

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.020

CFRP 拉挤板材的力阻效应^{*}

郑华升^{1,2}, 周梓棣², 杜琰²

(1. 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430081; 2. 武汉科技大学理学院, 武汉 430081)

摘要:采用单向拉伸试验考察了碳纤维增强塑料(CFRP)拉挤板的电阻-应变响应规律。结果表明,纵向拉应变引起CFRP拉挤板纵向电阻的增大,其力阻效应的平均灵敏度为1.87,尺寸变化是其电阻变化的主要原因;CFRP拉挤板的力阻响应具有较好的线性,其非线性误差为 $\pm 1.5\%$;循环加载过程中,CFRP拉挤板的力阻响应平稳,重复性误差为 $\pm 4.3\%$;经过一个周期的加载-卸载试验后,CFRP拉挤板的电阻产生不可逆的增大,其迟滞误差为 $\pm 4.8\%$ 。

关键词:CFRP拉挤板;力阻效应;加固结构

中图分类号:TQ327.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)04-0095-04

Piezoresistivity of Pultruded CFRP Plate

Zheng Huasheng^{1,2}, Zhou Zidi², Du Yan²

(1. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan 430081, China;

2. School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Resistance-strain response of pultruded CFRP plate was studied by uniaxial tension test. The results reveal that the resistance of pultruded CFRP plate is increased by the tension strain with a average gauge factor of 1.87, and the resistance change is mainly due to the size effect. Good linearity is observed in the piezoresistive response with a nonlinearity error of $\pm 1.5\%$. The pultruded CFRP plate exhibits stable piezoresistive response under cyclic loading with a non-repeatability error of $\pm 4.3\%$. An irreversible increase in resistance is found after a load-unload test, and the hysteresis error is $\pm 4.8\%$.

Keywords: pultruded CFRP plate; piezoresistivity; strengthened structure

碳纤维增强塑料(CFRP)是工程结构加固领域的重要材料。近年来,随着国家节能减排战略的实施,CFRP加固行业得到了快速发展,但与此同时,结构加固后的安全性监测却没有得到相应的重视。迄今为止,由于现场条件的制约和传感器性能的限制,对加固结构实施长期实时的健康监测还面临一定的困难。

研究表明,碳纤维复合材料大多具有应变-电阻效应(又称力阻效应)^[1-4]。若以覆盖在结构表面的CFRP加固层作为敏感层,用以感知结构的受力与变形信息,则有可能在不依赖外部传感器的情况下形成一种加固结构的无损检测方法。由于是利用加固材料自身的功能特性进行传感,该方法在长期性和经济性方面具有一定的优势。

然而,尽管CFRP的力阻效应早已被证实,但采用手糊或模压等传统工艺制作的CFRP加固板材的力阻响应在稳定性上还不能令人满意^[5-11],因而难以满足实际工程监测的需要。近年来,采用拉挤工艺制作的单向连续碳纤维板因其突出的力学性能和

优良的耐腐蚀性,已逐渐成为结构加固领域的常用材料。拉挤成型具有工艺稳定、连续性强、自动化程度高等特点,这有助于材料力阻性能的稳定和提升,因此,CFRP拉挤板更有希望成为一种可靠的传感材料。

为探索CFRP拉挤板应用于加固结构健康监测的可行性,笔者通过单向拉伸试验研究了其电阻随拉伸应变的响应规律,并从线性度、重复性、迟滞性3个方面对其响应误差进行了分析。

1 实验过程

1.1 原材料

单向CFRP拉挤板:ST-1.2,厚度1.2 mm,拉伸强度 ≥ 2000 MPa,拉伸弹性模量 $\geq 1.4 \times 10^5$ MPa,无锡盛特碳纤维制品有限公司;

环氧树脂:E44,上海奥屯化工科技有限责任公司

^{*} 国家自然科学基金项目(51608401),湖北省自然科学基金项目(2016CFB265)

联系人:郑华升,博士后,研究方向为碳纤维智能复合材料

收稿日期:2017-01-22

司;

导电银胶:EN-06B8,广州盈讯电子贸易公司。

1.2 仪器及设备

电子万能试验机:SANS-CMT5105型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

多通道数据采集仪:Keithley 2700型,美国Keithley公司;

可编程数字电源:Keithley 2450型,美国Keithley公司。

1.3 试样制备

将碳纤维拉挤板切割为150 mm×8.5 mm的长条形试样。用导电银胶在试样中部粘贴4个铜电极,其中两外侧电极间隔50 mm,两内侧电极间隔30 mm。试样两端采用环氧树脂加强,试样及电极布置如图1所示。

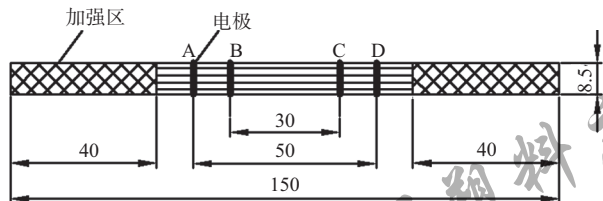


图1 CFRP拉挤板单向拉伸试样

1.4 性能测试

对试样进行等幅循环拉伸试验(见图2),拉伸位移循环区间为0.3~0.6 mm,共循环10个周期。另对试样进行加载-卸载试验,拉伸位移幅值0.6 mm。试验过程中利用试验机配备的引伸计实时测量试样的拉伸应变,并通过4电极法监测试样电阻,即采用可编程数字电源在试样的两外侧电极(电极A与电极D)上提供大小为100 mA的恒稳电流,采用多通道数据采集仪采集试样内侧电极间(电极B与电极C)的电压,根据欧姆定律计算得到



图2 CFRP拉挤板的单向拉伸实验

试样在内侧电极间的电阻,分析试样的电阻随拉伸应变的变化规律。

2 结果与讨论

2.1 灵敏度分析

图3为等幅循环拉伸过程中,CFRP拉挤板的拉伸应变和纵向电阻随时间的变化规律。试样的初始纵向电阻为0.08158 Ω,反映出CFRP拉挤板的纵向电阻率为27.7 Ω·m。图中显示,CFRP拉挤板的纵向电阻随着拉应变的增大而增大,随着拉应变的减小而减小。电阻响应曲线与拉伸应变曲线具有较好的一致性。

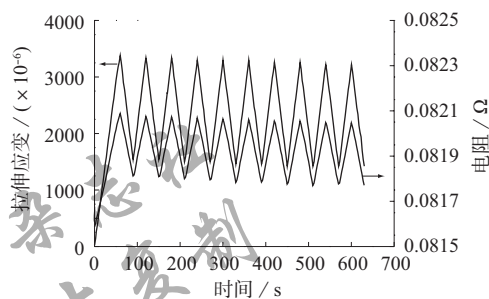


图3 CFRP拉挤板在循环拉伸中的电阻响应

灵敏度(简称GF,用单位应变所产生的电阻变化率表示)是评价力阻效应强弱的关键指标,其数值按式(1)计算。

$$GF = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} \quad (1)$$

式中: ΔR ——电阻变化;

R_0 ——初始电阻;

ε ——纵向拉伸应变。

根据图3中的电阻响应曲线计算得到各拉伸循环周期下的力阻灵敏度如图4所示。无论是加载还是卸载,CFRP拉挤板反映的灵敏度均在1.81~1.92间小幅波动,其平均灵敏度为1.87。由此可见,CFRP拉挤板的力阻效应在灵敏度上表现得并不突出。

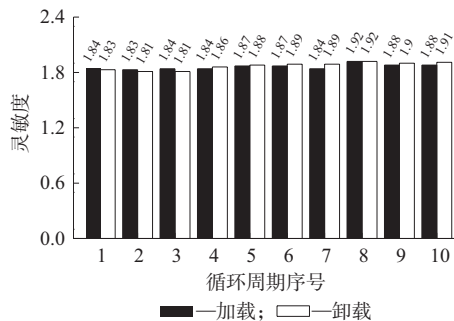


图4 单向拉伸时各循环周期中的灵敏度

CFRP 拉挤板的纵向电阻 R 可以用式 (2) 表示。

$$R = \frac{\rho L}{WT} \quad (2)$$

式中: ρ ——电阻率;

L ——试样长度;

W ——试样宽度;

T ——试样厚度。

在小变形的情况下,对 (2) 式两端取全微分,则将其电阻变化分解为电阻率变化引起的电阻变化和尺寸变化引起的电阻变化。即

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R_0} &= \frac{d\rho}{\rho_0} + \frac{dL}{L} - \frac{dW}{W} - \frac{dT}{T} \\ &= \frac{d\rho}{\rho_0} + (1 + \nu_{LW} + \nu_{LT})\varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ν_{LW}, ν_{LT} ——泊松比;

ε ——纵向拉伸应变。

则纵向拉伸时的灵敏度可表达为

$$GF = \frac{dR}{R_0 \varepsilon} = \frac{d\rho}{\rho_0 \varepsilon} + (1 + \nu_{LW} + \nu_{LT}) \quad (4)$$

对于 CFRP 单向复合材料,可取 $\nu_{LW} = \nu_{LT} = 0.28^{[9]}$,则有

$$\frac{d\rho}{\rho_0 \varepsilon} = GF - 1.56 \quad (5)$$

而实验结果反映的 CFRP 拉挤板的平均灵敏度为 1.87,这意味着,变形时 CFRP 拉挤板的电阻变化主要由尺寸效应引起,电阻率变化的贡献很小。

2.2 误差分析

(1) 非线性误差。

非线性误差 γ_L 指传感器的校准曲线和拟合曲线间的最大偏差 $\delta_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 的百分比,取循环拉伸中第一个周期的加载曲线进行分析,采用最小二乘法对其进行线性拟合,其校准曲线和拟合曲线如图 5 所示,则 CFRP 拉挤板力阻响应的非线性误差为:

$$\gamma_L = \pm \frac{\delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \pm 1.5\% \quad (6)$$

从现有报道看,单向 CFRP 的力阻响应大多具有明显的非线性^[5-7],这与受力变形时单向 CFRP 导电网络结构的变化有关。一般认为,轴向拉力的作用改变了单向 CFRP 中碳纤维的波纹形态,使其更加笔直^[8],从而导致部分相互接触的碳纤维发生脱离,其导电网络结构随之发生变化,而这种变化引起的电阻响应是非线性的过程,因而其宏观力阻响应

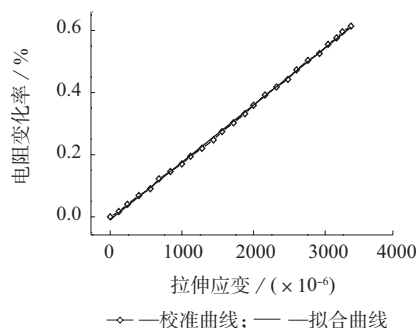


图 5 CFRP 拉挤板电阻响应的校准曲线和拟合曲线

也具有非线性。

对 CFRP 拉挤板而言,在板材成型过程中碳纤维承受了一定的张力,成型后碳纤维大多能保持笔直形态,在板材受力变形时,因导电网络结构的变化而引起的电阻变化非常微弱,其力阻响应主要由尺寸变化所导致的碳纤维单丝本身的力阻效应引起。实验证实,碳纤维单丝的力阻效应具有良好的线性度^[12],因此,CFRP 拉挤板的力阻效应也反映出较好的线性度。

(2) 重复性误差。

重复性误差 γ_R 是一种随机误差,反映传感元件在同一方向上作多次变动时其响应曲线的不一致程度,常用正行程或反行程中的最大偏差 $\Delta Y_{\max}$ 的一半对其满量程输出值 Y_{FS} 的比值来表示。针对循环加载中的力阻响应曲线,重复性误差为:

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% = \pm 4.3\% \quad (7)$$

现有的关于 CFRP 力阻效应的报道很少给出重复性误差的具体数值,但目前各种类型 CFRP 的力阻响应在稳定性上均存在一定欠缺,主要表现在连续加载的过程中其电阻容易出现衰减的现象^[10-11],这一现象与传统制作工艺条件下碳纤维与树脂间的不稳定粘接界面有关。从 CFRP 拉挤板的电阻-应变响应曲线(图 6)可以看出,在循环区间上,每周

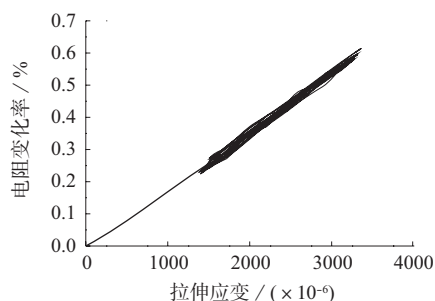


图 6 循环加载时 CFRP 拉挤板的电阻-应变响应曲线

期下的电阻响应曲线近乎重合,反映出良好的重复性,电阻衰减现象在 CFRP 拉挤板材的力阻效应中已大为改善。这种优良的稳定性是 CFRP 拉挤板作为应变传感元件实施结构健康监测的重要前提。

(3) 迟滞误差。

拉伸应变在一个周期内由小到大再由大到小的过程中,电阻响应出现上行曲线与下行曲线不重合的现象,称之为迟滞。迟滞误差 γ_H 用正反行程最大输出差值 $\Delta H_{\max}$ 的一半对其满量程输出值 Y_{FS} 的比值来表示。根据加载卸载曲线(图7)得到 CFRP 拉挤板力阻效应的迟滞误差为:

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% = \pm 4.8\% \quad (8)$$

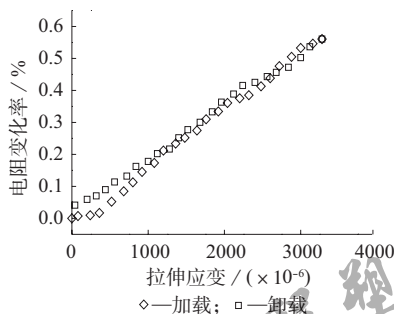


图7 CFRP 拉挤板的迟滞曲线

CFRP 加固板材的迟滞误差表现在,经过一个周期的加载-卸载后,电阻不能完全回复,而是有所增大,产生这种效应的主要原因在于,制作拉挤板的连续碳纤维束中存在一定数量的“弱节”,这使得部分碳纤维在较小的应力下就能发生断裂,而这种断裂是不能随着应力的消失而恢复的,因而卸载后形成了电阻的增大,即产生迟滞误差。弱节断裂的现象不会重复出现,因此,这种迟滞现象主要表现在第一次拉伸的过程中。

3 结论

(1) 拉应变引起 CFRP 拉挤板的纵向电阻增大,其力阻效应的平均灵敏度为 1.87。

(2) CFRP 拉挤板的力阻响应具有较好的线性,其非线性误差为 $\pm 1.5\%$ 。

(3) 循环加载的过程中 CFRP 拉挤板的力阻响应平稳,重复性误差为 $\pm 4.3\%$ 。

(4) 经过一个周期的加载卸载试验后,CFRP 拉挤板的电阻产生不可逆的增大,其迟滞误差为 $\pm 4.8\%$ 。

参考文献

[1] Wang D J, Chung D D L. Through-thickness piezoresistivity in

a carbon fiber polymer-matrix structural composite for electrical resistance-based through-thickness strain sensing[J]. Carbon, 2013, 60(12):129-138.

[2] 宋显辉,刘冬,吕泳,等. 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, Lyu Yong, et al. Research on sensing properties of polymer based carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(2):48-51.

[3] 王勃,欧进萍,张新越,等. 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, et al. 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.

[4] Zheng Huasheng, Zhu Sirong, Li Zhuoqi. Continuous deformation monitoring by polymer-matrix carbon fiber sensitive layer[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2016, 31(3):705-712.

[5] Gordon D A, Wang Shoukai, Chung D D L. Piezoresistivity in unidirectional continuous carbon fiber polymer-matrix composites: single-lamina composite versus two-lamina composite[J]. Composite Interfaces, 2004, 11(1):95-103.

[6] Ogi K, Inoue H, Takao Y. An electromechanical model for the temperature dependence of resistance and piezoresistance behavior in a CFRP unidirectional laminate[J]. Composites Science & Technology, 2008, 68(2):433-443.

[7] 黄莉,龚学进,孙明清,等. 连续碳纤维带树脂基复合材料的传感性能实验研究[J]. 功能材料, 2010, 41(8):1402-1405.

Huang Li, Gong Xuejin, Sun Mingqing, et al. Experimental research on the sensing properties of resin-composite with continuous carbon fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41:1402-1405.

[8] 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, 2004, 35(10):1135-1147.

[9] Todoroki A, Samejima Y, Hirano Y, et al. Piezoresistivity of unidirectional carbon / epoxy composites for multiaxial loading[J]. Composites Science & Technology, 2009, 69(11):1841-1846.

[10] Wang S, Chung D D L. Self-sensing of flexural strain and damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement[J]. Carbon, 2006, 44(13):2739-2751.

[11] 郑华升,朱四荣,李卓球. 碳纤维毡/环氧树脂复合材料的力阻效应[J]. 功能材料, 2015, 46(11):11085-11093.

Zheng Huasheng, Zhu Sirong, Li Zhuoqi. Piezoresistivity of carbon fiber mat / epoxy resin composites[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(11):11085-11093.

[12] Zheng Lixia, Li Zhuoqi, Song Xianhui, et al. Deformation resistance effect of PAN-based carbon fibers[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2009, 24(3):415-417.