



复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
ISSN 1000-3851, CN 11-1801/TB

《复合材料学报》网络首发论文

题目: 基于 FBG 传感技术的复合材料加筋板低速冲击损伤监测
作者: 周玉敬, 任明伟, 刘刚, 胡晓兰, 范广宏, 益小苏
DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.002
收稿日期: 2018-09-11
网络首发日期: 2018-11-15
引用格式: 周玉敬, 任明伟, 刘刚, 胡晓兰, 范广宏, 益小苏. 基于 FBG 传感技术的复合材料加筋板低速冲击损伤监测[J/OL]. 复合材料学报.
<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.002

基于 FBG 传感技术的复合材料加筋板 低速冲击损伤监测

周玉敬¹, 任明伟¹, 刘刚^{*2,4}, 胡晓兰^{*3}, 范广宏¹, 益小苏²

(1.北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 先进成型技术与装备国家重点实验室, 北京 100083; 2.北京航空材料研究院先进复合材料重点实验室, 中航工业复合材料技术中心, 北京, 100095; 3.厦门大学材料学院 福建省防火阻燃材料重点实验室, 厦门 361005; 4.东华大学, 先进低维材料中心, 上海 201602)

摘要: 针对碳纤维增强树脂基复合材料低速冲击损伤的实时监测, 本文设计将布拉格光纤光栅 (FBG) 传感器埋植在复合材料加筋板结构的三角填充区, 在线监测复合材料 T 型加筋板冲击损伤过程。分别将 FBG 传感器埋植于复合材料层合板内部和复合材料 T 型加筋板的三角填充区, 对比 FBG 传感器的埋入对复合材料层合板与复合材料 T 型加筋板对力学性能的影响, 结果表明内埋 FBG 传感器的复合材料层合板试样的拉伸强度比未埋植传感器的层合板试样降低了约 5%, 但在 FBG 传感器的破坏应变范围内, FBG 传感器可以准确、实时地监测复合材料的应变信号。将 FBG 传感器埋入复合材料 T 型加筋板的三角填充区, 内埋 FBG 传感器的加筋板样件压缩破坏载荷与未埋植的样件基本一致。通过对比加筋板蒙皮上冲击位置、冲击能量对 FBG 传感器测得的冲击过程持续时间和最大应变值的影响, 表明冲击过程持续时间随着冲击能量增加而延长, 最大应变值随着冲击距离的增加呈下降趋势, 而最大应变值随着冲击能量的增加呈上升趋势。利用 FBG 传感器测得的应变信号可初步实现对复合材料 T 型加筋板蒙皮冲击损伤位置及冲击能量的实时监测。

关键词: FBG 传感器; 低速冲击; 损伤监测; 复合材料; 冲击定位

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

Low-velocity impact damage monitoring of composite stiffened panels based on FBG Sensors

ZHOU Yujing¹, REN Mingwei¹, LIU Gang^{*2,4}, HU Xiaolan^{*3}, FAN Guanghong¹, YI Xiaosu²

(1.State Key Laboratory of Advanced Forming Technology & Equipment, Beijing National Innovation Institute of light-weight Co., Ltd., Beijing, 100083, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, AVIC Composites Center, Beijing 100095, China; 3. College of Materials, Fujian Provincial Key Laboratory of Fire Retardant Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4. Center for advanced low-dimension materials, Donghua University, Shanghai 201602, China)

Abstract: FBG sensors were embedded in triangle region of a composite T-stiffened panels to real-time monitor the strain change during impact. By embedding the FBG sensors in composite laminates and triangle region of the T-stiffened composite plates respectively, the effects of FBG sensors on the properties of the composite laminates and T-stiffened composite plates were studied. Results show that the tensile strength of the composite laminates with FBG sensors could be about 5% lower than the laminates without FBG sensors. Within the failure strain scope of FBG sensors, the FBG sensors could accurately monitor the strain signals real-time for the composite laminates. The compressive load of the T-stiffened panels with FBG sensors in triangle area is almost same as the T-stiffened panels without FBG sensors. Moreover, the effects of impact location and impact energy on the impact time and max-strain

收稿日期: 2018-09-11; 录用日期: 2018-11-08; 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0700603)、航空科学基金 (2016ZF68011)、江苏省重点研发计划 (BE2015007)、福建省科技创新平台建设计划 (2014H2006)

通讯作者: 刘刚, 博士, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料

E-mail: liugang@dhu.edu.cn;

胡晓兰, 博士, 副教授, 研究方向为树脂基复合材料

E-mail: xlhu@xmu.edu.cn

引用格式: 周玉敬, 任明伟, 刘刚, 胡晓兰, 范广宏, 益小苏. 基于 FBG 传感技术的复合材料加筋板低速冲击损伤监测 [J]. 复合材料学报, 2019, 36

ZHOU Yujing, REN Mingwei, LIU Gang, HU Xiaolan, FAN Guanghong, YI Xiaosu. Low-velocity impact damage monitoring of composite stiffened panels based on FBG sensors [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36: (in Chinese).

measured by the FBG sensors were studied. The results show that the impact time is increased with increasing impact energy. However, the max-strain is decreased with increasing impact distance, increased with increasing impact energy. By embedding the FBG sensors in triangle area of the composite T-stiffened panels, the impact location and impact energy of the T-stiffened composite panels could be monitored real-time by FBG sensors preliminarily.

Keywords: FBG sensors; low-velocity impact; damage monitoring; composites; impact localization

碳纤维增强树脂基复合材料由于自身的层合结构特点, 对冲击非常敏感, 特别是受到低速冲击时易产生内部缺陷和损伤。这些缺陷和损伤不仅会导致复合材料层合板的承载能力下降, 还因其外表不易检测而存在安全隐患, 导致复合材料层合板结构的可靠性降低, 潜在危害很大^[1-3]。而作为主承力结构的复合材料加筋板, 则会因这种目视不可见的内部分层损伤, 进一步扩展使加筋板屈曲, 导致加筋板整体承载能力大大下降^[4]。为了降低低速冲击损伤给复合材料结构带来的风险, 及时监测冲击过程并探明损伤的位置及大小, 对于复合材料在服役环境下的安全性而言就显得尤为重要^[5-6]。

将布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器埋入复合材料内部, 在线监测记录复合材料结构内部传感信息, 从而了解复合材料结构因内部损伤等引起的信号变化, 可实时、在线监测复合材料结构的健康状态, 提高复合材料结构的可靠性^[7-11]。与传统的超声 C 扫描等复合材料损伤检测方法相比, FBG 传感器埋入法可实现复合材料结构健康状态的在线检测, 同时 FBG 传感器还具有直径小、与复合材料相容性好、抗环境干扰强、稳定性好等优势, 具有很好的应用前景^[12-15]。利用 FBG 传感器对复合材料层合板结构的冲击损伤监测, 将 FBG 传感器粘贴于复合材料层合板表面, 可以通过 FBG 传感器测得的冲击信号, 判定复合材料层合板冲击位置^[16-17]。也可将 FBG 传感器埋入复合材料层合板内部, 实现在线监测低速冲击产生的分层损伤^[17], 并可以通过层合板冲击损伤过程的在线监测, 研究 FBG 传感器监测层合板内部不同厚度的应力变化情况^[18-21]。Takeda S 等还将 FBG 传感器埋入复合材料加筋板的蒙皮与筋条粘接面, 以评估复合材料加筋板冲击损伤^[22]。

然而, 由于常用的光纤直径在 150-250 μm 之间, 比复合材料中碳纤维的直径(一般 5-10 μm)大一个数量级, 且光纤与碳纤维在力学性能、硬度

等性质上差异较大, 加之 FBG 传感器材料与树脂基体在热膨胀等性质方面亦不匹配, 导致光纤埋入复合材料层板内部, 对复合材料的微观形貌及宏观力学性能产生一定的影响^[23]。

复合材料加筋板是一个重要的主承力结构, 在受到外来冲击时, 加筋板蒙皮的层合结构极易产生冲击表面很难观察到的内部分层损伤。为了实现复合材料加筋板结构的低速冲击损伤监测, 同时能减小 FBG 传感器对复合材料力学性能的负面影响, 本文将 FBG 传感器埋植于复合材料加筋板的结构非干涉区-三角填充区内。在对比 FBG 传感器埋植于复合材料层合板与加筋板结构的三角填充区对复合材料力学性能影响的基础上, 通过在线监测低速冲击过程中复合材料应变响应信号, 分析了 FBG 传感器测得的冲击过程持续时间和最大应变值与冲击能量、冲击点位置的关系, 验证了埋植于 T 型加筋板非干涉区的 FBG 传感器信号在线监测复合材料冲击损伤位置、冲击能量与损伤大小的可行性, 探索了埋植于加筋板三角填充区 FBG 传感器对于复合材料结构冲击损伤在线监测的可行性。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用热压罐成型工艺制备复合材料层合板和 T 型加筋板, 材料体系为中航工业复合材料技术中心提供的 CCF300/5228A 碳纤维增强环氧树脂预浸料。复合材料拉伸试样和加筋板铺层顺序如表 1 所示, 复合材料拉伸试样尺寸为 250mm \times 25mm, FBG 传感器沿试样长度方向埋植, 应变片和 FBG 传感器位置如图 1(a)所示。加筋板尺寸如图 1(b)所示。实验中 FBG 传感器沿 0 $^\circ$ 纤维方向分别埋入层合板中间铺层和加筋板三角填充区。加筋板三角填充区的埋植位置如图 1(b)所示。

表 1 复合材料层合板和加筋板的铺层顺序

Table 1 Lay order of FBG sensors in laminates and T-stiffened panels

| Type | | Ply sequence |
|-------------------|------------|----------------------------------------|
| Tension sample | Unembedded | [45/0/-45/90/0/45/0/-45/0]s |
| | Embedded | [45/0/-45/90/0/45/0/-45/0(FBG)]s |
| T-stiffened panel | panel | [45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45/0]s |
| | stiffener | [45/-45/0/45/-45/0/45/-45/0/45/-45/0]s |

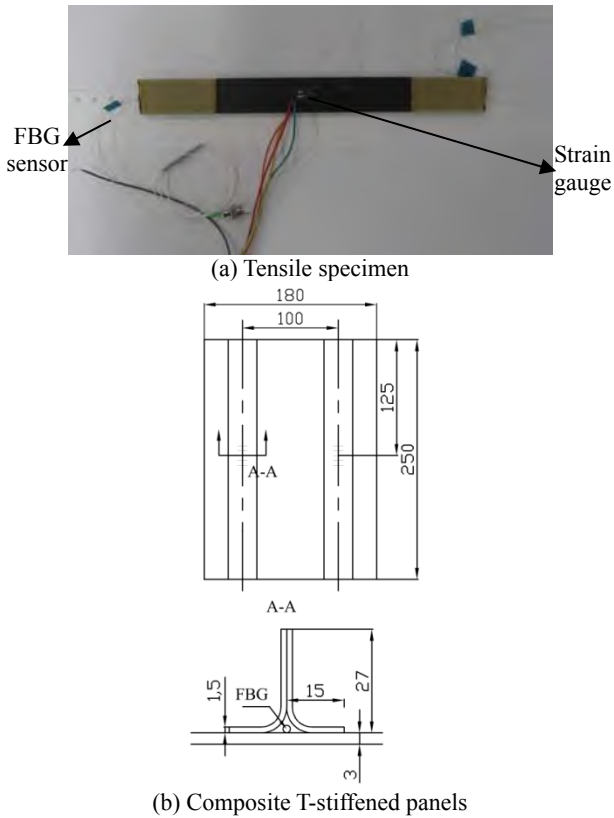
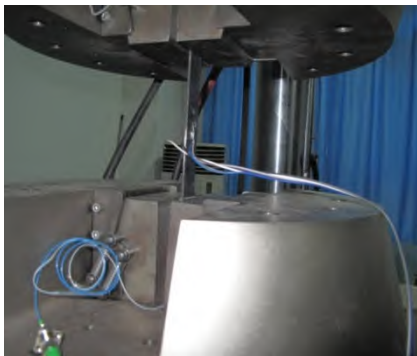


图 1 内埋 FBG 传感器的拉伸试样及复合材料 T 型加筋板结构示意图

Fig.1. Profiles of the tensile specimen and composite T-stiffened panels with embedded FBG sensors

1.2 实验方法

拉伸实验在 INSTRON 8803 型试验机上进行，加载速度为 1.5 mm/min。在拉伸过程中 FBG 传感器信号由布拉格解调仪（型号 1ZH100，最大解调频率为 1000 Hz，设备为中航工业北京长城计量测试技术研究所制造）进行采集，FBG 传感器应变灵敏度系数为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。在拉伸试样表面的中心位置粘贴应变片，如图 2(a) 所示。复合材料加筋板采用自由落体低速冲击试验机进行落锤冲击测试，利用布拉格解调仪采集冲击过程中 FBG 传感器信号，如图 2(b) 所示。利用 LEICA 光学显微镜对拉伸试样进行金相显微分析。复合材料加筋板压缩实验在 INSTRON 8803 型试验机上进行，如图 2(c) 所示。采用 Masterscan 380 超声波 C 扫描仪监测复合材料冲击后损伤情况。采用日本 Hitachi 公司的 S4800N 型冷场发射扫描电子显微镜观察复合材料的内部微观形貌，样品喷金处理。



(a) Tensile testing



(b) Impact testing



(c) Compression testing

图 2 复合材料拉伸和冲击测试设备
Fig.2. Equipment for tensile, impact testing and compression testing of the composites

2 结果与讨论

2.1 内埋 FBG 传感器对复合材料力学性能的影响

图 3 为复合材料层合板内埋 FBG 传感器的金相照片。从图 3 中可见，在热压罐成型过程中，原本 FBG 传感器是沿 0° 纤维方向埋入层合板中间铺层，因预浸料中的树脂在加热过程中黏度变小，在压力作用下，FBG 传感器行进到了铺层纤维束的内部。FBG 传感器周围的纤维分布受其行进运动影响，均匀性有所下降。从显微镜图片来看，复合材料基体树脂与 FBG 传感器表面的保护层粘接紧密，相容性较好。

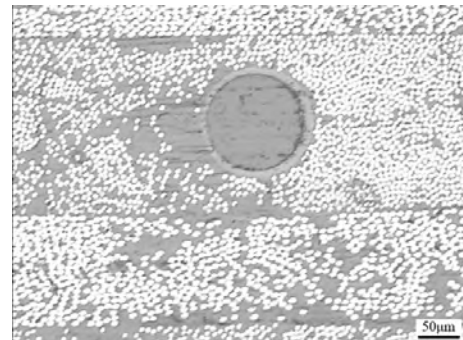


图 3. 纤维铺层中内埋 FBG 传感器的复合材料 T 型加筋板拉伸试样金相照片

Fig.3 Metallographic photo of tensile composite T-stiffened panels specimen with embedded FBG sensor in fabric layers

图 4 为复合材料层合板内埋 FBG 传感器对拉伸强度的影响。从图 4 可见, 埋入 FBG 传感器的复合材料试样的拉伸强度从未埋植 FBG 传感器复合材料的 1548MPa 降低到了 1465MPa, 拉伸强度降低了 5.4%。可见, 虽然在层合板中, 复合材料基体树脂与 FBG 传感器表面的保护层粘接紧密, 但复合材料的拉伸强度依然下降了。本文应用的光纤拉伸强度为 837MPa, 远低于碳纤维拉伸强度 (约 3500MPa), 此时光纤相当于复合材料中相对较弱的增强相纤维, 复合材料在拉伸载荷作用下, 较弱的光纤会首先发生断裂, 并在断裂处产生应力集中, 导致试样拉伸性能下降。由此亦可推测, 应用这种埋植方式, FBG 传感器埋植数量越多, 对复合材料性能影响也越大。

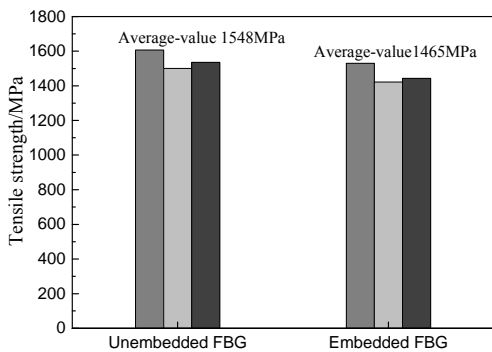


图 4. 纤维铺层中内埋 FBG 传感器对复合材料 T 型加筋板拉伸试样强度的影响

Fig.4 Influence of embedding FBG sensor in fabric layers on tensile strength of composite T-stiffened panels

图 5 是复合材料层合板试样在拉伸载荷作用过程中, 通过纤维铺层内埋 FBG 传感器和样品表面黏贴应变片两种方式测得的应变信号对比结果。从图 5 可见, FBG 传感器和应变片测得的应变值随着载荷的增大而增加, 且 FBG 与应变片的测量结果保持一致。由于本文使用的 FBG 传感器的最大破坏应变约为 $13000\mu\epsilon$, 使其在试样破坏之前的应变约为 $13000\mu\epsilon$ 处发生断裂失效。但图 5 结果显示, 在 FBG 传感器的破坏应变范围内, FBG 传感器测得的应变信号与试样表面的应变片测得的应变信号一致。这说明, FBG 传感器可以准确、实时地监测到复合材料内部应变信号^[18, 19]。

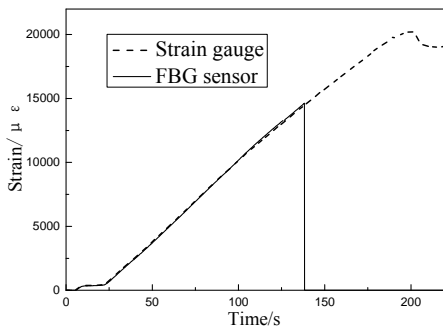


图 5 复合材料层合板拉伸过程中内埋 FBG 传感器和表面应变片测量应变结果比较

Fig.5 Strain results measured by embedded FBG sensors and surficial strain gauges in tensile testing of the composite laminates

通过以上分析可知, FBG 传感器埋植于复合材料层合板中使复合材料拉伸强度下降, 主要是由于 FBG 传感器的力学性能远低于碳纤维, 光纤在层合板结构中类似于增强相, 在受到外部载荷作用时光纤首先发生了断裂, 引起应力集中, 导致了复合材料的整体力学性能下降。复合材料的 T 型加筋板结构, 是复合材料在实际应用中非常典型的结构形式。而复合材料 T 型加筋板的三角填充区是结构非干涉区, 此处因其结构形式的原因使该区域只有树脂, 如图 1 所示。将光纤设计埋植于此, 则可以避免光纤被动作为增强相的缺陷。

作为主承力结构的复合材料加筋板, 加筋板蒙皮的层合结构在受到冲击时产生的内部分层损伤, 在压缩过程中分层区会率先产生局部屈曲, 进一步扩展至加筋结构, 导致加筋板整体承载能力大大下降。本文将 FBG 传感器埋植于复合材料 T 型加筋板的三角填充区, 考察了复合材料加筋板的压缩性能, 结果如图 6。由图 6 可见, 内埋 FBG 传感器和未埋植的加筋板样件压缩破坏载荷分别为 285.3kN 和 286.7kN, 内埋 FBG 传感器的加筋板样件破坏载荷比未埋植的样件仅降低了 0.5%, 两者压缩性能基本一致。由此可知, FBG 传感器埋入三角填充区对加筋板性能基本无影响。图 7 为埋植于三角填充区的 FBG 传感器的 SEM 照片, 从中也可见, 光纤通过其表面的保护层, 和树脂基体粘接良好。

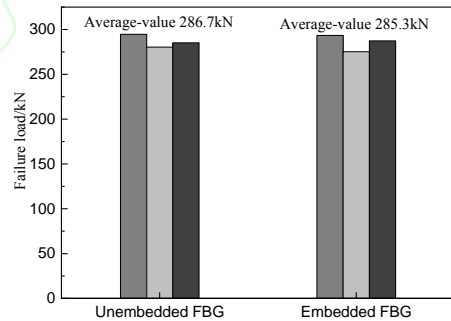


图 6 压缩过程中 FBG 传感器对复合材料 T 型加筋板破坏载荷的影响

Fig.6 Influence of embedded FBG sensor on damage load of the composite T-stiffened panels

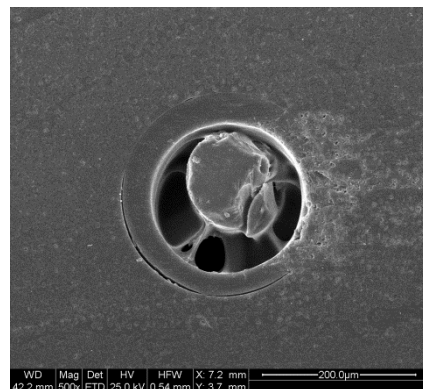


图 7. 埋植于复合材料 T 型加筋板三角填充区内的 FBG 传感器光纤的 SEM 照片

Fig.7 SEM photo of FBG sensor embedded in the Triangle area of the stiffened panel

2.2 内埋 FBG 传感器的复合材料 T 型加筋板冲击损伤监测

复合材料的 T 型加筋板蒙皮是复合材料在使用过程中比较容易受到低速冲击损伤的部位。针对复合材料的典型 T 型加筋板结构形式，在结构非干涉区---三角填充区内埋 FBG 传感器，在不同冲击位置和冲击能量条件下，在线监测复合材料 T 型加筋板在冲击过程中的冲击应变信号，研究 FBG 传感器的冲击应变信号与冲击位置、冲击能量、冲击损伤之间的关系。

2.2.1 冲击位置对 FBG 传感器信号的影响

以 FBG 传感器刻栅区中点为原点，冲击能量为 3J/mm，冲击位置 A、B、C 和 D 的坐标分别是 (30mm, 0)、(50mm, 0)、(50mm, 30mm)和 (70mm, 0)，如图 8 所示。

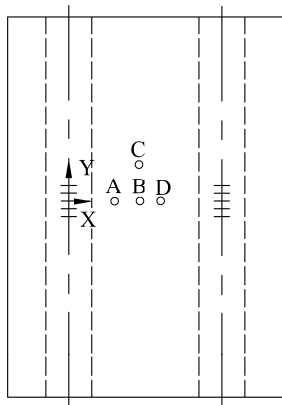
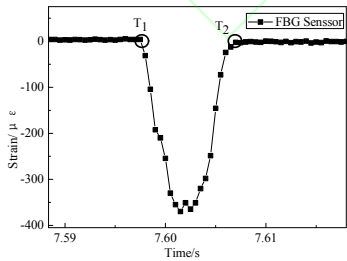
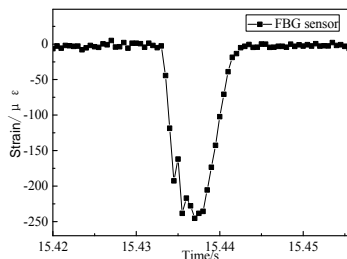


图 8 复合材料加筋板冲击位置示意图
Fig.8 The profile for impact location of the stiffened panel

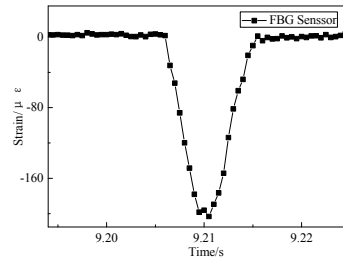
冲击过程中 FBG 传感器测得应变曲线如图 9 所示。从图 9 可见，埋植于三角填充区的 FBG 传感器可以监测到复合材料加筋板的冲击信号以及低速冲击过程中的应变变化。以图 9(a)中 FBG 传感器测得的冲击曲线为例，冲击过程的发生时间 T 则为： $T=T_2-T_1$ 。图 10 为冲击点位置与 FBG 传感器测得冲击过程持续时间的关系，从图中可以看出，冲击点位置对冲击过程持续时间基本没有影响。



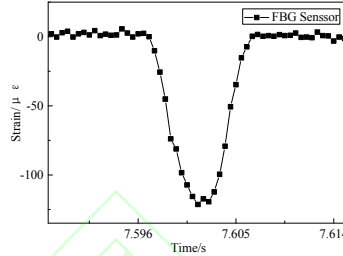
(a) Impact location A



(b) Impact location B



(c) Impact location C



(d) Impact location D

图 9 不同冲击位置条件下 FBG 传感器测得复合材料 T 型加筋板冲击应变曲线

Fig.9 The strain curves of composite T-stiffened panel measured by FBG sensors of different impact location

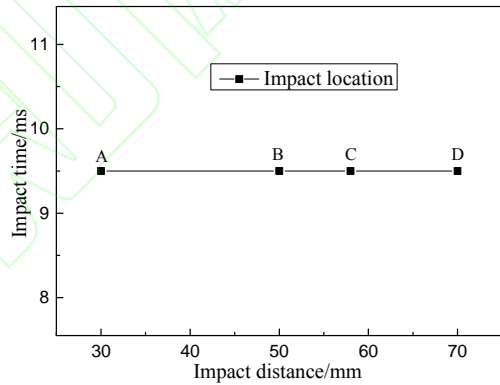


图 10 冲击点位置与 FBG 传感器测得复合材料 T 型加筋板冲击过程持续时间的关系

Fig.10. Relation between impact locations and the impact times of composite T- stiffened panels measured by the FBG sensors

图 11 为冲击位置与 FBG 传感器测得的最大冲击应变值的关系。从图 11 可见，在相同冲击能量下，冲击点位置与 FBG 传感器距离与 FBG 传感器测得的最大冲击应变值成反比关系，并呈较好的线性关联。由此说明，利用埋植于 T 型加筋板三角填充区内的 FBG 传感器测得的最大应变值随冲击点位置线性变化的特性，可以对复合材料加筋板蒙皮受到的低速冲击位置进行较为有效的初步判定。

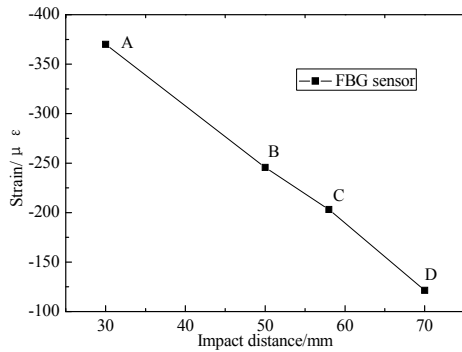


图 11 冲击位置与 FBG 传感器测得的复合材料 T 型加筋板最大冲击应变值的关系

Fig.11 Relation between impact location and the max-strain value of composite T-stiffened panels measured by FBG sensors

2.2.2 冲击能量对 FBG 传感器信号的影响

利用 FBG 传感器对复合材料 T 型加筋板冲击位置 B 进行冲击过程监测, 冲击能量分别为 1J/mm, 2J/mm, 3J/mm, 4J/mm 和 5J/mm。图 12 是冲击能量与 FBG 传感器测得的最大应变值的关系。从图 12 可见, 随着冲击能量增加, FBG 传感器测得的最大应变值增大。在冲击能量小于 4J/mm 时, 冲击能量与最大应变值的相关性较接近于线性关系。在冲击能量大于 4J/mm 时, 冲击能量与最大应变值的相关性偏离于线性, 且随冲击能量的增加, 最大应变值增量小于线性增量。图 13 给出了冲击能量与加筋板蒙皮冲击过程持续时间的关系, 由此可见, 随着冲击能量的增加, 冲击过程的持续时间也随之增加。其原因可能是由于随着冲击能量的增加, 复合材料 T 型加筋板蒙皮内部的纤维分层、树脂开裂、裂纹纵向贯穿等损伤^[24]增加, 导致冲击过程产生的应变和持续时间增加。而且随冲击能量的增加, 冲击过程的持续时间与之呈现较好的线性关系。由此可知, 在冲击能量较小时 (如 $\leq 4\text{J/mm}$), 通过内埋在 T 型加筋板的三角填充区的 FBG 传感器, 能比较好地通过冲击能量与最大应变值的关系来初步判定冲击能量的大小。而通过冲击能量与冲击过程持续时间的变化特性关系, 则可为准确地判定冲击能量的大小。

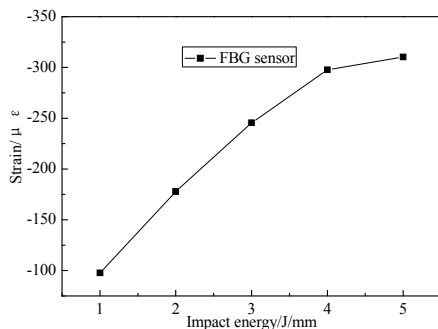


图 12 冲击能量与 FBG 传感器测得的冲击过程中复合材料 T 型加筋板最大应变值的关系

Fig.12 Relation between impact energy and the max-strain value of composite T-stiffened panels measured by FBG sensors during impact

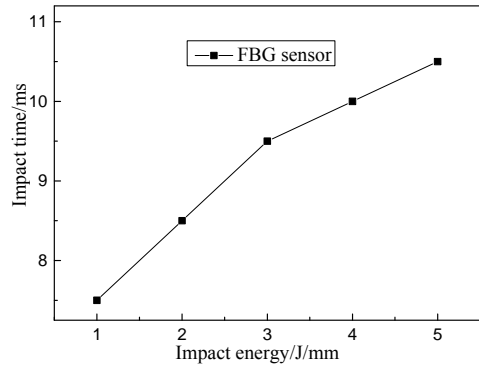


图 13 冲击能量与 FBG 传感器测得的复合材料 T 型加筋板蒙皮冲击过程持续时间的关系

Fig.13. Relation between impact energy and the impact time of composite T-stiffened panels measured by FBG sensors

图 14 为加筋板蒙皮的冲击损伤 C 扫描形貌及冲击损伤面积与冲击位置的关系。从图 14(a)可见, 随着冲击能量的增加, 加筋板蒙皮的冲击损伤面积随之增加^[5,24], 且试样在 45° 方向的损伤也逐渐明显, 这也意味着冲击能量增加对复合材料的危害性逐渐增大。从图 14(b)可见, 蒙皮的冲击损伤面积和冲击能量之间, 呈现良好的线性关系。而图 12 亦显示, 随着蒙皮冲击能量的增大, 对应的 FBG 传感器测得的冲击过程持续时间也随之增加, 并具有良好的线性关系。由此可知, 可以通过冲击过程持续时间的监测, 来初步判定复合材料冲击损伤面积的大小和冲击能量的大小。

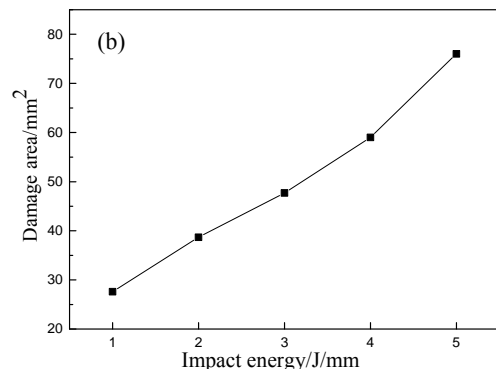
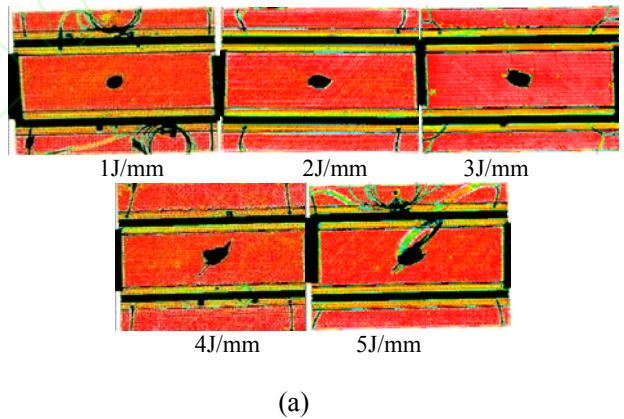


图 14 复合材料 T 型加筋板蒙皮冲击损伤 C 扫描形貌 (a) 及损伤面积与冲击能量关系 (b)

Fig.14 C-scan pictures and relation between delaminating area of composite T-stiffened panels and impact energy

3 结论

(1) 将布拉格光纤光栅 (FBG) 传感器埋植于碳纤维增强树脂基复合材料层合板的纤维铺层间, 在 FBG 传感器的应变监测范围内, FBG 传感器的测量结果与粘贴于试样表面的应变片测量结果基本一致, 可以有效监测复合材料层合板内部的应变信号。但复合材料层合板的拉伸性能会因埋植 FBG 传感器受到负面影响, 拉伸强度下降约 5%。

(2) 将 FBG 传感器埋植于典型复合材料 T 型加筋板结构的非干涉三角填充区内, 内埋 FBG 传感器的加筋板样件比未埋植的样件压缩强度仅降低了 0.5%。FBG 的埋植对复合材料的压缩强度基本没有影响。

(3) 冲击位置在非筋条区域时, 冲击位置与 FBG 传感器距离与 FBG 传感器测得的最大冲击应变值成反比关系, 与冲击过程持续时间无关。冲击能量与 FBG 传感器测得的最大冲击应变值和冲击过程持续时间成正比关系。可利用 FBG 传感器测得的冲击过程持续时间随冲击点能量变化的特性, 初步判定冲击能量大小, 利用 FBG 传感器测得的最大应变值随冲击点位置及冲击能量的变化特性, 实现对复合材料加筋板蒙皮受到的低速冲击进行初步判位。

参考文献:

- [1] FAGGIANI A, FALZON B G. Predicting low-velocity impact damage on a stiffened composite panel [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(6): 737-749.
- [2] 朱炜壺, 许希武. 含低速冲击损伤复合材料层合板剩余压缩强度及疲劳性能试验研究[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(5): 171-172.
ZHU Weiyao, XU Xiwu. Experiment research on residual compressive strength and fatigue performance of composite laminates with low velocity impact damage[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(5):171-172.
- [3] 邓立伟, 陈新文, 王海鹏等. 复合材料层合板低速冲击后的力学性能试验研究[J]. *纤维复合材料*, 2013,17(3):17-18.
DENG Liwei, CHEN Xinwen, WANG Haipeng, et al. Mechanical experimental study on composite laminates after low-velocity impact[J]. *Fiber Composites*, 2013,17(3):17-18.
- [4] SUH S S, HAN N L, YANG J M. Compression behavior of stitched stiffened panel with a clearly visible stiffener impact damage[J]. *Composite Structures*, 2013, 62(2):213-216.
- [5] TAKEDA S, AOKI Y, NAGAO Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors[J]. *Composite Structures*, 2012, 94: 813-816.
- [6] 陆观, 徐一鸣, 邱自学等. 基于光纤传感网络的变截面复合材料低速冲击定位[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(12):1632-1635.
LU Guan, XU Yiming, QIU Zixue, et al. The low velocity impact localization based on optic fiber sensing network for varied cross-section composites[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(12):1632-1635.
- [7] GENG X Y, JIANG M S, GAO L L. Sensing characteristics of FBG sensor embedded in CFRP laminate[J]. *Measurement*, 2017, 98:199-201.
- [8] 刘刚,张斌,周玉敬,等.内埋光纤光栅碳纤维增强复合材料层压板力学性能及拉伸应变监测[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014,(9):16-21.
LIU Gang, ZHANG Bin, ZHOU Yujing, et al. Study for mechanical properties of the composite laminates embedded with the optical fibers[J]. *FRP/CM*, 2014,(9):16-21.
- [9] DIAMANTI K, SOUTIS C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010,46(8): 342-352
- [10] 高琳琳, 王庆林, 王晓霞, 等. 纤维复合材料层合板内埋光纤光栅传感器的保护技术[J]. *复合材料学报*, 2016, 33 (11) : 2485-2486.
GAO Linlin, WANG Qinglin, WANG Xiaoxia, et al. Protection technology of optical fiber grating sensors embedded in fiber composite laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016,33(11): 2485-2486.
- [11] HU Haixiao, LI Shuxin, WANG Jihui, et al. FBG-based real-time evaluation of transverse cracking in cross-ply laminates[J]. *Composite Structures*, 2016, 138:151-154.
- [12] HAO Juncai, LENG Jinsong, WEI Zhang. Non-destructive evaluation of composite pressure vessel by using FBG sensors. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(2):120-122.
- [13] SHRESTHA P, PARK Y, KIM C G. Low velocity impact localization on composite wing structure using error outlier based algorithm and FBG sensors[J]. *Composites Part B*, 2017,116:298-300.
- [14] 沈维亮, 朱启荣, 解明如. 基于光纤光栅传感器的玻璃纤维复合材料层间应变测试的实验分析[J]. *力学季刊*, 2013,34(3):463-465.
SHEN Weiliang, ZHU Qirong, XIE Mingru. Experimental analysis of strain between layers of glass-fiber reinforced composite materials[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2013,34(3):463-465.
- [15] ZHU Qirong, XU Cheng, YANG Guobiao. Experimental research on damage detecting in composite materials with FBG sensors under low frequency cycling[J]. *International Journal of Fatigue*, Part1, 2017, 101:61-66.
- [16] SHRESTHA P, KIM J H, PARK Y, et al. Impact localization on composite structure using FBG sensors and novel impact localization technique based on error outliers[J]. *Composite Structures*, 2016, 142:263-270.
- [17] SHREATHA P, KIM J H, PARK Y, et al. Impact localization on composite wing using 1D array FBG sensor and RMS/correlation based reference database algorithm[J]. *Composite Structures*, 2015,125: 159-169.

- [18] TAKEDA S, MINAKUCHI S, OKABE Y, et al. Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors[J]. *Composites: Part A*, 2005, 36(7): 903–908.
- [19] 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):31-33.
GU Guangwei, WANG Qingtao, LI Wei. Research of FBG-based composite damage monitoring subjected to low-velocity impact[J]. *FRP/CM*, 2015,(4):31-33.
- [20] 武湛君, 万里冰, 张博明, 等. 光纤光栅应变传感器监测复合材料层板疲劳过程[J]. *复合材料学报*, 2004,21(6):75-78.
WU Zhanjun, WAN Libing, ZHANG Boming, et al. Fatigue process monitoring for composite laminates with fiber bragg grating[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2004,21(6):75-78.
- [21] TAKEDA S, OKABE Y, YAMAMOTO T, et al. Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63: 1885–1888.
- [22] 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.
- [23] 赵海涛,张博明,武湛君,等. 光纤光栅智能复合材料基础问题研究[J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(12): 27 - 28.
ZHAO Haitao, ZHANG Boming, WU Zhanjun, et al. Infrastructure study for optical fiber grating in smart composite materials [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(12):27-28.
- [24] TSUTSUI H, KAWAMATA A, SANDA T, et al. Detection of impact damage of stiffened composite panels using embedded small-diameter optical fibers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014,13:1284-1290.