

复合材料界面力学的光纤测试方法

周崇华 姜德生 程家骥

(武汉工业大学 激光研究所)

曾黎明 闻狄江

(武汉工业大学 复合材料教研室)

提 要

本文将单模光导纤维代替普通玻璃纤维埋设于聚脂之中,将 He-Ne 激光分光后接入这一信号光纤及另一同样长度的参考光纤中,利用这两根光纤输出的激光的干涉效应来测试埋设于聚脂之中光导纤维的各种应力情况(在复合材料受各种外力时),从而得到玻璃纤维同聚脂的界面微观力学的各种结果,开拓了一种新的复合材料的测试方法。

关键词: 单模光纤; 复合材料。

一、引 言

在复合材料的测试技术中,过去,测试复合材料中浇铸体同玻璃纤维界面的力学性能,主要是通过拔脱实验、电子显微镜实验,这些方法实际上是破坏性测试,而且无法对整个受力过程进行连续监测,而干涉型光纤则解决了这一问题。实际上,光导纤维是一种玻璃纤维,其材料性质和几何尺寸常用玻璃纤维基本相似。将单模光导纤维按玻璃纤维的埋设方式埋设于浇铸体中,即形成同样性能的复合材料,它在受外力时,则因光纤中受应力而产生双折射效应,对通过光纤中的激光起相位调制作用。其输出光同参考光纤的输出光相干涉,形成干涉条纹。受力时干涉条纹移动,通过其计数,就可测得光纤中的应力情况。由于利用光的干涉效应,因此灵敏度极高;又由于光纤传光光路简单,成本低易于推广。这种方法不仅可以测试复合材料受力情况下玻璃纤维的应力从而得到界面的情况,还可测试复合材料在浇铸过程中的收缩应力,以及温度应力。改善任何复合材料中界面的性能和表面处理的方法,是研究复合材料的一个极重要的问题,加入微量耦联剂可改善复合材料界面性能。干涉型光纤可通过界面的测试直接得到耦联剂的粘结性能的结果。我们首先对我校复合材料教研室研制的耦联剂进行了实验。这种复合材料测试方法国内外尚未见报道。

二、基本原理

干涉型光纤测试方法的原理图见图1。

我们推导单拉伸情况下单位长度光纤上产生的光相位变化。

考虑直径为 D 、折射率为 n 、长度为 L 的光纤。假设自由空间传播常数为 K_0 的光以传播常数 β 的单模在光纤中传播。当光经过这一段光纤后，光波的相位为 $\phi = \beta L$ 。光纤应变引起的输出光相移可用下式表示。

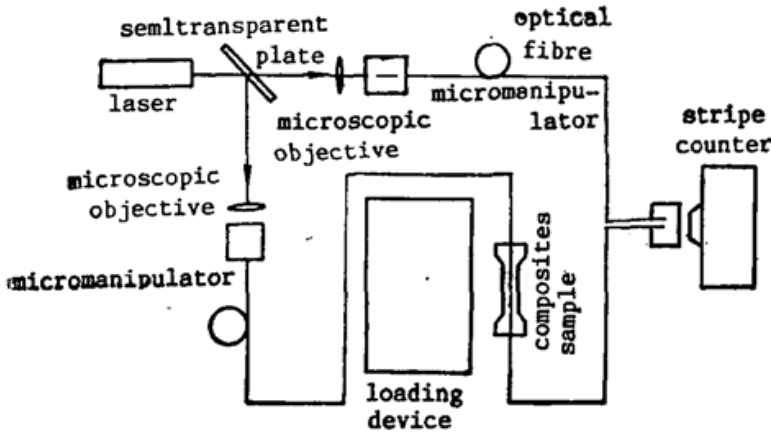


Fig. 1 Diagram of interferometric optical fibre test

$$\Delta\phi = \beta \cdot \Delta L + L \cdot \Delta\beta \quad (1)$$

这里 $\beta \cdot \Delta L = \beta \cdot L \cdot \frac{\Delta L}{L} = \beta \cdot L \cdot \varepsilon_s$

ε_s 为光纤轴向应变系数；

$$L \cdot \Delta\beta = L \cdot \frac{d\beta}{dn} \Delta n + L \frac{d\beta}{dD} \cdot \Delta D,$$

Δn ——折射率变化。

上式中右边第一项为光弹效应，第二项为应变使光纤直径变化而产生的波导模色散效应，它比前一项小 2~3 个数量级，故可忽略^[1]。由此得

$$\Delta\phi = \beta L \varepsilon_s + L \frac{d\beta}{dn} \cdot \Delta n \quad (2)$$

$\beta = n_{\text{eff}} \cdot K_0$ ， n_{eff} 为有效折射率，且 $n_{\text{eff}} \approx n$ 故 $\beta = n K_0$ ， $\frac{d\beta}{dn} = K_0$

应变光效应表现为光特征曲线的变化^[2]，

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^6 P_{ij} \varepsilon_j, \quad (i = x, y, z).$$

实验中，光纤为纵向单拉伸，拉应力为 P ，因此光纤各方向应变可写成向量^[3]：

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu P/E \\ -\mu P/E \\ P/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

在无切变情况下， $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$ ，因此只需考虑应变光张量的 $i, j = 1, 2, 3$ 矩阵元^[3]：

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} \end{pmatrix}.$$

由此 $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_x = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_y = \frac{P}{E} [-\mu P_{11} + (1 - \mu) P_{12}]$ ， $\frac{1}{n_x^2} - \frac{1}{n^2} = \frac{(n_x - n)(n_x + n)}{n_x^2 \cdot n^2}$ ， $\Delta n = \frac{1}{2} n^3 \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{x \text{ 或 } y} = \frac{1}{2} n^3 (P/E) [-\mu P_{11} + (1 - \mu) P_{12}]$ 。则

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= L \left(\beta \varepsilon_s + \frac{d\beta}{dn} \cdot \Delta n \right) \\ &= L \left\{ \beta \frac{P}{E} + K_0 \cdot \frac{n^3}{2} \cdot \frac{P}{E} [-\mu P_{11} + (1 - \mu) P_{12}] \right\} \end{aligned}$$

$$= L \frac{P}{E} \left\{ \beta + K_0 \frac{n^3}{2} [-\mu P_{11} + (1-\mu) P_{12}] \right\}. \quad (3)$$

式中括号内为常数, E 为光纤材料的弹性模量。令

$$\frac{1}{E} \left\{ \beta + K_0 \frac{n^3}{2} [-\mu P_{11} + (1-\mu) P_{12}] \right\} = M. \quad (4)$$

M 对同一种光纤材料为常数, 故 $\Delta\phi = LP \cdot M$, 因此得单位长度光纤上光相位变化同此长度上拉应力成正比。实验中使用的光纤为武汉邮电科学院生产的 $\phi 10/100 \mu\text{m}$ 单模光纤, 损耗为 0.6 dB/km , 其光纤材料参数值为: 杨氏模量 $E = 1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $n = 1.458$, $\lambda = 0.63 \times 10^{-6} \text{ m}$, $\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} = 1.446 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, $\mu = 0.17$, $P_{12} = 0.270$, $P_{11} = 0.121$ 。代入 (4) 式, 得到 $M = 9.4 \times 10^{-2} (\text{rad} \cdot \text{cm}/\text{kg})$, 同我们实验中标定的值一致, 从而实验上验证了这一理论的推导。由于各种玻璃的 E , μ , P_{11} , P_{12} 有一定变化范围, 因此不同光纤 M 值不尽一致。但 $\Delta\phi$ 与 $L \cdot P$ 都存在线性关系, 这一线性关系对各种光纤都适用, 是一个普适关系。由于 M 值在实验中易于标定, 这样可以保证实验更精确。我们实验中 M 值通过实验标定确定。

三、实 验

1. 光纤 M 值标定实验

为测取我们这种光纤在浇铸体中的受力, 首先要对此种光纤进行标定。由上面推导可知, 光纤对外力的灵敏度极高, 因此, 标定时加力应为连续力, 连续力变化精度要高(在几 dyne 范围内), 一般的弹簧加力计难以满足这种要求。我们利用水的浮力来进行这一实验, 如图 2 所示, 将信号光纤的某一点固定在全息台侧, 在光纤上距这点一定距离(这里为 5.5 cm), 用 502 胶将浮子粘在此点, 浮子为塑料材料。浮子浮于水中, 由于浮子比重比水重, 因此光纤受拉。用一根很细的虹吸管将烧杯内水向外引放, 水面下降则浮力减小。浮子为圆柱形, 直径 $D = 4.65 \text{ cm}$, 则浮力变化

$$\Delta F = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \Delta h \cdot d_w$$

水面下降的高度 Δh 由烧杯上四条等距刻线给出, 两刻线间距离 $\Delta h = 1.50 \text{ cm}$, 试验段光纤长度为 5.5 cm 。实验时, 让烧杯中的水缓慢流出, 读取水面从一刻线下降到相邻一刻线时干涉条纹移过的数目。

表 1 为光纤标定数据(光纤长 5.5 cm)。由此可得出单位 cm 光纤长度在水位下降 1.5 cm 时干涉条纹移动数为 $4.831/\text{cm}$ 。此时浮力变化为: $\Delta F' = \frac{3.14}{4} \times 4.65^2 \times 1.5 \times 10^{-3} = 2.55 \times 10^{-2} (\text{kg})$ 。每移动一根条纹时受力变化为: $\Delta F = \Delta F' / 4.83 = 5.28 \times 10^{-3} (\text{kg})$ 。

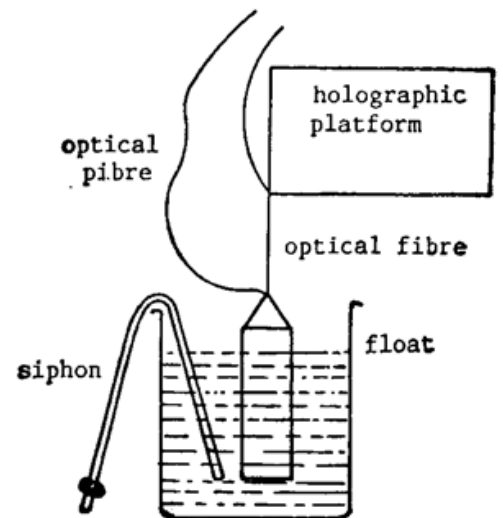
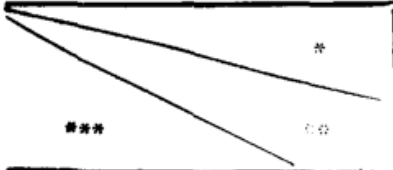


Fig. 2 Diagram of standard experiment

Table 1 Optical fibre standard experiment data table

	5.5~4.0	4.0~2.5	2.5~1.0
1	27.0	27.0	26.5
2	26.0	26.5	26.5
3	26.5	26.5	27.0

* change of water level (cm), $\Delta h = 1.5$.

** stripe number.

*** test number.

光纤外径为 $100 \mu\text{m}$, 光纤中拉应力为:

$$\Delta P = \frac{\Delta F}{s} = \frac{5.28 \times 10^{-3}}{\frac{\pi}{4} (100 \times 10^{-4})^2} = 67.3 (\text{kg}/\text{cm}^2).$$

这样当拉应力变化为 $67.3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 时, 每 cm 光纤上移动一根条纹:

$$M = \frac{\Delta \phi}{LP} = \frac{2\pi}{1 \times 67.3} = 9.33 \times 10^{-2} (\text{rad} \cdot \text{cm}/\text{kg}).$$

2. 复合材料中玻璃纤维应力情况的测定

实验是同我校复合材料教研室共同进行的。复合材料的浇铸体为不饱和聚酯树脂, 这一实验的目的是通过测试玻璃纤维与树脂之间加了耦联剂与未加耦联剂的两种复合材料的拉伸性能, 来检验耦联剂的作用。

图 3 为拉伸试件的几何尺寸, 为方便起见, 我们浇铸的试件的几何尺寸都一样, 光纤沿轴浇铸在拉伸试件的中间。五组试件重复实验。

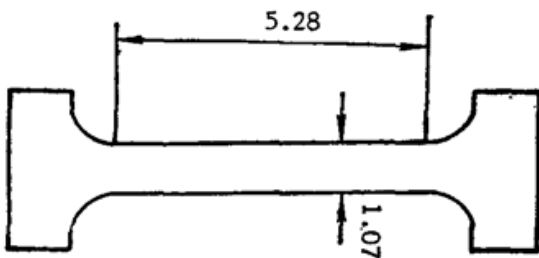


Fig. 3 Geometric size figure of pull sample

加载装置为弹簧拉力机, 量程为 100 kg 。加载过程中为使试件不致有挠动, 先预加一个初值拉力, 然后每加一定的力, 读出条纹的移动数目。加载过程中我们发现, 加力和减力过程中条纹计数一致, 实验重复性良好。

表 2 为聚酯树脂与玻璃纤维之间未加耦联剂的试件测试时条纹移动数和玻璃纤维中的拉应力。表 3 为加了耦联剂的试件测试时条纹移动数和玻璃纤维中的拉应力。干涉条纹移动数目为多次测量的平均值。玻璃纤维中拉应力由 $P = \frac{\Delta \phi}{LM}$ 得出。我们将未加耦联剂与加耦联剂时玻璃纤维中拉应力情况作一个比较, 如表 4 所示。

由表 4 得知, 这种耦联在很大程度上加强了玻璃纤维与不饱和聚酯树脂之间的粘接力, 从而提高了加耦联剂的复合材料中玻璃纤维的拉应力(为原来的约 1.5 倍), 从而大大增强了这种复合材料的本身的抗拉强度。在对这种试件的宏观测试中, 我们发现加了耦联剂的试件的抗拉强度也大约是未加耦联剂试件的 1.5 倍(具体还同铺设的玻璃纤维数有关)。这也有力证明了我们实验的可靠性。从表中也可以看出, 这种方法是研究复合材料界面问

Table 2 Test data table without coalescer

load (kg)	0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	
stripe number change	0	18.0	37.5	55.5	73.0	90.0	108.5	
pull stress of optical fibre (kg/cm ²)	0	228.6	476.2	704.8	927.5	1143	1377	
load (kg)	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
stripe number change	125.5	143.0	161.0	179.5	196.0	212.5	229.0	248.0
pull stress of optical fibre (kg/cm ²)	1594	1816	2044	2274	2489	2692	2908	3149

Table 3 Test data table with coalescer

load (kg)	0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	
stripe number change	0	29.0	57.5	86.0	115.0	143.0	172.5	
pull stress of optical fibre (kg/cm ²)	0	368.3	730.2	1092	1460	1816	2190	
load (kg)	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
stripe number change	201.0	228.5	256.5	284.5	312.0	339.5	366.5	393.0
pull stress of optical fibre (kg/cm ²)	2552	2902	3257	3613	3962	4311	4654	4991

Table 4 Test data comparative table coalescer and without coalescer

load (kg)	0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	
pull stress without coalescer (kg/cm ²)	0	228.6	476.2	704.8	927.5	1143	1377	
pull stress with coalescer	0	368.3	730.2	1092	1460	1816	2190	
load (kg)	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
pull stress without coalescer (kg/cm ²)	1594	1816	2044	2274	2489	2692	2908	3148
pull stress with coalescer	2552	2902	3257	3613	3962	4311	4654	4991

题的一种有效方法。

由于复合材料界面项目为国家“七五”攻关项目，时间较紧，我们只作了拉伸情况的测试，而实际上这种方法还可测试受压，弯曲等多种受力情况下玻璃纤维中的应力。值得注意的一点是，这种方法还可测试树脂在浇铸过程中由液体变为固体的凝胶过程的收缩应力，这也是其它方法不易测量的。因此这种方法作为一种复合材料的测试方法，具有广泛应用的前景。

参 考 文 献

- [1] C. D. Butter and G. B. Hoker; *Appl. Opt.*, 1978 17, No. 18 (Sep), 2867~2871.
- [2] D. A. Pinnow; "Elasto-optical Materials", in Handbook of Laser Ed by R. J. Pressly, (CRC, Cleveland, Ohio, 1971), 367~371.
- [3] 王龙甫;《弹性理论》, (科学出版社, 北京, 1978), 64~78.
- [4] T. G. Giallorenzi et al.; *IEEE J. Q. E.*, 1982, QE-18, No. 4 (Apr), 626~665.

[5] CHARLES M. DAVIS; *Laser Focus*, 1983, 18, No. 2 (Feb), 112~116.

[6] 长尾和美编; 邮电 532 厂技术情况室译,《光导纤维》, (人民邮电出版社, 北京, 1980), 79~112.

Optical fiber interferometric testing of composites interface mechanics

ZHOU CHONGHUA, JIANG DESHENG, CHEN JIAQI
(*Institute of Laser, Wuhan University of Technology*)

ZHEN LIMING AND WEN DIJIANG
(*Faculty of Composites, Wuhan University of Technology*)

(Received 4 July 1989; revised 33 October 1989)

Abstract

The mechanical measurement between fiber and medium in composites is an attractive but difficult subject. We use a single-mode optical fiber instead of ordinary fiber to be buried in polyester. When He-Ne laser light goes through the single optical fiber and reference fiber with the same length, we could test the stress and strain in the optical fiber in composites according to the two-beam interference. Many results could be obtained about the interface microcosmic mechanics in composites. This paper presents a new sensitive testing method for composites.

Key words: single-mode optical fiber; stress testing in composites; two-beam interference.