

机敏复合材料内光纤植入技术的 实验研究*

杨建良 向 清 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

摘要 介绍了机敏复合材料内传感光纤植入技术的实验研究结果,包括复合材料及传感光纤阵列铺设方式、光纤的植入方案、埋置工艺、光纤内埋部分在热压时的保护、光纤的引出及引出时在材料边缘的保护方法等。

关键词 光纤传感器,机敏复合材料,植入技术

1 引 言

在航空航天领域,集结构与功能于一体的光纤机敏复合材料的研究引起人们极大的关注^[1]。这种在复合材料与结构的关键部位埋入传感光纤而形成的新型材料系统,不仅保持了原有先进复合材料的特性,还增加了智能化功能,如对构件在飞行过程中的内、外部受力与损伤或环境变化的自检测功能,在自检测和自感知的基础上结合内、外接信号处理单元与控制执行单元实行自决策功能,对裂纹扩张的自抑制、损伤的自愈合、自行调节构件形状与刚度实现高速飞行状态下的自减振和自降噪等,从而大大提高了飞机飞行的安全可靠。目前该技术中光纤在基质复合材料中的植入技术仍是未完全解决的一大难题。本文对复合材料内光纤植入技术进行了详细的实验研究,成功地在教-11 飞机的碳纤维/环氧垂直尾翼试件内植入了两种光纤传感网络。

2 植入基质复合材料中的光纤传感原理

对于象飞机尾翼这样大型的复合材料结构,为全面监测其整体状况,不能采用单个传感器而要用阵列;为降低成本及简化测量与信号处理,传感单元不宜采用干涉或相位型而最好用强度调制型。实验中我们选用了两种易于构成阵列网络的强度调制型光纤传感器:一种为自变形微弯传感器(图 1 与图 3),由平面内垂直两方向

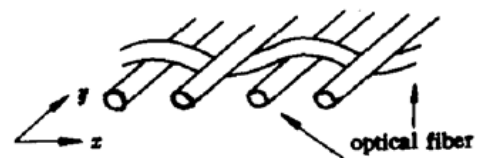


图 1 自变形微弯光纤传感器

Fig. 1 Self-deforming microbending optical fiber sensor

* 国防科技预研基金资助项目。

多模光纤相互交叉形成二维网络,交叉点处相当于微弯光纤传感器的锯齿或梳状变形器,在结构受力时,利用光纤本身受压时产生微形变导致光功率损耗来测量应力^[2]。第二种为刻纹光纤传感器(图 2)^[3],由氢氟酸对多模光纤包层刻蚀形成。其传感机理一是在外力作用下刻纹段与非刻纹段模体积不匹配造成传输光的功率损耗;二是光纤受轴向应力作用下的侧向弯曲导致传输光功率损耗(图 2 (b))。以上两类传感器结构简单、测量方便、且无需外加变形装置,但自变形微弯传感器的交叉点有可能在树脂基复合材料内形成树脂空洞,降低材料强度。

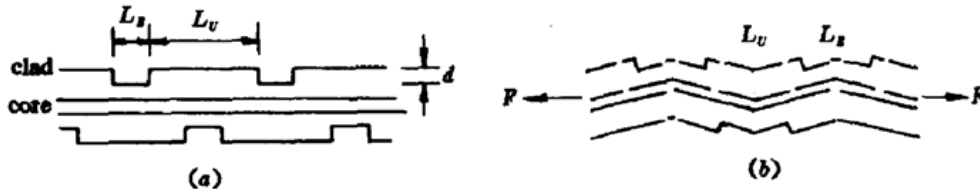


图 2 不对称刻纹光纤 (a) 及其在轴向应力作用下的侧向弯曲 (b)

Fig. 2 Asymmetric etched fiber (a) and its lateral bending induced by axial stress (b)

3 复合材料内两种光纤传感阵列的植入方案

教-11 机垂直尾翼由 24 层单向无纬碳纤维层合材料多向叠合而成,光纤及材料的铺设方式为:将预浸了环氧树脂的碳纤维无纬布按顺序铺设,同时在预计叠层间按预定方案铺设光纤,两端留出部分光纤(>50 mm)引出材料外以便以后连接光源与探测器,然后将铺设好的内

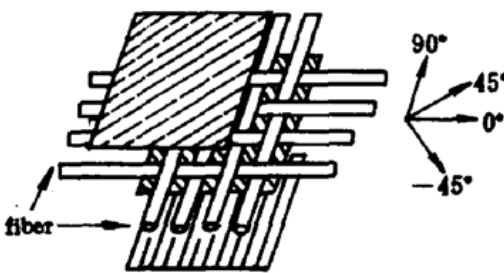


图 3 植入复合材料中的二维自变形微弯光纤传感阵列

Fig. 3 Self-deforming microbending fiberoptic sensor array embedded in composites

埋有光纤的复合材料送固化炉热压固化。自变形微弯传感器植入教-11 机复合材料垂尾内形成传感阵列见图 3,埋置方式为 $[0^\circ/+45^\circ/F_{0^\circ,90^\circ}/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ]$,在分层复合材料的 2,3 层间埋置有二维自变形微弯传感阵列(其中 F 表示光纤,其下标表示埋置方向,图 3 只画出埋置了光纤的 2,3,4 层,其它层被省略)。光纤的最佳布局原则是^[1]:正交地夹在两个其增强纤维方向平行的面之间,当两个面的纤维不平行时,光纤

平分两个面上纤维之间的最大夹角,且靠近受力最大的表面。因此阵列埋入靠近表面的 2,3 层间;又由于 2,3 层内增强纤维分别为 $\pm 45^\circ$,因此光纤阵列埋置方位分别为 0° 与 90° ,正好平分 2,3 层两个面上纤维之间的夹角。

植入飞机复合材料垂尾内的三维刻纹光纤传感阵列见图 4,其埋置方式为 $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/F_{0^\circ}/90^\circ/F_{45^\circ}/0^\circ/F_{90^\circ}/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ (光纤沿 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三方向排列,是用于监测材料内纵向、剪切与横向应力或损伤)。三层光纤分别埋置于相邻两层(3 与 4,4 与 5,5 与 6)材料间,可避免在同一层中光纤交叉凸起,形成树脂空洞。光纤埋置同样遵循前叙最佳原则。该阵列不但可依前述传感原理测量材料内应力与应变,还可用作材料或结构内损伤探测。如图 4,若输出端光纤 1 与 8(或 11)无光输出,则基本可断定光纤 1 与 8 交叉处 C 附近材料存在裂纹。另外,(1) 刻纹光纤表面凹凸不平,可加强与基质材料的粘结力;(2) 相应于不同材料或结构,调节刻蚀时间,

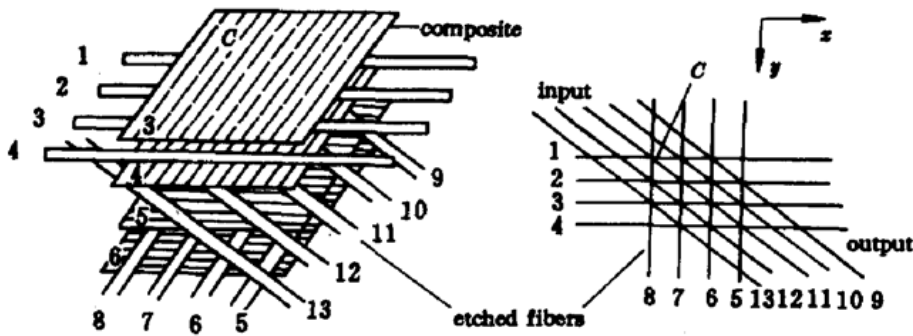


图 4 植入复合材料内的三维刻纹光纤传感阵列

Fig. 4 Etched optical fiber sensor array in a smart composite material

控制光纤刻蚀深度,可方便地改变光纤的断裂阈值,保证光纤先于或同时与材料发生断裂,提高了探测灵敏度。

4 复合材料内光纤传感阵列的植入技术

4.1 光纤内埋部分的处理及其保护

在复合材料内植入光纤,有两点是非常重要的:一是要尽量减小对材料原有机械性能的影响;二是植入工艺与方案要尽量使光纤的传感灵敏度达最大。为此我们在以下几方面进行了实验研究。

4.1.1 光纤与复合材料的相容性

包括光纤直径与材料内碳增强纤维直径的相容性;光纤及涂敷材料(强度及模量)与基体材料及碳纤维的匹配等。光纤直径本来较大,加上涂敷层将是碳纤维直径的十倍以上,植入光纤会在材料中造成应力集中区,影响基体的完整性与连续性。为此我们在光纤的内埋部分均将涂敷层剥去,而引出材料部分则保留涂敷层以保持其机械强度。以后的实验还证明这样做的另一好处:植入裸光纤比保留涂敷层时的传感灵敏度高 10%左右,这可解释为应力传递过程中,涂敷层在光纤与材料间起了缓冲作用。埋入裸光纤的问题是易于断裂,为此自变形光纤间的间隔(变形齿距)不能太小。

4.1.2 光纤与碳增强纤维的夹角

该夹角对光纤灵敏度及由于植入光纤而引起的树脂富余区(树脂腔)的大小影响很大,当光纤与碳纤维平行时相容性最好,树脂腔最小,但基体损伤探测灵敏度最小;而垂直时灵敏度最高,但树脂腔最大;夹角为 45° 则介于两者之间。自变形阵列采用了 45° 方案,是因该阵列存在光纤之间 90° 交叉点,本身即可引起较大树脂腔,不得不牺牲灵敏度而减小光纤与碳纤维夹角,且图 3 中 x, y 两方向光纤与碳纤维夹角均为 45° ,保证了两方向光纤灵敏度的一致;刻纹光纤阵列 x, y 及 45° 三方向光纤分别埋入不同层板间,本身不会引起树脂腔,因此可追求最大灵敏度,故采用与碳纤维垂直的方案。而两阵列均铺设为网状,是因为在飞行中,飞机构件的受力原因极为复杂,内部应力及损伤的方向、大小与位置无法预测,而网状结构定位能力较好。

光纤植入过程中最大的困难在于怎样保护光纤内埋部分在热压固化过程中不受破坏(对于裸光纤及刻纹光纤尤其重要)。未采用保护措施时,自变形光纤完好率不到 70%,刻纹光纤完好率更在 50% 以下,经多次试验摸索,解决的方案是在光纤内埋的刻纹部分与内埋裸光纤

部分预涂一层薄薄的环氧树脂(也可涂硅橡胶),以增加光纤韧性既抗损伤能力。这样做的另一个好处是可使光纤固定于复合材料预浸层板上,防止复合材料铺设好后送固化炉固化前复合材料内光纤位置移动或走形,影响成型后传感阵列的传感精度与灵敏度。采用这样的措施后,自变形光纤完好率达到 90% 以上,刻纹光纤也有 85% 左右。

4.2 光纤接头引出技术及其保护

光纤引出接头起将光信号引出并耦合到检测器的作用,在铺设、加工、固化成型及使用中应特别注意。存在的主要问题为:一是在材料直角形边缘处的光纤引出接头在真空热压时易受折损坏;二是在复合材料热压成型时材料内环氧胶沿光纤流出,既污染光纤,又使其变脆易断。开始我们采用细金属针管作接头保护,但热压时仍有环氧胶流出,另外因光纤是植入 24 层层压布的某一层或几层内,光纤引出接头离上下表面有一定距离,不同层引出头之间也有一定距

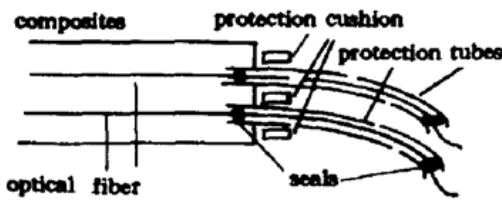


图 5 内埋光纤的引出及其保护

Fig. 5 The lead-out and protection of the embedded optical fiber

离,金属保护套在真空高压环境下向下翘曲,易在内外接口处折断光纤。经多次试验摸索,我们的解决方案是(图 5): (1) 在材料边缘处给光纤套上内径与光纤直径相同的四氟乙烯毛细管作光纤接头保护; (2) 为避免热压时材料内环氧胶沿光纤流出,在四氟乙烯管内外端口加耐高温腻子条密封(原来用高温喷灯加热熔化护管密封,但同时也熔化了光纤涂敷层

使光纤易损),而在保护管内外两端口均加密封条的原因是单端密封条易在抽真空时被抽走; (3) 采用热熔橡胶作成台阶状保护垫,置于光纤引出头与上下表面间及不同层光纤引出头之间,在加热加压固化时,复合材料层压板厚度会变化,而热熔橡胶衬垫也会被受压及热熔压缩,两者厚度变化一致,可保护光纤接头在真空热压时不会翘曲及受折损坏。

实践证明,以上各种措施非常有效,我们在教-11 机垂尾中成功地植入了上述两种光纤阵列(还包括植入了单模光纤及各种刻纹数目、深度、周期的刻纹光纤于不同角度或不同层板间形成的试件共 6 块)。光纤完好率均在 94% 以上。

5 植入光纤阵列复合材料试件的力学测试结果

植入自变形微弯光纤阵列的碳纤维/环氧复合材料试件(教-11 机垂尾的一部分)的大小为 $200 \times 200 \times 3.3$ (mm),在板中心处 $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 的面积内,埋入了 4×4 正交编织的多模光纤($62.5/125 \mu\text{m}$)阵列(图 3)。植入刻纹光纤阵列的试件大小为 $200 \times 200 \times 3.3$ (mm),在板中心处 $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 的面积内,埋入了 $4(0^\circ) \times 5(45^\circ) \times 4(90^\circ)$ 的刻纹光纤阵列(图 4, x, y 方向光纤间距皆为 50 mm),采用了 $62.5/125 \mu\text{m}$ 的多模光纤,其刻蚀时间为 15 min(刻蚀深度为 $25.5 \mu\text{m}$),刻纹数目为 60,其刻纹宽度与周期分别为 0.5 mm 与 1.5 mm。为检测植入光纤对材料机械性能的影响和内埋光纤对材料内应变、应力探测的可行性及其灵敏度,我们对植入了以上两类光纤阵列的复合材料试件进行相关力学实验,结果令人满意。

5.1 植入光纤阵列对复合材料机械性能的影响

为检测植入光纤对材料机械性能的影响程度,对植入光纤前后的复合材料试件进行了拉伸强度实验,结果见表 1(表中只列出了有代表性的、对材料性能影响较大的自变形光纤阵列),表 1 显示:植入光纤对复合材料机械性能有一定影响,但影响程度不大,其纵横向拉伸强

度均下降不到 2%。

表 1 植入光纤对复合材料机械性能的影响

Table 1 The effects of embedding fibers on mechanical property of composite materials

	longitudinal (0°) tensile strength/MPa	transverse (90°) tensile strength/MPa
no optical fibers	131	86
embedding self-deforming fiberoptic sensor array	128.8	84.8

另外,将植入了以上两类光纤阵列的复合材料试件拉伸到产生分层破坏后进行检查,发现材料内外部均有分层,但均没发生在埋置有光纤的层压板之间,因而没有证据说明植入光纤会对复合材料的抗分层能力产生明显影响。

5.2 内埋光纤对材料内应变、应力探测实验

为检测内埋光纤对材料内应变、应力探测的可行性及其灵敏度,对植入了以上两类光纤阵列的复合材料试件进行了拉伸(分别对 x 与 y 两方向)与三点弯曲实验,以及将试件顶部平面向上并固定四边后,对试件的每一个光纤交叉点处垂直于试件平面施加法向压力等,同时用试件中心处外贴的电阻应变片检测试件应变与内埋光纤阵列中光功率变化的关系。实验显示:(1) 光纤中光功率的变化只与试件中平行于光纤轴向的应变有关,垂直于光纤轴向的应变(应力)对光纤中光功率没有明显的影响;(2) 当平行于光纤轴向施力于结构上时,光功率损耗与施力大小基本成正比,且变化明显,当外力导致施力点处应变达 $4000 \mu\text{s}$ 时,对刻纹光纤阵列,经过该点的光纤中光功率已下降了 28%;对自变形微弯光纤阵列,经过该点的光纤中光功率已下降了 10%左右,而逐渐撤除外力、应变恢复到零时,光功率损耗也线性地恢复到零点。即两类光纤阵列均无迟滞现象、重复性好、灵敏度高(刻纹光纤阵列较自变形微弯光纤阵列灵敏度要高),表明了内埋光纤对材料内应变、应力或损伤探测的可行性。

致谢 感谢南昌飞机制造公司六车间及 650 所复合材料室全体员工的大力支持与合作。

参 考 文 献

- 1 R. M. Measure. Advances toward fiber optic based smart structures. *Optic Engineering*, 1992, 31(1): 34~47
- 2 Tu Yaqing, Chen Weimin, Tang Jun *et al.*. Preliminary search on a novel optic fiber sensing array quasi-distributing force over a area. *Journal of Transduction Technology* (传感技术学报), 1994, 7(4): 34~36 (in Chinese)
- 3 Yang Jianliang, Xiang Qing, Huang Dexiu. Optical fiber sensor array in smart material and structure and its neural network processing. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, A24(4): 370~374 (in Chinese)

Experimental Study of Embedding Optical Fibers into Smart Composite Materials

Yang Jianliang Xiang Qing Huang Dexiu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The experimental study of embedding optical fibers into smart composite materials is presented in this paper. This technology includes the stacking method of composite lamination, the technique of embedding optical fibers, the protection of embedded optical fibers in heating and pressurizing processes, the lead-out method of embedded fibers and the protection of the fibers in the edges of composites structure when the optical fibers are led out from the host materials.

Key words fiberoptic sensor, smart composite material, embedding technique