

文章编号: 0258-7025(2009)02-0387-04

# 单丝拔出法在光纤智能复合材料界面研究中的应用

刘荣梅 梁大开

(南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 采用单丝纤维拔出法研究光纤智能复合材料中光纤与基体之间界面的剪切强度。为了测量光纤拔出拉伸力, 设计了小量程的力传感器, 该传感器设计灵敏度为 1.91 mV/V, 标定结果表明其测试结果不受载荷作用位置的影响。单丝拔出试验研究发现无论光纤埋入长度多短, 光纤单丝拔出试验过程中, 在埋入端附近总是发生涂敷层破坏, 埋入基体部分断在其内部, 而纤芯(包括包层)从残留在基体内的涂敷层中拔脱出来的现象。有限元分析结果表明, 光纤埋入基体中, 埋入的涂敷层在基体材料端面附近会出现应力集中, 且埋入长度越短, 应力集中程度越大。采用单丝拔出法无法得到光纤与基体结构之间的界面剪切强度值, 但试验现象表明, 光纤涂敷层与树脂之间是浸润的。

**关键词** 光纤光学; 智能复合材料; 界面; 单丝拔出法; 光纤; 传感器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0387

## Interface Study of Smart Composite Material with Optical Fiber by Single-Fiber Pull-Out Test

Liu Rongmei Liang Dakai

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Interface forms between the embedded fiber and the composite. Cracks at the interface can initiate final damage. Therefore, the study of the interface between the embedded optical fiber and the matrix is of crucial importance. Single-fiber pull-out test was designed and used to study the formed interface. The value of the interfacial shear strength can be obtained by two ways. Studying the relationship between the embedded length of fiber and pull out force is one way. The other way is to find the critical length  $L_c$ , at which the fiber was broken instead of being pulled out. A low-range transducer was designed to precisely capture the magnitude of the pulling force. The force transducer was calibrated. It was shown that the output of force transducer was uninfluenced by the load position. The sensitivity of the transducer was 1.91 mV/V. Single-optical-fiber pull-out test results revealed that the coating of the fiber was broken at the boundary between embedded and bare parts, no matter how short it was embedded in the resin. The core and the clad of the optical fiber were pulled out from the coating, which was left inside the resin. Finite element analysis indicated that there was a region of stress concentration near the boundary at the coat. The shorter the embedded length was, the more intense the concentration was. However, the tests indicate that the coating of the optical fiber and the resin are in good imbibitions.

**Key words** fiber optics; smart composite material; interface; single-fiber pull-out test; optical fiber; sensor

## 1 引言

由于抗电磁干扰能力强、灵敏度高、体积小便于与其它材料复合成型等特点, 光纤常被埋入到其它材料中构成光纤智能材料与结构<sup>[1]</sup>, 或称为光纤智能复合材料。光纤智能复合材料可用于工程结构中的应力、应变<sup>[2]</sup>、裂缝<sup>[3]</sup>等结构参数的实时在线监测, 实现对工程结构内多目标信息的监控和提取。例如在复合材料的成型工艺过程监测及其服役期间的“健康监

测”方面<sup>[4]</sup>, 光纤智能复合材料已得到广泛应用<sup>[5,6]</sup>。

光纤智能复合材料中的光纤不仅起感知内外部环境变化<sup>[7]</sup>, 实现自诊断<sup>[8]</sup>、自适应、自修复等功能的作用, 同时还要承受载荷, 所以必须考虑光纤埋入对结构强度的影响。目前, 越来越多的科学家开始重视研究埋入的光纤与基体结构之间力学性能的相互影响<sup>[9,10]</sup>。根据材料学知识, 埋入的光纤与基体之间会形成的界面, 该界面会对结构的性能产生影

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60535020)资助课题。

作者简介: 刘荣梅(1975—), 女, 讲师, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: romme@nuaa.edu.cn

响,如界面裂纹会引起整个结构的破坏,因此光纤智能复合材料中,光纤和基体结构之间形成的界面的研究至关重要。

界面研究的方法包括宏观和微观的实验方法。宏观实验方法很多,如 Ioscpescu 剪切测试<sup>[11]</sup>和横向(或 45°)拉伸<sup>[12]</sup>等,这类实验都间接分析界面应力,有时很难从实验结果中得到正确的界面特性。为了克服问题,往往采用微观实验法,如单丝纤维拔出法<sup>[13]</sup>、临界断裂长度法<sup>[14]</sup>等。

为了获取光纤与基体结构之间形成的界面剪切强度值,采用单丝拔出法,对光纤智能复合材料的界面进行研究。

## 2 单丝拔出法简介

将单丝垂直地埋入基体中,固化后将单丝从基体中拔出,测定纤维拔出所需的拉力,从而可得到界面剪切强度。

设纤维的埋入深度为  $L$ (如图 1 所示),拔出纤维的力为  $F$ ,界面剪切力阻碍纤维被拔出。平衡时有

$$F = \sigma\pi r^2 = 2\pi rL\tau, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为对单丝施加的应力, $\tau$  为界面平均剪切强度, $r$  为单丝的半径。

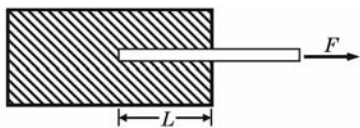


图 1 单丝拔出试验示意图

Fig. 1 Schematic of single-fiber pull-out test

显然,纤维拔出力随埋入深度的增加而增加。当埋入长度达到临界长度  $L_c$  时,拔出纤维所需的应力超过纤维的拉伸强度,纤维断裂而不是被拔出。因此可由纤维的拉伸强度  $\sigma_{\max}$  求出界面剪切强度

$$\tau = \sigma_{\max} r / (2L_c), \quad (2)$$

式中  $L_c$  为单丝从基体拔出的临界长度。由(1)式和(2)式可知,计算分析光纤与基体结构之间界面的剪切强度方法有两种:一种方法是测量光纤拔出力  $F$  和埋入长度  $L$ ,由(1)式计算  $\tau$ ;另一种方法是测量光纤埋入基体中的临界长度  $L_c$ ,由(2)式计算得到界面剪切强度  $\tau$ 。

## 3 光纤拉力测量传感器的研究设计

采用第一种方法测量光纤与基体之间界面的剪切强度,需测量光纤从基体中拔出的力,该载荷的数值很小。为了精确测量该载荷,必须设计小量程的力传感器。考虑到载荷的大小及传感器与光纤的连

接问题,设计了双梁双孔反 C 型梁式力传感器(如图 2 所示)。

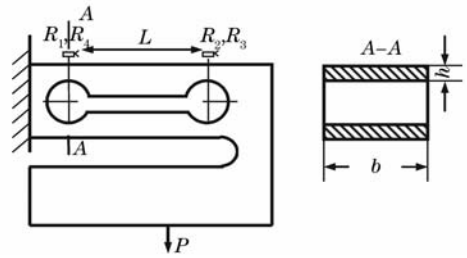


图 2 力传感器示意图

Fig. 2 Schematic of mechanical force transducer

该力传感器可简化成如图 3 所示的模型,载荷  $P$  简化为作用在弹性元件端部的一个力  $P$  和一个力偶  $M$ 。

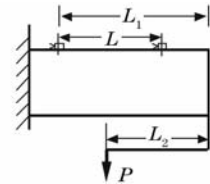


图 3 力传感器受力简化

Fig. 3 Simplify of force transducer

传感器上 4 个应变片贴片位置如图 4 所示,组成全桥电路(其中应变片 1 和 4 以及 2 和 3 分别对接),连接到应变读数仪。

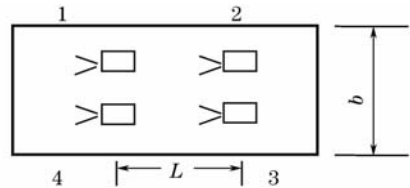


图 4 应变片贴片位置示意图

Fig. 4 Strain gauge distribution

根据桥路原理,则应变仪读数  $\epsilon_d$  计算公式为

$$\epsilon_d = PL / (EW), \quad (3)$$

式中  $E$  为传感器材料弹性模量, $W$  为传感器截面抗弯截面系数, $P$  为拉伸载荷值, $L$  为应变片 1 和 2(或应变片 3 和 4)间距离。

传感器灵敏度  $S_i$  可用(4)式计算:

$$S_i = \frac{K\epsilon_d}{4} = \frac{3KPL}{2Eb^2}, \quad (4)$$

式中  $K$  为应变片的灵敏系数,通常值为 2。假设测量载荷最大为 100 N,选用铝作为传感器材料,则设计传感器的灵敏度为 1.91 mV/V。由(4)式可见,该传感器的灵敏度只与应变片之间的距离  $L$  有关,而与拉伸载荷作用位置无关。

选取 2 级精度的 200 g 砝码对设计的传感器进

行标定,首先改变砝码放置位置,应变仪读数始终为 2。按照传感器标定方法,可得到该传感器静态标定曲线,如图 5 所示。

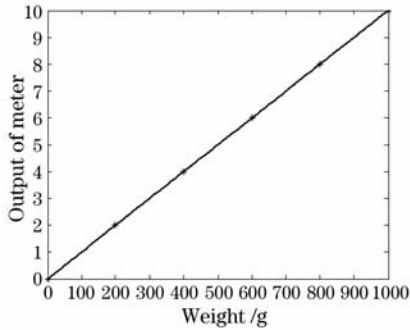


图 5 传感器静态标定曲线

Fig. 5 Calibration of force transducer

通过实验分析可以发现,该传感器的输出结果不受载荷作用位置的影响。

## 4 光纤与基体结构界面研究分析

### 4.1 试验准备

根据材料表面学<sup>[9]</sup>,采用单丝拔出法研究光纤与基体之间形成的界面。

在 110 mm × 10 mm × 4 mm 的凹槽内侧四周涂满硅脂脱模剂后,缓慢将配好的 E51 环氧树脂倒入槽内,并将光纤一端埋入树脂内,如图 6 所示,待树脂固化后进行单丝拔出试验。由于凹槽尺寸远远大于光纤尺寸,并且槽内侧四周涂上脱模剂,在边界条件上可认为该装置可以保证试样满足单丝拔出试验条件。

### 4.2 试验过程及分析

在环氧树脂中埋入不同长度的光纤,固化后进行单丝拔出试验,若通过试验能确定单丝拔出的临界长度  $L_c$ ,在光纤的拉伸强度已知的前提下,由(2)式可以得出界面剪切强度。

无论光纤埋入的长度多短,在光纤单丝拔出试验过程中,总是出现光纤的纤芯(包括包层)从涂敷



图 6 单丝拔出法研究光纤与基体之间的界面

Fig. 6 Single fiber pull-out test setup for studying interface between the optical fiber and the resin

层中拔脱出来,而其涂敷层发生破坏,埋入基体部分断在基体内部的现象,图 7 为拔出后的光纤在 250 倍的显微镜下的照片。从图 7 可见,涂敷层的破坏不是沿其横截面发生的。



图 7 拔出后的光纤

Fig. 7 Optical fiber after pulled out from the resin

### 4.3 有限元计算分析

光纤单丝拔出试验过程中,并未出现光纤直接从基体中拔出,却出现光纤涂敷层在锚入的根部被拔断,而光纤其余部分从残留在基体内的涂敷层中拔脱。为了对光纤埋入基体中的力学行为有进一步了解,采用有限元软件对光纤埋入基体后的单丝拉伸进行模拟分析。

光纤结构如图 8 所示,由纤芯、包层和涂敷层组成,其中纤芯和包层材料相同,采用极小的掺杂用来调整折射率,实现光在纤芯内的全反射。涂敷层一般为塑料,对光纤起机械保护作用。建模时,将纤芯和包层作为一个整体,研究树脂、涂敷层和纤芯在光纤单丝拉伸时的应力分布情况。

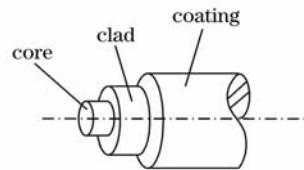


图 8 光纤截面示意图

Fig. 8 Cross section of an optical fiber

光纤埋入基体中长度为 0.3 mm 时,在光纤上施加 100 MPa 的拉伸应力,各部分的正应力分布如图 9 所示。从图 9 中可见,光纤埋入基体中,埋入的涂敷层在基体材料端面附近会出现应力集中现象,其正应力的数值可达到 131 MPa。

改变光纤在基体中埋入的长度,可得到各部分不同的应力分布情况。有限元分析表明,应力集中均发生在基体材料端面附近的涂敷层上。

表 1 为不同埋入长度下,涂敷层上最大正应力的数值,该数值都是在拉伸应力为 100 MPa 的情况下得到的。比较表 1 中数据,可发现埋入长度越短,应力集中程度越大。

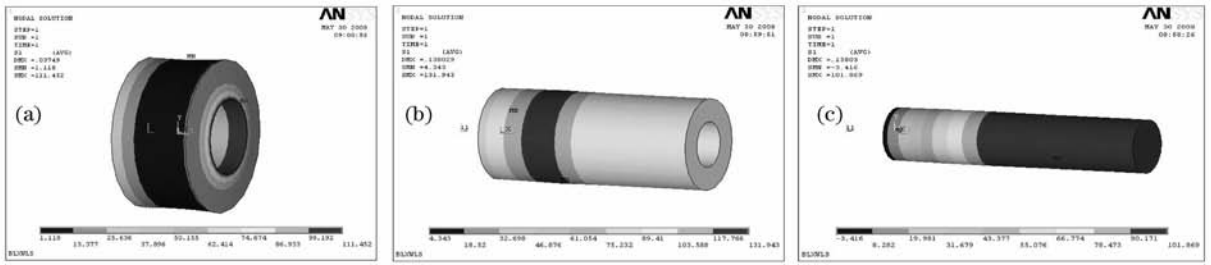


图9 (a) 基体部分的正应力分布情况; (b) 光纤涂敷层上的正应力分布; (c) 纤芯(包层)部分的正应力分布

Fig. 9 (a) Normal stress distribution at the resin; (b) normal stress distribution at the coating; (c) normal stress distribution at the core and the clad

表1 不同埋入长度下涂敷层上最大正应力

Table 1 Maximum normal stress on coating with different embedded length

$L/\text{mm}$	0.5	0.4	0.3	0.25
$\sigma/\text{MPa}$	112.905	127.137	131.943	150.167

## 5 结 论

根据材料学知识,采用单丝拔出实验方法研究智能复合材料中光纤与基体结构形成的界面。可通过测量光纤埋入基体的临界长度  $L_c$ ,或通过分析光纤拔出拉伸力随埋入长度的变化,计算界面的剪切强度。然而大量反复试验表明,无论光纤埋入基体中的长度多短,单丝拔出试验时,总出现光纤涂敷层在根部被拔断,纤芯和包层从残留在基体中的涂敷层拔脱的现象。

有限元分析结果表明,光纤埋入后,埋入基体材料中的涂敷层在锚入端出现应力集中,且在同样大小的拉力作用下,埋入的光纤越短,应力集中越严重。

由于光纤结构的特殊性,采用单丝拔出法,得不到光纤与基体之间界面剪切强度的数值。需另寻合适的方法来研究光纤与基体之间的界面的剪切强度。

尽管单丝拔出法未能得到光纤与基体材料之间界面的剪切强度,但根据实验现象,可以得到结论:将光纤埋入复合材料中,带有涂敷层的光纤和树脂之间是浸润的,这对整体结构的强度是有利的。

为测量光纤拉伸力,设计了小量程高精度的力传感器。根据分析,无论光纤在什么位置,都不影响传感器的输出结果。该传感器的设计原理简单,可应用于其它小量程力传感器的设计。

## 参 考 文 献

- Li Dongsheng, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Experimental study of fiber grating smart layer system based on Fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1166~1170  
李东升,梁大开,潘晓文. 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层试验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1166~1170
- Li Hongnan, Zhou Guangdong, Ren Liang. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress[J]. *Acta Optica Sinica*,

2007, **27**(5): 787~793

李宏男,周广东,任亮. 非轴向力下埋入式光纤传感应变传递分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 787~793

- C. K. Y. Leung, Zhenglin Yang, Ying Xu *et al.*. Delamination detection in laminate composites with an embedded fiber optical interferometric sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **119**(2): 336~344
- Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined Long-Period fiber grating/Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888  
廖弦,饶云江,冉曾令等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 884~888
- R. de Oliveira, C. A. Ramos, A. T. Marques. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors [J]. *Computers & Structures*, 2008, **86**(3~5): 340~346
- Zhang Boming, Wang Dianfu, Du Shanyi *et al.*. Investigation of multi-functional fiber optic smart composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, **17**(1): 37~41  
张博明,王殿富,杜善义等. 多功能光纤智能复合材料研究[J]. *复合材料学报*, 2000, **17**(1): 37~41
- Zeng Jie, Liang Dakai, Du Yan *et al.*. Quasi-distributed optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 243~248  
曾捷,梁大开,杜艳等. 准分布式光纤表面等离子体波传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 243~248
- Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 779~782  
张锦龙,余重秀,王葵如等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 779~782
- Yang Hong, Sun Xiaohan, Zhang Mingde *et al.*. The performance research on hollow center optical fiber network embedded in composite materials [J]. *Chinese J. Applied Mechanics*, 2001, **18**(4): 134~140  
杨红,孙晓嵩,张明德等. 空心光纤网络埋入复合材料中性能影响的研究[J]. *应用力学学报*, 2001, **18**(4): 134~140
- K. Schaaf, B. Cook, F. Ghezzi *et al.*. Mechanical properties of composite materials with integrated embedded sensor networks [C]. *SPIE*, 2005, **5765**: 781~785
- Lara-Curzio Edgar, Bowers David, Ferber Mattison K. The interlaminar tensile and shear behavior of a unidirectional C-C composite[J]. *J. Nuclear Materials*, 1996, **230**(3): 226~232
- M. Steen, J. L. Vallés. Interfacial bond conditions and stress distribution in a two-dimensionally reinforced brittle-matrix composite [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, **58**(3~4): 313~330
- S. Nuriel, A. Katz, H. D. Wagner. Measuring fiber-matrix interfacial adhesion by means of a 'drag-out' micromechanical test [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, **36**(1): 33~37
- A. Kelly, W. R. Tyson. Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum[J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 1965, **13**: 329~350