复合材料学报 第22卷 第6期 12月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 6 December 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 06-0114-06

碳纤维硫铝酸盐水泥基机敏复合材料

王守德[1,2], 黄世峰[2], 陈 文[1], 程 新[*2]
(1. 武汉理工大学 材料学院 430070; 2. 济南大学 材料学院 250022)

摘 要: 采用压制成型方法制备了碳纤维硫铝酸盐水泥基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Sulphoaluminate Cement, 简称 CFRS)。用 XRD 和孔结构分析仪对复合材料的物相和孔径与孔体积的关系进行了分析, 研究了不同碳纤维掺量对复合材料在单调压应力和循环压应力下的机敏性能的影响。XRD 和孔结构分析研究结果表明, 压制成形的试样水化 14 天硫铝酸盐水泥水化仍不完全, 试样结构致密, 孔隙率较小, 孔径基本小于 0.9 μm; 单调压应力下机敏测试性能表明, 碳纤维掺量为 0.3 %和 0.5 %的 CFRS 试样电容变化率与压应力近似成线性关系, 机敏性能较好; 循环压应力下碳纤维掺量为 0.7 %的 CFRS 试样电容变化率与循环压应力成一一对应关系, 表现出较好的机敏特性。

关键词: 碳纤维; 硫铝酸盐水泥; 机敏性能; 介电常数
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

SMART PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED SULPHOALUMINATE CEMENT

WANG Shoude[1,2], HUANG Shifeng[2], CHEN Wen[1], CHENG Xin[*2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022, china)

Abstract: Carbon fiber reinforced sulphoaluminate cement was fabricated by pressing technology; its smart properties were studied. The phases and relationship between pore diameter and pore volume were analyzed by XRD test and Poremaster analyzer. The influences of different carbon fiber contents on the smart properties of CFRS under monotone stress and cycle stress were studied. The results of pore structure analysis and XRD analysis indicate that the structure is dense, the hydration of sulphoaluminate cement is not completed and the pore diameter is mostly smaller than 0.9 μm. The monotoning stress test indicates that the fractional changes in capacity of CFRS containing 0.3 % and 0.5 % carbon fiber are linear to the stress, and having smarter properties; the cycle stress test indicates that the fractional change in capacity of CFRS containing 0.7 % carbon fiber is corresponding to the cycle stress change, and the CFRS containing 0.7 % carbon fiber has smarter properties.

Keywords: carbon fiber; sulphoaluminate cement; smart property; dielectric constant

随着土木工程结构向智能化方向发展, 加强大型土木工程结构的健康检测, 预防重要基础设施突发事故的发生已经成为土木结构的一个研究热点[1~3]。土木结构健康监测的一个重要途径是在结构关键部位埋设各种类型的传感器, 在线监测结构的受力以及材料老化状况, 进而根据已有经验, 推测结构的健康状况。但是目前传感器的性能状况却无法满足土木结构长达几十年健康监测的需要。以应用最多的传感器——电阻应变片为例, 它不仅存在抗电磁干扰性差、灵敏度低的缺点, 而且长期测量结果的准确性也受环境湿度、应变片的蠕变等多种因素的影响, 误差大、可靠性低, 同时对于结构长期寿命监测也是无法实现的。而近十年来发展迅速的光纤传感器, 虽然具有灵敏度高、柔软易于布置、适于分布传感及遥测、抗电磁干扰性强等优良性能, 但其所存在的与混凝土结构的变形匹配性

收稿日期: 2004-12-13; **收修改稿日期**: 2005-04-18
基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(03BS060)
通讯作者: 程 新, 博士, 教授, 博士导师, 从事无机非金属材料的研究 E-mail: chengxin@ujn.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

差、植入成活率低、解调设备造价高的缺点，在一定程度上限制了它在土木工程领域的大面积推广应用。如何在不大幅度提高工程造价和不改变当前施工工艺的情况下，对混凝土结构进行健康监测，已经成为土木工程领域急需解决的一个热点问题[4~8]。

近年来，基于碳纤维水泥基复合材料的压敏效应而制作的碳纤维水泥传感器得到广泛关注，为以上问题的解决带来了希望。由于其主要原材料为水泥石和少量碳纤维，造价低、耐久性与混凝土相当，与混凝土相容性好，可以象一个大骨料一样埋在混凝土当中，非常适合监测混凝土的压应力状态。对碳纤维水泥基复合材料的研究，国外主要是以美国纽约州立大学的 Chung 等学者为主，他们研究发现通过测量电阻的变化可以检测 CFRC 的微小应力损伤和对材料产生大范围破坏进行提前预警；研究了不同碳纤维处理方法和不同外掺物对 CFRC 材料压敏性能的影响；并对材料的 Seebeck 效应和阻温等温敏特性进行了研究[9~19]。目前国内的研究水平与国外相比还有一定差距，但研究进展较快。武汉理工大学的袁润章、李卓球等学者较早地进行了 CFRC 材料用于应力传感器的研究，首次发现了 CFRC 材料具有压力-电压的压敏特性，并对其在道路融雪化冰方面的应用等都进行了一系列的研究[20~23]；随后，同济大学也开始了 CFRC 的温度自诊断、自适应的研究工作；此外，哈尔滨工业大学的戚鹏生等学者以及西安交通大学的王秀峰等学者也开始了 CFRC 机敏性能方面的研究。但到目前为止，还没有出现以硫铝酸盐水泥为基体的碳纤维水泥基机敏复合材料，本研究以快硬早强的硫铝酸盐水泥为基体，讨论了不同碳纤维掺量对 CFRS 机敏性能的影响。

1 试 验

1.1 试样制备

原材料：硫铝酸盐水泥(淄博产)，其理化性能见表 1；甲级纤维素(分散剂)；聚丙烯腈基短切碳纤维(上海新兴碳素有限公司产)，其性能如表 2。

表 1 硫铝酸盐水泥的成分

Table 1 The main components of sulphoaluminate cement

Component	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
Sulphoaluminate cement	13	30	3	40	6	8

制备工艺：试样中水分和分散剂(甲基纤维素)在水泥中的质量分数分别为 13.0 %和 0.6 %，碳纤维在水泥中的质量分数分别为 0.1 %、0.3 %、0.5 %、0.7 %、0.9 %和 1.1 %，试样分别为 1#、3#、5#、…、11#。将碳纤维加入配有分散剂的乙醇溶液(既能保证碳纤维分散均匀，又不会让水与水泥提前反应而无法压制成形)中，先用手振摇乙醇混合溶液 3 min 使其分散，再慢慢地加入称量好的水泥，然后将该溶液倒入盛有水泥的干燥容器中，用搅拌机搅拌 2 min 制成泥浆，空气中干燥，乙醇挥发后加入适量水，10 MPa 下压制成型，试样尺寸为 30 mm ×30 mm ×14 mm。在养护箱养护(20 ℃，100 %RH)一天后放入室温水浴中再养护 14 天。一组相对面被银浆电极，80 ℃下 15 min 烘干以固化银层。

1.2 性能测试

用 D/MAX-RA 型 X 射线衍射仪对 CFRS 试样的物相组成进行分析；用 Poremaster-60 型全自动孔隙率测定仪对 CFRS 试样的孔隙率进行测定；采用 INSTRON-5569 型伺服液压万能试验机和 TH2816 宽频 LCR 数字电桥对单调载荷和循环载荷下的 CFRS 试样进行电容值测试：铜片压紧在银电极上作为导出电极，测试频率为 150 kHz，每个试样取 5 次测量的电容平均值作为试样的电容值 C，取三个试样的平均值作为最终电容值 C 的测量结果。

2 结果与讨论

2.1 XRD 衍射分析

CFRS 试样的机敏性能与试样包含的物相是分不开的。实验中对碳纤维含量为 0.1 %的 CFRS 的 X 射线衍射进行分析，如图 1 所示，水泥试样的水化时间为 14 天。图中 1 mm、4 mm、7 mm 表示试样中衍射取样的位置距离水化水溶液的距离。由图可知三个不同位置的 XRD 图谱基本一致，其中包

表 2 碳纤维的性能

Table 2 The properties of carbon fiber

Diameter/ μm	Density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	Tensile strength/ GPa	Tensile modulus/ GPa	Elongation at break/ %	Carbon content/ %	Electrical resistivity/ ($\Omega \cdot cm$)
7 ±0.2	1.78	> 3.0	220～240	1.25～1.60	> 95	10^{-2}～10^{-3}

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

含的物相均为高硫型硫铝酸钙、无水硫铝酸钙、水化硅酸钙、水分及其它未水化的颗粒等。由于碳纤维的含量较少，在 X 射线衍射分析中没有其明显的衍射峰。由此可以看出，CFRS 试样可看成是各种未水化的水泥物相、水化产物相、碳纤维、水分气相等所组成的多相材料。

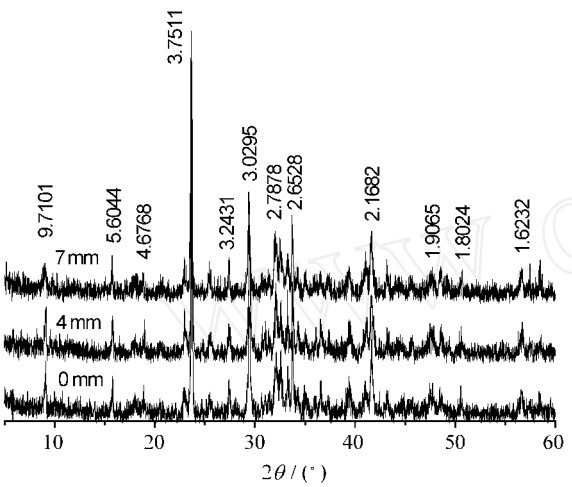

图 1　CFRS 试样 XRD 物相分析

Fig. 1　XRD analysis of CFRS sample

由物相组成可知 CFRS 水化很不完全。原因可能为：(1) 压制成型前水灰比很小，水/水泥(质量比) = 13.0 %，因此水泥不是在初期就能够完全发生水化的，一般水化程度远远没有达到 80 %；(2) 10 MPa 下压制成型的试样，结构密实，其孔径与孔体积的关系如图 2 所示。由图可知，试样中的孔径非常小，基本上小于 0.9 μm。由测试结果可知整个试样的气孔率不高，仅为 11.29 %。水泥颗粒在这样的条件下即使有足够的水分也没有水化空间进行水化；同时试样养护时水分子没有有效的通道浸入试样内部供水泥颗粒水化，因而水泥试样在水化 14 天后其组成仍为不完全水化。

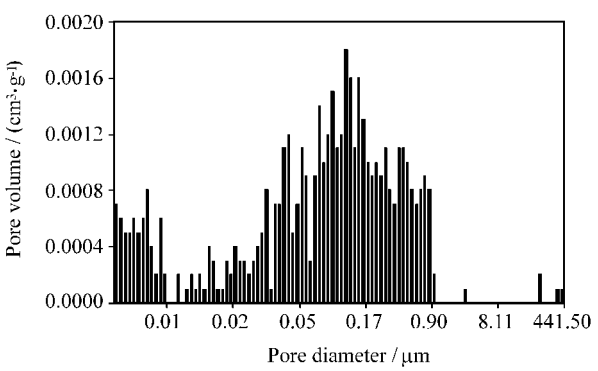

图 2　CFRS 中孔径与孔体积的关系

Fig. 2　Relationship between pore diameter and pore volume

2.2　单调压应力下 CFRS 的机敏性能

实验中单调压应力下的机敏性能是通过测量 CFRS 材料在压应力作用下的电容变化率来获得的，电容的变化取决于试样电介质的变化。CFRS 材料的电容量与其介电常数、极板面积、极板间距有如下关系[24]：$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 A/\lambda$，式中 C、ε_r、ε_0、A、λ 分别代表电容量、相对介电常数、真空中介电常数、极板面积和极板间距。CFRS 材料在单调压应力作用下极板面积 A 几乎没有变化，所以 C 的变化是由于 ε_r、λ 的变化引起的。

在一定频率和温度下，CFRS 的介电常数可用经验公式表示[25]：$\varepsilon_r = V_1\varepsilon_1 + V_2\varepsilon_2 + V_3\varepsilon_3 + \cdots + V_q\varepsilon_q + V_x\varepsilon_x$，式中：$\varepsilon_r$ 为系统总的介电常数；V_q 为各相的体积；ε_q 为各相介电常数；V_x 是指裂纹和气孔的体积；ε_x 是指裂纹和气孔的介电常数，也就是空气的介电常数，其值为 1，非常小。固定频率和温度，试样处在单调压应力作用下，随着压应力的增大，试样内部的裂纹和孔隙会不断增多，即 V_x 不断增大，则其它各相的体积 V_q (q = 1，2，3，…) 保持不变，如果此时其它各相的相对介电常数 ε_q 保持不变，对于单位体积的 CFRS 试样来说 V_x 的增大将导致整个材料的相对介电常数 ε_r 变小；但在单调压应力作用下 CFRS 试样的两电极板间距不断变小，即 λ 变小，材料中各个物相的电极化率会不断增大，材料的相对介电常数 ε_r 和电极化率 X_e 有如下的关系：$\varepsilon_r = X_e + 1$，由此可见，ε 的变化取决于 CFRS 中各物相在压应力作用下其 X_e 的变化。引起水泥基材料极化的因素主要有以下几种：(1) 电子、离子位移极化，电子位移极化可以光频随外电场变化，离子位移极化的建立时间为 10^{-12}～10^{-13} s；(2) 弛豫极化，极化建立时间为 10^{-2}～10^{-3} s；(3) 取向极化，极化建立时间为 10^{-2}～10^{-10} s；(4) 空间电荷极化，建立时间大约为几秒到数十分钟，甚至数小时等。实验中电容的测试频率为 150 Hz，在此频率下能引起水泥基材料极化的因素仅为电子、离子位移极化。碳纤维含有大量的 π 键电子，硫铝酸盐水泥基体中含有 Ca^{2+}、Na^+、K^+、OH^-、SO_4^{2-} 等离子。由此可以看出，实验中 CFRS 电容的变化与 π 键电子和 Ca^{2+}、Na^+、K^+、OH^-、SO_4^{2-} 等离子的极化率有关。

图 3 是不同碳纤维掺量的 CFRS 在单调压应力作用下电容变化率随应力的变化曲线。从图中可以

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

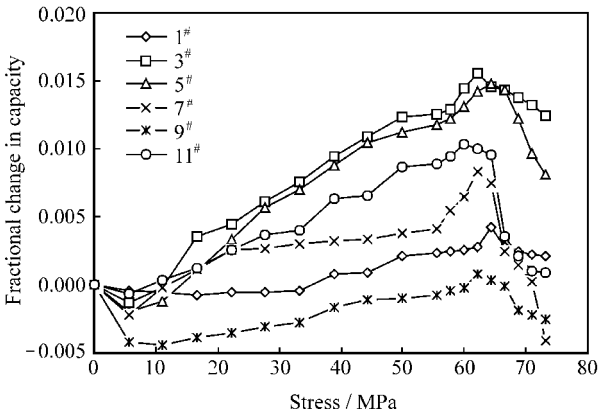

图 3　不同碳纤维掺量的 CFRS 电容变化率与单调压应力关系图

Fig. 3　Relationship between fractional changes in capacity of different carbon fiber content CFRS sample and stress

看出，在压应力作用下，不同碳纤维掺量的 CFRS 的电容变化率开始时均减小，达到最小值后又近似线性增大，压应力增大到 CFRS 断裂时复合材料的电容变化率突然下降。其机理为：开始加载时，铜片导出电极与水泥试样的银电极仅部分接触，两种电极间有部分空气填充，水泥试样中也有部分裂纹和孔洞被空气填充，随着压应力的增大，这部分空气不断被挤出，两电极逐渐紧密接触，水泥试样中的裂纹和孔洞逐渐闭合，CFRS 的相对介电常数 $\varepsilon_r = V_1\varepsilon_1 + V_2\varepsilon_2 + V_3\varepsilon_3 + \cdots + V_q\varepsilon_q + V_x\varepsilon_x$ 中的 $V_x\varepsilon_x$ 相逐渐变小，ε_r 变小，导致 CFRS 试样的电容在开始加载时变小，而此时由极板间距变小引起的电容上升处于次要地位；随着加载压应力的进一步增大，CFRS 试样的电极间距减小引起试样电容的变化率处于主导地位，此阶段试样的电容变化率升高；CFRS 复合材料压裂前后，试样内部产生大量裂缝，导致 CFRS 的电容变化率大幅度下降。从图 3 还可以看出，不同碳纤维掺量的 CFRS 其电容变化率是不一样的。3# 和 5# 试样其电容变化率值最大，而且在压应力 5～60 MPa 作用范围内，随着压应力的升高，电容变化率近似线性增大，可能原因是当碳纤维掺入量较少时，材料中影响极化率变化的π键电子较少，所以压应力作用下电容变化率幅度不大；当碳纤维掺入量较多时，虽然影响极化率变化的π键电子增多，但是碳纤维与水泥基体的界面也会增多，在压应力作用下界面是薄弱环节，容易产生微裂纹和微孔隙，所以其电容变化率也不大，由此可以看出碳纤维的掺入量有一个最佳值。

2.3　循环压应力下 CFRS 的机敏性能

实验中加载的循环如图 4 所示。最大压应力为 1 MPa，每个样品加载 10 个循环，研究循环压应力下 CFRS 材料的电容变化率。图 5 是碳纤维掺量不同的 CFRS 试样在循环压应力作用下的电容变化率曲线。图 5 中 1# 试样的碳纤维掺量为 0.1%，可以看出，在循环压应力下，CFRS 的电容变化率几乎单调下降，没有出现有规律的变化；3# 和 5# 试样的碳纤维掺入量分别为 0.3%和 0.5%，可以看出，在每个循环过程中，加载时电容变化率随压应力增大而成近似线性关系降低，卸载时，电容变化率成线性增大，电容的变化率与压应力之间具有鲜明的对应关系，但在前几次的循环中，卸载后出现了较大的不可逆减小，随着循环次数的增加，这种不可逆减小逐渐降低，第五次循环后电容变化率

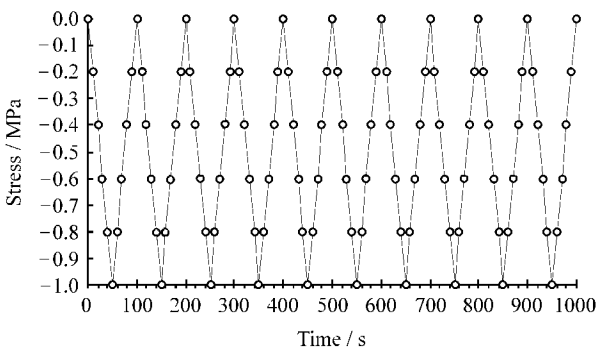

图 4　最大加载压应力为 1 MPa 时循环压应力与时间的关系

Fig. 4　Relationship between cycle stress and time under the max. stress of 1 MPa

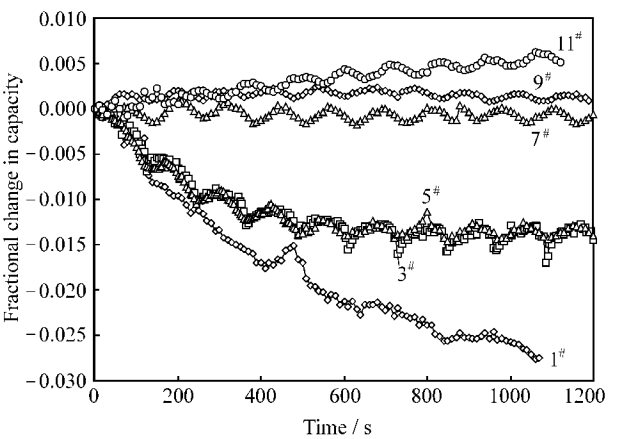

图 5　最大加载压应力为 1 MPa 时不同碳纤维掺量的 CFRS 电容变化率与时间的关系

Fig. 5　Relationship between fractional changes in capacity of different carbon fiber content CFRS sample and time under the max. stress of 1 MPa

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基本可逆，这是由于这两个试样中碳纤维的掺入量较少，在开始的几个循环中试样内部结构有一定程度的损坏，几个循环后材料的结构趋于稳定；7# 和 9# 试样的碳纤维掺入量分别为 0.7 %和 0.9 %，相比较而言，这两个试样的电容变化率比较有规律，CFRS 试样的机敏性能较好；11# 试样的碳纤维掺量为 1.1 %，可以看出，在循环压应力作用下材料的电容变化率出现了不可逆转的上升。由图 5 可知，碳纤维掺入量过少或过多，CFRS 试样都没有好的机敏性能，这可能是因为：碳纤维掺入量过少，CFRS 试样在循环压应力作用下会遭到不断的破坏，过少的纤维不能增强水泥基体，使破坏一直延续下去；而碳纤维过多，CFRS 试样内部会包含过多的微裂纹和微空隙，在循环压应力作用下，微裂纹和微空隙不断闭合，所以导致 CFRS 的电容变化率不可逆转的上升。

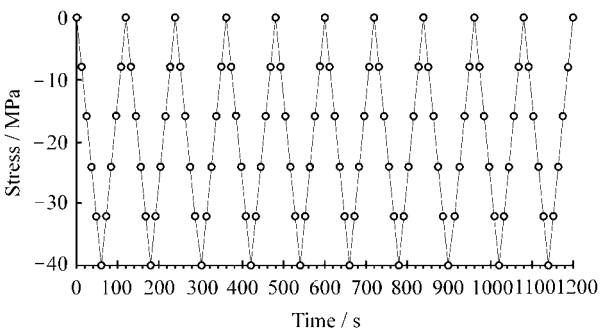

图 6　最大加载压应力为 40 MPa 时循环压应力与时间的关系

Fig. 6　Relationship between cycle stress and time under the max. stress of 40 MPa

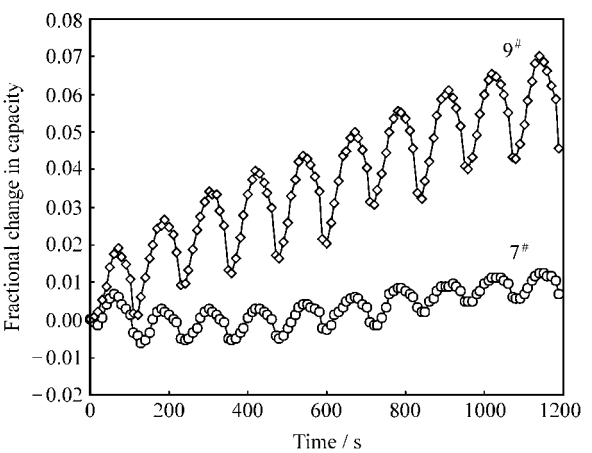

图 7　最大加载压应力为 40 MPa 时不同碳纤维掺量的 CFRS 电容变化率与时间的关系

Fig. 7　Relationship between fractional changes in capacity of different carbon fiber content CFRS samples and time under the max. stress of 40 MPa

进一步提高循环载荷的最大加载压应力，如图 6 所示，此时最大加载压应力为 40 MPa，考察循环加载时最大加载压应力为 1 MPa 时机敏性能较好的 7# 和 9# 试样的机敏性能。图 7 是 7# 和 9# 试样在图 6 所示循环压应力作用下的电容变化率曲线。由图可以看出，当最大循环加载压应力为 40 MPa 时，7# 试样的电容变化率随加载次数的变化比较有规律，重复性较好；而 9# 试样的电容变化率数值出现不可逆的变化，虽然曲线变化与循环压应力出现一一对应关系，但是循环加载前后电容变化率数值变大，其机敏性能较差。综上所述，循环加载条件下 7# 试样的机敏性能较好。

3　结　论

(1)　X 射线分析表明，压制成形的 CFRS 试样中硫铝酸盐水泥水化很不完全，这是由于压制成形的试样结构致密，水分难以与水泥颗粒反应造成的，同时致密的结构也没有水化的空间，孔隙率分析也证明了这一点。

(2)　150 kHz 频率下，影响 CFRS 复合材料极化率的因素包括碳纤维带入的 π 键电子和水泥基体中的 Ca^{2+}、Na^{+}、K^{+}、OH^{-}、SO_4^{2-} 等离子。

(3)　单调压应力作用下，碳纤维掺入量为 0.3 %和 0.5 %的试样的机敏性能较好，在压应力 5～60 MPa 作用范围内，随着压应力的升高，电容变化率近似线性增大。

(4) 循环压应力作用下，碳纤维掺入量为 0.7 %的试样的机敏性能较好，其电容变化率与压应力的变化一一对应，电容的变化可逆性较强。

参考文献：

[1]　欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定[A]. 见：走向 21 世纪的中国力学 ——中国科协第九次“青年科学家论坛”报告文集[C]. 北京：清华大学出版社，1996. 179 - 189.

[2]　Aktan A E, Tsikos C J, Catbas F N, Grimmlsman K, Barrish R. Challenges and Opportunities in Bridge Health Monitoring [A]. In: Proceedings of 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring[C]. 1999. 461 - 473.

[3]　Aktan E, Chase S, Inman D, Pines D. Monitoring and Managing the Health of Infrastructure Systems [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Health Monitoring of Highway Transportation Infrastructure[C]. SPIE, 2001.

[4]　李　辉，钟树生，黄　文，等. 对用电阻应变片进行应变长期测量的研究[J]. 重庆建筑大学学报，1998，20(4)：21 - 26.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 陶宝祺, 王 妮. 电阻式应变传感器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[6] 王瑞金. 应变片在动态测试中疲劳规律的研究[J]. 机电工程, 2000, 17(4): 66 - 68.

[7] 梁 磊, 姜德生, 孙东亚. 光纤传感器在混凝土结构中的相容性研究[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(2): 11 - 14.

[8] 竺逸年. 光纤传感器在钢筋混凝土结构和建筑物中的应用[J]. 光通信技术, 1995, 19(3): 220 - 225.

[9] Wen Sihai, Chung D D L. Electrical behavior of cement-based junctions including the pn-junction [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31: 129 - 133.

[10] Wen Sihai, Chung D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating[J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31: 665 - 667.

[11] Xu Yunsheng, Chung D D L. Silance-treated carbon fiber for reinforcing cement[J]. *Carbon*, 2001, 39: 1995 - 2001.

[12] Chung D D L. Cement reinforced with short carbon fibers: A multifunctional material [J]. *Composites*, 2000, 31: 511 - 526.

[13] Wen Sihai, Chung D D L. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31: 141 - 147.

[14] Bontea Dragos Marian, Chung D D L, Lee G C. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 651 - 659.

[15] Wen Sihai, Chung D D L. Effect of admixtures on the dielectric constant of cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31: 673 - 677.

[16] Xu Yunsheng, Chung D D L. Reducing the drying shrinkage of cement paste by admixture surface treatments[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 241 - 245.

[17] Cao Jingyao, Chung D D L. Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31: 1633 - 1637.

[18] Wen Sihai, Chung D D L. Seebeck effect in steel fiber reinforced cement [J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(4): 661 - 664.

[19] Wen Sihai, Chung D D L. Seebeck effect in carbon fiber reinforced cement [J]. *Cem Concr Res*, 1999, 29(12): 1989 - 1993.

[20] Sun M, Li Z, Mao Q, Shen D. Thermoelectric percolation phenomenon in carbon fiber-reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(12): 1707 - 1712.

[21] Sun Mingqing, Li Zhuoqiu, Mao Qizhao, Shen Darong. A study on thermal self-monitoring of carbon fiber reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29: 769 - 771.

[22] Sun Mingqing, Liu Qingping, Li Zhongqiu, Hu Yaozu. A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 1593 - 1595.

[23] 吴自暇, 赵宏声, 赵丽芳, 等. 碳纤维-水泥基复合材料应力传感器的研究[J]. 武汉工业大学学报, 1995, 17(1): 49 - 53.

[24] 郑立霞, 宋显辉, 李卓球, 等. 碳纤维增强水泥在受压时的电容测量[J]. 混凝土, 2003(3): 25 - 27.

[25] 胡 昂, 方永汉. 湿度对 DSP 水泥基材料介电常数的影响[J]. 硅酸盐学报, 1995, 23(2): 190 - 194.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net