复合材料学报 第21卷 第6期 12月 2004年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 21 No. 6 December 2004

文章编号: 1000-3851(2004)06-0075-07

光纤光栅应变传感器监测复合材料层板疲劳过程

武湛君[1,*], 万里冰[1,2], 张博明[1], 赵海涛[1]
(1. 哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001; 2. 北京交通大学 机电学院测控系, 北京 100044)

摘 要: 采用光纤光栅(FBGs)作为疲劳计监测了复合材料层板在等应力幅疲劳测试过程中的应变变化, 该变化反映了复合材料在疲劳过程中刚度的衰减规律。试验结果验证了FBGs传感器的疲劳监测能力。FBGs不仅能够埋入复合材料中反映材料疲劳过程中的刚度衰减, 而且具有良好的耐久性与稳定性, 在经过高达10^6次循环周次后, 依然保持良好的传感能力。FBGs作为一种有效的手段和工具, 为复合材料服役过程中的损伤监测、寿命评估以及材料破坏失效阶段的预警提供了可能。

关键词: 光纤光栅(FBGs); 循环加载; 疲劳损伤监测; 寿命评估
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

FATIGUE PROCESS MONITORING FOR COMPOSITE LAMINATES WITH FIBER BRAGG GRATINGS

WU Zhanjun[1,*], WAN Libing[1,2], ZHANG Boming[1], ZHAO Haitao[1]
(1. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The internal strain of composite laminates during a constant stress amplitude fatigue testing process was monitored with fiber Bragg gratings (FBGs) as a fatigue indicator to reveal Youngs modulus decrease of the specimen, which is a direct index of damage. It is demonstrated that FBGs can not only be embedded in composite structures to detect fatigue damage during fatigue process, but also with excellent durability compared with other sensors such as foil gauges, which is most frequently used in strain measurement. After 1 million cycles, the FBGs can still keep good sensibility. It can be concluded that it is a novel way to monitor, evaluate and give crash alert for the health state of composite structures during their whole service life with FBGs as a fatigue indicator.

Keywords: fiber Bragg gratings; cyclic loading; fatigue damage detection; life estimation

纤维增强树脂基复合材料(FRP)由于具有比强度高、比刚度大、寿命长、结构可设计等众多优点, 在航空、航天、汽车、船舶等工业中获得了大量的应用。在工程应用中, 疲劳载荷导致的损伤以至破坏是结构失效的重要原因之一。与金属材料相比, 复合材料的内部微结构及疲劳损伤机理复杂得多。复合材料的损伤模式主要包括基体开裂、纤维/基体界面脱胶、分层以及纤维断裂等。它们在循环加载中经常同时存在, 使人们从微观角度定量研究疲劳损伤更加困难, 目前的研究大多是宏观唯象的[1]。

宏观上材料的剩余强度和剩余刚度与材料的疲劳损伤密切相关, 用剩余强度来度量损伤的程度具有直观的特点, 但实验测量十分费时费力, 并且一个试件仅能得到一个实验数据点, 分散性较大[2,3]。剩余刚度可以在疲劳实验过程中连续测量, 且不会影响材料的性能, 它随着材料内部损伤的不断积累而单调下降, 因此是一个非常有潜力的宏观无损检测参数。剩余刚度的衰减在材料的实际服役过程中则体现为在设计载荷作用下, 材料的变形随着损伤的积累而逐渐加大, 即可以通过连续监测结构在服役期间的应变变化描述材料或结构在使用过程中的损伤状态, 进而评估材料的疲劳寿命。用剩余刚度来描述疲劳损伤的主要缺点是剩余刚度

收稿日期: 2003-11-17; 收修改稿日期: 2004-03-31
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372027)
通讯作者: 武湛君, 副教授, 研究方向: 智能复合材料与结构 E-mail: wuzhj@hit.edu.cn

对疲劳损伤不十分敏感，因此，高灵敏度、高可靠性、抗疲劳性能优异的应变传感器成为服役期材料剩余刚度监测和疲劳寿命预报的关键。

光纤传感器是近年来发展起来的一种智能化传感器元件，利用光纤传感器对复合材料结构的成型工艺过程及服役过程的监测已有很多报道[4~6]。本文中利用复合材料固化监测后仍然保持着良好应变传感能力的光纤布拉格光栅传感器(FBGs)，在控制载荷疲劳测试中监测了材料内部的应变变化以及刚度的衰减，为将光纤光栅传感器应用于复合材料服役期损伤监测与疲劳寿命预报进行了有益的探索和尝试。

1　疲劳过程中的循环应变

由复合材料疲劳剩余刚度理论知，在交变载荷作用下，随着复合材料结构疲劳损伤的形成、扩展直到最后结构疲劳破坏失效，材料或结构的刚度呈连续下降的趋势。在控制载荷条件下，疲劳过程中结构刚度的衰减可以通过结构最大应变的变化反映出来，图1 为文献[7] 给出的在控制载荷条件下层合板最大应变 ε_{max} 随循环周次变化的曲线。

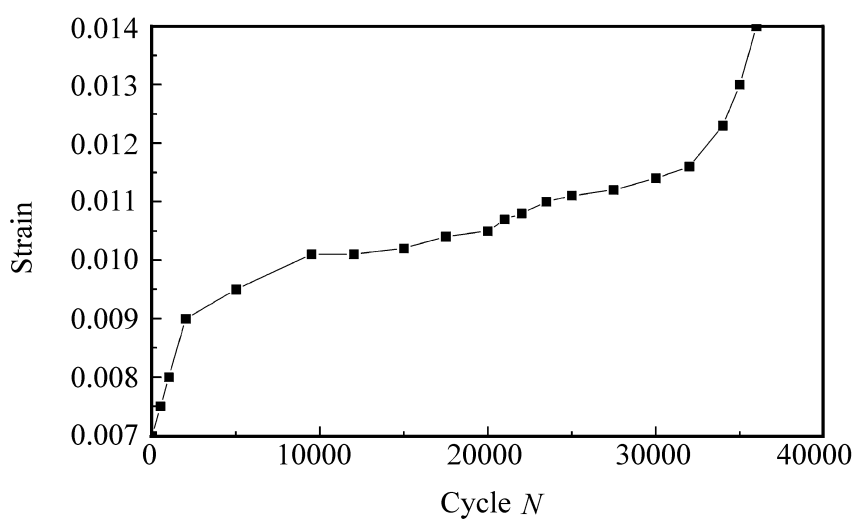

图1　层合板的疲劳循环最大应变

Fig. 1　Maximum strain vs. fatigue loading cycles

从最大应变与疲劳循环周次的关系曲线能够看出，在定载荷控制条件下，复合材料试件在疲劳过程中的最大应变单调连续变化，最大应变变化曲线与层合板刚度衰减曲线相类似，也可以分为三个阶段。在第一阶段，最大应变绝对值快速增长，但增长速率逐渐降低；随后应变变化进入线性增长阶段，这一阶段占总循环周次的大部分；在最后阶段，因为层合板产生分层损伤，最大应变迅速增长，直到试件最后产生疲劳破坏。层合板疲劳过程中最大应变变化三个阶段和刚度衰减的三个阶段具有明显的对应关系，二者变化规律亦近似，都呈现快速- 平缓- 快速的变化趋势。因此，纤维增强树脂基复合材料层合板疲劳过程中材料剩余刚度的衰减可以由循环最大应变的变化来描述。

以疲劳模量 $E(N) = \sigma(N)/\varepsilon(N)$ 作为层合板疲劳过程中的剩余刚度，则疲劳剩余刚度的衰减可以表示为

$$\frac{E(N)}{E(0)} = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon(N)} \Big/ \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon(0)} = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(N)} \qquad (1)$$

在疲劳过程中，如果将传感器粘贴在层合板表面或埋入其内部在线测量应变变化，就可以实时获得复合材料层合板的疲劳剩余刚度衰减状况。通过监测循环应变监测层合板剩余刚度衰减具有无损检测的优点，可以在疲劳过程中连续测量，而不会影响材料的性能，使复合材料结构服役期间的疲劳损伤状态在线评估成为可能。

2　布拉格光纤光栅

光纤布拉格光栅是一种波长选择反射器，它所反射的中心波长的数学表达式为

$$\lambda_B = n_{eff}\Lambda \qquad (2)$$

式中：Λ 是光栅的周期；n_{eff} 是纤芯的有效折射率。由上式可以看出，凡是能够导致光纤光栅有效折射率变化或者光栅周期变化的物理量均能引起布拉格波长的变化。当光纤布拉格光栅受到外力作用产生应变或温度发生变化时，光栅周期将发生变化，同时有效折射率也会发生变化。不考虑温度变化时，对式(2) 求导得出

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2}\left[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})\right]\right)\varepsilon \qquad (3)$$

式中：$P_{1i}(i = 1,2)$ 为单模光纤的弹光系数；ν 是光纤材料的泊松比；ε 是光纤产生的轴向应变。记

$$P_{eff} = \frac{n_{eff}^2}{2}\left[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})\right] \qquad (4)$$

P_{eff} 称为光纤的有效弹光系数，对于石英光纤，$P_{eff} \approx 0.22$[8]，所以有

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_{eff})\varepsilon \approx 0.78 \times 10^{-6}\varepsilon \qquad (5)$$

式中：$\Delta\lambda_B$ 为反射中心波长偏移量；ε 为光纤光栅的应变。对于石英光纤，用于应变或温度测量时，其系统框图如图2 所示。

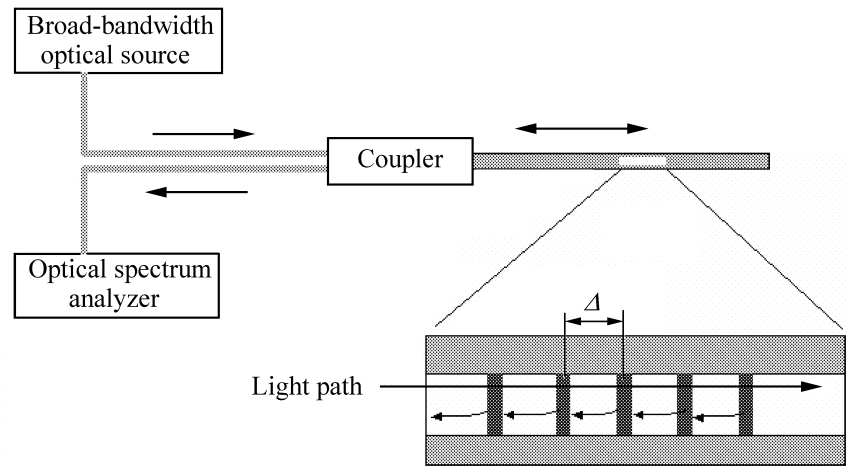

图2　光纤光栅系统框图

Fig. 2　Systematic diagram for fiber Bragg gratings

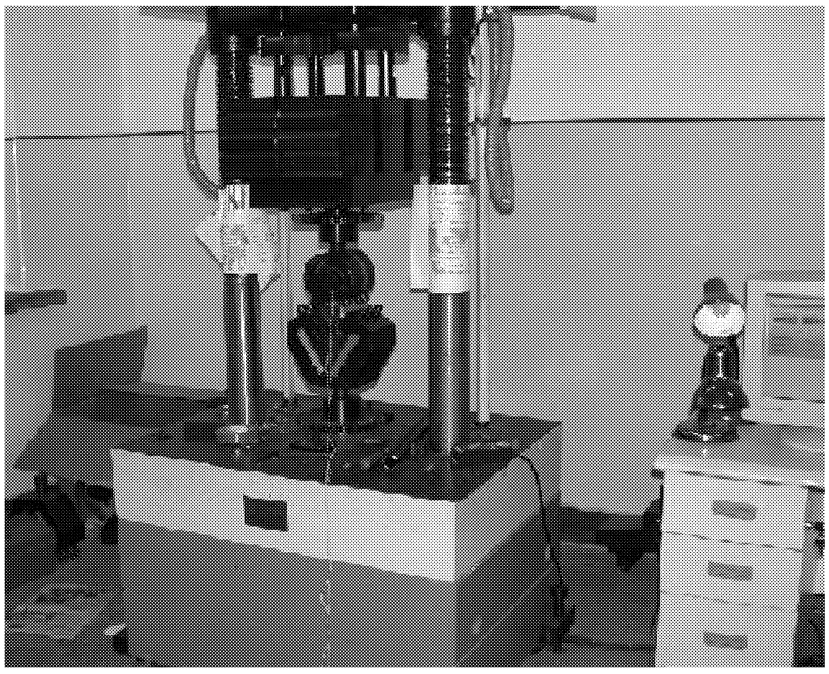

图3　层合板疲劳实验装置

Fig. 3　Photograph of the fatigue testing system for composite laminates

3　光纤光栅监测复合材料疲劳

3.1　试件制备

采用T300/环氧5222A预浸料和热压釜真空袋成型工艺制作复合材料层板，预浸料各铺层尺寸为300 mm×300 mm。进行手工铺层时将光纤光栅按预先设计的位置和方向埋于预浸料铺层中，固化结束后应测量光纤光栅反射波长信号，以判断其经历高温高压后是否保持应变传感能力。本研究中共制作了6个埋光纤光栅的复合材料试件，其中铺层方式为$[0]_{16}$的试件4个，铺层方向为$[0/90]_{4S}$的试件2个，但正交铺层的一个试件在切割操作过程中光信号消失，可能是光纤在试件端部出口处断裂所致。试件长250 mm，宽15 mm，试件的两端均粘贴玻璃钢加强片。

3.2　实验设备

采用PLG-200C高频疲劳试验机对复合材料试件进行疲劳加载，在拉-拉疲劳过程中监测埋光纤布拉格光栅传感器复合材料试件的应变变化。光纤光栅的反射光信号由布拉格波长解调系统FBG-IS采集，疲劳实验装置如图3所示。

3.3　静态测试

疲劳实验前为了获得材料的应力-应变关系、破坏强度等参数，为疲劳测试应力水平的确定提供参考，对同一批制作的层合板进行了静态拉伸实验。试件表面粘贴电阻应变片测量应变，分级施加载荷，加载速度为2 mm/min，单向层合板和正交层合板的静态拉伸曲线如图4所示。实验测得$[0]_{16}$层合板(16层单向层合板)纵向极限拉伸强度为1270 MPa，$[0/90]_{4S}$层合板(16层正交层合板)极限拉伸强度为566 MPa。选择一个埋有光纤光栅的试件进行静态拉伸测试，拉伸过程中粘贴于试件

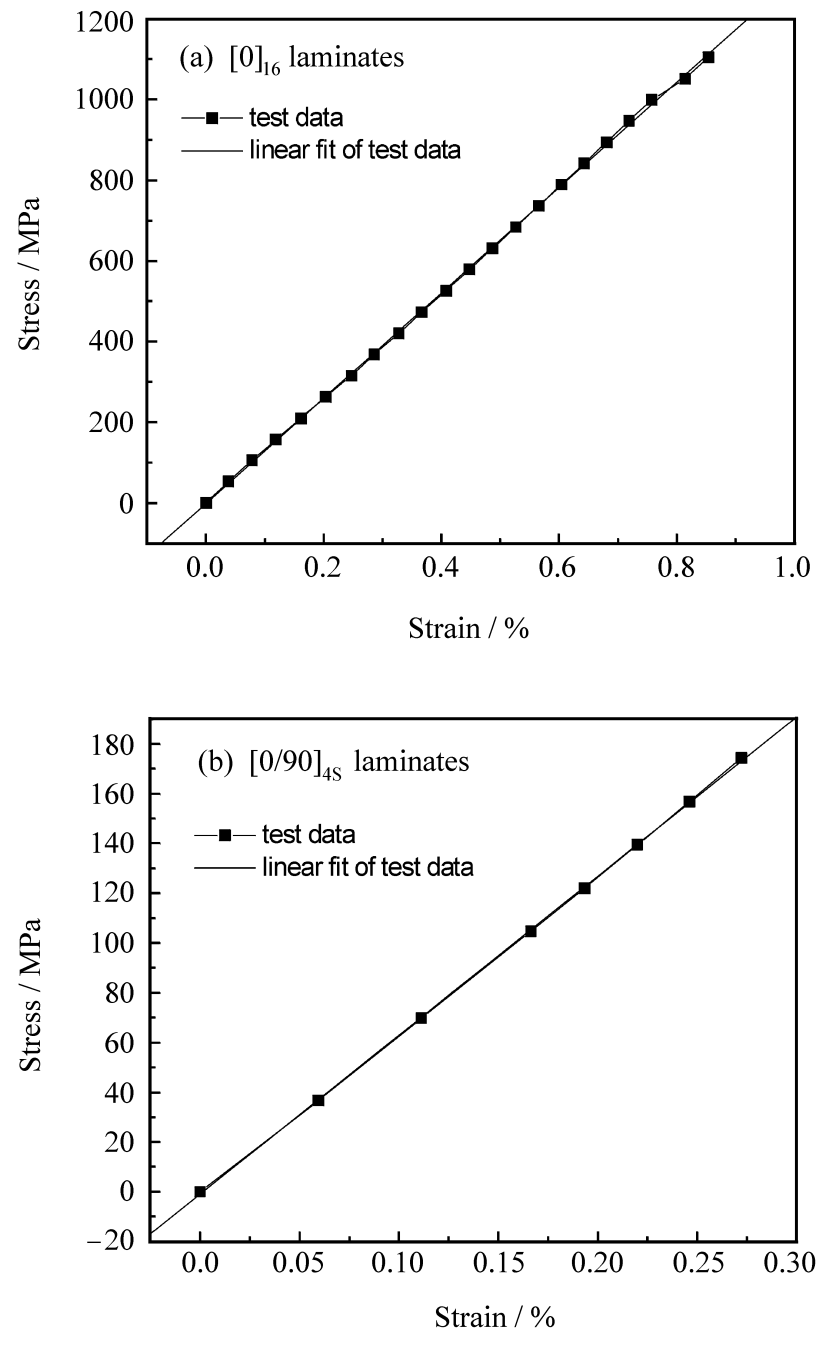

图4　静态拉伸试验结果

Fig. 4　Quasi-static tensile test results

表面的电阻应变片和埋于材料内部的光纤光栅分别测得的层合板应变变化如图5所示，可以看出，二

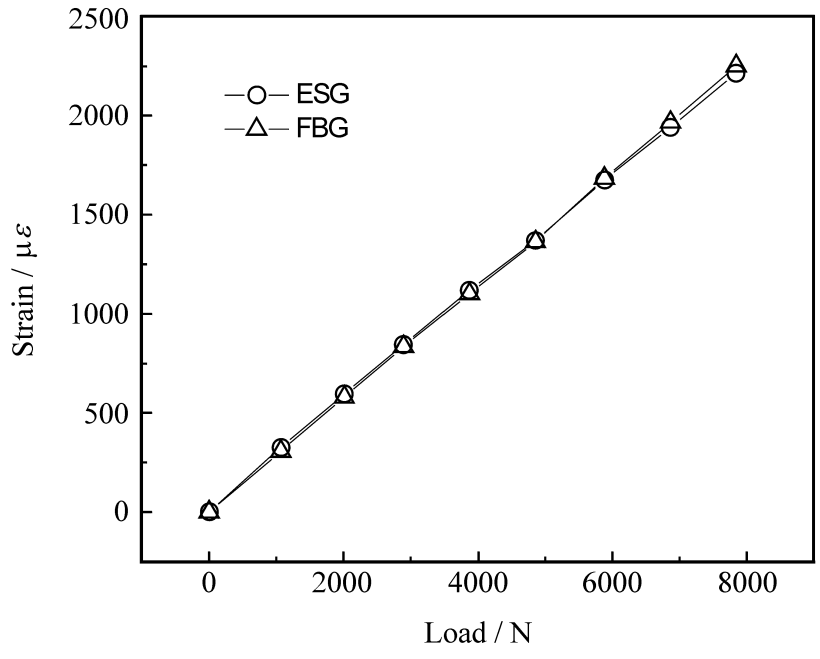

图5　应变片与光纤光栅应变测量的比较

Fig. 5　Comparison between strains measured by FBGs and electrical strain gauges (ESG)

者的实验结果曲线吻合良好，光纤布拉格光栅能够精确、有效测量复合材料层合板的内部应变。

3.4　层合板疲劳过程监测

3.4.1　单级加载层合板疲劳过程监测与分析

PLG-200C 高频疲劳试验机是基于共振原理设计的，在试验机卡头上安装复合材料试件并启动试验机，共振频率为66 Hz，采用控制载荷方式对试件进行疲劳加载，实验在室温空气中进行。疲劳监测过程中，交变载荷每循环5 万(或10 万)次，暂停疲劳加载，对试件进行静态加载，记录试件在最大载荷、最小载荷以及平均载荷时的布拉格反射波长信号，根据光纤光栅应变灵敏系数即可得到相应时刻的应变值。实验过程中为去除环境温度波动对应变测量的影响，设置一参考光栅作为温度补偿措施。

分别对编号为1#、2#和3#复合材料试件进行疲劳过程应变监测，试件铺层方向以及疲劳实验参数如表1 所示，表中应力比表示疲劳试验中最小应力与最大应力的比值。

1#和2#试件在疲劳过程中最大/平均/最小应变增量-循环次数曲线分别如图6 所示。从1#和2#试件的实验结果曲线可以看出，在控制载荷拉拉疲劳过程中，随着循环次数的增加，材料的最大/平均/最小应变均呈增加趋势。两个试件的铺层方式和所处应力水平虽然不同，应变变化规律却具有相似性。在疲劳初始阶段，应变增加较快，随后进入第二阶段，应变呈线性缓慢增长，并且这一阶段在总循环周次中占大部分。在疲劳测试中，对1#试件施加的应力水平较低，交变最大应力仅为层合板强度极限的40 %，所以1#的循环应变增长较缓慢，疲劳测试结束时(50 万次)最大应变的增量约为30 με。对2#施加的应力水平较高，交变最大应力为层合板强度极限的65 %，所以2#试件的循环应变增长较迅速，疲劳测试结束时(10^6 次)最大应变的增量也较大，达到了203 με。在对3#试件进行第一次静态拉伸的过程中，埋于材料内部的光纤光栅传感器光信号突然消失，应是埋于试件内的光纤断裂所致，断裂时光纤光栅测得的试件应变为6196 με。

根据光纤光栅测得的应变变化，以式(1)计算层合板疲劳过程中的归一化剩余刚度，则可以得到复合材料层合板的归一化疲劳剩余刚度($E(N)/E(0)$)衰减曲线分别如图7 所示。

光纤布拉格光栅测得的疲劳剩余刚度衰减曲线显示，层合板的疲劳剩余刚度在疲劳过程中逐渐衰减，在较低的应力水平时衰减较慢，在较高的应力水平时则衰减较快。当应力水平一定时，层合板疲劳剩余刚度衰减呈明显的阶段性，疲劳剩余刚度在疲劳的早期，衰减较为迅速，随后进入缓慢线性衰减阶段，衰减速率基本保持恒定，2 个试件的铺层方向和所施加的应力水平虽然不同，但都是在载荷循环次数约为10 万次时，刚度衰减进入线性的第二阶段。

3.4.2　两级加载层合板疲劳过程监测与分析

复合材料结构在实际服役过程中除了承受交变恒定幅值载荷作用外，还会承受多级交变载荷的作用，因此用光纤光栅监测了在非等幅两级疲劳加载情况下层合板的应变变化历程。非等幅两级疲劳加

表1　一级加载疲劳实验参数

Table 1　Experimental parameters for one-step loading fatigue tests

Sample	Lay up	Stress ratio	Maximum stress/ MPa	Average stress/ MPa	Minimum stress/ MPa
1#	$[0]_{16}$	0.2	495 (40 % σ_b)	296	97
2#	$[0/90]_{4S}$	0.2	370 (65 % σ_b)	221	73
3#	$[0]_{16}$	0.2	800 (63 % σ_b)	480	160

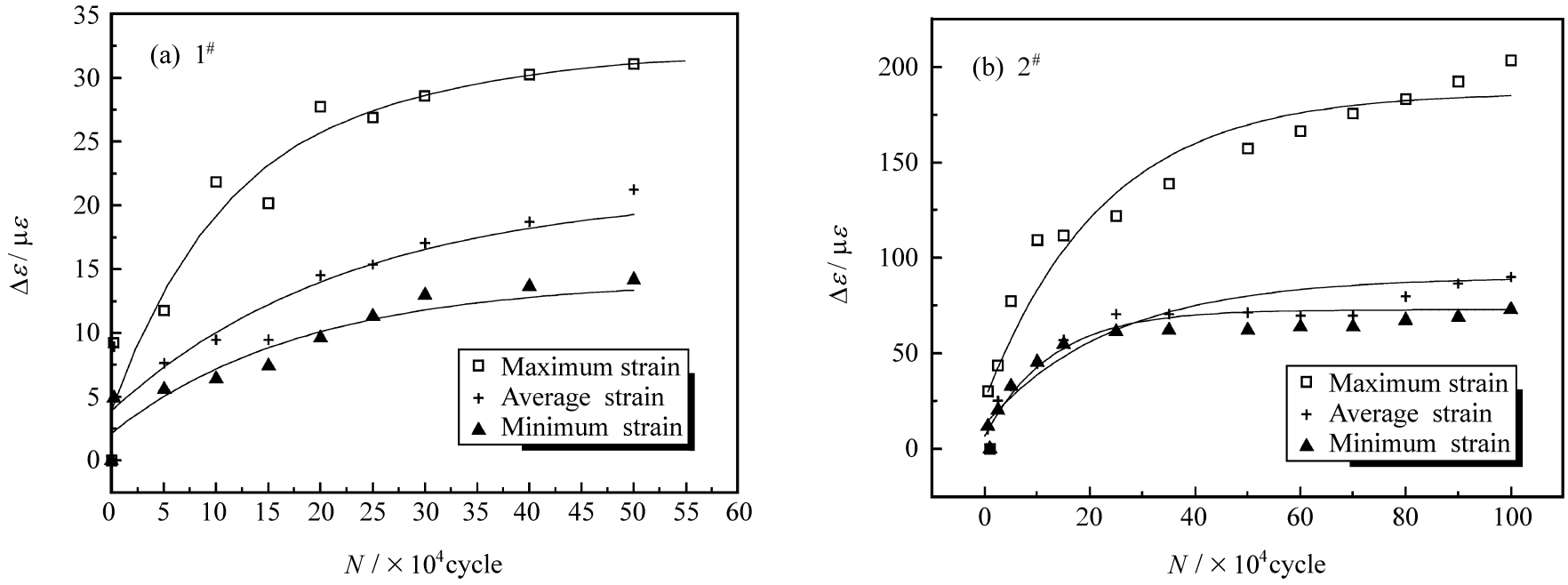

图6　应变增量随循环次数变化曲线

Fig. 6　Strain increment vs. loading cycle curves

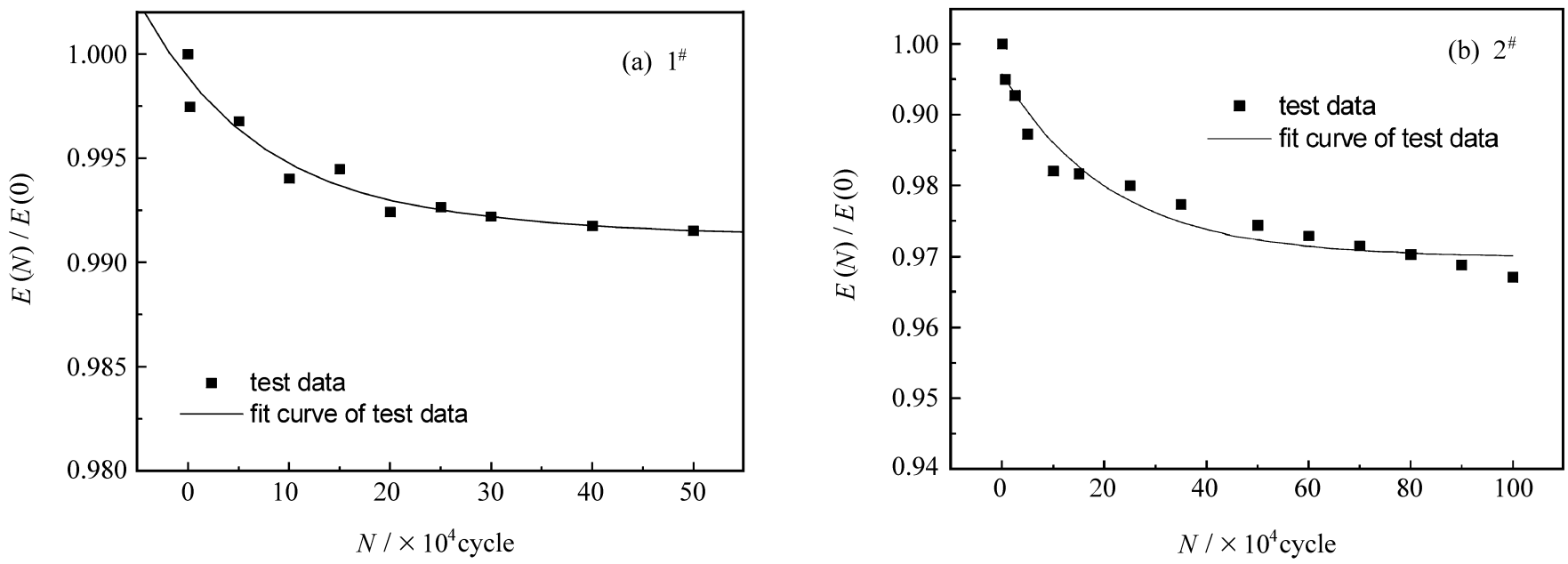

图7　疲劳剩余刚度衰减曲线

Fig. 7　Stiffness degradation curves of the specimen during fatigue test

载是把经过一定循环周次的试件卸载，然后改变疲劳载荷幅值直至试件疲劳破坏。对编号为4# 和5# 的复合材料试件进行两级加载疲劳过程应变监测，试件铺层方向以及实验参数如表2 所示，实验结果曲线分别如图8 所示。

在对4# 试件进行两级加载疲劳实验过程中，第一级应力水平为601 MPa，当第一级载荷循环次数达到30 万次的时候，改变载荷进行第二级加载，第二级应力水平为659 MPa，当累积循环次数达到591121 次时，4# 试件发生纵向开裂。对5# 试件施加的第一级疲劳应力水平为668 MPa，在第一级载荷循环次数达到15 万次的时候，进行第二级加载，第二级应力水平为734 MPa，当累积循环次数达到436853 次时，试件产生纵向开裂。根据光纤光栅测得的应变变化，以式(1) 计算层合板疲劳过程中的剩余刚度，则可以得到层合板在两级加载疲劳过程中的归一化疲劳剩余刚度衰减曲线分别如图9 所示。

从两个试件的实验结果曲线可以看出，在两级加载拉-拉疲劳过程中，随着载荷循环次数的增加试件的最大应变逐渐加大，应变的变化揭示了层合板疲劳过程中损伤的积累以及刚度衰减的过程。当应力水平改变时，层合板的应变曲线也相应地出现阶跃。在每一级应力水平循环过程中，层合板的剩余刚度衰减都可以分为两个阶段，第一阶段层合板剩余刚度衰减较快，第二阶段呈线性较慢的衰减。在两级疲劳加载实验中，由于两个试件的铺层方向均为$[0]_{16}$，二者最后的宏观疲劳损伤形式相同，都是产生了较大的纵向裂纹，但试件并未断裂。当试件疲劳损伤累积出现较大的宏观纵向裂纹后，应

表2　两级疲劳加载实验参数

Table 2　Experimental parameters for two-step loading fatigue tests

Sample	Lay up	Stress ratio	Maximum stress/ MPa	Average stress/ MPa	Minimum stress/ MPa
4#	$[0]_{16}$	0.2	601 (47 % σ_b)	360	120
		0.1	659 (52 % σ_b)	363	66
5#	$[0]_{16}$	0.1	668 (53 % σ_b)	366	66
		0.1	734 (58 % σ_b)	403	73

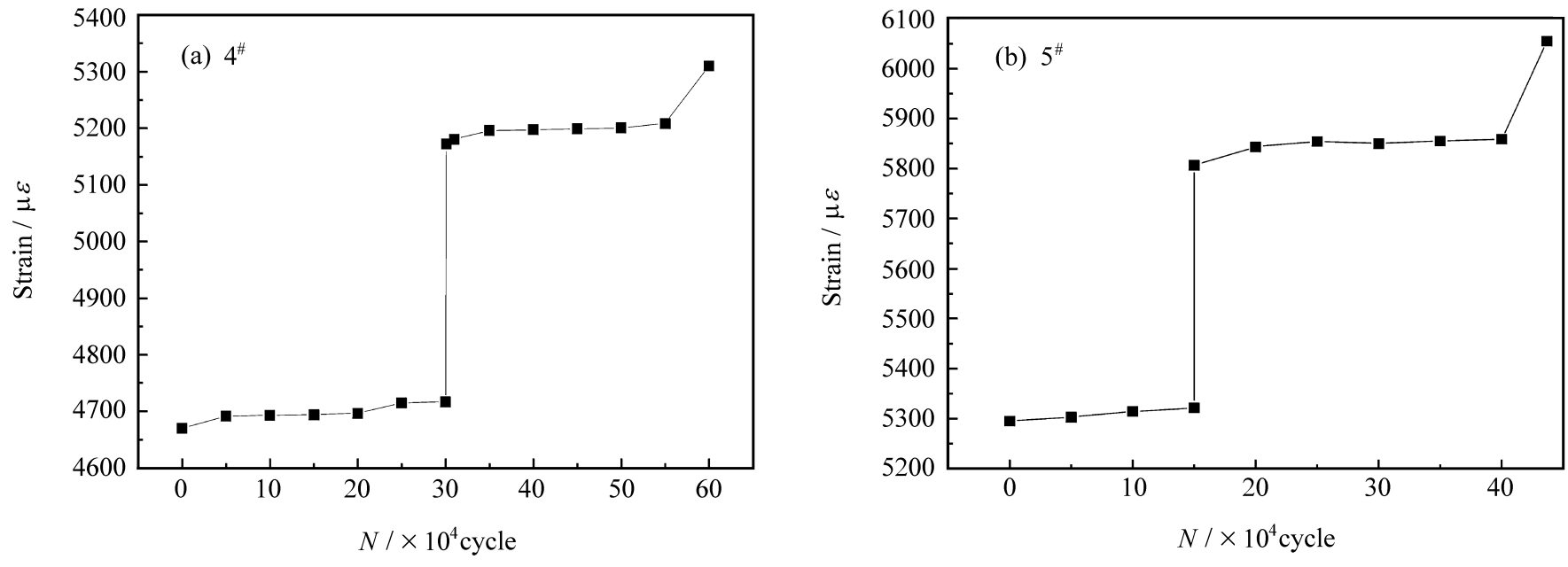

图8　最大应变-循环次数曲线

Fig. 8　Maximum strain vs. loading cycle curves

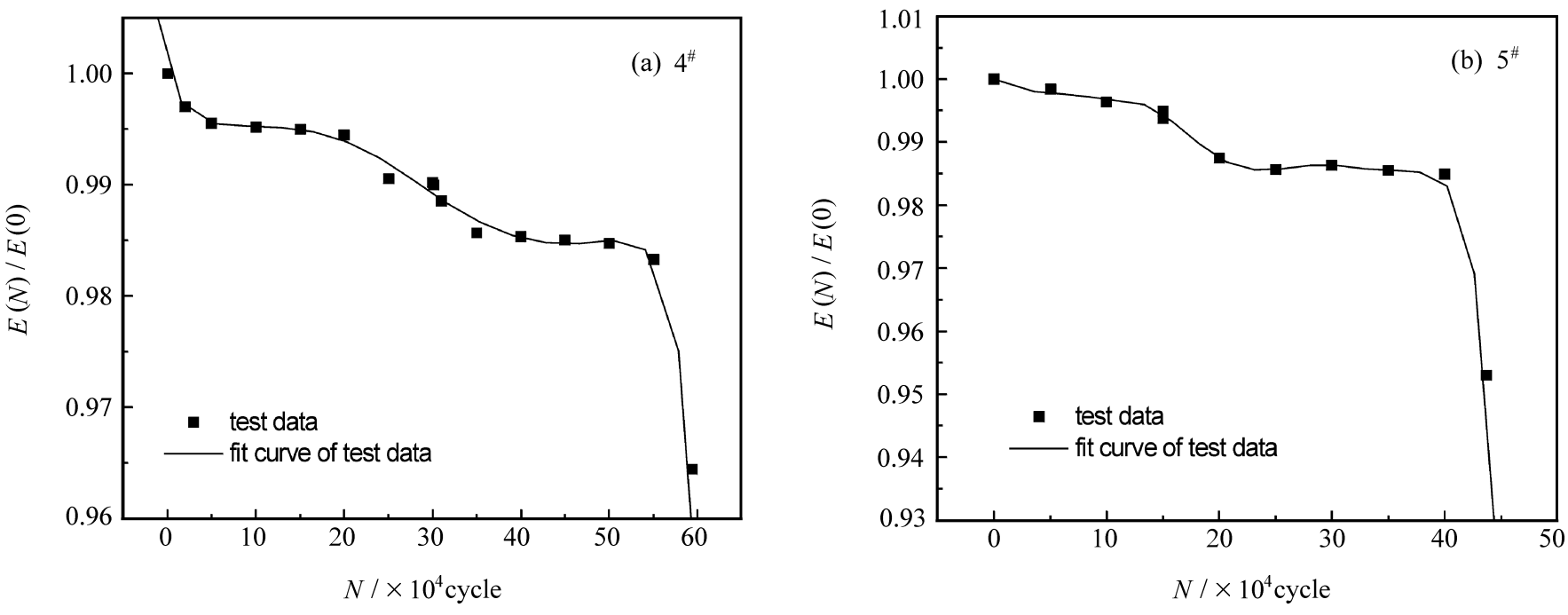

图9　疲劳剩余刚度衰减曲线

Fig. 9　Stiffness degradation curves of the specimen during fatigue test

变监测曲线有一突变，最大循环应变显著增加，此时层合板剩余刚度衰减约为5 %。光纤光栅传感器在两级疲劳加载实验过程中保持良好的应变监测性能，当层合板出现宏观疲劳损伤时，光纤光栅显示出对可能的结构疲劳破坏失效具有预警能力。

3.4.3　光纤光栅的抗疲劳性能

在复合材料结构疲劳监测过程中，由普通单模石英光纤制造的光纤光栅要经历上百万次的循环载荷。为了获得光纤光栅传感器本身的抗疲劳能力，以评价其在复合材料层合板整个疲劳监测过程中的应变传感性能，本文中在应用光纤光栅监测层合板疲劳实验结束后，在试件表面重新粘贴电阻应变片，并对其进行静态拉伸。选取经历了50 万循环周次的1# 试件、100 万循环周次的2# 试件，在日

本半岛试验机上对试件进行加载，在试件拉伸过程中同时记录应变仪指示值和布拉格波长漂移值，由应变片和光纤光栅分别测得的应变-载荷曲线如图10 所示。

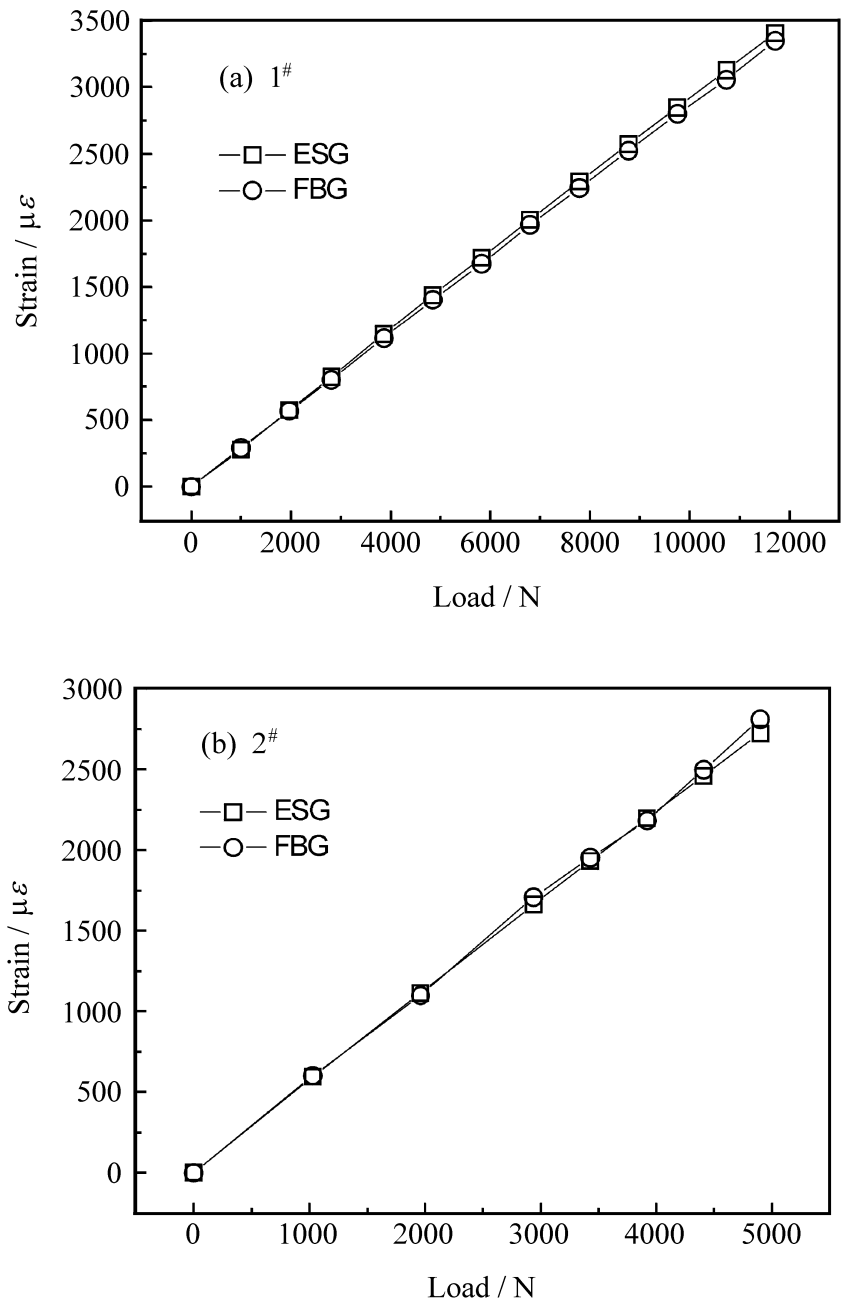

图10 疲劳加载试件的应变-载荷曲线

Fig. 10 Strain-load curves of specimens after cycle loading

试件的静态拉伸实验结果曲线显示，经历了高达50 万次(1# 试件) 和100 万次(2# 试件) 交变载荷后，埋于复合材料内部的光纤光栅应变传感性能保持完好，其应变测量值与电阻应变片的电阻测量值吻合良好。实验证明，光纤布拉格光栅传感器具有很强的抗疲劳能力，在层合板的整个疲劳监测过程中保持完好的应变传感性能，能够满足复合材料结构服役期间疲劳状态实时监测的要求。

4 结 论

复合材料疲劳过程中由于损伤的积累，层合板的剩余刚度逐渐衰减，控制载荷条件下层合板循环应变的连续增长则反映了这一刚度衰减过程。由于可以埋设在复合材料内部，光纤光栅传感器直接获得了疲劳过程中材料内部的应变变化历程，即获得了层合板由于疲劳损伤积累导致的刚度衰减过程。对于正在服役期间的复合材料结构，以埋于材料内部的光纤光栅在线监测的结构应变变化为基础，能够对层合板疲劳损伤状态作出评估，并对结构的疲劳破坏失效作出预警。

实验结果显示，光纤光栅克服了传统的电阻应变片在疲劳测试中容易与被测结构脱粘的缺点，经过高达10^6 次(2# 试件) 循环后，传感器依然保持良好的应变传感能力。

光纤布拉格光栅传感器作为一种崭新的手段和工具，能够埋于复合材料内部监测循环应变，为复合材料结构服役过程中的在线损伤监测、剩余寿命预报以及材料破坏失效的预警提供了可能。

参考文献:

[1] 翟洪军，姚卫星. 纤维增强树脂基复合材料的疲劳剩余刚度研究进展[J]. 力学进展. 2002, 32(1): 69-80.

[2] 顾 怡，姚卫星. 疲劳加载下纤维复合材料的剩余强度[J]. 复合材料学报. 1999, 16(3): 98-102.

[3] 顾 怡. 复合材料拉伸剩余强度及其分布[J]. 南京航空航天大学学报. 1999, 31(2): 164-171.

[4] Zhang B, Wu Z, Wang D, et al. An investigation of multi-functional fiber optic sensor in smart composite [J]. Optical Engineering, 2001, 4: 612-617.

[5] 武湛君，张博明，王殿富，等. 基于折射率变化的复合材料固化在线监测研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 87-91.

[6] 武湛君，张博明，王殿富，等. 用于FRP 固化在线监测的光纤微弯压力传感器[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 125-129.

[7] 轩福贞，孙树勋，汤红卫，等. 两级载荷下层合板疲劳与寿命预测[J]. 应用力学学报. 1998, 15(1): 90-95.

[8] Davis M A, Bellemore D G, Berkoff T A, et al. Design and performance of a fiber Bragg grating distributed strain sensor system [J]. SPIE, 1995, 2446: 227-231.