

碳纤维树脂基复合材料的传感特性研究^{*}

宋显辉 刘 冬 吕 泳 李卓球
(武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

摘要 通过伏安特性实验,表明碳纤维树脂基复合材料的伏安特性曲线基本过零点,且线性较好,其电流-电压关系符合欧姆定律。通过对碳纤维树脂基复合材料进行拉伸、循环加载等试验,得到其电阻随变形而变化的规律为:在弹性范围内,拉伸加载时电阻值呈可逆地增加;卸载时电阻值呈可逆地减小。结果表明,碳纤维树脂基复合材料具有良好的电阻-变形敏感性,灵敏度高于 60,具有满意的线性度和良好的重复性,蠕变很小,稳定性较好。

关键词 碳纤维树脂基复合材料 传感特性 灵敏度 循环加载

现代科技的发展,使得土木工程结构和基础设施的规模日益大型化和复杂化,质量要求日趋严格。为了保证其在服役过程中安全可靠地工作,对重要工程结构的实时在线健康监测显得越来越重要^[1]。然而传统的点式电测方法,由于电阻应变片难以埋入、存活率低、捕捉范围小,再加上超声波和放射线照相技术等无损检测技术的局限性,有可能使混凝土基体的微开裂等损伤不能被探测到,监测系统的稳定性和耐久性都不能很好地满足工程实际的需要^[2]。20 世纪 70 ~80 年代,由材料失效引起的一系列灾难性事故的发生,促使人们寻求能从根本上解决工程结构质量与安全性监测的可靠方法^[3]。

工程塑料主要是作为结构材料使用,目前工程塑料的功能特性也日益得到工程界的重视^[4-5]。碳纤维具有耐高温、耐摩擦、导电、导热及耐腐蚀等特点,可加工成各种织物,沿纤维轴方向表现出很高的强度。

碳纤维树脂基复合材料的比强度、比模量等综合指标在现有结构材料中是最高的。在强度、刚度、结构件重、疲劳特性等有严格要求的领域,碳纤维树脂基复合材料都具有优势。碳纤维及其复合材料已广泛用于航天、航空、体育休闲等领域^[6-7]。

对于长寿命的工程结构来讲,传感元件的性能稳定性是一个需要重点考虑的指标,因为它对系统辨识结果的准确性和正确性具有至关重要的影响。笔者研究的碳纤维树脂基复合材料中碳纤维以毡的形式存在,导电网络已经形成,具有电阻材料特征,影响其电导率的主要因素有纤维接触数目、接触电阻、间隙大小和网络形成等。从影响其电导率的因素来分析碳纤维树脂基复合材料电阻随变形所发生的变化,给碳纤维毡施加单调与循环载荷,研究其变形与电阻之间的变化规律,探究碳纤维树脂基复合

材料的传感机理,为其应用于制作感知应变或损伤的传感器奠定基础。

1 实验部分

1.1 原材料

PAN 基碳纤维毡:其主要技术参数见表 1,河南省开封鹏远玻璃纤维制品有限公司;

环氧树脂: E-44(6101),岳阳石油化工总厂岳华有机化工厂;

低分子聚酰胺树脂:岳阳石油化工总厂岳华有机化工厂;

导电银胶: HT1013,湖北回天胶业股份有限公司。

1.2 仪器、设备

微型材料试验机: Instron 5848 型,英国 Instron 公司;

多通道数据采集仪: Keithley 2700 型,美国 Keithley 公司;

可编程数字电源: Keithley 2400 型,美国 Keithley 公司。

表 1 碳纤维毡的技术参数

单位面积质量 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	纵向拉伸强度 / $\text{N} \cdot (\text{50 mm})^{-1}$	纤维直径 / μm	含胶率 / %	含水率 / %	拉伸弹性模量 / GPa
10	≥ 15	7.02 ± 2	6 ~12	≤ 0.5	207

1.3 试样制备

将碳纤维毡裁剪成 160 mm ×20 mm 的矩形薄片,因碳纤维毡很薄,容易损伤,故将碳纤维毡的两端用 502 胶固定在一张 160 mm ×30 mm 的中空长方形纸条上,以便于操作。按图 1 所示,分别将细铜丝用导电银胶粘贴于碳纤维毡表面作为电极,12 h

^{*} 国家自然科学基金项目 (10672128)
收稿日期: 2006-11-18

后导电银胶完全固化。在电极表面须进行镀锡处理,防止电极被氧化。整个制样过程中要防止碳纤维毡被折或被扭。

将上述制好的碳纤维毡沿图1中虚线剪断,放入长160 mm,宽30 mm,厚2 mm的预先铺有约1 mm厚环氧树脂的塑料模具中,然后将模具加满环氧树脂,最后固化,脱膜制得试样。

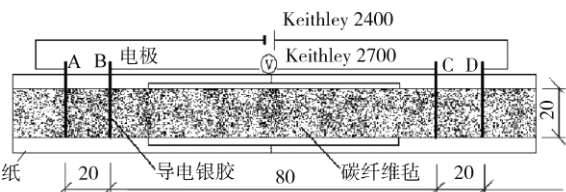


图1 碳纤维试样形状及尺寸

1.4 实验方法

因碳纤维树脂基复合材料试样的电阻较小,故采用四电极法来测量碳纤维毡的电阻,这样可以消除接触电阻的影响。将试样两端分别固定到微型材料试验机上,试验机的夹头端部分别与试样的B、C电极平齐,在碳纤维树脂基复合材料试样同夹头接触的部分用聚酯薄膜隔开,以防止漏电。采用可编程数字电源给试样的A、D电极通0.1 mA的直流恒稳电流。采用多通道数据采集仪采集试样B、C端的电压,根据欧姆定律 $R = U_{BC} / I$,经计算即可得到试样BC之间的电阻;用多通道数据采集仪的其它通道采集材料试验机输出的位移模拟信号,经过校正即可得到碳纤维树脂基复合材料试样的变形量。碳纤维树脂基复合材料试样受力发生变形导致其电阻发生变化,研究其电阻变化与变形之间的关系。

加载之前首先研究碳纤维树脂基复合材料的伏安特性,按图2所示将整个装置接好,用可编程数字电源供电,电压从0.1 V增加到0.9 V,同时采集相应的电流值。

按以下3种方式对碳纤维树脂基复合材料试样进行测试:

(1) 单调拉伸加载。位移控制,加载速度为2 mm/min,检测试样的灵敏度;位移控制,加载速度为0.05 mm/min,加载结束按应变控制,当应变达到0.002时,维持该应变不变,观察试样的蠕变性能。

(2) 循环等幅拉伸加载。位移控制,采用三角波循环加载,加载速度为0.1 mm/min,峰值为0.1 mm,仅1个周期,分析试样传感特性的滞后;再将加载速度降为0.02 mm/min,峰值保持0.04 mm,共循

环3个周期,研究试样的重复性。

(3) 使试样不承受任何载荷,每天测1次电阻,绘制电阻随时间变化的曲线,分析碳纤维树脂基复合材料试样的稳定性。

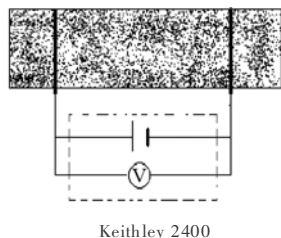


图2 材料伏安特性测试装置示意图

2 结果与分析

2.1 伏安特性

图3示出碳纤维树脂基复合材料的伏安特性。由图3可知,复合材料试样的电压-电流曲线变化规律基本为线性,且近乎过零点。这表明在低压范围内,碳纤维树脂基复合材料试样的电压-电流关系能很好的符合欧姆定律。

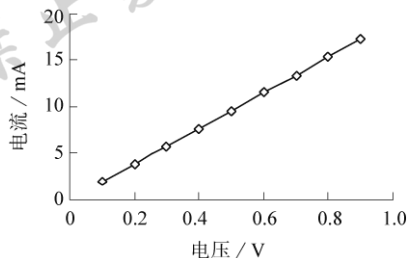


图3 碳纤维树脂基复合材料的伏安特性

2.2 灵敏度及应变极限

图4示出碳纤维树脂基复合材料的电阻变化率与应变的关系。碳纤维树脂基复合材料的传感灵敏度是其单位应变所对应电阻值的变化率,在图4所示曲线的线性段任取两个点,可计算得到试样的灵敏度为 $K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = 64.6$,其灵敏度远高于电阻应变计的灵敏度。

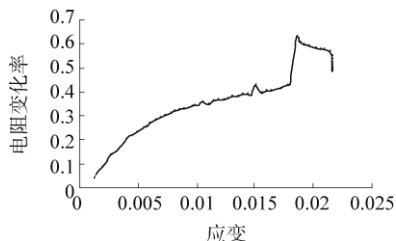


图4 碳纤维树脂基复合材料的电阻变化率与应变的关系

当电阻变化率-应变曲线的线性关系偏离10%时,此时的试样应变为该试样的应变极限,从图4曲线可以看出该试样的应变极限约为0.002。

2.3 线性度

线性度就是在标准条件[环境温度为 (20 ± 5) ℃, 相对湿度不大于 85%] 下, 碳纤维树脂基复合材料试样的校准曲线与拟合曲线间最大偏差与满量程输出值的百分比, 用 e_1 表示。采用最小二乘法做出拟合曲线, 如图 5 所示。从而得到碳纤维树脂基

复合材料试样的线性度 $e_1 = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = 1.5\%$ 。

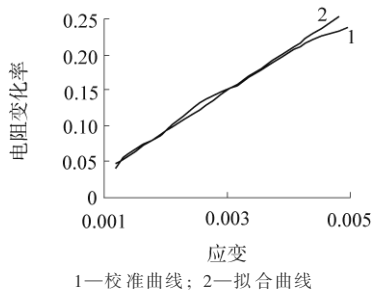


图 5 碳纤维树脂基复合材料试样的线性度

2.4 重复性

重复性表示碳纤维树脂基复合材料试样在输入量按同一方向作全量程多次变动时所得特性曲线的不一致程度。用试样 3 个等幅循环得到的电阻值分析重复性。

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1} = 1.3369(\Omega)$$
$$Y_{FS} = 80.329 \Omega$$

重复性 $e_f = \frac{3 \times 1.3369}{80.329} \times 100\% = 4.99\%$

式中: s ——标准偏差;

Y_i ——各个循环的电阻值;

$\bar{Y}$ ——各个循环的电阻值的平均值;

Y_{FS} ——满量程电阻值。

2.5 蠕变和稳定性

碳纤维树脂基复合材料试样在满量程输入并保持不变时, 输出量随时间变化的最大值 $\Delta_{\max}$ 相对于满量程输出的百分比, 称为传感器的蠕变。依据图 6 计算得到碳纤维树脂基复合材料试样的蠕变 $e_c =$

$$\frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.26989}{45.232} \times 100\% = 0.6\%$$

图 7 示出碳纤维树脂基复合材料试样的电阻随时间变化情况。由图 7 可知, 试样制成后的前 5 天电阻变化幅度较大, 之后逐渐趋于平稳。23 天后, 标称电阻值基本稳定在 (103 ± 1) Ω。这说明试样成

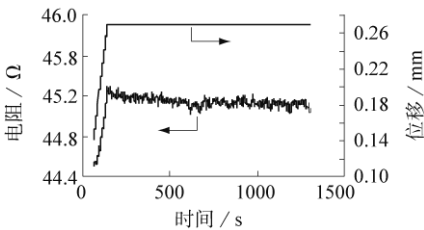


图 6 碳纤维树脂基复合材料试样的蠕变

型一个月后再进行其它性能试验, 基本可排除电阻随时间变化的影响。

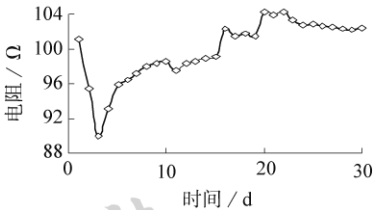


图 7 碳纤维树脂基复合材料试样的稳定性

3 结论

(1) 从碳纤维树脂基复合材料的单调拉伸、循环拉伸加载实验得到其电阻率随试样变形而变化的规律。试验结果表明, 碳纤维树脂基复合材料具有较好的变形 - 电阻敏感性, 即拉伸加载时, 电阻值可逆地增加; 卸载时, 电阻值可逆地减小。

(2) 通过对碳纤维树脂基复合材料伏安特性的研究, 其电流 - 电压关系符合欧姆定律。

(3) 通过对碳纤维树脂基复合材料试样单调拉伸实验, 绘制电阻变化率随应变变化的曲线, 取弹性阶段分析灵敏度及线性度。其灵敏度为 64.6, 应变极限可达约 0.002, 线性度为 1.5%。

(4) 通过循环拉伸实验发现, 碳纤维树脂基复合材料电阻变化的重复性误差不大于 5%, 蠕变较小, 稳定性较好。

根据碳纤维树脂基复合材料对载荷的敏感特性, 可将碳纤维树脂基复合材料用来制作感知应变或损伤的传感器。其具有结构简单, 施工方便, 适用面积大, 检测方法简单等优点, 可实现对玻璃钢/复合材料制品及大型建筑结构的健康监测。

参考文献

[1] 骆英, 陶宝祺. 土木工程智能结构中传感器原理与应用[J]. 江苏理工大学学报, 2000, 21(5) : 9 - 13.

[2] 宋显辉, 郑立霞, 李卓球. 碳纤维水泥变形传感器的研制[J]. 测控技术, 2005, 23(2) : 22 - 24.

[3] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的研究和应用[J]. 中国科学基金, 2005 (1) : 8 - 12.

[4] 齐兴国, 丁乃秀, 何美玲, 等. 炭黑填充聚乙烯导电复合材料的性能研究[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(7) : 21 - 24.

- [5] 惠雪梅,王晓洁,尤丽虹. CE/EP/CF 的湿热性能研究[J]. 工程塑料应用,2006,34(5):49-51.
- [6] Fu X, Chung D D L. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement[J]. Cement and Concrete Research, 1996

(26):15-20.

- [7] Wen S H, Chung D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31:665-667.

RESEARCH ON SENSING PROPERTIES OF POLYMER BASED CARBON FIBER COMPOSITES

Song Xianhui, Liu Dong, Lü Yong, Li Zhuoqi

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT The voltage-current characteristic experiment results showed that the voltage-current curves of carbon fiber resin matrix composites basically passed through the coordinate origin and exhibited good linearity, both of which accorded with Ohm's law. By means of tensile and cyclic loading tests of carbon fiber resin matrix composites, the formula that its resistance changed with its deformation was achieved as follows: within elastic range, its resistance increased with deformation reversibly under tensile loading and decreased reversibly at unloading stage. Results revealed that carbon fiber resin matrix composites possessed excellent resistance-deformation sensitivity exceeding 60, satisfactory linearity and repeatability, and good stability indicated by ignorable creeping.

KEYWORDS carbon fiber resin matrix composites, sensing characteristics, sensitivity, cyclic loading

钢(铝)塑复合管新行标发布

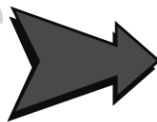
建设部近日发布公告,批准钢塑复合管和铝塑复合管等三项行业标准,自2007年3月1日起实施。

此次获批的《钢塑复合压力管用双热熔管件》和《耐热聚乙烯(PE-RT)铝塑稳态复合管》为新制订的城镇建设行业标准,编号分别为CJ/T237-2006和CJ/T238-2006;《铝塑复合压力管(对接焊)》为修订的城镇建设行业标准,编号为CJ/T159-2006。(中化报)

十类塑料管道将获重点推广

建设部组织编制的《建设部“十一五”技术公告》(简称《技术公告》)将于近期颁布,其中十类塑料管道近50个品种被列入重点推广目录。涉及建筑给水(冷水、热水)塑料管道系统、建筑排水塑料管道系统、建筑地面辐射采暖塑料管道系统、散热器采暖塑料管道系统、建筑电线塑料护套管系统、城乡供水塑料管道系统、城镇排水塑料管道系统、聚乙烯燃气管道系统、电力通讯塑料保护套管系统等。(中化)

硅酮母粒



高品质塑料加工助剂 优质、低价、取代进口产品

在工程塑料中应用

- 改善工程塑料制品表面性能(光滑、光亮、无浮纤、易脱模)及注塑性能(降低注塑温度、注塑压力)
- 优异的耐高温性:可用于PA66、PC、PPS等作润滑剂
- 突出的耐磨性:添加1%~3%即可达到传统聚四氟乙烯(PTFE)粉5%~10%的耐磨效果。摩擦系数和磨损大幅度下降

在聚烯烃无卤阻燃电缆料中应用

- 改善加工性能:极大地降低高填充无卤阻燃聚烯烃电缆料的熔体粘度,使电缆制品挤出表面更加光滑、平整。挤出扭矩更小。降低加工温度,减少材料分解
- 是 $Mg(OH)_2$ / $Al(OH)_3$ 的阻燃协效剂。可使氧指数大幅度提高,降低无机阻燃剂的用量



本公司同时着力于有机硅材料在塑料中的应用和无卤阻燃材料的开发、应用,各种开口爽滑等功能粒的生产。

成都思立可科技有限公司

通讯地址:成都市双林路22号仁禾商务楼5-5室
电话:(028)84332845 84332840 84202128
传真:(028)84332840

邮编:610066
热线:13308066379 13388168449
E-mail:silike@sina.com