复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第3期 6月 2010年
Vol. 27 No. 3 June 2010

文章编号：1000-3851(2010)03-0111-05

树脂基搭接碳纤维智能层的力阻特性

朱四荣*，郑华升，李卓球
（武汉理工大学 理学院，武汉 430070）

摘 要： 提出一种具有局部搭接结构的树脂基碳纤维智能层，将其敷设于结构表面以检测结构受载时的变形，实现对结构大范围监测。基于该智能层，采用单轴拉伸和三点弯曲的加载方式，对构件进行应变和位移检测。实验发现，碳纤维局部搭接结构是引起力阻效应的主要因素，其单位应变的电阻率变化的灵敏度达到104，相当于非搭接连续碳纤维复合材料力阻效应灵敏度的34倍。实验结果还进一步表明，树脂基搭接碳纤维智能层力阻曲线光滑稳定，其传感极限约为8500 $\mu\varepsilon$。建立了树脂基搭接碳纤维复合材料的电学模型，揭示了这种力阻效应主要来源于搭接界面处层间电阻的变化，并从纤维轴向力、搭接面积和层间剪应变三个方面解释了这种层间电阻变化的机制。

关键词： 碳纤维；局部搭接智能层；力阻效应；电学模型；层间电阻
中图分类号： **文献标志码：** A

Piezoresistivity of overlapped carbon fiber polymer-matrix smart layer

ZHU Sirong*, ZHENG Huasheng, LI Zhuoqiu
(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A smart layer was developed by effectively overlapping continuous carbon fibers in a local area in epoxy matrix. The smart layer was stuck on the structure surface to sense its deformation and perform a large-region monitoring. Based on the smart layer, the strain and displacement of the components were detected in the uniaxial tension and three-point bending experiments. The results indicate that the local overlapped structure is the essence of the overlapped carbon fiber polymer-matrix smart layer. The gauge factor of the overlapped carbon fiber polymer-matrix smart layer, defined as fractional change in resistance per unit strain, is as high as 104, which is 34 times as that in continuous carbon fiber composites without an overlapped part. The results further show that the piezoresistivity curve of overlapped carbon fiber polymer-matrix smart layer is smooth and stable, and exhibits a sensing limit of around 8500 $\mu\varepsilon$. An electrical model of the overlapped carbon fiber polymer smart layer was established, which revealed that the change of interlaminar resistance in the overlapping region is the source of its piezoresistivity. Furthermore, a preliminary explanation of the mechanism of the change of interlaminar resistance was made from fiber axial load, overlapped area and interlaminar shear strain.

Keywords: carbon fiber; overlapped smart layer; piezoresistivity; electrical model; interlaminar resistance

碳纤维复合材料力阻效应的发现，为工程结构的健康监测开辟了新的途径。过去的20年里，众多学者在这一领域进行了大量的研究工作[1-6]。但是，长期以来他们的研究对象大都局限于局部简单受力构件，对大型复杂结构进行全面准确的健康监测还存在困难。

近两年，文献[7-9]提出了碳纤维智能层的概念，这种层状碳纤维复合材料可连续的敷设于结构表面，具有全域感知变形和损伤的能力。智能层中的碳纤维以短切毡的形式存在，短切碳纤维毡具有很强的应变敏感性[10]，而以短切碳纤维毡作为导电填料的复合材料也具有优良的传感特性[11]。但他们未对短切碳纤维毡的传感机制做出解释。其中面临的突出问题是，短切碳纤维毡中的碳纤维呈弥散性分布，且方向具有随机性，这给传感机制研究和力阻效应模型的建立带来很大的困难。

收稿日期： 2009-07-07；**收修改稿日期：** 2009-12-01
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50878169)
通讯作者： 朱四荣，博士，教授，从事碳纤维智能复合材料的研究 E-mail：zhusirong@whut.edu.cn

本文作者提出一种简洁的具有局部搭接结构的树脂基碳纤维智能层，这种智能层以环氧树脂作为基体，采用单一方向的 2 束碳纤维在局部区域的搭接结构；并将其敷设于构件表面，采用轴向拉伸和三点弯曲的加载方式研究其电阻随应变的响应，实现对结构的大范围监测，同时探讨碳纤维智能层的力阻效应产生的主要原因，分析其力阻效应的机制。

1　实　验

1.1　原材料

制作树脂基局部搭接碳纤维智能层的原材料为：PAN 基连续碳纤维（单丝直径 7 μm，含碳量 93%），上海碳素有限公司生产；E－44 型环氧树脂，岳阳石油化工总厂岳华有机化工厂生产；固化剂（650 低分子聚酰胺树脂），湖南湘潭特种胶粘剂厂生产；丙酮，天津市永大化学试剂开发中心出品；电极采用铜导线和导电银胶制成；导电银胶由湖北回天胶业股份有限公司制造。

1.2　试样制备

树脂基搭接碳纤维智能层的制备方法如图 1 所示。用导电银胶在连续纤维上粘贴铜电极，其中激励电极贴于碳纤维端部的外侧，确保电流能从纤维横截面上均匀流过；电压采集电极贴于碳纤维端部的内侧，这样所采集的电压就能够反映纤维被测段的真实体积电阻。将环氧树脂与聚酰胺树脂按 1∶1 混合，加入树脂混合后总质量的 10%的丙酮做稀释，然后将两束连续碳纤维按图 1 所示的搭接方式进行糊制。

为了制作与测试方便，将该智能层在尺寸为 300 mm×20 mm×4 mm 的玻璃纤维增强塑料板条上进行糊制。常温成型后，在 80℃下置于鼓风干燥箱中后固化 2 h，固化后糊制层厚度约为 0.7 mm，搭接处纤维含量约为 28%。为作比较分析，按同样方式制作一组无搭接的连续碳纤维层试样（纤维含量约为 20%），如图 2 所示。

1.3　测试方法

在 Instron 5882 上对试样进行轴向拉伸循环实验和三点弯曲循环实验，加载频率均为 1/60 Hz。拉伸实验的载荷幅值为 800 N。三点弯曲循环实验中试样的跨距为 200 mm，跨中挠度幅值为 1.5 mm，将贴有碳纤维的表面先后置于受拉侧和

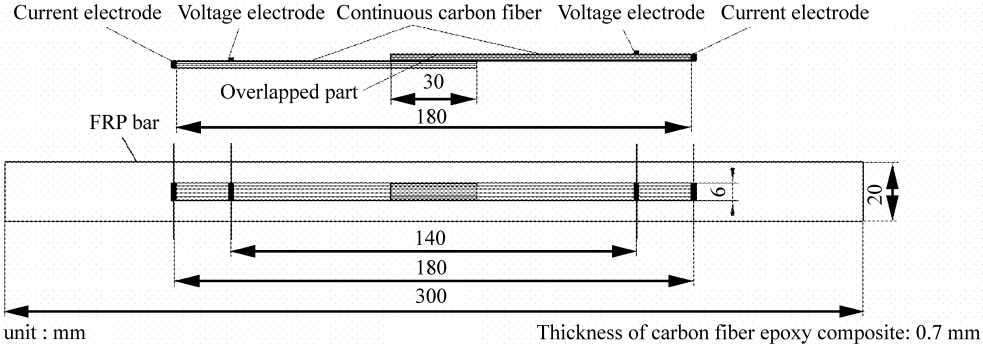

图 1　搭接碳纤维智能层的构造及其敷设于玻璃纤维增强塑料板条上的试样

Fig. 1　Construction of overlapped carbon fiber polymer-matrix smart layer and the sample stick-on a GRP bar

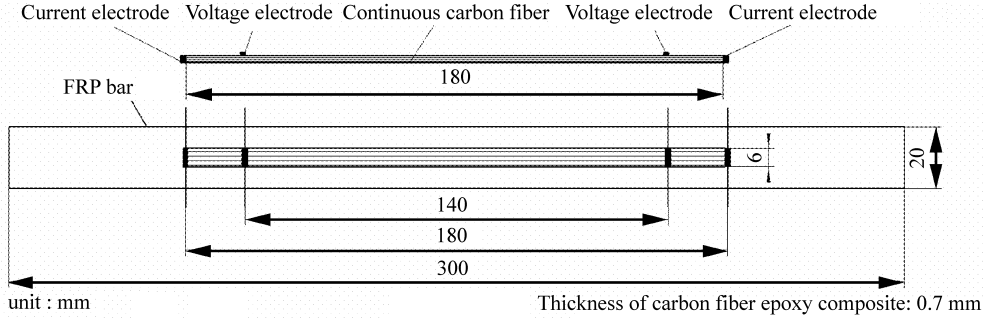

图 2　无搭接连续碳纤维复合材料及其敷设于玻璃纤维增强塑料板条上的试样

Fig. 2　Construction of continuous carbon fiber composite and the sample stick-on a GRP bar

受压侧进行实验。此外，为测试传感极限范围，对局部搭接碳纤维试样进行了轴向单调拉伸试验，加载速率为 0.5 mm/min。实验过程中采用四电极法测试电阻，即用直流电源 Keithly2400（美国 Keithley 公司）在外侧两电极上通 1 mA 恒定电流，用多通道采集仪 Keithly2700（美国 Keithley 公司）采集内侧两电极间的电压。拉伸测试时用 Instron 5882 自带的引伸计测量拉伸应变，并连同载荷和位移模拟信号一起输入至 Keithly2700 采集仪与上述电压信号同步采集，采集频率为 1 Hz。

2 实验结果及分析

2.1 力阻效应

图 3 所示为搭接碳纤维智能层和无搭接连续碳纤维层的电阻相对变化率在其所附玻璃纤维增强塑料板条受到循环拉伸时的变化规律。由图可知，碳纤维智能层与无搭接连续碳纤维层表现出相同的变化规律，电阻随着拉应变增加表现出线性、可恢复的增加，因此均具有力阻效应。图中显示，相比于无搭接连续碳纤维层，搭接碳纤维智能层的力阻效应表现出如下特征。

（1）搭接碳纤维智能层的灵敏度更高，按照灵敏度计算公式：

$$k = (\Delta R/R_0)\varepsilon \tag{1}$$

式中：k 为灵敏度，ΔR 为电阻变化，R_0 为初始电阻，ε 为轴向应变。

将实验数据代入式(1)，计算得出搭接碳纤维智能层的灵敏度 k 达到了 104，而连续碳纤维层的灵敏度约为 3，前者为后者的 34 倍。这一实验结果表明，尽管搭接碳纤维智能层的力阻效应包含了连续碳纤维自身体积电阻的变化，但其搭接结构是引起力阻效应的主要因素。

（2）搭接碳纤维智能层的电阻响应曲线相对比较光滑，基本没有毛刺现象，这说明搭接碳纤维智能层的力阻效应稳定。

图 4 为搭接碳纤维试样的电阻在其所附玻璃钢条受到单调拉伸时的变化规律，结果显示，在整个单调拉伸过程中，搭接碳纤维试样的电阻呈现出单调增大的趋势，而在应变达到约 8500 $\mu\varepsilon$ 前，电阻随应变的变化保持线性增大。由此可见，树脂基搭接碳纤维智能层的传感极限在 8500 $\mu\varepsilon$ 左右。

图 5 所示为搭接碳纤维智能层处于三点弯曲构件的受拉面和受压面时，在循环弯曲载荷下的电阻变化规律。受拉时，变化规律与单轴拉伸时一致，

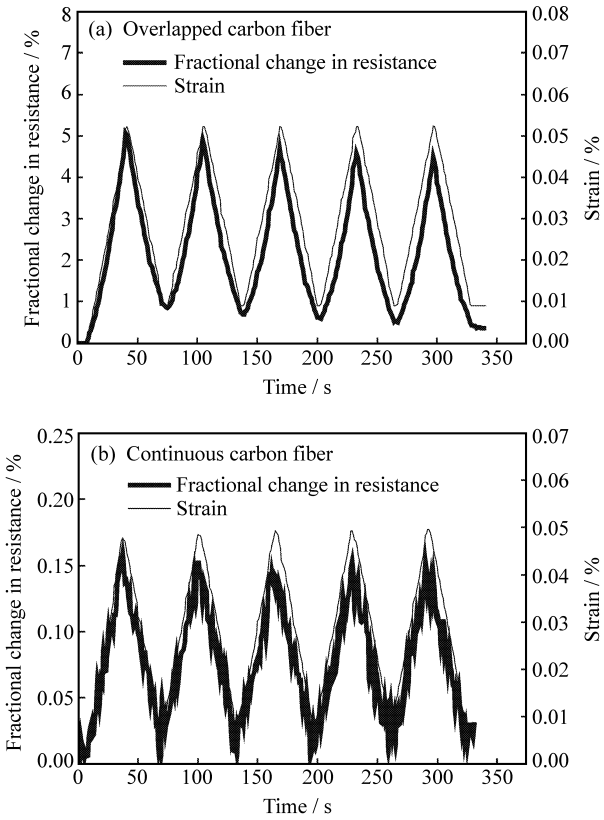

图 3 搭接碳纤维（搭接处纤维质量含量约为 28%）和连续碳纤维（纤维质量含量约为 20%）附于循环拉伸构件时的力阻效应

Fig. 3 Piezoresistivity of overlapped carbon fiber sample with 28% mass fraction of carbon fibers in the overlapped area and continuous carbon fiber sample with 20% mass fraction of carbon fibers stuck-on the cycle axially loaded bar

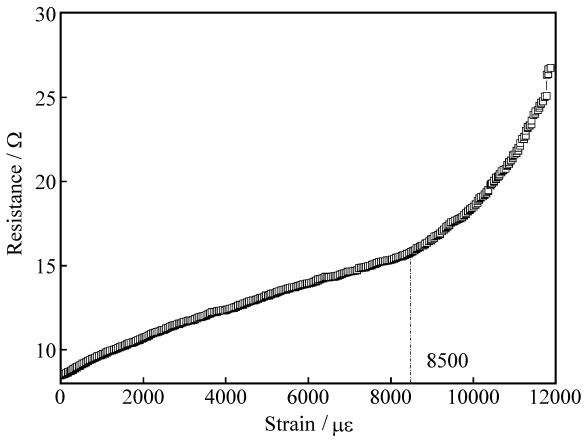

图 4 搭接碳纤维试样（搭接处纤维含量约为 28%）的电阻在其所附玻璃纤维增强塑料板条受到单调拉伸时随应变的变化规律

Fig. 4 Resistance response of overlapped carbon fiber sample with 28% mass fraction of carbon fibers in the overlapped area stuck-on a monotone axially tensioned bar

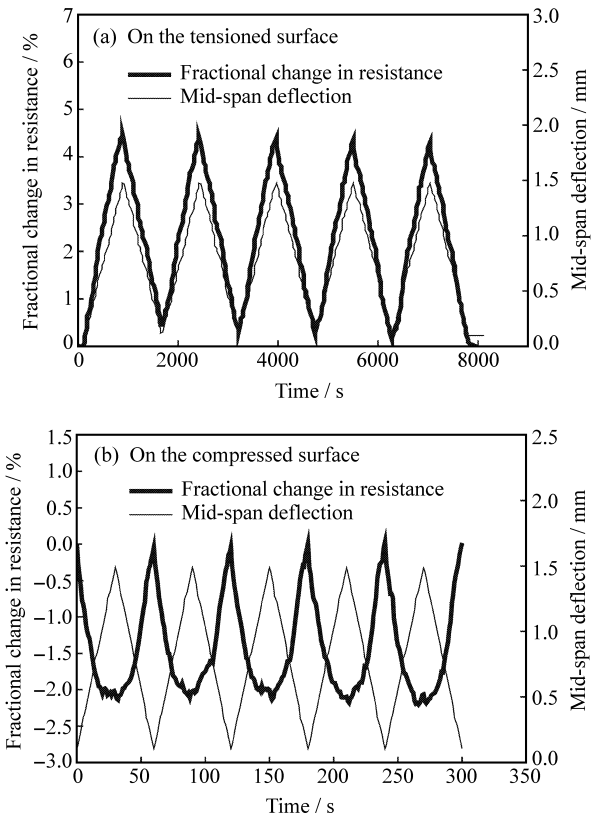

图 5　搭接碳纤维(搭接处纤维含量约为 28%)附于三点弯曲构件表面时的力阻效应

Fig. 5　Piezoresistivity of overlapped carbon fiber sample with 28% mass fraction of carbon fibers in the overlapped area stuck-on the surface of a three-point bending beam

即搭接碳纤维智能层的电阻随着拉应变的增加而增加；受压时，电阻随着压应变的增加而减小。所以搭接碳纤维智能层对拉应变和压应变均具有敏感性，且重复性好。图中还可以发现，搭接碳纤维智能层受压时的灵敏度低于受拉时的灵敏度，在所附玻璃钢条挠度相同的情况下，受压时的电阻相对变化为受拉时的一半左右，但是，这仍然表明搭接碳纤维智能层在受压时具有较高的灵敏度。

2.2　力阻效应的电学模型

为了探讨搭接碳纤维智能层中的搭接结构力阻效应的影响机制，按图 6 所示建立了该智能层的电学模型，R_a，R_b为非搭接段的纵向体积电阻，在搭接段，上下两层纤维间通过离散的接触形成多个层间接触电阻 r_i，这种离散的接触来源于界面处纤维的波纹形态，从而构成了上下两层间的多个导电通路，同时将搭接段纤维的纵向体积电阻分割为若干段，即 R_i。

由于激励电极贴在纤维束端部，对于连续纤维来说，可认为电流均匀地从每根纤维上流过，其导电结构比较稳固，纵向变形对纤维纵向体积电阻率影响甚微，因而其灵敏度较低。对于搭接碳纤维智能层而言，纵向变形会对其搭接界面带来多方面影响，从而总体引起电阻的较大变化。这些影响包括：(1) 纤维轴向力改变了搭接界面处纤维的接触程度。因为当搭接碳纤维智能层在沿纤维长度方向受拉时，纤维轴向拉力使得搭接间的 2 束碳纤维被拉直，导致搭接界面处纤维间接触点变少，电阻增加；当搭接碳纤维智能层在沿纤维长度方向受压时，纤维轴向压力使得已有的纤维接触变得更紧密，在搭接界面处的纤维间的接触点增加，电阻减小。(2) 搭接处上下两层纤维的纵向错动改变了搭接区域的接触面积，纵向拉应变的错动使得搭接区域变小，从而降低了纤维接触的机会，使得电阻增大；而纵向压应变错动使得搭接区域变大，从而提高了纤维接触的机会，使得电阻减小。(3) 搭接处上下两层纤维在纵向错动过程中产生了层间剪应变，使得层间纤维接触产生松动，这种松动效应同时存在于受拉和受压的情形中。

由此可见，以上三种效应对于纵向受拉的搭接碳纤维智能层都意味着 r_i 在数值上增加，数量上减少，因而电阻会发生较大增加；对于纵向受压的搭接碳纤维智能层而言，前两种效应会导致 r_i 在数值上减小，数量上增加，因而电阻减小。但是，由于双向的错动产生了层间剪应变使得已有层间纤维接触产生松动，这将弱化电阻减小的效应，所以受压

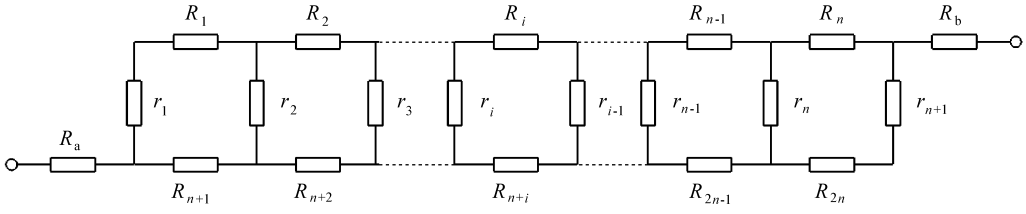

图 6　局部搭接碳纤维智能层的电学模型

Fig. 6　Electrical model of overlapped carbon fiber smart layer

时的灵敏度要低于受拉的灵敏度。

3 结 论

（1）树脂基搭接碳纤维智能层的局部搭接结构是引发其力阻效应的主要原因，其力阻灵敏度远大于非搭接连续碳纤维，稳定性也优于连续碳纤维。

（2）通过建立电学模型，从三个方面初步揭示了其搭接界面处的层间接触电阻的变化机制，从细观上进一步揭示了碳纤维毡应变传感特性的起源。

（3）基于树脂基搭接碳纤维智能层的高灵敏度与稳定性，显示了其作为一种稳定的高灵敏度智能器件的应用前景。

参考文献：

[1] Chung D D L. Self monitoring structure materials [J]. Materials Science and Engineering，1998，22(2)：57-78.

[2] 韩宝国，欧进萍. 炭纤维水泥石压敏传感器的温湿度补偿方法[J]. 复合材料学报，2007，24(2)：99-104.
Han Baoguo，Ou Jinping. Temperature and humidity compensation method of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(2)：99-104.

[3] Zhu Sirong，Chung D D L. Analytical model of piezoresistivity for strain sensing in carbon fiber polymer - matrix structural composite under flexure [J]. Carbon，2007，45(8)：1606-1613.

[4] 王玉林，赵晓华. 碳纤维水泥基复合材料的正、负压敏性及其机理分析[J]. 复合材料学报，2005，22(4)：40-46.
Wang Yulin，Zhao Xiaohua. Positive and negative pressure sensitivities of carbon fiber - reinforced cement - matrix compsites and their mechanism [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(4)：40-46.

[5] Angelidis N，Wei C Y，Irving P E. The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain [J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2004，35(10)：1135-1147.

[6] 王 勃，欧进萍，张新越，何 政. CFRP 筋及其加筋混凝土梁感知性能试验与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(12)：220-224.
Wang Bo，Ou Jinping，Zhang Xinyue，He Zheng. Experimental research on sensing properties of CFRP bar and concrete beams reinforced with CFRP bars [J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2007，39(12)：220-224.

[7] 张小玉，李卓球，宋显辉，朱四荣. 水泥基智能表层的研制及特性[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2006，34(8)：97-99.
Zhang Xiaoyu，Li Zhuoqiu，Song Xianhui，Zhu Sirong. Development of cement - based smart layers [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology，2006，34(8)：97-99.

[8] 张小玉，李卓球，宋显辉. 碳纤维智能层传感功能特性研究[J]. 华中科技大学学报：城市科学版，2008，25(2)：36-38.
Zhang Xiaoyu，Li Zhuoqiu，Song Xianhui. Sensor function characteristic research of carbon fiber smart layer [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology，2008，25(2)：36-38.

[9] 李卓球，邓友生，方 玺. 碳纤维智能层及其场域诊断[J]. 公路，2007(12)：155-159.
Li Zhuoqiu，Deng Yousheng，Fang Xi. Carbon fiber intelligent layers and diagnoses of its sensitive field [J]. Highway，2007(12)：155-159.

[10] Zhang Xiaoyu，Li Zhuoqiu，Song Xianhui. Sensor characteristics of carbon fiber mat [J]. Key Engineering Materials，2006，326-328(Pt2)：1451-1454.

[11] 宋显辉，刘 冬，吕 泳，李卓球. 碳纤维树脂基复合材料的传感特性研究[J]. 工程塑料应用，2007，35(2)：48-51.
Song Xianhui，Liu Dong，Lü Yong，Li Zhuoqiu. Research on sensing properties of polymer based carbon fiber composites [J]. Engineering Plastics Application，2007，35(2)：48-51.