

# 基于碳纳米管压阻效应的复合材料 结构健康监测技术

朱永凯<sup>1</sup>, 陈盛票<sup>1</sup>, 田贵云<sup>1,2</sup>, 潘仁前<sup>1</sup>, 王海涛<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院,南京 210016;2. 纽卡斯尔大学 NEI 7RU,英国)

**摘要:**复合材料结构健康监测技术是一个重要的发展方向,不断出现新的监测方法,而碳纳米管(CNT)因具有优越的传感特性得到了广泛的关注。介绍了碳纳米管及其压阻效应的形成机理,并总结了碳纳米管膜所具有的压阻特性及其相关的应用研究进展,设计了利用碳纳米管压阻效应制成的聚合物薄膜传感器在复合材料结构健康监测(SHM)中进行应用的研究方案。其中,传感器采用表面贴覆的方法和阵列式监测原理,结合特征提取、模式识别等信号处理方法,实现对复合材料的早期损伤及其类型进行预测、识别和定位等功能。

**关键词:**碳纳米管;压阻效应;复合材料;结构健康监测

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2010)09-0664-06

## Structure Health Monitoring Technology for Composites Based on Piezoresistive Effect of Carbon Nanotubes

ZHU Yong-Kai<sup>1</sup>, CHEN Sheng-Piao<sup>1</sup>, TIAN Gui-Yun<sup>1,2</sup>, PAN Ren-Qian<sup>1</sup>, WANG Hai-Tao<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Newcastle University, Newcastle University upon Tyne, UK)

**Abstract:** Structure health monitoring technology for composites is an important development direction and new monitoring methods are emerged. Carbon nanotubes (CNTs) have been widely studied because of their excellent sensor's properties. This paper introduces the mechanism of piezoresistive effect of CNTs, and summarizes the piezoresistive properties of CNTs film and researches of the related applications. The paper then designs the experimental solution of the structural health monitoring (SHM) of composites using CNT polymer film sensors based on the piezoresistive effect. Sensors based on matrix—monitoring principle are pasted on surface. Signal processing methods with feature extraction and pattern recognition are used to predict, identify and locate early failure and the failure style of composites.

**Keywords:** Carbon nanotube; Piezoresistive effect; Composites; Structure health monitoring

结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)是指利用现场的无损传感技术,通过分析包括结构响应在内的结构系统特性,达到检测结构损伤或退化的目的<sup>[1]</sup>。结构健康监测的方法众多,目前研究和应用较多的主要有光纤、应变传感、超声、涡流、红外热成像、射线、声发射等,其中,光纤和应变传感主要用于在线实时监测,而其它方法更多地

**作者简介:**朱永凯(1975—),博士,副教授,主要研究方向为结构健康监测、智能传感技术。

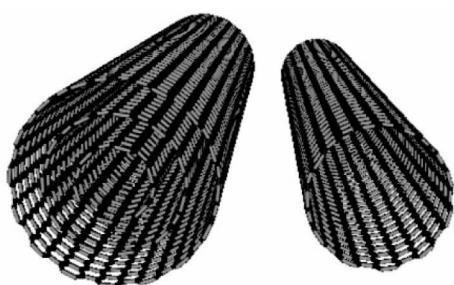
用于线下检测中。在线实时监测技术中,对损坏的传感器进行更换的费用较为昂贵,而且很多传感器都直接集成到材料内部,无法更换,要求传感器的有效寿命要高于结构本身的使用寿命,且集成后传感器对材料性能的影响应越小越好。光纤因其本身具有易脆性这一缺点,需经过保护性包覆后进行埋覆,对材料本身的性能会造成较大的影响。而应变传感技术中的传感材料与被测结构复合后,对原有结构性能的影响则很微小。目前所常用的应变传感方式包括压阻式、压电式、电容式、电感式等,而压阻式应

变传感方式因具有较高的精度和较好的线性特性得到了广泛的应用。其中,压阻式应变传感方式利用的是固体的压阻效应<sup>[2]</sup>,是指固体受到作用力后电阻率(或电阻)发生变化的现象,为机械能和电能之间提供了一种简单直接的能量与信号转换机制<sup>[3]</sup>。目前,压阻式应变传感器所采用的材料多为单晶硅材料,但相关研究机构通过对碳纳米管性质的研究,发现它除了具有优越的压阻特性外,在综合性能方面也具有优越性。比如碳纳米管具有高弹性、低质量密度、大长径比(通常>1000)的特点<sup>[4]</sup>,其弹性模量超过1TPa,与金刚石的弹性模量相当,约为钢的5倍,是已知材料中最高的,它的弹性应变量最高可达20%,为钢的60倍,而其密度只有钢的1/6<sup>[5]</sup>。此外,碳纳米管的热稳定性和导电性能也远高于铜。碳纳米管的这些优越性能使其作为传感材料时比其它材料具有更好的质量和更长的使用寿命。

## 1 碳纳米管的压阻性质

### 1.1 概述

1991年,日本电镜学家 Iijima<sup>[6]</sup>通过高分辨率电子显微镜(HRTEM)观察电弧蒸发石墨产物时发现了多壁碳纳米管(MWNTs),其外形如图1(a)所示。大约两年后,Iijima<sup>[7]</sup>又发现了单壁碳纳米管(SWNTs),其外形如图1(b)所示。同时,碳纳米管按手性又可以分为非手性型管(对称)和手性型管(不对称)。其中非手性型管又可分为扶手椅型管和锯齿型管,其结构如图2所示。研究表明,碳纳米管既有金属性又有非金属性。其中,碳纳米管的金属性和非金属性依赖于它的手性,仅依靠手性控制尚无法选择性地获得金属性或非金属性的碳纳米管,但目前可以通过一些方法将金属性或半导体性的碳纳米管分离开来,从而实现碳纳米管的电性控制,并且碳纳米管的层数和直径目前都可以控制,为碳纳



(a) 多壁碳纳米管      (b) 单壁碳纳米管

图1 碳纳米管结构示意图<sup>[8]</sup>

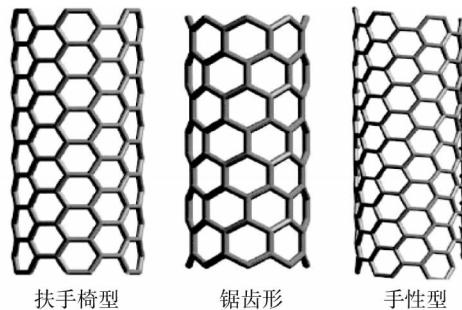


图2 按手性分类的碳纳米管结构示意图<sup>[7]</sup>

米管的传感应用提供了保障。

碳纳米管压阻式应变传感器的关键因素之一是其阻值特性,碳纳米管电阻主要来源于两个方面<sup>[9]</sup>:一方面,碳纳米管自身存在的电阻,碳纳米管内部电阻阻值的变化跟应变和碳纳米管的手性角有关,而且手性角的变化对碳纳米管内阻的影响是比较大的,尤其是当手性角接近0°时,其影响更为显著;另一方面,碳纳米管与碳纳米管之间存在的电阻,碳纳米管管间电阻又分为接触电阻和隧道电阻,其中隧道电阻对阻值影响较大,而纯碳纳米管所制成的薄膜,只存在接触电阻,隧道电阻只在碳纳米管聚合物中存在,可见,碳纳米管聚合物薄膜里各种电阻的产生机制均存在,而隧道电阻所表现的特性突出。

### 1.2 压阻式碳纳米管的传感特性

目前,研究所发现的碳纳米管压阻方面的特性主要可概括以下几个方面。

#### 1.2.1 线性度

Dang<sup>[10]</sup>等人在对多壁碳纳米管-甲乙烯硅橡胶(MWNT-VMQ)聚合物进行的压阻研究试验中,发现样品的压力-电阻率变化曲线呈现出优越的线性变化特性。而且,Cao<sup>[11]</sup>、Park<sup>[12]</sup>、Pham<sup>[9,13]</sup>、Kang<sup>[14-15]</sup>、Song<sup>[16]</sup>、张毅<sup>[17]</sup>、Gau<sup>[18]</sup>、韩向宇<sup>[19-20]</sup>等人在所进行的多壁碳纳米管膜或其电导聚合物薄膜的压阻效应研究试验中均证实了其样品具有很好的线性特性。多壁碳纳米管聚合物的压阻效应中所具有的良好的线性特性使其在传感检测中对被测结构的形变能有更加直观的反映,且无需进行线性校正等工作。

#### 1.2.2 可逆性

Pham<sup>[9,13]</sup>等人在给多壁碳纳米管电导聚合物(MWNT-PMMA)样品进行周期性的三角波力加载时,发现样品的时间-电阻率变化曲线也呈良好的周期性三角波形状。在其它研究机构或单位<sup>[10,17-18,21-22]</sup>所进行的关于碳纳米管压阻性质的

研究中,这一性质也均得到了很好的验证,而材料性能的可逆性是传感材料应具备的基本条件。因此,多壁碳纳米管及其聚合物所具有的良好的压阻可逆性也是其作为压阻传感应用的一个必要条件。

### 1.2.3 灵敏度

Kang<sup>[15]</sup>等人在对碳纳米管基于聚合物基体的压阻效应研究中发现应变传感器样品具有低带宽和高灵敏特性。Gau<sup>[18]</sup>等人在研究试验中也发现了碳纳米管聚合物比多晶硅传感器具有更高的灵敏度和更快的响应时间,相比于其它压阻传感材料更具有优越性。不过,碳纳米管聚合物压阻效应的灵敏度受碳纳米管的管径大小(长径比)<sup>[9-10,19]</sup>、制备方法<sup>[11,20]</sup>及其在聚合物中的质量分数<sup>[9,13,18]</sup>等因素的影响。因此,要制备符合特定要求的聚合物材料,就需要从以上几个因素着手考虑。课题研究中,拟选用经化学处理的,管径较小(3~10 nm)的多壁碳纳米管材料,并对不同质量分数的聚合物分别进行性能研究试验,从中选取性能较为优越的材料。

### 1.2.4 温度特性

张毅<sup>[17]</sup>在对几组分别经过不同方法处理的碳纳米管膜进行的温度-电阻变化研究试验中,发现经普通超声分散处理的样品,其电阻率随温度缓慢上升,而其它经化学切割或纤维混合压实处理的样品,电阻率则随温度的升高呈大幅线性下降趋势。因此,可根据其电阻率受温度影响所产生的线性变化特性对检测结果进行温度补偿,具有方法简单、补偿精度高等优点,这一特性使碳纳米管更易作为传感应用。

而在 Cao<sup>[11]</sup>等人所进行的温度对多壁碳纳米管膜压阻性质的影响的研究试验中,发现在不同环境温度下,样品的应变-电阻率变化曲线的线性特性并未发生大的变化。不过,随着温度的升高,样品的电阻率随应变变化会有所加快,即灵敏度有所提高。Gau<sup>[22]</sup>等人发现由聚酰亚胺-多壁碳纳米管(PI-MWNT)聚合物为传感材料加工而成的微压力传感器比多晶硅具有更好的热稳定性。这也说明了多壁碳纳米管在温度特性方面比其它传感材料更加优越。实际传感方案中,将利用碳纳米管的线性温度特性对不同环境温度下的测量结果进行线性温度补偿,以获得准确的应变测量结果。

总之,多壁碳纳米管具有的线性度、可逆性、灵敏度以及温度等方面特性,适于作为传感应用,因此,利用它的压阻效应所进行的应用研究是可行的。

### 1.3 压阻式碳纳米管的应用

对碳纳米管压阻效应的研究在十年前就已开展,但当时还只是处于初期的探索性研究阶段,很多特性并没有研究透彻,所以其应用性研究也未展开。2004年,Jain<sup>[23]</sup>发表的一篇讨论碳纳米管聚合物的文章提到了将碳纳米管的压阻效应用于结构健康监测等相关领域的可能性,可视为对碳纳米管压阻性质进行的一个较早期的应用性研究。之后,Kang<sup>[24]</sup>在博士论文中,也论述了利用碳纳米管的压阻效应制成应变传感器,用于结构健康监测系统中的可能性,并致力于这方面的研究工作<sup>[15,25-26]</sup>。

在压力检测方面,台湾国立成功大学航空航天研究所微纳科技中心的 Gau<sup>[18]</sup>等人用聚酰亚胺-多壁碳纳米管(PI-MWNT)聚合物作为传感材料,加工制作出了微型压力检测系统。在对系统的线性度、可重复性和高低频反应灵敏性等各项传感特性的测试研究中,均得到了满意的性能特性曲线,证实了系统在结构健康监测的微压力检测领域中进行应用的可行性。

在转速检测方面,重庆大学的张毅<sup>[17]</sup>在对多壁碳纳米管膜在高速转动下压阻效应的应用研究中,发现随着转速的线性增加或减少,系统的电阻值也呈现出线性的变化规律,说明其可在结构健康监测的转速检测领域中进行应用。

在疲劳损伤监测方面,加拿大肯考迪亚大学复合材料中心的 Nofar<sup>[27]</sup>等人通过测量涂覆在复合材料表面的多壁碳纳米管-玻璃纤维-环氧树脂聚合物的电阻变化,来预测复合材料试验样品的失效区域。在该研究试验中,制作了如图3所示3种类型的双区域疲劳损伤监测样品。在进行的周期疲劳测试试验时发现,对残余电阻变化率进行观察,能够准确地预测出损伤位置。该研究试验说明了碳纳米管膜压阻传感器在复合材料损伤监测中进行应用的可行性。同时,在其分段式检测方法中,传感材料只布置

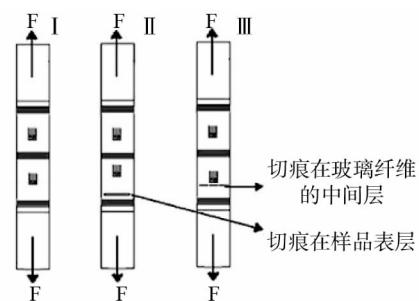


图3 三种类型的双区域疲劳试验损伤监测样品

于检测区域中心,说明碳纳米管膜压阻传感器可检测其所覆盖材料周围一定范围内的应力变化情况。虽然国际上已有一些高校或研究机构开展了碳纳米管压阻性质在疲劳损伤监测方面的应用研究工作,但是,其目前均还停留在实验室研究阶段,未有相关的工程应用。

## 2 碳纳米管压阻传感器在复合材料结构健康监测中的应用方法与试验

碳纳米管的压阻效应用于复合材料进行结构健康监测是切实可行的,但针对不同的复合材料测量,还需设计详细的研究方法和试验方案,包括原理方法、传感器的布置和信号处理等环节。

### 2.1 在复合材料结构健康监测中的应用方法

将传感器应用于材料的结构健康监测中主要有表面贴覆和嵌入式两种方式,其中嵌入式中又包括埋入式、智能夹层和编织集成等方法。各种方法的适用场合因材料的加工工艺及其组成不同而有较大差异。

复合材料结构也有其特殊的生产工艺,其中层合复合材料主要采用多层复合材料铺层经预浸后,加压加温固化而获得,而编织复合材料则由机械或手工将纤维编织束编织,再经固化而成。这些特殊的制造工艺允许功能器件在结构件的生产制造过程中埋入结构件。在本课题对复合材料进行结构健康监测的应用研究中,将主要针对较有应用前景的碳纤维复合材料(CFRP)。这主要是因为碳纤维复合材料具有脆性,在疲劳后易发生脆裂,而且一旦出现裂纹就会很快扩展,因此对其进行结构健康监测研究更有现实意义。传感器的应用基于阵列式监测原理,采用表面贴覆的方法。

本研究方案所采用的阵列式监测原理<sup>[28]</sup>,就是将各组性能基本相同的传感器节点组成矩阵形式,每组传感器节点内含有两个并行排列的子传感器,由于它们相互紧连着(中间用绝缘胶粘接),因此在进行检测应用时,所感测到的被测结构的应变信号基本相同。两个子传感器中,一个用于列分布传感,另一个用于行分布传感。将按矩阵形式排列的各传感器组内的行列子传感器分别用导线进行连接后,就可通过行、列信号进行综合分析,实现损伤的检测和定位的目的。

而且压阻传感器不仅能对其直接覆盖的区域进行监测,还可对其周围一定范围内的形变作出响应,

因此,对传感器的分布间距进行合理设置后,就可使系统对覆盖范围内的结构应变都能有很好的响应和定位。

实际方案中,采用 16 组碳纳米管聚合物薄膜压阻传感器在复合材料表面组成  $4 \times 4$  矩阵形式(图 4)。对于大面型的检测对象,如风机叶片等,需要先对检测对象进行力学分析,寻找易受损部位进行贴覆,避免传感器的密集布置,最后进行不同模式的受力测试和损伤检测等试验研究。

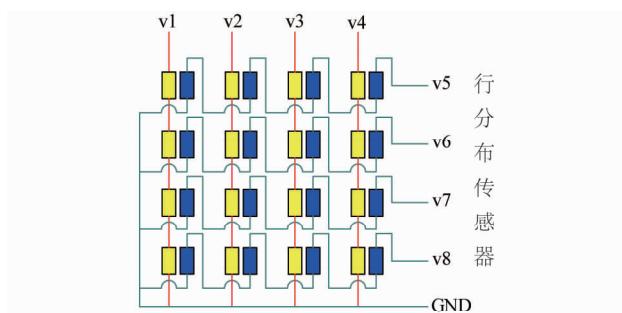


图 4 阵列式传感器分布组成图

### 2.2 在复合材料结构健康监测中的试验研究

课题的试验研究工作主要包括对所制备的传感材料进行相关的性能测试,再将性能满足要求的碳纳米管聚合物薄膜压阻传感材料在碳纤维复合材料中用表面贴覆的方法进行试验研究。同时,还将对试验中所采集的具有不同状态和特征的数据信号进行相关信号处理。

#### 2.2.1 传感材料制备及性能测试

在碳纳米管聚合物薄膜的制备中,选用的多壁碳纳米管管径为 3~10 nm。在将多壁碳纳米管材料通过硝酸处理后,与聚甲基丙烯酸甲基(PMMA)进行聚合。在进行多壁碳纳米管-聚甲基丙烯酸甲基的聚合时,制作出多壁碳纳米管质量分数为 1%~10% 的几组不同薄膜样品。后对各组样品分别进行性能测试实验。测试采用三点弯曲法<sup>[21]</sup>,其原理和系统组成分别如图 5 和 6 所示。图 5 中,碳纳米管聚合物薄膜、环氧树脂薄层和不锈钢片的几何尺寸(长×宽×厚)分别为 30 mm×8 mm×200 μm,30 mm×8 mm×80 μm 和 120 mm×8 mm×2 mm,电极材料为银浆。

试验时,用卡子将样品固定后,用只与衬底保持单点接触的螺旋测微计向衬底旋进时,衬底产生弯曲,形变量根据螺旋测微计读出来,并通过数据采集卡传到 PC 机,作为应力-电阻率坐标图的应力参数;系统中的电阻测量系统采用四探针测量仪。测

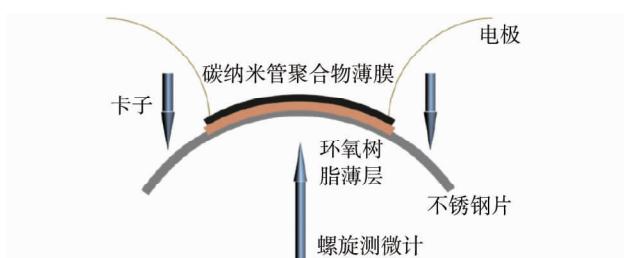
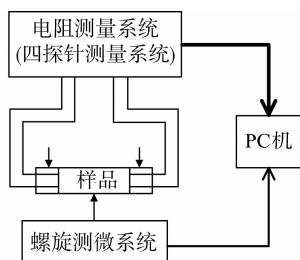
图 5 三点弯曲测量法原理图<sup>[21]</sup>

图 6 测试系统组成框图

出电阻阻值后,在 PC 机的软件控制界面上绘制出应力-电阻率关系坐标曲线。在 PC 机中,除将传回的各类数据经过处理进行应力-电阻率关系曲线的实时显示外,还通过数据采集卡的模拟量输出口对螺旋测微系统的动作进行控制。

之后,通过对聚合物薄膜样品的应力-电阻率变化关系的研究分析,得出线性度和灵敏度方面具有最佳综合性能的样品参数组成,以在碳纤维复合材料结构健康监测的研究试验中进行应用。

### 2.2.2 表面贴覆研究试验

表面贴覆的方法因具有系统组成方便、灵活,试验现象直观等优点而广泛应用于传感材料的应用研究试验中。而且本课题中所选用的研究对象——碳纤维复合材料也较适合进行表面贴覆。

试验系统的整体构成如图 7 所示,碳纤维复合材料层为厚度约 5 mm 的矩形平面板,其上每个红色方格代表一组碳纳米管聚合物薄膜压阻传感器组,它由两个相邻的子传感器组成,在复合材料表面共贴覆了 32 个子传感器。传感薄膜与复合材料面

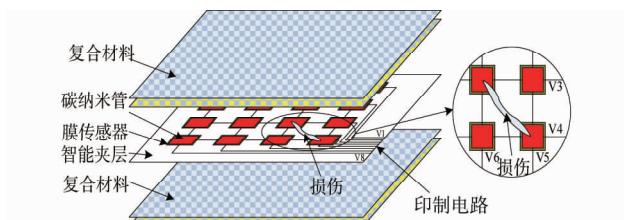


图 7 传感器系统的组成及分布

板之间有一层粘结绝缘层,它主要是将传感薄膜紧密地贴覆在材料表面,以使传感薄膜能实时地检测到被测材料的微小形变,同时也起到绝缘作用。进行粘贴时,必须使粘结绝缘层与复合材料面板及传感薄膜之间起到很好的匹配作用,而不会使其在粘结部位产生应力集中,导致传感薄膜发生失效破坏。连接导线需要有一定的松弛余量,以使被测材料结构有更大的形变空间。系统的粘结绝缘材料用的是环氧树脂制成的粘接剂,连接导线用的是铜。

试验前,先将试验面板的四周用台架进行固定。试验时,让面板按特定方向及幅度进行形变,形变类型包括纵向扭曲、纵向弯曲及特定部位受力。图 7 中的损伤由特定部位受力形变过度后材料发生脆裂而产生。

系统工作时,首先得到 V1 至 V8 所对应的压阻阻值,再用灰度图表示不同的阻值,根据灰度图的分布判断出损伤情况。上位机软件除对材料面板的受力情况用灰度图进行显示外,还具有对疲劳和损伤进行报警、各传感器组的电阻值随时间的变化曲线显示、数据存储以及进行其它方面的信号处理等功能。对于图中的损伤,系统在扫描到 V3 和 V4 时,检测到它们的阻值均变大,而扫描到 V5 和 V6 时,检测到它们的阻值也均变大。因此,上位机软件就可判断出 V3, V4, V5 和 V6 所围的区域内有疲劳或损伤发生。而具体的疲劳程度或损伤大小则是通过对电阻值变化的大小进行信号处理后来确定。在灰度图里,V3, V4, V5 和 V6 所围区域就会显示深色,具体颜色深度则取决于所计算出的电阻值。

但该方法也存在干扰较大,贴覆质量可靠性较低,传感薄膜易受损等问题,系统构建时需针对传感薄膜的有效粘贴、导线的有效连接等方面优化设计、加工,尽量减少干扰;对于碳纤维复合材料面板的微小形变,系统可能检测不到,因此对于材料初期的疲劳也就可能无法进行有效监测。

### 2.2.3 信号处理

信号处理是试验系统软件部分的核心。在该试验系统中,碳纤维复合材料面板上的阵列式碳纳米管聚合物薄膜传感器的电阻值随面板受力形变的不同而产生相应的变化。比如,对于特定部位的受力所产生的形变,受力部位附近传感器的电阻值将因形变大小及与受力部位距离大小的不同而发生不同程度的变化;而对于纵向扭曲,扭曲的折痕处传感器的电阻值也会较正常值不同,具体是变大还是变小,

则取决于折痕是因拉伸还是因压缩而产生的,变化的范围则取决于形变程度。此外,传感器所产生的的是非标准的电流信号。针对这些情况,将主要从以下几个方面对信号处理工作进行展开。

(1) 数据的预处理 包括数据的标准化,干扰噪声的消除等。其中,数据的标准话主要是对被测信号进行 I/V 转换和放大处理;干扰噪声的消除主要是对被测信号进行小波分析,以提取有用信号,并对干扰信号进行滤除,进而使计算出的电阻值的误差尽量小。

(2) 特征提取和选择 提取和选择的方法就是系统通过对所检测到的每个传感器组电阻率的时间变化曲线中斜率的变化情况,来预测并判断被测部位的受力和损伤趋势。

(3) 模式识别 与碳纤维复合材料疲劳或损伤相关的特征将用离散的变量表示,并组成矩阵。其中,模式代表的是不同的疲劳或损伤状态及其类型,如因结构扭曲而产生的疲劳等。在处理中,把大量代表不同的正常或非损伤状态的数据组成一个模板,新的数据组和模板只要和其进行比较就可获得损伤信号。模板的构建主要用统计法进行。

### 3 总结及展望

本文总结了碳纳米管的压阻特性及其相关的应用研究进展,并给出了基于碳纳米管压阻效应的聚合物薄膜传感器在复合材料结构健康监测中进行应用的试验研究方法和技术。下一步除对上述试验研究方法进行系统性试验外,还将采用智能夹层方法对矩阵式监测原理进行应用研究。同时,还将针对传感器在工程化应用中所存在的相关问题开展工作,如实际环境因素比实验室要复杂很多,因此如何在恶劣环境下对监测系统中的信号传输导线进行排布,并保证其连接质量;如何在众多更加严重的干扰中对微小应力或形变信号进行有效提取;如何解决结构的过应力、过形变对传感器性能造成不可恢复性破坏等。相信随着研究的推进,碳纳米管聚合物薄膜压阻传感器在复合材料结构健康监测领域的工程化应用能很快实现。

### 参考文献:

- [1] Housner G W. Structural control: past, present, and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9):897—971.
- [2] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [3] Chang L. 微机电系统基础[M]. 黄庆安,译. 北京:机械工业出版社,2007.
- [4] Spitalsky Z. Carbon nanotube - polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3):1—45.
- [5] Galanov B A, Galanov S B. Stress-strain state of multi-wall carbon nanotube under internal pressure [J]. Nano-particle Res, 2002(4): 207—214.
- [6] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991(354):56—58.
- [7] Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter[J]. Nature, 1993(363):603—605.
- [8] Functionalised carbon nanotubes as therapeutic vectors [EB/OL]. [http://www-ibmc.u-strasbg.fr/ict/vectorisation/nanotubes\\_eng.shtml](http://www-ibmc.u-strasbg.fr/ict/vectorisation/nanotubes_eng.shtml).
- [9] Pham G T. Characterization and modeling of piezo-resistive properties of carbon nanotube-based conductive polymer composites[D]. Florida: Florida State University, 2008.
- [10] Dang ZM. Supersensitive linear piezoresistive property in carbon nanotubes / silicone rubber nanocomposites[J]. Applied Physics, 2008, 104(2):024114—024114—6.
- [11] Cao C L. Temperature dependent piezoresistive effect of multi-walled carbon nanotube films[J]. Diamond & Related Materials, 2007, 16(2):388—392.
- [12] Park M. Strain dependent electrical resistance of multi-walled nanotube/polymer composite films[J]. Nanotechnology, 2008, 19(5):5705—5712.
- [13] Pham G T. Processing and modeling of conductive thermoplastic/carbon nanotube films for strain sensing[J]. Composites: Part B, 2008, 39(1):209—216.
- [14] Kang I. Introduction to carbon nanotubes and nanofiber smart materials[J]. Composites: Part B, 2006, 37(6):382—394.
- [15] Kang I. The bulk piezoresistive characteristics of carbon nanotube composites for strain sensing of structures[J]. Nanoscience and Nanotechnology, 2007, 7(11):3736—3739.
- [16] Song X. Controllable fabrication of carbon nanotube-polymer hybrid thin film for strain sensing[J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86:2330—2333.
- [17] 张毅. 碳纳米管膜的压阻效应及其相关力学性质研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.
- [18] Gau C. Piezoresistive characteristics of MWNT nano-

(下转第 674 页)

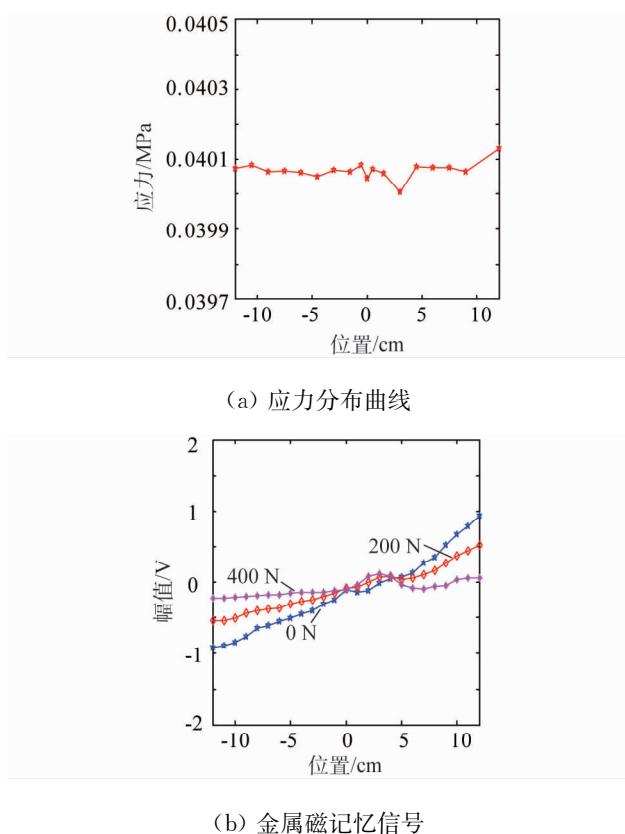


图 8 退火试件的循环加载

分布较均匀。当循环加载后,金属磁记忆的信号强度随着压应力的增加而减小。就幅值而言,并未出现法向的规则波形,但两端的磁场变化基本上均匀,并未出现类似未对试验件进行退火前,只有负峰值变化剧烈的情况。

(上接第 669 页)

- composites and fabrication as a polymer pressure sensor[J]. Nanotechnology, 2009, 20(18): 1—11.
- [19] 韩向宇. 管径相关的多壁碳纳米管膜的压阻效应[J]. 功能材料, 2007, 38(2): 323—325.
- [20] 韩向宇. 功能化碳纳米管及其性质研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [21] Tombler T W. Reversible electromechanical Characteristics of Carbon Nanotubes under Local-Probe Manipulation[J]. Nature, 2000, 405: 769—772.
- [22] Vidhate S. Time dependent piezoresistive behavior of polyvinylidene fluoride/carbon nanotube conductive composite[J]. Materials Letters, 2009, 63(21): 1771—1773.
- [23] Jain S. Building smart materials based on carbon nanotubes[J]. Smart Structures and Materials 2004: Smart Electronics, Mems, Biomems and Nanotechnology, 2004, 5389: 167—175.

## 5 结语

实际检测中,无法对试件先进行退火处理以达到均匀微观组织结构的目的,检出结果往往可能是互相之间累积与叠加。将金属磁记忆技术与巴克豪森噪声法结合起来,可实现优势互补,可同时定性和定量地对试件上的残余应力进行检测。通过试验发现,对未经过均匀组织处理的铁磁材料的金属磁记忆信号作微分处理,可以更准确地反映出应力集中的状态。金属磁记忆的信号随着拉应力的增大而增大。同一压力载荷下,增大循环次数,金属磁记忆信号的峰-峰值有变小的趋势;当载荷增大,增大循环次数,金属磁记忆的累积效应相对较小载荷条件下的累积效应更明显。实际检测出的金属磁记忆信号波形有可能不对称,产生此种现象的原因是峰值较大的一侧,微观组织结构分布相较更不均匀,或可以说波形峰值较大的一侧位错更为密集,即此侧已存在应力集中区。

## 参考文献:

- [1] 林俊明,林春景,林发炳. 基于磁记忆效应的一种无损检测技术[J]. 无损检测, 2000, 22(7): 297—299.
- [2] Wilson J W, Tian Gui Yun, Barrans Simon. Residual magnetic field sensing for stress measurement [J]. Sensors and Actuators, 2007(A135): 381—387.
- [3] 任吉林,林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [24] Kang I. Carbon Nanotube Smart Materials [D]. USA: University of Cincinnati, 2005.
- [25] Kang I. A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15: 737—748.
- [26] Kang I. Carbon Nanotube Composites Multi-Sensing Characteristics Based on Electrical Impedance Properties[C]. 2nd International Conference on Nanoscale Materials and Engineering, 2008, 9: 7364—7367.
- [27] Nofar M. Failure detection and monitoring in polymer matrix composites subjected to static and dynamic loads using carbon nanotube networks[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69 (10): 1599—1606.
- [28] Schulz M J, Sundaresan M J. Smart Sensor System for Structural Condition Monitoring of Wind Turbines [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2006.