

## 嵌入式光纤传感器对碳纤维层合板弯曲性能的影响

胡宇博<sup>1</sup>, 郎利辉<sup>1</sup>, 闫东东<sup>1</sup>, 秦成伟<sup>2</sup>, 史志远<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中车唐山机车车辆有限公司 转向架技术中心, 河北 唐山 064000)

**摘要:** 针对光纤嵌入碳纤维层合板成形中常出现的涂覆层脱落问题, 用一组对比试验研究了光纤的嵌入保护在碳纤维层合板成形过程中的作用; 通过三点弯曲试验研究了光纤嵌入数量、嵌入方向对碳纤维层合板弯曲性能和失效模式的影响。结果表明: 光纤的嵌入数量引起的碳纤维层合板抗弯强度和模量的最大损失分别为 8.5% 和 14.3%; 沿纤维方向嵌入光纤时, 在光纤挤入方向相同的纤维束群中, 抗弯强度和模量分别降低 5.2% 和 13.1%; 而当光纤光栅垂直于纤维方向嵌入复合材料内部时, 光纤周围形成眼状复合结构, 抗弯强度和模量均略有提升, 增幅约为 2.5%, 起到一定的增强相的效果。

**关键词:** 碳纤维层合板; 光纤传感器内嵌; 光纤保护套; 弯曲试验; 抗弯强度; 模量

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.007

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0054-07

## Influence of embedded optical fiber sensor on bending properties for carbon fiber laminates

Hu Yubo<sup>1</sup>, Lang Lihui<sup>1</sup>, Yan Dongdong<sup>1</sup>, Qin Chengwei<sup>2</sup>, Shi Zhiyuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Bogie Technology Center, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000, China)

**Abstract:** For the coating peeling problem that often occurs in the formation of carbon fiber laminates embedded with optical fiber, the role of embedded protection for optical fibers in the forming process of carbon fiber laminates was studied by a set of comparative tests, and the influences of number and direction of embedded optical fibers on the bending properties and failure modes of carbon fiber laminates were studied by three-point bending tests. The results show that the maximum loss of bending strength and modulus caused by the number of embedded optical fibers are 8.5% and 14.3%, respectively. When the optical fiber is embedded along the direction of carbon fiber, the bending strength and modulus are decreased by 5.2% and 13.1% respectively in the optical fiber bundle group with the same optical fiber extrusion direction. However, when the optical fiber grating is embedded in composite material along the vertical direction of carbon fiber, an eye-shaped composite structure is formed around the optical fiber, and the bending strength and modulus are slightly improved with an increasing range of about 2.5%, which has the effect of a certain reinforcing phase.

**Key words:** carbon fiber laminate; embedded optical fiber sensor; optical fiber protective sleeve; bending test; bending strength; modulus

碳纤维复合材料具有质量轻、比强度高、比刚度大、可设计性强等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车工业、电子电气以及轨道交通等领域中<sup>[1-4]</sup>。碳纤维层合板是由多层的碳纤维单层材料通过某种次序叠加合成的一个整体的结构板体。因此, 单层碳纤维材

料的性能可能不同, 各层之间的主方向可能也不同, 这就导致层合板存在各向异性<sup>[5]</sup>。层合板受载时铺层间的应力状态混杂, 内部易发生层间破坏, 严重时会导致整个结构被破坏。此外, 复合材料在生产制备、运输加工等环节中还容易引起纤维断裂、局部褶皱、孔隙等缺陷和损伤问题。针对这些问题, 以光纤光栅传感器 (Fiber Bragg Grating Sensor, FBGs) 为核心的结构健康监测技术, 能够通过将微细的光纤传感器嵌入到结构内部, 实时地获取与碳纤维层合板当前状态有关的物理量或信息, 再结合信号处理方法和外部分析建模方法, 实现层合板状态的具象化, 在线获取缺

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目 (24300002021107005)

作者简介: 胡宇博 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: sy2107304@buaa.edu.cn

通信作者: 郎利辉 (1970-2022), 男, 博士, 教授

E-mail: huyubo93@163.com

陷和损伤等相关信息<sup>[6-7]</sup>。

Shivakumar K<sup>[8]</sup>对光纤传感器嵌入复合材料层合板进行了系统研究, 提出了光纤嵌入产生的眼状结构, 试验结果表明, 纤维增强复合材料中嵌入光纤传感器会引起树脂腔和光纤周围增强纤维的几何扰动, 导致抗压强度降低 40%, 拉伸强度损失约 10%。Sahir Masmoudi 等<sup>[9]</sup>对嵌入压电传感器和未嵌入传感器的复合材料试件分别进行拉伸、静力和疲劳加载, 结果表明, 异质微细传感器对材料力学性能的影响几乎可以忽略不计。Hadzic R 等<sup>[10]</sup>通过对嵌入光纤传感器的复合材料进行拉伸和压缩试验, 发现嵌入光纤传感器后的材料强度较未嵌入光纤时明显降低。谢怀勤等<sup>[11]</sup>对碳纤维复合材料中嵌入光纤后的弯曲性能进行了试验研究, 分析的影响参数包括光纤直径大小、光纤嵌入方向以及嵌入的光纤体积含量等。孟庆平等<sup>[12]</sup>在碳纤维复合材料内部嵌入光纤光栅传感器, 研究了嵌入光纤光栅传感器后碳纤维复合材料的结构强度变化及光纤光栅的信号传递率, 试验结果表明, 碳纤维复合材料埋入光纤光栅传感器前后的结构强度变化率小于 10%。

碳纤维层合板的弯曲性能在航空飞行器翼面结构、车辆轻量结构件中均为重要的设计参数<sup>[13]</sup>。特种环境下, 复杂的弯曲载荷也往往是结构产生破坏的根本原因<sup>[14]</sup>。针对光纤嵌入所产生的性能影响, 国内外研究团队多数关注了复合材料的拉伸和压缩性能, 对弯曲性能的理论 and 试验研究相对较少。因此, 本文通过三点弯曲试验研究了嵌入式光纤传感器的数量和嵌入方向对碳纤维层合板的弯曲强度、模量以及失效模式的影响, 验证了光纤结构健康监测技术应用在碳纤维层合板构件上的可行性, 对光纤嵌入式智能复合材料的工程化应用具有一定的指导意义。此外, 根据成形工艺过程中出现的光纤破损现象, 设计有光纤出口保护套, 有效提高了光纤传感器的鲁棒性和耐久性。

## 1 试验与试样制备

### 1.1 材料与试样设计

参照 GB/T 1449—2005<sup>[15]</sup>设计了如图 1 所示的弯曲试样, 使用 T700 碳纤维单向布和 IN2 导流环氧树脂制成, 铺层顺序为  $[0_2/90/0]$ 。(其中下标 2 表示  $0^\circ$  铺层重复 2 次, 下标 s 表示对称), 层数为 8 层。图 1 中的光纤光栅传感器, 是利用掺杂光纤的光致折射率的变化特性, 采用特殊工艺使得光纤纤芯的折射率发生周期变化而制成的反射型光纤无源传感器件, 其实物

图如图 2 所示。

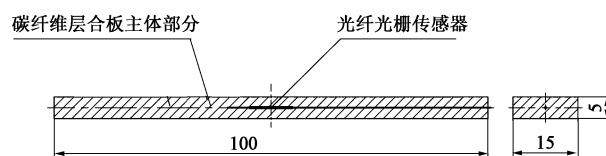


图 1 弯曲试样尺寸

Fig. 1 Bending specimen sizes

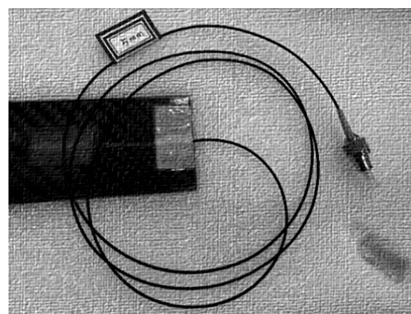


图 2 光纤光栅传感器

Fig. 2 Fiber bragg grating sensor

在达到相同测试效果的前提下, 为避免试验产生不必要的成本和消耗, 此次试验中采用普通裸光纤来代替光纤光栅传感器, 嵌入到碳纤维层合板中进行弯曲试验。光纤以预铺贴的形式安装在干纤维布的中间层, 再通过真空导流的方式将整个试件浸润树脂, 并在真空压力下最终成形, 如图 3 所示。试验方案的设计主要围绕试样设计而展开, 共设计了 4 种类型的试样进行性能对比试验, 分别探究光纤嵌入数量、嵌入方向对层合板弯曲性能的影响。此外, 在初步制样环节中发现, 裸光纤直接嵌入到层合板内时, 成形过程中的真空压力会使真空袋在层合板边界处被挤压, 导致悬于空中的裸露光纤受变形挤压, 容易发生断裂。因此, FBGs 在嵌入式测量中通常还要在光纤的出口端添加保护层, 以确保 FBGs 在监测工作中有良好的服役表现<sup>[16]</sup>。为验证保护层在弯曲试验中的作用, 另设计了 1 组含有保护层的试样作对比试验。试验方案具体如表 1 所示。

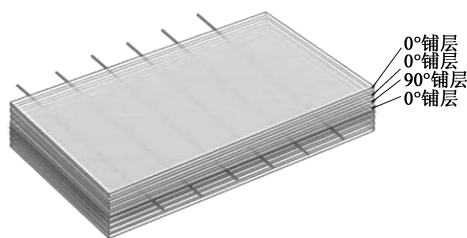


图 3 光纤预铺贴

Fig. 3 Pre-laying of optical fiber

表 1 设计的试验方案

Table 1 Designed test schemes

嵌入光纤数量	嵌入方向/(°)	试验组标记	每组试样数量
1	0	OF1LEN	5
1	90	OF1WID	5
2	90	OF2WID	5
2	0	OF2LEN	5
2	0	OF-CL	5
BLANK	—	—	5

其中,“试验组标记”说明如下:光纤 (Optic Fiber) 记为“OF”;定义嵌入方向 0°为与纤维方向平行的角度,即弯曲试样长度方向,记为“LEN”;定义嵌入方向 90°为与纤维方向垂直的角度,即弯曲试样宽度方向,记为“WID”;保护层 (Cover Layer) 记为“CL”;未嵌入任何光纤的对照组试样记为“BLANK”。需要指出的是,所有嵌入光纤的试样,光纤均位于中间层,即铺层顺序为  $[0_2/90/0/OF/0/90/0_2]$ 。

1.2 三点弯曲试验

完成试样的制备后,采用 CTM100G 微机控制高温万能材料试验机对试验组进行弯曲试验。试验在 GB/T 1449—2005<sup>[15]</sup> 中要求的试验条件下进行,采用无约束支撑,通过三点弯曲以恒定的压缩加载速率使试样破坏,如图 4 所示。在整个过程中,测量施加在样件上的载荷和试样的挠度,确定弯曲强度、弯曲弹性模量以及弯曲应力与应变的关系。样件厚度为  $(2 \pm 0.1)$  mm,跨距为 45 mm,加载速率为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,当弯曲载荷骤降超过 20%时即认为试样发生失效,加载终止,卸载,单次试验结束。



图 4 三点弯曲试验

Fig. 4 Three-point bending test

2 试验结果及分析

2.1 光纤保护

光纤一般由 3 层物质组成:纤芯、包层、涂覆层。通常纤芯由折射率比周围包层略高的光学材料制成,主要作用是传导光线,使光纤以特定角度到达与包层的界面处时能够实现全反射,从而保证光线在纤芯内部的传递。包层的主要成分为二氧化硅,与纤芯材质相近,弹性模量一般在 72 GPa 附近。涂覆层主要是由环氧树脂、硅橡胶、塑料等组成,避免光纤出现磨损、压裂等一般失效情况。

光纤传感器自身的保护在工程应用中是不可忽视的重要问题。实际上由于光纤嵌入至中心铺层之间,层合板外部延伸出的光纤处在悬空阶段,在成形过程中真空袋在大气压力的作用下与层合板紧密贴合,光纤在出口处将出现较大的弯曲变形。成形后光纤外表面如图 5a 所示,尽管未出现明显折断破坏,但表面涂覆层出现了明显的脱落,包层乃至纤芯直接裸露在外,将极大程度地影响光纤的传感测量功能。因此,在原有光纤光栅串的基础保护层之上,另外在光纤的出口端附近裹覆一层聚四氟乙烯管,如图 5b 所示,增强了光纤在成形和实际应用过程中的鲁棒性,保障工作寿命和监测性能。

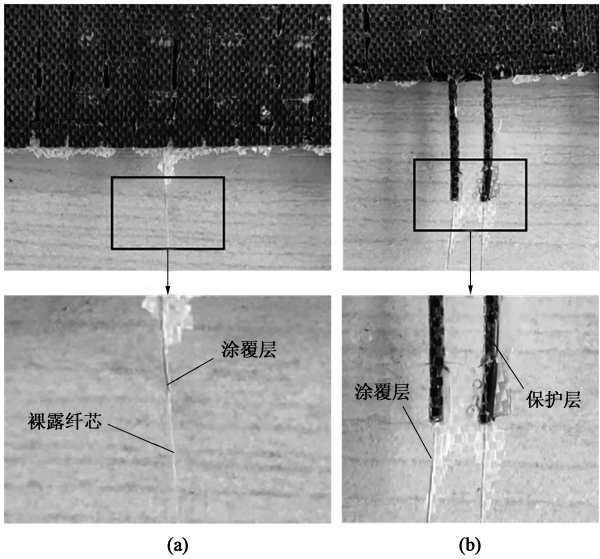


图 5 光纤出口端保护

(a) 无保护层 (b) 添加特氟龙保护层

Fig. 5 Protection of optical fiber outlet

(a) Without protective layer (b) With Teflon protective layer

2.2 失效模式分析

试样的典型失效模式为:由受压面开始到中性



层以上主要表现为局部屈曲和断裂,中性层以下仍保持低强度的连接状态,局部有微小裂纹出现。屈曲可能是纤维发生的微屈曲,也可能是各铺层层间的屈曲,这种类型的屈曲会导致外部层的分层,有时分层先于屈曲发生。沿 $0^\circ$ 嵌入光纤试样 OF1LEN 的典型失效模式如图 6a 所示,发现中性层附近多发生铺层级屈曲,局部分层发生的位置并不固定,有的

向左侧延伸、有的向右侧延伸。此外,该类型试样在压头正下方,直接受压区域未出现外表面的压溃断裂。沿 $90^\circ$ 嵌入光纤试样 OF1WID 的典型失效模式如图 6b 所示,与 OF1LEN 不同,该类型试样在中性层附近未出现明显的分层情况,表现为局部断裂,断裂区窄,向两侧延伸少,但压头附近表面层的压碎情况较为明显,受压面有小范围压溃和分层。

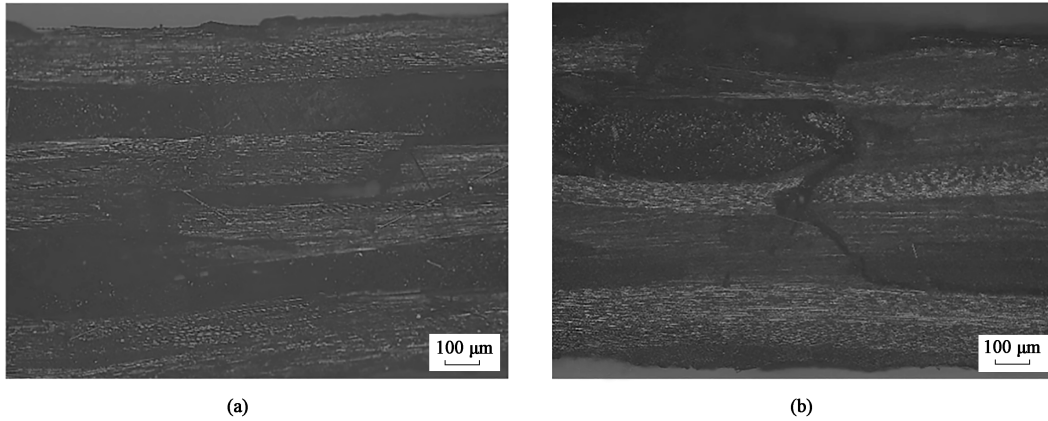


图6 嵌入光纤的试样的典型失效模式

(a) OF1LEN (b) OF1WID

Fig. 6 Typical failure modes of samples embedded in optical fiber

总体上,各组试样均未出现中性层以下受拉层的拉伸断裂,且从 OF1WID 的断裂截面来看,整个断裂区与光纤仍保持有一定距离,说明光纤的嵌入基本没有引起局部应力集中,嵌入位置引入的初始损伤也比较少。

### 2.3 试验结果分析

以各试验组内典型破坏试样为代表,绘制各组试验的载荷-位移曲线,如图 7 所示。分析加载位移在 $2\sim 3$  mm 这一区间内载荷的变化情况,能够清楚看到载荷在 $2$  mm 附近达到峰值,随后骤降,随之出现载荷的二次上升(类平台)阶段。这种渐进的失效模式可以解释为:碳纤维增强聚合物复合材料的拉伸强度大于其压缩强度,因此,在弯曲加载过程中层合板压缩侧的碳纤维层首先发生挤压断裂,这也是出现第 1 次载荷骤降的原因;但断裂并未扩展至整个厚度层面,层合板支撑侧的碳纤维层由于其优越的拉伸强度仍保持着强连接状态,能够继续承受载荷,进而在载荷-位移曲线上呈现出短促上升期,随后层合板支撑侧的纤维层出现拉伸破坏,出现第 2 次载荷骤降的趋势,这也与 Sun G Y 等<sup>[17]</sup>、Mehdi Kalantari 等<sup>[18]</sup>提出的碳纤维复合材料弯曲试验中存在类平台区域的研究结果保持了一致。此外,前文提到的失效模式分析中也进一步印证了

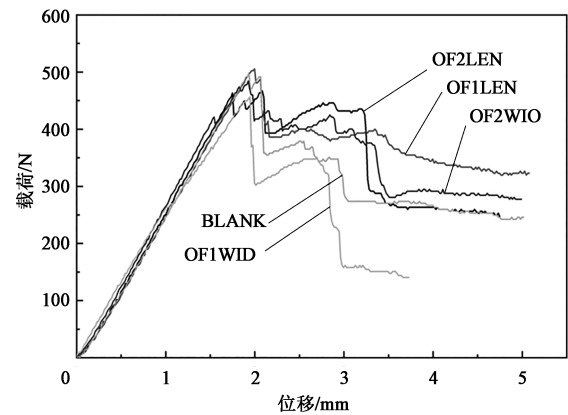


图7 典型试样的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of typical specimens

这一现象。

三点弯曲试验的弯曲强度为:

$$\sigma_f = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

弯曲弹性模量计算公式为:

$$E_f = 500(\sigma'' - \sigma') \quad (2)$$

式中: $\sigma_f$ 为弯曲强度,MPa; $P_b$ 为试样破坏时的最大载荷,MPa; $L$ 为跨距,mm; $h$ 为试样厚度,mm; $b$ 为试样宽度,mm; $E_f$ 为弯曲模量,MPa; $\sigma''$ 为应变为 $0.0005$ 时测得的弯曲应力,MPa; $\sigma'$ 为

应变为 0.0025 时测得的弯曲应力, MPa。

根据式 (1) 和式 (2), 可计算出各组试样的弯曲强度和弯曲模量, 计算结果如表 2 所示。图 8 中抗弯强度以及弯曲模量值均为各组 5 个试样得到的平均计算结果。由平均计算结果可知, 相比于未嵌入光纤的对照组 BLANK, 其余试样多数均有不同程度的弯曲性能损失, 其中沿 0° 嵌入 2 根光纤的试验组 OF2LEN 中试样的抗弯强度和弯曲模量损失最多, 分别达到 8.5% 和 14.3%。

表 2 各组试样的弯曲强度以及弯曲模量计算结果  
Table 2 Calculation results of bending strength and bending modulus for each group of samples

试验组	试样编号	抗弯强度/MPa	弯曲模量/GPa
OF1WID	1	673.091	74.241
	2	609.684	70.296
	3	692.601	67.014
	4	643.827	69.809
	5	697.479	66.866
OF2WID	1	669.794	59.879
	2	595.349	61.015
	3	516.553	61.113
	4	569.084	57.370
	5	678.523	61.686
OF1LEN	1	687.278	60.568
	2	630.370	60.349
	3	590.972	59.801
	4	499.043	55.809
	5	652.257	59.080
OF2LEN	1	630.370	60.026
	2	621.615	57.271
	3	608.482	56.069
	4	512.175	56.670
	5	582.216	61.533
BLANK	1	507.257	64.614
	2	575.542	67.286
	3	702.356	70.050
	4	692.601	68.599
	5	741.376	69.750

2.3.1 光纤嵌入数量的影响

对于沿 90° 嵌入 2 根光纤的弯曲试样, 碳纤维层合板的抗弯强度比嵌入 1 根光纤和未嵌入光纤时层合板试样的抗弯强度降低了 8.4% 和 6.0%; 沿 0°

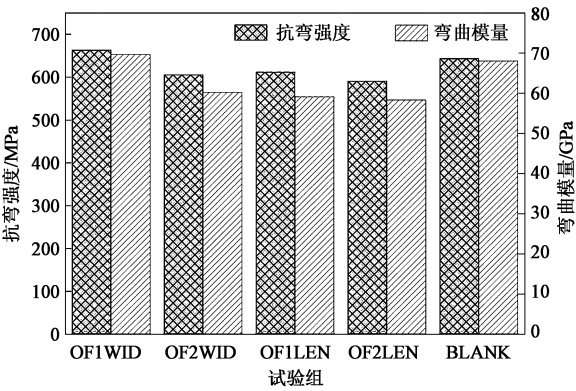


图 8 弯曲试验结果  
Fig. 8 Bending test results

嵌入 2 根光纤的弯曲试样, 其抗弯强度比嵌入 1 根光纤和未嵌入光纤时层合板试样的抗弯强度降低了 3.4% 和 8.5%。根据以往对光纤嵌入数量影响复合材料力学性能的研究可知, 光纤嵌入数量在 5 以下时, 对材料的拉伸强度影响低于 1.2%, 但随着嵌入数量提升至 10 及以上时, 性能有明显的降低<sup>[19]</sup>。在弯曲试验中, 抗弯强度随着光纤嵌入数量的增大有小幅的性能缩减, 相比于拉伸、压缩强度在 1.2% 以下的相对损失值, 光纤嵌入数量能明显影响到碳纤维层合板试验件的抗弯强度和弯曲模量。

2.3.2 光纤嵌入方向的影响

光纤沿不同方向嵌入对层合板弯曲性能的影响比较复杂。沿 0° 嵌入 1 根裸光纤的试验组 OF1LEN 与未嵌入光纤的对照组 BLANK 相比, 抗弯强度降低 5.2%。从数据结果中能够明显看出, 光纤嵌入角度和相邻层合板纤维方向相同时, 引入的初始损伤小, 且与纤维和树脂基体结合良好。从图 9a 中也能明显看出光纤挤入方向相同的纤维束群中, 周围无气孔和其他明显缺陷, 整体来看沿 0° 嵌入光纤对抗弯强度的影响较小。

以往对光纤沿 90° (垂直相邻纤维铺层方向) 嵌入复合材料结构的性能影响研究中, 大都提到“眼状结构”的产生。这种特殊结构的产生主要来源于纤维束由编织工艺形成的单层结构, 光纤与相邻层合板纤维沿一定角度嵌入时, 光纤相较于纤维束来说, 具有较大的直径和固有体积, 层间在光纤附近形成树脂富集区, 如图 9b 所示。但树脂富集区的形成对于结构的影响并不一定总是有害的, 也能起到一定的止裂和局部增强的作用, 提高层合板的断裂韧性<sup>[20]</sup>。从试验结果看, 与沿 0° 嵌入光纤后复合材料的抗弯强度出现不同程度的降低不同的是,

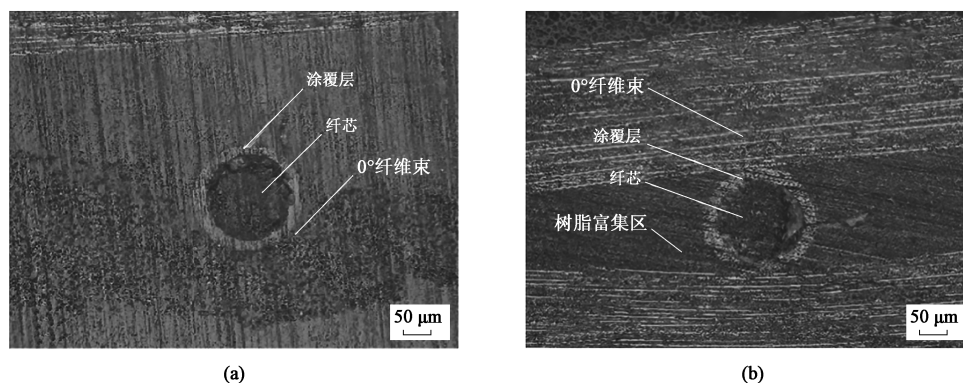


图9 不同光纤嵌入方向的试样的微观形貌

(a) OF1LEN (b) OF1WID

Fig.9 Micro appearances of samples with different embedding directions for optical fiber

当沿  $90^\circ$  嵌入光纤时, 材料的抗弯强度和弯曲模量则略有提高, 增幅约为 2.5%。试样在受到弯曲载荷作用时, 光纤处在压头正下方中性层位置附近, 同时受压缩和拉伸两种载荷作用。从拉伸强度上来比较, 所选用的光纤强度要远高于树脂基体强度。因此, 位于树脂富集区内的光纤起到增强功能, 阻碍树脂基体裂纹扩展, 所以强度反而有所提高。

在弯曲模量的试验结果中, 除沿  $90^\circ$  嵌入单根光纤 OF1WID 试验组外, 含有光纤的试验组在弯曲模量上均有一定程度损失。另一方面, 光纤作为异物嵌入层合板会引入初始损伤, 这种损伤的严重程度与光纤的数量、直径均有直接关系, 表现为光纤数量越多, 引入的初始损伤越大。因此, 光纤嵌入的数量、方向对试样弯曲性能的影响需要综合考虑其增益和损伤。

### 3 结论

(1) 光纤与碳纤维层合板合成工艺中, 容易引起光纤涂覆层脱落, 进而极大程度地影响光纤的传感性能。选择聚四氟乙烯管对光纤出口端进行保护, 能够有效提高光纤传感器的鲁棒性和耐久性。

(2) 光纤嵌入数量增加时, 碳纤维层合板的抗弯强度将有所降低, 抗弯强度的最大损失约为 8.5%, 弯曲模量的最大损失约为 14.3%; 嵌入数量能较为明显地影响到碳纤维层合板的抗弯强度和弯曲模量, 因此, 在光纤传感器应用过程中应尽量减少光纤的嵌入数量, 尽可能提高单根光纤上各个光栅的传感特性。

(3) 当光纤沿  $0^\circ$  (平行于纤维方向) 嵌入层合板内部时, 对碳纤维层合板内部微观形貌的影响很

小, 光纤挤入相邻纤维铺层中, 初始损伤较小; 光纤沿  $90^\circ$  (垂直于纤维方向) 嵌入层合板时, 光纤周围形成树脂富集区, 弯曲失效特征以中性层局部断裂为主, 基本未出现分层情况, 界面结合良好且能够起到一定的增强相效果。

### 参考文献:

- [1] Beckwith Scott W. Aerospace composites at automotive efficiencies [J]. Sampe Journal, 2015, 51 (5): 5-5.
- [2] Ashok Kumar Ilanko, Srinivasan Vijayaraghavan. Wear behavior of asbestos-free eco-friendly composites for automobile brake materials [J]. Friction, 2016, 4 (2): 144-152.
- [3] 蒋星宇, 王洁琼, 邱琳琳, 等. 碳纤维材料在能源领域的应用 [J]. 材料导报, 2021, 35 (S2): 470-478.  
Jiang X Y, Wang J Q, Qiu L L, et al. Application of carbon-based fiber materials in the field of energy [J]. Material Guide, 2021, 35 (S2): 470-478.
- [4] 王成雨, 彭晓博, 杨杰. 碳纤维复合材料轨道车辆结构的设计分析 [J]. 复合材料科学与工程, 2021, (10): 67-73, 82.  
Wang C Y, Peng X B, Yang J. Design and analysis of carbon fiber composite rail vehicle structure [J]. Composite Science and Engineering, 2021, (10): 67-73, 82.
- [5] Jones R M. Mechanics of Composite Materials [M]. State of Florida: CRC Press, 2018.
- [6] Balageas Daniel, Fritzen Claus Peter, Güemes Alfredo. Structural Health Monitoring [M]. London: ISTE, 2006.
- [7] Achenbach J D. Structural health monitoring-What is the prescription [J]. Mechanics Research Communications, 2008, 36 (2): 137-142.
- [8] Shivakumar K. Mechanics of failure of composite laminates with an embedded fiber optic sensor [J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38 (8): 669-680.
- [9] Sahir Masmoudi, Abderrahim Mahi, Saïd Turki. Effect of piezoelectric implant on the structural integrity of composite laminates subjected to tensile loads [J]. Applied Composite Materials, 2017, 24 (1): 39-54.



- [10] Hadzic R, John S, Herszberg I. Structural integrity analysis of embedded optical fibers in composite structures [J]. Composite Structures, 1999, 47 (1/4): 759-766.
- [11] 谢怀勤, 董旭峰. 埋入光纤对 CFRP 抗弯性能影响试验研究 [J]. 材料科学与工艺, 2006, (1): 12-14.  
Xie H Q, Dong X F. Experimental study on the effect of embedded optical fiber on the bending properties of CFRP [J]. Materials Science and Technology, 2006, (1): 12-14.
- [12] 孟庆平, 孙维, 王亚龙, 等. 植入 FBG 的碳纤维复合材料全寿命周期结构状态研究 [J]. 宇航材料工艺, 2018, 48 (4): 46-50.  
Meng Q P, Sun W, Wang Y L, et al. Study on the whole life cycle structural state of carbon fiber composites implanted with FBG [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48 (4): 46-50.
- [13] 王海丰, 于野, 许现哲, 等. 车身碳纤维接头结构横向弯曲性能研究 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (1): 86-90, 111.  
Wang H F, Yu Y, Xu X Z, et al. Study on transverse bending properties of carbon fiber joint structure of car body [J]. Automotive Engineering, 2019, 41 (1): 86-90, 111.
- [14] 李晓勇, 王富强, 叶丽燕, 等. 飞机用铝合金弯管类接头折叠缺陷分析及预防 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 83-90.  
Li X Y, Wang F Q, Ye L Y, et al. Analysis and prevention on folding defect for aluminum alloy elbow joints of aircraft [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 83-90.
- [15] GB/T 1449—2005, 纤维增强塑料弯曲性能试验方法 [S].
- GB/T 1449—2005, Test method for bending properties of fiber reinforced plastics [S].
- [16] 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): 2485-2491.  
Gao L L, Wang Q L, Wang X X, et al. Protection technology of embedded fiber bragg grating sensor in fiber composite laminate [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33 (11): 2485-2491.
- [17] Sun G Y, Tong S W, Chen D D, et al. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 636-651.
- [18] Mehdi Kalantari, Dong C S, Davies I J. Numerical investigation of the hybridisation mechanism in fibre reinforced hybrid composites subjected to flexural load [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 102: 100-111.
- [19] 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]. 复合材料科学与工程, 2014, (7): 16-22.  
Liu G, Zhang B, Zhou Y J, et al. Mechanical properties and tensile strain monitoring of embedded fiber Bragg grating carbon fiber reinforced composite laminates [J]. Composites Science and Engineering, 2014, (7): 16-22.
- [20] Seo D C, Lee J J. Effect of embedded optical fiber sensors on transverse crack spacing of smart composite structures [J]. Composite Structures, 1995, 32 (1-4): 51-58.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •