复合材料学报 第19卷 第1期 2月 2002年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 19 No. 1 February 2002

文章编号: 1000-3851(2002)01-0122-04

空心光纤在复合材料断裂位置测量中的研究

杨 红, 梁大开, 陶宝祺, 胡自力, 邱 浩
(南京航空航天大学 测试工程系, 南京 210016)

摘 要: 损伤监测与断裂修复是复合材料研究的难题之一。利用空心光纤注胶来实现复合材料的自诊断、自修复是一种行之有效的方法。由此对空心光纤的传光机理做了详细的研究和分析,并介绍了利用空心光纤对复合材料断裂位置进行测量的原理、方法及实验研究。首先给出了空心光纤的性能,其次介绍了利用测量光纤衰减特性的剪断方法来进行复合材料断裂位置的研究,最后介绍了Y型耦合器在断裂位置研究中的实用性,并以一个系统的实验原理图作为整个研究的小结。

关键词: 空心光纤; 复合材料; 剪断法
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

RESEARCH ON SELF-DIAGNOSE OF THE RUPTURE PLACE USING HOLLOW-CENTER OPTICAL FIBER IN COMPOSITE MATERIAL

YANG Hong, LIANG Da-kai, TAO Bao-qi, HU Zi-li, QIU Hao
(Measurement and Testing Department, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Monitoring damage and repairing crack are the important problems in composite materials. The method of self-diagnose and self-repair composite structures using a hollow-center optical fiber filled adhesive is a good technique. Based on this thought, the mechanism investigation and analysis of light transmission in the hollow-center optical fiber are made in detail. The measure method and experimental research of self-diagnose for the rupture location in composite materials are also put forward. In this paper, the performance of the hollow-center optical fiber is explained first. The theory of light transmission attenuation by snipping the optical fiber is used in self-diagnose of the rupture location. Finally, a Y coupler is given to measure the rupture location and a general experimental system for self-diagnose and self-repair is given as an example.

Key words: hollow-center optical fiber; composite material; snip-method

复合材料具有比强度高、比模量大,耐疲劳性能好,阻尼减振性好,破损安全性高等优点,已成为结构轻型化的主要材料,在航天航空等许多领域应用广泛。但复合材料在性能监测、损伤及断裂检测等方面比金属材料更复杂[1],对复合材料损伤、断裂进行适时监测与处理是目前研究的热点之一。光纤传感器埋入复合材料中可用来监测制造过程,检测制品完整性,寻找可能出现的损伤、裂纹等;埋入航天器中,可并入正常的监视网络;也可与飞行控制、故障评估、处理等联系在一起。国内外已发表许多应用研究的论文[2~5],但自修复还仅处于实验研究阶段,目前尚未有实用研究的报道。

笔者探讨了研制成功的空心光纤性能及其在复合材料自诊断、自修复中以提高结构的整体性能和安全可靠性为目的而进行的应用研究。空心光纤埋入复合材料中既可作诊断的传感元件,又可作修复时的执行元件,是一种难得的容自诊断与自修复于一体的功能元件。

1 空心光纤的性能

空心光纤是由纤芯、包层和涂敷层组成的一个多层介质结构的对称圆柱体,空心纤芯的内表面不

收稿日期: 1999-05-20; 收修改稿日期: 1999-07-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(59875036)
作者介绍: 杨 红(1967),博士,师从中国科学院院士陶宝祺教授,主要从事光纤通讯、光纤传感器、测控及智能结构等方面的研究。

具有包层和涂敷层(如图 1)。

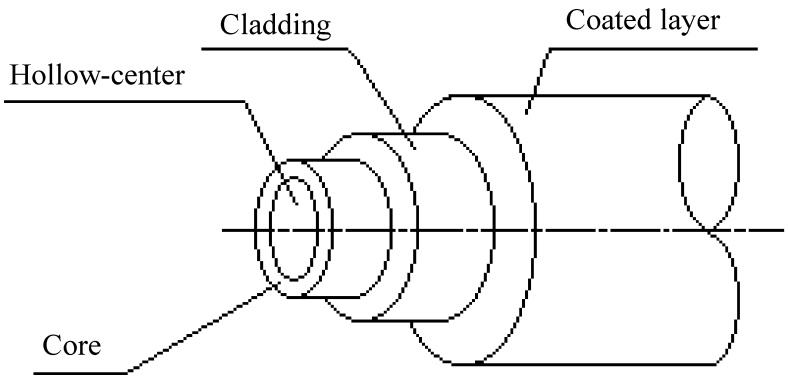

图 1　空心光纤的结构

Fig. 1　Construct of hollow optical fiber

由于纤芯空心的存在，此处传光、传感的机理很值得研究。由射线理论[6]可知，光在光纤中的传播主要是依据全反射原理。但光在空心光纤中的传播还受到空心处纤芯与所含介质形成的界面的影响，因而具有一定的特殊性。为此，专门研究了光在空心光纤中传播时对光输出特性的影响。研究中采用在空心光纤内注入不同液体的方法来进行性能比较，表 1 为其测试结果。另外，最近的研究发现，空心光纤经过特殊处理后可大大提高性能检测的灵敏度，实验结果表明，简单地利用光强检测就可达到 20 %～30 %的变化率，很适宜于结构的性能测试。经特殊处理后，该光纤传光性能的理论研究还在进一步的探索中。

由表 1 可看出，空心内注入介质的不同，光在光纤中传播时对光输出的影响也不同。尤其是胶液引起的光强变化最显著，这主要是由于胶液的折射率大于或接近纤芯的折射率，出现了光线由纤芯折射到胶液里的现象，具有泄漏型光波导的性质，又由于胶液的透光性能不好，导致了折射到胶液里的光线传播不畅，影响了输出光的光强。

表 1　空心光纤性能测试数据

Table 1　Performance of hollow-center optical fiber

Optical fiber	No liquid (air)	Adhesive (thin)	Adhesive (thick)
Refractive index n	1.0	1.41	1.51
Length m	1.25	1.0	1.0
Luminous intensity mw	0.34	0.0085	0.0041

2　测量断裂位置的原理

剪断法(原理如图 2)是多模光纤光纤衰减特性测量的基准方法，衰减特性是光纤传光机理的一个重要特性。通过剪断法测定出衰减系数 T后，就可以由此进行许多理论分析、实验及应用的研究。

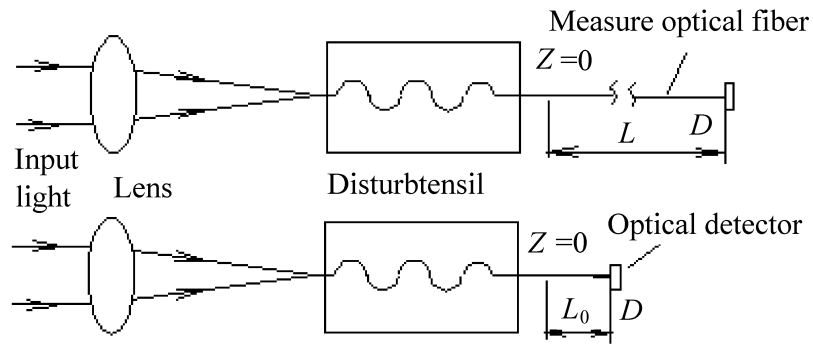

图 2　测量光纤损耗的剪断法原理图

Fig. 2　Theory of pass-light attenuation by snipping optical fiber

衰减系数 T的公式如下：

$$T = 4.34V = 10\lg(P_i/P_o)/L(\mathrm{dB/Km}) \quad (1)$$

其中，P_i、P_0 分别为输入、输出光功率；L 为光纤长度；L_0 为剪断处离光检测器的距离。

$$V = \ln[P(L_0)/P(L)]/(L - L_0) \quad (2)$$

由此计算出任意长度处的光功率 P(Z) 为：

$$P(Z) = P_i e^{-V \cdot Z} \quad (3)$$

利用测量光纤损耗的剪断法理论来研究空心光纤的衰减特性，在此基础上进行断裂位置测量的分析、实验及应用的研究。由空心光纤性能可知，空心光纤衰减特性主要是由于光传播时受到空心处纤芯与空气所成界面影响而引起的，这一衰减特性沿轴向有规律地变化着。为考察空心内界面处对传光性能的影响程度，利用剪断法对三种纤芯填充物下的空心光纤进行了传光性能的测量，测试结果见表 2。

表 2　光纤传光衰减特性的测试数据

Table 2　Test data of pass-light attenuation by snipping optical fiber (1-length: m; 2-Luminous intensity: mw)

Medium	No liquid (air in it)		Adhesive (thin)		Adhesive (thick)	
	1	2	1	2	1	2
0	0.8	0.32	0.7	0.031	0.8	0.015
1	0.6	0.35	0.6	0.045	0.6	0.034
2	0.4	0.38	0.4	0.093	0.4	0.078
3	0.2	0.42	0.2	0.192	0.2	0.176

表 2 测试的数据表明，不同的纤芯填充物对空心光纤的传光性能有着不同的影响。其中填充物为空气的影响最小，填充物为浓胶液的影响最大，而且胶液引起的光强变化最显著，这都与表 1 的测试结论一致。这也说明空心光纤在不同纤芯填充物下的衰减特性不同，应用这一特性时必须是在同一纤芯填充物下作比较。

另外,根据表 2 测试的数据,利用式(2),可以计算出不同纤芯填充物下空心光纤的衰减常数 V,再利用式(1)就可以推出衰减系数 T。至此,就获得了空心光纤在不同纤芯填充物下的衰减特性。有了 V、T参数后,就可以根据传输光功率的变化计算出光纤断裂的具体位置。经计算得到空心光纤在不同纤芯填充物下的衰减常数 V见表 3。

表 3　空心光纤在不同纤芯填充物下的衰减常数

Table 3　Attenuation constant of hollow-center optical fiber in different media

Medium	No liquid(air)	Adhesive (thin)	Adhesive (thick)
1	0.448	3.727	4.092
2	0.430	3.662	4.122
3	0.453	3.647	4.104

表 3 的结果表明,同一纤芯填充物,分段剪断时计算出的衰减常数 V大致相同,计算结果间的最大误差在 5 % 的范围内。利用上面的结果取平均值作为不同纤芯填充物下的衰减常数 V,它为空心光纤应用于复合材料断裂位置的精确测量提供了一种切实可行的方法。

另外,从表 3 的计算数据中可以发现,不注液体的衰减常数与注入液体的有十分明显的差别。这一结果表明,光在胶液中的透光性能没有在空气中的好。另外,在理论上空心光纤的纤芯同普通光纤是一样的,它应具有普通光纤的传输特性,但实验结果表明,它具有的传光衰减特性远远大于普通光纤传光衰减特性的理论值,这说明空心内界面处影响着光的传输,空心光纤确实具有泄漏型光波导的性质。

3　断裂测量的实验研究

有了 V, T指标后,就可以根据埋入复合材料中的空心光纤的传输光功率计算出光纤断裂的位置。将空心光纤埋入在环氧树脂制成的圆棒结构中(如图 3)。

位号 1 表示空心光纤,位号 2 表示圆棒,L 为光纤的长度,L_0 表示剪断处离光检测器的距离,位号 c 处是特地开的槽,目的是让此处在拉伸时发生断裂,利用此方法可以较好地控制断裂的位置,从而来验证上述方法的可行性。

影响热固性树脂基复合材料力学性能的因素,不仅在于树脂基体、光学纤维材料及其界面的粘结状况,还取决于所应用的试验方法。由于在位号 c 处开了槽口,因此在拉伸时此处很容易发生断裂,在实

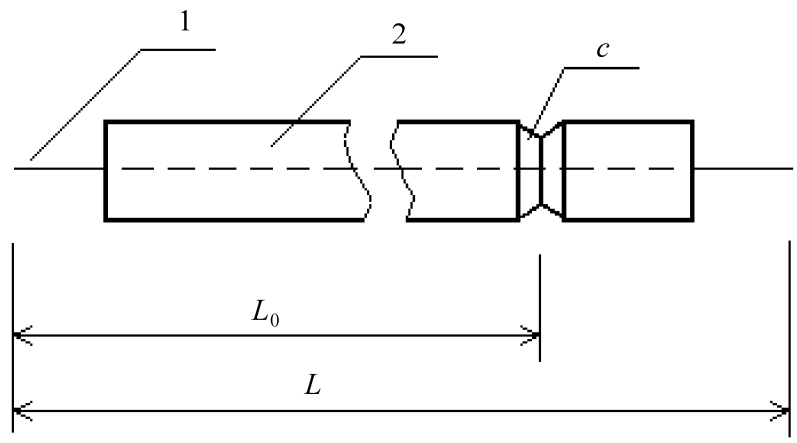

图 3　断裂位置测量的圆棒试件

Fig. 3　Round test sample for rupture place

验中,对圆棒试件进行了 5 次拉伸断裂测试[4],均在此处整体断开。实验中,采用的光纤长度均为 L= 2 m, 初始输出光强均为 0.59 mw,衰减常数 V取为 0.444,其上下误差控制在 3 % 左右。所测试的结果、实际断裂位置和断裂位置计算值列于表 4 中。有实用价值的研究方法见图 4。

表 4　测试的结果、实际断裂位置和断裂位置计算值(2 mw 的氦氖激光器)

Table 4　Test data, real rupture place and calculation of rupture place

Parameter	Luminous intensity of rupture place / mw	Calculation of rupture place / m	Real rupture place / m
1	0.656	1.761	1.75
2	0.742	1.484	1.50
3	0.832	1.226	1.25
4	0.925	0.987	1.0
5	1.034	0.736	0.75

由表 4 可以知道,断裂位置计算值和实际断裂位置非常接近,最大误差不超过 2 %。但实验中也暴露出一个缺点,在实际工程应用中大多不可能采用图 3 的测试方法,因为复合材料往往是很复杂的,不可能在每一个断裂处都很容易地测量输出的光强。针对这一实际存在的问题,对空心光纤应用于复合材料提出了图 4 的研究方法,即采用 X 或 Y 型光纤耦合器。最近的研究验证了图 4 所提研究方法的可行性。经过多次的试验研究,成功地制成了 Y 型光纤耦合器。从而实现了从同一端的两根光纤进出光的设想。一根作为入射光使用,另一根作为出射光使用。

经过多次反复的实验研究,终于试制成功了传光效果较好的Y型光纤耦合器(如图4中的位号1

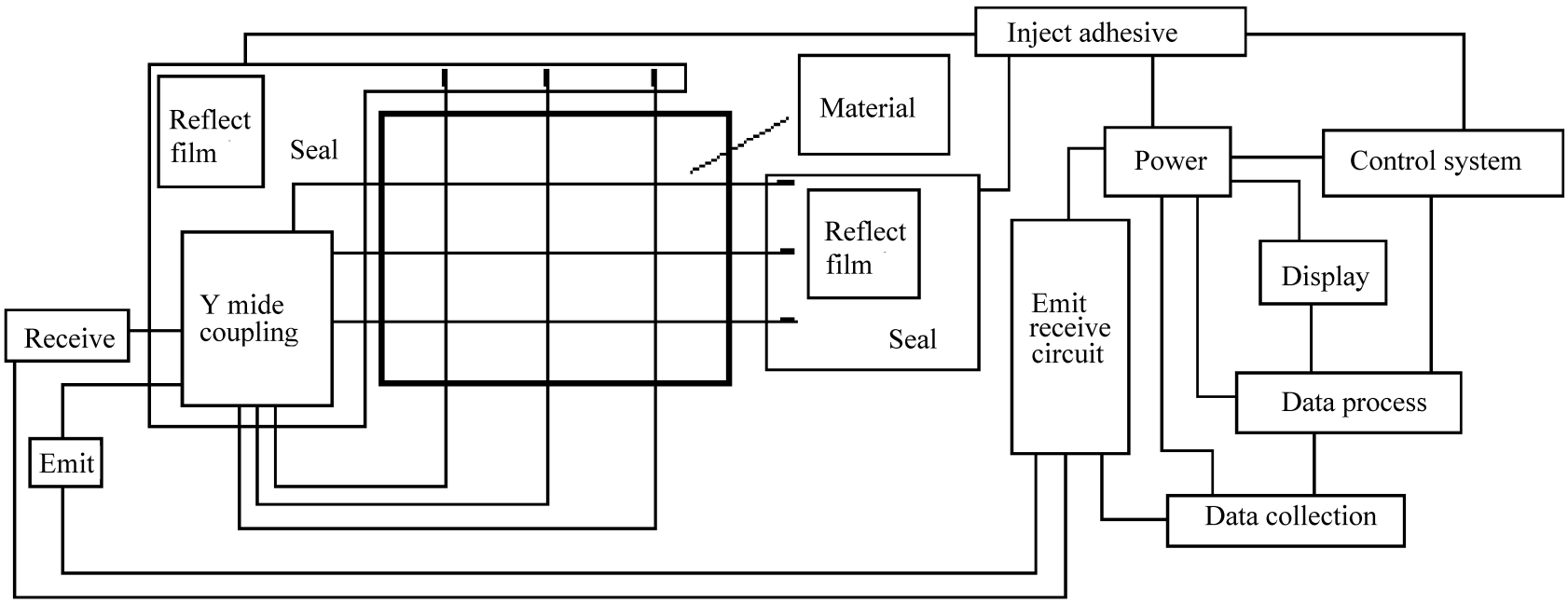

图 5　空心光纤应用于复合材料断裂位置测量的研究

Fig. 5　Research on the rupture place measurement of composite material by hollow-center optical fiber

处)，其耦合效率可达 50% ～70% 之间。同一根耦合器经多次反复测试，其传输特性是一个定值，据此，输出的光强变化就可认为是仅有光纤断裂产生的，而其它影响则可看成为固定值而不必去研究。

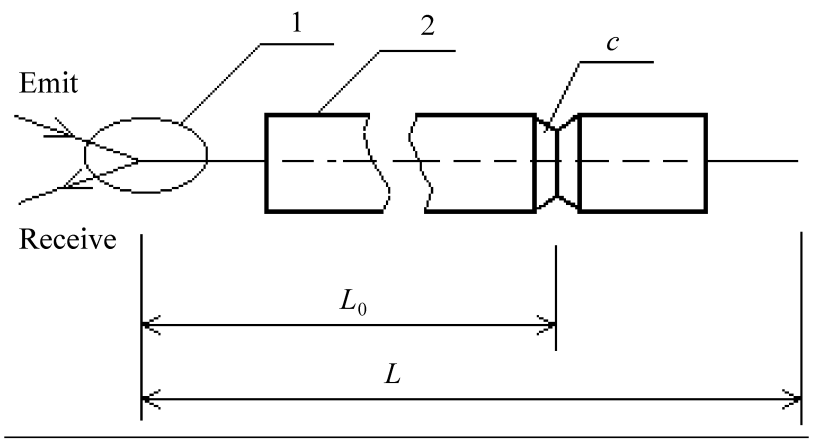

图 4　Y 型光纤耦合器用于断裂位置测量的方法

Fig. 4　Method of rupture place by Y coupling

表 5　利用 Y 型耦合器的测试结果、实际位置及计算值(10 mw 的 LD 激光器)

Table 5　Test data, real rupture place and calculation of rupture place by Y coupling

Parameter	Luminous intensity of rupture place/ μw	calculation of rupture place/ m	real rupture place / m
1	17.8	1.16	1.2
2	20.0	1.01	1.0
3	25.0	0.77	0.8
4	29.1	0.61	0.6
5	35.0	0.40	0.4

由表 5 可以看出，图 4 的方法在复合材料自诊断、自修复的研究中极具应用价值，而且还可以推广到其他工程应用中。此项研究的成功，为复合材料自诊断、自修复在结构的实现上提供了巨大的优越性，图 5 的工作不仅仅是复合材料断裂位置的测量，还包括复合材料自诊断、自修复的研究。

由图 5 可知，采用在空心光纤的一端镀反射膜，另一端用 Y 型光纤耦合器，使原本很复杂的系统得到简化。这不仅使光的输入输出共用一台仪器，而且使自修复的注胶系统得以极大的简化。空心光纤的一端镀反射膜是为了在性能监测时增强光信号的输出。

参考文献:

[1]　沃丁柱. 复合材料大全 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 10- 14.

[2]　Crispin Doyle, Gerard Fernando. Detecting impact damage in a composite material with an optical fiber vibration sensor system [J]. Smart Mater Struct, 1998, 7: 543- 549.

[3]　Yang S M, Jeng J A. Vibration control of a composite plate with embedded optical fiber sensor and piezoelectric actuator [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8: 393- 400.

[4]　Powell G R, Crosby P A, Wasters D N. In-situ cure monitoring using optical fiber sensors - a comparative study [J]. Smart Mater. Struct, 1998, 7: 557- 568.

[5]　Marja Englund, Ari Ipatti, Pentti Karioja. Fiber-optic security monitoring sensor [A]. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering [C]. 1997, 3099: 284- 299.

[6]　朱世国, 付克祥. 纤维光学原理与实验研究 [M]. 成都: 四川大学出版社. 1992. 31- 45, 164- 175.