

## 石英光纤与树脂界面剪切强度实验研究

刘荣梅 梁大开

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

**摘要:** 为了克服无法精确控制光纤埋入长度和埋入方向等缺点,重新设计了光纤单丝拔出实验。有限元计算结果表明,新旧方法下,光纤各部分剪切应力的分布规律相同,且各相应应力数值误差不超过5%。根据原理设计了纤维穿透基体的光纤拔出实验模具,并进行了普通单模光纤以及碳涂层单模光纤与基体材料间界面剪切强度实验研究。光纤单丝拔出实验现象表明,光纤涂层与内部包覆层间界面平均剪切强度较低,因该强度值与光纤周围的基体材料上承受的沿光纤轴向的正应力相关,若将光纤埋入到复合材料中去,轴向载荷不宜过大,否则会出现光纤涂层和包覆层之间界面剪切剥离,产生裂纹,从而降低整体结构的力学性能。

**关键词:** 光纤;智能材料;界面

**中图分类号:** TB301

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2010)06-0758-06

## Interfacial Shear Strength Between Optical Fiber and Resin

Liu Rongmei, Liang Dakai

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

**Abstract:** To control the length and the direction of the embedded fiber, the optical fiber pull-out test is re-designed. According to finite element results, the shear stress distributions on fiber parts during the new designed test are accordance with that of the former ones. The maximum experimental error for corresponding stress is less than 5%. Therefore, a new model with fiber penetrating matrix is designed. Tests are carried out to study the interfacial shear strength between the embedded optical fiber and the matrix. Two kinds of optical fibers, normal single mode fiber and c-coated one, are studied. Fiber pull-out test results show that the mean interfacial shear strength between the coating and the clad is weaker. Since the interfacial shear stress between the coat and the clad is related to the normal stress of the matrix around the embedded optical fiber, the applied normal load on smart composite is limited. Otherwise, once the material is overloaded, flaws are appeared between the coating and the clad of the optical fiber. It decreases the mechanical performance of the formed intelligent structure.

**Key words:** optical fibers; smart material; interface

20世纪70年代,美国的R. O. Clause等人将光纤埋入聚合物基碳纤维复合材料中,使材料具有感知应力和断裂损伤的能力,并称之为自适应材料。该实验同时也被认为是智能复合材料的首次实验。

光纤智能复合材料既能发挥复合材料的优异

性能,又可以对材料结构的应力<sup>[1]</sup>、应变<sup>[2]</sup>、损伤状态<sup>[3]</sup>等进行长期实时在线监测,因此光纤智能复合材料在工程上应用越来越广泛<sup>[4-5]</sup>。

光纤埋入复合材料后,与基体材料之间会形成界面,该界面会对结构的性能产生影响<sup>[6-7]</sup>。因此智

基金项目:国家自然科学基金(60907038)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2008388)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(NS2010012)资助项目。

收稿日期:2010-01-15;修订日期:2010-06-12

作者简介:刘荣梅,女,讲师,1975年1月生,E-mail:romme@nuaa.edu.cn。

能复合材料中,光纤和基体结构之间形成的界面的性能研究至关重要。

为了获取光纤与基体结构之间形成的界面剪切强度值,采用微观实验方法,对光纤与基体间的界面进行研究。界面主要形成在光纤与基体之间,因此设计实验研究光纤与基体之间界面剪切强度。

## 1 实验方法简介

试验研究采用改进后的单丝拔出法研究光纤与基体材料形成的界面。

单丝拔出法采用将单丝埋入基体当中(如图1),固化后将单丝沿轴向从基体中拔出,测定纤维拔出所需的拉力,从而计算得到界面剪切强度。

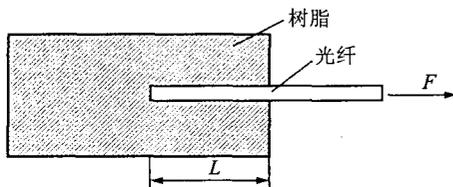


图1 单丝拔出试验示意图

假设界面上剪切应力均匀分布,根据力学平衡关系<sup>[8]</sup>,纤维与基体间界面剪切强度满足计算公式

$$\tau = \frac{\sigma_f r}{2L_c} \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为界面平均剪切强度; $r$ 为单丝的半径; $\sigma_f$ 为纤维的拉伸强度; $L_c$ 为单丝纤维刚好被拔出而不是断裂在基体内部的临界埋入长度。

采用该方法研究光纤与基体材料之间的界面,存在如下问题:(1)必须要做大量试验,以找到临界长度 $L_c$ ;(2)精确控制光纤埋入长度是降低实验误差的主要因素之一;(3)保证纤维埋入平直而无弯曲,同时保证光纤埋入沿轴线方向,从而保证光纤拔出时拉力沿轴线;(4)采用该方法研究界面,首先对纤维自身拉伸强度值有所了解。

为了控制光纤埋入基体中长度,保证光纤沿轴向受拉,采用改进后的试验方法研究光纤与基体间界面,实验原理如图2所示。

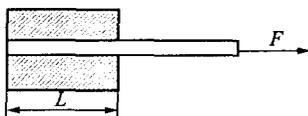


图2 改进后的单丝拔出示意图

根据实验原理制作光纤单丝拔出装置,如图3所示。将光纤埋入时,垂直穿透图3中凹槽,则光纤埋入深度为凹槽长度 $L$ ,可通过改变槽的长度尺寸

达到改变光纤埋入长度的目的。模具上的狭缝用于光纤埋入方向定位。在模具内侧涂上硅油脱模剂,以减少模具对基体的作用力,从而降低摩擦力等因素对光纤单丝拔出力影响。

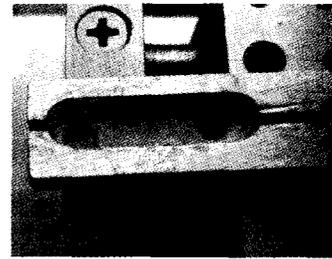


图3 单丝拔出装置

基体材料填充到直径为 $L$ 的槽内,则光纤埋入深度为 $L$ 。基体固化后进行光纤单丝拔出试验,界面剪切力阻碍光纤被拔出。假设界面上剪切应力均匀分布,则光纤拔出力 $F$ 和界面平均剪切强度 $\tau$ 之间满足

$$F = \pi d L \tau \quad (2)$$

式中 $d$ 为光纤直径。

由式(2)可通过测量光纤拔出力 $F$ 和埋入长度 $L$ 之间的关系,研究光纤与基体结构之间形成的界面剪切强度。

## 2 两种实验方法计算结果对比

为了对新设计的实验方法所得的数据可靠性有所了解,采用有限元软件对光纤埋入基体后的单丝拔出进行模拟分析。分析在两种实验方法下,光纤各部分的应力分布。

光纤结构如图4所示,由纤芯、包覆层和涂敷层构成,其中纤芯和包覆层一般材料均为 $\text{SiO}_2$ ,在包覆层采用极小掺杂来调整折射率,以实现光在纤芯内的全反射。因此建模时,将纤芯和包覆层看作一个整体,采用SOLID95单元。至于涂敷层,为对光纤起保护作用的塑料,建模时单独作为实体单元。为了模拟光纤涂敷层和包覆层之间,以及涂敷层和基体之间的连接,采用ANSYS中的Vglue命令。图5为两种不同试验状态下的系统建模。

在光纤自由端施加100 MPa的拉伸应力后,研究光纤涂敷层和纤芯部分的应力分布。图6和图7分别为光纤埋入基体后,光纤涂敷层上和光纤自身沿轴向剪切应力云图。

图6为不同实验方法测量光纤与基体之间界面剪切强度时,涂覆层上的剪切应力分布。由于实

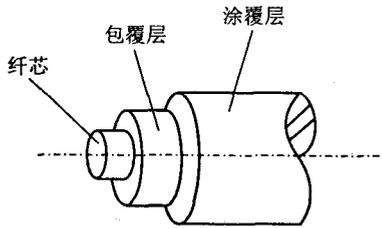
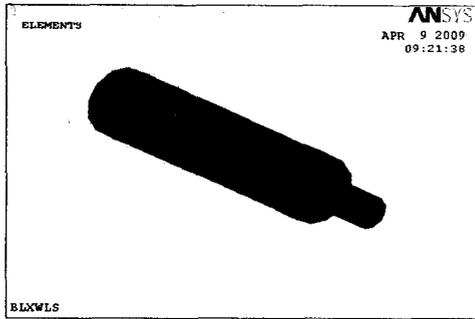
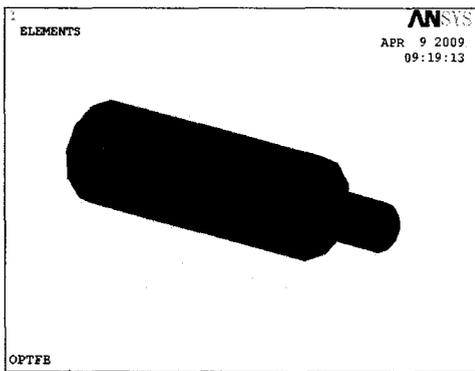


图4 光纤截面示意图



(a) 传统试验方法系统



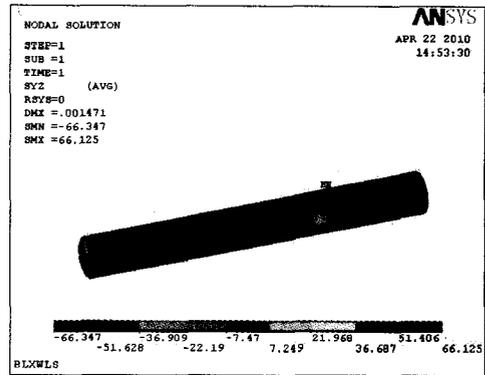
(b) 新方法系统模型

图5 有限元模型

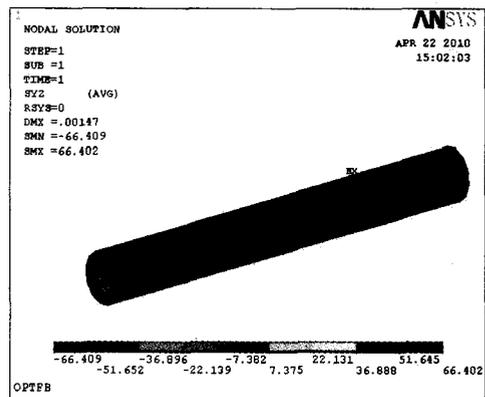
验测量的是沿光纤轴向的剪切应力,因此,图中只比较了 $\tau_{yz}$ 和 $\tau_{zx}$ 。

由图可见,两种情况下,涂覆层上的剪切应力分布相同,在光纤埋入端附近出现应力集中,最大剪切应力误差仅为1%左右。采用第一种方法,则涂覆层上的剪切应力 $\tau_{yz}$ 和 $\tau_{zx}$ 的大小分别约为7.47和7.044 MPa,而采用第二种方法,涂覆层上相应剪切应力分别约为7.382和7.375 MPa,剪切应力最大相对误差不超过5%。

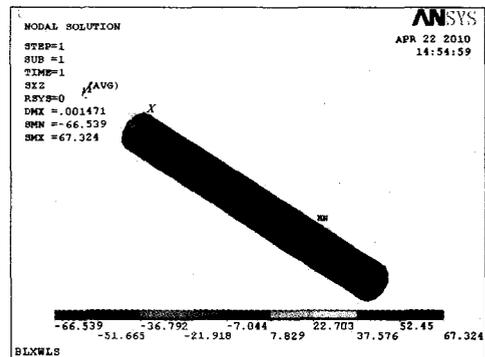
由图7可见,两种情况下,光纤上的剪切应力分布相同,均在光纤埋入端附近出现应力集中。新方法下光纤上的剪切应力的数值以及最大应力的数值基本上都比采用第一种方法时光纤上相应应力的数值要大,但分析两种情况下的应力集中程



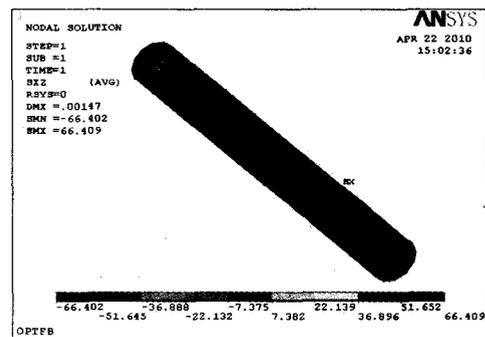
(a) 旧方法下涂覆层上的 $\tau_{yz}$



(b) 新方法下涂覆层上的 $\tau_{yz}$



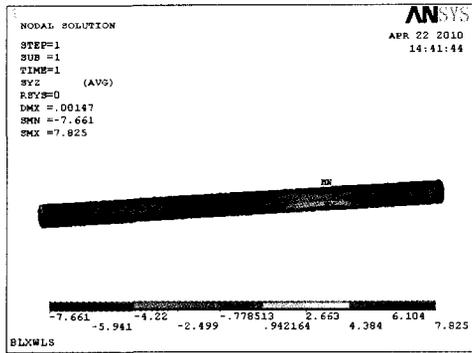
(c) 旧方法下涂覆层上的 $\tau_{zx}$



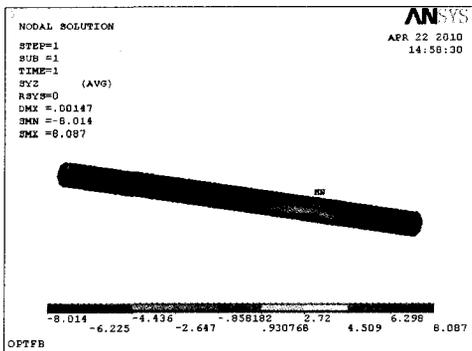
(d) 新方法下涂覆层上的 $\tau_{zx}$

图6 涂敷层上剪切应力比较

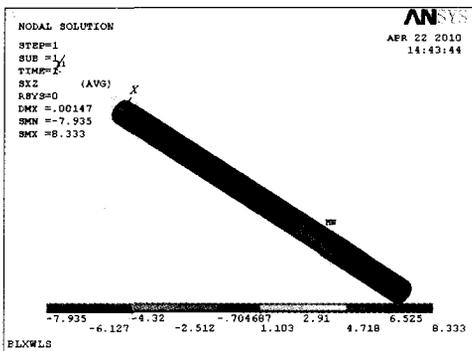
度,可以发现, $\tau_{yz}$ 和 $\tau_{zx}$ 的应力集中系数分别为10.05,9.42及11.83和8.69,显然新方法可以减缓



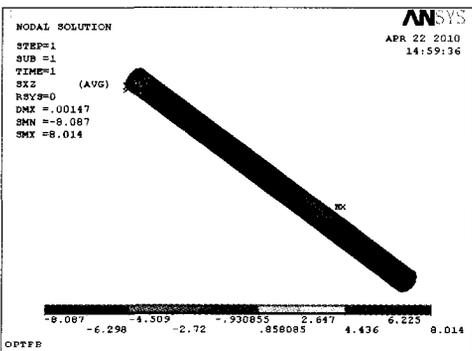
(a) 旧方法下光纤上的 $\tau_{xz}$



(b) 新方法下光纤上的 $\tau_{xz}$



(c) 旧方法下光纤上的 $\tau_{xz}$



(d) 新方法下光纤上的 $\tau_{xz}$

图7 光纤上的剪切应力分布对比

拔出时,光纤上的应力集中程度。此外应用第二种方法,应力集中的数值与第一种方法相比,误差不

超过5%。

由此可见,新设计的实验方法可以用来研究光纤埋入后与基体之间界面剪切强度。因此根据原理,设计了光纤单丝拔出试验。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 材料

研究采用两种光纤,一种为康宁公司提供的单模光纤,其纤芯和包覆层材料均为普通石英,直径分别为9和125  $\mu\text{m}$ ,涂覆层厚60  $\mu\text{m}$ 。另一种为碳涂覆单模光纤,碳涂敷光纤与普通光纤相比,在包覆层和塑料涂层间多了一层碳涂敷层。

选用环氧树脂作为基体材料。

#### 3.2 试样制备

设计了用于制备光纤单丝拔出试样的模具。该模具上开槽,改变槽的尺寸可改变光纤埋入长度。在模具内侧涂上硅油脱模剂,光纤放置在垂直于树脂的狭缝内,将调配好的环氧树脂缓慢倒入模具中。为了精确控制光纤位置,光纤两端均伸出树脂外。环氧树脂常温固化24 h,而后将多余的光纤撤断。将固化后的试样连同模具夹持,进行单丝拔出试验以研究光纤和基体间界面剪切强度值。

研究光纤单丝拔出力随埋入长度的变化关系,由式(2)可计算得到光纤与基体之间界面平均剪切强度值。由于该变化关系应为过原点的直线,所以实验时,只研究了埋入长度 $L$ 为3 mm的情况下,光纤拔出力,即在模具上加工出3 mm的凹槽,而后按上述过程准备试样,进行光纤单丝拔出实验。

采用文献[9]中设计的力传感器测量光纤单丝拔出力。

#### 3.3 光纤与基体之间界面剪切强度研究

对光纤单丝拔出实验数据进行处理,得到其统计平均值 $F$ 。

表1和表2分别为普通单模光纤和碳涂覆光纤单丝拔出力实验数据。将光纤平均拔出力 $F$ 和 $L=3$  mm代入式(2),可以得到光纤和基体之间界面剪切强度值。

根据实验数据可作出普通单模光纤拔出力 $F$ 的概率密度分布图,如图8所示。由图可见,光纤单丝拔出力试验数据符合正态分布,其均值为1.77 N。碳涂覆光纤按同样分析方法,得到其单丝拔出力均值为1.71 N。

表1 普通单模光纤单丝拔出力 N

| 组号 | 序号 | 拔出力 F | 组号 | 序号 | 拔出力 F |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1  | 1  | 1.4   | 6  | 1  | 2.0   |
|    | 2  | 2.4   |    | 2  | 1.9   |
|    | 3  | 2.1   |    | 3  | 1.8   |
|    | 4  | 1.7   |    | 4  | 1.6   |
|    | 5  | 1.9   |    | 5  | 1.7   |
| 2  | 1  | 1.8   | 7  | 1  | 2.6   |
|    | 2  | 2.2   |    | 2  | 1.7   |
|    | 3  | 1.6   |    | 3  | 1.4   |
|    | 4  | 1.7   |    | 4  | 1.8   |
|    | 5  | 1.9   |    | 5  | 1.2   |
| 3  | 1  | 1.8   | 8  | 1  | 1.7   |
|    | 2  | 1.9   |    | 2  | 1.8   |
|    | 3  | 1.6   |    | 3  | 1.8   |
|    | 4  | 1.7   |    | 4  | 1.7   |
|    | 5  | 1.8   |    | 5  | 1.9   |
| 4  | 1  | 1.6   | 9  | 1  | 1.8   |
|    | 2  | 1.7   |    | 2  | 1.2   |
|    | 3  | 2.0   |    | 3  | 1.7   |
|    | 4  | 1.9   |    | 4  | 2.0   |
|    | 5  | 1.6   |    | 5  | 1.8   |
| 5  | 1  | 1.6   | 10 | 1  | 1.4   |
|    | 2  | 1.4   |    | 2  | 1.6   |
|    | 3  | 1.8   |    | 3  | 1.7   |
|    | 4  | 1.6   |    | 4  | 2.0   |
|    | 5  | 2.1   |    | 5  | 1.8   |

表2 碳涂覆光纤单丝拔出力 N

| 组号 | 序号 | 拔出力 F | 组号 | 序号 | 拔出力 F |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1  | 1  | 1.7   | 6  | 1  | 1.8   |
|    | 2  | 1.5   |    | 2  | 1.6   |
|    | 3  | 2.0   |    | 3  | 1.2   |
|    | 4  | 1.6   |    | 4  | 1.8   |
|    | 5  | 1.7   |    | 5  | 2.0   |
| 2  | 1  | 2.2   | 7  | 1  | 1.4   |
|    | 2  | 1.6   |    | 2  | 1.7   |
|    | 3  | 1.5   |    | 3  | 1.5   |
|    | 4  | 1.8   |    | 4  | 2.0   |
|    | 5  | 1.5   |    | 5  | 1.6   |
| 3  | 1  | 1.7   | 8  | 1  | 1.9   |
|    | 2  | 1.6   |    | 2  | 1.3   |
|    | 3  | 1.8   |    | 3  | 2.0   |
|    | 4  | 2.0   |    | 4  | 1.5   |
|    | 5  | 1.6   |    | 5  | 1.8   |
| 4  | 1  | 1.5   | 9  | 1  | 1.9   |
|    | 2  | 1.6   |    | 2  | 1.5   |
|    | 3  | 1.4   |    | 3  | 1.8   |
|    | 4  | 1.7   |    | 4  | 1.7   |
|    | 5  | 2.3   |    | 5  | 1.9   |
| 5  | 1  | 2.0   | 10 | 1  | 1.7   |
|    | 2  | 1.4   |    | 2  | 1.5   |
|    | 3  | 1.5   |    | 3  | 1.7   |
|    | 4  | 1.7   |    | 4  | 2.0   |
|    | 5  | 1.9   |    | 5  | 1.6   |

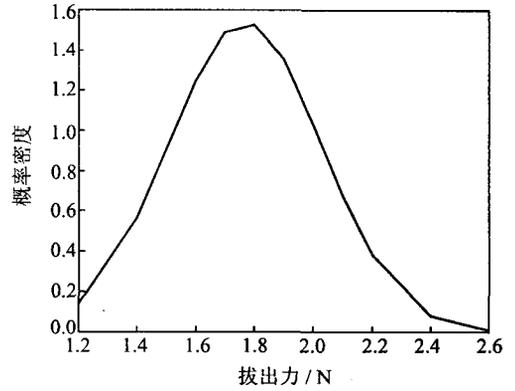


图8 普通单模光纤单丝拔出力概率密度分布图

光纤单丝拔出试验过程中,无论是普通单模光纤或是碳涂覆光纤,总是出现光纤外部在埋入端被拉断,而其余部分从残留在基体内的材料中拔脱出来的现象。图9为碳涂覆光纤单丝拔出后放大250倍的照片。

由图9可见,光纤单丝拔出时,在碳涂覆层和最外层起机械保护作用的塑料涂层之间发生剪切破坏。

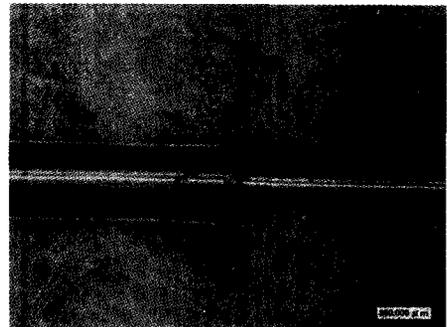


图9 碳涂覆光纤单丝拔出后照片

对比不同材料单丝拔出试验现象,可以得到结论:光纤埋入到基体中,其涂敷层和纤芯之间界面剪切强度远低于涂层和基体之间界面剪切强度。

光纤拉伸时,涂敷层和光纤均承担拉力,由于光纤涂层的弹性模量数值远远低于光纤的弹性模量(10<sup>-2</sup>量级),因此可以近似认为实验测得的拔出力即为光纤内部(纤芯和包覆层)与涂敷层之间的拔脱力。

由分析结果,光纤涂敷层和其内部之间剪切强度值可由式(2)有

$$\tau_0 = \frac{F}{\pi dL} = \frac{1.77}{\pi \times 125 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-3}} = 1.5 \text{ MPa}$$

实验测量得到的界面剪切强度值为平均值,而实际界面剪切应力分布比较复杂。Yuan 等<sup>[10]</sup>假设各物质均为线弹性,根据力学平衡和变形协调,推

导出光纤埋入树脂基复合材料后,复合材料上应变线性分布时,光纤与涂层之间界面剪切应力公式

$$\tau_g(x) = \frac{kr_g\sigma_m \cosh(kx)}{2 \sinh(kL')} \quad (3)$$

式中: $r_g$ 和 $L'$ 分别为光纤半径和埋入长度; $\sigma_m$ 为基体材料上承受的拉伸应力; $k$ 为与材料相关的常数。

因此,埋入复合材料后,光纤与涂层之间界面平均剪切应力 $\tau$ 与基体上的正应力 $\sigma_m$ 之间应满足

$$\tau = \frac{\int_{-L'}^{L'} \tau_g(x) dx}{2L'} = \frac{r_g\sigma_m}{2L'} \quad (4)$$

由式(4)可见,光纤埋入复合材料中,基体上的拉伸应力不能过大,否则 $\sigma_m$ 过大,可能会出现光纤与涂层界面间的平均剪切应力超过平均剪切强度 $\tau_b$ ,从而可能会出现光纤涂敷层和内部的剪切破坏。

若将试验所用普通单模光纤制成光栅,埋入到材料中,为了保护光纤光栅,往往在工作段两端留有引线。假设光纤埋入复合材料中的长度为20 mm,根据式(4)可计算得到由光纤涂覆层和包覆层的界面剪切强度所许可的基体拉伸应力。

$$\sigma_m = \frac{1.5 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-3}}{125 \times 10^{-6}} = 240 \text{ MPa}$$

因此将研究所用的光纤制成光栅,应用到智能材料中去,一旦光栅周围的基体材料上承受的轴向正应力超过240 MPa,则可能会首先出现光纤与涂敷层之间界面的剪切破坏,影响整体的力学性能。为了避免出现因为光纤内部损坏而降低复合材料力学性能,可以通过提高光纤内部和涂层的界面剪切强度,或增加光纤埋入长度。

## 4 结 论

根据力学平衡知识,本文研究了新的测量光纤与基体之间界面剪切强度的实验方法,根据原理设计了相应模具。该方法与之前的研究方法相比,具有以下特点:

- (1)有限元计算结果表明,该方法和之前方法得到的光纤涂层和其本身剪切应力分布是一致的;
- (2)不须预先研究光纤自身的拉伸强度;
- (3)可以精确控制光纤埋入长度,可通过改变开槽的尺寸,达到改变埋入长度的目的;
- (4)可以保证光纤单丝沿轴向受拉。

普通光纤和碳涂敷光纤单丝拔出实验结果表明,光纤包覆层与涂敷层之间界面剪切强度比较低,因此易剥离,这对光纤传感无影响,但对结构强度会产生影响。

若将带涂敷层的光纤埋入复合材料中,塑料涂

敷层与基体之间是浸润的,形成界面的剪切强度远大于光纤内部界面的剪切强度。因此,复合材料承载时光纤附近的基体材料上的正应力若超过某个值,可能会出现光纤涂敷层与内部之间的破坏,从而会降低埋入后整体的结构强度。

至于基体材料上正应力的最大值,与光纤包覆层和涂敷层之间界面剪切强度有关,还与光纤埋入长度有关。适当增加埋入长度,可以避免因光纤涂敷层剥离引起的结构力学性能降低,但从结构角度来说,这样对整体的性能又是不利的。提高光纤涂敷层和内部的剪切强度可以帮助提高整体力学性能。

## 参考文献:

- [1] 芦吉云,梁大开,李东升,等.基于光纤智能夹层传感结构的应力测量研究[J].实验力学,2006,21(5):567-571.
- [2] Lawrence C M, Nelson D V, Udd E, et al. Fiber optic sensor for transverse strain measurement[J]. Experimental Mechanics, 1999,39(3):202-209.
- [3] Oliveira R de, Ramos C A, Marques A T. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric fabry-Pérot sensors[J]. Computers & Structures, 2008,86(3/5):340-346.
- [4] Dumitrescu O R, Baker D C, Foster G M, et al. Near infrared spectroscopy for in-line monitoring during injection moulding [J]. Polymer Testing, 2005,24(3):367-375.
- [5] Gasior P, Kaleta J, Sankowska A. Optical fiber sensors in health monitoring of composite high pressure vessels for hydrogen[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V. 2007 Proc of SPIE. [S.l.]:SPIE,2007:1-10.
- [6] Steen M, Vallés J L. 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.
- [7] Joffe R, Andersons J, Wallström L. Interfacial shear strength of flax fiber/thermoset polymers estimated by fiber fragmentation tests[J]. Journal of Materials Science, 2005,40(9/10):2721-2722.
- [8] 胡福增,陈国荣,杜永娟.材料表面[M].2版.上海:华东理工大学出版社,2001:201-202.
- [9] 刘荣梅,梁大开.单丝拔出法在光纤智能复合材料界面研究中的应用[J].中国激光,2009,36(2):387-390.
- [10] Yuan Libo, Zhou Limin. Sensitivity coefficient evaluation of an evaluation of an embedded fiber-optic strain sensor[J]. Sensor and Actuators A,1998,69(1):5-11.