

工学博士学位论文

基于光纤传感技术的复合材料结构  
全寿命健康监测研究

赵海涛

哈尔滨工业大学

2008 年 7 月

国内图书分类号：TB12

国际图书分类号：621

## 工学博士学位论文

# 基于光纤传感技术的复合材料结构 全寿命健康监测研究

博 士 研 究 生：赵海涛

导 师：王殿富教授

副 导 师：张博明教授

申 请 学 位：工学博士

学 科 、 专 业：工程力学

所 在 单 位：航天工程与力学系

答 辩 日 期：2008 年 7 月 29 日

授 予 学 位 单 位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TB12

U.D.C.: 621

Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering

**RESEARCH ON WHOLE LIFE HEALTH  
MONITORING OF COMPOSITES  
STRUCTURE BASED ON FIBER OPTIC  
SENSING TECHNOLOGY**

<b>Candidate:</b>	Zhao Haitao
<b>Supervisor:</b>	Prof. Wang Dianfu
<b>Associate Supervisor:</b>	Prof. Zhang Boming
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Doctor of Engineering
<b>Specialty:</b>	Engineering Mechanics
<b>Affiliation:</b>	Center for Composite Materials
<b>Date of Defence:</b>	July, 29, 2008
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	Harbin Institute of Technology

## 摘要

先进复合材料结构广泛地应用于航空航天领域，为了预防结构的突然性破坏，降低维护成本，将健康监测技术应用于复合材料结构是一种行之有效的方法。光纤传感器与复合材料的兼容性好，抗干扰能力、耐腐蚀能力强，以光为传输信号，被广泛应用于埋入复合材料结构进行实时健康监测。

本文以光纤传感器为监测工具，面向复合材料制造过程、服役过程，以提高复合材料产品合格率，降低复合材料的维护成本为目标，建立复合材料结构制造—服役全寿命健康监测体系，来实时监测可重复使用复合材料结构的制造、服役、损伤、破坏全寿命过程。本文针对该主题，开展了如下研究工作：

1. 利用粘度信息实现了复合材料固化过程加压时机的准确控制，提高了材料制造过程的质量。通过等温粘度试验，经数据拟合获得了 HD03 环氧树脂的化学流变方程。将光纤布拉格光栅埋入到 T300/ HD03 复合材料中，监测固化过程的温度历程，将监测到的温度信息带入到树脂的化学流变方程中，实时地计算出粘度值，并选择合适的粘度值对复合材料制造施加压力。以层板厚度和残余应变为质量参数，比较了不同加压时机对层板厚度，残余应变，固化过程应变变化的影响，得到了制作质量较高层板加压时机的粘度范围。以埋入光纤光栅监测温度，转换为可作为加压时机选择参数的粘度值，能有效地控制加压时机，完成复合材料制造闭环控制，提高了复合材料的质量，实现了复合材料制造过程的监测。

2. 基于光纤光栅传感器监测了复合材料和铝板的共固化过程，受温度载荷影响下的变形过程，为两种不同材料共同使用提供了实验数据基础。埋入光纤光栅传感器实时监测纤维缠绕单向板的固化过程，以及复合材料和铝板之间界面的固化应变。由于复合材料和铝板的热力学性能不同，在固化过程中复合材料内部与界面之间存在着差异，在固化过程后期会出现分离的现象，释放一部分热应力。将光纤光栅埋入复合材料与铝板的胶接件，复合材料外表面和铝板外表面粘贴光栅，在温度载荷下监测三处界面的应变变化历程，并与数值模拟结果进行了对比。胶粘剂在温度载荷下性能的变化，对复合材料表面的光栅监测结果影响较大，使监测值和模拟值有所不同。光纤光栅的可埋入性为两种不同材料的界面处应变变化提供了手段，监测数据提高了整体结构的安全性。

3. 通过有限元软件对复合材料压力容器的分析, 揭示了压力容器的破坏机理, 为健康监测传感器的布设提供了依据。基于 ANSYS 有限元软件建立了复合材料压力容器模型, 真实模拟了缠绕角度和封头变厚度, 用应变测量和变形测量验证了有限元模型的准确性。应变测量使用电阻应变片, 整体变形测量选择压力容器桶身的螺旋方向, 使用 SMARTape 传感器进行监测; 利用 ANSYS 提供的路径功能, 实现了预报值与监测量的对比, 两者一致。在此模型基础上, 以 Hashin 失效准则和最大应力准则为判断依据, 完成了复合材料压力容器渐进损伤分析, 预测了爆破压力。建立有限元模型对结构进行分析, 并通过实验进行验证, 为健康监测提供了分析基础。

4. 开发了一种干涉型光纤传感器, 联合光纤光栅, 实现了可重复使用复合材料结构服役过程的健康监测, 为飞行器结构重要组成部分的全寿命健康监测奠定了基础。基于迈克尔逊干涉原理研制了一种适用于复合材料结构长距离监测的光纤传感器, 利用微给进装置检验了传感器的拉伸响应, 变形量与解调仪读数相一致; 考察了传感器监测损伤的能力, 以及温度响应特性。利用光纤光栅传感器监测结构点的应变, 干涉型光纤传感器监测结构整体变形, 建立了局部—整体全方位复合材料压力容器健康监测系统, 监测了复合材料压力容器的低温工作性能, 静水压力性能, 将监测结果同有限元分析、应变片结果进行了对比, 三者相符合。监测了复合材料压力容器的爆破过程, 验证了监测系统察觉结构破坏的能力。完成了压力容器结构健康监测的研究, 其可行性推动了飞行器上其它复合材料结构的实时全寿命监测。

**关键词** 复合材料; 光纤传感技术; 健康监测; 压力容器; 渐进损伤

## **Abstract**

Advanced composite structure has been applied broadly in aerospace. In order to avoid structure being destroyed and reduce cost of maintenance, structure health monitoring has been an effect method. Good compatibility with composite, excellent ability of anti-interference and corrosion resistant and acting light as signal which make fibre optic sensors be applied to act as embedding sensors into composite to monitor the structure in real-time.

This paper built a whole life system of structure health monitoring with fibre optical sensors for composite manufacture and service process for the goal of improving products percent of pass and reducing cost of maintenance. Studies as follows have been developed.

1. Quality of manufacture has been upgraded by the information of viscosity which decides the best pressure-applied moment for the process of composites cure. Chemo-rheological equation of HD03 epoxy resin was acquired by constant temperature experiment and data fitting. When FBG sensors were embedded into T300/HD03 composites, temperature evolution could be monitored during cure. Substituting temperature form monitoring into the chemo-rheological equation, real-time viscosity number can be calculated from which a suitable pressure-applied moment can be choosed. Influences to thickness of laminate, residual strain and strain variation of cure have been compared under different pressure-applied moment and the viscosity range for best pressure-applied moment has been acquired. By means of embedding FBG sensors monitoring temperature, viscosity number can be transferred from temperature to choose best pressure-applied moment which can effectively control pressurization moment and complete closed-loop control of composite manufacture. Qualities of composites are improved and monitoring of composites manufacture process is realized.

2. Experimental data was provided for different materials in common use by FBG sensor-based monitoring common cure of composites and aluminum plate and deformation process under temperature load. FBG sensors were embedded to monitor the cure of filament wound unidirectional laminate and the strain between composite and aluminum plate. Due to different mechanical property of

composite and aluminum, the inner and interface of composite is different during the cure and in the final time of cure detachment arises and some quantity of heat deliveries. Embedding a FBG into composites and stick two FBGs on the surface of composite, under the temperature course, the strains of the three interfaces were monitored. The results of monitoring and numerical simulation were compared. The different properties under different temperature of the glue have great influence on the results of composite surface monitoring. The embedding ability of FBG sensors provides a tool to monitor the interface between different materials and the data from monitoring improves the safety of integral structure.

3. By the finite element software analyzing on composite pressure vessel, failure mechanism of pressure vessel was disclosed and the law of monitoring sensors placement was provided. A finite element model of composite pressure vessel has been built by ANSYS finite element software. In the model, angle of winding and variation thickness of dome was same as the true manufacture and accuracy of the model has been verified by monitoring the strain and the deformation. Strain was measured by strain gauges and helix direction of the cylinder was selected as deformation of the whole cylinder which was monitored by SMARTape sensor. It was realized the comparison between forecasting value and monitoring value by the path function of ANSYS. The forecasting value and the monitoring value matches good. On the base of this model, according to Hashin failure criterion and maximum stress criterion, course of damage analysis was proceed and bursting pressure was predicted. By building finite element model to analyze the structure and through experiments to verify, analyzing base was provided for health monitoring.

4. A kind of interference fibre optic sensors has been developed and together with FBG sensors real-time health monitoring of reusable composite structure can be realized. Base for whole life health monitoring of aircraft important parts can be built. A fibre optic sensor was developed for composite structure under long distance monitoring based on Michelson's interferometer. Tension response of the sensor was verified by micro-move device whose deformation was concordance with the reading of demodulation. Monitoring damage ability of the sensor and characters of temperature response were tested. A local and global composite pressure vessel monitoring system was built by FBG sensors and

interferometer sensors for point and whole strain of structure. Property of low temperature and hydrostatic pressure was monitored and the results of monitoring were compared with that of ANSYS and strain gauges which showed good concordance. The bursting process of composite vessel was also monitored from which the ability of finding structure damage was verified. The study of composite pressure vessel monitoring will push other composite structure of aircraft whole life health monitoring forward.

**Keywords** Composite material, Fiber optic sensing technology, Health monitoring, Pressure vessel, Progressive failure



# 目 录

摘要 .....	I
Abstract .....	III
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.2 结构健康监测技术 .....	2
1.2.1 结构健康监测的主要内容 .....	4
1.2.2 结构健康监测中的关键问题 .....	5
1.2.3 基于光纤传感技术的健康监测研究与发展现状 .....	8
1.3 基于光纤传感技术的复合材料固化监测 .....	10
1.3.1 光纤传感器监测复合材料固化的原理 .....	11
1.3.2 光纤折射率传感器监测复合材料固化 .....	12
1.3.3 光纤微弯传感器监测复合材料固化 .....	13
1.3.4 光纤光栅传感器监测复合材料固化 .....	13
1.3.5 光纤Fabry-Perot传感器监测复合材料固化 .....	14
1.4 复合材料压力容器健康监测研究与发展现状 .....	15
1.4.1 复合材料压力容器健康监测传感器 .....	16
1.4.2 复合材料压力容器健康监测 .....	17
1.5 本文的主要研究内容 .....	21
第 2 章 光纤光栅监控T300/HD03 复合材料的制造 .....	23
2.1 引言 .....	23
2.2 光纤布拉格光栅 .....	24
2.2.1 光纤布拉格光栅的原理 .....	24
2.2.2 光纤布拉格光栅温度及应变灵敏系数的确定 .....	25
2.3 HD03 环氧树脂的化学流变模型 .....	27
2.4 光栅监控T300/HD03 制造过程 .....	31
2.4.1 试验准备 .....	31
2.4.2 温度监测 .....	32
2.4.3 实时粘度计算 .....	33
2.4.4 分析与讨论 .....	34

2.4.5 不同加压时机的比较 .....	35
2.5 复合材料固化过程数值模拟.....	39
2.6 埋入光纤对复合材料性能的影响 .....	41
2.7 本章小结 .....	42
<b>第 3 章 复合材料和铝板界面的应变监测与分析 .....</b>	<b>44</b>
3.1 引言 .....	44
3.2 复合材料与铝板共固化监测.....	45
3.2.1 铝板的处理 .....	45
3.2.2 纤维缠绕单向板的制造.....	45
3.2.3 温度监测结果和分析 .....	48
3.2.4 应变监测结果和分析 .....	48
3.3 复合材料与铝板协调变形监测.....	50
3.3.1 高温环境下的协调变形.....	51
3.3.2 低温环境下的协调变形.....	54
3.4 金属与复合材料变形协调性预报 .....	55
3.4.1 协调变形模型的建立 .....	55
3.4.2 协调变形模拟结果与讨论.....	56
3.5 本章小结 .....	57
<b>第 4 章 复合材料压力容器有限元分析 .....</b>	<b>59</b>
4.1 引言 .....	59
4.2 复合材料压力容器有限元模型的构建 .....	60
4.2.1 复合材料压力容器模型的建造 .....	60
4.2.2 复合材料压力容器的有限元分析 .....	63
4.2.3 复合材料压力容器模型的验证 .....	64
4.3 复合材料压力容器渐进损伤分析 .....	72
4.3.1 复合材料破坏准则及材料退化规律 .....	72
4.3.2 渐进损伤分析过程 .....	73
4.3.3 渐进损伤分析结果 .....	74
4.4 复合材料压力容器爆破压力预测 .....	77
4.5 本章小结 .....	81
<b>第 5 章 基于光纤传感技术的压力容器健康监测 .....</b>	<b>82</b>
5.1 引言 .....	82
5.2 干涉型光纤传感器的开发.....	83

5.2.1 干涉型光纤传感器的力学和光学原理 .....	83
5.2.2 干涉型光纤传感器的研制.....	84
5.2.3 干涉型光纤传感器的应变特性 .....	86
5.2.4 干涉型光纤传感器的温度特性 .....	88
5.3 复合材料压力容器低温监测.....	90
5.3.1 健康监测系统的建立 .....	90
5.3.2 灌入液氮过程监测 .....	92
5.3.3 低温增压监测 .....	94
5.4 复合材料压力容器破坏监测.....	97
5.4.1 静水压力监测 .....	97
5.4.2 复合材料压力容器爆破监测.....	100
5.5 本章小结 .....	104
结 论.....	106
参考文献.....	110
攻读学位期间发表的学术论文 .....	121
哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明 .....	122
致 谢.....	123
个人简历 .....	124

# Contents

<b>Chinese abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>English abstract .....</b>	<b>III</b>
 <b>Chapter 1 Introduction .....</b>	 <b>1</b>
1.1 The background and significance .....	1
1.2 Structural health monitoring technology .....	2
1.2.1 The main contents of structural health monitoring .....	4
1.2.2 The key problem of structural health monitoring .....	5
1.2.3 Research and developing status on health monitoring with FOSs .....	8
1.3 Cure monitoring of composites with FOSs.....	10
1.3.1 Principle cure monitoring of composites with FOSs .....	11
1.3.2 Cure monitoring of composites with fiber optic refractive sensors ....	12
1.3.3 Cure monitoring of composites with fiber optic microbend sensors...	13
1.3.4 Cure monitoring of composites with FBGs sensors.....	13
1.3.5 Cure monitoring of composites with Fabry-Perot sensors .....	14
1.4 Health monitoring of composites pressure vessel.....	15
1.4.1 Sensors of health monitoring of composites pressure vessel .....	16
1.4.2 Health monitoring of composites pressure vessel.....	17
1.5 The contents of the dissertation .....	21
 <b>Chapter 2 Monitoring and controlling manufacturing for T300/HD03 composite using FBG.....</b>	 <b>23</b>
2.1 Introduction .....	23
2.2 Fiber Bragg grating .....	24
2.2.1 Sensing principle of FBG .....	24
2.2.2 Temperature sensitivity and strain sensitivity of FBG .....	25
2.3 Chemo-rheological model of hd03 epoxy resin .....	27
2.4 Monitoring and controlling manufacturing process for T300/HD03 .....	31
2.4.1 Preparation of experiments .....	31
2.4.2 Temperature monitoring .....	32
2.4.3 Real-time calculated viscosity .....	33

2.4.4 Results and discussion .....	34
2.4.5 Comparison of different pressure-applied moment .....	35
2.5 Simulation of composite curing process .....	39
2.6 Mechanical characterization of composites with embedded optical fibers	41
2.7 Summary .....	42
<b>Chapter 3 Monitoring and analysis of strain on the interface between composites and aluminum plate .....</b>	<b>44</b>
3.1 Introduction .....	44
3.2 Monitoring of cure strain on the interface between composites and aluminum plate .....	45
3.2.1 Aluminum plate processing .....	45
3.2.2 Filament wound unidirectional laminate manufacturing .....	45
3.2.3 Results and analysis of monitoring of temperature .....	48
3.2.4 Results and analysis of monitoring of strain .....	48
3.3 Monitoring of compatible deformation of composites and aluminum plate .....	50
3.3.1 Compatible deformation under high temperature .....	51
3.3.2 Compatible deformation under low temperature .....	54
3.4 Compatible deformation prediction of composites and aluminum plate .....	55
3.4.1 Model building .....	55
3.4.2 Simulation results and analysis .....	56
3.5 Summary .....	57
<b>Chapter 4 Finite element analysis of composite pressure vessel .....</b>	<b>59</b>
4.1 Introduction .....	59
4.2 Finite element model building of composite pressure vessel .....	60
4.2.1 Model building of composite pressure vessel .....	60
4.2.2 Finite element analysis of composite pressure vessel .....	63
4.2.3 Model verification of composite pressure vessel .....	64
4.3 Progressive failure analysis of composite pressure vessel .....	72
4.3.1 Failure criteria and material property degradation rules .....	72
4.3.2 Process of progressive failure analysis .....	73
4.3.3 Results of progressive failure analysis .....	74
4.4 Bursting pressure prediction of composite pressure vessel .....	77

4.5 Summary .....	81
<b>Chapter 5 Monitoring of Composite Pressure Vessel Using FOSs .....</b>	<b>82</b>
5.1 Introduction .....	82
5.2 Development of interferometric fiber optic sensor .....	83
5.2.1 Mechanical and optical principle of interferometric fiber optic sensor .....	83
5.2.2 Manufacture of interferometric fiber optic sensor .....	84
5.2.3 Strain characteristic of interferometric fiber optic sensor .....	86
5.2.4 Temperature characteristic of interferometric fiber optic sensor .....	88
5.3 Monitoring of cryogenic composite pressure vessel .....	90
5.3.1 Structural health monitoring system building .....	90
5.3.2 Monitoring of inject liquid nitrogen into pressure vessel .....	92
5.3.3 Monitoring of cryogenic pressurizing process .....	94
5.4 Monitoring of bursting process of composite pressure vessel .....	97
5.4.1 Monitoring of pressure vessel subjected to hydrostatic pressure .....	97
5.4.2 Monitoring of bursting process of composite pressure vessel .....	100
5.5 Summary .....	104
<b>Conclusion .....</b>	<b>106</b>
<b>References .....</b>	<b>110</b>
<b>Papers published in the period of Ph. D. education .....</b>	<b>121</b>
<b>Statement of copyright .....</b>	<b>122</b>
<b>Letter of authorization .....</b>	<b>122</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>123</b>
<b>Resume .....</b>	<b>124</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 课题背景

碳纤维增强树脂基复合材料由于具有高比强度、高比模量等优点，而广泛地应用于航空航天<sup>[1]</sup>、船舶、汽车等领域。为提高复合材料的产品质量，保障服役安全，从制造伊始便开始监测复合材料的固化过程，直至复合材料结构服役结束，不仅能够降低维护成本，还能避免灾难性事故的发生。

碳纤维增强树脂基复合材料的制造工艺包括：模压工艺，热压釜工艺，RTM工艺，缠绕工艺等<sup>[2]</sup>。对于不同的工艺会有不同的参数控制产品的质量，例如模压工艺的质量控制参数是温度、加压时机和压力大小，RTM工艺的质量控制参数是渗透率和固化温度。传统的复合材料制造多是遵循预先制定的基于经验的固定工艺路线和工艺参数，不考虑成型过程中材料内部的状态变化，当原材料、添加剂和加工环境稍有变化时，则材料质量和性能均会产生较大波动。对材料内部进行某些参数的监测，将监测信息反馈到固化工艺中，从而调整工艺来提高产品质量是行之有效的方法<sup>[3]</sup>。

复合材料通常与金属材料一同使用，例如，复合材料导弹弹翼中需要加入钛合金骨架，蜂窝夹层结构中的复合材料蒙皮和铝蜂窝，金属内衬纤维缠绕复合材料压力容器等。纤维增强复合材料是各向异性材料，金属材料为各向同性材料，如果两者在固化、使用过程中不能很好地胶接在一起，在使用过程中必然造成金属和复合材料的分离，使得整个结构失效<sup>[4]</sup>。因此，有必要了解金属和复合材料界面的固化过程，胶接结构在温度载荷下的响应<sup>[5]</sup>，为复合材料和金属共同安全服役提供更加可靠的依据。

纤维缠绕复合材料结构广泛地应用于工业的各个领域，例如，汽车用的压缩天然气气瓶，石油管道，火箭的发动机外壳，液体燃料储箱等<sup>[6]</sup>。复合材料虽然有重量轻的优点，但是容易受到冲击损伤，存在着众多的损伤机理。为了保证结构的安全使用，需要检查制造、运输和储藏等各个环节发生的意外损伤。传统无损检测技术，如C扫描，超声波，X射线，磁涡流，红外热像法等<sup>[7,8]</sup>，都是离线、静态、被动的材料及结构损伤检测，而结构健康监测系统的提出，改变了结构及材料安全监测的思路。它利用粘贴在结构表面或预埋在结构内部的传感器监测外部环境或自身状态的变化，具有实

时、动态、在线的特点<sup>[9]</sup>。健康监测可以始于制造期间，止于结构的报废，能够实现结构的全寿命监测。光纤传感器的出现，为复合材料结构全寿命健康监测提供了更加有效的方法。光纤传感器质量轻，可埋入性好，可实现分布式测量，同其它类型传感器相比，更加适合航空航天的需要。

本文以光纤传感器为监测手段，以具有金属内衬的可重复使用复合材料压力容器为监测主体，对其进行制造-服役过程的全寿命健康监测。复合材料模压工艺加压时机对复合材料的品质影响重大，根据等温粘度实验拟和出HD03 环氧树脂的化学流变方程，利用埋入到复合材料中的光纤光栅监测温度，将温度信息带入到化学流变方程中，从而得到树脂的粘度，按照粘度值来选择加压时机，进而完成复合材料固化过程的闭环控制。此种方法也可用于调整纤维缠绕复合材料成型中的工艺。将光纤布拉格光栅传感器埋入到缠绕复合材料层板中、铝板和缠绕复合材料板界面之间，监测整个固化历程，包括固化过程的温度变化，固化过程和降温过程的应变变化，比较复合材料内部、复合材料与铝板界面处的差异。使用光纤光栅监测复合材料与铝板粘接件的协调变形，光纤光栅分别粘贴在复合材料外表面、铝板外表面、两种材料的粘接面，监测在温度载荷作用下的应变变化过程，并同有限元模拟进行比较。基于 ANSYS 有限元软件，建立了变厚度变角度的压力容器模型，实现了对复合材料压力容器渐进损伤的模拟和爆破压力的预报。开发研制了一种干涉型光纤传感器，使用光纤光栅和干涉型光纤传感器，在两者协同下监测了复合材料压力容器的低温液氮增压、常温静水增压和破坏过程，完成了复合材料压力容器局部和整体的组合式监测。

## 1.2 结构健康监测技术

结构健康监测(Structure Health Monitoring, SHM) 就是指利用先进的传感元件和数据采集设备，通过对结构进行无损伤地、实时地监测，获得结构的内部信息，分析包括结构反应在内的各种特征，以便了解结构因损伤或退化而造成的改变<sup>[10]</sup>。结构健康监测的目的是要发展一种最小人工参与的实时、连续监测与损伤探测的自动化系统，能够通过网络或远程中心自动、连续、实时地报告结构状态，结构健康监测的发展方向是将目前广泛采用的离线、静态、被动的损伤检测，转变为在线、主动、实时的监测与控制。

结构健康监测作为一项综合各个学科的技术，大致经历了三个发展阶段：第一阶段以结构监测领域研究人员的专业经验为基础，对诊断信息只能



做简单的数据处理；第二阶段以传感器技术和动态测试技术为手段，以信号处理和建模为基础，在工程中得到了广泛的应用；第三阶段是为了满足大型复杂结构的健康诊断要求，进入了以知识处理为核心，数据处理、信号处理与知识处理相融合的智能发展阶段。

结构健康监测是智能材料与结构技术的一个重要研究方向。智能材料与结构(Smart Materials and Structures)是能“感知”外部环境和内部状态，并可通过改变物理参数或形状对这些变化或外部激励作出最佳响应的系统，其自身具有自诊断、自适应、自修复等功能<sup>[11]</sup>。结构健康监测是通过将传感系统埋入或粘贴在主体复合材料结构中，同时引入信号、信息处理等技术，使结构材料具有感知和预报自身变形、缺陷、损伤、腐蚀失效等一系列结构的非健康状态以及感知环境参数的功能。其研究范围率先在航空航天等军事领域展开，而后向土木工程等民用领域延伸。结构监测技术缺少了智能材料与结构中的作动器，因此结构不会主动变形，无法完成自适应和自修复，但可根据监测结果采取有效地控制。

结构健康监测系统的组成应包括以下几个部分<sup>[12]</sup>：

- (1) 传感系统。安装在待测结构上，或与结构紧密接触，通过传感器获取结构上的待测物理量；
- (2) 数据采集和处理系统。采集传感系统的数据并进行初步处理。
- (3) 通讯系统。将采集并处理过的数据传输到监控中心。
- (4) 监控中心和报警系统。利用具备诊断功能的软硬件对接收到的数据进行诊断，判断损伤的发生、位置、程度，对结构健康状况做出评估，如发现异常，发出报警信息。

健康监测系统的工作流程如图1-1所示。从图中也可看出，监测系统应为一闭环系统，监测中心对结构进行诊断后，若有损伤发生则进行补救，避免结构进一步破坏和灾难事故的发生。

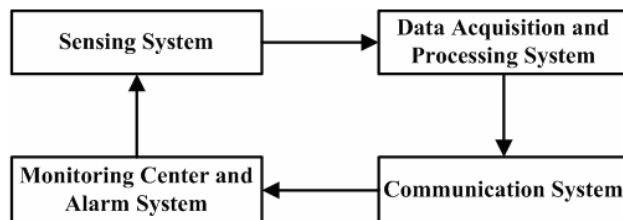


图 1-1 健康监测系统的工作流程图

Fig. 1-1 Work flowchart for system of structural health monitoring

结构健康监测技术具有以下优点<sup>[13]</sup>:

- (1) 实时在线地监测结构状态, 对结构的安全性能及时进行评估, 节省维护费用;
- (2) 以先进的测试系统为手段, 自动采集和处理数据, 提高了安全性和可靠性, 减少了劳动强度;
- (3) 对结构的响应具有验证作用, 检验结构设计的合理性;
- (4) 延长结构的有效使用寿命, 出现结构损伤可报警, 避免灾难性事故的发生。

### 1.2.1 结构健康监测的主要内容

结构健康监测能够解决的主要问题包括: 结构响应, 损伤诊断, 载荷识别等。结构的响应是健康监测最基本的内容, 损伤诊断、载荷识别是以结构响应为基础, 根据监测信号特征获取结构相应的信息。

#### 1.2.1.1 结构响应

结构响应是力学中的正问题, 对于特定的结构, 根据载荷的大小和位置可以计算出结构的响应, 通过健康监测的手段能够判断出计算结果是否正确, 同时检验结构设计的合理性。结构响应包括静、动力反应, 两者均能体现结构工作和损伤状态的基本要素, 例如应变, 加速度, 频率, 振型等参量<sup>[14,15]</sup>。静力响应往往不能很好的反映结构整体工作性能和损伤状况, 而是更多的反映了结构某一部分或者构件某一截面的实际损伤情况。动力响应是整体状态的一种度量, 当结构的质量、刚度和阻尼特性发生变化时, 选用结构振动模态作为权数, 对结构损伤前后的模态变化量进行加权处理, 从而实现单元损伤的识别和有效定位<sup>[16,17]</sup>。

结构健康监测技术通过布设适合的传感器, 采用相应的信号采集系统, 便能够获取结构的动力响应。再通过这种动力参数的变化便可判断结构的健康状况。

#### 1.2.1.2 损伤诊断

损伤诊断是根据监测系统获取的信息, 对数据进行分析, 得到有效参数后对结构进行评价<sup>[18,19]</sup>。例如, 应变是结构最简单最直接的一个参数, 可以用最大应变准则对结构的损伤做出诊断。损伤诊断方法的研究从 20 世纪 70 年代开始, 到目前为止, 已有许多比较成熟的方法。损伤指标法是根据结构参数的变化来确定是否有损伤的出现, 频率、振型、刚度、柔度都是比

较常用的指标。滕海文等人以动力响应诊断的应变模态指标为基础，结合频率指标提出了实用的组合指标<sup>[20]</sup>。神经网络法和遗传算法是随着人工智能技术的不断发展，而被引入到损伤诊断中。Yan等人将压电传感器和驱动器埋入复合材料梁中，进行了结构脱层损伤的在线监测，以前五阶模态频率来训练神经网络，可以确定损伤的位置和程度<sup>[21]</sup>。余龙等人采用遗传算法对含裂纹悬臂复合材料圆柱壳体进行了损伤振动的检测<sup>[22]</sup>。

### 1.2.1.3 载荷识别

载荷识别是力学中的反问题，是在已知结构特性的情况下，根据结构在承受载荷作用下测得结构的响应，从而反演出作用在结构上的载荷历程和位置<sup>[23,24]</sup>。由于求解反问题会出现不确定解，因此载荷识别也是健康监测中相对较难的一个问题。载荷识别技术的研究开始于上个世纪七十年代，是在航空领域首先提出来的，当时随着飞机设计中采用大量的复合材料，飞机性能要求不断提升，为更好地掌握新型飞机结构的受力情况，准确了解飞机在飞行过程中的载荷环境，提出了飞行器载荷识别研究的课题。美国菲利普空军实验室（AFRL）的Barlett等人将机械理论中频域分析法引入到载荷反演中来，应用加速度响应构造频响函数，通过对频响函数的求逆反演了直升机主轴的动态力<sup>[25]</sup>。比利时卢维思布鲁塞尔大学的Desanghere等在研究运载火箭所受飞行载荷时，提出了离散系统动态载荷反演的时域方法<sup>[26]</sup>。

## 1.2.2 结构健康监测中的关键问题

结构健康监测中的关键问题是与其系统组成密不可分的，包括传感元件的选择，传感器与结构的相容性，传感器的优化布设，传感器的出入口，数据的采集与处理，结构的损伤诊断与评价<sup>[27]</sup>。

### 1.2.2.1 传感元件的选择

可制作成传感元件的材料包括光纤传感器，压电材料，形状记忆合金(SMAs)等<sup>[28]</sup>。这些传感元件所能监测的物理量列于表1-1。

光纤传感器是随着通信技术的发展而新兴起来的，由于它的体积小，重量轻，耐腐蚀性好，传感器不受电磁干扰，被广泛的应用于航空航天、船舶、建筑、工业等领域<sup>[29]</sup>。光纤纤芯的主要成分是SiO<sub>2</sub>，因此可以经受较高的温度；测量使用光的传输，灵敏度、反应速度也较高。光纤传感器可以在单根光纤上布设多点，制作成分布式测量网络，降低监测线路的重量和成本。光纤传感器由于其埋入性好，与基体相容性强，在复合材料健康监测领

域备受青睐<sup>[30]</sup>。

表 1-1 三种传感元件所能监测的物理量

Table 1-1 Parameter monitored for three kinds of sensors

物理量	光纤传感器	压电材料	形状记忆合金
应变	√		
应力		√	√
温度	√		
电压		√	
电阻			√

压电材料具有正压电效应和逆压电效应，当它受到外力作用时，在它的某些表面会出现电荷，这种现象称之为正压电效应。反之，在压电材料上加上电场时，它将发生形变，这种现象称之为逆压电效应<sup>[31]</sup>。也就是说，在压电材料中，电学量与力学量相互耦合，介质中储存的能量由两部分组成，一部分是应变能，另一部分是电磁能。利用正压电效应，压电材料可以制作传感元件<sup>[32,33]</sup>。

形状记忆合金因具有形状记忆效应，被用于智能材料与结构的作动器。此外，它还具有应变自感知的特性，即电阻变化与所施加的应力或应变存在一定的关系，因此可以作为传感元件使用<sup>[34,35]</sup>。形状记忆合金具有良好的耐久性和耐腐蚀性，适合于长期、恶劣环境下的健康监测。

#### 1.2.2.2 传感器与结构的相容性

传感器不仅粘贴在结构表面，有时还要埋入到结构内部，尤其是复合材料结构，埋入不仅可以监测复合材料结构的固化过程，还能监测成型后结构的服役过程<sup>[36]</sup>。对于复合材料结构埋入传感器技术有以下几点要求<sup>[37,38]</sup>：

- (1) 传感器的尺寸要尽量小，方向尽可能与纤维平行；
- (2) 传感器的埋入对结构影响小，并且传感器能正常工作；
- (3) 传感器与基体的粘接要牢固，能有效的传递载荷；
- (4) 在复合材料生产期间的恶劣环境下，维持传感器的传感性能；
- (5) 复合材料成型后边缘能够修整，以满足装配的要求。修剪过程中不能损坏传感器；
- (6) 传感器能够简单而牢固的连接，断开方便；
- (7) 在使用期间能经受得住经常的恶劣的运行环境。

### 1.2.2.3 传感器的优化布设

在结构上布设的传感器越多，越能获得结构的真实响应，置信度也越高。不过，由于经济原因和结构运营情况，传感器的布设数量和位置会受到限制，只能通过尽可能少的传感器来获取最可靠而最全面的健康状况信息，也就是传感器的优化布设。要进行传感器的优化布设，首先要确定优化布设准则，也即优化的目标函数。其次，必须选用适当的优化计算方法<sup>[39]</sup>。优化问题的数学表示为：

$$\begin{aligned} \text{选定设计变量: } & \bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T \\ \text{求解目标函数: } & F(\bar{X}) \rightarrow \min F(\bar{X}) = F(\bar{X}^*) \\ \text{满足约束条件: } & G_u(\bar{X}) \geq 0 \quad u = 1, 2, \dots, m \\ & H_v(\bar{X}) = 0 \quad v = 1, 2, \dots, p \\ \text{约束最优化解: } & \text{最优化点 } \bar{X}^* \\ & \text{最优化值 } F(\bar{X}^*) \end{aligned}$$

对于整体监测，Penny等人提出了评价传感器优化布设的 5 条量化准则：模态置信准则MAC（Modal Assurance Criterion）、修正模态保证准则（Modified Modal Assurance Criterion）、SVD（Singular Value Decomposition）比、模态所测功能和Fisher信息矩阵值<sup>[40]</sup>。模态动能法(MKE)是将传感器布置在模态动能较大的位置<sup>[41]</sup>。Kammer提出的有效独立法(Effective, Independence Methods)，其基本思想是逐步消除那些对目标参量的独立性贡献最小的自由度，以使目标的空间分辨率达到最佳程度<sup>[42]</sup>。Guyan模型缩减法是通过刚度(静力缩减)或质量(动力缩减)子矩阵构成的转换矩阵把对模态反应起主要作用的自由度保留而作为测点的位置。对于局部监测，通常根据结构特点，考虑有限元分析结果来确定。

### 1.2.2.4 传感器的进出口设计

对于光纤传感器而言，光纤进出口的方法对于埋入光纤传感器健康监测的构成是一个重要的组成部分<sup>[43]</sup>。制造带有埋入光纤的复合材料是一个简单的过程，但在加工和连接工作中存在几个问题：第一，在复合材料边缘的光纤是容易损坏的，因为光纤表面蘸有树脂后变得很脆；第二，埋入光纤的存在，使得加工复合材料变得困难；第三，带有埋入光纤部件与邻近部分或外部系统连接也是有困难的。

光纤进出口的方法近几年的研究包括：尾纤法，厚度法，插拔法等<sup>[44,45]</sup>。出入口处的尾纤连接方式是最容易想到和实施的。由于尾纤与埋置光纤是一体的，就避免了因连接而造成的损耗。但尾纤法需要在出入口处理

入套管进行保护，该方法只适合实验室研究，对于现实中结构服役期的监测是不切实际的。厚度方向上出入口的方式能够解决边缘修整问题，便于同其它设施相连。为了使光纤穿过铺层，需要事先用通针在预浸带上扎孔，在缠绕成型中此种方法比较可行。插拔式的光连接方法是理想的出入口方式<sup>[46]</sup>，如图1-2所示。当然，这种方式要尽量减小连接器的尺寸，才会降低这种影响，充分发挥复合材料的性能，不影响复合材料的正常使用。

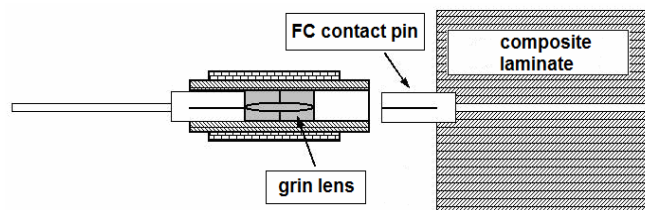


图 1-2 插拔式出入口

Fig. 1-2 Connection ingress and egress

#### 1.2.2.5 数据的采集与处理

数据采集与处理的主要内容是各种智能传感元件的信号转换接口和采集软件的开发。随着电子元器件的发展，数据采集卡的种类和形式层出不穷，为传感器的数据采集提供了方便。数据处理的核心内容是提取结构损伤特征信息，充分利用现代信号处理方法，如高阶谱分析、时域分析、小波分析、神经网络、遗传算法等方法，对传感器传输来的信息进行智能处理，便于对结构进行安全与损伤评价。

#### 1.2.2.6 结构的损伤诊断与评价

结构的损伤诊断与评价是健康监测的核心，可根据结构特点、可靠度分析、专家系统等理论，构建有效的软件分析程序，达到健康监测最终的目的，进行损伤诊断与评价，并对损伤部位采取相应的补救措施。

### 1.2.3 基于光纤传感技术的健康监测研究与发展现状

在航空航天方面，1979年，美国国家航空航天局(NASA)启动了一项有关智能蒙皮的研究计划，首次将光纤传感器埋入先进聚合物基复合材料蒙皮中，用以监测复合材料的应变和温度。而后结构健康监测在航空航天领域迅速发展。美国Sander公司将布拉格光栅光纤传感网络用于X-33箱体的应力和温度的准分布监测；美国格鲁门公司利用压电声发射传感器及光纤传感

器,有效地监测了战斗机机翼结构的损伤及应变。美国 1998 年开始为期六年的NASA Aircraft Morphing计划,该计划利用光纤传感器对复合材料结构进行健康监测作为重要研究内容之一,希望利用多功能光纤传感器完成对应变、温度和化学成分的监测,从而实现从复合材料固化工艺过程开始直到结构服役结束的全寿命监测。德国汉堡的空中客车测试中心在 1998-1999 年对碳纤维增强复合材料的机翼疲劳性能进行了研究,使用了光纤光栅的多路技术,2 个光栅阵列,每个阵列中包含 11 个光栅,传感器均粘贴在机翼表面<sup>[47]</sup>。德国的Wolfgang Ecke等人使用 12 个光纤光栅传感器构建了分布式应变和温度传感网络,监测了返回飞行器X-38 的船体结构<sup>[48]</sup>。美国空军实验室在 2000 年启动了名为“Structural Health Monitoring Of Advanced Aerospace Vehicles(SHMAAV)”的项目,发展健康监测技术,实现自动探测撞击损伤、粘结层完整性、机身与热防护结构裂纹是该项目的主要内容。欧洲航天局(ESA)在 2000 年提出了未来航天运载器预备项目(FLPP),开发安全的、可靠的、低成本的空间利用技术。SHM被称之为基于状态的维护(CBM)或者是超前的维护,它将利用传感器不断地维护设备。当监测到设备有接近破坏的迹象的时候,系统将会发出警告,以维修设备。SHM将比人工更可靠更快捷的自动完成检查,减少地面维护时间和成本。美国的MOI公司已经开展了对客机机翼、迎风面的监测,并在此研究中开发了一种便于安装的光栅传感器。美国的一些大学在光纤传感器监控复合材料固化、复合材料结构的无损检测与损伤评价、结构服役期间的工作状态监测以及疲劳、冲击损伤监测等方面进行了众多的研究<sup>[49,50]</sup>

国内众多的高校在健康监测方面也进行了广泛的探索和尝试,哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、清华大学、西安交通大学等单位在光纤传感器、形状记忆合金、压电材料等方面的研究工作各具特色,并取得了多项研究成果<sup>[51,52,53]</sup>。

在土木工程方面,1989 年,美国布朗大学的Mendez等人首次提出将光纤传感器埋入钢筋混凝土中监测结构内部的状态参数,开始了土木工程的健康监测<sup>[54]</sup>。1992 年Rutger 大学的Prohaska 等人首次将光纤光栅埋入到混凝土结构中测量应变,这之后相关的实验研究很快就拓展到实际的大型工程结构<sup>[55]</sup>。Davis.M等人在美国新墨西哥州一座州际大桥上应用布拉格光栅传感器进行在线监测,确定大桥受交通荷载作用时的应变水平和频率响应,系统通过分析传感器探测到的资料可以确定交通车辆的数量和相对重量,同时还能确定整个大桥的频率响应<sup>[56]</sup>。John Seim 等人在美国俄勒冈州的一座名为

Hosetail Falls 的大桥上利用光纤光栅对桥的两个需要进行补强的大梁进行监测，以确定复合材料对大桥进行维修和补强的可行性以及复合材料长期的工作性能<sup>[57]</sup>。

国内在土木工程上的健康监测技术已经日渐成熟。哈尔滨工业大学、清华大学、重庆大学、南开大学、武汉理工大学、香港理工大学等单位对光纤传感器的应用研究非常重视，投入了大量的人力和物力，得到了系列研究成果，并已经在一些重点示范工程上得到了应用。

### 1.3 基于光纤传感技术的复合材料固化监测

先进热固性树脂基复合材料，成功地作为军用飞机和民用客机的结构材料使用已经有 20 多年的历史。先进热固性树脂基复合材料的固化过程在宏观上表现为树脂物态的变化，从粘稠的液体到粘度低的可流动液体，再经过凝胶直至变为固体；在微观上是树脂与催化剂由小分子通过交联反应聚合形成大分子的过程。

复合材料产品的质量与材料固化工艺过程密切相关。环氧树脂的固化一般采用阶梯升温程序来进行，各阶段的温度与固化峰起始温度  $T_0$ ，峰顶温度  $T_p$  和终止温度  $T_e$  有关，通常把固化峰起始温度近似为凝胶温度。大量研究表明固化反应温度  $T$  与固化过程升温速率  $\beta$  呈线性关系，因此利用  $T$  和  $\beta$  的线性关系，通过外延法可初步求出固化工艺温度。由 DSC 分析能够获得固化反应起始固化温度、恒温固化温度及后处理温度，在此基础，通过进一步的工艺优化，得到最终的固化工艺条件。

制定出的固化工艺能否保证产品的性能和稳定性，还需要进一步的实验研究来确定。为了稳定复合材料产品质量，降低生产成本，提高材料加工与制造的重复性，各国学者做了大量的研究工作。始于 20 世纪 80 年代初期的复合材料成型工艺在线监控技术的研究，为提高复合材料质量提供了新的思路和方法。针对树脂基复合材料固化过程监测，各国学者先后提出了动态弹簧法、动态差示扫描量热法、红外频谱法以及介电法等，这些方法或是由于只能够对小型试件进行离线测量，或是由于测量精度低、成本高等原因，在实际生产中并没有得到广泛应用。利用现代光纤传感器在成型工艺过程中对材料内部的温度、应变、粘度等过程参数进行监测，并基于监测信号实时调整和优化工艺过程，形成复合材料固化过程的循环控制系统，可以有效地控制复合材料产品质量，是复合材料成型工艺的发展方向。



### 1.3.1 光纤传感器监测复合材料固化的原理

随着对光纤传感技术研究的深入及其技术的日益成熟，80 年代末期，国外开始了光纤传感器监测复合材料成型工艺过程的研究，研究内容涉及光纤对复合材料力学性能的影响、光纤埋入技术、光纤固化监测传感器的开发、光纤进出口的设计、固化信息提取与评价、基于光纤传感技术对各种复合材料制造工艺的监测等各个方面。

与传统固化监测技术相比，光纤传感器具有明显的优势，它与复合材料基体结合良好，其体积小，对材料的力学性能影响很微小，能够直接获得材料内部信息，实现成型工艺过程的在线监测。光纤传感器监测复合材料固化工艺过程，灵敏度高，耐腐蚀好，能经受得住高温、高压的环境。预先埋入复合材料铺层中来测量工艺过程参数，并对工艺过程加以控制，如温度、压力等。

固化监测系统如图1-3所示。将光纤传感器埋置在未固化的复合材料中，尾纤引出加热装置外，与解调仪相连，由电脑采集解调仪的数据，反馈给加热装置，调整和控制固化过程的参数。

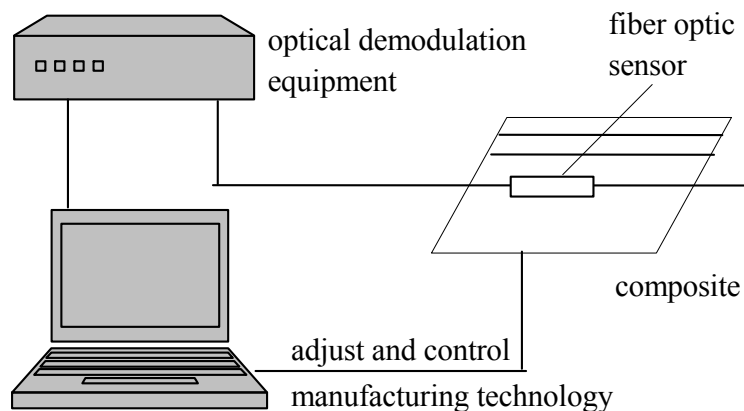


图 1-3 光纤传感器监测复合材料固化

Fig. 1-3 Cure monitoring of composites with fiber optic sensors

基于不同的光纤固化监测机理，形成了不同种类的复合材料固化监测光纤传感器。可用于树脂基复合材料固化过程监测的光纤传感器主要包括光纤折射率传感器、光纤微弯传感器、光纤布拉格光栅传感器以及光纤 Fabry-Perot 传感器。

### 1.3.2 光纤折射率传感器监测复合材料固化

根据菲涅耳折射原理，复合材料固化工艺过程中，树脂基体分子键发生重组，小分子通过交联反应聚合成体形网状结构的大分子，随着交联反应的进行，树脂折射率逐渐增大，通过跟踪树脂折射率变化即可实现固化过程监测（如图1-4）。基于这一原理，各国研究者分别设计了结构形式不同、各具特色的光纤折射率传感器，在线监测复合材料的固化过程。

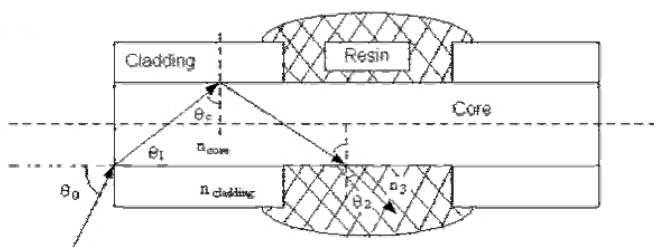


图 1-4 折射率传感器工作原理示意图

Fig.1-4 Schematic of the fiber optic refractive index sensors principle

武湛君等人提出了将光纤折射率传感器用于复合材料制造过程，采用纤芯折射率为 1.62 的特制多模光纤，用酸腐蚀方法去除中间一段(20mm)的外包层，裸露其纤芯，制作成光纤折射率传感器，埋入环氧 648 预浸料进行了固化过程测量，传感器能有效地反映复合材料升温固化过程。邹建在被腐蚀掉包层的普通光纤纤芯上涂上一薄层树脂，树脂固化后作为传感段埋于树脂基体中测量折射率的变化<sup>[58]</sup>。Lam将一段端面平滑的光纤作为探针预先埋入预浸料中，平滑的光纤端面相当于一个反射系数随树脂折射率改变而逐渐变化的透镜，光纤另一端连接探测系统测量光功率的变化<sup>[59]</sup>。杨春等人提出一种普通石英光纤去除一段包层后端面再镀反射膜的探头型传感结构形式，利用经过传感段后衰减的反射光信号来测量树脂固化过程<sup>[60]</sup>。Afromowitz则采用一小段已经固化的与光纤纤芯直径大小相近的圆柱形环氧树脂作为传感段，它分别与输入、输出光纤联接后埋于预浸料铺层中，固化过程中随着树脂折射率的增加，接收端光功率将逐渐减少<sup>[61]</sup>。Kassamakov在此基础上又对光纤的反射端面形状做了改进，他采用具有曲面形状的光纤端面，并认为可以提高测量的灵敏度<sup>[62]</sup>。S.Vacher等人使用参考光纤法，利用测量光纤末端与树脂接触发生折射，同参考光纤信号进行比较，监测了 RTM6 环氧树脂的固化<sup>[63]</sup>。V. Antonucci等人使用折射型光纤传感器，联合

光栅传感器监测了热固性树脂的固化和凝胶<sup>[64]</sup>。

### 1.3.3 光纤微弯传感器监测复合材料固化

光纤微弯造成光纤传输能量损失，主要是由于纤芯最高阶传导模耦合到包层的辐射模，然后很快衰减。这种模态间的耦合可以由许多环境效果造成，如温度、压力、碰撞或引起结构应变的声波。树脂基纤维增强复合材料的固化过程中，需要一定的温度和压力的作用，在不同的固化反应阶段，增强纤维所承受的压力是变化的，其传递到光纤传感区的压力也随之变化，进而导致不同程度的光纤微弯损耗（如图1-5）。

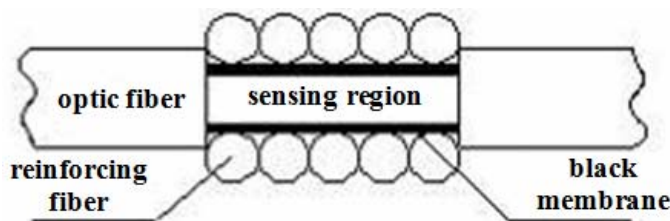


图 1-5 光纤微弯传感器示意图

Fig.1-5 Configuration of the microbend fiber optic sensor

基于固化过程中的上述现象，张博明提出采用光纤微弯传感器监测复合材料的固化成型过程，并将埋于预浸料铺层中的光纤传感段包层去除以增强微弯效应，提高测量的灵敏度<sup>[65]</sup>。光纤微弯传感器能够给出树脂粘度最低点和固化完成点的时间，可重复性较好，灵敏度与固化过程的压强以及传感器铺设方向相关。武湛君设计制作了适用于纤维增强复合材料层板固化监测的光纤微弯压力传感器，集成建立了光强式光纤固化监测系统，针对对复合材料固化成型工艺的树脂基体粘度变化进行了监测，该传感器可以对增强纤维所承担的压力变化进行监测，进而反映固化过程中树脂粘度的发展变化<sup>[66]</sup>。王科等人利用光纤微弯压力传感器同时测量固化过程的垂直层板方向压力变化规律及树脂流动状态，获得了良好的结果<sup>[67]</sup>。

### 1.3.4 光纤光栅传感器监测复合材料固化

光纤布拉格光栅是在一段光导纤维纤芯中建立起一种空间周期性的折射率分布，当其受到应变或者温度作用时，布拉格中心反射波长会产生漂移，由此光纤布拉格光栅可以作为传感器。光纤布拉格光栅传感器的结构极为精

巧，主要用于应变、温度的测量，经过改进也可用于测量其它参数，如压力、位移等。光栅传感器可测量绝对值，能够实现分布式测量的特点，在众多领域得到了应用。

光纤布拉格光栅传感器能够监测复合材料固化过程中的应变历程和温度历程。Murukeshan和Kalamkarov等人分别应用FBG传感器在复合材料的热压釜成型工艺和拉挤工艺中实现了固化过程材料内部应变变化历程的监测<sup>[68,69]</sup>。Lawrence和Leng等人在固化过程中实现了多种铺层方式的层合板内部应变变化历程监测，并分析了铺层方式对应变变化的影响<sup>[70,71]</sup>。Degrieck和Kang等人使用光纤光栅对纤维缠绕复合材料压力容器进行了固化监测，分析了残余应力。万里冰等人对单向和正交复合材料板实现了固化过程中应变和温度监测，并分析了正交板的残余应变<sup>[72]</sup>。武湛君等人则利用单根布拉格光栅传感器实现了对复合材料工艺过程不同阶段、不同目标的监测（温度、施加压力、应力变化）<sup>[73]</sup>。

### 1.3.5 光纤Fabry-Perot传感器监测复合材料固化

外置式光纤Fabry-Perot传感器（EFPI）是将同轴的两根光纤连接在空心光纤上，构成了传感器的传感段<sup>[74]</sup>，并且在两根光纤之间留有一定的缝隙。当外部干扰作用于传感段时，传感段将产生轴向变形，导致两根光纤端面的相对距离发生变化，从而引起光纤端面所反射的干涉光的变化（如图1-6）。因此，对光纤端面所反射的干涉光进行分析，就可以测试出外部的扰动量。

Lawrence将Fabry-Perot传感器埋入到AS4/3501-6 石墨环氧复合材料中，使用模压工艺固化，监测应变和温度，并同估算值进行了比较<sup>[75]</sup>。Kang将光纤布拉格光栅和一段裸光纤封装在毛细玻璃管内，形成所谓的FBG/EFPI联合传感器，实现了层合板固化过程中的应变和温度的实时监测<sup>[76]</sup>。该研究者还使用此种联合传感器监测了非对称层板的固化，获得了固化过程的热应变和温度<sup>[77,78]</sup>。Taylor将Fabry-Perot干涉型光纤传感器埋入到石墨/PEEK中监测固化过程材料的相变<sup>[79]</sup>。Leng等人将Fabry-Perot和光栅传感器埋入到碳/环氧复合材料中监测其固化过程和残余应变。Virgil将EFPI传感器埋入到四层复合材料中，监测应变和温度，为了调整固化工艺，使制品的残余应变最小，希望将这项技术用于螺旋桨叶片的监测<sup>[80]</sup>。福田武人将FBG和EFPI传感器埋入RTM成型的RFP中，进行了固化工艺监

测<sup>[81]</sup>。

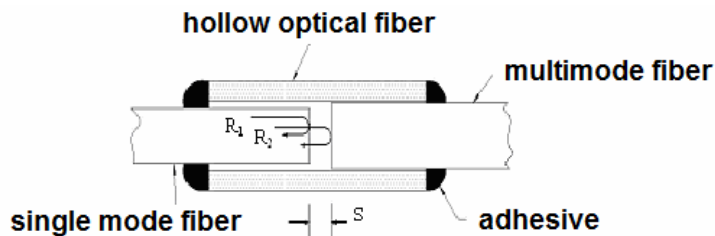


图 1-6 EFPI 传感器示意图

Fig. 1-6 Schematic of EFPI sensor

上述几类光纤传感器均能够实时反应树脂基体的固化进展，完成复合材料固化工序过程的在线监测。光纤折射率传感器监测固化过程的研究开展得最早，整个测量系统结构简单，光接收端只需要测得光功率的变化，经济实用，但多数情况需采用高折射率纤芯的特种光纤，并且只能定性地反应固化过程，限制了它更高层次的应用。光纤微弯传感器适用于复合材料的热压工艺，传感器结构简约，所需仪器设备简单，测量的重复性较好，适于工业现场的应用。Fabry-Perot 传感器具有可靠性好、动态响应宽、安装简便、制作工艺较简单、价格低廉等优点，在健康监测领域有一定的研究价值和应用前景。光纤布拉格光栅传感器测量精度高，结构精巧，经过改进后能够测量三维应变，温度应变交叉敏感问题也可通过参考光栅法等解决。目前，国内的一些光学公司已开发出成本较低的解调仪，使光纤光栅监测复合材料固化更具前景。

## 1.4 复合材料压力容器健康监测研究与发展现状

复合材料压力容器健康监测起源于航天上可重复使用储箱。过去航天燃料储箱均为一次性使用，其成本居高不下<sup>[82]</sup>。为了降低生产和维护成本，把结构健康监测技术应用到可重复使用储箱上，在重复使用过程中进行全寿命监测，保证其安全服役。1998 年，美国洛马航空公司在 X-33 可重复使用低温储箱上粘贴了 FBG 传感网络，提出分布式监测的概念，最大限度地减少连接线用量，降低重量<sup>[83]</sup>，使健康监测技术更加适合航空航天领域。

目前，复合材料压力容器健康监测内容主要有：固化过程监测，服役环境监测，内压和结构应变监测，损伤监测，爆破压力监测，液体燃料泄漏监

测等。

### 1.4.1 复合材料压力容器健康监测传感器

就传感器类型而言，目前应用于复合材料压力容器健康监测的传感器主要分为压电和光纤两大类传感器。它们具有如下共同优点：

- (1) 体积小，重量轻，对结构强度的影响小；
- (2) 适合于粘贴在结构表面或者埋入到结构中；
- (3) 抗干扰能力强，耐久性好；
- (4) 易于实现分布式测量，减少连接导线用量。

下面归纳总结了纤维缠绕复合材料压力容器健康监测中采用的传感技术，如表1-2所示。

表 1-2 压力容器健康监测传感技术比较

Table 1-2 Comparisons of sensing technology for health monitoring on pressure vessels

传感器名称	类型	原理	监测物理量	优点和缺点
Fabry-Perot传感器 (EFPI) [84]	光纤	单条光纤中的光干涉	温度，应变	价格低廉；制作困难，无法弯曲
SMARTape条带式传感器	光纤	两条光纤中的光干涉	应变，损伤	适用于大范围监测
强度调制型光纤传感器 [85,86]	光纤	光纤中光强的变化	应变	适用于大范围监测
光纤光栅 (FBG)	光栅	外界扰动引起光栅波长的变化	固化，温度，应变，损伤	制作简易，可监测多种物理量
双轴FBG	光栅	轴向、横向扰动都敏感的光栅	损伤	应用情况与单轴FBG相同；制作工艺复杂
光栅氢传感器	光栅	钯金属遇氢膨胀引起波长的变化	氢泄漏	使用简单方便，制作设备昂贵
SMART Layer [87,88]	压电	诊断波信号振幅变化	损伤	主动监测，易于网络化和定制生产

压电类传感器当前主要是指智能夹层(SMARTLayer)，是采用印刷电路方法制造的带有分布式排列压电元件的柔性层。压电元件采用压电陶瓷

PZT，不仅是传感器，还是激励器，能进行主动监测。目前拥有此项技术的有斯坦福大学和南京航空航天大学，美国 Acellent 公司针对 SMARTLayer 生产了 SMARTSUITCASE，它集成了信号发生器、数据采集器、信号初步分析等功能，并与 PC 机有机结合在一个主机箱里，同时配套了相应的软件应用平台，方便与传感器连接并进行实时数据处理。

光纤传感的基本原理是以光纤的导波现象为基础，利用不同的导波原理可以制作出多种类型的传感器，亦即光在光纤中传输，受到温度、应变的作用后，光的强度、相位、频率、偏振态等光波量会发生变化，通过测量这些量的变化就可以得到相应的物理量，如法布里-珀罗干涉光纤传感器，光纤光栅传感器（FBG），SOFO 传感器等。

## 1.4.2 复合材料压力容器健康监测

### 1.4.2.1 固化过程监测

复合材料固化监测在实验室中的研究已经基本成熟，将这项技术应用于产品监测，不仅需要在埋入技术上攻关，还需要对生产设备进行改进。就纤维缠绕压力容器而言，为了使树脂分布均匀，在缠绕和固化过程中需要不停地转动压力容器，这给光纤监测带来了巨大挑战，连续的扭转将使信号损耗甚至引起传感纤维断裂。那么，如何预埋光纤、定位并保证光纤的存活率成为一个关键问题。

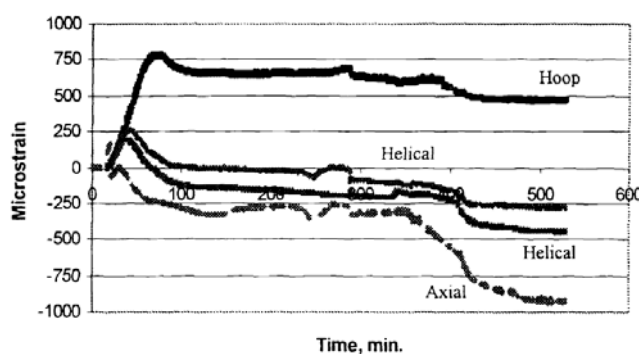


图 1-7 固化过程的温度监测

Fig. 1-7 Temperatures during cure

Richard 等人通过对固化设备进行改进，利用反转电机的方法成功地将 FBG 传感器阵列预埋在复合材料压力容器壳体内部，由层间温度场测量实现

了固化过程监测（如图1-7所示）；同时，根据层间应变测量结果得到了固化残余应变场分布<sup>[89,90]</sup>（如图1-8所示）。

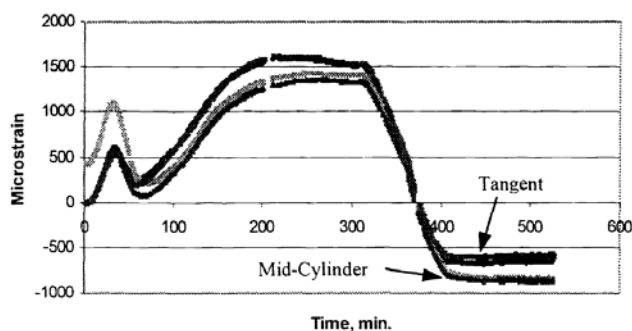


图 1-8 固化过程的应变监测

Fig. 1-8 Strains during cure

开发小型的解调系统，做好防热保护后放置到加热釜中和容器一同旋转，信号通过无线网络传输出来，也是可行的方法。并且，小型的解调系统也适合未来航空航天上对其它结构进行服役期的健康监测。

#### 1.4.2.2 服役环境监测

航天用的可重复使用燃料储箱需要经历反复的高低温作用，充入液体燃料时储箱处于低温环境，完成飞行回到地面后处于常温环境。传感器在这样的高低温循环下是否有效，成为研究者普遍关心的问题。

1995 年美国洛马航空公司的Lisa等人验证了EFPI光纤传感器能够应用于低温储箱的监测，在 $-210^{\circ}\text{C}\sim 370^{\circ}\text{C}$ （可重复使用储箱工作的范围在此之内）的温度范围内它能够正常工作<sup>[91]</sup>。由于弯曲对EFPI传感器的精度有影响，故不能粘贴或埋入到封头处的曲面部位，限制了EFPI传感器在储箱上的使用。哈尔滨工业大学的张晓晶等人探索了裸FBG传感器在 $-150^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏特性，通过实验证实了FBG传感器只在有限区域内波长变化和温度是线性关系，而在整个实验温度范围内却是非线性的。作者证明了FBG能够在低温下使用，并分段给出了FBG的温度灵敏系数<sup>[92]</sup>。这项作为FBG传感器在低温储箱上的应用打下了基础。日本东京大学的Takeda等人在液氮储箱表面粘贴了FBG传感器，证实了传感器能够在液氮的温度下正常使用<sup>[93]</sup>。这项研究中是通过向储箱中打入液氮来增加压力，为FBG传感器在低温储箱上的应用做了一次实际地验证。

使用光纤类传感器能够测量复合材料压力容器的温度环境，但还没有进



行反复高低温环境的测试。在高低温环境下，FBG 应变传感器的解耦也是需要重点考虑的。

#### 1.4.2.3 内压和结构应变监测

复合材料压力容器作为一种承压结构，其内压和结构的应变关系是最受关注的问题。

最先做这项工作的是美国洛马航空公司的研究人员把EFPI传感器埋入到缩比的低温储箱中，证实了埋入传感器是可行的，并把电阻应变片粘贴在缩比件的表面。实验表明，EFPI传感器和电阻应变片的测量结果有极好的一致性。日本东京大学的Takeda等人将FBG传感器粘贴在液氮储箱表面，并和应变片的测量结果进行了对比，虽然储箱在增压和减压的过程中，测量的应变没有重合为一条线，但FBG和应变片的测量结果符合得很好。韩国科学技术院的研究人员在储箱的桶身和封头处粘贴了大量的FBG传感器和应变片进行了比较，两者的测量结果相符合<sup>[94,95]</sup>，稍有差别是由于两种传感器粘贴的位置不完全重合。马歇尔宇航中心的Grant等人将FBG传感器埋入到复合材料压力容器中，验证了FBG传感器在增压过程中的存活能力，容器内压力与FBG传感器测量到的应变成正比<sup>[96,97,98]</sup>。比利时根特大学的Waele等人把FBG传感器埋入到复合材料压力容器中，跟踪载荷循环变化，监测容器变形情况，得到了较好的结果<sup>[99,100]</sup>。Waele等人还把埋入FBG传感器的监测结果和应变片、声发射的监测结果作了深入的比较，FBG传感器的监测结果与两者符合得很好<sup>[101,102]</sup>。

容器内压力和结构应变成线性关系，由粘贴或者埋入传感器得到了证实。复合材料与金属内衬在增压和减压下的变形是否协调，两种材料是否脱粘，还没有进行深入研究。将传感器埋入到两种材料的界面，探测两者之间的变形情况，检测分层，是以后的研究方向。

#### 1.4.2.4 损伤监测

用健康监测手段识别复合材料压力容器的损伤，众多的研究者进行了大量的工作。

美国Acellent公司的研究人员使用SMART Layer条带对缠绕压力容器进行了损伤监测。实验表明，容器有损伤后，传感器测量到的诊断波信号振幅变小，通过传感器网络获取的信息能够确定出损伤的位置<sup>[103]</sup>。瑞士SMARTEC的研究人员在压缩气体气瓶上布置了 6 个SMARTape传感器（SOFO干涉型传感器中的一种<sup>[104]</sup>），验证了压力和传感器测量的应变成正比，并且通过传感器获得的信息能够判断损伤的类型、大小和深度。美国蓝

色之路研究院的Ortyl则利用双轴FBG传感器获取的信息，输入到光学成像软件中，得到了复合材料压力容器上损伤的位置<sup>[105]</sup>。同一单位的Kunzler等人在复合材料压力容器中埋入双轴FBG传感器，把传感器获取的信息输入到编制好的程序中，得到了冲击损伤和预制损伤的位置及大小，与涡流检测、超声波检测得到了相同的结果。并且，在实验中复合材料分层和纤维断裂得到了不同的信号，从而作者认为双轴FBG传感器能够识别损伤的种类<sup>[106,107]</sup>。如图1-9所示。

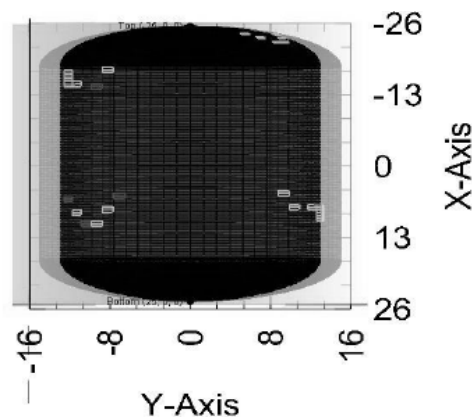


图 1-9 使用双轴 FBG 传感器识别损伤水平和位置

Fig.1-9 Damage levels and location may be tracked by the multi-axis FBG strain sensors

以上的损伤监测工作确定了损伤的位置、大小和类型，但还不是很精准，如果能把损伤量化，具体给出损伤对剩余寿命的影响，还需要更加进一步的研究。

#### 1.4.2.5 爆破压力监测

压力容器作为承压结构，当内部的压力达到容器的承载极限时，就会发生爆破，为了验证容器的承载能力，一些研究者对爆破压力进行了监测。

美国马歇尔宇航中心使用表面粘贴的FBG传感器监测了复合材料压力容器的爆破，但是FBG传感器并没有监测到爆破前的征兆，在容器内压力达到1200psi的时候光栅就没有信号了（爆破压力 3000psi）。韩国铁路研究院的研究人员使用埋入的FBG传感器监测复合材料压力容器的爆破，也没有监测到最后的爆破，最大程度能够监测到爆破压力的 95%，个别的只监测到爆破压力的 32%<sup>[108]</sup>。

监测爆破压力目的是从监测结果中获取爆破前的征兆，但是爆破前容器的变形过大通常会使光纤断裂。未来监测爆破压力的研究可以选取较高韧性

的胶粘剂粘贴 FBG 传感器,虽然降低了灵敏度,但能够使传感器一直监测到爆破的发生。另外,也可和其它的无损检测相结合,例如声发射技术,检测出压力容器相对薄弱的部位,而把 FBG 传感器布置在其附近,避免爆破引起的断裂。

#### 1.4.2.6 泄漏监测

储存易燃易爆的液氢储箱如果发生泄漏,必将引起灾难性的事故,因此对其进行泄漏监测也格外重要。

德国高技术物理学会的研究人员将钽金属用环氧胶粘贴在光栅段,制作成微弯梁氢传感器,经过测试,氢气的密度与光栅的波长成正比<sup>[109]</sup>。上海交通大学和哈尔滨工业大学合作利用MEMS加工工艺在光栅处溅射上金属钽薄膜,钽金属吸收氢气后膨胀,将变形传递给光栅,从而制作成氢传感器,来探测氢储箱是否泄漏。实验结果表明,氢气浓度与光栅波长有线性关系<sup>[110]</sup>。

FBG 和钽金属结合制作成氢传感器的原理都是相同的,不同的是制作方法。合理选择方法,制作出的氢传感器在精度上会有差别。

### 1.5 本文的主要研究内容

随着光纤传感技术在复合材料领域中的深入研究,该项技术正逐步走向工程应用。本文基于光纤传感技术,以可重复使用复合材料压力容器为研究主体,对其制造-服役全寿命健康监测进行了研究,主要研究内容如下。

针对复合材料模压工艺加压时机对复合材料的品质影响重大,提出利用粘度确定加压时机的方法,以提高产品的质量。根据等温粘度实验拟和出HD03 环氧树脂的化学流变方程,利用埋入到复合材料中的光纤光栅监测温度,将温度信息带入到化学流变方程中,从而得到树脂的粘度,按照粘度值来选择加压时机,进而完成复合材料固化过程的闭环控制。比较了加压时机对复合材料层板厚度,残余应变的影响。使用通用有限元程序 ANSYS 模拟了固化过程的温度场,同光栅监测的过程进行了比较。

将光纤布拉格光栅传感器埋入到缠绕复合材料层板中、铝板和缠绕复合材料板之间,监测整个固化历程,包括固化过程的温度变化,固化升温 and 降温过程的应变变化。使用光纤光栅监测复合材料与铝板的协调变形,光纤光栅分别粘贴在复合材料表面、铝板表面、两种材料之间,在温度载荷作用下的应变过程都可由光栅监测到,并且将测量值与有限元模拟值进行了比较。

基于通用有限元程序 ANSYS，编制 APDL 语言流程，建立了复合材料压力容器模型，实现了复合材料压力容器封头缠绕处变厚度、变角度的模拟。通过静水压力实验，使用应变和整体变形监测的方法，证明了模型的正确性。在此模型的基础上，应用 Hashin 失效准则研究了复合材料压力容器的渐进损伤，估算了容器的爆破压力。

开发了一个建立在力学分析和光学干涉原理基础上，应用范围广泛，适用不同研究对象，性能稳定，可靠性高的干涉型光纤传感器。此种传感器可对各种复合材料结构固化成型过程—损伤演变过程—可靠性评估一体化全寿命过程进行健康监测。验证了传感器的拉伸、温度响应，监测复合材料损伤的能力。基于光纤光栅传感器，干涉型光纤传感器，建立了复合材料压力容器健康监测系统，监测了复合材料压力容器的低温工作性能，静水压力性能，将监测结果同有限元分析、应变片结果进行了对比。监测了复合材料压力容器的爆破过程，验证了监测系统察觉结构破坏的能力。

## 第2章 光纤光栅监控T300/HD03 复合材料的制造

### 2.1 引言

模压成型工艺是先进复合材料生产的常用方法之一。在模压过程中，预浸料宏观上经历树脂流动、胶凝和硬固三个阶段；细观上树脂的分子链由线性变成了网状体型结构。这种变化不会自行发生，需要一定的外部条件——温度、压力和时间，这三个变量是模压工艺的主要参数<sup>[111,112]</sup>。温度的主要作用是促使树脂基体熔融、流动和固化；压力的作用是排除固化反应中产生的气体和多余的树脂，使物料充满模腔，保证产品达到精确的形状和尺寸；温度上升的快慢和加压时机的选择是时间的函数<sup>[113]</sup>。合理选择加压时机是决定产品品质的关键因素之一。

目前，加压时机的选择可采用三种方法来确定<sup>[114]</sup>。一是根据温度指示，当树脂温度达到工艺温度的时候即可加压。二是根据操作者的经验，操作者可以将树脂拉丝查看粘稠状态来确定加压时机。三是按树脂固化反应时气体释放量来确定加压时机，在大量气体放出之前的温度下加压。通常温度的测量使用上下压板的热电偶，或者选用单独的热电偶棒插入模具中进行温度的测量。这样的测量方法不能完全反映材料内部的温度，有必要选用可埋入式传感器到复合材料内部测量温度，给出准确的材料内部温度值。操作者根据经验通过流出来的树脂的粘稠程度来判断是否达到施加压力的时刻，无疑使产品的质量大大受到人为因素的影响。第三种方法虽然是以固化反应释放的气体为判断准则，但还是要归结到温度。

光纤布拉格光栅（FBG）传感器由于其具有结构简单，体积小，耐腐蚀性好，埋入复合材料中与基体材料兼容性好的优点，在智能材料与结构的传感技术研究中倍受青睐。将光纤光栅埋入复合材料预浸料铺层，在成型工艺中在线监测材料内部的应变历程和温度历程，并且固化结束后光纤光栅仍保持传感能力和其固有的优点，可以继续应用于材料服役期间的损伤监测与健康评价。

本章利用光纤布拉格光栅可埋入到材料内部实时监测温度的特点，将光栅埋入到碳纤维 T300/环氧树脂 HD03 预浸料中，实时监测复合材料在固化过程中的温度历程。根据等温粘度实验拟合得到 HD03 环氧树脂的化学流变

方程，将温度历程代入到化学流变方程中，实时地获得了树脂的粘度，从而根据粘度来选择加压时机。在不同加压时机下，比较了层板的厚度和残余应变，并以粘度值为信号进行了加压实验。此种方法完成了复合材料制造过程中的闭环控制。使用通用有限元程序 ANSYS 模拟了固化过程的温度场，并用此温度值计算出了粘度值，同光栅监测的过程进行了比较。

## 2.2 光纤布拉格光栅

### 2.2.1 光纤布拉格光栅的原理

光纤布拉格光栅（FBG）是纤芯折射率沿光纤轴向呈周期性变化的一种光栅。FBG作为传感器时，其工作原理可以归结为Bragg中心反射峰波长 $\lambda_B$ 的测量，即通过对由外界扰动引起的 $\lambda_B$ 漂移量的测量，就可以得到被测参数。图2-1为光纤光栅传感系统的示意图。

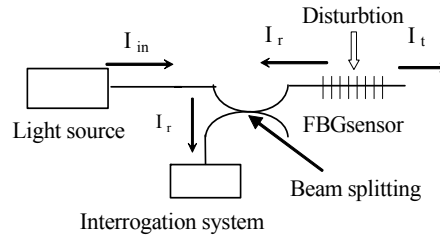


图 2-1 光纤光栅传感系统

Fig.2-1 Sensing system based on FBG sensors

$\lambda_B$  与光纤纤芯有效折射率  $n_{eff}$  以及光纤光栅长度周期  $\Lambda$  相关，它们的关系为：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2-1)$$

由式(2-1)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。当应变作用于光纤光栅时，光栅的拉伸会导致其周期的变化，同时光弹效应也会导致有效折射率的变化；温度场作用于光纤光栅时，由于光纤材料的热膨胀，会产生由热导致的应变，同时纤芯折射率也会因热光效应而随温度变化。

实际的应用中，可以应用实验的方法分别测定光纤光栅的应变灵敏系数

和温度灵敏系数，则由应变和温度变化引起的总的布拉格中心波长漂移

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (2-2)$$

式中的  $K_\varepsilon$  和  $K_T$  分别为传感器的应变灵敏系数和温度灵敏系数，都可以通过实验获得。

温度灵敏系数反映了波长相对漂移量  $\Delta\lambda/\lambda_B$  与温度变化  $\Delta T$  之间的关系。当材料确定后， $K_T$  是与材料系数相关的常数。温度灵敏系数可用下式表示：

$$K_T = \alpha + \zeta \quad (2-3)$$

式中  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数， $\zeta$  为光纤的热光系数。

光纤光栅的纤芯为石英，室温下石英的有效折射率  $n=1.4469$ ， $\alpha$  约为  $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $\zeta$  约为  $8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 9.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，那么温度灵敏系数  $K_T$  的理论值约为  $8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。若忽略温度对热膨胀系数  $\alpha$  和热光系数  $\zeta$  的影响，则光纤光栅温度灵敏系数  $K_T$  为一常量，波长变化与温度变化量是线形关系。

应变灵敏系数反映了波长相对漂移量  $\Delta\lambda/\lambda_B$  与应变变化  $\Delta\varepsilon$  之间的关系。当材料确定后， $K_\varepsilon$  是与材料系数相关的常数。应变灵敏系数可用下式表示：

$$K_\varepsilon = 1 - p_e \quad (2-4)$$

式中  $p_e$  为光纤的有效弹光系数。对掺锗石英光纤， $P_e \approx 0.22$ ，因此  $K_\varepsilon \approx 0.78$ ，因温度不影响弹光系数的值，所以光栅的波长变化与应变变化量呈线性关系。

### 2.2.2 光纤布拉格光栅温度及应变灵敏系数的确定

为了精确地得到光纤布拉格光栅的温度、应变灵敏系数，通过图2-2的装置来测定。图中的主要仪器是高低温箱，在箱外是为了测量应变灵敏系数而搭建的铁架子。实验测定的是光纤光栅从室温  $\sim 200^\circ\text{C}$  温度范围内中心波长对温度的依赖关系，以及  $20^\circ\text{C}$  和  $200^\circ\text{C}$  时波长和应变变化量的对应关系。所用光纤光栅为广泛使用的商业掺锗单模光纤，中心波长在  $1540\text{nm}$  左右。测量温度灵敏系数的光纤光栅自由悬挂在高低温箱内，经受环境温度的变化。使用高低温箱来提供温度环境，通过电子加热炉得到高温，试验箱内部温度在  $-150^\circ\text{C} \sim +1000^\circ\text{C}$  范围内连续可调，调节精度为  $1^\circ\text{C}$ ，由高低温箱内的 3 个热电偶温度计测量高低温箱内的温度，通过面板上的数字表读取温度

值。



图 2-2 灵敏系数测量装置

Fig.2-2 Measure set-up for delicacy

实验时的室温为  $17^{\circ}\text{C}$ ，每隔  $5^{\circ}\text{C}$  记录一次光栅的波长。光栅解调仪使用美国MOI公司生产的SI425。图2-3为实验测量到的结果，可以看出温度和光纤光栅的中心波长有良好的线性关系，经过线性拟合后，得到温度灵敏系数为  $11.033\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

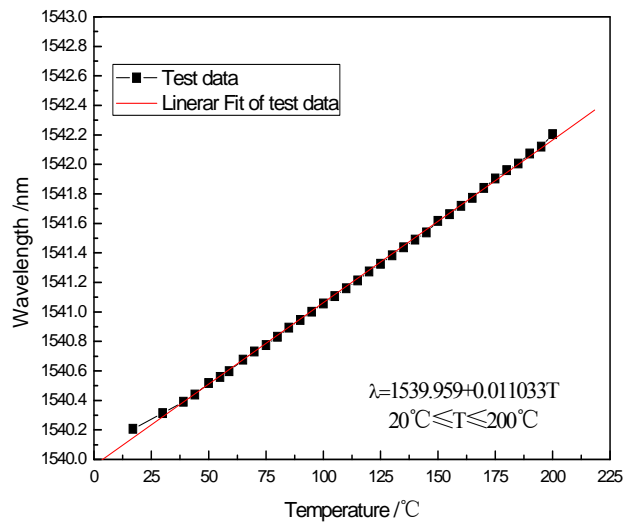


图 2-3 光纤光栅温度响应曲线

Fig.2-3 Temperature response of the FBG



用于测量应变灵敏系数的光纤光栅，两端粘贴在 1mm 厚的钢板上。下部的钢板与固定的钢架相连接，假定它在试验过程中是静止不动的；上部的钢板与微进给装置相连接，通过螺钉的微运动对光纤光栅施加纵向拉伸应力，测量光栅的应变敏感性。由千分表读出光纤的位移，其精度为 0.001mm。实验分别测量了 20℃ 下和 120℃ 下的应变灵敏系数。

图2-4显示了实验测量结果，两个不同温度下的光栅中心波长和应变值有良好的线性关系，最终使用的应变灵敏系数是两个温度下的平均值，为 1.174pm/ $\mu\epsilon$ 。

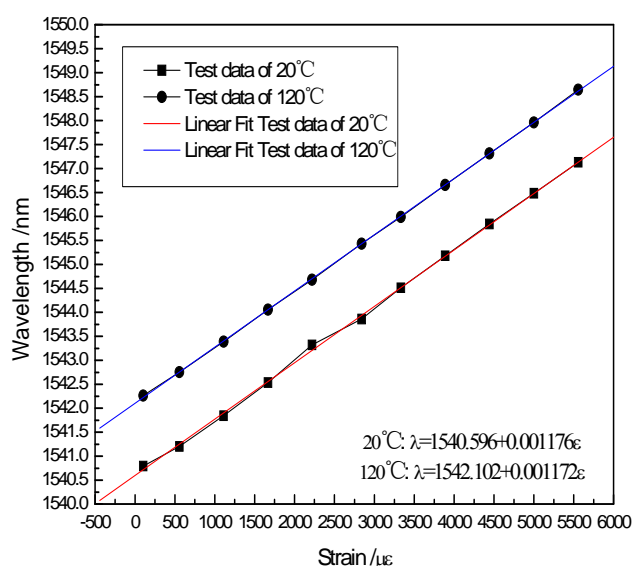


图 2-4 光纤光栅应变响应曲线

Fig.2-4 Strain response of the FBG

## 2.3 HD03 环氧树脂的化学流变模型

热固性树脂作为先进复合材料的基体材料，其生产工艺过程必须考虑树脂的粘度变化、凝胶、交联、固化动力学等多重因素，这些因素对产品的质量均有重要意义。对模压工艺而言，树脂的粘度变化将直接影响到加压时机和压力大小，因为树脂的外流也必然影响到材料内部树脂的固化度场和温度场的分布，影响制件最终树脂的含量，使产品的规格无法满足。树脂粘度明显影响树脂的流动，进而影响孔隙的迁移，在一定程度上影响孔隙的形成和

生长。

为了得到HD03 环氧树脂的化学流变模型，进行了 12 组等温粘度实验，温度分别为 118℃、122℃、129℃、136℃、140℃、145℃、147℃、150℃、155℃、158℃、160℃、165℃。实验仪器是MCR300 流变仪，实验测得的等温条件下粘度和时间的关系如图2-5所示。

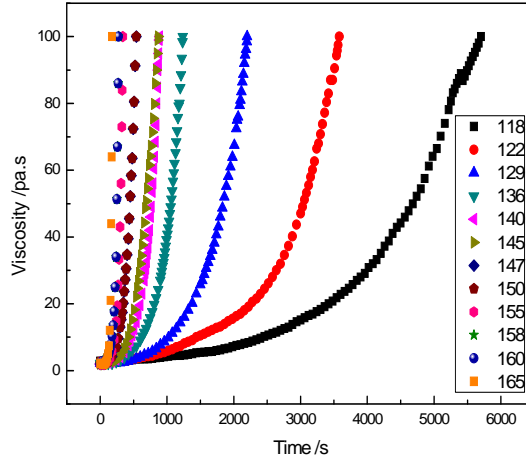


图 2-5 不同温度下测量的粘度

Fig.2-5 Measuring viscosity for different temperature

当树脂温度低于凝胶温度时，树脂不发生固化反应，此时树脂粘度仅受温度影响，树脂粘度会因温度的升高而降低；随着加热时间的持续，当树脂温度高于凝胶温度时，固化反应开始，树脂粘度逐渐增大，此时树脂粘度受温度和时间的双重影响。树脂本身为高分子聚合物，属于非牛顿流体。其粘度随着剪切速率的变化而变化。因此热固性树脂粘度可表示为时间、温度和剪切速率三个变量的函数：

$$\eta = \eta(T, t, \dot{\gamma}) \quad (2-5)$$

为了便于实验研究，假设树脂为牛顿流体，树脂粘度与剪切速率无关。这样，树脂的粘度仅受时间和温度的影响，可表示为二者的函数：

$$\eta = \eta(T, t) \quad (2-6)$$

Roller 认为 B-阶段环氧树脂的等温粘度模型为：

$$\eta(t) = \eta_0 \exp(Kt) \quad (2-7)$$

式中， $\eta_0$  为初始时刻的粘度， $K$  为反应速率常数。为了拟合出  $K$  值，将上式变换为：

$$K = \frac{\ln \eta(t) - \ln \eta_0}{t} \quad (2-8)$$

从式(2-8)可以看出， $K$ 值的意义为：任意时刻的粘度值同初始粘度无量纲化后取对数，再同时间相比。各温度下树脂的初始粘度列于表2-1。

表 2-1 各个温度下树脂的初始粘度

Table 2-1 Initial viscosity for different temperature

温度(°C)	初始粘度 $\eta_0$ (pa.s)
118.0195	1.02962
122.0833	0.95551
129.1852	0.78846
136.129	0.74194
140.9667	0.64185
142.6842	0.69315
147.4783	0.69315
155.4	0.58779
158.1429	0.69315
164	0.69315

将图2-5中的数据按照式(2-8)作图，得到图2-6。

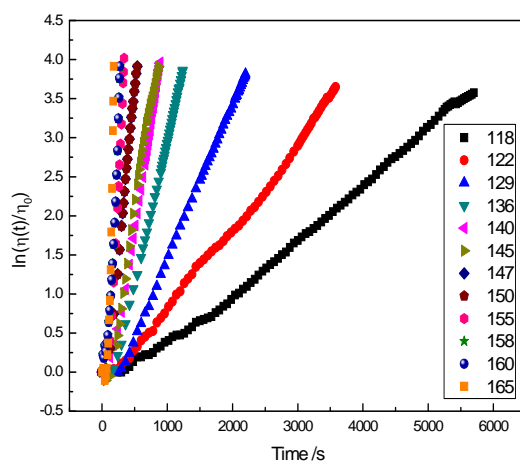


图 2-6 粘度无量纲化

Fig.2-6 The viscosity non-dimensions

图2-6中的各组数据经线性拟合后得到不同的K值，把得到的K值用二次多项式拟合，可得：

$$K(T) = 1.953 \times 10^{-4} \times T^2 + 0.1362 \times T - 26.75 \quad (2-9)$$

将各组的初始粘度  $\eta_0$  取对数后拟合得到下式：

$$\ln \eta_0(T) = 0.4213 + 9.611 \times \exp\left(-\frac{T}{42.06}\right) \quad (2-10)$$

将式(2-8)推广为非等温固化，则有：

$$\ln \eta(f(t), t) = \ln \eta_0(f(t)) + \int_0^t \exp[K(f(t))] dt \quad (2-11)$$

式中， $f(t)$ 表示温度是时间的函数。这样，对于 HD03 环氧树脂，在知道固化过程的温度历程的情况下，能够得到任意时刻的粘度值。当然，对于其他的树脂体系也可通过此种方法拟合出化学流变方程，根据温度历程的监测获取各个时刻的粘度。

为了验证拟合出来的方程的准确性，严格按照HD03 环氧树脂的固化工工艺制度测量了其粘度值，如图2-7。可以看出，时间段在 1 小时前，缺少等温粘度的数据，拟合的效果较差；1 小时后测量粘度和推导出的粘度符合较好。由于加压时机在 1 小时之后，因此能够按照拟合方程实时计算粘度，来确定加压时机。

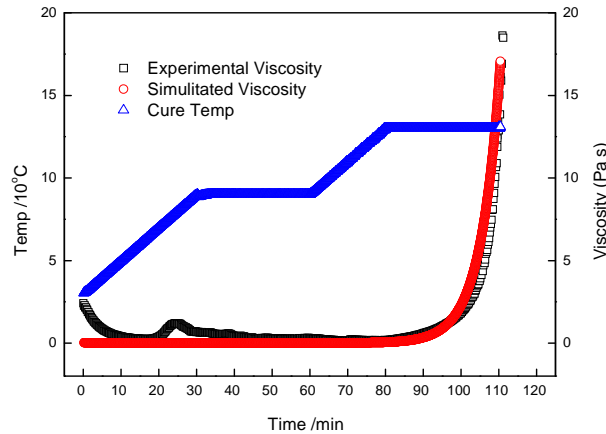


图 2-7 拟合方程的实验验证

Fig.2-7 The comparison between the measured and predicted viscosity of HD03

## 2.4 光栅监控T300/HD03 制造过程

使用光栅监测 T300/HD03 复合材料固化过程的温度历程，将温度值带入到 HD03 树脂的化学流变方程中，得到树脂的粘度，根据粘度值来控制加压时机，从而完成复合材料制造的数字化。

### 2.4.1 试验准备

试验使用 T300/HD03 预浸料，按照模具的尺寸裁减大小， $270 \times 170 \text{mm}$ ，其铺层形式为 $[0^\circ / 90^\circ_2 / 0^\circ_2 / 90^\circ_2 / 0^\circ / (F_0) / 0^\circ / 90^\circ_2 / 90^\circ_2 / 0^\circ]$ ，共 16 层，光栅布置在中间层，和增强纤维平行。在模具的边框上留有孔洞，能够引出光纤。

T300/HD03 预浸料的固化工艺为：从室温开始升温到  $90^\circ\text{C}$ —保温 30min—升温到  $130^\circ\text{C}$ —保温 30min—保温结束后施加 5MPa 压力—升温到  $175^\circ\text{C}$ —保温 210min，升温速率为  $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。然后关闭加热装置，自然降温至室温。试验在热压机上完成，热压机的温度控制通过可编程模块来实现。监测装置和实验设备如图2-8所示。

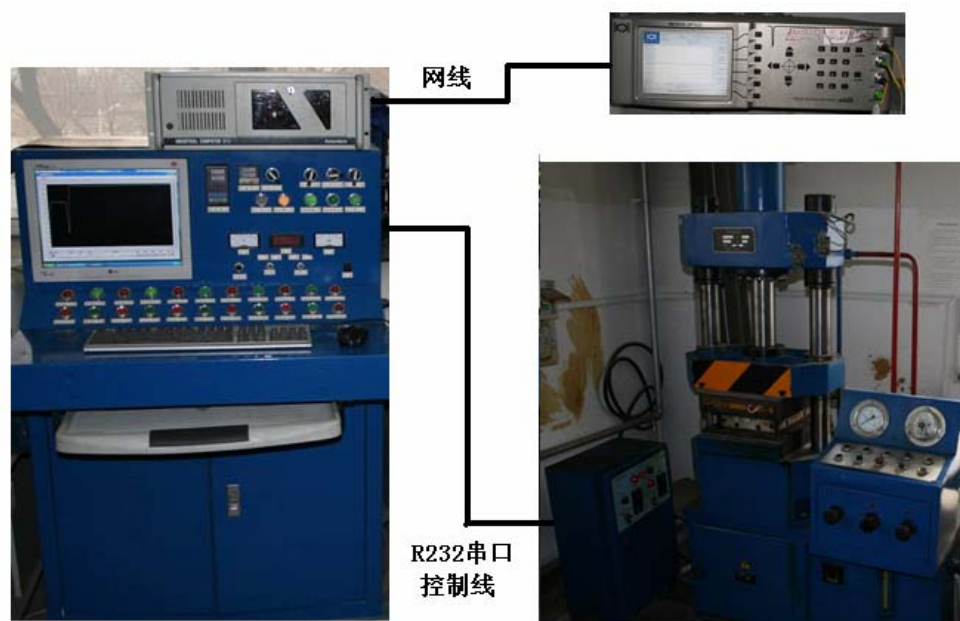


图 2-8 光纤光栅监测装置和实验设备

Fig.2-8 Instrument of monitoring for cure process of composite laminate

由于光纤光栅对温度和应变都敏感，需要对其解耦。实验中，采用参考光栅法进行解耦，使用直径 0.7mm 的钢管封装光栅，作为温度传感器（参考光栅），另一个光纤光栅直接埋入到预浸料中，作为应变传感器。两个光栅的布置间隔为 20mm。测量时，应变传感器获取的是应变和温度之和，去除掉温度的影响，即为应变信息。另外，在光纤光栅温度传感器的附近还埋设了一组热电偶，用来同光栅的测量结果相比较，其数据的采集由模块 ADAM4018 完成。

## 2.4.2 温度监测

图2-9给出了压机上、下压板的热电偶、复合材料中的热电偶和光栅测量温度的结果。图中非常突出的数据点是光纤光栅应变传感器测量到的结果，在这个时刻施加了压力。若只看加压时间之前的部分，可看出各种传感器的测量值很接近。

热电偶虽然也能够埋入到材料中，但其体积大，是光栅的数十倍，还需要两个组成一对才能工作，这样无法在工程上广泛应用。光栅却可以发挥它体积小的优点，完全适合工程的要求，在后文中，还将讨论光纤的埋入对复合材料结构的具体影响。

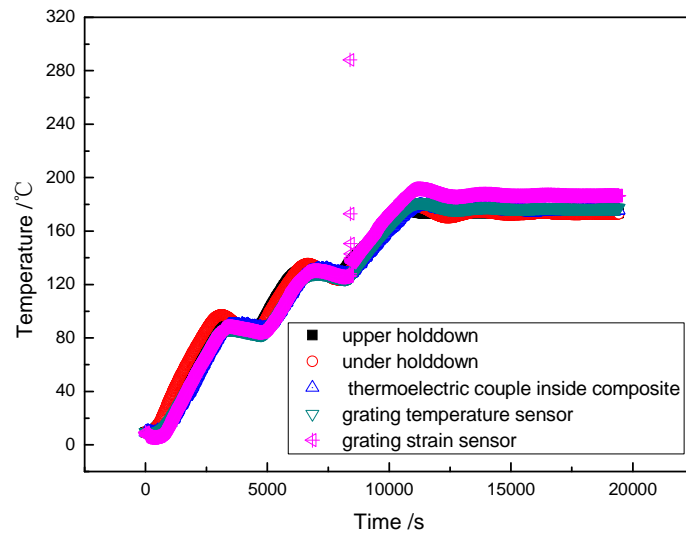


图 2-9 不同传感器的监测结果

Fig.2-9 Monitored results by different sensor

### 2.4.3 实时粘度计算

使用Labview软件制作了光纤光栅信号采集程序，解调仪与计算机使用网线连接，通讯协议为IP/TCP协议。在采集过程中，把光纤光栅温度传感器的测量值和应变传感器实时地处理，可以获得相应的温度和应变，软件截图如图2-10所示。将获得温度带入到化学流变方程中，每隔1秒钟计算一次，得到的粘度，软件截图如图2-11所示。在程序中已经嵌入了相应的公式，粘度的数值也是可实时察看的。

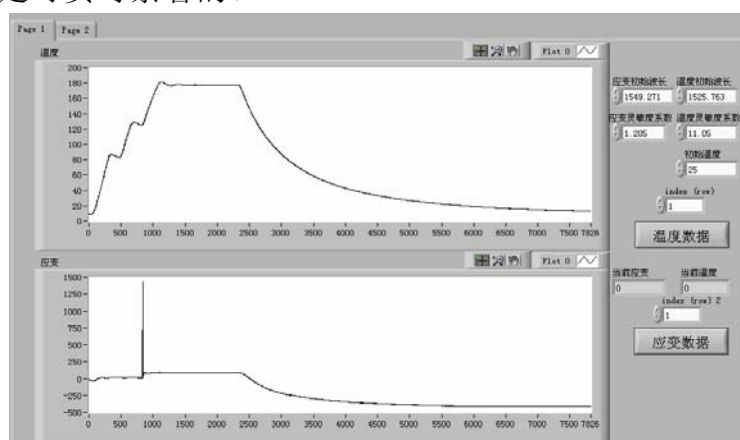


图 2-10 固化监测与处理软件界面

Fig.2-10 Software interface of the cure monitoring and processing system

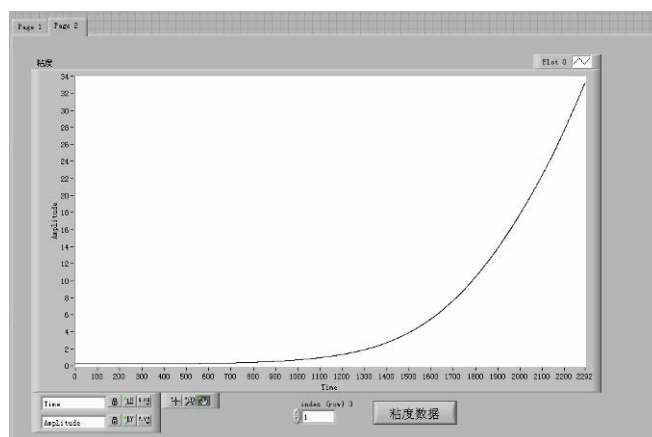


图 2-11 计算粘度界面

Fig.2-11 Software interface of calculation viscosities

从图2-9的温度历程看，在加压之前光栅温度传感器和光栅应变传感器两者的监测到的温度吻合得很好，因此将这两组加压之前的温度历程代入到式(2-11)中，得到两条粘度曲线，如图2-12所示。

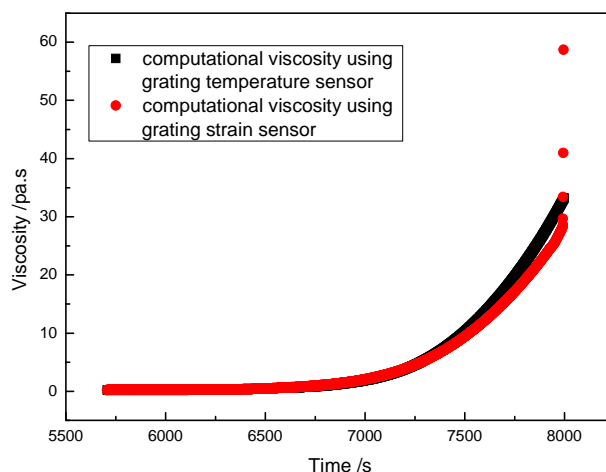


图 2-12 使用不同传感器计算的粘度值

Fig.2-12 Viscosities calculated via different sensors

#### 2.4.4 分析与讨论

从图2-9看出，光纤光栅和热电偶都能准确地反映材料内部的温度，同压机上、下压板的热电偶相比，升温阶段的同一时刻温度较低，这是由于模具吸收了热量以及热量散失，传递到材料内部时没有达到预定的温度。在三个保温段，时间足够长，几个传感器的测量值基本上相同，和设定的预定值也相同。

施加压力时光栅应变传感器有明显的增值，而后迅速地下降。因为施加压力后，树脂内部压力急剧升高，带动光栅产生较大的应变。随着树脂被压出，树脂承担的压力逐渐转移到纤维上，光栅的信号也开始回落。随后它所反映的温度值已经开始大于另外几个，因为随着温度不断地升高，树脂的粘度上升得很快，其热膨胀能够带动光栅产生应变，这时的应变传感器测量到的是应变和温度的和，在图2-9中没有去除掉应变变量，都转化成了温度。

图2-12中的两条粘度曲线从初始很长一段时间内彼此都很接近，随着温度的升高两条曲线也变得有了差别。差别的产生是由于温度传感器处于钢管



封装的空气中，应变传感器在材料中，导致两个光纤光栅测量的温度值稍有差别，随着积分的累积，差异开始逐渐显现出来。加压时，用光栅温度传感器计算得到的粘度为 32.87Pa.s，用光栅应变传感器计算得到的粘度为 33.44Pa.s，这说明在加压之前，应变传感器测量到的只有温度信息，几乎不包含应变信息。这对于工程应用来说，具有极高的价值，使用光纤光栅监测复合材料固化，光纤的埋入影响了材料的微结构，也就影响了复合材料的力学以及结构上的性能。如果只是裸光纤，由于其体积小，其相容性还不成问题。若把光纤光栅封装起来再使用，相容性很差，因为封装钢管的尺寸要比光纤的直径大很多，这样就影响了光纤光栅在复合材料中的应用。裸光纤光栅在加压之前测量到的几乎完全是温度信息，因而可以采用不封装的光纤光栅直接埋入到材料中，同样能够实现在固定的粘度值施加压力，而几乎不影响结构的力学性能。

### 2.4.5 不同加压时机的比较

为了对比不同时刻加压时复合材料树脂的粘度，以及加压时机对复合材料层板的厚度、残余应变的影响，在不同的时刻做了两次实验，以正常工艺为基准，加压时机分别为提前 15 分钟、滞后 10 分钟，另外还以粘度为信号进行了一次验证实验，加压时的粘度值为 34.76Pa.s。

#### 2.4.5.1 层板厚度的比较

产品的厚薄也是影响其质量的一项重要因素，从产品的厚薄程度可以判断出纤维的含量，以及是否满足装配的要求。将层板制造完成后，使用螺旋测微器测量复合材料层板四个角的厚度，结果列于表2-2。

表 2-2 不同加压时机制造的层板的厚度的比较

Table 2-2 Thickness of composite laminate pressurized at different moment

加压时机	第一点厚度(mm)	第二点厚度(mm)	第三点厚度(mm)	第四点厚度(mm)	施加压力时的粘度值(Pa.s)
正常工艺 (标准)	1.98	2.02	2.05	2.07	33.44
提前 15 分钟	1.78	1.82	2.02	1.89	2.70
滞后 10 分钟	2.09	2.25	2.20	2.36	77.59
正常工艺 (以粘度为信号)	2.00	2.05	2.02	2.13	34.76

从表中可以看出，加压时机对复合材料层板的厚度有很大的影响，加压时间提前，树脂粘度低，加压后树脂大量被挤出，层板变薄；加压时间滞后，树脂的粘度过大，被挤出的量很少，制造出的层板很厚。

层板的厚度小于模腔，是由于钢制模具在加热过程中发生膨胀，体积自然也会向模腔内部延伸。在加压时，树脂的粘度小，流动性强，无法抵抗压力，因此层板变薄。

层板的厚度超出了模腔的范围，这是由于，模压工艺制造复合材料，为了使加压之前上模不影响复合材料，在阴模与阳模之间加入了 0.5mm 的垫片，在需要加压的时候再撤出。加压时间滞后，复合材料固化过程已处于后期，能够抵抗压力，因此层板变厚。

根据此表可以看出，加压时机对层板的厚度有直接影响，因此为了制造出合格的产品，选择合适的加压时机尤为重要。

#### 2.4.5.2 残余应变的比较

复合材料产品的质量和力学性能与材料固化工艺过程密切相关，固化工艺过程中形成的残余应变是影响材料质量的重要因素之一。残余应变是以光栅测量到的信号计算出来的，为便于比较，将各种情况下的残余应变列于表 2-3。从表中可以看出，正常工艺下，复合材料成型后的残余应变较小，以粘度为信号施加压力获得的层板的残余应变也相对较小。而另外两种情况制造出的层板残余应变却较大。

表 2-3 不同加压时机制造的层板残余应变的比较

Table 2-3 Residual strain of composite laminate pressurized at different time

加压时机	加压前应变 ( $\mu\epsilon$ )	加压后最大应 变( $\mu\epsilon$ )	成型后的残余 应变( $\mu\epsilon$ )
正常工艺(标准)	24	417	-406
提前 15 分钟	-103	403	-892
滞后 10 分钟	-366	154	-445
正常工艺(以粘度为信号)	16	450	-338

为了比较固化过程的应变历程，将不同工艺下的应变历程曲线列于下面。由光栅监测到的正常工艺下复合材料的应变历程如图2-13。从图中可以看出，在升温的初始阶段，复合材料内部的应变先有所下降，这是由于以埋入后的光栅波长为初始值，此时的光栅处于张紧状态。温度升高后树脂的束

缚能力下降，光栅恢复自由状态。而后树脂的粘度增加，材料内部开始出现正应变。施加压力后，树脂的内压急剧增加，应变达到顶点，然后迅速下降达到一个平稳值，直到保温时间结束。

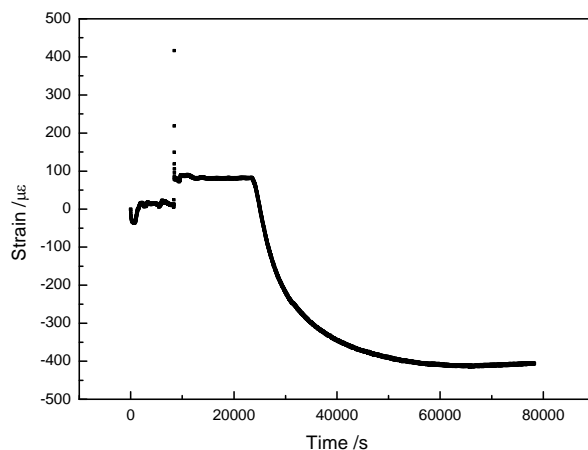


图 2-13 正常工艺下复合材料的应变历程

Fig.2-13 Strain evolution of composite at standard process

由光栅监测到的提前加压下复合材料的应变历程如图2-14。从图中可以看出，施加压力后，树脂由于流动性好，所承担的内压也小。树脂流出一部分后，压力有所下降。随着固化过程的继续，交联反应逐步加深，树脂粘度开始提高，应变也开始变大，直到保温时间结束。

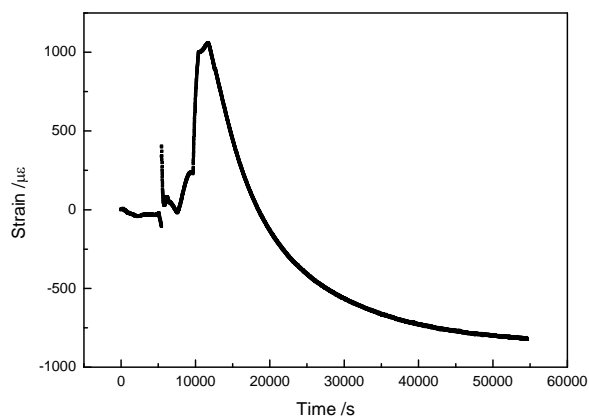


图 2-14 提前加压下复合材料的应变历程

Fig.2-14 Strain evolution of composite at advancing pressure-applied

由光栅监测到的滞后加压下复合材料的应变历程如图2-15。从图中可以看出，施加压力后，材料内部的压力由树脂和纤维一同承担，此时的树脂流动性很小，流胶量也很少，其回落值也比其他两种情况小。

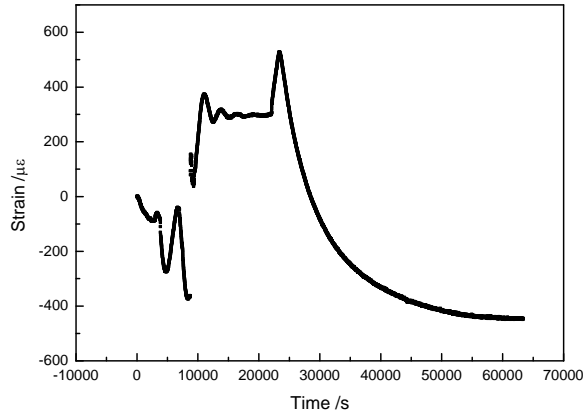


图 2-15 滞后加压下复合材料的应变历程

Fig.2-15 Strain evolution of composite at deferring pressure-applied

比较上面的三幅图，在加压时材料内部的应变都有所增加，并且迅速回落，但正常工艺下回落后会保持应变在一个稳定的值，而另外两种情况却还会继续增加。在后固化过程中，正常工艺下的应变变化很小，基本保持为一个常数。以粘度为信号施加压力所制造的层板，其应变历程 如图2-16所示。从图中也可看出其后固化阶段的应变值变化不大。

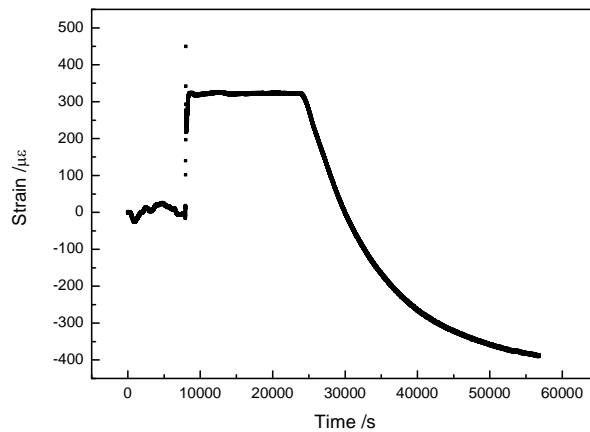


图 2-16 以粘度为信息加压下复合材料的应变历程

Fig.2-16 Strain evolution of composite at pressure-applied by viscosity

以粘度为信号进行的实验表明，复合材料同样获得了良好的性能。复合材料的固化过程是温度与时间的累积，光栅测量到的温度带入到树脂的化学流变方程中得到粘度能够反映这种累积，以粘度为信号选择加压时机是可行的。这种方法能够实现复合材料制造过程中材料内部温度的监测，进而对加压时机加以控制。

从计算的粘度曲线看，HD03 树脂在到达一定的温度后，粘度增加得很剧烈，这样，我们所选择的加压时机很难控制在一个值上，而选择一个带宽进行加压比较合理。对于 HD03 树脂的加压时间范围是 130℃ 保温后的 25～30 分钟内，因此确定出的加压范围为 18-35Pa.s。

## 2.5 复合材料固化过程数值模拟

复合材料固化过程模拟提供了预测其固化工艺周期（温度、固化度和残余应变）的手段，更加清晰地理解固化过程复杂的物理化学变化。在此，选用文献[115]中的程序来完成数值模拟，同监测结果进行比较。

文献[115]中的程序采用ANAYS通用有限元程序，通过APDL二次开发语言实现温度的数值模拟。在模型建立前，首先假设复合材料在固化过程中各处的加热是均匀的，故此取一断面来进行模拟。模拟中所使用的材料物理和热力学参数如表2-4所示。

表 2-4 材料的物理参数  
Table 2-4 Properties of composite

参数	值	参数	值
树脂密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.25	纤维密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.80
树脂比热 ( $\text{J/g/K}$ )	1.26	纤维比热 ( $\text{J/g/K}$ )	0.712
树脂热传导率 ( $\text{W/m/K}$ )	0.24	纤维热传导率 ( $\text{W/m/K}$ )	2.51
预浸料密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.5935	预浸料比热 ( $\text{J/g/K}$ )	1.03
预浸料热传导率 ( $\text{W/m/K}$ )	0.711	纤维体积含量	0.6

模拟时选择PLANE55 单元，4 节点。模型尺寸为  $170 \times 2\text{mm}$ ，共划分单元 200 个，节点 255 个。以中心节点为例，其模拟温度与监测温度相对比的曲线如图2-17所示。监测的时候，由于温度的升高需要有传热的过程，因此热量传递从加热台到模具，再到材料内部会有一段时间延迟。而在模拟的过

程中却没有考虑这一点，因此，在同一时刻模拟的温度高于监测的温度。在 90℃ 和 130℃ 的保温段，监测曲线是略向下倾斜，因为模具和空气之间存在热交换，模拟过程也没有考虑这点。对于三段升温曲线，其斜率逐渐变小，也可看出加热装置在高温加热段的升温速率变缓。

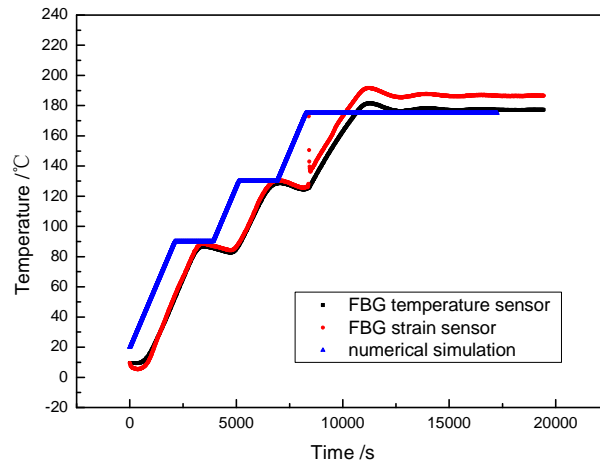


图 2-17 模拟温度与监测相比较

Fig.2-17 Comparison of temperatures simulated and monitored

将模拟温度也带入到式(2-11)中，画出曲线和图2-12合并得到图2-18。由于粘度的计算依赖于温度，因此模拟出的粘度值和实测温度计算出的粘度值有一定的差别。

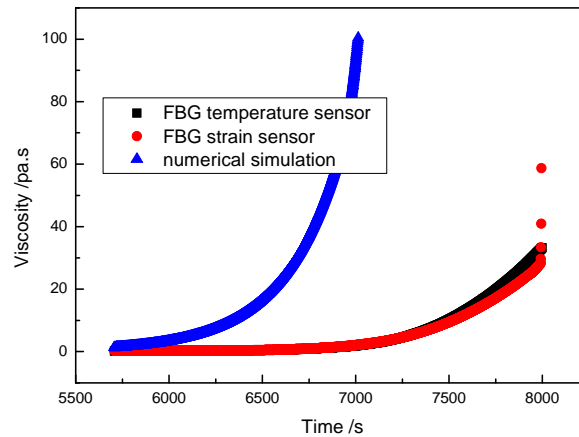


图 2-18 模拟粘度与监测相比较

Fig.2-18 Comparison of viscosities simulated and monitored

## 2.6 埋入光纤对复合材料性能的影响

光纤传感器的埋入无疑破坏了复合材料的微结构，扰动了周围复合材料的应变场，光纤周围会产生树脂富足区，是材料发生破坏的潜在。有必要分析出光纤埋入后对材料影响的具体后果。

使用 ANSYS 通用有限元程序，采用 SOLID46 单元模拟层合板，SOLID45 单元模拟光纤部分。引入应力集中系数把光纤对结构的影响量化。应力集中系数计算由下式计算：

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (2-12)$$

其中， $\sigma_{\max}$  为最大应力， $\sigma_0$  为远场平均应力。计算时，施加的应力为 100MPa，表2-5列出了应力集中系数的计算结果。

通过计算，可以看出，埋入光纤后会对结构的力学性能产生一定的影响，单向板中光纤平行于纤维和受力方向时，应力集中系数最小。在埋光纤传感器智能复合材料中，就应该尽可能地采用这种构造。当然，若传感器的主要作用是监测树脂裂纹，就要对结构稍做改动。

表 2-5 埋入单模光纤的计算结果

Table 2-5 Calculation result for embedded optical fiber

层板形式	光纤埋置方式	拉伸		弯曲	
		最大应力 (MPa)	应力集中系数	最大应力 (MPa)	应力集中系数
单向	垂直载荷	126	1.26	1210	1.21
单向	平行载荷	113	1.13	1150	1.15
正交	垂直载荷	290	1.53	1380	1.38
正交	平行载荷	284	1.49	1310	1.31

使用模压工艺制作了拉伸和弯曲试件，通过拉伸和弯曲试验来验证光纤对结构的影响。单向试件的尺寸为  $15 \times 230\text{mm}$ ，正交试件的尺寸为  $25 \times 230\text{mm}$ 。实验在英斯特朗实验机上进行，表2-6列出了光纤对结构的影响程度。

通过试验研究，可以看出光纤的埋入对结构会产生一定的影响，有些制造过程中的人为缺陷还超过了光纤的影响，使得应力集中系数小于 1。在实

验中，光纤对结构的影响并不是很大，完全可以接受，埋光纤光栅到复合材料中进行健康监测是可行的。

表 2-6 埋入单模光纤的试验结果

Table 2-6 Experiment result for embedded optical fiber

层板形式	光纤埋置 方式	拉伸		弯曲	
		最大应力 (MPa)	应力集中系数	最大应力 (MPa)	应力集中系数
单向	无光纤	1010.47	1	1518.55	1
单向	垂直载荷	926.30	1.09	1517.85	1.0001
单向	平行载荷	935.57	1.08	1621.69	0.94
正交	无光纤	528.71	1	914.22	1
正交	垂直载荷	546.78	0.97	847.63	1.18
正交	平行载荷	524.34	1.01	773.75	1.08

## 2.7 本章小结

本章利用粘度信息实现了复合材料固化过程加压时机的准确控制，提高了材料制造过程的质量。针对 HD03 环氧树脂，按照 B-阶段环氧树脂的等温粘度模型，通过等温粘度试验，经过数据拟合得到了化学流变方程。将光纤布拉格光栅埋入到复合材料中，不仅能够对其固化过程进行温度监测，还可以将监测到的温度信息带入到树脂的化学流变方程中，实时地计算出粘度值，从而选择合适的粘度带施加压力。对于 HD03 树脂，合理地加压范围为 18-35 Pa.s。裸光栅在施加压力之前监测到的基本上是温度值。在粘度值为 34.76Pa.s 进行了施加压力制造层板的验证，层板的性能良好。

比较了不同加压时机制作出的层板的厚度，残余应变，以及固化过程的应变历程。正常工艺下，复合材料层板的厚度符合要求，残余应变相对较小，在加压之后，层板的应变保持常量；提前加压时层板的厚度变薄，滞后加压层板的厚度变厚，残余应变也相对较大，加压之后，层板的应变还会增加，处于不平稳变化。

本章通过埋入光纤光栅不仅对复合材料的生产实现了监测，还将监测到的信息反馈到生产中，完成了复合材料制造的闭环控制。该方法能够有效地



控制加压时机，将操作者的经验转化为可视化的粘度值，提高产品的合格率。粘度信息体现了复合材料固化过程中温度、时间的累积，光纤光栅的可埋入性实现了复合材料固化中真实温度的监测，保证了计算粘度的准确性，也可按此方法对复合材料的其它工艺参数进行控制。对复合材料成型工艺的控制，实现了复合材料结构全寿命健康监测的第一步。

## 第3章 复合材料和铝板界面的应变监测与分析

### 3.1 引言

单一材料一般很难满足工程应用的需求，因此通过合成两种或两种以上组分材料构成复合材料结构，发挥各种材料的优势，为各个领域服务。从 20 世纪 60 年代以来，先进树脂基复合材料已成为现代航空航天不可缺少的材料之一。

复合材料又通常与金属材料一同使用，来弥补复合材料不密封、纤维不能承受压力的缺点，例如，复合材料导弹弹翼中需要加入钛合金骨架，蜂窝夹层结构中的复合材料蒙皮和铝蜂窝，金属内衬纤维缠绕复合材料压力容器等。但是，纤维增强复合材料是各向异性材料，金属材料为各向同性材料，两者在固化过程中将产生复杂的温度场，出现不均匀的温度分布，从而产生较高的热应力和热变形，影响两者胶接在一起的强度。如果两者在固化过程中不能很好地胶接在一起，在使用过程中必然造成金属和复合材料的分离，使得整个结构失效。

具有金属内衬的纤维缠绕复合材料压力容器在高压工作状态下，复合材料最大的变形可达千分之五，此时铝内衬已进入塑性变形区，但是复合材料仍在弹性变形范围之内。当复合材料压力容器卸压的时候，复合材料的弹性变形要恢复到原始状态，而铝内衬的塑性变形是不可恢复的。此时发生了两种材料变形不协调的问题，相当于在铝内衬外表面施加了载荷。如果铝内衬无法阻挡复合材料的恢复，就会出现内衬的压缩失稳，在内壁形成褶皱，使整个容器失去使用的价值<sup>[116]</sup>。

另外，当具有金属内衬的压力容器内部没有压力作用时，而环境的温度变化很大，使容器处于温度载荷作用下，两种材料由于热膨胀系数不同，接触层处的材料相互制约，保持变形一致，而两种材料各自的表面又会自由变形。若铝内衬的变形很大，在复合材料的约束下只能向内部突出，和复合材料分离脱粘。

因此，有必要了解金属和复合材料界面的固化过程、载荷作用下的协调变形情况，为复合材料和金属共同安全服役提供更加可靠的依据。光纤光栅传感器由于具有可埋入的优点，为界面处的监测提供了一种可能的手段。

本章使用缠绕方法制作复合材料层板，将光纤布拉格光栅传感器埋入到缠绕复合材料层板中、铝板和缠绕复合材料板之间，监测整个固化历程，包括固化过程的温度变化，升温过程和降温过程的应变变化，比较不同部位的差异。在压力容器的桶身部分切割出试样，将光纤光栅粘贴在复合材料外表面、铝板外表面、两种材料界面之间，在温度载荷下，比较三处的变形，并用 ANSYS 软件进行了模拟。

## 3.2 复合材料与铝板共固化监测

缠绕法制造复合材料层合板是以钢板为芯模，在其上缠绕浸泡过树脂的单向纤维，达到预定厚度后合模，在芯模侧面将纤维断开，然后放在烘箱中固化，形成两块单向纤维层合板。为了监测复合材料和铝板共同固化，在缠绕结束后，先放置一块铝板，然后合模。

### 3.2.1 铝板的处理

裁剪 300mm×300mm 的铝板，铝板厚度 1mm，为保证铝板的平整度，剪切时使用专用的切割机。先用水去除表面的泥污，然后放入烤箱在 60℃ 的温度下干燥 30min。取出后用细砂纸打磨粗化，使用浓度 99.5% 的丙酮溶液擦洗除脂，再放入烤箱中在 60℃ 的温度下干燥 30min。取出后在表面擦酸液酸蚀，酸蚀法可以使铝板表面形成新的氧化膜，如同其他非贵金属一样，表面氧化膜可以使树脂与之产生有效粘接，从而提高结合强度。酸液配制为浓硫酸:重铬酸钾:水=1:10:30，等待 10min 后用 65℃ 清水冲洗干净，再放入烤箱中 60℃ 干燥 30min。再次取出铝板后，表面涂抹按一定配比调制的环氧树脂。

### 3.2.2 纤维缠绕单向板的制造

制作的复合材料单向板使用碳纤维 T800，2 股纱，每层 0.125mm，在无级变速缠绕机上缠绕而成。模具经过处理后在上面刷脱模剂，然后安装在缠绕机上，一次缠绕可以制作两块板。缠绕过程中使用螺旋测微器测量板的厚度，当厚度达到 1mm 时（约 8 层纤维），平行纤维方向和垂直纤维方向分别布置 FBG 应变传感器。由于 FBG 传感器对温度和应变都敏感，采用参考光栅法进行解耦，所埋置的参考光栅是用 0.7mm 粗的针管封装的 FBG 传感器，此

装置作为温度传感器。FBG应变传感器和FBG温度传感器布设位置如图3-1所示。

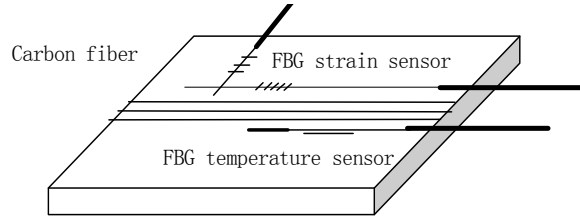


图 3-1 光纤光栅传感器的布置示意图

Fig.3-1 Sketch map of laying FBG sensors

光纤的进出口用 0.7mm粗的针管保护，放置光栅图如图3-2。树脂的粘度足以粘牢传感器和保护针管，使它们在模具旋转的过程中不会脱离下来。



图 3-2 安装光纤光栅传感器和保护针管

Fig.3-2 Laying FBG sensors and bushing

放置完传感器后，继续缠绕，当厚度达到 2mm 时（15 层纤维），缠绕结束，再放置 2 个 FBG 应变传感器，方向分别为平行纤维方向和垂直纤维方向，由于此处位置和 FBG 温度传感器的位置只有 1mm，假设这两个位置的温度历程是相同的，只需用 1 个温度传感器来解耦。

此处光纤出口的保护采用聚酰亚胺 F46 薄膜，此种薄膜是由聚酰亚胺

薄膜双面涂布聚全氟乙丙烯树脂经高温烧结而成，耐高、低温，同时具有自粘性。将宽度 10mm 的聚酰亚胺 F46 薄膜，裁减 100mm 长的两片，把光纤传感器作为进出口的部分放在两片薄膜的中间。加热棒通电加热达到 350℃ 时，开始对薄膜进行加热 30 秒。

传感器与薄膜成为一体后，按设计布置在缠绕纤维上，然后在其上面放置铝板，加上模具盖板后用螺栓拧紧。模具另一侧的复合材料板不进行监测，直接加模具盖板。整个监测试件如图3-3所示。最后把整个模具从缠绕机上卸下，放置到烤箱中准备加热。



图 3-3 光纤光栅传感器的布置

Fig.3-3 Laying method of FBG sensors

烤箱上预留孔洞，把光纤延长线从孔洞中穿入到烤箱中，再把光纤光栅和光纤延长线用熔接机熔接在一起，光纤延长线上有 FC 接头，可以与光栅解调仪相连。光栅解调装置使用美国 Micron Optics 公司生产的 4 通道 SI425。将传感器与解调仪连接好后，发现垂直于纤维方向的 2 个传感器均没有信号，可能是由于在合模时压力过大，纤维与光栅传感段发生剪切，光栅传感段的抗剪强度很低，使传感器损坏。因此，在未来的研究中应寻求一种抗剪强度大，或者传感段经过特殊处理不影响灵敏度的光栅，能够经受得

住纤维的剪切，保证监测工作的顺利进行。

### 3.2.3 温度监测结果和分析

所使用的环氧树脂在室温下为黑色粘稠状液体，其固化工艺为：升温速率为  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，温度达到  $80^{\circ}\text{C}$  时保温 2h，继续升温到  $120^{\circ}\text{C}$  保温 2h，关闭烤箱自然降温。固化过程中不需要施加压力。

图3-4显示了FBG测量温度的结果，光栅测量的结果低于烤箱的设置温度，这是由于，烤箱自身的热电偶处于烤箱的温度中，光栅温度传感器位于材料内部，热电偶先达到温度设定值，使烤箱停止加热；此时热量还没有完全传递到材料内部，因此光栅的测量温度值比预设值小  $10^{\circ}\text{C}$  左右。

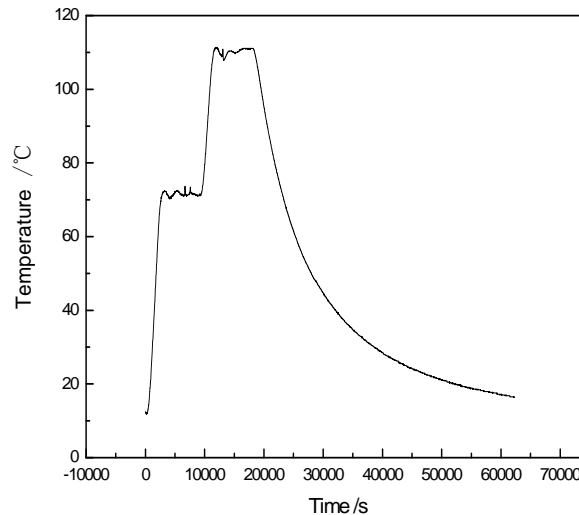


图 3-4 光栅温度传感器的监测结果

Fig.3-4 Monitored result of FBG temperature sensor

从温度监测曲线可以看出，经过封装后的光纤光栅能够作为温度传感器，测量出复合材料固化过程中材料内部的温度历程，由于烤箱中的热电偶先达到预设温度，使光栅测量到的值小于工艺过程的温度。

### 3.2.4 应变监测结果和分析

#### 3.2.4.1 升温阶段

图3-5显示了升温过程中两个不同位置的光纤光栅传感器测量到的应变情况。初始阶段，复合材料内部、复合材料和铝板界面之间的应变都在下

降。经过一段时间后，复合材料内部、界面处的应变均发生转折，界面处应变非线性逐渐增加，复合材料内部的应变依然继续下降。界面处的应变在升温即将结束时趋于平缓，而复合材料内部的应变经过不长时间就转为平缓，一直保持到升温结束。处于不同位置的两个光纤光栅测量到了两种不同的情况。

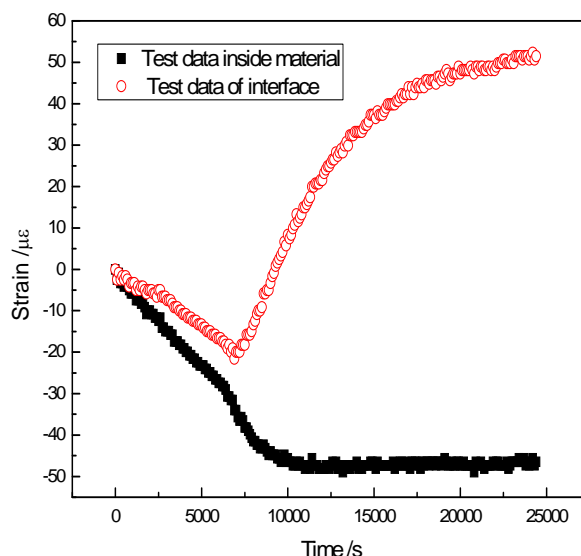


图 3-5 升温过程应变监测

Fig.3-5 Monitored strain during temperature rise

升温初期（图3-5），两个光栅测量到的应变均为负值，说明光栅放入材料中后，由于安装模具盖板时使用螺丝拧紧，盖板给增强纤维和树脂施加了压力，增强纤维和树脂带动光栅产生了拉应变。测量时，把这时的波长作为初始值。当温度不断升高，树脂的粘稠度逐渐下降，不能再束缚住光栅的应变，光栅的应变有下降的趋势。升温一个多小时后，两个光栅的测量值都产生了拐点，界面处的应变在 $-20\mu\epsilon$ 时有上升的趋势，光栅开始测量到拉应变。这是由于温度不断的升高，铝的热膨胀系数大，热膨胀快，铝板膨胀，带动与之相连的光栅产生正应变。材料内部的应变却迅速的下降，当应变到达 $-47\mu\epsilon$ 时，应变开始保持平稳，不再变化。这是由于金属模具的膨胀系数大，升温膨胀后使内部的材料处于受压状态，材料体积被压缩，使光栅产生了压应变。

#### 3.2.4.2 降温阶段

降温采取自然降温。图3-6显示了降温过程中两个不同位置光栅的测量

结果。降温时，两个光栅测量到的应变都开始下降。界面处的应变下降得比较剧烈，在趋于平缓的时候应变产生了一个跳跃。复合材料内部的光栅先下降，而后有所增加，在一个拐点处又开始下降。

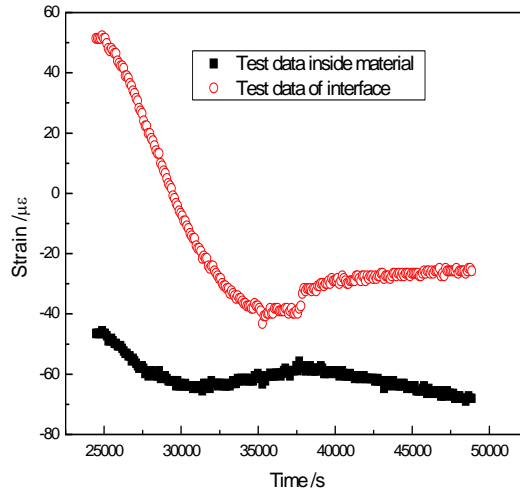


图 3-6 降温过程应变监测

Fig.3-6 Monitored strain during temperature fall

降温时（图3-6），界面处的光栅下降得比较快，因为铝板的热膨胀系数大，降温时收缩得快，带动光栅的应变迅速降低，而后趋于平缓。固化 10h 左右时，应变产生了跳跃，约  $6\mu\epsilon$ 。这是由于复合材料和铝板的热膨胀系数不同，铝板收缩过快，两者发生了分离，因而界面间的应力有所释放。复合材料内部的光栅也由于温度下降应变有所降低，但比较缓慢，而后趋于平缓。

埋入 FBG 传感器可以实时监测缠绕单向板的固化过程，以及复合材料和铝板之间界面的固化应变。FBG 传感器的测量数据表明，复合材料内部与界面之间在固化过程中存在着差异；两种不同的材料在固化后期存在着分离的现象，释放了一部分应力。

### 3.3 复合材料与铝板协调变形监测

复合材料与金属材料胶接在一起使用时，如果有温度载荷的作用，存在热不匹配问题。复合材料和金属的热膨胀系数不同，受到温度载荷的作用时在层间存在着热应力，会使结构变形和脱粘。利用光栅的可埋入性，监测两



者的变形，将为工程的实际应用提供更多的可靠数据，提高粘结强度，增加使用寿命。

### 3.3.1 高温环境下的协调变形

#### 3.3.1.1 实验试件的制作与实验设备

将复合材料与铝板切割成条形试件，尺寸分别为  $250 \times 25 \times 3\text{mm}$  和  $250 \times 25 \times 1\text{mm}$ 。复合材料与铝板的粘接使用常温固化胶粘剂J-39 将试件粘好。在试件的中心处，沿长度方向布置一根光栅，而后涂抹胶粘剂，光栅尾纤保留在外面。最后将复合材料外表面、铝板外表面分别粘贴一根光栅。光栅布置如图3-7所示。

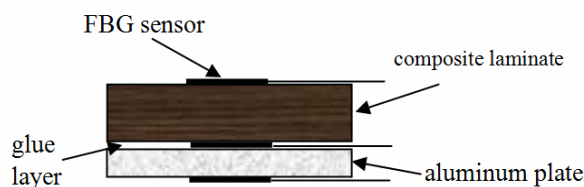


图 3-7 光纤光栅布置示意图

Fig.3-7 Schematic of location of FBG sensors

实验设备使用特制的热压釜，在热压釜的上端留有光纤的进出口，能满足载荷施加过程的实时监测。实验设备如图3-8所示。实验时，将一个参考光栅放置在热压釜内，测量温度的变化。



图 3-8 预留光纤出口的热压釜

Fig.3-8 Autoclave with egress/inegress of optic fibre

### 3.3.1.2 监测过程与分析

由于胶粘剂J-39 的最高使用温度为  $120^{\circ}\text{C}$ ，因此将试件放置在热压釜中，从室温升高到  $100^{\circ}\text{C}$ ，使用光栅监测升温 and 降温过程中三个层面的应变变化。结果如图3-9所示。

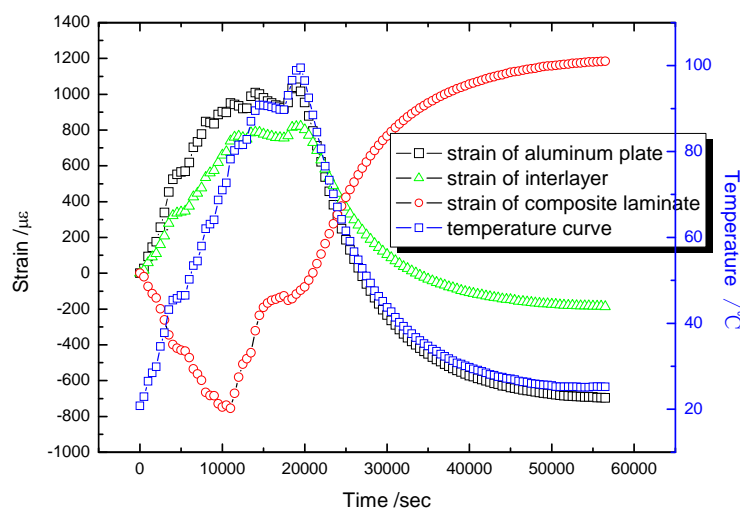


图 3-9 第一次温度变化时不同层面的应变

Fig.3-9 Strains at different layer for the first time

从图 3-7 中可以看出，光纤光栅监测到了温度变化范围从室温到  $100^{\circ}\text{C}$ ，然后恢复到室温整个过程粘接试件的应变变化。升温阶段，铝板最初的应变为正应变，复合材料的应变为负应变，层间的应变也为正应变，但受到复合材料的束缚，因此应变小于铝板。温度持续上升，铝板和层间应变继续增长，在  $70^{\circ}\text{C}$  时复合材料的应变出现了转折，开始逐渐增长。温度达到  $80^{\circ}\text{C}$  时进行了一下保温处理，使烘干箱内的温度进一步稳定，此时各处的应变也保持了一个平衡水平。温度继续升高，各处的应变也在增长。当温度达到  $100^{\circ}\text{C}$  时，关闭加热器。此时，复合材料的应变继续增加，铝板、层间的应变开始下降。恢复到室温时，复合材料的应变为正值，铝板的应变为负值，层间的应变也为负值，但相对较小。

从以上的过程可以分析出，复合材料的热膨胀系数和导热系数均很小，铝板的热膨胀系数和导热系数均很高，升温的初始阶段铝板的温度会高于复合材料，其变形也大于复合材料。随着温度的不断升高，整个试件开始向复合材料方向弯曲，因此，复合材料的负应变是由于受到铝板变形的影响。随着温度的上升，复合材料的温度也逐渐提高，在  $70^{\circ}\text{C}$  时，铝板的变形开始

变缓，而复合材料的应变出现了拐点。出现拐点的原因：一是复合材料的热应变超过了铝板的影响；二是复合材料的热膨胀系数发生了变化；三是在此温度下胶粘剂的性能变化大，热膨胀系数变大，不能被忽略。在 100℃时铝板、层间的应变达到最大值。降温时，铝板的热膨胀系数和导热系数大，因此应变开始减小，试件逐渐向铝板方向弯曲，带动复合材料的应变继续增加。这种变化一直持续到烘干箱内温度到达室温。在室温时，试件没有恢复到原始的状态，而是向铝板弯曲，这是由于温度变化改变了胶粘剂的性能，铝板和复合材料之间的热不匹配产生了热应力，热应力存储于不可恢复的胶粘剂之间。

试件经过第一次升温变化后，试件向铝板方向弯曲。为了考查粘接件是否还将继续弯曲，胶粘剂是否已稳定，把试件放入热压釜中进行了第二次实验，实验结果如图3-10。此处分析，去除了由于弯曲产生的影响，即取试件各处的应变为零值。

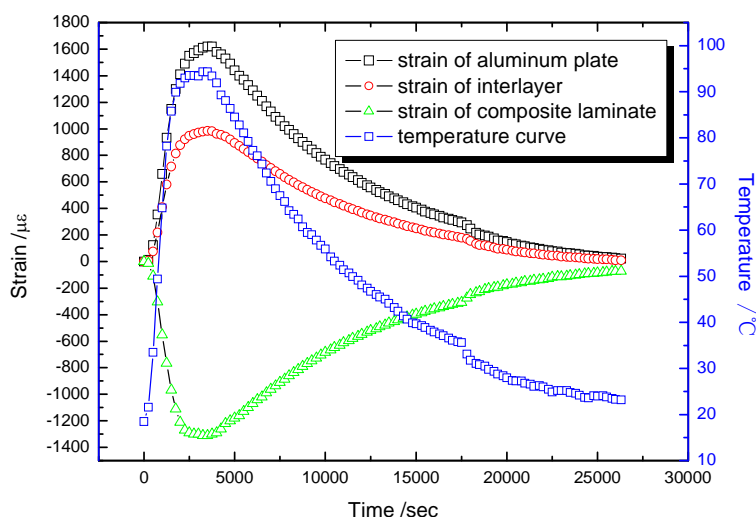


图 3-10 第二次温度变化时不同层面的应变

Fig.3-10 Strains at different layer for the secondary time

从图中可看出，升温初期，铝板开始时的应变为正应变，复合材料的应变为负应变，层间的应变也为正应变，曲线介于两种材料的应变之间。温度持续上升，此种状态一直保持，直到温度到达 100℃。关闭加热装置后，干燥箱内温度下降，试件表现出与升温时相反的趋势，铝板的应变开始下降，层间的应变也开始下降，而复合材料的应变逐渐上升。这种状态一直保持到干燥箱内的温度达到室温，并且弯曲后的试件能够恢复到初始状态。

从以上的过程可以分析出，复合材料和铝板粘接件在发生弯曲后，其状态也处于稳定，粘接件在温度载荷作用下，虽然复合材料表面、铝板表面、两种材料的界面之间的应变不同，但热载荷消失后整个试件能够恢复到原有状态，不再发生更大程度的弯曲。

### 3.3.2 低温环境下的协调变形

#### 3.3.2.1 实验试件的制作与实验设备

试件的制作是用低温胶粘剂 DWY-1 粘接复合材料和铝片，DWY-1 低温胶由 A、B 两种胶按一定的比例混合，固化工艺为  $40^{\circ}\text{C}/1\text{h}+60^{\circ}\text{C}/2.5\text{h}+90^{\circ}\text{C}/2.5\text{h}+110^{\circ}\text{C}/3\text{h}$ 。光栅的粘贴位置与前面的实验相同，各层面分别粘贴一个光栅传感器，使用相同的胶粘剂。试件在热压釜中固化，加热结束后不打开热压釜，让其自动降温，温度到达室温后取出试件。经加热粘结的试件发生了弯曲，弯向铝板一侧。

实验设备使用一保温容器，内壁和外壁均为 45#钢，中间层用泡沫隔热。实验时，将一个参考光栅放置在容器中，测量温度的变化。

#### 3.3.2.2 监测过程与分析

实验时放置好试件和光栅后，向容器中倒入液氮，制造低温环境。低温实验的结果列于图3-11。

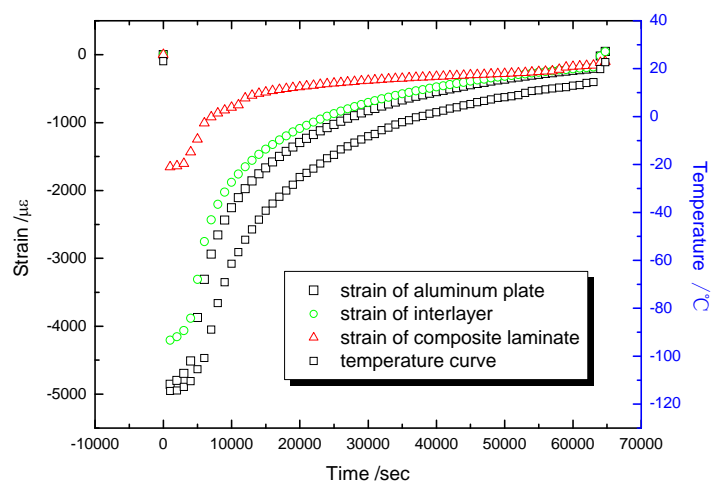


图 3-11 低温环境下不同层面的应变

Fig.3-11 Strains at different layer in low temperature

从图中可以看出，试件遭遇低温后，迅速产生变形。铝板的应变最大，

复合材料的应变最小，层间应变介于两者之间。液氮快速挥发完之后，温度升高，三个层面的变形也开始恢复，并逐渐回到初始状态。

从以上的过程可以分析出，粘接试件的温度降低后，铝板的热膨胀系数大，从室温环境降到低温后，其体积迅速收缩，产生负应变；复合材料也与此类似，但其热膨胀系数小于铝板，因此其应变变化没有铝板的大，但是复合材料总的应变值保持为负值，说明铝板对其影响小于环境的影响。两种材料之间的应变受铝板的影响多些，因铝板相对复合材料要薄一些，应变值与铝板相接近，但小于铝板的应变。

### 3.4 金属与复合材料变形协调性预报

材料的温度发生变化后，其自身的应变为：

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t \quad (3-1)$$

式中， $\alpha$  为材料的膨胀系数。

铝与复合材料粘接件在温度载荷作用下，存在变形协调性问题。根据上式，铝是各向同性材料，复合材料是由碳纤维和树脂组成的各向异性材料，铝的热膨胀系数、导热系数均大于复合材料，受热时两者的应变不完全相同。铝的应变大，复合材料的应变小，粘接在一起的结构又要保持应变的连续性，因此粘接件会发生弯曲。而对于金属内衬的复合材料压力容器来说，受热后内衬会向内部突起，使整个容器失效。

#### 3.4.1 协调变形模型的建立

铝板与复合材料的变形协调预报采用 ANSYS 软件，模拟复合材料与铝板的粘接件在温度载荷下三个层面的应变过程。模拟时两种材料所采用的单元均为 PLANE55，节点数为 4 节点，温度为其自由度。

试件尺寸为  $250 \times 25 \times 4\text{mm}$ ，采用的模拟参数列于表3-1。由于复合材料的纤维方向几乎都沿宽度方向，弹性模量的取值接近树脂模量。

表 3-1 材料热力学和力学性能

Table 3-1 Thermal and mechanics properties of material

材料	弹性模量(GPa)	泊松比	热膨胀系数 ( $10^{-6} \times \text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )	导热系数 ( $\text{w/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )
复合材料	7.02	0.32	2.6	0.8
铝板	7.35	0.3	23	236

### 3.4.2 协调变形模拟结果与讨论

按照表3-1的材料性能，模型的边界条件为四周自由，用ANSYS软件模拟了温度上升时两种材料的应变，从结果中发现，三个层面的应变均按照线性趋势发展，即铝板和层间的应变单调上升，复合材料的应变单调下降，没有出现监测中的拐点，结果如图3-12所示。

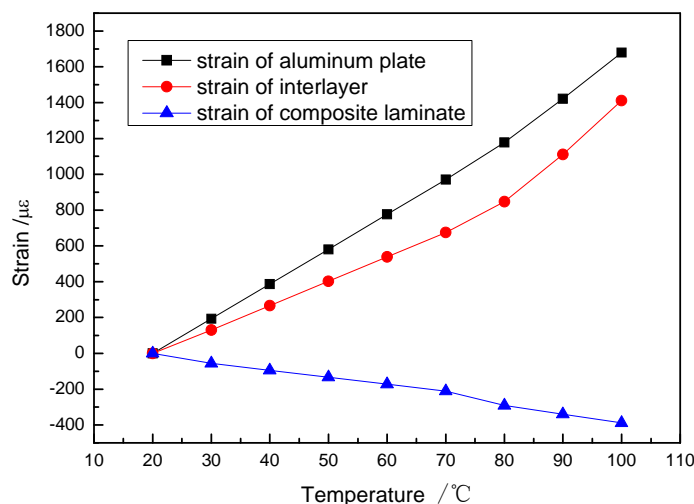


图 3-12 升温过程的应变模拟

Fig.3-12 Strains simulation at heating process

光纤光栅监测的实验部分，对于复合材料监测出现拐点提出了三点可能的原因，根据有限元分析，可以看出，复合材料的热应变不会超过铝板的影响。那么，出现拐点的原因只能是复合材料或胶粘剂的热膨胀系数发生了变化。

由于纤维和基体的热膨胀系数常常是温度的函数，所以先讨论复合材料热膨胀系数发生改变的情况。在 80、90、100℃之间复合材料的热膨胀系数分别按 4、5、7×10<sup>-6</sup>×m/m.℃计算。将复合材料升温的应变模拟值与实测值进行对比，如图3-13所示。从图中可以看出，预报值与实测值之间还是有一定的差距。要将这个差距调整到最小，还需要进一步增大热膨胀系数。

因为碳纤维复合材料的一个优点便是热膨胀系数小，因此，对于碳纤维/环氧复合材料来说，热膨胀系数变化如此大的可能性还是比较小的。而对于胶粘剂来说，在 100℃以内，其热膨胀系数增大很多的可能性就相对较大。

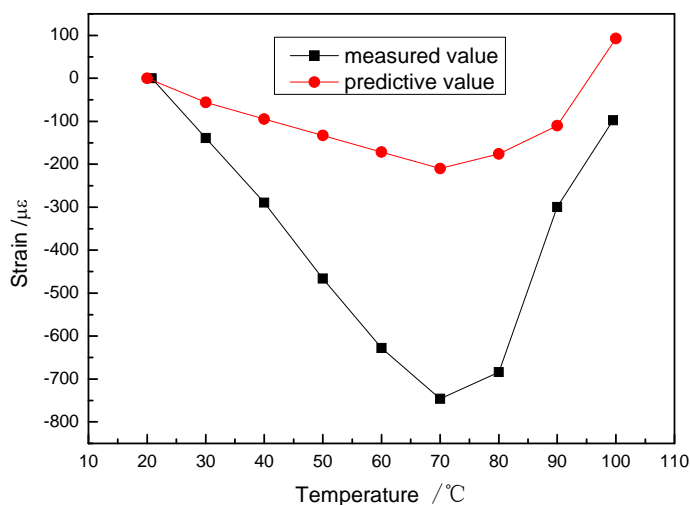


图 3-13 模拟值和监测值比较

Fig.3-13 Comparison of simulation and monitoring strains

若复合材料的热膨胀系数变化较小，而胶粘剂在温度作用下性能发生了较大变化，热膨胀系数变大，在模型上增加一胶层，同样能够得到类似于图 3-13 的曲线。当然，在这里缺少的工作是复合材料和胶粘剂在 20~100℃ 之间热膨胀系数的实测。如果胶粘剂性能的改变使得光栅在复合材料表面的监测出现了拐点，那么光栅的测量值便不能体现复合材料的应变。对复合材料来说，其最好的监测形式还是埋传感器到材料当中。

尽管在复合材料表面粘贴光栅的测量值在温度较高时存在不确定性，与胶粘剂的性能有很大的关系，但在 70℃ 之前的监测值还是准确的。并且在界面处，铝的热膨胀系数依然占主导地位，在高温时监测到的应变也是准确的。

对于具有不同热膨胀系数的胶接件，其热应力是被人们所关注的。光纤光栅可布置在胶层中，监测两者的热不匹配。未来，在金属内衬复合材料压力容器的界面，铝合金飞机用复合材料的补强处，都可以用光纤光栅进行全寿命监测。

### 3.5 本章小结

本章基于光纤光栅传感器监测了复合材料和铝板的共固化过程，受温度载荷下的变形过程，为两种不同材料共同使用提供了实验数据基础。

埋入 FBG 传感器实时监测了缠绕单向板的固化过程，以及复合材料和铝板之间界面的固化应变。FBG 传感器的测量数据表明，复合材料内部与界面之间在固化过程中存在着差异，这是由于两者的热力学性能不同而引起的；两种不同的材料在固化后期存在着分离的现象，释放了一部分应力。

将复合材料与铝板粘接在一起，并且把光栅传感器布设在复合材料表面、铝板表面、两者粘接界面，进行了温度载荷实验。光纤光栅监测到了三个界面应变的变化历程，在 70℃ 后复合材料表面的监测值与模拟值出现了差别，经分析，胶粘剂在高温时性能发生了变化，影响了光栅的测量，但低温时的测量值是准确的。

本章利用光纤光栅的可埋入性，监测了复合材料与金属材料之间的界面，为两种材料的共同使用提供了界面间真实的数据，保证了服役过程的安全性。本章的研究内容只是进行了试件级的界面监测，当然，此种界面监测方法还可用于具有内衬的复合材料压力容器，金属飞机的复合材料补强处等，完成整体结构的全寿命监测。



## 第4章 复合材料压力容器有限元分析

### 4.1 引言

纤维缠绕工艺是 20 世纪 40 年代由 R E Young 开发的,最初这种工艺方法主要用来生产火箭发动机壳体。复合材料纤维缠绕成形工艺是指将连续纤维或经过树脂胶液浸渍后的纤维,按照预定的缠绕规律均匀地排布在内衬容器上,然后再加热或在常温条件下固化,制成一定形状制品的工艺方法。50 年代中期开始用于生产供宇航工业充装高压气体的压力容器。60 年代初,美国 NASA-Lewis 研究中心首次提出纤维缠绕预应力承载金属内衬气瓶的设计思想,使复合材料压力容器的制作技术步入了一个新的发展阶段。复合材料压力容器的应用主要是用来满足部件减轻重量的要求,与同容积的金属容器相比,复合材料压力容器的重量可减轻一半的重量。

纤维缠绕复合材料压力容器结构的力学性能分析理论有网格理论,薄膜理论,二维板壳理论,三维弹性理论<sup>[117,118]</sup>等。网格理论分析模型只考虑了纤维的承载能力,完全忽略了基体的作用。薄膜理论考虑了基体的承载和传载作用,假设复合材料结构由多层复合材料单向板共同承载,计算时忽略了由垂直于单向板平面的层间应力引起的横向剪切和曲率变化引起的局部应力。二维板壳理论基本假设为直法线假设,即壳体中曲面无变形且位移沿壳体的厚度无变化,垂直于壳体表面的正应力及横向剪切可忽略不计。在此基础上又发展为直线假设,高阶剪切变形理论等。三维弹性理论能够直接在体单元上使用材料的三维本构关系<sup>[119]</sup>,无须对材料性能和结构做任何假设,并考虑了层间应力对壳体厚度的影响。

纤维缠绕复合材料压力容器在使用过程中,若其内压过大,结构将存在着几何非线性和材料非线性。几何非线性是指纤维缠绕压力容器在受内压过程中所产生的大变形,应变、局部扭转和曲率变化都相当大。材料非线性是指因内压的作用使纤维缠绕压力容器产生基体开裂、层间分层及纤维断裂等损伤缺陷。

本章以 ANSYS 通用有限元为手段,使用非线性分析方法,对纤维缠绕复合材料压力容器进行有限元分析,并在静水压力实验中,表面粘贴电阻应变片测量应变,SMARTape 条带式变形传感器测量变形量,验证了模型的正

确性。在此模型基础上进一步研究了压力容器的渐进损伤，以失效因子为参数，讨论了失效单元逐层失效的过程，预报了容器的爆破压力，为健康监测的传感器布设提供了依据。

## 4.2 复合材料压力容器有限元模型的构建

复合材料压力容器有限元模型建造的难点在于：封头处纤维厚度和方向的不断变化。使用实体单元建造模型，需要预先知道厚度。而 ANSYS 提供的壳单元 SHELL91 可以先建造整体模型，然后通过实常数给单元赋值，达到纤维层变化厚度和角度的目的。

### 4.2.1 复合材料压力容器模型的建造

采用有限元软件ANSYS中的八节点三维壳单元SHELL91，这种单元的各层内各个节点处的厚度可以不相同，而假定单元内部厚度变化是光滑的。因此用此单元不仅可模拟桶身段等厚度的部分，还可模拟封头部分的变厚度。复合材料压力容器结构如图4-1所示，由五部分组成：左封头，左封头过渡段，桶身段，右封头过渡段，右封头。建造模型只考虑了复合材料层和内衬，两端没有盖板。

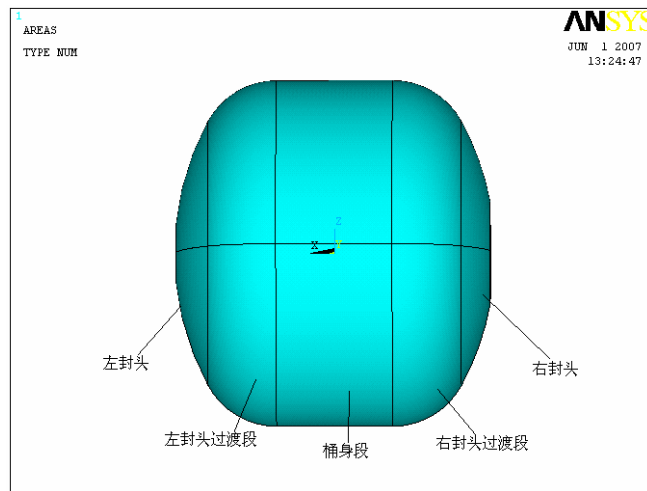


图 4-1 复合材料压力容器结构

Fig. 4-1 Structure of composite pressure vessel

由于缠绕结构在封头处存在纤维堆积，因此建立有限元模型时需要实现

封头复合材料层厚度和角度的变化。缠绕容器制造按照平面缠绕和环向缠绕，缠绕丝嘴回绕芯模做圆周运动，封头上纤维轨迹近似为一平面曲线，如图4-2所示。筒身段的缠绕角由式(4-1)确定<sup>[120]</sup>：

$$\tan \alpha_0 = \frac{y_{e1} + y_{e2}}{l} = \frac{r_{01} + r_{02}}{l_{e1} + l_c + l_{e2}} \quad (4-1)$$

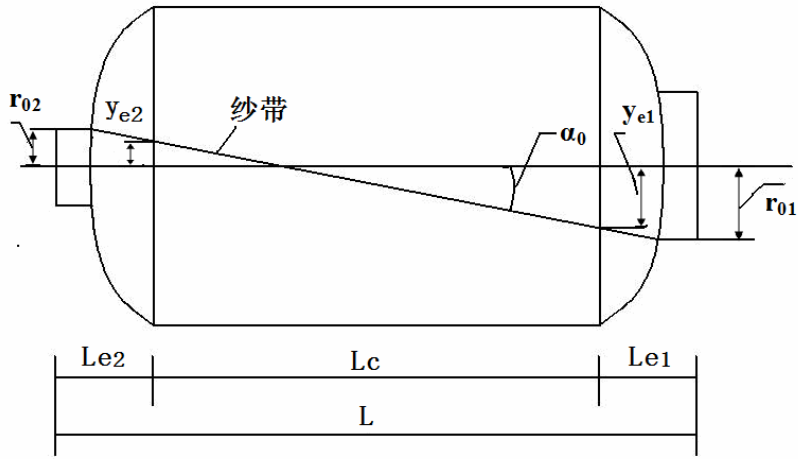


图 4-2 平面缠绕容器示意图

Fig.4-2 Schematic of planar winding pressure vessel

封头段缠绕角方程为：

$$\tan^2 \alpha = \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \xi \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \xi \tan \alpha_0)^2]} \quad (4-2)$$

封头处纤维厚度为：

$$\bar{t} = \frac{1}{\rho} \left\{ 1 + \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \xi \tan \alpha_0)]^2}{\rho^2 - (\rho_e + \xi \tan \alpha_0)^2} \right\}^{1/2} \quad (4-3)$$

式中各参数均为整化后值，其中：

$$\rho = \frac{r}{R} \quad \xi = \frac{z}{R} \quad (\bullet) = \frac{d}{d\xi} \quad \bar{t} = \frac{t_f}{t_{fa} \cos \alpha_0} \quad (4-4)$$

式中  $r$  为封头的回转半径， $R$  为桶身段半径， $z$  为旋转轴， $t_f$  为封头处厚度， $t_{fa}$  为桶身段径向缠绕组的厚度。

式(4-2)说明了缠绕角  $\alpha$  的变化规律，在法兰盘处  $r=r_0$  时， $\alpha=\pi/2$ ；随着  $r$  增大， $\alpha$  逐渐减小，在封头过渡段与桶身相切处  $r=R$ ， $\alpha$  变至最小，这时  $\alpha=\alpha_0$ ， $\alpha_0$  为圆筒段的缠绕角。

式(4-3)说明了封头处厚度的变化规律，随平行圆半径的减小，纤维厚度增加；在极孔位置处纤维很容易产生堆积和架空。

根据以上两个微分方程和整化方程，运用ANSYS APDL 语言编制程序，可以计算出封头上每个单元的纤维方向和各节点的厚度，生成实常数。然后对不同的单元赋予不同的实常数，以实现封头复合材料层厚度和纤维缠绕角度的变化，如图4-3所示。模型中使用的材料常数如表4-1所示。

表 4-1 复合材料力学参数  
Table 4-1 Properties of composite for mechanics

性能	T800/环氧		测试方法
	平均值	最大值	
含胶量	22.71%	—	GB3855-83
固化度	84.83%	—	GB2578-89
纵向拉伸强度 (MPa)	1332.04	1506.73	GB3354-82
纵向拉伸模 (GPa)	192.90	195.61	GB3354-82
主方向泊松比	0.32	0.32	GB3354-82
横向拉伸强度 (MPa)	9.59	11.53	GB3354-82
横向拉伸模量 (GPa)	7.02	8.98	GB3354-82
次方向泊松比	0.04	0.06	GB3354-82
纵横剪切强度 (MPa)	13.09	15.82	GB3355-82
纵横剪切模量 (GPa)	6.87	7.22	GB3355-82

#### 4.2.2 复合材料压力容器的有限元分析

模型共划分单元 10000 个，节点数 27760 个。计算时使用非线性大应变分析，在所建立的有限元模型上加载 4.5MPa 的内压，不考虑材料损伤造成的非线性，同时假设内衬在此压力下不发生屈服。容器为轴旋转体，提取轴线上的一组单元的最外层进行分析。压力容器模型的轴向应力、环向应力和剪切应力如图4-4、图4-5、图4-6所示。

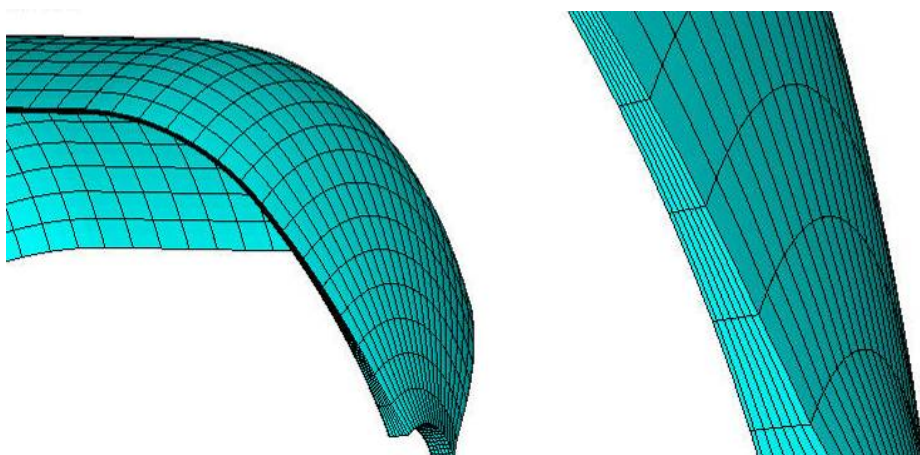


图 4-3 复合材料压力容器封头厚度的连续变化

Fig. 4-3 Continual change of dome thickness

容器的轴向力基本由经向缠绕纤维承担，在右封头处有最大值。两个封头过渡段处于受压区。桶身段受到了封头过渡区的影响，所受到的轴向力也并不是一个常数，而是从桶身中央向过渡段逐渐增大。

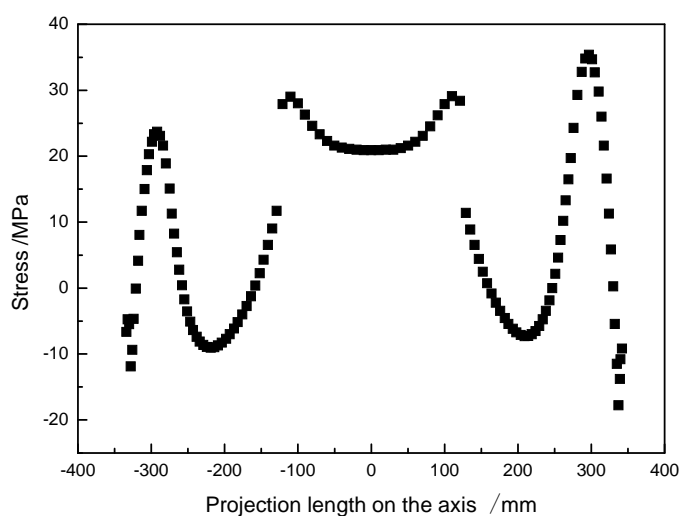


图 4-4 轴向应力图

Fig. 4-4 Axial stress distribution

桶身处的环向应力最大，在此部分缠绕了多层环向纤维。两个封头处的环向应力稍微小些。

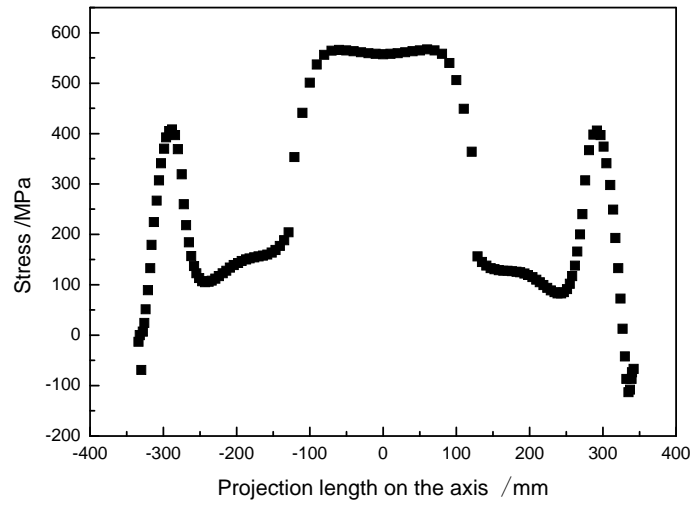


图 4-5 环向应力图

Fig. 4-5 Hoop stress distribution

剪应力在右封头处出现了极大值，左封头过渡段出现了极小值。桶身处处于剪应力稳定区，基本处于同一水平。

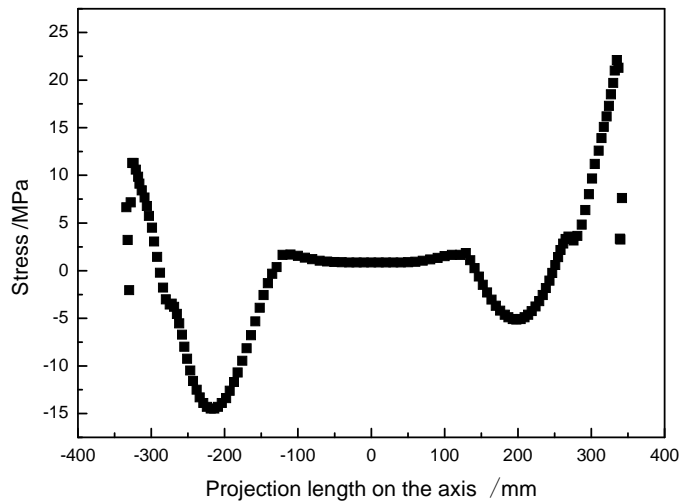


图 4-6 剪切应力图

Fig. 4-6 Shear stress distribution

### 4.2.3 复合材料压力容器模型的验证

#### 4.2.3.1 应变验证

为了验证模型的准确程度，在容器表面粘贴电阻应变片测量应变，同模型计算结果相对比。将要粘贴应变位置用砂纸打磨光滑，用还氧树脂E51 和低分子聚酰胺 618 按 1:1 混合（常温固化），粘贴了 25 组应变片，每组含有 2 个应变片，其方向分别为轴向和环向，其布置图如图4-7所示。在 15 点至 16 点之间因为有裙，在此段上无法布置应变片。建立模型时也忽略了裙对结构的影响。

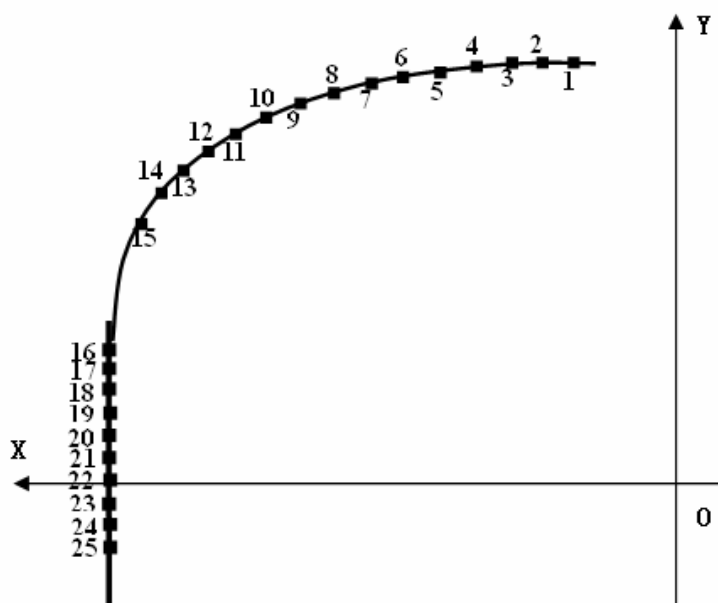


图 4-7 应变片布置示意图

Fig. 4-7 Schematic of location of electronic strain gage

实验仪器采用 YE2539 高速静态应变仪，可直接通过 YE29005（RS-232/RS-485 转换器）与计算机的 RS-232 串行口进行通讯。应变仪上共有 6 路采集器，每台采集器具有十个测量点，各采集器之间保持同步采集，系统采样率与所用的采集器的数量无关。一台应变仪即可满足上述实验。

粘贴好应变片后，将压力容器放置在打压坑中，一方面连接好水压泵，一方面连接电阻应变片的线路到应变仪，最后把应变仪同电脑连接好。打压时，逐渐增压，每隔 0.2MPa 采集一次数据，直到压力达到 4.5MPa。

取实验中 4.5MPa 时的应变和计算分析的应变相对比，轴向应变如图4-8所示。从图中可以看出，计算值能够描绘出复合材料压力容器轴线上的应变变化，与实验拟合值相接近。环向应变在桶身部分失效过多，在此只给出封

头处的应变，如图4-9所示，两者之间轮廓相符，在有些值上有差别，其原因可能是封头的实际厚度、缠绕角度和模拟厚度、角度的不同。

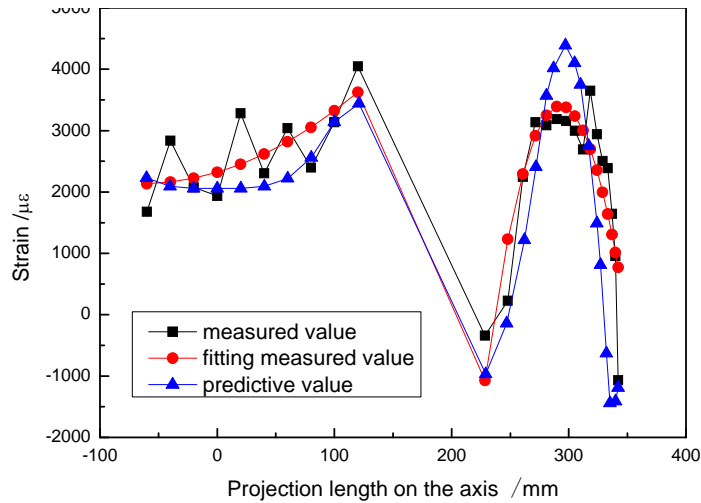


图 4-8 轴向应变

Fig. 4-8 Axial strain distribution

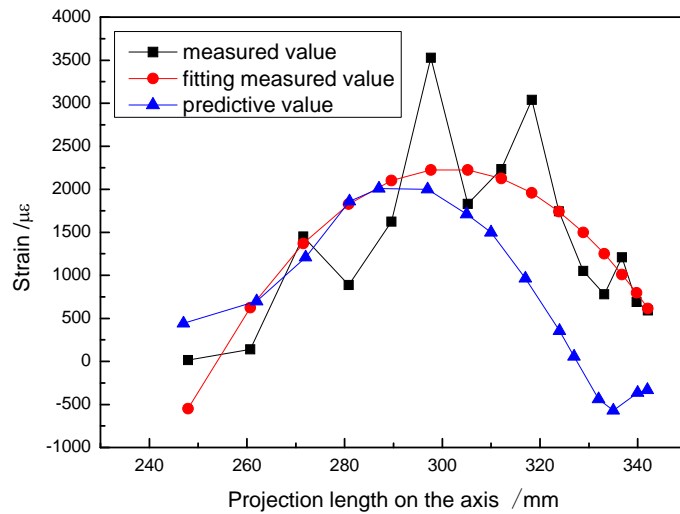


图 4-9 封头处的环向应变

Fig. 4-9 Hoop strain distribution in dome

再取 6 号点在压力变化下的轴向应变，与有限元解进行对比，压力增长范围从 0~4.5MPa，如图 4-10 所示。初始时，在压力较小的状态的，两者的应变基本保持一致，当压力为 2MPa 时，测量值和预报值开始分开，而后随



着压力的增加，这种趋势也越来越明显。

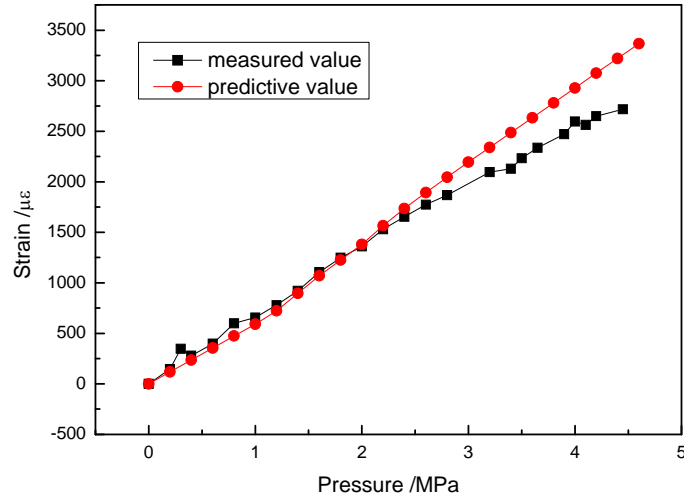


图 4-10 6#点的轴向应变

Fig. 4-10 Axial strain distribution of 6#

#### 4.2.3.2 变形验证

将压力容器表面需要粘贴传感器的部分使用 100-150#砂纸进行打磨，平整后使用还氧树脂E51 和低分子聚酰胺 618 按 1:1 混合（可在常温下固化），将SMARTape条带式变形传感器粘贴在容器表面。SMARTape条带式变形传感器可以把距离差转换成光纤之间的光程差，然后被SOFO采集仪测量得到。传感器如图4-11所示。SMARTape条带式变形传感器全长 2.4m，按螺旋线布置在桶身。传感器位置和监测系统如图4-12所示。



图 4-11 SMARTape 条带式传感器

Fig. 4-11 SMARTape sensor

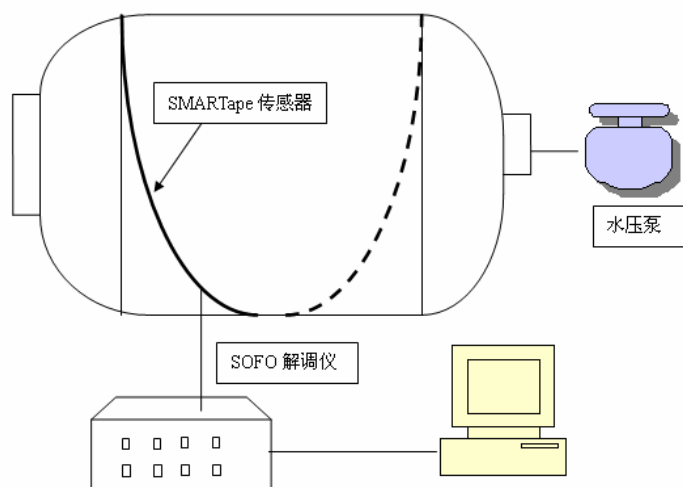


图 4-12 传感器位置和监测系统示意图

Fig. 4-12 The experimental set-up and location of sensor

SOFO解调系统是由瑞士SMARTEC公司开发研制的，SOFO Bee读数仪见图4-13。此仪器与计算机的RS-232 串行口进行通讯，可连接 24 个传感器。仪器内装有ADAM模块，用于连接热电偶，具有数据储存能力，仪器内配有电池。读数仪适合地面安装和特殊工程需要。其特制外壳防水、防咬、防撞。



图 4-13 SOFO Bee 读数仪

Fig. 4-13 SOFO Bee reading unit

SOFO解调系统其核心部分是低相干光源和迈克尔逊干涉仪光纤化（见图4-14）。来自LED的光发射到单模光纤（纤芯  $9\mu\text{m}$ /包层  $125\mu\text{m}$ ），通过耦合器进入到测量光纤和参考光纤中。测量光纤埋入或者粘贴在结构表面，与被测结构紧密接触，它随着结构的变化而变形，伸长和收缩。参考光纤处于自由状态，与结构不接触。在两根光纤的末端有反射镜，把光反射回耦合器，然后传输到分析仪。分析仪中有可移动的反射镜，只有当分析仪中的光程差补偿了结构中光纤的光程差，调制的信号才能被光控二极管得到，从而获取结构的变形量。

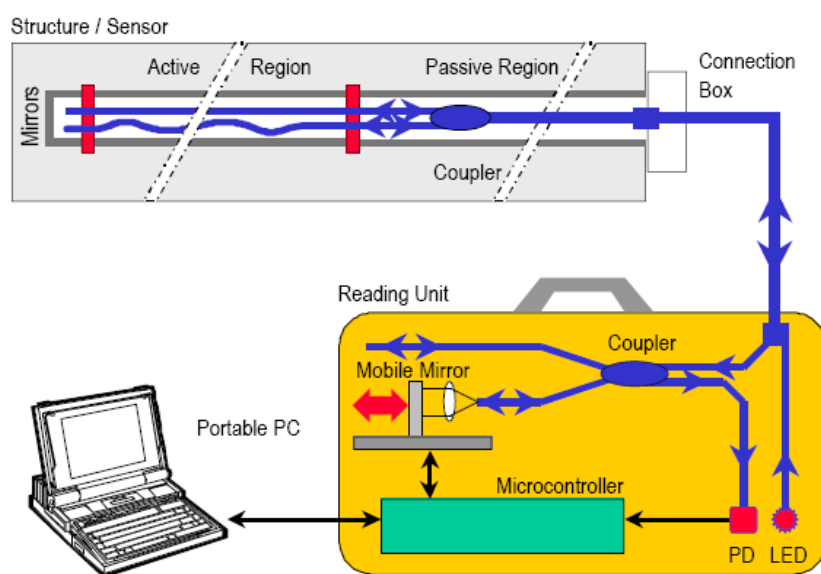


图 4-14 SOFO 测量系统

Fig. 4-14 Measure set-up for delicacy

复合材料压力容器注满水后，与水压泵相连，向容器中注入水进行增压监测。每隔  $0.2\text{MPa}$  记录一次传感器的数据，到压力为  $4.5\text{MPa}$  时停止。

使用SOFO Bee读数仪获取实验数据的软件为SOFO SDB 软件，实验结果如图4-15所示。测量窗口共有四部分组成，其中第一个图表示传感器的状态，出现两条红色的虚线表示传感器的两臂工作正常；第二个图表示监测值与时间的关系；第三个图表示正在工作的传感器，读数仪最多可接 24 个传感器，实验的时候只用了一个传感器；第四个图中的内容为测量值，获取的是两个测量臂的光程差，测量臂比参考臂稍长，软件显示的值为正，否则为负。

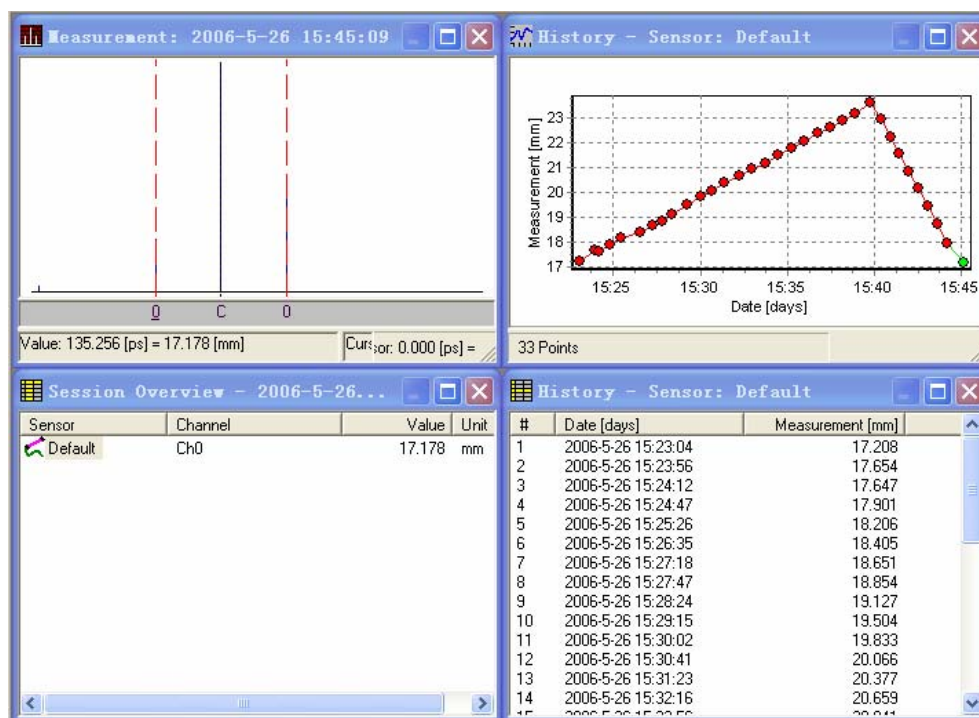


图 4-15 SOFO SDB 软件界面

Fig. 4-15 Software interface of SOFO SDB

ANSYS 后处理中的一个比较有用的功能是能够虚拟映射任何结果数据到模型的任意路径上。这样一来就可沿该路径执行许多数学运算和微积分运算，从而得到有意义的计算结果：开裂处的应力强度因子和 J-积分，通过该路径的热量、物体上的磁场力、压力容器校核线上的薄膜应力等。附带好处是，能以图形或列表方式观察结果项沿路径的变化情况。

SMARTape 传感器获取的是整个传感器的伸长量，因此利用 ANSYS 中的路径功能，获得与传感器路径相同的伸长量。在 ANSYS 模型的桶身部分，创建一条与传感器布置相同的路径，如图 4-16 所示。此路径为桶身展开面的对角线，在桶身上为一螺旋曲线，路径上共有 6420 个点。

把主应变  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\gamma_{12}$  映射到路径上，取一矩形微元进行分析，假设路径上的应变  $\varepsilon_x$  服从平面应力状态，则：

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \cos^2 \theta + \varepsilon_2 \sin^2 \theta - \gamma_{12} \sin \theta \cos \theta \quad (4-5)$$

式中， $\theta$  为主方向 1 与路径切向的夹角。方程两端同乘微元对角线的长度  $dl$  后沿路径积分得：

$$\int_l \varepsilon_x dl = \int_l (\varepsilon_1 \cos^2 \theta dl + \varepsilon_2 \sin^2 \theta dl - \gamma_{12} \sin \theta \cos \theta dl) \quad (4-6)$$

则沿路径  $l$  积分后方程左侧为路径总的变形量  $\Delta L$ ，方程右侧用有限元方法对定积分求解。

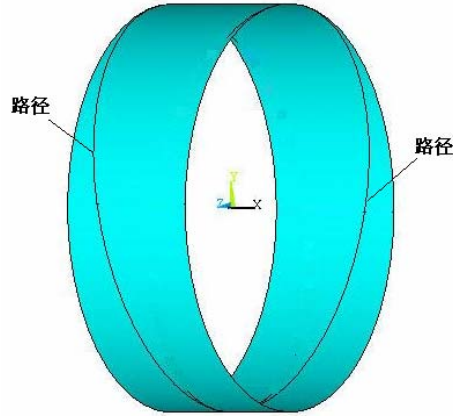


图 4-16 在桶身上创建的路径

Fig. 4-16 Path in the cylinder part

图4-17显示了使用SMARTape传感器的实测值和理论计算值。两者略有差别。

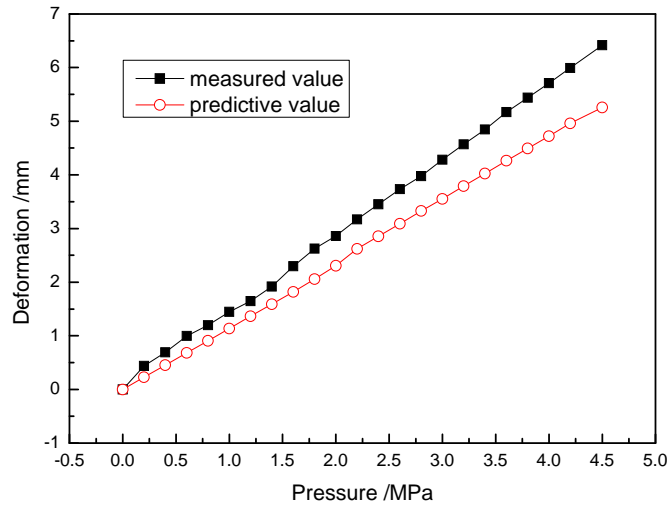


图 4-17 桶身螺旋方向变形量

Fig. 4-17 Distortion of helix direction in the cylinder part

理论计算值保持了很好的线性，实验值在压力达到 1.6MPa 后保持了很好的线性。SMARTape 传感器在压力 4.5MPa 下测量到的最大变形为 6.443mm，理论计算值为 5.258mm。两者的区别同总长度和路径有关，实际的传感器为 2.40m，而理论的路径为 2.35m，总长度的差别使整体变形量出现了差别。传感器布设的时候虽然按照螺旋线粘贴，但实际和理想状态有偏差，也能导致结果的不同。两者虽然有差别，却是在上述的两条原因下不可避免的。若改进了上上两条原因，模型对于变形量的预测还将更加准确。SMARTape 传感器监测到的平均应变为  $2683\mu\epsilon$ ，理论计算的平均应变为  $2237\mu\epsilon$ 。

通过以上两种方法验证了复合材料压力模型基本正确，能够准确的反映结构的应变和变形，可用此模型做其它分析。

### 4.3 复合材料压力容器渐进损伤分析

复合材料是各向异性材料，损伤过程不像各向同性材料那样是一个瞬时的过程，复合材料的损伤表现为基体开裂、界面分层以及纤维断裂等形式，是一个损伤逐渐累积的过程<sup>[121,122]</sup>。本节将利用前述的有限元模型，根据复合材料破坏准则对压力容器进行渐进损伤分析。

#### 4.3.1 复合材料破坏准则及材料退化规律

复合材料结构设计中一个重要的因素就是材料强度特性的表征，由此也产生了众多的失效准则，如最大应力准则，Hill准则等。由于Hashin准则能很好的判断累积损伤破坏模式，因此选用Hashin失效准则对复合材料压力容器的树脂部分进行渐进损伤分析。二维Hashin准则的表达式如下<sup>[123]</sup>，纤维断裂准则选用最大应力准则。

基体开裂准则：

$$\begin{aligned} \text{当 } \sigma_2 > 0 \quad & \left( \frac{\sigma_2}{Y_t} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 = e_m^2 \\ \text{当 } \sigma_2 < 0 \quad & \left( \frac{\sigma_2}{Y_c} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 = e_m^2 \end{aligned} \quad (4-7)$$

纤维断裂准则：

$$|\sigma_1| \leq \begin{cases} X_t & (\sigma_1 < 0) \\ X_c & (\sigma_1 > 0) \end{cases} \quad (4-8)$$

式中,  $Y_t$  为树脂拉伸强度,  $Y_c$  为树脂压缩强度,  $S$  为剪切强度, 当  $e_m^2 \geq 1$  表示有损伤出现,  $e_m^2 < 1$  表示完好。  $X_c$  为纵向压缩强度,  $X_t$  为纵向拉伸强度。应力分量相对于铺层的局部坐标系, 其中 1 轴平行于纤维方向, 2 轴垂直于纤维方向。

复合材料在内部产生损伤时, 刚度也将随损伤而发生衰减。对应的材料退化如表4-2所示。

表 4-2 材料性能退化规律<sup>[124]</sup>

Table 4-2 Material property degradation rules

失效形式	刚度退化
基体开裂	$E_{22} = 0.2E_{22}$ $G_{12} = 0.2G_{12}$ $G_{23} = 0.2G_{23}$
纤维断裂	拉伸 $E_{11} = 0.07E_{11}$ 其它值为 $10^{-9}$
	压缩 $E_{11} = 0.14E_{11}$ 其它值为 $10^{-9}$

表中有些值取极小值, 是为了让有限元软件能够计算, 刚度矩阵不发生奇异。

### 4.3.2 渐进损伤分析过程

渐进损伤分析过程由 ANSYS APDL 语言实现, 通过循环语句进行结构加载和失效判断。其基本过程为:

- (1) 以 0.1MPa 为载荷增量逐步施加内压载荷;
- (2) 提取当前载荷条件下的各个单元以及各层计算结果;
- (3) 利用 Hashin 准则判断失效形式;
- (4) 修改失效单元内失效层的材料常数;
- (5) 载荷增加, 重复上述过程, 直到某个单元各层的纤维全部断裂。

按照上述思想, 实现渐进损伤分析的程序流程图如图4-18所示。在已经建立好的模型上, 施加载荷后进行分析, 获得各单元各层的应力值, 按照失效准则计算失效因子。若有失效层, 按照材料退化规律更改材料属性。结构失效是以单元上的各层纤维均断裂为判断条件。

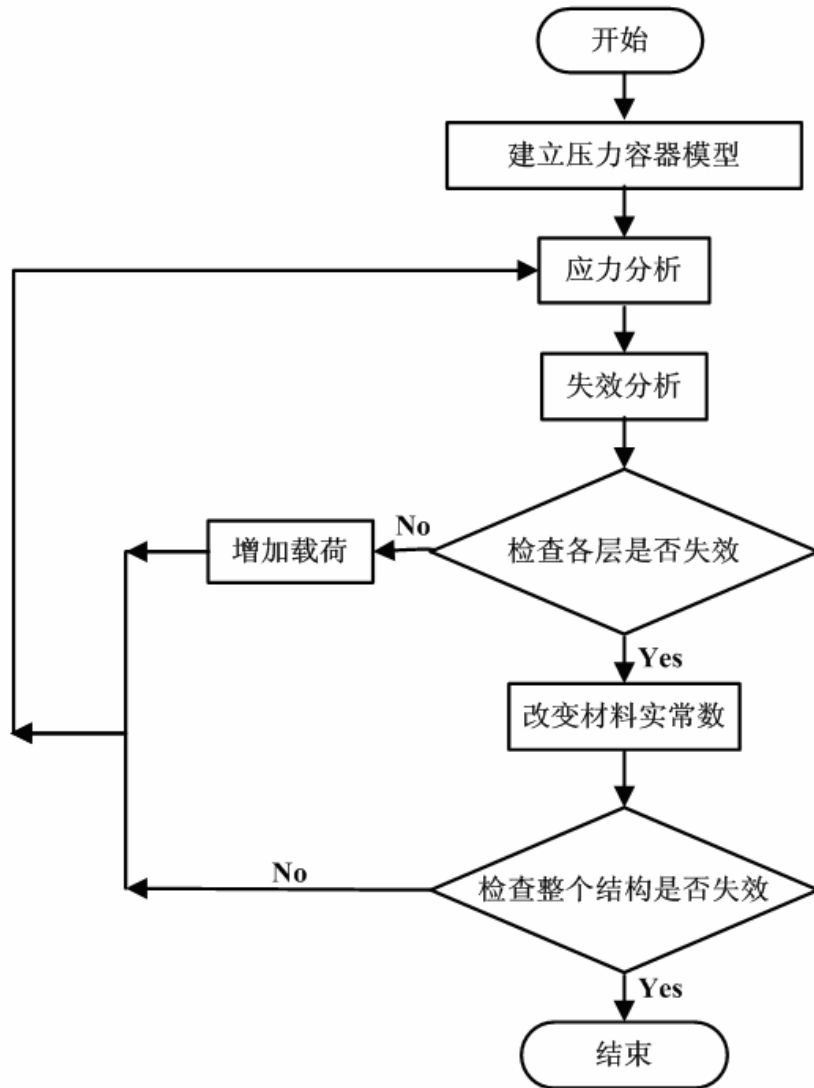


图 4-18 渐进损伤分析流程图

Fig. 4-18 Flowchart of progressive failure analysis

### 4.3.3 渐进损伤分析结果

图4-19显示了初始阶段压力容器最外层的基体开裂因子，在 0.9 MPa 时，右侧封头的基体开裂因子开始接近 1，1.0MPa时最先开裂，而后再在 1.1MPa下按照材料性能退化规律更改了材料常数，使此处的开裂因子接近零值。



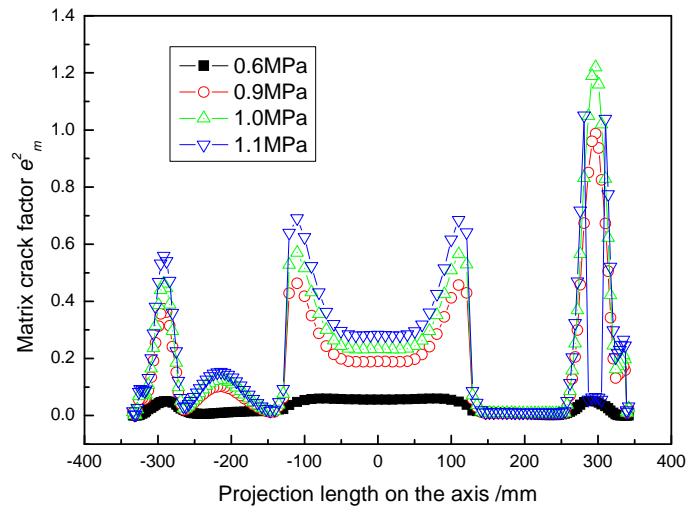


图 4-19 各单元基体开裂因子

Fig. 4-19 Matrix crack factor of elements

桶身部分在 1.3MPa 下与峰头连接处的基体开裂因子接近于 1，1.4MPa 下基体开裂，基体开裂因子超过 1。1.5MPa 时退化了材料的刚度，此时左封头的基体开始开裂。如图 4-20 所示。

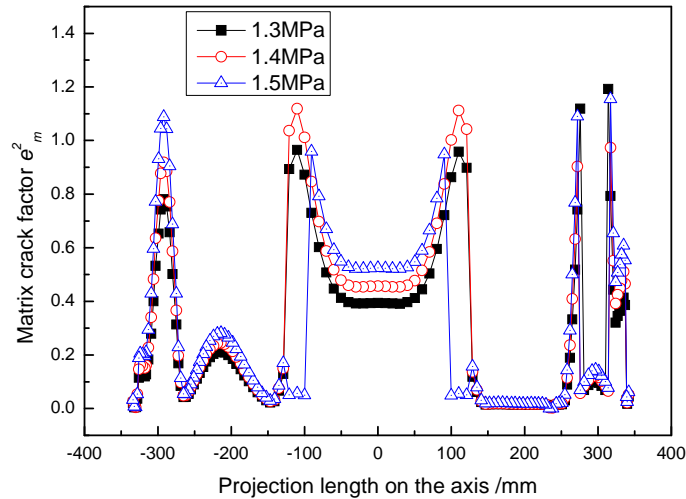


图 4-20 各单元基体开裂因子

Fig. 4-20 Matrix crack factor of elements

压力继续增长，在 2.0MPa 时，桶身处树脂临界开裂边缘，2.1MPa 下，全部开裂，2.2MPa 时桶身处的树脂完全开裂，在此之后增加内压计算时，

全部采用树脂开裂后的材料常数。如图4-21所示。

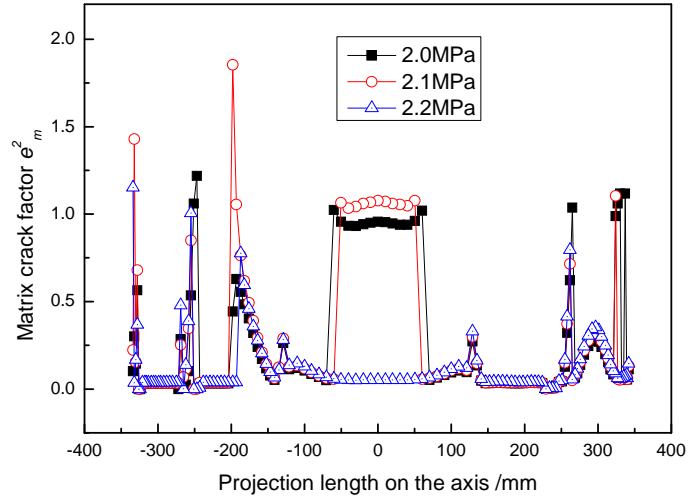


图 4-21 各单元基体开裂因子

Fig. 4-21 Matrix crack factor of elements

取桶身中部的一个单元，做 0~4.0MPa 下的应力-应变曲线，如图4-22所示。轴向上，由于树脂开裂后更改了材料性能，应力也迅速下降。环向上的应力-应变关系为直线，没有受到轴向的影响。

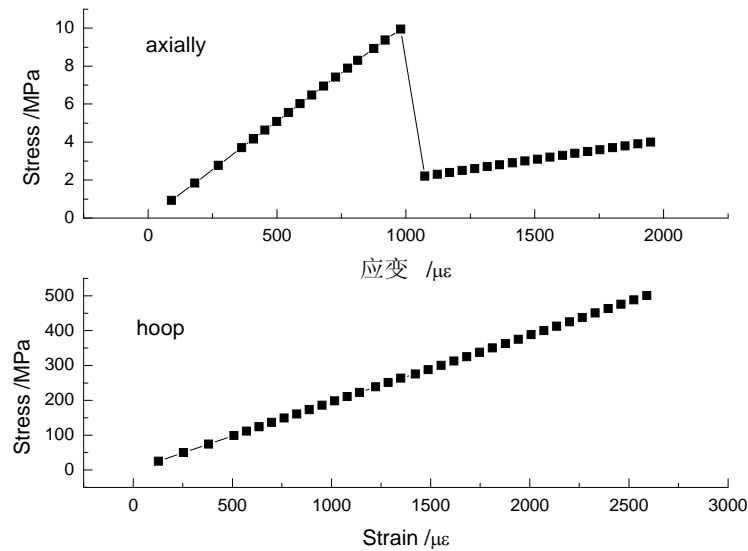


图 4-22 桶身单元应力-应变曲线

Fig. 4-22 Stress-strain curve of element in the cylinder

纤维断裂失效因子的计算值如图4-23所示。在 3.0MPa下，纤维的断裂因子处于很低的水平，随着压力的增长，其值也在不断的增大。桶身和右封头的纤维断裂因子要比左封头大，两处不同的原因是，缠绕时两端的法兰口不同，右封头的较小，使得在缠绕角度和厚度上不同，造成了受力情况的不同。在 6.0MPa下，桶身的纤维断裂因子最大值为 0.6。

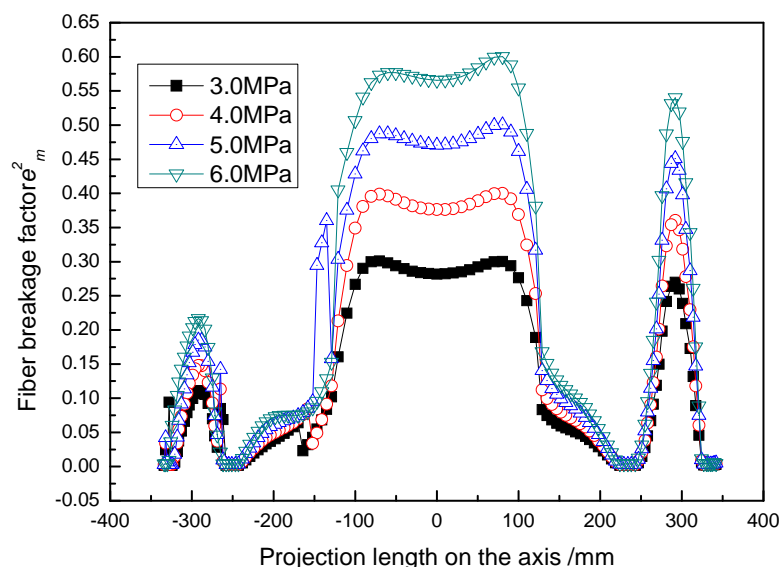


图 4-23 各单元纤维断裂因子

Fig. 4-23 Matrix crack factor of elements

#### 4.4 复合材料压力容器爆破压力预测

在上节基础上，将内压载荷继续增大，并且假设内衬为理想塑性材料，发生塑性变形后并不破裂，即应变增加，应力基本无变化。

传感器布置在容器的最外层时，只能监测到此层的变化，因此首先看最外层纤维的纤维断裂失效因子。内压在 7.0MPa和 8.0MPa下，纤维断裂因子的值还在稳步增长。当压力达到 9.0MPa时，有单元的纤维断裂因子超过 1，此处的纤维断裂。如图4-24所示。在 8.0MPa~9.0MPa之间的压力下，桶身与封头连接处的最外层纤维的断裂失效因子有了突变，推测是由于内部纤维失效导致外层纤维的应力急剧增加。左封头的纤维断裂失效因子的值比较小、右封头的断裂失效因子较大，但还没有断裂。

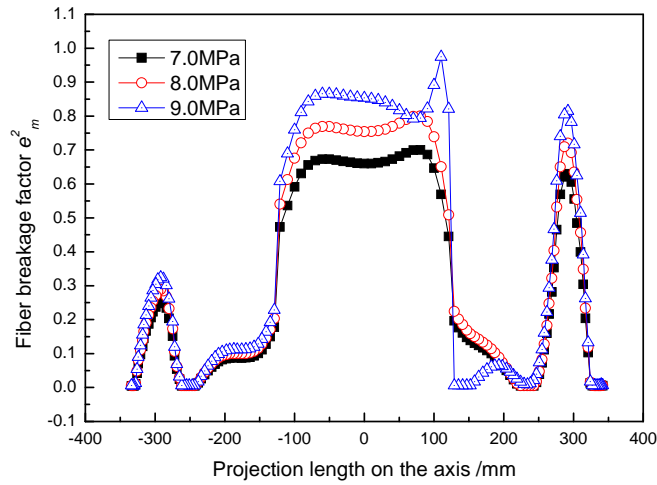


图 4-24 各单元纤维断裂因子

Fig. 4-24 Fiber crack factor of elements

鉴于桶身与封头的连接处出现突变，从ANSYS后处理中，查看此处所有层在 8.0MPa到 9.0MPa之间的应力变化。发现在 8.1MPa时，第 3 层纤维（经向缠绕）的应力最先超过强度值，纤维断裂失效因子超过 1，如图4-25所示。纤维断裂后，经过材料性能退化，释放应力后，由其它层来承担总的应力，因此其它层的断裂失效因子也迅速增长。在 8.2MPa时，第 6、9 层纤维断裂。

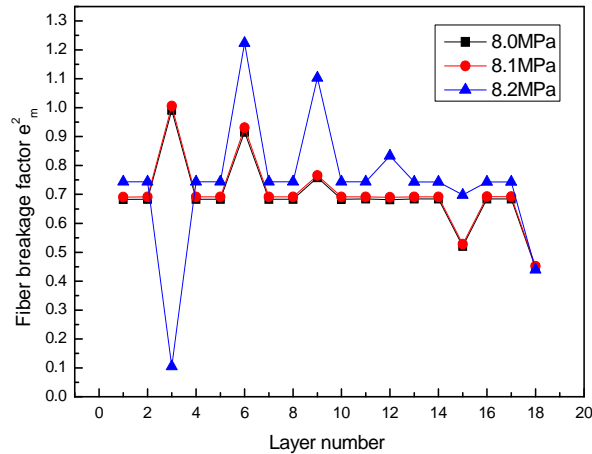


图 4-25 失效单元各层纤维断裂因子

Fig. 4-25 Fiber crack factor of failure element in every layer

压力继续增加,第12、15层纤维也相继断裂,如图4-26所示,最后一层经向纤维的应力水平迅速上升,此层为紧贴内衬的一层。贴近内衬的一层在8.4MPa时断裂。此时,这个单元的全部经向纤维都断裂。环向纤维的应力水平也迅速上升,如图4-27所示,在8.8MPa时纤维断裂失效因子几乎接近于1。

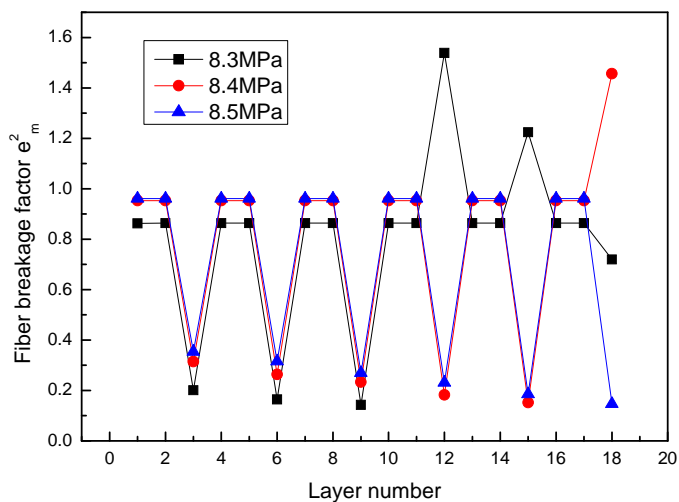


图 4-26 失效单元各层纤维断裂因子

Fig. 4-26 Fiber crack factor of failure element in every layer

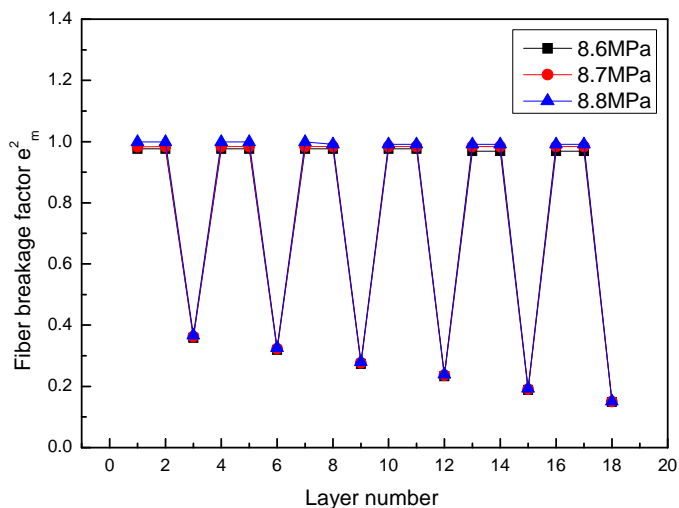


图 4-27 失效单元各层纤维断裂因子

Fig. 4-27 Fiber crack factor of failure element in every layer

压力达到 8.9MPa 时，环向纤维也全部失效，如图 4-28 所示。至此，该单元的纤维全部断裂，压力容器的预测爆破压力为 8.9MPa。

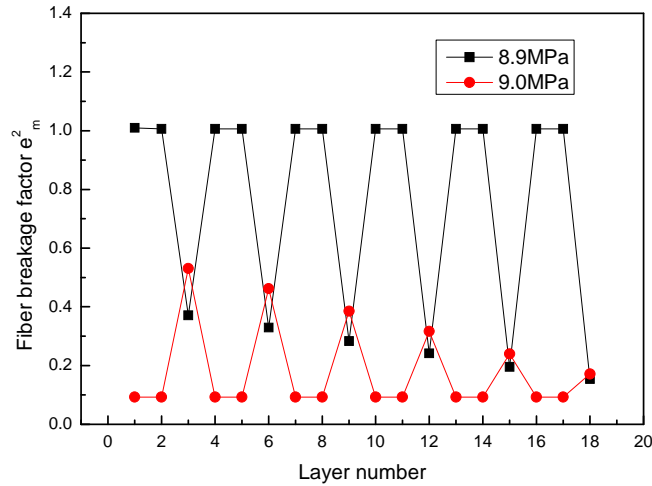


图 4-28 失效单元各层纤维断裂因子

Fig. 4-28 Fiber crack factor of failure element in every layer

单元内部的层在失效时，会对周围的单元产生相应的影响。图 4-29 中，在 8.6MPa 压力下，失效单元的突变还没有表现出来，但对周围单元的影响已经表现出来。失效单元右侧的应力水平开始有下降趋势，当压力再次上升，失效单元的应力突变变得明显时，周围单元的应力水平下降也明显了很多。

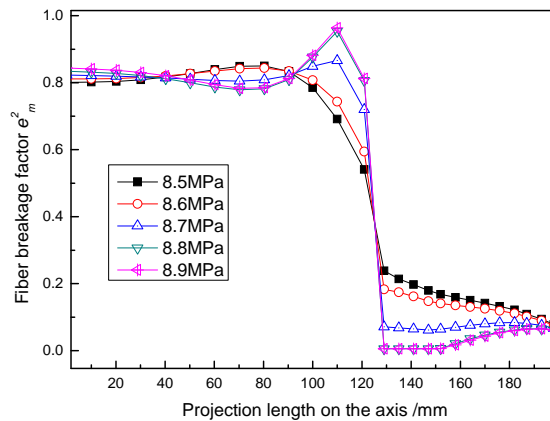


图 4-29 失效单元对周围应力水平的影响

Fig. 4-29 Effect of failure element for around stress

## 4.5 本章小结

本章通过有限元软件对复合材料压力容器的分析，揭示了压力容器的破坏机理，为健康监测传感器的布设提供了依据。

基于 ANSYS 有限元软件，按照平面缠绕方法建立了复合材料压力容器计算了封头处不同的缠绕角度和厚度，通过 ANSYS 软件中的实常数对单元赋值，模拟出了压力容器的真实情况。在压力容器的桶身段和封头粘贴了 25 组应变片，验证了模型的正确性，基本能够反映真实的应变变化。使用 SMARTape 条带传感器测量了容器桶身螺旋向的伸长量，通过 ANSYS 路径功能获得了桶身螺旋向的变形，与传感器的测量值基本相符。

对压力容器模型逐步施加压力，以 Hashin 失效准则和最大应力准则为判断依据，对模型进行了渐进损伤分析，在 2.0MPa 时树脂完全开裂，最初的纤维断裂出现在 8.1MPa，桶身与封头连接处，而后经向纤维逐渐断裂，在 8.9MPa 下此位置纤维全部断裂。压力容器爆破压力的预报值为 8.9MPa。

本章作为结构健康监测传感器布设的基础，通过有限元建模分析-实验验证-破坏分析，不仅揭示了复合材料压力容器的破坏过程，也确定了传感器的布设位置。对于飞行器上其它复合材料结构的健康监测，也将按照此路线来确定传感器的位置，对更加复杂的结构，再用传感器优化布设准则来确定传感器的数量和位置。

## 第5章 基于光纤传感技术的压力容器健康监测

### 5.1 引言

纤维缠绕金属内衬压力容器必须具有金属压力容器所没有的 LBB（爆破前泄漏准则）失效模式。该模式必须满足两个条件：纤维缠绕层的循环寿命远大于内衬，可保证内衬因疲劳而先于纤维缠绕壳体失效；若内衬因裂纹不稳定增长透过其厚度且在内衬面内扩展而失效，则纤维缠绕层必须具有承受附加载荷所需的强度。对纤维缠绕金属内衬压力容器进行健康监测，实时获取其变形情况，有信号异常时及时采取措施，能够避免灾难性的后果。

传统的无损检测/评估技术（NDT/NDE）不能直接应用于检测服役中的结构健康状态，因为这些技术需要在实验室内用大量的设备实现<sup>[125]</sup>。结构健康监测与无损检测的一个主要区别在于，结构的健康监测是在一个孤立的环境里面，没有人为干涉的情况下，特别是在航空、航天飞行器上，对正在服役中的结构进行监测。复合材料压力容器健康监测起源于航天上可重复使用储箱。过去航天燃料储箱均为一次性使用，其成本居高不下。为了降低生产和维护成本，把结构健康监测技术应用到可重复使用储箱上，在重复使用过程中进行全寿命监测，保证其安全服役。1998 年，美国洛马航空公司在 X-33 可重复使用低温储箱上粘贴了 FBG 传感网络，提出分布式健康监测的概念，最大限度地减少连接线用量，降低结构重量，使健康监测技术更加适合于航空航天领域。

光纤光栅的传感段只有 10mm，对复合材料结构来说，相当于点的测量，因此，有必要开发一种新型的传感器，对长距离进行监测，联合光纤光栅，两者配合使用，对结构进行局部、整体全方位的监测。

本章首先开发一种干涉型光纤传感器，用实验验证了传感器的应变特性和温度特性。将传感器粘贴在试件上进行三点弯曲实验，传感器的变形与载荷增量有线性关系，并且能够反映复合材料的损伤；传感器对温度变化也有良好的响应；传感器粘贴在复合材料压力容器上能够反映容器内的压力，并与国外产品进行了对比。然后将光纤光栅传感器、开发的传感器和应变片粘贴在复合材料压力容器表面，进行了容器低温增压实验、静水压力实验和破坏实验。



## 5.2 干涉型光纤传感器的开发

光在光纤中传输，受到温度、应变的作用后，光的强度、相位、频率、偏振态等光波量会发生变化，通过测量这些量的变化就可以得到相应的物理量。干涉型光纤传感器是众多的光纤传感器中的一种。其基本原理为：在单模光纤中传输的相关光，因待测能量场的作用，而产生相位调制。干涉测量技术把相位变化转化为强度变化，检测出待测的物理量<sup>[126,127]</sup>。干涉型传感器的优点是具有极高的灵敏度<sup>[128]</sup>。

瑞士SMARTEC公司开发了基于迈克尔逊干涉原理的SOFO光纤测试系统<sup>[129,130]</sup>，应用范围包括土木结构<sup>[131,132,133]</sup>，能源领域，复合材料结构<sup>[134]</sup>等。但其传感器的价格过高，不适合在国内广泛使用。开发一种价格低廉，适合在复合材料结构固化过程、服役过程进行长距离健康监测的传感器，将推动国内复合材料结构健康监测的发展。

### 5.2.1 干涉型光纤传感器的力学和光学原理

#### 5.2.1.1 力学原理

结构变形后，沿一条路径会有一个总的变形量  $\Delta L$ ， $\Delta L$  由此路径上有限个微元贡献，则有：

$$\Delta L = \varepsilon_1 l_1 + \varepsilon_2 l_2 + \cdots + \varepsilon_n l_n = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i l_i \quad (5-1)$$

式中的  $l$  表示微元的长度，下标表示第  $i$  个微元，式(5-1)右端可表示为沿路径的积分，则：

$$\Delta L = \int_l \varepsilon(l) dl \quad (5-2)$$

$\varepsilon(l)$  表示应变沿路径的变化，当然，此路径可以是第 1 主应变，第 2 主应变， $x$  方向应变，或者是几种应变的组合。由此可以看出，干涉型传感器测量的是路径的变形量，是应变沿路径的积分。

#### 5.2.1.2 光学原理

传感器工作原理图如图5-1所示，传感器根据迈克尔逊干涉原理设计而成。1300nm的光源发出宽带光，经耦合器 1 到达传感器，再经过耦合器 3 到达测量光纤和参考光纤。两束光在光纤端面镀膜处发生反射后回到解调仪中，在解调仪中当可移动反射镜所移动的距离与结构的变形相匹配后，两束

光发生干涉，并且干涉条纹出现极大值，此时解调仪中的模块输出反射镜移动的距离，一次测量完毕。

只有当迈克尔逊干涉仪两臂之间与传感器两反射面之间产生的光程差小于相干长度  $L_c$  时，光信号才能发生干涉；当二者绝对相等时，光干涉条纹出现主极大值，此时干涉仪达到光程匹配，满足以下条件：

$$n_0(L_1 - L_2) + X = n_0 L_0 \quad (5-3)$$

式中  $n_0$  为光纤纤芯折射率， $X$  为透镜与可移动反射镜之间的距离，将式两端同除  $n_0$ ，变化为：

$$(L_1 - L_2) + X / n_0 = L_0 \quad (5-4)$$

可见，传感器的测量臂同参考臂之间的差值与  $X$  值一一对应，外界的干扰均可以通过测量  $X$  获得。

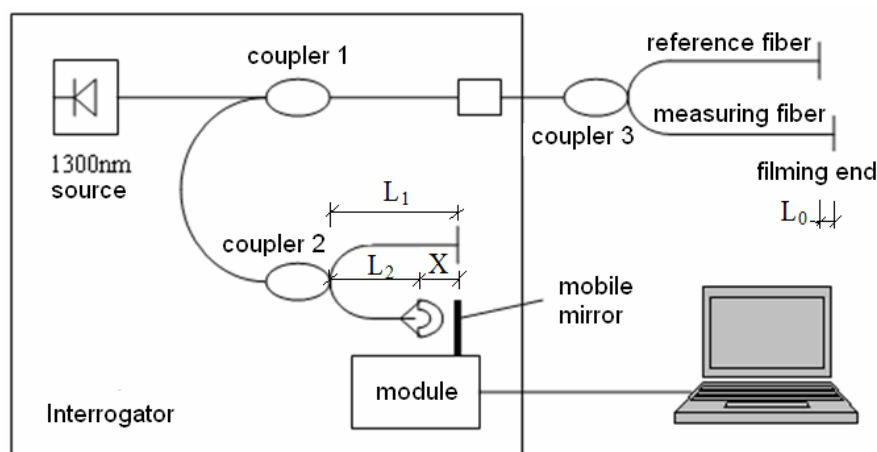


图 5-1 干涉型传感器工作原理

Fig. 5-1 Working principle of interferometric fiber optic sensor

## 5.2.2 干涉型光纤传感器的研制

### 5.2.2.1 干涉型光纤传感器的制作

干涉型光纤传感器的连接器使用 E2000，此种连接器是少有的几种装有弹簧闸门的光纤连接器，这样可以保护插针不受灰尘的污染，并不受磨损。其插入损耗 0.10dB，回波损耗 59.9dB。

耦合器采用单窗口光纤分路器（一分二），中心波长 1310nm，带宽  $\pm 40\text{nm}$ ，耦合比 50%:50%。耦合器的一端为单根光纤，另一端为两根光纤。

此种耦合器的体积小、重量轻。

在光纤上镀膜目前已经是一项很成熟的工艺。根据薄膜光学理论可知，在基底上用高低两种折射率的膜料交替镀制厚度为  $\lambda_0/4$  的多层膜堆，可以得到对中心波长  $\lambda_0$  具有一定反射率的反射镜。其反射率由基底折射率、膜料折射率、所处媒介折射率、以及镀膜的层数等因素决定。

将裸光纤的端部切割平整后镀介质膜作为反射镜，介质为  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$ ， $\text{Ta}_2\text{O}_5$  的折射率为 2.07， $\text{SiO}_2$  的折射率为 1.46。两种材料镀膜的厚度分别为  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  镀 156.93nm，然后  $\text{SiO}_2$  镀 222.14 nm，交替镀膜共 21 层。为保证光纤不会烤坏和断裂，镀膜温度控制在  $100^\circ\text{C}$  以内。交替镀膜后的反射率如图5-2，在中心波长 1310nm时可达到 98%，最低的反射率也可达 95%以上，完全能够满足使用的要求。

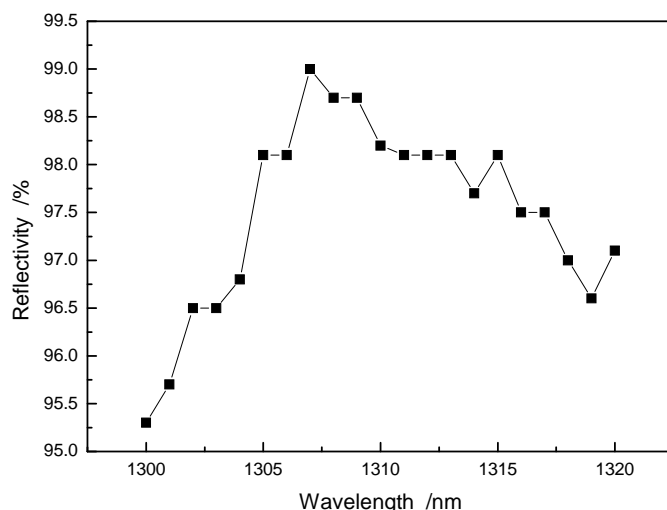


图 5-2 镀膜光纤的反射率

Fig. 5-2 Reflectivity of optical fiber end with reflective film

制作时先将E2000 与耦合器的单路熔接在一起，熔接使用专用的光纤熔接机KL-200，熔接损耗 0.02dB，然后将出口的两路光纤与两根镀膜的单模裸光纤熔接在一起。熔接前需要注意的是，为了让整个光路在仪器内产生干涉，测量光路与参考光路的距离不能太大，因仪器内部的可移动发射镜的移动距离是有限的。整个制作好的传感器如图5-3所示。传感器的解调装置使用SMARTEC公司生产的SOFO Bee读数仪。实验过程中选定拉伸后测量值增大的一路光纤作为测量光纤。

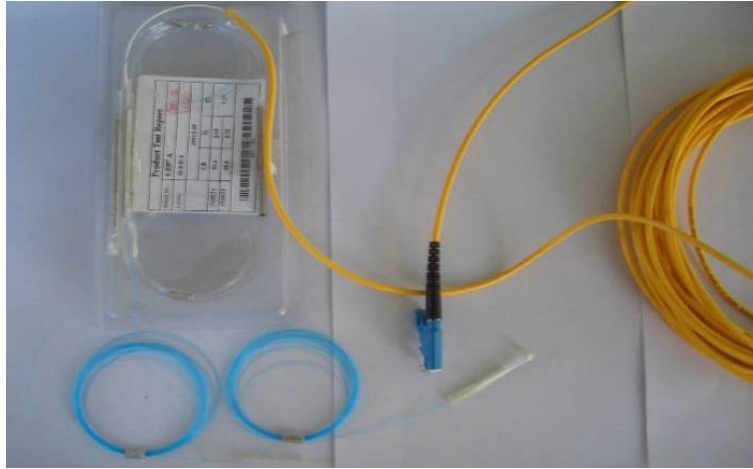


图 5-3 研制的传感器

Fig. 5-3 The developing sensor

### 5.2.3 干涉型光纤传感器的应变特性

为了检验干涉型光纤传感器的应变特性，制作了微给进装置（如图5-4所示），该装置的最小给进距离为  $10\mu\text{m}$ 。装置的左端为三个方向均可调的金属平台，右端是通过螺旋测微装置可横向移动的一个金属平台。在两个平台上安装有光纤夹具，试验前调整左端的平台，使夹持后的光纤保持水平。试验中通过右端螺旋测微装置的移动来拉伸光纤，检验其应变特性。

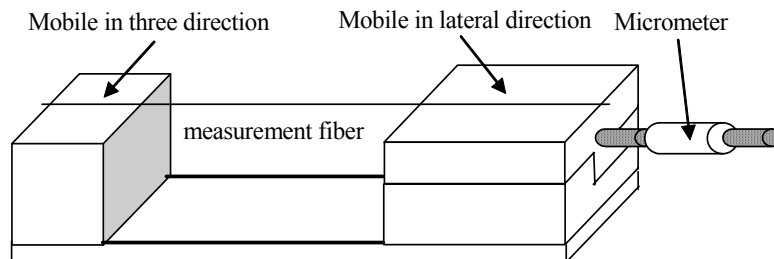


图 5-4 传感器应变特性的测量

Fig. 5-4 Measuring strain characteristic of the sensor

夹持的测量光纤长  $500\text{mm}$ ，预先张拉  $5\%$ ，使测量光纤处于张紧状态进行拉伸试验。试验中每次拉伸光纤  $10\mu\text{m}$ ，然后和SOFO读数仪测量到的数值进行对比，SOFO读数仪的分辨率为  $2\mu\text{m}$ 。图5-5为应变特性的实验结

果。可以看出,传感器对应变响应具有很好的线性度,拉伸曲线的线性拟合度 0.99976,卸载曲线的线性拟合度 0.9996。并且卸载后传感器恢复到了初始状态,只和初始值相差  $2\mu\epsilon$ 。

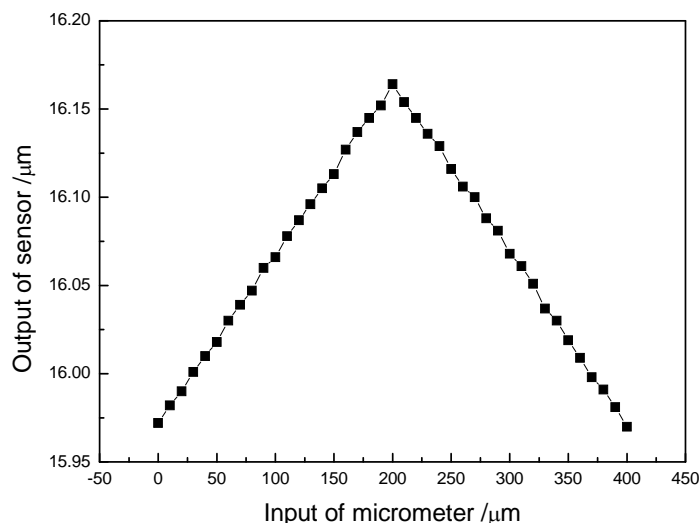


图 5-5 传感器应变特性的结果

Fig. 5-5 Results of strain characteristic

为了检验所研制传感器在载荷下的响应,将传感器粘贴在复合材料试件上,传感器的测量臂为 300mm,位置在试件宽度的中央,再把试件放置在支座上进行三点弯曲实验,跨距 300mm,试件宽 25mm,厚 3mm。施加载荷每次增量 200g,加至 3600g 结束。

在完好的梁上施加载荷后,在梁的 1/4 处、传感器附近打一个 5mm 的孔作为损伤,重复以上的实验。

实验结果如图5-6所示。可以看出,研制的传感器与载荷有线性关系,当复合材料试件存在损伤的时候,其试件刚度下降,变形增大,其斜率也大于无损伤的情况。可见,所研制的传感器可用于复合材料损伤的监测。

若传感器为线性传感器,其灵敏度是传感器的输出增量与输入增量之比,即:

$$k = \Delta y / \Delta x \quad (5-5)$$

所研制的传感器为线性传感器,根据以上部分所述实验可得  $k = 2\mu\epsilon / \mu\text{m}$ 。对于大型结构使用的传感器,此精度能满足要求,传感器的精度不受传感器长度的影响。

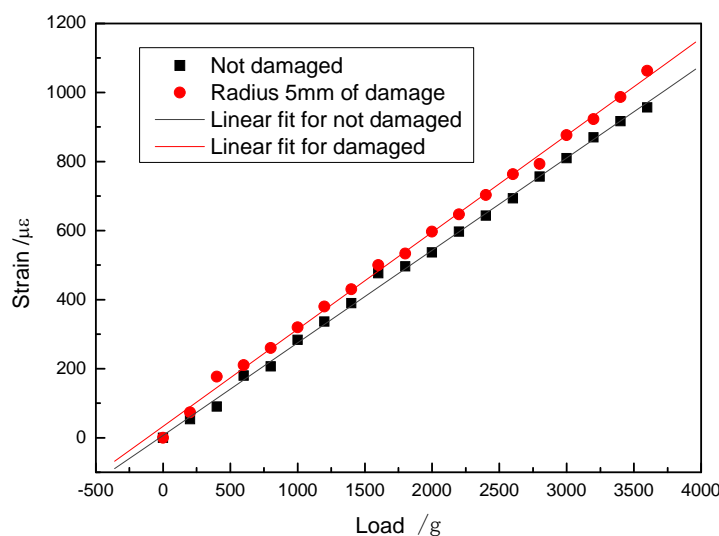


图 5-6 载荷下传感器的应变特性

Fig. 5-6 Strain characteristic of the sensor with load

#### 5.2.4 干涉型光纤传感器的温度特性

将传感器的测量光纤放置在金属容器中，容器上下表面可加热，参考光纤置于室温下，同时将一组热电偶也放置在其中，以便于和传感器的测量值进行比较。实验加热过程为：从室温开始升温到  $90^{\circ}\text{C}$ —保温 30min—升温到  $130^{\circ}\text{C}$ —保温 30min—升温到  $175^{\circ}\text{C}$ —保温 210min。图5-7显示了传感器、热电偶、加热上下面板的测量结果，四者具有很好的一致性。传感器的测量值为长度值，由于其参考光纤虽然在室温下，但是加热过程对室温会产生影响，所以和温度的测量结果还有些差别。若想把此种传感器用于温度的测量，还需要把参考光纤做很好地保温处理，使其处于一个恒定的温度环境中，则测量臂可很好的反映温度变化。

用两个研制的传感器再进行温度特性的实验。将一个传感器的测量光纤放置在干燥箱中，参考光纤置于室温下，另一个传感器的测量光纤和参考光纤都放入干燥箱中。图5-8显示了两个传感器的测量结果。只将测量光纤放入干燥箱的传感器的变化值为  $5.392\text{mm}$ ，将两臂均放入干燥箱的变化值为  $0.818\text{mm}$ 。这是由于在初始状态下测量光纤和参考光纤之间存在十几个毫米的差值，升温后这个差值增加出了一个新的增量。

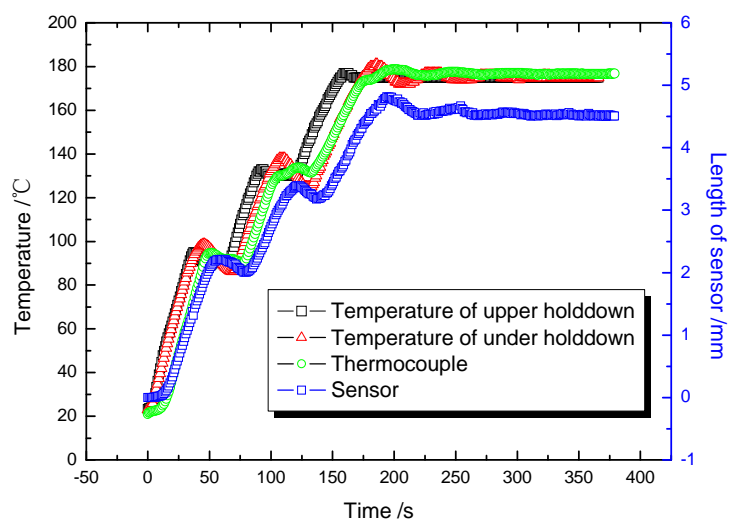


图 5-7 传感器的温度特性

Fig. 5-7 Temperature characteristic of the sensor

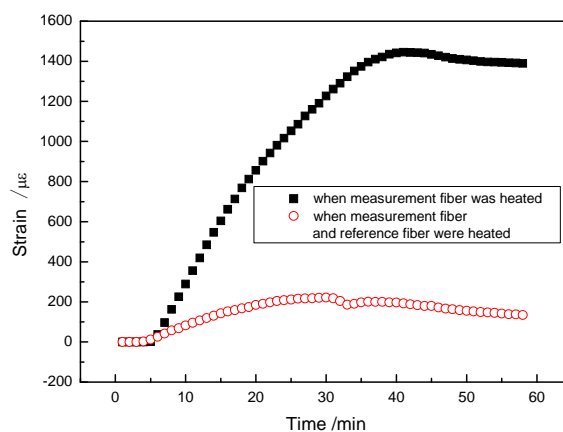


图 5-8 传感器温度特性的差异

Fig. 5-8 The difference of the sensor under two conditions

研制的干涉型光纤传感器灵敏度高，制作简单，价格低廉，适合在国内广泛使用。传感器的拉伸量与解调仪的输出量基本相等，粘贴在试件上与载荷增量有线性关系，并且能够反映复合材料的损伤；传感器对温度变化也有良好的响应。传感器采用裸光纤作为测量段，适合埋入复合材料中，后面将用所研制的传感器监测复合材料压力容器，用此种传感器能实现复合材料结构的制造工艺—损伤评估一体化全寿命健康监测。

## 5.3 复合材料压力容器低温监测

复合材料压力容器在使用中可能遭遇低温环境，或者在容器内本身就是液态气体，如液氮。健康监测技术能够察觉低温环境下复合材料的性能是否有突变，是否发生骤然爆破。

### 5.3.1 健康监测系统的建立

对容器进行打磨和清洁后，在表面粘贴光纤传感器和应变片。在压力容器表面共粘贴了 14 个光纤光栅和 4 个干涉型光纤传感器，其布设具体位置见表。为了尽量减少连接线，将光栅串联起来，一共四串。胶粘剂采用低温胶 DWY-1，在热压釜中加热固化。

表 5-1 传感器的布设位置

Table 5-1 Position of sensors

传感器类型	布设位置	数量	方向	备注
光栅	封头	4	纤维方向	距离法兰边缘分别为 100、160、180、200mm
		2	垂直纤维	距离法兰边缘分别为 160、180mm
	桶身中部	2	环向	两者成 90° 夹角
		2	轴向	两者成 90° 夹角
		2	环向	两者成 90° 夹角
		2	轴向	两者成 90° 夹角
研制的干涉型光纤传感器	桶身	2	轴向	传感器长度为整个桶身的轴向长度，两者成 90° 夹角
		1	环向	传感器长度为整个桶身的环向长度
SMARTEC 公司的条带传感器	桶身	1	轴向	长度为整个桶身的轴向长度，紧靠一个自制的传感器布设在光栅附近，与光栅方向一致
电阻应变片		14		



为方便说明，将传感器标号后列于图5-9。其中SOFO1 为厂家生产的，SOFO2~SOFO4 为自行开发研制的。与光栅相对应的应变片编号分别为ESG1~ESG14。

监测中使用了两种光纤传感器，光纤光栅的传感段为 10mm，对于结构来说相当于一个点，干涉型光纤传感器的传感段可根据需要制作，进行长距离的变形监测。两者组合在一起使用，形成点、线相互配合，局部、整体全方位结构健康监测系统。

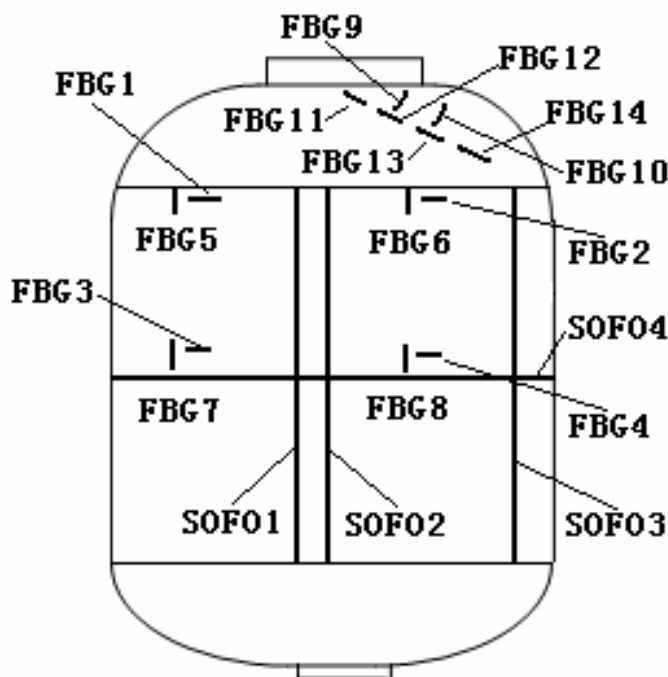


图 5-9 传感器编号与位置

Fig. 5-9 Number and position of sensors

传感器粘贴好后，再安装好一侧的法兰盘，然后将压力容器放置在高压容器实验保护装置中，此装置的设计工作压力为 80MPa。放置好压力容器到内部后，再焊接管路。法兰盘采用耐低温不锈钢制作，管路用不锈钢管。管路固定好以后，搭建健康监测系统，系统构成如图5-10所示。监测系统组成主要有光栅解调仪、SOFO解调仪、静态应变仪，光栅解调仪与电脑的接口为网卡，SOFO解调仪与电脑的接口为R232，静态应变仪与电脑的接口为R232，两台电脑能满足 3 台仪器数据的采集。实验时，通过水压泵向容器中注水来增加压力。

Fig. 5-10 Health monitoring system

液氮的灌入流程如图5-11所示。

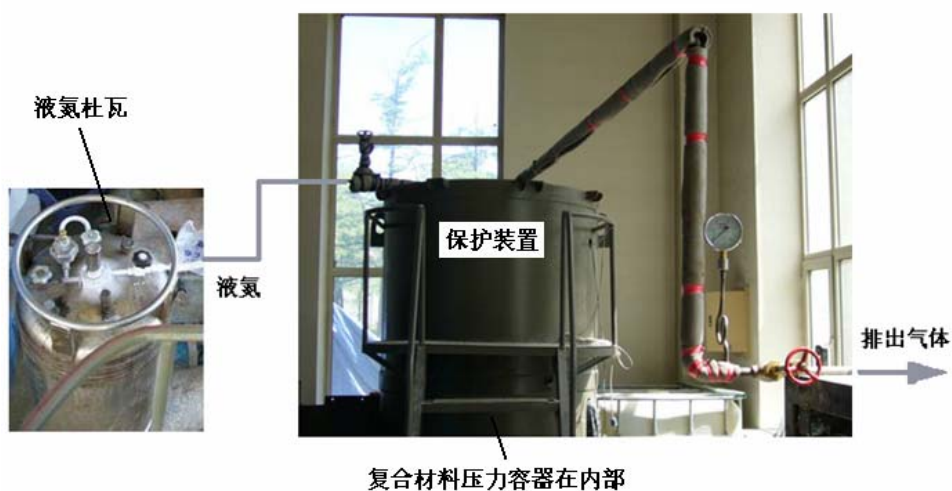


图 5-11 液氮灌入压力容器

Fig. 5-11 Inject liquid nitrogen into pressure vessel

对监测系统先进行传感器检测，因在固化过程、安装过程中均有可能损坏传感器。检查中发现，SOFO4 没有信号，ESG2、ESG4、ESG6、ESG8 应变片损坏，光栅全部完好。

在液氮的灌入过程中，打开监测仪器开始采集数据。灌入液氮后干涉型传感器的监测结果列于图5-12。SOFO1 和SOFO2 的距离比较近，两者的变化也相近，平均应变 $-1400\mu\epsilon$ 左右。SOFO3 的变形则略微大些，平均应变大约 $-3300\mu\epsilon$ ，原因是它位于保护装置的里侧，而另外两个传感器位于靠近门的一侧，热空气对参考光纤的影响比较大。

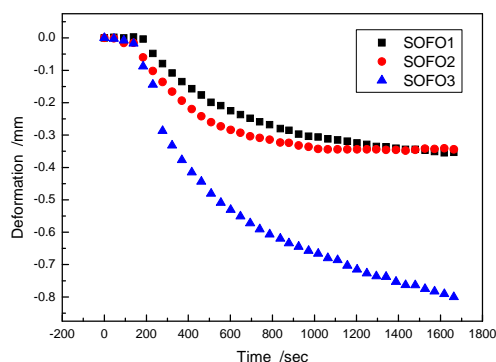


图 5-12 干涉型传感器的监测结果

Fig. 5-12 Monitoring results with interferometric sensors

光栅传感器的监测结果列于图5-13。容器内灌入液氮后遇冷收缩，传感器全部表现出了下降的趋势。桶身纵向变化最大，封头处的变化相对较小。

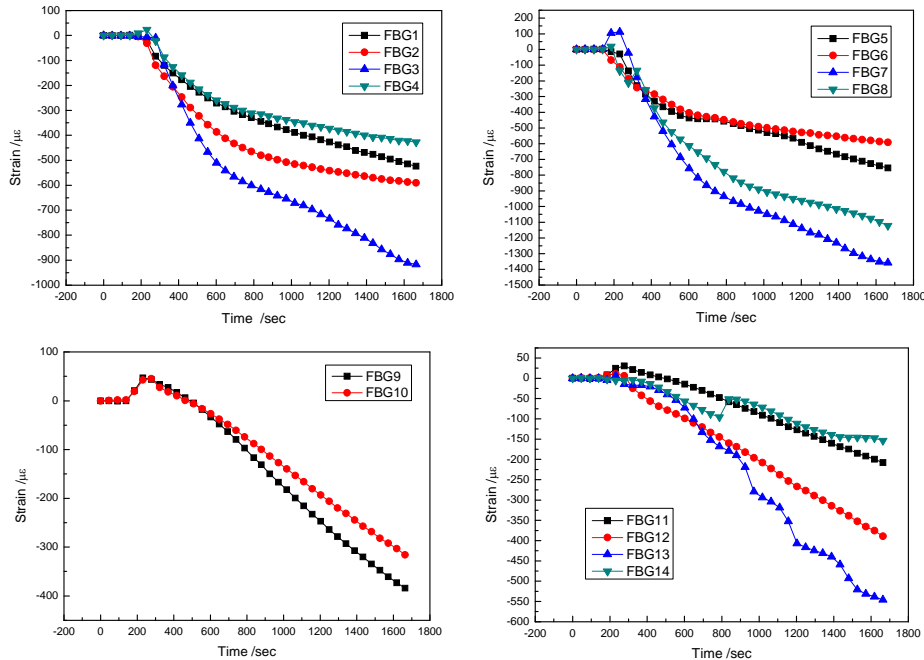


图 5-13 光栅传感器的监测结果

Fig. 5-13 Monitoring results with FBG sensors

灌液过程的时间比较短，在 30 分钟以内。灌入的液氮不断的气化，改变着周围的温度，压力容器又同外界不断的传热，容器整体处于不均匀的温度场中。传感器在这样的环境中，只能反映出每个点的应变，尽管布置在对称位置，但不能反映对称的变化。FBG9 和 FBG10 在灌入液氮的初期，还有一段微小的上升，可见由于时间短，封头的温度所受影响较小时，液氮的气化增加了容器内的压力。

### 5.3.3 低温增压监测

压力容器经过一段时间的稳定，在外表面凝结了一层霜，温度环境基本均衡。实验时，将进液阀门和出液阀门均关闭，利用液氮的气化来增加压力容器内的压力。在出液管路上安装有压力表，压力每增加 0.2MPa 采用一次数据。监测结果列于图5-14。SOFO1 和 SOFO2 的测量值很接近，SOFO3 略微高一些，传感器的响应与压力基本上呈线性关系。传感器的测量值不能完

全相同，和传感器的总长度是有关的。可见，研制的传感器在性能上已能满足要求，适合于健康监测的使用。

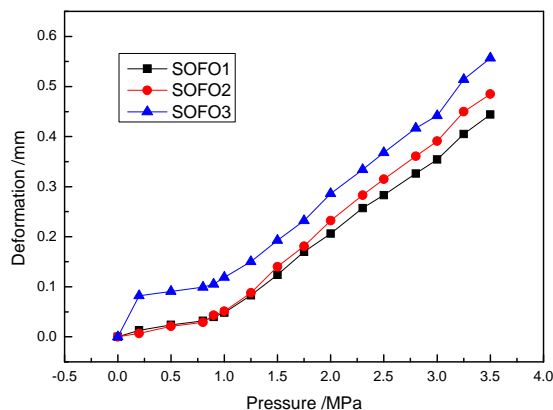


图 5-14 干涉型光纤传感器的监测结果

Fig. 5-14 Monitoring results with interferometric sensors

光栅布设的数量较多，一是为了获得更多的数据，二是在对称位置可以相互比较。14 个传感器串成了 4 路，FBG1~FBG4、FBG5~FBG8、FBG9 和 FBG10、FBG11~FBG14。但在实验时，发现压力增加后 FBG2、FBG4、FBG6、FBG8 均没有了信号，在没有压力时才有信号，说明该侧传感器均失效。桶身上的光纤光栅传感器的监测结果列于图 5-15 和 5-16。桶身的环应变小于连接处的应变，环向应变大于轴向应变，这与分析结果相一致。但此时，温度场还在影响着容器结构，使应变-压力曲线的线性度还不是很好。

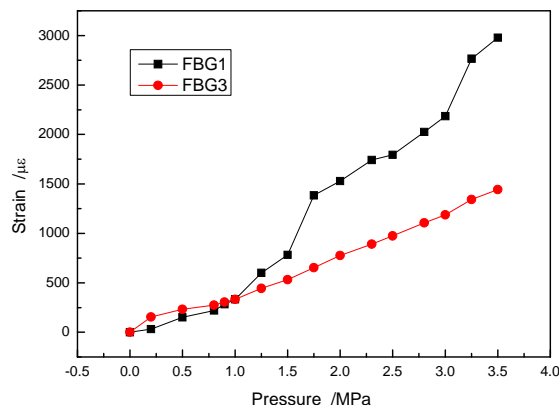


图 5-15 桶身环向监测结果

Fig. 5-15 Hoop monitoring results in cylinder

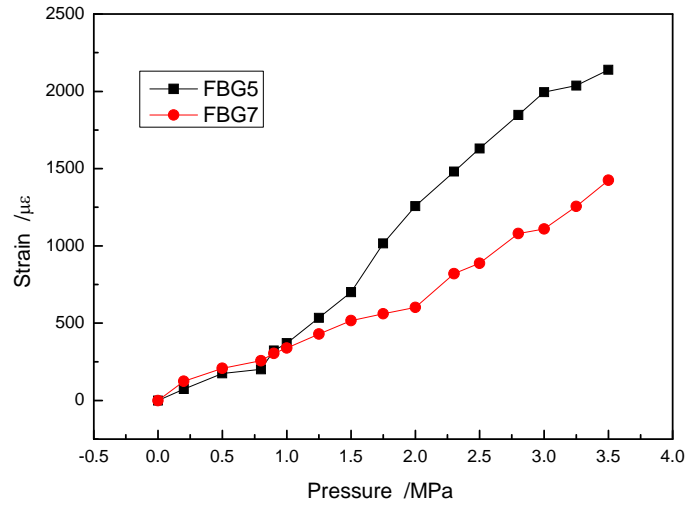


图 5-16 桶身轴向监测结果

Fig. 5-16 Axis monitoring results in cylinder

封头处光栅的监测结果列于图5-17和5-18。封头的纤维方向存在应变梯度，从监测结果中也可以看出，封头处的应变也受到温度的影响。从曲线的变化趋势看，光栅的信号基本和内压呈线性关系。

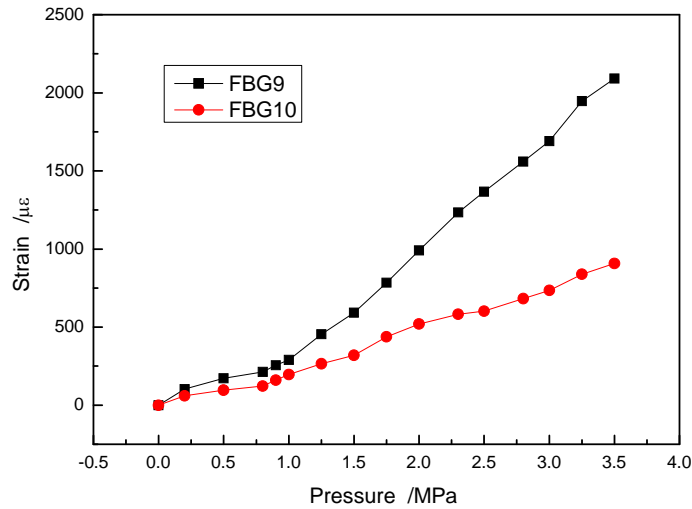


图 5-17 封头垂直纤维方向监测结果

Fig. 5-17 Monitoring results of perpendicularity fiber in dome

在图5-18中，可以看出，FBG11 和另外 3 个光栅分别位于一个应变波峰的两侧。

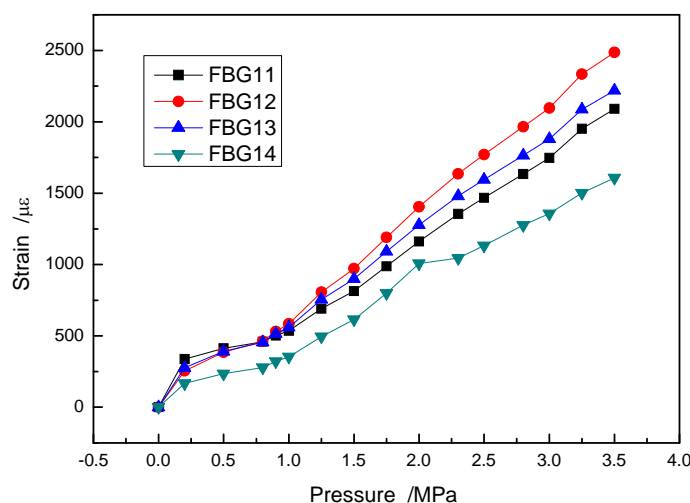


图 5-18 封头纤维方向监测结果

Fig. 5-18 Monitoring results of parallel fiber in dome

复合材料压力容器在低温下的增压实验表明, 复合材料应变与内压依然有线线性关系, 两种光纤传感器在低温下也表现了良好的性能。应变片在低温下的监测结果较差, 在图中没有列出。后续要做静水压力实验, 将对光纤传感器监测结果、应变片结果、有限元计算结果相比较。

## 5.4 复合材料压力容器破坏监测

### 5.4.1 静水压力监测

静水压力实验是利用水压泵向容器中注入水来增加内压。监测系统和传感器不变, 首先将压力增加至 4.6MPa, 三个干涉型光纤传感器的监测结果如图5-19所示。干涉型传感器的响应与容器内的压力呈线型关系, SOFO1 和SOFO2 在 2.6MPa之后, 保持着稳定的间距, SOFO3 在 3MPa之后其值变得略微缓慢。SOFO1 的监测值与预测值更加接近, SOFO2 和SOFO3 也能够反映桶身处整体的变形完全能够应用。模型预测值采用ANSYS提供的路径功能, 由于粘贴传感器的位置正好为第2主应变的方向, 利用路径积分功能即可获得路径上总的变形量。

SOFO1 为按照桶身长度定制的传感器, SOFO2 和 SOFO3 为实验室制作的, 因此总体长度的差别导致了最终变形量的差别。

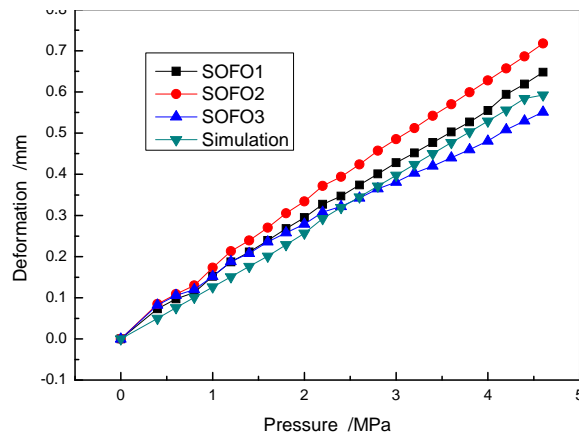


图 5-19 干涉型传感器监测水压过程

Fig. 5-19 Monitoring hydraulically testing with interferometric sensors

光纤光栅在桶身的监测结果如图5-20和5-21。FBG1 的 监测值和模拟值比较接近，ESG1 的测量值较两者差距大些。FBG3 的测量值、模拟值和 ESG3 均不完全相同，光栅的测量值较小，并且表现出了衰减的趋势。FBG5 和模拟值有些差别，ESG5 和模拟值比较接近。FBG7 和模拟值相符，ESG7 损坏，信号不正确。桶身部分的传感器与容器内压有线性关系，预报值与测量值之间的差异主要还是由于模型无法完完全全的反映结构，缠绕时真正的缠绕角和厚度，过去实验对容器的损伤等，FBG3 的信号出现了衰退，可能的原因就是其他位置的纤维断裂，光栅所在位置受到了影响。

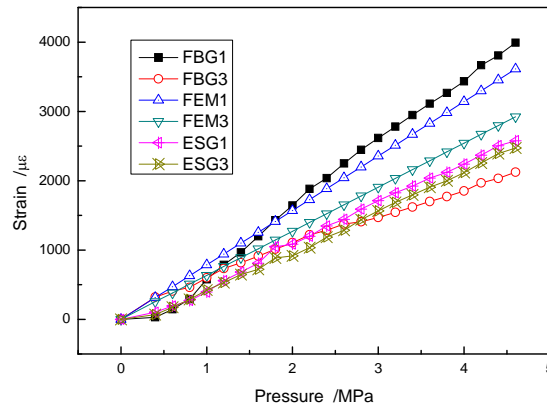


图 5-20 桶身环向监测水压结果

Fig. 5-20 Monitoring hydraulically testing in hoop cylinder with FBG



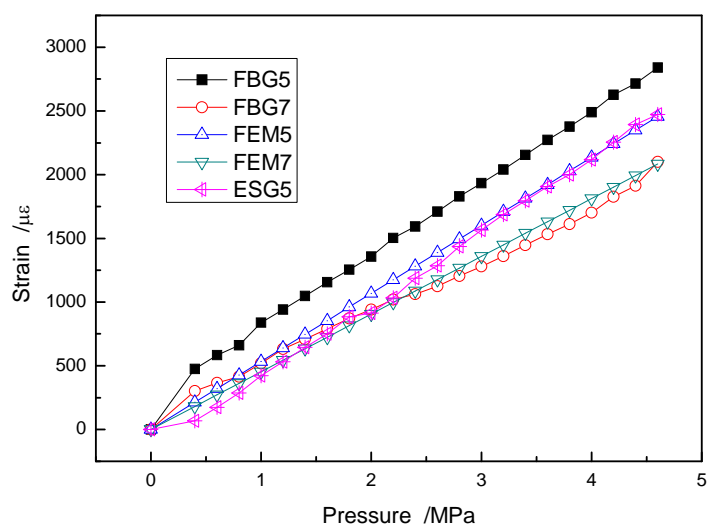


图 5-21 桶身轴向监测水压结果

Fig. 5-21 Monitoring hydraulically testing in Axial cylinder with FBG

光纤光栅在封头的监测结果如图5-22、5-23和5-24。封头处的FBG、ESG和模拟值三者相符的程度较高，当然其中也有些差别，这与位置传感器所在的位置、模型中选择对比单元的位置均有关系。

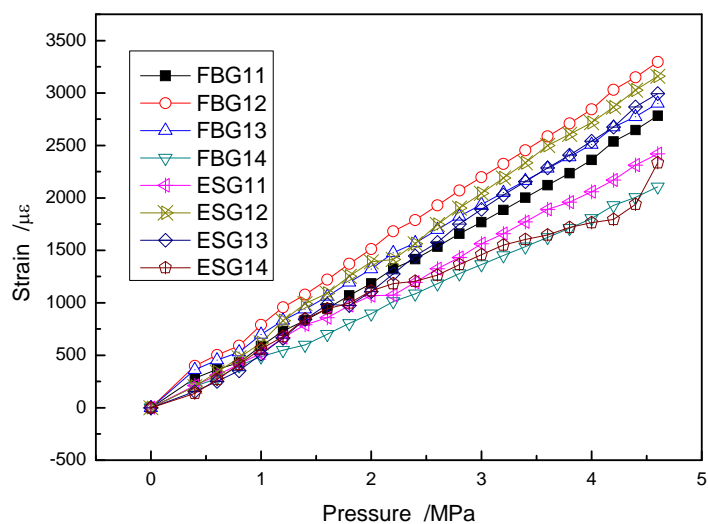


图 5-22 封头纤维方向监测水压结果

Fig. 5-22 Monitoring hydraulically testing in dome with FBG of parallel fiber

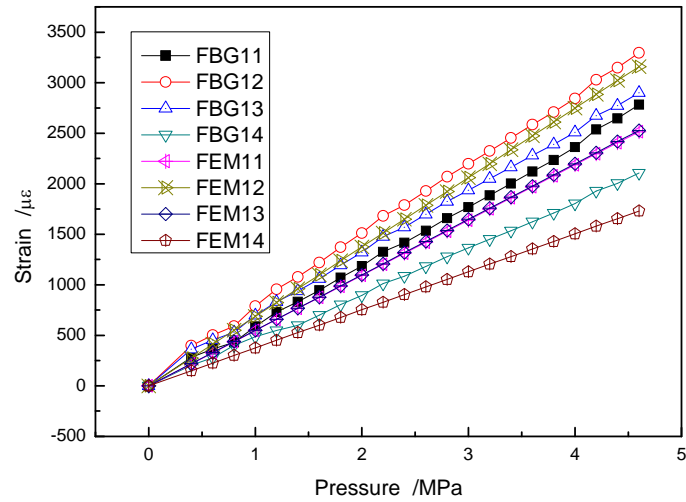


图 5-23 封头纤维方向监测结果

Fig. 5-23 Monitoring hydraulically testing in dome with FBG of parallel fiber

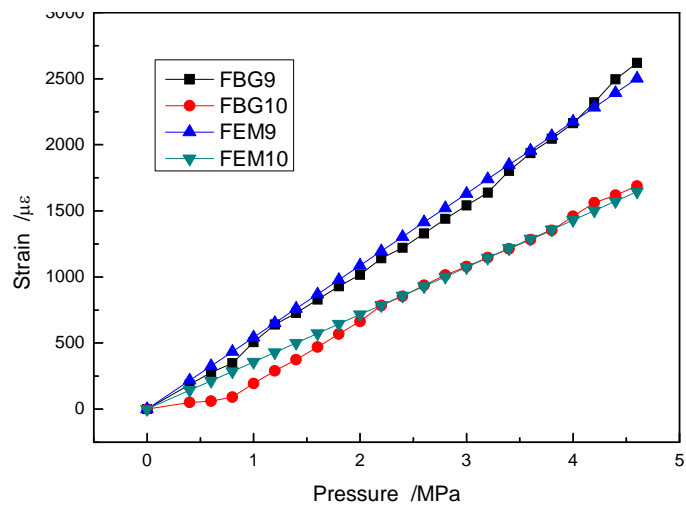


图 5-24 封头垂直纤维方向监测水压结果

Fig. 5-24 Monitoring hydraulically testing in dome with FBG of perpendicularity fiber

#### 5.4.2 复合材料压力容器爆破监测

对于爆破监测，将水压从 0 值逐渐增大，直至压力容器出现破坏，或者内衬发生漏水。干涉型传感器的结果列于图5-25。

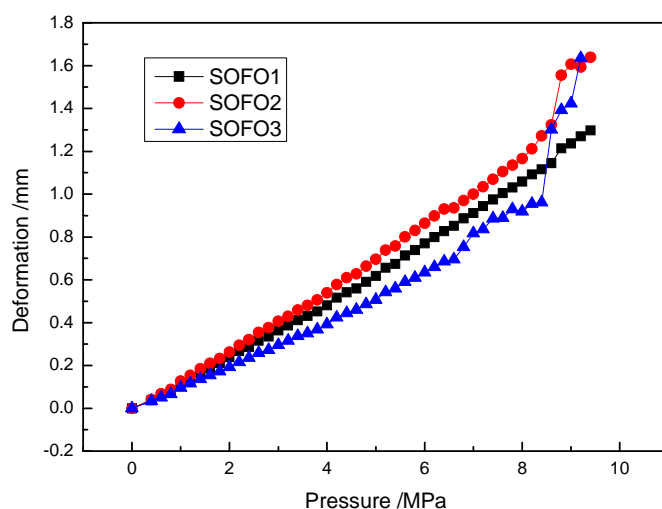


图 5-25 干涉型传感器监测爆破

Fig. 5-25 Monitoring blasting with interferometric sensors

从图中可以看出，传感器在增压过程中，压力与伸长量有线性关系，但压力在 8.6MPa 的时候，三个传感器开始出现了跳跃式的变化。这是由于部分纤维断裂，应力重分布后，未断裂的纤维所承受的应力增大，变形急剧升高，使得传感器的监测值也迅速增加。在压力达到 9.2MPa 的时候，SOFO2 和 SOFO3 传感器的光纤断裂，压力容器表层破坏严重，见图 5-26 和 5-27。



图 5-26 传感器所在位置的破坏

Fig. 5-26 Breach of sensor position of pressure vessel



图 5-27 压力容器其它位置的破坏

Fig. 5-27 Breach of pressure vessel

光纤光栅的监测结果列于图5-28和5-29。桶身处的环向光栅在 5.6MPa 的时候就开始出现了信号的变化，其它方向的光栅结果略大于此值。光纤光栅的信号发生变化是由于复合材料外层发生脱层，外层纤维在打磨的时候有部分被切断，使脱层后的纤维不能承担载荷，信号开始下降。应变片的体积相对较大，对结构细微的变化没有响应。桶身轴向的结果与环向类似，复合材料脱层后信号有下降的突变。

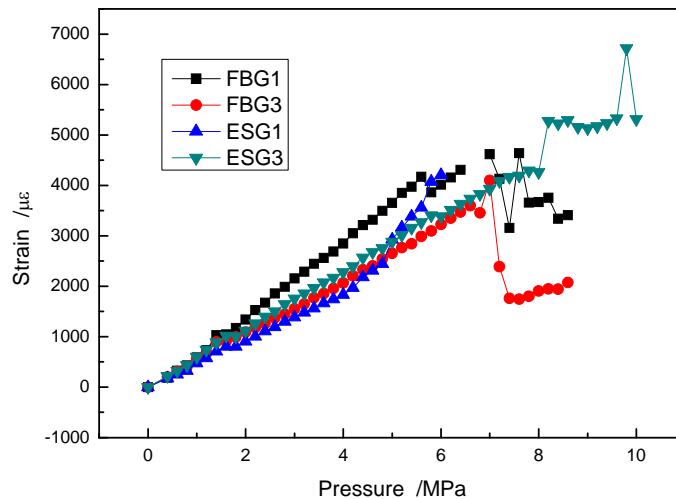


图 5-28 桶身环向监测爆破结果

Fig. 5-28 Monitoring blasting in hoop cylinder with FBG

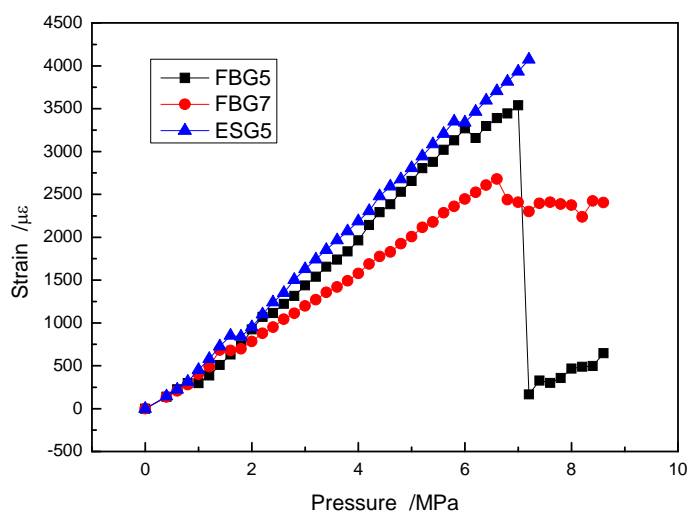


图 5-29 桶身轴向监测爆破结果

Fig. 5-29 Monitoring blasting in axial cylinder with FBG

封头处光栅的监测结果列于图5-30和5-31。封头处由于进行了增厚补强，纤维在封头处没有破坏，光栅的测量结果与应变片也符合得很好，应变与压力保持线性关系。在垂直于纤维方向，监测到的信号出现了衰减的趋势，在高压下垂直纤维方向有了损伤，通过光栅监测的信号表现了出来。ESG11 在测量中途损坏后没有了信号。

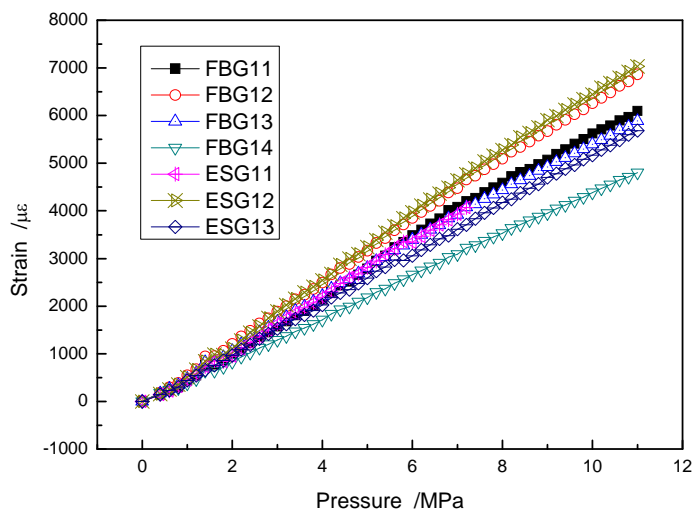


图 5-30 封头纤维方向监测爆破结果

Fig. 5-30 Monitoring blasting in dome with FBG of parallel fiber

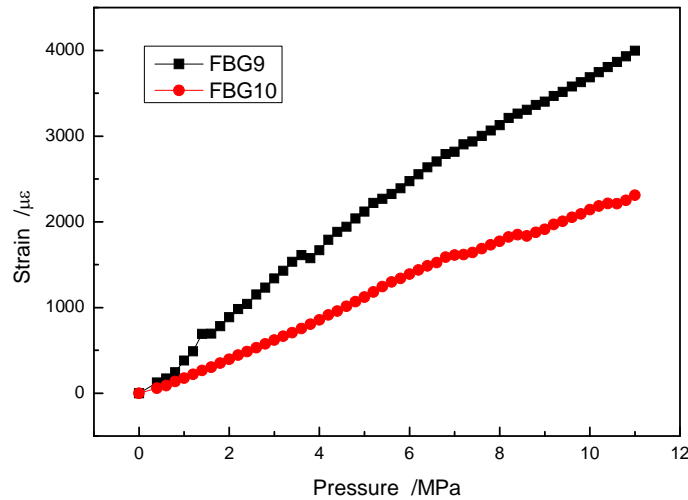


图 5-31 封头垂直纤维方向监测爆破结果

Fig. 5-31 Monitoring blasting in dome with FBG of perpendicularity fiber

使用两种光纤传感器监测压力容器的爆破，由于铝内衬的塑性大，没有出现漏水的现象，但压力容器桶身处的纤维已经开始了分层和断裂，两种光纤传感器表现出了不同的趋势，同传感器的传感段长度相关。光纤光栅的长度短，对测量点的变化比较灵敏，当附近稍有变化时，它的信号就开始出现了不稳定的变化。而干涉型光纤传感器，测量的范围比较大，对点的测量不敏感，只有较大范围的损伤，信号才会出现变化。

同有限元的预测相比，容器的真实爆破压力可能会比预报值更加高，这是由于在预报爆破压力的时候，纤维的断裂强度值选取的较低造成的。容器的真实破坏形式和预报的也不近相同，预报的爆破模型是在桶身与封头的连接处内层的经向纤维先断裂，然后应力重新分布后使外层纤维的应力值急剧增加，导致断裂。实验时，却是外层的纤维和经向纤维分层、断裂。两者不同的原因在于，复合材料压力容器在打磨的时候，桶身上有几处纤维被磨断了，造成了结构的损伤，因此容器的破坏表现为在桶身处的破坏。

## 5.5 本章小结

本章开发了一种干涉型光纤传感器，联合光纤光栅，实现了可重复使用复合材料结构服役过程的健康监测，为飞行器结构重要组成部分的全寿命健康监测奠定了基础。

基于迈克尔逊干涉原理研制了一个干涉型光纤传感器，灵敏度高，制作简单，价格低廉，适合在国内广泛使用。传感器的拉伸量与解调仪的输出量基本相等，粘贴在试件上与载荷增量有线性关系，并且能够反映复合材料的损伤。传感器对温度变化也有良好的响应；传感器粘贴在复合材料压力容器上能够反映容器内的压力，并且同 SMARTEC 公司生产的传感器相比，相差很小。传感器的测量段直接采用了单模裸光纤，因而在未来的研究中，可将传感器埋入复合材料中进行固化、服役的全寿命健康监测。

对复合材料压力容器进行了低温监测。向容器中灌入液氮的过程中，各传感器表现了良好的性能。利用液氮在容器中气化使容器内的压力增高，监测了低温下复合材料容器的性能，容器的应变与内压有线性关系。对容器进行静水压力实验，光栅的监测结果同应变片结果、有限元结果进行了比较，三者相符，均与容器内压力有线性关系。干涉型传感器的监测值与模拟预报值进行了比较，两者有一致性，差别不大。在静水压力下对压力容器进行了爆破实验，由于外层纤维在实验前有损坏，容器没有从内内层开始破坏，全部表现为外层纤维的分层和断裂。光栅传感器和干涉型传感器能够监测容器发生变化的瞬间，提供预警功能。

本章开发了一个建立在力学分析和光学干涉原理基础上，应用范围广泛，适用不同研究对象，性能稳定，可靠性高的干涉型光纤传感器。根据光纤光栅和干涉型传感器各自的特点，联合在一起，形成局部、整体监测体系，可对各种复合材料结构固化成型过程—损伤演变过程—可靠性评估一体化全寿命过程进行健康监测。

## 结 论

本文基于光纤传感技术,针对可重复使用的复合材料压力容器的制造过程,服役过程,进行了全寿命健康监测研究:

1. 利用粘度信息实现了复合材料固化过程加压时机的准确控制,提高了材料制造过程的质量。研究了 HD03 环氧树脂的化学流变特性,认为其符合 B-阶段环氧树脂的等温粘度模型,通过等温粘度试验,经过数据拟合得到了化学流变方程。将光纤布拉格光栅埋入到 T300/ HD03 复合材料中,监测了固化过程的温度历程,还将监测到的温度信息带入到树脂的化学流变方程中,实时地计算出粘度值,并选择合适的粘度值施加压力。对于 HD03 树脂,合理地加压范围为 18-35 Pa.s。裸光栅在施加压力之前监测到的基本上是温度值。在粘度值为 34.76Pa.s 进行了施加压力制造层板的验证,层板的性能良好。比较了不同加压时机制作出的层板的厚度,残余应变,以及固化过程的应变历程。正常工艺下,复合材料层板的厚度符合要求,残余应变相对较小,在加压之后,层板的应变保持常量;提前加压时层板的厚度变薄,滞后加压层板的厚度变厚,残余应变也相对较大,加压之后,层板的应变还会增加,处于不平稳变化。

通过埋入光纤光栅不仅对复合材料的生产实现了监测,还将监测到的信息反馈到生产中,完成了复合材料制造的闭环控制。该方法能够有效地控制加压时机,将操作者的经验转化为可视化的粘度值,提高产品的合格率。粘度信息体现了复合材料固化过程中温度、时间的累积,光纤光栅的可埋入性实现了复合材料固化中真实温度的监测,保证了计算粘度的准确性,也可按此方法对复合材料的其它工艺参数进行控制。对复合材料成型工艺的控制,实现了复合材料结构全寿命健康监测的第一步。

2. 基于光纤光栅传感器监测了复合材料和铝板的共固化过程,受温度载荷下的变形过程,为两种不同材料共同使用提供了实验数据基础。埋入 FBG 传感器实时监测了缠绕单向板的固化过程,以及复合材料和铝板之间界面的固化应变。FBG 传感器的测量数据表明,复合材料内部与界面之间在固化过程中存在着差异,这是由于热膨胀系数不同而引起的;两种不同的材料在固化后期存在着分离的现象,释放了一部分应力。将复合材料与铝板粘接在一起,并且把光栅传感器布设在复合材料表面、铝板表面、两者粘接界面,进行了温度载荷实验。光纤光栅监测到了三个界面应变的变化历



程, 在  $70^{\circ}\text{C}$  后胶粘剂在温度载荷下性能发生变化, 对复合材料表面的光栅监测结果影响较大, 使监测值和模拟值有所不同。

利用光纤光栅的可埋入性, 监测了复合材料与金属材料之间的界面, 为两种材料的共同使用提供了界面间真实的数据, 保证了服役过程的安全性。界面监测方法还可用于具有内衬的复合材料压力容器, 金属飞机的复合材料补强处等, 完成整体结构的全寿命监测。

3. 通过有限元软件对复合材料压力容器的分析, 揭示了压力容器的破坏机理, 为健康监测传感器的布设提供了依据。基于 ANSYS 有限元软件, 按照平面缠绕方法建立了复合材料压力容器计算了封头处不同的缠绕角度和厚度, 通过 ANSYS 软件中的实常数对单元赋值, 模拟出了压力容器的真实情况。在压力容器的桶身段和封头粘贴了 25 组应变片, 验证了模型的正确性, 基本能够反映真实的应变变化。使用 SMARTape 条带传感器测量了容器桶身螺旋向的伸长量, 通过 ANSYS 路径功能获得了桶身螺旋向的变形, 与传感器的测量值基本相符。对压力容器模型逐步施加压力, 以 Hashin 失效准则和最大应力准则为判断依据, 对模型进行了渐进损伤分析, 在  $2.0\text{MPa}$  时树脂完全开裂, 最初的纤维断裂出现在  $8.1\text{MPa}$ , 桶身与封头连接处, 而后经向纤维逐渐断裂, 在  $8.9\text{MPa}$  下此位置纤维全部断裂。压力容器爆破压力的预报值为  $8.9\text{MPa}$ 。

作为结构健康监测传感器布设的基础, 通过有限元建模分析—实验验证—破坏分析, 不仅揭示了复合材料压力容器的破坏过程, 也确定了传感器的布设位置。对于飞行器上其它复合材料结构的健康监测, 也将按照此路线来确定传感器的位置, 对更加复杂的结构, 再用传感器优化布设准则来确定传感器的数量和位置。

4. 开发了一种干涉型光纤传感器, 联合光纤光栅, 实现了可重复使用复合材料结构服役过程的健康监测, 为飞行器结构重要组成部分的全寿命健康监测奠定了基础。基于迈克尔逊干涉原理研制了一个干涉型光纤传感器, 灵敏度高, 制作简单, 价格低廉, 适合在国内广泛使用。传感器的拉伸量与解调仪的输出量基本相等, 粘贴在试件上与载荷增量有线性关系, 并且能够反映复合材料的损伤。传感器对温度变化也有良好的响应; 传感器粘贴在复合材料压力容器上能够反映容器内的压力, 并且同 SMARTEC 公司生产的传感器相比, 相差很小。传感器的测量段直接采用了单模裸光纤, 可将传感器埋入复合材料中进行固化、服役的全寿命健康监测。

对复合材料压力容器进行了低温监测。向容器中灌入液氮的过程中, 各

传感器表现了良好的性能。利用液氮在容器中气化使容器内的压力增高，监测了低温下复合材料容器的性能，容器的应变与内压有线性关系。对容器进行静水压力实验，光栅的监测结果同应变片结果、有限元结果进行了比较，三者相符，均与容器内压力有线性关系。干涉型传感器的监测值与模拟预报值进行了比较，两者有一致性，差别不大。在静水压力下对压力容器进行了爆破实验，由于外层纤维在实验前有损坏，容器没有从内层开始破坏，全部表现为外层纤维的分层和断裂。光栅传感器和干涉型传感器能够监测容器发生变化的瞬间，提供预警功能。

开发了一个建立在力学分析和光学干涉原理基础上，应用范围广泛，适用不同研究对象，性能稳定，可靠性高的干涉型光纤传感器。根据光纤光栅和干涉型传感器各自的特点，联合在一起，形成局部、整体监测体系，可对各种复合材料结构固化成型过程—损伤演变过程—可靠性评估一体化全寿命过程进行健康监测。

本文研究工作的主要创新之处：

1. 针对复合材料热压制造工艺，提出了通过监测材料内部温度分布获取树脂粘度信息的方法，实现了加压时机的有效控制。
2. 利用光纤光栅传感器，建立了复合材料与金属粘接界面的变形监测方法，给出了粘接结构在不同温度载荷条件下的变形规律。
3. 开发了低成本干涉型分布式变形光纤传感器，针对复合材料低温压力容器建立了局部应变与整体变形相结合的结构健康监测系统，实现了加载过程与破坏过程的监测与分析。

在本文研究工作的基础上，作者认为以下内容有待进一步研究：

1. 其它树脂体系也可根据等温粘度实验拟和出化学流变方程，从而根据粘度来选择加压时机，将复合材料的制造数字化；
2. 为了将干涉型光纤传感器应用于其它领域，其封装问题需要解决，封装材料能束缚住处于拉伸状态的光纤，并且可适当弯曲；
3. 根据光纤光栅和干涉型光纤传感器各自的特点，埋入复合材料中，监测复合材料的固化过程，比较两者的相同点和差别，从点到线对固化后的残余应变进行分析；
4. 使用光纤光栅和干涉型光纤传感器复合材料压力容器的固化过程，分析其固化过程的应变变化和整体变形，由埋入式的传感器监测结构的破坏

更加能体现破坏过程。

5. 健康监测系统软件的开发，可实时显示结构应变、温度，关键点的图形变化等。

## 参考文献

- 1 R. J. Morgan, E. E. Shin, J. Lincoln, et al. Overview of Polymer Matrix Composites Performance and Materials Development for Aerospace Applications. SAMPE Journal. 2001, 37(2):102~107
- 2 赵渠森, 郭恩明. 先进复合材料手册. 机械工业出版社. 2003:1177~1398
- 3 Chensha Li, Maosheng Cao, Rongguo Wang. Fiber-optic Composite Cure Sensor: Monitoring the Curing Process of Composite Material Based on Intensity Modulation. Composites Science and Technology. 2003, 63:1749~1758
- 4 W. Baker, I. McKenzie, R. Jones. Development of Life Extension Strategies for Australian Military Aircraft, Using Structural Health Monitoring of Composite Repairs and Joints. Composite Structures. 2004, 66:133~143
- 5 I. Latka, W. Ecke, B. Höfer. Fiber Optic Sensors for the Monitoring of Cryogenic Spacecraft Tank Structures. SPIE. 5579:195~204
- 6 M. Z. Kabir. Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner. Composite Structures. 2000, 49:247~255
- 7 W. H. Prosser. Advanced Waveform-based Acoustic Emission Detection of Matrix Tracking in Composites. Material Bvauation. 1995, 53(9): 1052~1058
- 8 B. E. Anne. Applicability of X-radiography to the in-spection of Composites. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2000, 42(3): 152~157
- 9 S. Takeda, Y. Aoki, T. Ishikawa. Structural Health Monitoring of Composite Wing Structure During Durability Test. Composite Structures. 2007, 79:133~139
- 10 G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey, et al. Structural Control: Past, Present, and Future. ASCE, Journal of Engineering Mechanics. 1997, 123(9): 897~971
- 11 C. A. Rogers. Intelligent Materials Systems-The Dawn of a New Materials Age. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures. 1993, 4(1): 4~12
- 12 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评. 地震工程与工程振动. 2002, 22(3):82~90

- 13 J. Becker, W. Schroeder, K. Dittrich et al. Advanced Aircraft Structures Program-an Overview. SPIE. 1999, 3674:2~12
- 14 W. L. Richards, D. G. Lee, A. Piazza, et al. Characterization of Embedded Fiber Optic Sensors in Advanced Composite Materials for Structural Health Monitoring. SPIE. 5390:505~512
- 15 M. Studer, K. Peters, J. Botsis. Embedded Optical Fiber Bragg Grating Sensors for the Measurement of Crack Bridging Forces in Composites. SPIE. 2002, 4694:94~105
- 16 N. Takahashi, K. Yoshimura and S. Takahashi. Vibration Sensing with Fiber Bragg Grating. SPIE. 2001, 4513:1~6
- 17 Y. Yoon, S. Chung, M. Kim. Vibration Detection for a Composite Smart Structure Embedded with a Fiber Grating Sensor. SPIE. 2003, 5050:350~357
- 18 Y. C. Yang, K. S. Han. Damage Monitoring and Impact Detection Using Optical Fiber Vibration Sensors. Smart Mater. Struct. 2002, 11:337~345
- 19 M. Studer, K. Peters, J. Botsis. Embedded Optical Fiber Bragg Grating Sensors for the Measurement of Crack Bridging Forces in Composites. SPIE. 2002, 4694:94~105
- 20 滕海文, 霍达, 姜雪峰. 结构损伤位置识别的组合指标法. 北京工业大学学报. 2007, 33(5):493~497
- 21 Y. J. Yan, L.H. Yam. Online Detection of Crack Damage in Composite Plates Using Embedded Piezoelectric Actuators/Sensors and Wavelet Analysis. Composite Structures. 2002, 58(1): 29~38
- 22 余龙. 基于振动响应信号的复合材料壳体结构遗传算法损伤检测. 西北工业大学硕士学位论文. 2004: 48~49
- 23 L. Yu, T. H. T. Chan. Moving Force Identification Based on the Frequency-time Domain Method. Journal of Sound and Vibration. 2003, 261:329~349
- 24 E. Parloo, P. Verboven, P. Guillaume, et al. Force Identification by Means of in-operation Modal Models. Journal of Sound and Vibration. 2003, 262:161~173
- 25 F. D. Barlett, W. G. Flannelly. Model Verification of Force Determination for Measuring Vibration Loads. Journal of the American Helicopter Society. 1979, 19(4): 10~18
- 26 G. Desanghere, R. Snoey. Indirect Identification of Excitation Forces by

- Modal Coordinate Transformation. Proceedings of 3rd International Modal Analysis Conference. New York: Society for Experimental Mechanics, 1985:685~690
- 27 A. K. Green, M. Zaidman, E. Shafir, et al. Infrastructure Development for Incorporating Fibre-optic Sensors in Composite Materials. *Smart Mater. Struct.* 2000, 9:316~321
- 28 D. P. Garg, M. A. Zikry, G. L. Anderson. Current and Potential Future Research Activities in Adaptive Structures: an ARO Perspective. *Smart Mater. Struct.* 2001, 10:610~623
- 29 A. D. Kersey. A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology. *Optical Fiber Technology*. 1996, 11(2): 291~317
- 30 F. Elaldi. An Overview for Structural Health Monitoring of Composites in Aerospace Applications. *IEEE*. 2005: 309~314
- 31 王树彬, 韩杰才, 杜善义. 压电陶瓷/聚合物复合材料的制备工艺及其性能研究进展. *功能材料*. 1999, 30(2):113~121
- 32 X. Lin, F. G. Yuan. Diagnostic Lamb Waves in an Integrated Piezoelectric Sensor/Actuator Plate: Analytical and Experimental Studies. *Smart Mater. Struct.* 2001, (10):907~913
- 33 C. S. Wang, Fu-Kuo Chang. Diagnosis of Impact Damage in Composite Structures with Built-in Piezoelectrics Network. *SPIE*. 2000, 3990:13~19
- 34 M. Pozzi, G. Airoidi. Electrical Transport Properties of Shape Memory Alloys. *Materials Science and Engineering A:Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. 1998, 273(12):300~304
- 35 G. Airoidi, M. Pozzi. Electrical Transport Properties of Shape Memory Alloys under a Stress State. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME*. 1999, 12(1):108~111
- 36 E J Friebele, et al. Optical fiber Sensors for Spacecraft Applications. *Smart Mater. Struct.* 1999, (8):813~838
- 37 R. Hadzic, S. John, I. Herszberg. Structural Integrity Analysis of Embedded Optical Fibres in Composite Structures. *Composite Structures*. 1999,47: 759~765
- 38 J. M. A. Silva, T. C. Devezas, et al. Mechanical Characterization of Composites with Embedded Optical Fibers. *Journal of Composite Materials*.

- 2005, 39(14):1261~1281
- 39 E. A. Abbott, M. L. Scott. Optimal Design of Fibre Composite Structures with Embedded Sensor Systems. SPIE. 2002, 4935:41~50
- 40 J. E. T. Penny et al. The Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic testing. Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. Union College Press. Schenectady, NY. 1992:30~36
- 41 M. Paradopoulos, et al. Sensor Placement Methodologies for Dynamic Testing. AAIA. 1998, 36(2):256~263
- 42 D. C. Kammer. Sensor placement for On-orbit modal Identification and correlation of large space structures. Journal of guide, Control and Dynamics. 1991,14(9):251~259
- 43 B. A. Sjögren. Static Strength of CFRP Laminates with Embedded Fiber-optic Edge Connectors. Composites: Part A. 2001, (32):189~196
- 44 H. K. Kang, et al. Development of Fiber Optic Ingress/egress Methods for Smart Composite Structures. Smart Mater. Struct. 2000, (9):149~156
- 45 A. K. Green, E. Shafir. Termination and Connection Methods for Optical Fibres Embedded in Aerospace Composite Components. Smart Mater. Struct. 1999, (8):269~273
- 46 W. B. J. Spillman, J. R. Lord. Methods of Fiber Optic Ingress/egress for Smart Structures. Fiber Optic Smart Structures ed E.Udd, New York: John Wiley. 1995:121~153
- 47 N. T. Michad, K. Wauer, D. Betz, et al. Smart Sensing of Aviation Structures with Fiber-Optic Bragg Grating Sensors. SPIE. 2000, 3986: 134~143
- 48 W. Ecke, S. Grimm, I. Latka, et al. Optical Fiber Grating Sensor Network Basing on high-Reliable Fibers and Components for Space-craft Health Monitoring. SPIE. 2001, 4328: 160~167
- 49 P. M. Schindler, R. G. May, R. O. Claus. Location of Impacts on Composite Panels by Embedded Fiber Optic Sensors and Neural Network Processing. SPIE. 1995, 2444: 481~489
- 50 M. E. Regelbrugge, N. M. Wereley, Y. Matsuzaki. Overview of Smart Structures and Integrated Systems: 1997. SPIE. 1997, 3041: 2~9
- 51 张博明, 杜善义, 王殿富. 光纤模斑谱传感器复合材料固化监测研究. 实验力学. 1998, 13(4):560~564

- 52 熊克, 陶宝祺, 姚恩涛. 形状记忆合金扭力驱动器的力学模型和实验研究. 航空学报. 2001, 22(4):379~381
- 53 陈伟民, 朱永, 封君, 黄尚廉. 光纤法珀应变传感器系统的实验研究. 土木工程学报. 2002, 35(4):60~64
- 54 A. Mendez, T. F. Mcrse, F. Mendez. Application of Embedded Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Buildings and Structures. SPIE. 1989, 1170: 60~69
- 55 J. D. Prohaska, E. Snitze, B. Chen, et al. Maher. Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensor in Large Scale Concrete Structures. SPIE. 1993, 1798: 286~294
- 56 M. A. Davis, A. D. Kersey. Dynamic Strain Monitoring of an In-Use Interstate Bridge using Fiber Bragg Grating Sensors. SPIE. 1997, 3043:87~95
- 57 J. Seim, E. Udd, W. Schulz. Health Monitoring of an Oregon Historical Bridge with Fiber Grating Strain Sensors. SPIE. 1999, 3671: 123~134
- 58 邹建, 吴安平, 黄尚廉. 用于复合材料固化监控的光纤传感器. 传感技术学报. 1994, 9;53~55
- 59 M. A. Afromowitz, K.Y. Lam. The Optical Properties of Curing Epoxies and Applications to the Fiber Optic Epoxy Cure Sensor. Sensors and Actuators A-Physical. 1990, 23:1107~1110
- 60 杨春, 骆飞等. 用光纤进行树脂基复合材料的成型过程监测. 材料工程, 1999, (7);36~39
- 61 K. Y. Lam, M. A. Afromowitz. Fiber Optic Polymer Cure Sensor. Journal of Lightwave Technology. 1988, 6 (10): 1591~1594
- 62 I. Kassamakov, S. Kafedjiev. Fiber Optic Refractive Index Sensor. Proceeding of the 6th International School on Quantum Electronics: Lasers, Physics and Applications. 1990, 566~570
- 63 S.Vacher, J.Molimard, H.Gagnaire, et al. A Fresnel's Reflection Optical Fiber Sensor for Thermoset Polymer Cure Monitoring. Polymers & Polymer Composites. 2004, 12(4):269~276
- 64 V. Antonucci.M. Giordano, A. Cusano, et al. Real Time Monitoring of Cure and Gelification of a Thermoset Matrix. Composites Science and Technology. 2006, 66:3273~3280
- 65 张博明. 埋多功能光纤传感器智能材料与结构研究. 哈尔滨工业大学博



- 士学位论文. 1998:60~69
- 66 武湛君. 基于光纤传感技术的复合材料固化监测研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2001:24~31
- 67 王科, 张佐光, 扎姆阿茹娜, 等. 光纤微弯压力测试系统实时监测复合材料热压成型过程. 复合材料学报. 2005, 22(2):67~70
- 68 V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong, et al. Cure Monitoring of Smart Composites Using Fiber Bragg Grating Based Embedded Sensors. *Sensors and Actuators*. 2000, 79(2): 153~161
- 69 A. L. Kalamkarov, S. B. Fitzgerald, D. O. MacDonald. On the Processing and Evaluation of Pultruded Smart Composites. *Composites: Part B*. 1999, 30(7): 753~763
- 70 C. M. Lawrence, D. V. Nelson, J. R. Spingarn, et al. Measurement of Process-Induced Strains in Composite Materials Using Embedded Fiber Optics Sensors. *SPIE*. 1996, 2718: 60~68
- 71 J. S. Leng, A. Asundi. Real-time Cure Monitoring of Smart Composite Materials Using Extrinsic Fabry-Perot Interferometer and Fiber Bragg Grating Sensors. *Smart Mater Struct*. 2002, 11(2): 249~255
- 72 万里冰, 武湛君, 张博明. 光纤布拉格光栅监测复合材料固化. 复合材料学报. 2004, 21(6): 1~5
- 73 武湛君, 张博明, 万里冰. 单根光纤光栅监测复合材料固化工艺过程多目标参量技术的研究. 复合材料学报. 2004, 21(6): 82~86
- 74 杜善义, 冷劲松, 王殿富等. 智能材料系统和结构. 科学出版社. 2001:17~38
- 75 L. M. Craig, N. V. Drew, B. E. Thomas, et al. Embedded Fiber Optic Sensor Method for Determining Residual Stresses in Fiber-reinforced Composite Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1999, 9(10):788~799
- 76 H. K. Kang, Kang, D. H. Bang, H. Joon. Cure Monitoring of Composite Laminates Using Fiber Optic Sensors. *Smart Materials and Structures*. 2002, 11(2):279~287
- 77 H. K. Kang, D. H. Kang, C. S. Hong, et al. Monitoring of Fabrication Strain and Temperature during Composite Cure Using Fiber Optic Sensor. *SPIE*. 2001, 4336:211~218

- 78 H. K. Kang, D. H. Kang, C. S. Hong, et al. Simultaneous Monitoring of Strain and Temperature during and after Cure of Unsymmetric Composite Laminate Using Fibre-optic Sensors. *Smart Materials and Structures*. 2003, 12(1):29~35
- 79 H. F. Taylor, C. E. Lee. Sensing Applications of Fiber Fabry Perot Interferometers Embedded in Composites and in Metals. *ASME*. 1993, 181:47~52
- 80 V. E. Zetterlind, S. E. Watkins, M. W. Spoltman. Feasibility Study of Embedded Fiber-optic Strain Sensing for Composite Propeller Blades. *SPIE*. 2001, 4332:143~152
- 81 福田武人. 光纤传感器在监测 RTM 固化过程及复合材料健康状况中的应用. *纤维复合材料*. 2002, 56(3):56~61
- 82 Y. Morino, T. Shimoda, T. Morimoto. Applicability of CFRP Materials to the Cryogenic Propellant Tank for Reusable Launch Vehicle (RLV). *Advanced Composite Materials: The Official Journal of the Japan Society of Composite Materials*. 2001, 10(4): 339~347
- 83 P. Bodan, C. Bouvier. X-33/RLV Reusable Cryogenic Tank VHM Using Fiber Optic Distributed Sensing Technology. *AIAA*. 1998, 3: 1865~1870
- 84 J. S. Leng, A. Asundi. Structural Health Monitoring of Smart Composite Materials by Using EFPI and FBG Sensors. *Sensors and Actuators A*. 2003, 103(3): 330~340
- 85 R. H. Knapp, I. N. Robertson. Fiber Optic Sensor System for Filament-wound Pressure Vessels. *Proceedings of the Tenth (2000) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle, USA. 2000: 77~82
- 86 R. H. Knapp, T. A. Shimabukuro, I. N. Robertson. Fiber Optic Sensor System (FOSS) for Filament-wound Gas Cylinders. *Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Stavanger, Norway, 2001: 17~22
- 87 M. Lin, X. Qing, A. Kumar, et al. SMART Layer and SMART Suitcase for Structural Health Monitoring Applications. 2001, 4332: 98~106
- 88 M. Lin., A. Kumar, et al. Advances in Utilization of Structurally Integrated Sensor Networks for Health Monitoring in Commercial Applications. *SPIE*. 2002, 4701: 167~176

- 
- 89 R. Foedingei, D. Rea, et al. Structural Health Monitoring of Filament Wound Composite Pressure Vessels with Embedded Optical Fiber Sensors. 43rd International SAMPE Symposium. 1998: 444~457
  - 90 R. C. Foedinger, D. L. Rea, J. S. Sirkis, et al. Embedded Fiber Optic Sensor Arrays for Structural Health Monitoring of Filament Wound Composite Pressure Vessels. SPIE. 1999, 3670: 289~301
  - 91 L. Emery, E. J. Zisk. Health Monitoring of Reusable Composite Cryogenic Tanks. American Institute of Aeronautics and Astronautics(AIAA). 1995: 2237~2242
  - 92 张晓晶, 武湛君, 张博明等. 光纤布拉格光栅温度灵敏性的实验研究. 光学技术. 2005, 31(4): 497~499
  - 93 Takeda, T. Mizutani, et al. Application of Fiber Bragg Grating Sensors to Real-time Strain Measurement of Cryogenic Tanks. SPIE. 2003, 5056: 304~311
  - 94 H. K. Kang, J. S. Park, D. H. Kang, et al. Strain Monitoring of a Filament Wound Composite Tank using Fiber Bragg Grating Sensors. Smart Mater. Struct. 2002, 11(6): 848~853
  - 95 J. S. Park, C. U. Kim, H. K. Kang, et al. Structural Analysis and Strain Monitoring of the Filament Wound Motor Case. Journal of Composite Materials. 2002, 36(20): 2373~2388
  - 96 J. Grant, R. Kaul, S. Taylor, et al. Distributed Sensing of Carbon-epoxy Composites and Filament Wound Pressure Vessels Using Fiber-Bragg Gratings. SPIE. 2002, 4935: 32~40
  - 97 J. Grant, R. Kaul, S. Taylor, et al. Distributed Sensing of Carbon-epoxy Composites and Composite Wound Pressure Vessels Using Fiber-Bragg Gratings. SPIE. 2003, 5050: 187~196
  - 98 J. Grant. Distributed Sensing of Composite Over-wrapped Pressure Vessel Using Fiber Bragg Gratings at Ambient and Cryogenic Temperatures. SPIE. 2005, 5758: 201~208
  - 99 W. D. Waele, J. Degrieck, R. Baets, et al. Load and Deformation Monitoring of Composite Pressure Vessels by Means of Optical Fibre Sensors. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2001, 43(8): 518~525
  - 100 J. Degrieck, W. Waele, P. Verleysen. Monitoring of Fibre Reinforced

- Composites with Embedded Optical Fibre Bragg Sensors, with Application to Filament Wound Pressure Vessels. *NDT & EInternational*. 2001, 34(4): 289~296
- 101 W. D. Waele, J. Degrieck, W. Moerman, et al. Feasibility of Integrated Optical Fibre Sensors for Condition Monitoring of Composite Structures Part I Comparison of Bragg-sensors and Strain Gauges. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2003, 45(4): 266~271
- 102 W. D. Waele, J. Degrieck, P. D. Baets, et al. Feasibility of Integrated Optical Fibre Sensors for Condition Monitoring of Composite Structures Part II Combination of Bragg-sensors and Acoustic Emission Detection. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2003, 45(8): 542~546,553
- 103 M. Lin, A. Kumar, X. L. Qing, et al. Monitoring the Integrity of Filament Wound Structure Using Built-Insensor Networks. *Proceedings of SPIE. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. SPIE. 2003, 5054: 222~229
- 104 S. Casciati, M. Domaneschi, D. Inaudi. Damage Assessment from SOFO Dynamic Measurements. *SPIE*. 2005, 5855: 1048~1051
- 105 B. Glisic, D. Inaudi. Health Monitoring of a Full Composite CNG Tanks Using Long-gage Fiber Optic Sensors. *SPIE*. 2004, 5384: 44~53
- 106 M. Kunzlera, E. Udd, J. Mont, et al. Use of Multidimensional Fiber Grating Strain Sensors for Damage Detection in Composite Pressure Vessels. *SPIE*. 2005, 5758: 83~92
- 107 M. Kunzlera, E. Udd, S. Kreger. Damage Evaluation and Analysis of Composite Pressure Vessels Using Fiber Bragg Gratings to Determine Structural Health. *SPIE*. 2005, 5758: 168~176
- 108 D. H. Kanga, C. U. Kimb, C. G. Kimc. The Embedment of Fiber Bragg Grating Sensors into Filament Wound Pressure Tanks Considering Multiplexing. *NDT&E International*. 2006, 39: 109~116
- 109 I. Latkala, W. ECKEA, B. Höfer, et al. Fiber Optic Sensors for the Monitoring of Cryogenic Spacecraft Tank Structures. *SPIE*. 2004, 5579: 195~204
- 110 陈吉安, 张晓晶, 武湛君, 等. 探测氢气泄漏的布拉格光栅型传感器. *光学技术*. 2005, 31(5): 688~690

- 111 龚颖, 张佐光, 顾轶卓, 等. 热压工艺参数对单向复合材料层板密实状态的影响. 复合材料学报. 2006, 23(1):12~16
- 112 A. K. Gopal, S. Adali, E. Viktor, et al. Optimal Temperature Profiles for Minimum Residual Stress in the Cure Process of Polymer Composites. Composite Structures. 2000, 48:99~106
- 113 沃西源, 涂彬, 夏英伟. 碳/环氧模压成型工艺特性及其影响性能分析. 航天制造技术. 2006, 4:7~9
- 114 路明坤, 张惠, 王兆慧. 树脂基复合材料模压工艺加压时机优化研究. 纤维复合材料. 2005, 34(1):34~36
- 115 戴福洪. 树脂传递模塑工艺有限元模拟与树脂流动过程监测. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2004:79~85
- 116 吴菊, 朱迅, 李海燕, 等. 铝合金内衬复合材料高压容器界面粘结的研究. 纤维复合材料. 2005, 2:6~7, 18
- 117 陈汝训. 具有衬里的纤维缠绕压力容器分析. 固体火箭技术. 1999, 22(4):54~56
- 118 张晓晶. 复合材料壳体结构健康监测研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2005:67~73
- 119 X. Wang, Z. Zhong. Three-dimensional Solution of Smart Laminated Anisotropic Circular Cylindrical Shells with Imperfect Bonding. International Journal of Solids and Structures. 2003, 40:5901~5921
- 120 郑传祥. 复合材料压力容器. 化学工业出版社. 2006:176~184
- 121 J. S. Mayes, A. C. Hansen. Composite Laminate Failure Analysis Using Multicontinuum Theory. Composites Science and Technology. 2004, 64: 379~394
- 122 L. Iannucci. Progressive Failure Modelling of Woven Carbon Composite under Impact. International Journal of Impact Engineering. 2006, 32:1013~1043
- 123 Z. Hashin. Failure Criteria for Unidirectional Fibre Composites. J Appl Mech. 1980, 47:329~334.
- 124 K. I. Tserpesa, G. Labeasb, P. Papanikos, et al. Strength Prediction of Bolted Joints in Graphite/epoxy Composite Laminates. Composites: Part B. 2002, 33:521~529
- 125 N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbinson, et al. Aircraft Composites

- Assessment by Means of Transient Thermal NDT. Progress in Aerospace Sciences. 2004, 40:143~162
- 126 WANG Zhaoying, WU Xing, TIAN Hebin. Absolute Measurement Fiber-optic Sensors in Large Structural Monitoring. Semiconductor Photonics and Technology. 2003, 9(2): 102~106
- 127 裴雅鹏, 杨军, 苑立波. 光纤干涉型传感器原理及其相位解调技术. 光学与光电技术. 2005, 3(3): 17~21
- 128 A. Dardridge, A. B. Tveten, R. O. Niles, et al. Laser roil in fiber-optic interferometer system. Appl Phvs Lett. 1980, 37(6): 526~528
- 129 D. Inaudi, D. Posenato. Dynamic Demodulation of Long-gauge Interferometric Strain Sensors. SPIE. 2004, 5384: 38~43
- 130 D. Inaudi. Long-term Reliability Testing of Packaged Strain Sensors. SPIE. 5758:405~408
- 131 D. Inaudi, S. Vurpilot, N. Casanova, et al. Development and Field Test of Deformation Sensors for Concrete Embedding. SPIE. 2721:138~148
- 132 D. Inaudi, N. Casanova. Geo-structural Monitoring with Long-gage Interferometric Sensors. SPIE. 2000, 3995: 164~174
- 133 S. Vurpillot, N. Casanova, D. Inaudi, et al. Bridge Spatial Displacement with 100 Fiber Optic Sensors Deformations: Sensors Network and Preliminary Results. SPIE. 1997, 3043: 51~57
- 134 B. Glisic, D. Inaudi. Health Monitoring of a Full Composite CNG Tanks Using Long-gage Fiber Optic Sensors. SPIE. 2004, 5384: 44~53

## 攻读学位期间发表的学术论文

1. 赵海涛, 张博明, 武湛君, 王殿富, 戴福洪. 光纤光栅监测缠绕复合材料与铝板界面的固化应变. 复合材料学报. 2006, 23(6): 64-68
2. 赵海涛, 张博明, 武湛君, 王殿富, 戴福洪. 纤维缠绕复合材料压力容器健康监测研究进展. 压力容器, 2007, 24(3): 48-53
3. ZHAO Haitao, ZHANG Boming, WU Zhanjun, WANG Dianfu, DAI Fuhong. Monitoring and controlling manufacturing for composite using fiber Bragg grating. SPIE. 2007, 6423: 64233X
4. ZHAO Haitao, ZHANG Boming, WU Zhanjun, WANG Dianfu, DAI Fuhong. Monitoring of Composite Pressure Vessel Using Two Kinds of Fiber Optic Sensors. Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, CA. 2007, 9: 222-229
5. 赵海涛, 张博明, 武湛君, 王殿富, 戴福洪. 光纤光栅智能复合材料基础问题研究. 传感器与微系统. 2007, 12: 27-30
6. 赵海涛, 张博明, 武湛君, 王殿富, 戴福洪. 一种用于大尺寸复合材料结构健康监测的干涉型光纤传感器. 光电子·激光. (已录用)
7. 赵海涛, 张博明, 戴福洪. 利用光纤光栅确定 T300-HD03 复合材料的加压时机. 2006 航空宇航科学与技术全国博士生学术论坛论文集(中): 130-136
8. 赵海涛, 张博明. 光纤智能复合材料相容性研究. NCCM13: 96-101
9. 莫淑华, 赵海涛, 张博明. 电阻法预报 CFRP 层板疲劳损伤演变过程. 材料科学与工艺. 2004, 12(2):186-189

## 攻读博士学位期间申请的专利

1. 高速路的动态重量和速度监测装置. 专利号: 200510010507.6
2. 用于复合材料健康监测的干涉型光纤传感器. 申请号:200710072086.9
3. 埋入公路中的光纤光栅传感器及其封装方法. 申请号:200510010505.7

## 哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的博士学位论文《基于光纤传感技术的复合材料结构全寿命健康监测研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字：

日期： 年 月 日

## 哈尔滨工业大学博士学位论文使用授权书

《基于光纤传感技术的复合材料结构全寿命健康监测研究》系本人在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间在导师指导下完成的博士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日



## 致 谢

本文工作能够顺利完成，不仅有我自己的辛劳，还有众多老师的悉心指导，以及他人的帮助。

首先感谢我的导师王殿富教授。王老师开阔的视野、渊博的知识、高尚的人品、严谨的态度都使我受益终生。论文的每一步进展都离不开王老师的悉心指导，在生活与为人方面王老师亦给予学生众多亲切关怀和谆谆教诲，令我终生难忘。

感谢张博明教授多年来的在各方面对我的帮助，在论文工作中富有启发性的建议。张老师对待工作严谨的治学态度、勤恳的工作作风以及严于律己、宽以待人的为人，这些都是我在今后的人生道路上所要学习的。

感谢武湛君副教授的关心和指导，与他的讨论给我很多启发，武老师在生活方面也给予了我很多关心。

感谢戴福洪副教授对本文的指导。

感谢王荣国教授在实验方面给予的方便和帮助。

感谢王洋、于东、解维华、武玉芬、王晓宏、孙新杨、岳广全、杨仲、赵淑媛、叶金蕊、刘双、赵琳、潘利剑、张宁，以及智能材料与结构研究室的所有成员，这篇论文的顺利完成是与他们的热心帮助和密切合作分不开的。

感谢白光辉博士帮助我完成了一些实验。

感谢丁新福师傅协助我完成实验。

感谢我的父母，感谢他们对我的支持和鼓励，感谢他们对我多年的养育之恩，我的博士论文里也有他们的功劳。

感谢我的妻子汤珺女士，她的关爱、理解和支持陪伴我渡过论文工作中最艰难的时期。

感谢论文的评审专家对本文提出的宝贵意见。

感谢所有曾经给予我关心、支持和帮助的人们。

## 个人简历

赵海涛，男，汉族，1977 年 2 月出生，黑龙江哈尔滨人。

### 教育经历：

- 1996.9-2000.7： 兰州交通大学土木工程系，获铁道工程专业工学学士学位
- 2001.9-2003.7： 哈尔滨工业大学航天科学与力学系，获工程力学专业工学硕士学位
- 2003.9-至今： 哈尔滨工业大学航天学院航天工程与力学系，工程力学专业博士研究生

**研究方向：** 复合材料结构健康监测、光纤传感技术、智能复合材料与结构设计

### 主要科研工作及成果：

- 2004—2005： 参加航天科工集团 306 所科研项目“光纤固化监测技术在复合材料模压成型部件上的应用研究”。使用光纤光栅监测复合材料制品模压成型的全过程。
- 2004—2005： 参加“先进树脂基复合材料制造过程在线监测技术”。使用光纤光栅监控复合材料的固化成型过程，利用粘度确定复合材料的加压时机。
- 2005—2006： 参加黑龙江省教育厅振兴老工业基地重大科技项目“基于光纤光栅的桥梁健康监测和车辆称重、测速系统的研究”。使用光纤光栅、复合材料制作车辆称重、测速系统。
- 2005—2006： 参加黑龙江省交通厅重点科研项目“二灰碎石、水泥稳定砂砾半刚性基层材料冰冻耐久性的研究”。使用光纤光栅监测路基的冰冻耐久性。
- 2006—2007： 参加国家 863 项目，编号：2006AA702404。