

碳纤维水泥基复合材料温敏特性研究

刘小艳<sup>1,2</sup>, 姚 武<sup>1</sup>, 吴科如<sup>1</sup>

( 1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 200092; 2. 河海大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210098 )

**摘要** : 简单介绍了碳纤维水泥基复合材料的制备及其电阻率测试方法, 研究了不同掺量的碳纤维水泥基复合材料电阻率随温度变化的规律. 研究结果表明, 碳纤维水泥基复合材料具有温敏特性, 在温度升高的初始阶段, 试件电阻率随温度的升高而下降, 呈现 NTC 效应; 当温度升高到一定数值, 电阻率随温度的升高而逐渐升高, 呈现出 PTC 效应, 并且随着碳纤维掺量的变化, NTC/PTC 转变温度也发生变化. 基于试验结果, 对 NTC/PTC 效应的转变机理进行了初步探讨.

**关键词** : 碳纤维水泥基材料; 温敏特性; 智能混凝土; NTC 效应; PTC 效应

中图分类号: TU502      文献标识码: A      文章编号: 1000-198X(2007)02-0202-03

随着信息技术和材料科学的发展, 混凝土材料的多功能化、智能化已成为可能<sup>[1]</sup>. 智能混凝土是在混凝土原有组分的基础上复合智能型成分, 使混凝土材料具有自感知、自适应、自修复特性的多功能材料<sup>[2]</sup>. 调整特殊功能组分的种类和掺量, 可以满足人们对其不同的功能要求. 由于碳纤维自身良好的导电性能, 调整碳纤维的掺量, 可以使普通水泥基材料的电阻率大大降低, 使碳纤维水泥基复合材料具有良好的导电性<sup>[3-5]</sup>和电热效应<sup>[6]</sup>等特殊功能. 此外, 碳纤维水泥基材料的温度升高, 会引起其电阻率发生变化, 即碳纤维水泥基复合材料还具有温敏特性. 导电复合材料与半导体材料的温敏性能日渐成为智能混凝土的一大研究热点.

本文简单介绍了碳纤维水泥基复合材料的制备及其电阻率测试方法, 研究了不同掺量的碳纤维水泥基复合材料电阻率随温度的变化规律.

1 试 验

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, SICON 硅粉, 河砂, 细度模数为 2.6, 碳纤维, 长度 5 mm, 其物理力学性能见表 1.

1.2 试件制备及试验方法

试件为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的碳纤维水泥砂浆试块, 其配合比见表 2.

表 1 碳纤维物理力学性能							表 2 碳纤维水泥砂浆配合比				
Table 1 Physical-mechanical properties of carbon fiber							Table 2 Mixing ratio of CFRC				
直径/ μm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/ GPa	杨氏模量/ GPa	断裂伸长 率/%	碳含量 /%	电阻率/ (Ω·cm)	水泥	水	砂	硅粉	碳纤维
7.0±0.2	1.78	>3.0	220~240	1.25~1.6	>95	0.001~0.01	1000	400	1000	150	4, 6, 8, 12

采用 4 种不同的碳纤维掺量, 分别为水泥重量的 0.4%、0.6%、0.8%、1.2%, 加入硅粉是为了增强纤维的分散.

试件制作时, 首先制作碳纤维水泥砂浆块, 放置振动台振动密实后等间距地各试件中插入 4 片不锈钢电极, 再次振动 30 s, 保证电极与砂浆紧密接触, 最后放入标准养护室. 养护 24 h 后拆模, 测其电阻率, 直至电阻率随龄期变化稳定后方可试验. 电阻率测试采用四极法<sup>[7]</sup>. 电阻率测试仪器为 Fluke 高精度数字万用电表及可调稳压直流电源供应器. 温度及应变测量采用光纤光栅表面安装式传感器. Fluke 万用电表及光纤光栅传感器均可实时记录, 这样可以得到实时温度-电阻率、温度-应变关系曲线.

2 试验结果

图 1 为不同掺量的碳纤维水泥基材料的温度变化-电阻率关系 ,可见 ,碳纤维水泥基材料具有较好的温敏特性 . 试验期间室温为 26 ~ 30℃ ,该温度即为碳纤维水泥基材料的初始温度 . 在初始温度基础上升温 ,以温度升高值为横坐标 ,电阻率为纵坐标 ,得到温升-电阻率关系 .



图 1 不同掺量碳纤维水泥基材料的温升-电阻率关系

Fig.1 Relationship between temperature variation and electrical resistivity of CFRC at different mixing ratios of carbon fiber

图 2 为 0.8% 掺量碳纤维水泥基材料温度变化及其引起的微应变之 间的关系 . 从图中可以看出 ,两者近似为线性变化关系 .



从图 1 可以看出 ,低掺量( 0.4% )碳纤维水泥基材料在升温初始阶段 ,电阻率变化很小 ,温升-电阻率关系曲线开始段几乎为一个平台 ,随着温度的继续升高 ,电阻率随温度升高而增大( PTC 效应 ) . 随着碳纤维掺量的增大 ,温升-电阻率关系曲线初始段的形态开始发生变化 ,随着温度的升高 ,首先出现一个下降段 ,电阻率随温度升高而减小( NTC 效应 ) ;升高至一定温度后 ,电阻率转为随温度升高而增大 . 并且 ,随着碳纤维掺量的增大 ,NTC/PTC 效应转变的临界温度逐渐上升 ,0.6% ,0.8% ,1.2% 掺量对应的 NTC/PTC 效应转变的临界温度分别为 9℃ ,13℃ ,51℃ .

图 2 碳纤维水泥基材料温升-微应变关系( 0.8% 掺量 )

Fig.2 Relationship between temperature variation and strain of CFRC ( mixing ratio of carbon fiber : 0.8% )

之所以出现这种现象 ,是因为碳纤维水泥基材料在升温过程中 ,存在 2 个相互对立的过程 . 一方面由于温度升高 ,部分电子吸收能量被激发 ,成为载流子 ,在纤维之间跳跃 ,进行导电传输 ,从而使试件的电阻率减小<sup>[8]</sup> ,呈现 NTC 效应 ;另一方面 ,从图 2 可以看到 ,随着温度升高 ,试件自身发生体积膨胀 ,由于水泥基体的热膨胀系数大于碳纤维热膨胀系数 ,致使部分导电通路断开 ,从而使试件的电阻率增大 ,呈现 PTC 效应 . 在升温初始阶段 ,前一个过程处于主导地位 ,所以宏观上温升-电阻率关系呈现 NTC 效应 ,随着碳纤维水泥基材料温度升高到一定数值 ,体积膨胀导致电阻率增大作用的影响逐渐起主导作用 ,导致宏观上温升-电阻率关系呈现 PTC 效应 .



图 3 碳纤维水泥基材料的微观结构

Fig.3 Microstructure of CFRC

图 3 为通过扫描电镜( SEM )观察到的碳纤维水泥基材料的微观结构 . 乱向分布的不连续短切碳纤维在水泥基材料中形成了三维网状的导电网络 . 碳纤维掺量的高低 ,直接决定了这些导电网络的搭接情况 . 碳纤维掺量越低 ,碳纤维之间间距越大 ,因而载流子在纤维之间跳跃进行导电传输的难度越大 ,所以低掺量的碳纤维水泥基材料在升温初始阶段未能呈现 NTC 效应 . 另外 ,碳纤维掺量

越高,碳纤维之间间距越小,就有更多的碳纤维可以搭接形成导电网络,体积膨胀导致的导电网络断开就更不容易发生,所以,随碳纤维掺量的升高,NTC/PTC效应转变的临界温度呈增大的趋势。

### 3 结 论

a. 碳纤维水泥基复合材料具有较好的温敏特性,其温升-电阻率关系呈现明显的 NTC/PTC 效应,即在温度升高的初始阶段,试件电阻率随温度的升高而下降,呈现 NTC 效应;当温度升高到一定数值,电阻率随温度的升高而逐渐升高,呈现 PTC 效应。当碳纤维掺量较低时,没有明显的 NTC 效应。

b. 随着碳纤维掺量的增大,NTC/PTC 效应转变的临界温度呈现升高的趋势。

c. 碳纤维水泥基材料的温升-电阻率关系是由不同掺量碳纤维所形成的独特导电网络决定的。

另外,一定掺量的碳纤维水泥基复合材料在温度升高的初始阶段(NTC 效应阶段),温升-电阻率关系具有很好的重复性,升温、降温曲线几乎重合。利用碳纤维水泥基复合材料独特的温敏特性,方便地实时监测建筑物内部和周围环境温度变化,可极大地促进智能化建筑的发展。

### 参考文献:

- [1] 姚武. 高性能机敏混凝土的研究[C]//高性能混凝土研究与应用学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 21-28.
- [2] 姚武, 吴科如. 智能混凝土的研究现状及其发展趋势[J]. 新型建筑材料, 2000(10): 22-24.
- [3] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31: 141-147.
- [4] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Effect of carbon fiber grade on the electrical behavior of carbon fiber-reinforced cement[J]. Carbon, 2001, 39: 369-373.
- [5] 陈兵, 姚武, 吴科如. 用交流阻抗法研究碳纤维混凝土的导电性[J]. 材料科学与工程, 2001, 18(1): 76-79.
- [6] 孙明清, 李卓球, 毛起焰. CFRC 电热特性的研究[J]. 武汉工业大学学报, 1989(6): 72-74.
- [7] 伍建平, 姚武, 刘小艳. 导电水泥基材料的制备及其电阻率测试方法研究[J]. 材料导报, 2004(12): 85-87.
- [8] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

## Thermal-resistance characteristics of carbon fiber reinforced cement-based composites

LIU Xiao-yan<sup>1,2</sup>, YAO Wu<sup>1</sup>, WU Ke-ru<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Material Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** :An introduction was given to the methods for preparation of the carbon fiber reinforced cement-based composites (CFRC) and its electrical resistivity testing. The relationship between the electrical resistivity and temperature of CFRC at different mixing ratios of carbon fiber was studied. The result shows that CFRC is of certain thermal-resistance characteristics, and its electrical resistivity decreases with the increase of the temperature at the initial stage of temperature rise, demonstrating NTC effect of the test samples, and that the electrical resistivity increases with the rise of the temperature as the temperature rises to a certain value, demonstrating PTC effect of the test samples. It is also indicated that, with the variation of the mixing ratio of carbon fiber, the NTC/PTC transition temperature will also change. Moreover, the mechanism of transition of NTC/PTC effect was also discussed based on the experimental results.

**Key words** :carbon fiber reinforced cement-based composite; thermal-resistance characteristic; intelligent concrete; NTC effect; PTC effect