球冲击的方法来进行 CFRP 层合板的低速冲击实验,通过埋置在层合板中的 FBG 传感器对层合板的低速冲击过程进行监测,并采用解调仪对 FBG 传感器信号进行快速解调,获得了低速冲击过程中 FBG 传感器的中心波长峰值,研究了冲击能量与 FBG 传感器的中心波长偏移峰值(中心波长峰

值与初始中心波长值的差值为波长偏移峰值)的关系,为FBG传感器中心波长偏移峰值衡量冲击能量大小提供依据.

1 CFRP 层合板低速冲击过程分析

1.1 CFRP 层合板低速冲击有限元建模

运用ABAQUS软件对CFRP层合板在低速冲击作用下的响应进行模拟,由于FBG传感器的体积小,埋入层合板后对结构的力学性能影响较小<sup>[9]</sup>,故在仿真分析中忽略置入的FBG传感器的影响.

根据标准ASTMD7136—07<sup>[10]</sup>的规定,所选用的CFRP层合板的材料为T300/环氧树脂,尺寸为160 mm×100 mm,铺层方案为 $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}]_s$ ,钢球质量为64 g.由于钢球刚度远大于层合板刚度,因此笔者在建模中将钢球定义为刚体.钢球速度为钢球与层合板表面刚接触时的速度,通过改变冲击速度来改变冲击能量的大小.冲击钢球材料参数如表1所示.T300/环氧树脂层合板的参数如表2所示,表中, $E_1$ 、 $E_2$ 表示各向弹性模量; $Nu_1$ 为泊松比; $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ 为3个方向的剪切模量; $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ 为3个方向的拉伸强度; $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $Z_c$ 为3个方向的压缩强度; $S_{12}$ 、 $S_{23}$ 为纵向和横向的剪切强度; $W_{xt}$ 、 $W_{yt}$ 为纵向和横向的拉伸断裂能; $W_{xc}$ 、 $W_{yc}$ 为纵向和横向的压缩断裂能.

表1 钢球的材料参数

Tab.1 Material parameters of steel ball

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $Nu$
7 800	210	0.3

表2 T300/环氧树脂层合板的材料参数

Tab.2 Material parameters of T300/epoxy resin

参数	数值	参数	数值
$E_1/\text{GPa}$	128	$X_c/\text{GPa}$	0.870
$E_2/\text{GPa}$	8.7	$Y_c/\text{GPa}$	0.198
$Nu_1$	0.32	$Z_c/\text{GPa}$	0.198
$G_{12}/\text{GPa}$	4	$S_{12}/\text{GPa}$	0.104
$G_{13}/\text{GPa}$	4	$S_{23}/\text{GPa}$	0.086
$G_{23}/\text{GPa}$	4	$W_{xt}/\text{J}$	740
$X_1/\text{GPa}$	2.09	$W_{xc}/\text{J}$	440
$Y_1/\text{GPa}$	0.05	$W_{yt}/\text{J}$	20
$Z_1/\text{GPa}$	0.05	$W_{yc}/\text{J}$	80

不同冲击能量下对应的钢球初始速度如表3所示.

表3 冲击参数

Tab.3 Impact parameter

速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.765	2.500	3.090	3.536	3.952
能量/J	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

在ABAQUS中对CFRP层合板和钢球分别进行建模,由于低速冲击过程中,冲击钢球变形很小,因此分析中将其设置成刚体.将钢球和CFRP层合板模型进行装配,形成一个完整的装配体模型,为节省计算时间,此处将钢球和层合板表面之间的距离设置成0(临界接触位置),以便于分析时更快进入冲击接触状态.将层合板的两端进行约束,并在冲击钢球上施加一个垂直于层合板的初始速度,在分析中通过改变初始速度来进行不同冲击能量下的分析.选用单元S4R和C3D4对层合板和冲击钢球进行网格划分,有限元网格划分模型如图1所示.

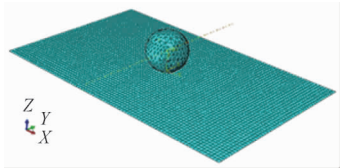


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element analysis model

1.2 有限元分析结果

分析时选取0.1J、1.765 m/s的冲击等级,设置分析时间为1 ms,观察层合板在低速冲击作用下的响应过程.在ABAQUS中查看冲击过程中应力波在层合板中的传播过程,选取典型时刻来分别查看 $0^{\circ}$ 层和 $90^{\circ}$ 层的应力情况,如图2所示.从图2可以看到,应力波在层合板内部是沿着纤维方向进行传播的.冲击过程中系统的动能和内能时间历程曲线,如图3所示.

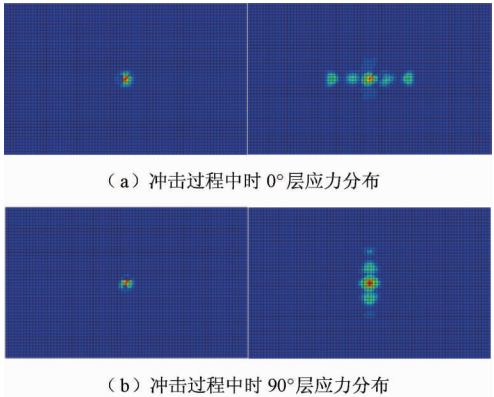


图2 应力波传播方向

Fig.2 Direction of propagation of stress wave

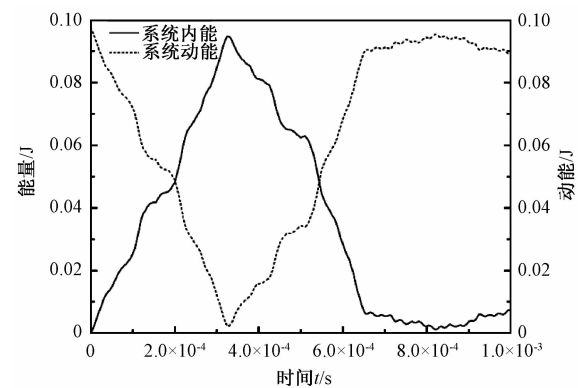


图 3 冲击过程中系统能量的时间历程曲线

Fig.3 Energy-Time curve during impact

冲击过程中的系统动能来自于冲击钢球,因此图 3 中的动能曲线所反映的是冲击钢球在冲击过程中动能的变化.从图 3 可以看到,动能曲线先下降到达一个谷底,然后上升,最后趋于平稳,这表明:在 1 ms 的分析时间内冲击钢球与层合板完成冲击接触.反映的实际情况是钢球以一定冲击速度与层合板表面接触,在层合板的阻挡下,速度降低直至 0,冲击钢球的动能转化为层合板的内能,随后层合板内能又转化为钢球的动能,从而使得冲击钢球反弹,最终与层合板脱离接触.从动能曲线可以看出,曲线趋于稳定后的动能要小于冲击开始时候的动能,可知在冲击接触的过程中,层合板吸收了一部分的动能.

不同冲击能量下,CFRP 层合板中间层 (ply-5) 中的最大应力值,如图 4 所示.从图 4 可以看出,在 0.1 J ~ 0.5 J 范围中,随着冲击能量的增加,层内的最大应力值呈增大趋势.

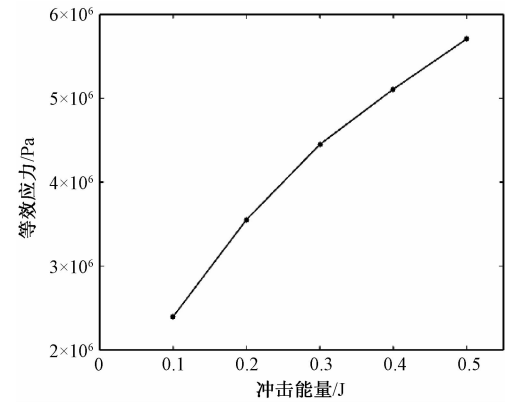


图 4 不同能量下 ply-5 层中的最大应力

Fig.4 Mises in ply-5 under different impact energy

2 CFRP 层合板低速冲击实验研究

2.1 CFRP 层合板低速冲击实验

实验件选用 T300 12K 碳纤维单向布作为纤

维增强体,M03 环氧树脂作为基体,层合板尺寸为 160 mm × 100 mm,铺层方案[0°/90°/0°/90°/0°],将 FBG 传感器沿着纤维方向埋置在中间层处,如图 5 所示,光栅位置距板材中心 10 mm.实验件一共 3 个,如图 6 所示.

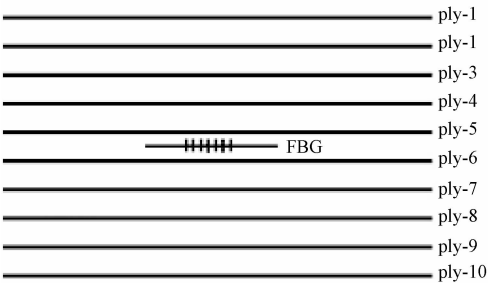


图 5 FBG 埋放位置

Fig.5 The FBG embedding position

将 1#实验件的两端固定,使层合板的几何中心正对着冲击钢球的正下方;将 FBG 传感器通过光纤跳线与解调仪相连,然后通过网线与电脑相连;打开解调仪软件,观察能否获得 FBG 传感器的波长信号,并记录传感器初始波长数据;最后将冲击钢球按照表 4 中编号 1 ~ 5 依次调整到对应高度来对层合板进行冲击,同时采集冲击过程中的波长信号;按照同样的方法完成其他两个实验件的冲击,并保存波长信号.具体实验参数见表 4.

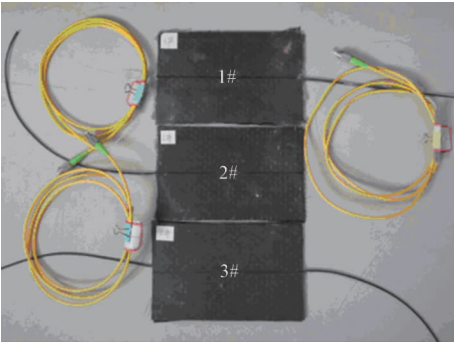


图 6 3 组层合板实验件

Fig.6 Three pieces of laminate specimens

表 4 冲击实验参数

Tab.4 Parameters of impact experiment

编号	高度/m	接触时的速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	冲击能量/ J
1	0.159	1.765	0.1
2	0.319	2.500	0.2
3	0.478	3.090	0.3
4	0.638	3.536	0.4
5	0.797	3.952	0.5

2.2 实验结果与分析

对FBG传感器上采集的中心波长信号进行分析,光纤光栅解调仪的采样频率为4 000 Hz.图7所示的是在0.1 J能量冲击下,1#实验件中的FBG传感器中心波长的变化.

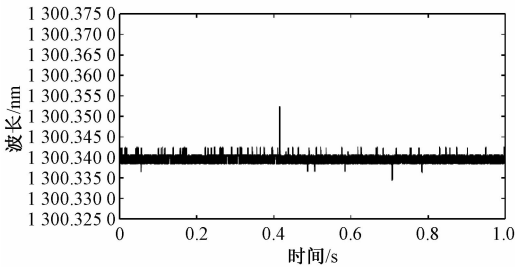


图7 1#实验件中FBG中心波长的变化

Fig.7 Wavelength shift in FBGs embedded in specimen 1#

由图7可知,在冲击钢球与层合板冲击的瞬间,FBG传感器的中心波长会出现一个峰值,波长峰值与初始波长的差值为波长偏移峰值,峰值过后,波长会出现回落.这表明在冲击瞬间,冲击点处的接触力所产生的应力波会引起了CFRP层合板内部的微变形,当应力波传播到传感器所埋置的位置时,这种微变形就会导致传感器发生微应变,从而使得FBG传感器的中心波长发生偏移.这表明传感器能够准确的捕捉到瞬间的冲击信号.

在0.1 J~0.5 J能量冲击下,3个实验件中的FBG传感器的波长偏移峰值如图8中所示.

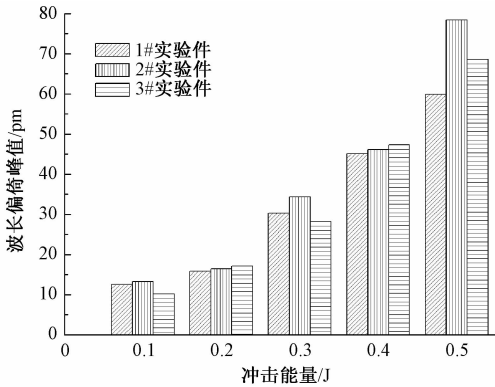


图8 3个实验件波长偏移峰值

Fig.8 Wavelength shift in FBGs embedded in 3 specimens

从图8中可以得出,0.1 J~0.5 J范围内,随着冲击能量的增加,3个实验件中传感器波长偏移峰值均呈现出逐渐增大的趋势,可见FBG传感器中心波长的偏移峰值与冲击能量的大小有关,FBG传感器中心波长的偏移峰值能反映冲击能量的大小.

根据FBG传感器的原理<sup>[11]</sup>,在忽略温度对光栅中心波长影响的情况下,FBG传感器中心波长的偏移量与FBG传感器布置点的应力成正比,从图8可以得出,随着冲击能量的增加,FBG传感器中心波长偏移峰值增大,FBG传感器布置点的层内最大应力值呈增大趋势,从而验证了图4所得的结论.

实验中1#、2#、3#实验件在同种冲击能量作用下,3个传感器的波长偏移峰值出现了一定的差异,经过分析,原因为3个实验件自身质量差异以及固化过程中存在残余应力.

3 结论

笔者将ABAQUS仿真和层合板低速冲击响应实验结合分析得到以下结论:

- (1)应力波在层合板内部是沿着纤维方向进行传播的;
- (2)埋置在CFRP层合板中的FBG传感器能够准确的捕捉到瞬间冲击信号,随着冲击能量增加,层内最大应力值呈增大的趋势,中心波长偏移峰值也随之增大.中心波长偏移峰值的大小可以反映冲击能量的大小,在层合板没有受到损伤之前,波长偏移峰值越大,冲击能量越大.

这为以后应用FBG传感器监测CFRP低速冲击损伤奠定基础,为构建FBG传感网络进行CFRP冲击损伤判定提供依据.

参考文献:

[1] 崔海坡,温卫东,崔海涛. 复合材料层合板冲击损伤及剩余强度研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(3):466-472.

[2] 李成,郭文辉,铁瑛. 采用流固耦合方法的复合材料层合板鸟撞分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6):76-79.

[3] 李成,马志垒,王永涛. 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(4):85-88.

[4] TSUDA H, LEE J R. Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system[J]. Composites science & technology, 2007, 67(7-8):1353-1361.

[5] TAKEDA S, AOKI Y, NAGAO Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors[J]. Composite structures, 2012, 94(3):813-819.

[6] 谷广伟,王庆涛,李炜. FBG监测层合板低速冲击损伤研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(4):31-34.

[7] 武雪, 李炜. 基于 FBG 的复合材料成型与冲击监测研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(5):9-12.

[8] 陆观, 徐一鸣, 邱自学, 等. 基于光纤传感技术的复合材料板低速冲击信号方向判别[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(12):90-92.

[9] WANG W J, SONG H, GUO W, et al. Mechanical properties of composites with embedded FBG sensors in manufacturing engineering[J]. Advanced materials research, 2012, 583:263-267.

[10] ASTM D7136—07. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event[S]. 2007.

[11] 赵勇. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:24-25.

Monitoring of CFRP Laninate under Low Velocity Impact Based on FBG Sensors

HU Yefa, WANG Bin, ZHANG Jinguang, SONG Chunsheng, XU Shiwei

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In this paper, ABAQUS was used to simulate the response of carbon fiber composite laminates under low velocity impact. It was found that with the increase of the impact energy, the maximum stress of each layer increased. By using the characteristic that the center wavelengths of FBG sensors in composite material structure were determined by stress, the experiment used the embedded FBG sensors to monitor the response of low velocity impact. By analyzing the center wavelength captured by optic fiber grating demodulator, the relationship between the impact energy and the peak wavelength shift of sensors was found. Experimental results showed that, the embedded FBG sensors were able to accurately capture the transient impact signal and the peak wavelength shift of sensors could determine the size of the impact energy. With the increase of the impact energy, the peak wavelength shift increases as well as the maximum stress of layer.

**Key words:** CFRP laminate; response of low velocity impact; FBG sensors; finite element analysis; impact energy

(上接第 76 页)

Component Design on Telescope with 1 m-Caliber Space Camera

LU Xiaoming<sup>1,2</sup>, JIA Jianjun<sup>1,2</sup>, ZHOU Chenglin<sup>1</sup>, FANG Yongyong<sup>1</sup>, XIE Yong<sup>1</sup>

(1. The Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. School of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To study the performance consistence of the large-caliber telescope, the main 1m-caliber telescope was structure-designed and analyzed to achieve the comprehensive result. The materials of the main telescope were selected by comparing the materials' nature, and light-weight design was performed. After choosing the supporting scenarios of the main telescope and preparing case models, we proceeded modal analysis to the main telescope parts, and verified supporting materials. Last, we conducted the gravity-transformative and thermal analysis on the main telescope. The weight of the main telescope was reduced to 76 kg with a light-weight ratio of 77%. The simulation results indicated that the *RMS* of axial and radial direction of the speculum were 8.9 nm and 3.5 nm respectively. After performing optimal design viai Sight, the radial self-weight deformation *RMS* of the primary mirror was improved to 3.3 nm, decreased 5.7% comparingwith the *RMS* before optimization. When the temperature of main specular body reached 20 ± 0.3 ℃, the *RMS* was 10.1 nm, which satisfied the surface figure accuracy of the telescope.

**Key words:** large-caliber telescope; main telescope; light-weight; whiffle tree support; gravity transformation; optimal design; thermal transformation