

文章编号:1673-2049(2016)05-0029-06

碳粉掺量对碳纤维筋材力阻效应的影响

刘荣桂¹,许兆辉¹,黄俊捷¹,丁勇²,梁戈¹

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013;

2. 南京理工大学 理学院,江苏 南京 210094)

摘要:为研究不同碳粉掺量改性基体对碳纤维增强复合材料(CFRP)筋力阻效应的影响,制作了碳粉掺量(质量分数)分别为 0%,2%,4%,6%,8%的 5 组碳粉改性 CFRP 筋材,通过轴向拉伸试验研究其电阻-应变行为。结果表明:碳粉会降低碳纤维筋材的电阻,碳粉改性 CFRP 筋材在低应力水平阶段的电阻变化率-应变关系线性较好,线性判定系数在 0.92 以上,灵敏度值在 20~30 之间;极限应变为 3%~5%,最大电阻变化率为 35%~60%;在低应力水平阶段,碳粉掺量对灵敏度值影响较小。

关键词:CFRP;碳粉;力阻效应;电阻;灵敏度

中图分类号:TU599

文献标志码:A

Effect of Carbon Powder Dosage on CFRP Tendon Piezoresistivity

LIU Rong-gui¹,XU Zhao-hui¹,HUANG Jun-jie¹,DING Yong²,LIANG Ge¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. School of Sciences, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the effect of carbon powder dosage on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendon piezoresistivity, five groups of CFRP tendons with different carbon powder dosage(0%, 2%, 4%, 6%, 8%)were produced, and the resistance-strain behavior was studied through axial tensile test. The results show that carbon powder reduces the initial CFRP tendon resistance, CFRP tendon has good linear relationship between resistance change rate and strain at low stress level, the linear correlation coefficient is above 0.92, the sensitivity value is 20 to 30. The ultimate strain of CFRP tendon is 3% to 5%, the maximum resistance rate is 35% to 60%. The effect of carbon powder dosage on CFRP tendon sensitivity is less at low stress level.

Key words: CFRP; carbon powder; piezoresistivity; resistance; sensitivity

0 引言

进入 21 世纪,大型结构和基础设施如大跨径桥梁、大型水坝、核电站等设施的损伤积累和灾变行为等问题日趋突出,人类对于重大工程的结构健康监测(SHM)提出了越来越高的要求^[1-2]。

碳纤维增强复合材料筋材(简称 CFRP 筋)具

有比强度高、轻质、抗疲劳、耐腐蚀等优良承载特性,在土木工程中的应用前景非常突出^[3-5]。同时,CFRP 筋具有自感知特性,其电阻与应变(力阻效应)线性关系较好^[6-9]。基于 CFRP 筋的双重特性,可以研发具有承载和传感双重功能的碳纤维传感器,结合传感技术构建智能结构体系,实时监测结构受力状态,评定结构的健康状况,进而科学地对结构

收稿日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51478209,51508235);江苏省科技厅基金项目(BK20140553)

作者简介:刘荣桂(1957-),男,江苏江都人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:liurg@ujs.edu.cn。

进行养护、维修和全寿命设计。

基于 CFRP 材料的力阻效应,建立传感器应力与电阻之间的关系方程,以寻找结构变形、裂缝、损伤程度与电阻变化之间的对应关系,结合理论算法,建立损伤识别模式方法,这是研发碳纤维传感器的重要基础。众多学者对 CFRP 材料的力阻效应进行了试验研究^[10-12]。Yang 等^[13]研究了不同标距长度(20,30,50 cm)对 CFRP 筋自感知特性的影响,结果表明:不同标距长度的初始电阻差小于 5%,灵敏度值在 2.1~3.8 之间。欧进萍等^[14-15]研究了不同直径和表面处理形式对 CFRP 筋电阻-应变关系的影响,并基于三点受弯试验研究了 CFRP 加筋梁的荷载-变形和电阻变化率-变形的关系,结果表明其电阻随应变的变化较明显;线性阶段内,灵敏度值在 30~40 之间,极限电阻变化率在 31%~64%之间。以上结果表明:CFRP 筋的电阻与应变具有较好的线性关系,但灵敏度值存在差异,且文献[13]的灵敏度值较小。乐正想等^[16]、季小勇^[17]研究了不含连续碳纤维丝束,只含不同纳米碳粉和炭黑掺量的树脂复合材料的电阻-应变行为,结果表明其电阻与应变呈线性关系,且存在最优碳粉掺量,使材料具有较高的灵敏度。

综合上述研究成果,为研究不同碳粉掺量改性的树脂基体对 CFRP 筋力阻效应的影响,以期通过碳粉掺量进一步优化 CFRP 筋力阻效应的灵敏度指标,本文以不同碳粉掺量的树脂为基体,通过浸润连续碳纤维丝束制备了 5 组碳粉掺量改性树脂基体的 CFRP 筋,通过单向拉伸试验研究了其电阻-应变行为,并对结果进行了分析。

1 试验概况

1.1 原材料

PAN 基碳纤维丝型号为 T300B-3K,由江苏恒神纤维材料有限公司生产,主要技术参数见表 1。碳粉的细度为 400 目,由盐城翔盛碳纤维科技有限公司生产,其主要技术参数见表 2。环氧树脂为 E44(6101),由江苏南通星辰合成材料有限公司生产。低分子聚酰胺树脂(650#)由江苏南通星辰合成材料有限公司生产。导电银胶型号为 DAD-40,由上海市合成树脂研究所生产。试验采用 0.02 mm 厚紫铜箔和多股铜芯线。

表 1 碳纤维丝技术参数

Tab.1 Technical Parameters of Carbon Fiber Monofilament

型号	拉伸强度/ MPa	含碳量/%	延伸率/%	电阻率/ (Ω·cm)
T300B-3K	3 480	96	1.5	1.5×10^{-3}

注:含碳量为质量分数。

表 2 碳粉技术参数

Tab.2 Technical Parameters of Carbon Powder

材料	拉伸强度/ MPa	含碳量/%	细度/目	电阻率/ (Ω·cm)
碳粉	≥3 500	95	400	1.5×10^{-3}

1.2 加载设备

加载设备采用吉林长春机械科学研究院有限公司生产的 DNS-100 电子万能试验加载机。电阻测量选用 VICTOR VC890C+型数字万用表。

1.3 试件制备

本次试验共制作了 5 组碳粉掺量改性树脂基体的 CFRP 筋,掺量 α 分别为 0%,2%,4%,6%,8%,筋材规格为 480 mm×10 mm×10 mm,每组 3 根,编号分别记为 1#,2#,3#,通过拉伸试验研究碳粉掺量对碳粉改性 CFRP 筋力阻效应的影响。制备筋材的装置见图 1,钢模具 2 两端接入橡胶塞,进液端通过导管连接基体漏斗 1,出液端接广口瓶 3 作保护装置,保护装置 3 连接真空泵 4 作动力装置。制作过程为:

- (1)将适量的碳纤维丝顺直平铺在钢模具 2 内,在钢模具 2 上方放置封装钢条。
- (2)向基体漏斗 1 内添加不同碳粉掺量的改性基体。
- (3)打开真空泵 4 抽真空,通过广口瓶 3 观察并控制试验进程。
- (4)若基体进入广口瓶 3 中,表明基体已浸润碳纤维丝。
- (5)关闭真空泵 4,取出钢模具 2,对筋材进行养护,脱模。

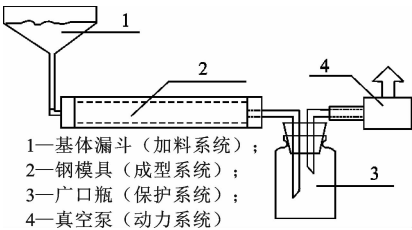


图 1 制备筋材装置示意

Fig.1 Device Schematic for Preparing Tendon

碳粉改性 CFRP 筋制备完成后,测量其电阻需要设置电极,以增强测试稳定性。电极引线选用多股铜导线,CFRP 筋横截面先用导电银胶粘贴 0.02 mm 厚的铜箔,铜箔和铜导线用焊锡焊接,保证整个截面的碳纤维丝与铜导线形成通路。电阻测试示意图见图 2。

1.4 试验方法

碳粉改性 CFRP 筋制作完成后,分别通 2,4,6,

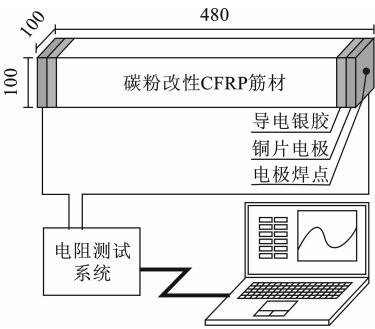


图 2 电阻测试示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic Diagram of Resistance Test (Unit:mm)
8,10 mA 的电流,采集筋材的电压信号考察其伏安特性。

对碳粉改性 CFRP 筋进行轴向拉伸试验,研究碳粉掺量对其力阻效应的影响。轴向拉伸采用位移控制,加载速度为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。试件的应变由加载机量程 50 mm 的引伸计获取。试验采用两电极法测量试样电阻,通 1 mA 恒定电流,用数字万用表采集电极间的电压信号,拉伸试验见图 3。

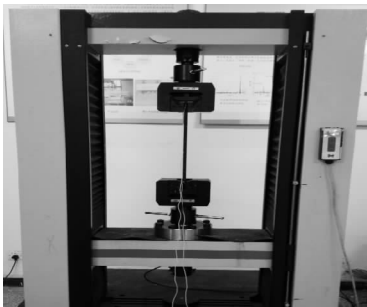


图 3 拉伸试验
Fig. 3 Tensile Test

2 试验结果与分析

2.1 初始电阻

5 组试件的初始电阻 R 及电阻均值见图 4,结果表明:碳粉改性 CFRP 筋的电阻随碳粉掺量的增长有所下降,但幅度较小,未表现出文献[16],[17]的渗流特性。这是由于树脂基碳粉复合材料渗流阈值在 8%左右,而碳纤维筋材中的连续碳纤维丝含量(质量分数)已经达到 60%,远高于渗流阈值,筋材内部已经形成稳定的导电通道,因而向基体添加碳粉时电阻只会小幅降低。

图 4 中 6%碳粉掺量的筋材电阻较 8%碳粉掺量的筋材电阻反而偏低,可能是由于制备该批筋材的内部气泡等缺陷较少,脱模时对筋材的损伤较小,筋材的质量优于其他几组试件。

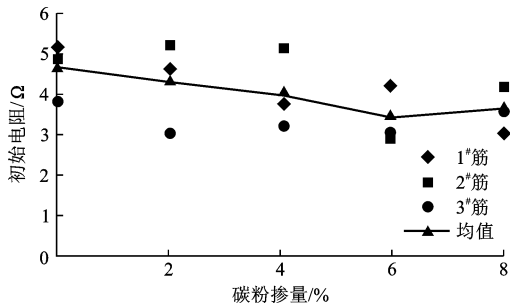


图 4 初始电阻
Fig. 4 Initial Resistance

2.2 伏安特性

图 5 为碳纤维筋材典型试件的伏安特性曲线,结果表明,电压-电流关系的线性度较好,CFRP 筋材符合欧姆定律。

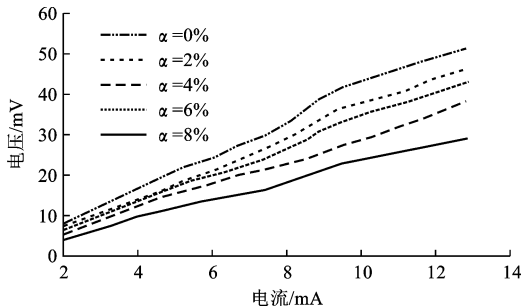


图 5 试件伏安曲线
Fig. 5 Volt-ampere Curves of Specimens

2.3 电阻变化率-应变关系

图 6 为碳粉掺量分别为 0%,2%,4%,6%,8% 的碳粉改性 CFRP 筋的电阻变化率-应变曲线,由于试件浸胶的均匀性、饱满性存在差异,试验结果中极限应变和电阻变化率-应变曲线表现出一些离散性,但整体变化规律仍具有较好的一致性。

试验结果表明,碳粉改性 CFRP 筋的电阻随应变的变化存在 3 个阶段:

(1)开始阶段,电阻变化率随应变的变化较快,且线性较好。该阶段处于低应力水平,轴向碳纤维是荷载的主要承担者,自然微弯曲状态的碳纤维在拉力作用下变顺直,同时碳纤维受力发生变形,导致碳粉改性 CFRP 筋的电阻变化率较高。

(2)应变超过 1.5%后,随着应变的增大,电阻变化率的增长速度有所降低,且曲线出现波动。该阶段应力相对较大,碳纤维继续发生几何变形,少量碳纤维会被逐根、逐束拉断,引起电阻的波动,但是筋材中仍存在大量稳定通路,导致碳粉改性 CFRP 筋电阻变化率随应变的变化较前阶段有所降低。

(3)最后阶段,应变超过 2.7%后,电阻变化率

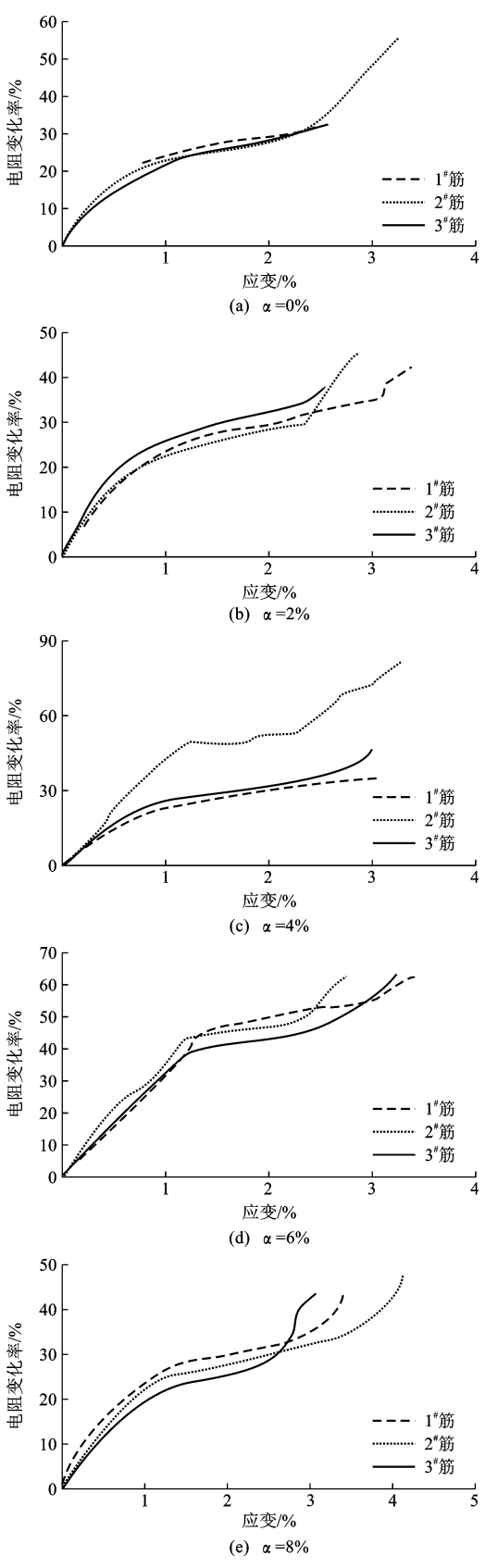


图 6 不同碳粉掺量的电阻变化率-应变曲线

Fig. 6 Resistance Change Rate-strain Curves of Different Carbon Powder Dosages

随应变快速增长直至筋材破坏,极限应变在 3%~5% 范围内,最大电阻变化率为 35%~60%,与文献 [14],[15] 的结果接近(电阻变化率范围为 30%~45%)。该阶段处于高应力水平,大量碳纤维被拉断,环氧树脂基体无法承受原本由碳纤维承受的荷载,基体即刻断裂,稳定的导电通路破坏,电阻变化率随应变快速增长。

2.4 灵敏度

力阻效应的灵敏度 K 是传感元件研发的一个重要指标,用来表示单位应变引起的电阻变化率,其计算公式为

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} \tag{1}$$

式中: ϵ 为应变; dR 为电阻变化量。

可见,灵敏度 K 受到电阻变化量、初始电阻和应变因素影响。为研究碳粉改性 CFRP 筋的灵敏度,定量分析了不同碳粉掺量的 CFRP 筋在低应力阶段的电阻变化率-应变关系,如图 7 所示。其灵敏度计算结果见图 8。

由图 7,8 可知:

(1)碳粉改性 CFRP 筋的电阻变化率-应变关系线性度较好,线性判定系数普遍高于 0.92,且试件结果的可重复性较好。

(2)碳粉改性 CFRP 筋的灵敏度值范围在 20~30 之间,掺入碳粉 CFRP 筋的灵敏度值会略有增加,但影响较小。其原因与图 4 的初始电阻受碳粉掺量影响原因一致,CFRP 筋中导电通道较为稳定,向基体添加碳粉时,不同应力水平下碳粉对改性 CFRP 筋电阻率变化贡献较小,即对灵敏度值影响较小。

(3)当碳粉掺量为 6% 时,碳粉改性 CFRP 筋的灵敏度值最大为 29.4,明显高于其他组试件的试验结果,与图 4 中的初始电阻规律相一致,该组筋材的质量相对较好。

3 结 语

(1)碳粉改性 CFRP 筋的初始电阻随碳粉掺量的增长有所下降,但幅度较小。

(2)碳粉改性 CFRP 筋的电阻变化率随应变变化存在 3 个阶段:低应力水平阶段电阻变化率随应变的变化较快,且线性较好;应变增大后电阻变化率随应变的变化速度有所降低,并且曲线出现波动;高应力水平阶段电阻变化率随应变快速增长,极限应变为 3%~5%,最大电阻变化率为 35%~60%。

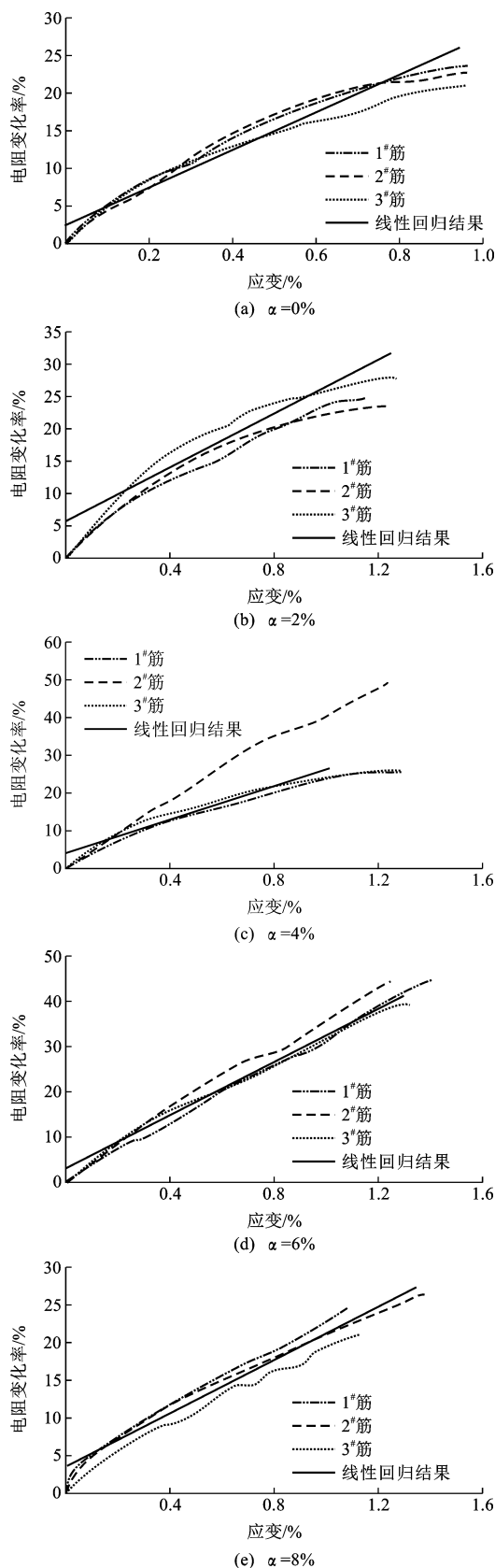


图 7 低应力阶段不同碳粉掺量的电阻变化率-应变曲线

Fig. 7 Resistance Change Rate-strain Curves with Different Carbon Powder Dosages at Low Stress Level

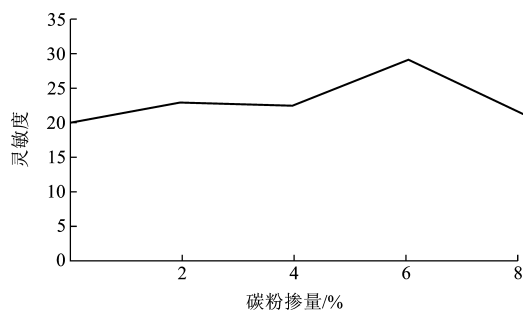


图 8 低应力阶段不同碳粉掺量 CFRP 筋的灵敏度
Fig. 8 Sensitivity of CFRP Tendons at Low Stress Level

(3)低应力水平阶段碳粉改性 CFRP 筋的电阻变化率-应变关系线性较好,线性判定系数在 0.92 以上,灵敏度值在 20~30 之间,但碳粉掺量对碳纤维筋材的灵敏度值影响较小。

参考文献:

References:

- [1] PENG Q, LI Y, HE X, et al. Interfacial Enhancement of Carbon Fiber Composites by Poly (Amido Amine) Functionalization[J]. Composites Science and Technology, 2013, 74: 37-42.
- [2] ARAI M, MATSUSHITA K, HIROTA S. Criterion for Inter Laminar Strength of CFRP Laminates Toughened with Carbon Nano Fiber Interlayer[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(7): 703-711.
- [3] 刘荣桂, 李成绩, 龚向华, 等. 碳纤维斜拉索的动力参数特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(8): 1284-1288.
LIU Rong-gui, LI Cheng-ji, GONG Xiang-hua, et al. Analysis of Dynamic Properties for CFRP Stayed Cables[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(8): 1284-1288.
- [4] KWON D J, WANG Z J, CHOI J Y, et al. Interfacial Evaluation of Carbon Fiber/Epoxy Composites Using Electrical Resistance Measurements at Room and a Cryogenic Temperature[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 72: 160-166.
- [5] 刘荣桂, 郭青, 陈蓓, 等. 几何非线性效应下的 CFRP 索斜拉桥动力特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2): 59-64.
LIU Rong-gui, GUO Qing, CHEN Bei, et al. CFRP Cable-stayed Bridge's Dynamic Properties with Geometric Nonlinear Effect Considered[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(2): 59-64.
- [6] AWAL A, CESCUTTI G, GHOSH S B, et al. Interfa-

- cial Studies of Natural Fibre/Polypropylene Composites Using Single Fibre Fragmentation Test (SFFT)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(1): 50-56.
- [7] FRISCH M. Conceptual Problems in Classical Electrodynamics: No More Toils and Trouble? [J]. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2013, 44(4): 527-531.
- [8] GRADO-CAFFARO M A, GRADO-CAFFARO M. Analytical Determination of the Fermi Velocity in Multi-walled Carbon Nanotubes[J]. Physics Letters A, 2008, 372(45): 6770-6772.
- [9] LIU L, MA P C, XU M, et al. Strain-sensitive Raman Spectroscopy and Electrical Resistance of Carbon Nanotube-coated Glass Fibre Sensors[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(13): 1548-1555.
- [10] BAKIS C E, NANNI A, TEROSKY J A, et al. Self-monitoring, Pseudo-ductile, Hybrid FRP Reinforcement Rods for Concrete Applications[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(6): 815-823.
- [11] VAVOULIOTIS A, PAIPETIS A, KOSTOPOULOS V. On the Fatigue Life Prediction of CFRP Laminates Using the Electrical Resistance Change Method[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(5): 630-642.
- [12] WANG S K, KOWALIK D P, CHUNG D D L. Self-sensing Attained in Carbon Fiber Polymer-matrix Structural Composites by Using the Interlaminar Interface as a Sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(3): 570-592.
- [13] YANG C Q, WU Z S. Self-structural Health Monitoring Function of RC Structures with HCFRP Sensors [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(10): 895-906.
- [14] 欧进萍, 王 勃, 张新越, 等. 混凝土结构用 CFRP 筋的感知性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2004, 20(6): 47-51.
- OU Jin-ping, WANG Bo, ZHANG Xin-yue, et al. Experimental Study on Self-sensing Properties of CFRP Bars for Concrete Structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 20(6): 47-51.
- [15] 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(2): 220-224.
- WANG Bo, OU Jin-ping, ZHANG Xin-yue, et al. Experimental Research on Sensing Properties of CFRP Bar and Concrete Beams Reinforced with CFRP Beas [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(2): 220-224.
- [16] 乐正想, 梅启林, 黄志雄. 纳米碳纤维复合材料的电阻-应变传感性能研究[J]. 功能材料, 2007, 38(增): 576-577.
- YUE Zheng-xiang, MEI Qi-lin, HUANG Zhi-xiong. Study on Carbon Nanofibers Composite Material's Resistance-strain Sensor Property [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(S): 576-577.
- [17] 季小勇. 纳米炭黑环氧树脂基复合材料应变和裂缝感知特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- JI Xiao-yong. Epoxy Matrix Composites Filled with Nano-carbon Black and Their Strain and Crack Monitoring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.