

文章编号:1671-6833(2011)01-0047-04

## 碳纤维增强水泥基复合材料(CFRC)的压敏特性

王振军<sup>1,2</sup>, 李克智<sup>1</sup>, 王 闯<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 长安大学 材料学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 论述了碳纤维增强水泥基复合材料(CFRC)压敏特性的研究进展, 阐释了 CFRC 具有压敏特性的机理, 明确了组成材料、成型工艺和加载方式等对 CFRC 压敏特性的影响规律, 分析了应力条件下 CFRC 的压敏特性及其在结构健康监测中的应用, 展望了 CFRC 压敏特性的发展与应用方向, 提出了 CFRC 压敏特性的研究重点。

**关键词:** 碳纤维增强水泥基复合材料(CFRC); 压敏特性; 影响因素; 结构健康监测

**中图分类号:** TU528

**文献标志码:** A

### 0 引言

在普通水泥基复合材料(Ordinary Cement Based Composites, 简称为 OCC)中掺入少量的短切碳纤维, 形成碳纤维增强水泥基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Cement Based Composites, 简称为 CFRC)极大地改善了复合材料的导电性能, 并使其对变形有很高的电阻敏感性, 形成智能结构材料, 使得智能材料与结构作为一个新颖的概念在结构非破损性监测中发挥了较好的作用。利用 CFRC 压敏特性作用于土木结构健康监测的传感器, 不仅可克服传统传感器耐久性低和稳定性差的缺点, 而且其低廉的造价和简单的埋设工艺, 使其有望成为土木结构健康监测的理想传感器之一。在路面混凝土中应用, 可根据应力-电阻的变化, 智能监测车辆的超载和速度等参数, 有望成为一种智能道路路面材料, 为交通管理的智能化提供材料基础。

### 1 CFRC 的压敏特性

#### 1.1 CFRC 的压敏性

在水泥基体中加入短切碳纤维, 其电阻会随着压应力的变化呈现出规律性变化, 具有自感知内部应力、应变和损伤程度的功能, 这就是压敏性, 于 1993 年首先被 Chung 课题组发现<sup>[1-2]</sup>。毛起焰<sup>[3]</sup>通过研究应力条件下复合材料的电阻率

变化规律, 阐明 CFRC 的压敏性能。结果表明, 普通水泥砂浆受到应力作用时, 电阻几乎没有明显变化, 如图 1 所示; 而 CFRC 电阻却有明显的变化, 初始施压时电阻逐渐减小, 然后趋于平缓, 最后迅速增大, 图 2 所示。

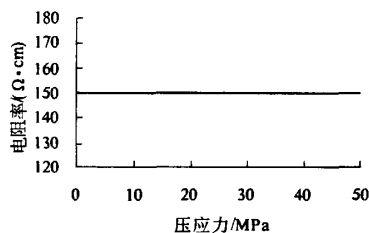


图 1 OCC 的压应力-电阻率变化图

Fig. 1 Relation chart between compression stress and resistance ratio of OCC

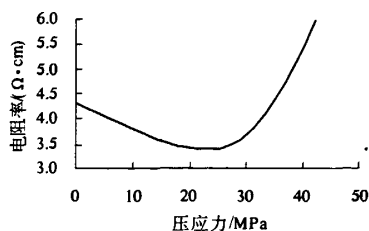


图 2 CFRC 的压应力-电阻率变化图

Fig. 2 Relation chart between compression stress and resistance ratio of CFRC

#### 1.2 CFRC 的压敏机理

对于 CFRC 的压敏机理, 普遍接受的结论是

收稿日期: 2009-09-12; 修订日期: 2010-10-17

基金项目: 凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)自主研究课题资助项目(32-PT-2009); 中国博士后科学基金资助项目(20100471631)

作者简介: 王振军(1978-), 男, 长安大学副教授, 博士, 博士后; E-mail: wangzhenjun029@163.com.

CFRC 受压后,内部电阻发生变化.如毛起焰<sup>[3]</sup>研究认为 CFRC 受压后,内部原有缺陷裂纹在压力作用下闭合,电子有可能越过较窄的势垒,从一根纤维跃迁至另一根纤维,电阻逐渐减小;随着压力增大,压力引起新裂纹产生,电阻在一定压力范围内变化不大,处于平衡阶段.随着压力增大,电阻的变化存在可逆感应区、平衡区和剧增区,反映了试块内原有缺陷裂纹的闭合张开、新裂纹的产生和裂纹扩展破坏三个阶段.在较大压力下循环加载直至破坏,当压力大到一定值后,电阻由减小转为增大,说明有新裂纹产生;卸载后电阻不恢复原值,是不可逆过程.

另一方面,还可以从 CFRC 受力的作用后,内部质点电荷不均匀而产生导电现象进行解析.如郑立霞<sup>[4]</sup>用图 3 a)表示质点在某方向上的投影,此时材料不受外力作用,正负电荷的重心重合,总电矩等于零,因而表面不带电荷.当沿某一方向受到外力作用时,材料就会发生由于形状改变而导致的正、负电荷重心不重合,即电矩发生了变化,从而引起了表面的荷电现象,导致材料两端表面出现符号相反的束缚电荷,即产生了压敏效应,如图 3(b)和(c)所示.

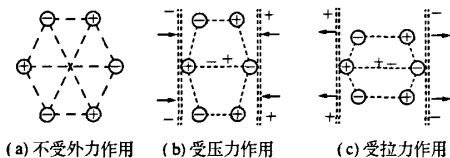


图 3 压敏性能产生机理示意图

Fig. 3 Pictures of compression sensitivity mechanism

## 2 CFRC 的压敏特性影响因素

### 2.1 组成材料

碳纤维的掺量和长度对 CFRC 试件压敏性有重要影响,只有当适当掺量的纤维均匀分散在水泥基体,被基体隔开且又相距邻近时,才有最好的压敏性,且最佳掺量与纤维长径比有关.韩宝国<sup>[5]</sup>采用正交试验研究了分散剂等对碳纤维水泥浆扩展度和 CFRC 导电性的影响,以及复合 6 mm 长碳纤维水泥石的压敏性.结果表明:CFRC 配合比决定了纤维和水泥粒子的分散性,也最终决定了材料的导电性;碳纤维长度越长,掺量越大,导电性的改善效果越好;一次加载至破坏前,掺有 0.18% ~ 0.5% 碳纤维的 CFRC 的电阻率具有 17% ~ 35% 的线性降低趋势.

Wang<sup>[6]</sup>用包含 10% 体积碳纤维的环氧树脂

作为 0.2 mm 厚的包裹层被用于水泥砂浆中作为应力敏感器,结果表明,一定范围内,压敏性能随着应力的增大而增加,而且压敏性能随着应力方向的变化具有可逆性,但只是部分的可逆. Wen<sup>[7]</sup>掺加 2.6% ~ 7.4% 体积掺量的碳纤维 CFRC 具有压敏性能,且与 CFRC 的模量相关.最近,美国 Chung 课题组<sup>[8]</sup>在 Materials and Structures 杂志上发表关于 CFRC 压敏性能的最新研究成果,表明硅酸钠液体的掺加能够提高 CFRC 内部  $\text{Na}^+$  浓度,更加明显地改善 CFRC 的压敏性能.

### 2.2 成型工艺

黄世峰<sup>[9]</sup>研究表明较大成型压力制备的复合材料孔隙率明显低于较小成型压力制备的复合材料;循环载荷下,碳纤维水泥基复合材料电阻的相对变化与载荷之间呈现明显的一一对应关系. Rez<sup>[10]</sup>研究了碳纤维体积掺量、循环荷载以及平行与垂直加载方式对成型早期和后期 CFRC 电阻的变化规律. Zhu<sup>[11]</sup>介绍了在 CFRC 中埋置和不埋置钢筋棒时承受三分点弯曲试验过程中的压敏性能,结果表明,CFRC 在弯拉力作用下,压敏性能是部分可逆的.

### 2.3 加载方式

吴献<sup>[12]</sup>研究表明,对 CFRC 试件施加循环荷载,在开始阶段,相同荷载下电压重复性比较差;在加载后期,电压重复性较好;在荷载变化幅度相同的情况下,荷载较小时电压变化值大于荷载较大时电压变化值. Mao<sup>[13]</sup>发现在压应力作用下,CFRC 由于内部变形而表现出压敏性能,当恒定的应力突然施加或卸载时,压敏性能随 CFRC 内部电阻的变化而变化,并基于隧道效应和水泥浆体微观结构,提出了 CFRC 的微观力学模型,来解析恒荷载和循环荷载作用下 CFRC 压敏性能的变化机理.王建军<sup>[14]</sup>构建了 CFRC 涂层混凝土上偏心柱模型,采用四电极测电阻法,极大提高了敏感性,得出 CFRC 的输出差动电压与结构所受偏心弯矩及偏心应变具有较高的敏感性. Wang<sup>[15]</sup>研究了碳纤维增强铝酸盐水泥 (CFSC) 的压敏效应和机理,结果表明,当压应力小于 5 MPa 时,相对介电常数降低;当压应力在 5 ~ 60 MPa 时,相对介电常数呈线性增长;当压应力大于 60 MPa 后,由于试件的受压破坏,相对介电常数急剧下降.

## 3 CFRC 压敏特性与结构健康监测

### 3.1 应力条件下 CFRC 的压敏特性

Sun<sup>[16]</sup>用固-液界面双层模型来描述 CFRC

的压敏性能,为智能混凝土结构的发展提供了新方法.Wen 对应力条件下 CFRC 的压敏性能进行了系统研究,取得了如下成果:认为由于拉伸过程中纤维-基体界面的变化,CFRC 的电阻率升高,但在碳纤维聚集区域,电阻率升高;当压应力达到 70% 以上,CFRC 纵向电阻尺寸因子(微小应力单元电阻变化)减小,应力达到 60% 以上时,横向电阻尺寸因子开始减小,随着试件尺寸的变大,两方向上的电阻尺寸因子都急剧减小<sup>[17]</sup>;2006 年首次提出压敏性能的理论模型,基于裂缝发展过程中,裂缝处纤维的轻微拉出和纤维-基体界面处电阻的持续增长,理论模型与实际试验结果具有较好的一致性<sup>[18]</sup>;研究了 CFRC 在三分点弯曲试验过程中,空间电阻的变化情况,测试试件表面和底面电阻值,底部电阻随应力-应变的增大而增大,且变化情况大于表面电阻,表面电阻更能够有效地表明,应力条件下,CFRC 电阻值的变化规律<sup>[19]</sup>.Huang<sup>[20]</sup>通过压制成型制备了 CFRC,并研究了其压敏性能;结果表明,在 CFRC 中存在明显的正温系数和负温系数,承受 10 MPa 压力时 CFRC 的电阻率对温度的敏感性明显高于承受 2 MPa 压力时,且前者的临界温度区范围较小;较大应力条件下,CFRC 有较大的电阻率变化,这对于结构的实时、动态健康检测非常重要.

### 3.2 压敏性在结构健康监测中的应用

Chen<sup>[21]</sup>认为 CFRC 可以将传统水泥基材料在抗拉荷载下单一裂纹的宏观开裂模式转化为多条细密裂缝的微观开裂模式,其极限拉伸应变可达 2% 甚至达 6%,具有显著的韧性特征和优良的耐久性能,为结构破坏状态的机理分析提供有利条件.郑立霞<sup>[22]</sup>通过在混凝土结构表面铺 CFRC 层,测试压力条件下 CFRC 的压敏性能,为混凝土结构无损检测提供一种新方法.结果表明,碳纤维用量增加,CFRC 电阻率下降,这使得通过测试 CFRC 单轴压缩下的电阻率变化来评价结构的智能性能成为可能.Fu<sup>[23]</sup>研究了 0.24% 碳纤维体积掺量的水泥砂浆的轻微疲劳破坏的自我诊断性能,结果表明,当应力小于 10% 疲劳寿命时,疲劳致使水泥砂浆的电阻下降 2%,而且这种变化是不可逆的,应力循环越大,CFRC 的电阻下降越大,他们提出 CFRC 电阻下降是由于 CFRC 内部碳纤维连接点断裂所致的观点.

## 4 结论

CFRC 作为一种具有自感应能力的材料,已

在智能感应材料得到应用,并为结构无损检测提供一种新途径.其压敏特性受组成材料、成型工艺和加载方式等因素影响而产生变化;笔者认为还应该在以下两个方面加强研究:(1)CFRC 压敏性能受如碳纤维用量、分散程度等组成材料因素影响变化较大,存在不确定性,可以通过模型描述或数值模拟等方法定量地、准确地给出不同条件下电阻率的变化规律或值域,对于 CFRC 压敏特性的预估和应用非常重要;(2)碳纤维增强砂浆由于细骨料颗粒较小且相对均匀,压敏特性相对稳定,已在结构中作为快速修补材料得到应用,但结构工程中使用较多的是混凝土,而混凝土的性能受粗集料等因素影响而波动较大,使得国内外对于图纤维增强混凝土压敏特性研究和应用相对薄弱.

## 参考文献:

- [1] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a thermometer [J]. Cement Concrete Research, 1999, 29(6): 961-965.
- [2] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement [J]. Carbon, 2007, 45(4): 710-716.
- [3] 毛起焰,赵斌元,沈大荣,等.水泥基碳纤维复合材料压敏性的研究[J].复合材料学报,1996,13(4): 8-11.
- [4] 郑立霞,宋显辉,李卓球. CFRC 材料在准三向受压情况下的压敏性研究[J].硅酸盐通报,2004,(4): 40-43.
- [5] 韩宝国,关新春,欧进萍.碳纤维水泥基材料导电性与压敏性的试验研究[J].材料科学与工艺,2006,14(1): 1-4.
- [6] WANG X J, CHUNG D D L. Short carbon fiber reinforced epoxy coating as a piezoresistive strain sensor for cement mortar [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 1998, 71(3): 208-212.
- [7] WEN Si-hi, CHUNG D D L. Piezoresistivity in continuous carbon fiber cement-matrix composite [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(3): 445-449.
- [8] HUANG C Y, WANG S K, CHUNG, D D L. Cement-based piezoelectret [J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 541-557.
- [9] 黄世峰,徐东宇,徐荣华,等.碳纤维/水泥基复合材料微观结构及机敏特性[J].复合材料学报,2006, 23(4): 95-99.
- [10] REZA F. Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites [J]. Journal of Materi-

- als in Civil Engineering, 2003, 15 (5): 476 - 483.
- [11] ZHU S R, CHUNG D D L. Theory of piezoresistivity for strain sensing in carbon fiber reinforced cement under flexure[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(15): 6222 - 6233.
- [12] 吴献, 周志强, 王丽娜. 碳纤维水泥基复合材料在循环荷载作用下的压敏性[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 290 - 293.
- [13] MAO Q Z, CHEN P H, ZHAO B Y, et al. A study on the compression sensibility and mechanical model of carbon fiber reinforced cement smart material[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1997, 10(4): 338 - 344.
- [14] 王建军, 宋显辉, 李卓球. 碳纤维水泥基复合材料压敏性应用研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 100 - 103.
- [15] SHOUDE W, SHIFENG H, XIN C, et al. Piezoelectric effect of carbon fiber-sulfo-aluminate cement composites [J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41 (26): 3133 - 3141.
- [16] SUN M Q, LIU Q P, LI Z Q, et al. A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30 (10): 1593 - 1595.
- [17] WEN S H, CHUNG D D L. Effects of strain and damage on strain-sensing ability of carbon fiber cement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18 (3): 355 - 360.
- [18] WEN S H, CHUNG D D L. Model of piezoresistivity in carbon fiber cement[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (10): 1879 - 1885.
- [19] WEN S H, CHUNG D D L. Spatially resolved self-sensing of strain and damage in carbon fiber cement [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41 (15): 4823 - 4831.
- [20] HUANG S F, XU D Y, JUN C, et al. Smart properties of carbon fiber reinforced cement-based composites [J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41 (1): 125 - 131.
- [21] CHEN B, WU K, YAO W. Piezoresistivity in carbon fiber reinforced cement based composites [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2004, 20 (6): 746 - 750.
- [22] 郑立霞, 宋显辉, 李卓球. 碳纤维增强水泥压敏效应和温敏效应的解耦[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(4): 534 - 537.
- [23] FU X L, CHUNG D D L. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (1): 15 - 20.

## Compression Sensitivity of Carbon Fiber Reinforced Cement Based Composites (CFRC)

WANG Zhen-jun<sup>1,2</sup>, LI Ke-zhi<sup>1</sup>, WANG Chuang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The research advances of compression sensitivity of carbon fiber reinforced cement based composites (CFRC) were presented. The compression sensitivity mechanism was discussed. Influence rules of raw materials, moulding techniques and loading ways on compression sensitivity of CFRC were pointed out. Compression sensitivity of CFRC under stresses and their utilization in structure health monitoring were analyzed. The developments and the utilizations of CFRC compression sensitivity were forecast and their key studies were put forward.

**Key words:** carbon fiber reinforced cement based composites (CFRC); compression sensitivity; influence factor; structure health monitoring