

## Study on pressure-sensitive characteristics of cement paste of carbon fiber reinforced concrete under cyclic load

Dong Haifei\* Cheng Wei

Huaxin Cement Co., Ltd., Wuhan

**Abstract:** Under the cycle of load, the pressure sensitivity of the cement paste sample containing CCCW (including active chemical substances) was studied. And then the mechanism of pressure sensitivity with different content of carbon fiber treated by surface oxidation was discussed. Finally, the reasons of different pressure sensitivity among three kinds of carbon fiber cement pastes were analyzed. The result showed that: carbon fiber treated by oxidation of concentrated nitric acid and adding CCCW material can improve the resistant stability of the carbon fiber-reinforced concrete (CFRC) under the action of cyclic load. The corresponding relationship between stress and resistance existed with different content of carbon fiber, and it came to the conclusion that when the content of carbon fiber was up to the amount of 1.2wt. % cement, the pressure sensitivity was the best.

**Keywords:** J carbon fiber - reinforced cement - based composite; CCCW materials; electrical resistivity; pressure sensitivity

Received: 2019-08-02; Accepted: 2019-09-05; Published: 2019-09-23

# 碳纤维混凝土水泥净浆在循环荷载作用下的压敏特性研究

董海飞\* 程 伟

华新水泥股份有限公司, 武汉

邮箱: dongmu4050052@163.com

**摘 要:** 研究了内掺含活性化学物质的 CCCW 材料及碳纤维表面氧化处理后不同碳纤维掺量下水泥净浆试样在循环荷载作用下的压敏特性, 并讨论了其压敏机理, 分析了三种碳纤维掺量下试样压敏性能差异产生的原因。实验结果表明: 添加 CCCW 材料和使用经浓硝酸处理后的碳纤维混凝土试样, 在循环荷载下其电阻稳定性得到了有效提高, 并且不同碳纤维掺量下试样的电阻和应力均存在较好的对应关系, 碳纤维掺量为水泥质量的 1.2 % 时, 试样的压敏性最好。

**关键词:** 碳纤维水泥基复合材料; CCCW 材料; 电阻率; 压敏性能

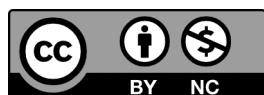
收稿日期: 2019-08-02; 录用日期: 2019-09-05; 发表日期: 2019-09-23

---

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



碳纤维混凝土不仅施工工艺简单、与混凝土结构相容性好, 而且具备良好的力学性能和导电性。研究表明, 利用碳纤维混凝土的压敏性, 可以实现大型

土木工程结构和基础设施的健康监测 [1]。由于长期的荷载作用,必然会导致碳纤维混凝土产生损伤和微裂纹。内含活性化学物质的 CCCW 材料在潮湿条件下可以对水泥基复合材料的表面及内部裂纹进行修复,能够提高混凝土的密实度和力学性能 [3] [4] 故有望较好地兼顾力学与导电两方面性能的要求。在总结相关研究成果的基础上 [5] [6] [7] 笔者近年来对碳纤维水泥基复合材料的研究发现,通过添加 CCCW 材料和对碳纤维实施表面氧化处理等方法,在适宜的碳纤维加入量条件下可获得碳纤维水泥净浆试块电学性能的稳定。本文拟对该材料的压敏特性进行研究,并对试验结果的影响因素进行分析探讨。

## 1 试验原料及方法

### 1.1 原材料及主要实验设备

本实验采用普通硅酸盐水泥 425 号(湖北华新水泥股份有限公司生产),自来水,分散剂为羧甲基纤维素钠(CMC),消泡剂为磷酸三丁酯,加人量分别为水泥重量的 0.4% 和 0.03%,PAN 基短切碳纤维,碳纤维的性能指标如下:直径  $7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ , 抗拉强度  $\geq 1.95 \text{ GPa}$ , 拉伸模量  $\geq 175 \text{ GPa}$ , 电阻率  $25.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ , 密度  $\geq 1.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。使用 CCCW 材料(加拿大进口)作外加剂。

所用测试设备主要为 KEITHLEY2007 直流稳压电源,Victor9806<sup>+</sup> 数字万用表,2700 多通道数据自动采集处理系统。

### 1.2 碳纤维的表面处理

将碳纤维用浓硝酸浸泡进行氧化处理 [11] 待处理 2 h 后用蒸馏水反复冲洗,然后在  $110^\circ\text{C}$  烘箱内烘干。

### 1.3 碳纤维水泥试样制备参数

水灰比 W/C 为 0.40, CCCW 加人量为水泥重量的 3% 碳纤维的加人量分别为水泥重量的 1.0%、1.2% 和 2.0%、碳纤维的长度为 5mm、试样尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ , 每组试样为 6 个。

## 1.4 碳纤维水泥试样压敏性测试方法

碳纤维水泥试样电阻测试采用四电极法, 试样预先用砂纸磨平至要求尺寸, 用无水乙醇洗净表面间隙, 然后用银粉导电胶在试样表面制成电极, 4 个电极位于四个与长度方向垂直的横截面上。将试样置于 INSTRON 万能材料试验机上, 试样上下受压表面用硬纸与材料试验机压座和压头隔离, 即构成压敏性测试系统, 以测定碳纤维水泥净浆试块在 5 次循环加载下的电阻变化情况。加载的最大应力为 12.5MPa, 低于最大应力的 30%, 加载和卸载速率控制为 0.42 MPa/s, 测试环境条件为 RH75% 和 20 °C。

## 2 结果与讨论

碳纤维混凝土的压敏性是指碳纤维混凝土的电阻率会随着压应力的变化而变化。试样的电阻率与压应力之间有着较好的对应关系。最初加载时试样的电阻率较小, 每次循环的起始电阻率随循环次数的增多而增大, 但增加的幅度逐渐减小, 压敏性能一般。试样的最初电阻率较大, 随循环次数增加, 试样的起始电阻率变化较小, 但在后两循环加载过程中, 最大加载时对应的电阻率也略有减少。此时试样的导电性能比较稳定且重复性能良好, 但在整个加载或卸载期间电阻率上下跳动呈“锯齿形”变化, 导致压敏性较差。结果显示, 在每个循环中, 试样电阻率和应力都有着——对应的关系且电阻率的变化基本可逆。加载时, 电阻率随应力的增大而单调减小; 卸载时则相反。即电阻率随应力单调变化, 此时试块的压敏性最稳定。

出现以上特征是与碳纤维水泥基复合材料压敏性机理分不开的 [8] [9]。目前对此方面的解释有 2 种: 1) 国外学者认为碳纤维水泥基复合材料在加载、卸载过程中碳纤维会从水泥基体中被挤入和拔出, 从而导致碳纤维与水泥基体间接接触电阻减小和增大, 表现出试样电阻的相应减小和增大。同时由于碳纤维的挤入和拔出在卸载后不可能恢复到加载前状态, 电阻率的相对变化会出现一定程度的增减。2) 国内学者倾向于量子力学中描述粒子运动的隧道效应来解释压敏性, 认为受到压应力作用时碳纤维水泥基材间隔变薄, 纤维间绝缘势垒相

对减小,隧道电流增加,试样电阻相应减小;而卸载时情况正好相反。本试验结果与上述结论基本一致,即加载时随压应力的增大,电阻总体呈下降趋势;卸载时随压应力的减小,电阻保持上升。对于含碳纤维的水泥基材料,导电相主要是碳纤维和水泥孔隙中的碱性溶液组成,电阻率较小,而且由千纤维的阻裂和增韧作用,基体中的微裂纹数量大幅下降。在材料的弹性变形阶段,材料内部的碳纤维也产生弹性应变,使得材料的电阻变化率与内部所受应力呈线性关系。

事实上,影响碳纤维水泥基复合材料的压敏特性的因素很多,包括水泥基体的性质和显微结构、碳纤维的性质及其分散性、试样的制备工艺等。下面仅就 CCCW 材料的加人 和使用浓硝酸实施表面氧化处理碳纤维对碳纤维水泥基复合材料的压敏性的影响做一简要分析。

加人 CCCW 的水泥基体的性质和显微结构对复合材料导电性的影响与孔结构的减少有关。这是由于水泥基体的内部孔隙被进一步地填充,离子的迁移空间减小,导致导电能力减弱,从而使极化效应减弱,电阻值稳定性提高。同时,材料密实度的提高使得基体与碳纤维的界面粘接的更好,故可有效提高材料的压敏稳定性。

对碳纤维表面进行氧化处理可以改善碳纤维表面疏水性,提高碳纤维对水的浸润性[10]。由于碳纤维表面有一层胶料,因此碳纤维在水中呈现表面疏水性。采用浓  $\text{HNO}_3$  浸泡 2 h 处理碳纤维可有效改善碳纤维的性质。由千碳纤维表面处理后增加了羧基与狭基官能团的数量,使得碳纤维表面活性基团的数目增多,增强了碳纤维表面的活性,也可提高碳纤维的分散性[11]。经过表面处理的碳纤维的分散性能得到增强,也有利于增强试样电阻率的稳定性。因此,使用表面氧化处理过的碳纤维水泥净浆试样,碳纤维界面的性能得到很大的提高,随着循环荷载的继续,碳纤维和混凝土的界面仍能保持很好的粘接,导致电阻率在每个循环的最大值和最小值基本不变,从而也可提高 CFRC 材料的压敏稳定性。

由上述讨论可知,添加含活性化学物质的 CCCW 外加剂、使用合适掺量的浓  $\text{HNO}_3$  浸泡 2 h 的碳纤维,可以较好的获得电阻性能及压敏性能稳定的碳纤维

水泥基复合材料。碳纤维水泥基材料的电阻变化与所受荷载呈良好的线性关系,其机敏特性反应了材料内部损伤状况丰富的信息。根据此特性可以及时预报水泥基材料内部潜在的损伤隐患,有效的防止脆性破坏。

### 3 结论

1) 经浓硝酸氧化处理的碳纤维分散性得到了增强,掺加 CCCW 材料和使用氧化处理碳纤维,能使基体与碳纤维界面有很好的粘接,有利于 CFCC 试样电阻率和压敏性的稳定性。

2) 不同碳纤维含量下试样的电阻和应力存在一一对应关系,即压应力增大,电阻率降低;压应力减小,电阻率升高。当碳纤维的加入量为水泥加入量的 1.2% 时,试样的压敏特性最好。

### 参考文献

- [1] 谢建宏,张为公智能材料结构的研究与发展[J]. 传感技术学报,2004,3,(1): 164-167.
- [2] Chen P W, Chung D D L. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of nondestructive flaw detection [J]. Smart Materials and Structures, 1993, 2(1): 22-30.
- [3] 唐焯娟,吴笑梅、攀粤明. 水泥基渗透结晶型防水材料的研究[J]. 广东建材,2007,(11): 48-52.
- [4] 江世永,蔡涛,李雪阳. 碳纤维复合材料筋高韧性水泥基复合材料柱拟静力试验对比研究[J]. 工业建筑,2018(9).
- [5] 毛起癭,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
- [6] 王大鹏,侯子义. 碳纤维表面处理对碳纤维混凝土压敏性的影响[J]. 黑龙江工程学院学报,2004,18,(3): 5-7
- [7] 韩宝国,关新春,欧进萍. 导电掺和料形态与水泥基材料压敏性的相关性[J]. 复合材料学报,2004,21,(3): 137-141

- 
- [ 8 ] Wu K R, Chen B, Yao W. Smart properties of carbon fiber reinforced cement based composite [ J ] . Journal of Tongji University, 2002, 30 ( 4 ) : 456-464
- [ 9 ] 李卓球, 吴菁, 宋显辉, 等. 基于界面效应的碳纤维混凝土压敏性的研究 [ J ] . 混凝土, 2007, ( 6 ) : 10-12
- [ 10 ] SHUI Zhonghe, ZHAO Zhengqi, LI Chao et al. Effects of Surface Treatments on the Dispersion Uniformity of Carbon Fibers in Cement Paste [ J ] . Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25 ( 12 ) : 17-19
- [ 11 ] 夏立鹏, 张黎飞, 郑愚. CFRP 增强工程水泥基复合材料桥面连接板的结构和性能 [ J ] . 复合材料学报, 2019, 36 ( 4 ) : 848-859.