

碳纤维混凝土的机敏特性研究

王春阳<sup>1 2</sup>

( 1. 华中科技大学土木与力学学院 ,湖北 武汉 430074 2. 平顶山工学院土木工程系 ,河南 平顶山 467001 )

摘 要 :制作了体积掺量分别为( 0.0%、0.2%、0.4%、0.8% 和 1.2% )的碳纤维水泥基材料 ,试件为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体 ,并比较其电导性能 ,试验研究了不同碳纤维掺量的混凝土在单调和循环荷载作用下其压应力和电阻率的关系 .结果表明 ,随碳纤维掺量增大 ,阻抗曲线逐渐向左移动 ,在三维空间随机分布的纤维逐渐聚集并彼此连接 ,使复合材料的电导性能大幅增加 .当碳纤维体积掺量同为 1.0% 时 ,不同龄期材料的交流阻抗谱相差很大 ,随着水化龄期的增长 ,C - S - H 凝胶大量形成 ,水泥基材料中的溶液电阻逐渐增大 ,此时作为导电性分散相的碳纤维将起电导的主导作用 .随着外部荷载的增加 ,基准水泥基材料的导电性几乎无变化 ,直到破坏时 ,电阻变化率剧烈增大 ,而碳纤维水泥基材料在弹性阶段其电阻变化率随内部应力线性增加 ,当接近峰值荷载时 ,电阻率才逐渐增大 ,预示试件即将破坏 .

关键词 :机敏 ;碳纤维 ;混凝土 ;模型  
中图分类号 :TU 528.572 文献标识码 :A

0 引言

混凝土材料本身不具备自感应功能 ,但在混凝土基材中复合部位导电相可使混凝土具备本征自感应功能<sup>[1]</sup> ,将一定形状、尺寸和掺量的短切碳纤维掺入混凝土材料中 ,可以使材料具有自感知内部应力、应变和损伤程度的功能<sup>[2]</sup> .通过对材料的宏观行为和微观结构变化进行观测 ,发现水泥基复合材料的电阻变化与其内部结构变化是相对应的<sup>[3]</sup> .碳纤维混凝土是在普通混凝土中分散均匀地加入碳纤维而构成 ,它的主要特性之一是压敏性 .由于碳纤维是导电的 ,因此 ,由碳纤维和碳纤维之间未水化的水泥颗粒 ,水化产物 ,缺陷裂纹等阻隔所形成的势垒构成了具有一定电阻的导电网络 .随着压应力的变化 ,碳纤维混凝土的电阻率也会变化 ,通过试验可以了解碳纤维混凝土的压应力和电阻率的关系曲线 .低掺量、乱向分布的不连续短切碳纤维在水泥基材料中并不完全相互孤立 ,随着碳纤维掺量的增加 ,在水泥基材料中逐渐形成了纤维聚集团簇 ,团簇内纤维彼此连接<sup>[4 5]</sup> .按照渗流理论 ,分散相在分散体系中的浓度达到临界点时 ,相互接触的分散相构成了无限渗流集

团 .因此 ,在碳纤维水泥基材料中 ,当碳纤维掺量达到或超过临界值时 ,全部团簇形成渗流网络 ,使导电率急剧上升 ,鉴于碳纤维水泥基材料具有良好电导特性 ,它可以作为传感器并以电信号输出的形式反映自身受力状况和内部的损伤程度 .

1 试验所用的原材料

- ( 1 )聚丙烯晴碳纤维 :碳纤维的长度依据试验进行人工短切 ,其长度分别为 1 mm、5 mm、10 mm 和 15 mm ,为上海碳素厂生产 .
- ( 2 )水泥 :水泥采用 32.5 级普通硅酸盐水泥 .
- ( 3 )外加剂 :外加剂为分散剂 WG ,主要成分为纤维素和氧化乙烯烷基醚 ,自制 .
- ( 4 )硅灰 :硅灰为 Elken 公司提供 ,颗粒粒径约为 0.01 ~ 0.1 μm .
- ( 5 )砂与石子 :中河砂及最大粒径为 30 mm 的碎石

( 6 )投料顺序 :先掺法 :碳纤维先投入拌合水中搅拌 ,然后掺入水泥 .搅拌中分散系数第一次达到最大时的时间 2 min 被定为最佳搅拌时间 .在一般的拌制工艺中 ,碳纤维的长度在 5 mm 左右或更大时 ,碳纤维的最大体积掺量不宜超过 1% .

2 试验

制作了不同体积掺量的碳纤维水泥基材料 (0.0%、0.2%、0.4%、0.8% 和 1.2%) 并比较其电导性能,试件为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体.在进行力学性能测试前先测定材料的交流阻抗谱,测量仪器为 273A 型恒电位仪/恒电流仪及 5210 型锁相放大器,然后,在试件两侧(与承压面相垂直)通过导电胶各粘接一个铜电极,并与精密数字电阻仪相接,测量试件受荷过程中的电阻变化,试验加载采用单调和循环受压两种形式,试验加载设备为液压试验机<sup>[6]</sup>.

3 结果讨论

28 d 龄期时不同碳纤维掺量水泥基材料的交流阻抗谱图如图 1 所示,从图 1 中可见,随碳纤维掺量增大,阻抗曲线逐渐向左移动.通过交流阻抗谱计算的碳纤维水泥基材料的电导率如图 2 所示,随着碳纤维掺量的增大,其电导率也增大,在碳纤维体积掺量达 0.4% 时,电导曲线发生转折,且电导与碳纤维体积分数几乎呈指数关系,这种现象反映了碳纤维在水泥基材料中空间分布状况的变化趋势,通过显微结构观察发现,随着碳纤维体积掺量的增加在三维空间随机分布的纤维逐渐聚集并彼此连接,使复合材料的电导性能大幅增加.

大量的研究表明,交流阻抗谱与材料的内部微观结构有关,从图 3 中可以看出,当碳纤维掺量

同为 1.0%(体积掺量)时,不同龄期材料的交流阻抗谱相差很大.

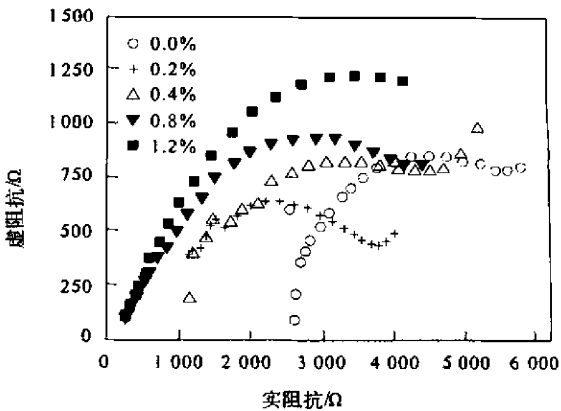


图 1 碳纤维水泥基材料 28 d 龄期的交流阻抗谱

Fig.1 Carbon fibre concrete 28 days age of AC impedance chart

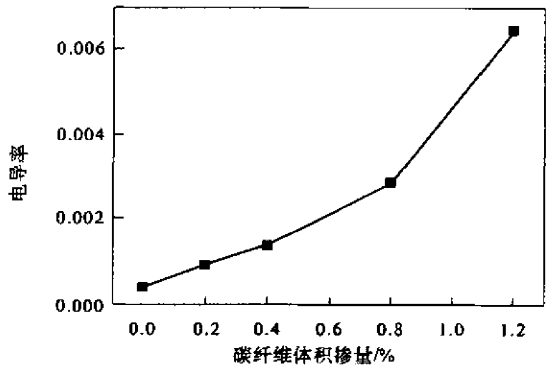


图 2 碳纤维水泥基材料中电导与碳纤维体积分数的关系

Fig.2 Carbon fibre concrete conductance and carbon fibre volume fractional connection

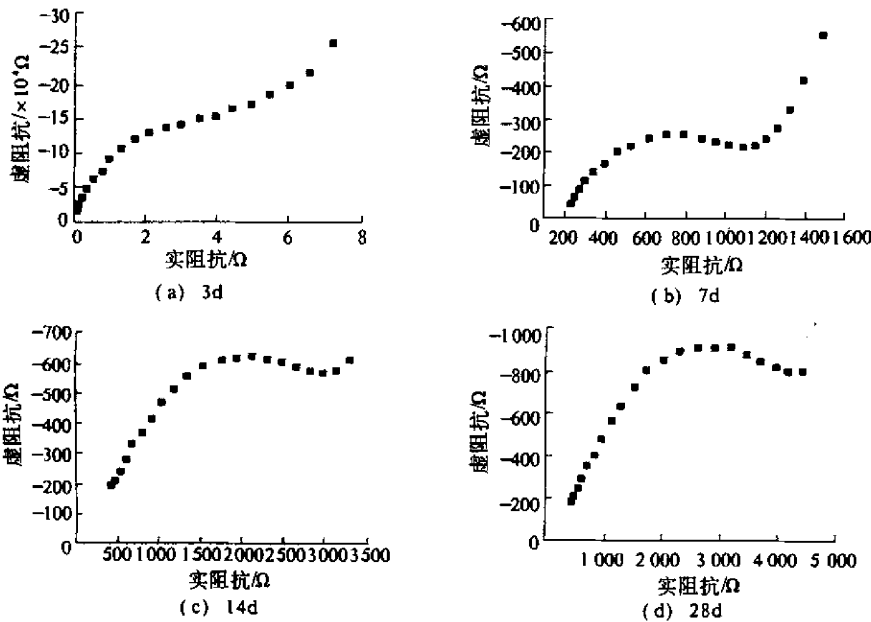


图 3 碳纤维水泥基材料在不同龄期的阻抗谱

Fig.3 the impedance chart of differ age at carbon fibre concrete

在龄期为 3 d 时,由于水泥水化尚不充分,内部孔隙和自由水较多,材料导电性能很大程度上取决于水泥基体内孔隙中的碱性溶液,在龄期为 7 d 时,阻抗谱中的中频半圆就已经表现,表明水泥水化已进入相对稳定期,随着水化龄期的增长,C-S-H 凝胶大量形成,水泥基材料中的溶液电阻逐渐增大,与扩散作用相关的区段渐渐消失,此时作为导电性分散相的碳纤维将起电导的主导作用.

图 4 所示为基准水泥基材料与不同体积掺量的碳纤维水泥基材料承受单调加载时的电阻的变化趋势,从图中可以看出,随着外部荷载的增加,基准水泥基材料的导电性几乎无变化,直到破坏时,电阻变化率剧烈增大,而碳纤维水泥基材料在弹性阶段其电阻变化率随内部应力线性增加,当接近峰值荷载时,电阻率才逐渐增大,预示试件即将破坏.

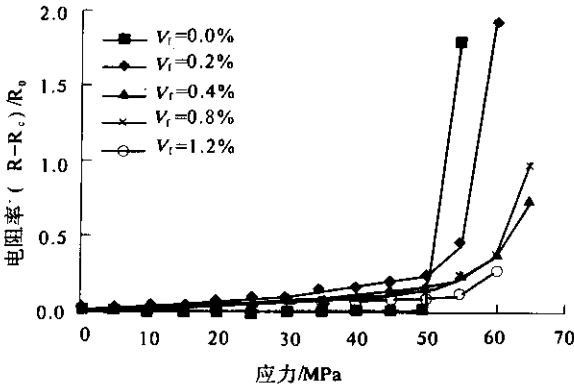
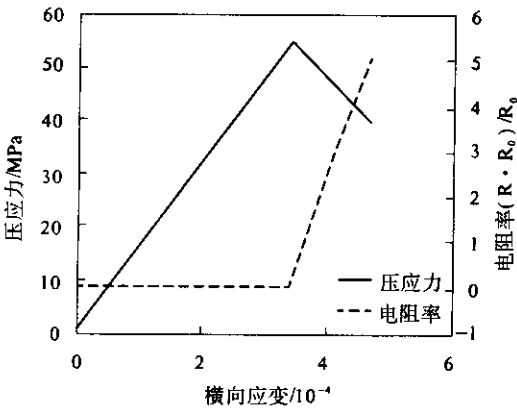


图 4 基准水泥基材料和碳纤维水泥基材料导电性能与外部荷载的关系

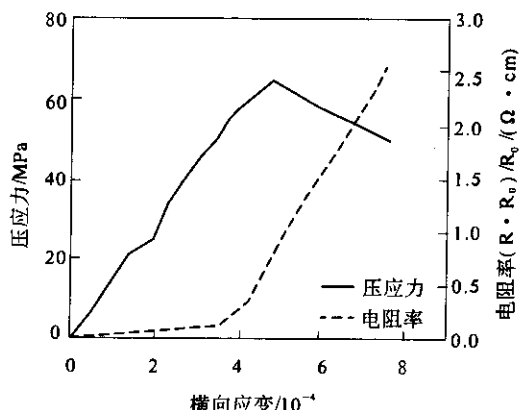
Fig.4 the connection of electric conductance capability with exterior load at benchmark concrete and carbon fibre concrete

基准水泥基材料在导电性能上的惰性行为是由于其材料组分,水化产物和内部微裂纹组成的复合体本身的电阻率相对较大,虽然随着荷载的增加,材料内部微裂纹不断增多和繁衍,但对电阻率的影响甚微.当达到极限荷载出现宏观裂纹扩展时,由于裂缝的绝缘性,才使得电阻率迅速增加(见图 5(a)所示).然而,对于含碳纤维的水泥基材料,导电相主要由碳纤维和水泥孔隙中的碱性溶液组成,电阻率较小.而且由于纤维的阻裂和增韧作用,相对而言,基体中的微裂纹数量大幅下降,在复合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,当复合材料进入非线性阶段,由于微裂纹的不断增多以及碳纤维被拔出或被拉断,使得材料的电阻率逐渐增加(见图 5(b)所示).根据碳纤维水泥基材料受荷载过程的这种电导敏感性,可以掌握材料内部的应力-应变关系.

在循环加载条件下,碳纤维水泥基材料电导性能的变化情况如图 6 所示.图中显示,在第一循环中电阻率出现了不可恢复的增量,然后在后续的循环中,电阻率均随外部加载和卸载而产生相应的恢复性增减,在第一循环中电阻率不可恢复的增量可理解为材料的初始损伤,即材料内部的微裂纹产生,随着荷载的增加,水泥基材料内部微裂纹张开或扩展,表现出材料的电阻率上升;而当卸载时,材料内部裂纹闭合,其电阻率下降.



(a) 基准水泥基材料



(b) 体积掺量为 0.8% 的碳纤维水泥基材料

图 5 应力-应变和电阻率-应变关系曲线

Fig.5 Stress - strain and resistance change rate - strain connection curve  
万方数据

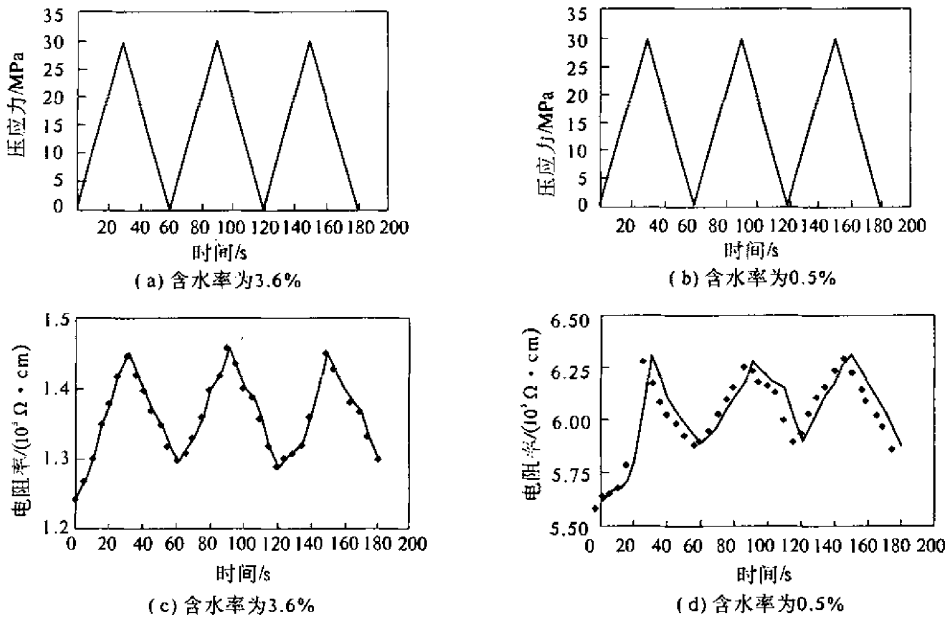


图 6 体积掺量为 0.4% 碳纤维水泥基材料循环压应力和电阻率随时间的变化规律

Fig.6 Along with time change law of cyc press stress and resistance rate mixed carbon fiber press volumenometer is 0.4% into concrete

在碳纤维水泥基复合材料中,基材的含水量对材料的电阻有较大的影响,当含水量较大时(图 6(a)),材料的电阻率较小,这是因为此时复合材料中的导电网络主要由水泥石液相中的离子和碳纤维中的电子组成,随着水分的蒸发,材料中的含水量下降,图 6(b)水泥石中的液相数量减少,导电离子也相应减小,电阻率逐渐增大,然而在循环加载过程中两种含水量材料是电阻率变化趋势却相似。

碳纤维水泥基材料的电阻变化与所受荷载呈良好的线形关系,其机敏特性反映了材料内部损伤状况丰富的信息,根据这一特性可以有效地预报水泥基材料内部的损伤,防止潜在的脆性破坏,因而可广泛应用于诸如桥梁、水利和建筑等重要构筑物的特征部位,实现实时的、动态的健康监测和损伤评估,确保这些重要基础设施的安全。

#### 4 结论

(1) 随碳纤维掺量增大,阻抗曲线逐渐向左移动,在三维空间随机分布的纤维逐渐聚集并彼此连接,使复合材料的导电性能大幅增加。

(2) 当碳纤维掺量同为 1.0%(体积掺量)时,不同龄期材料的交流阻抗谱相差很大,随着水化龄期的增长,C-S-H 凝胶大量形成,水泥基材料中的溶液电阻逐渐增大,与扩散作用相关的区段

渐渐消失,此时作为导电性分散相的碳纤维将起电导的主导作用。

(3) 基准水泥基材料与不同体积掺量的碳纤维水泥基材料承受单调加载时,随着外部荷载的增加,基准水泥基材料的导电性几乎无变化,直到破坏时,电阻变化率剧烈增大,而碳纤维水泥基材料在弹性阶段其电阻变化率随内部应力线性增加,当接近峰值荷载时,电阻率才逐渐增大,预示试件即将破坏。

(4) 循环加载条件下,碳纤维水泥基材料导电性能在第一循环中电阻率出现了不可恢复的增量,然后在后续的循环中,电阻率均随外部加载和卸载而产生相应的恢复性增减,随着荷载的增加,水泥基材料内部微裂纹张开或扩展,表现出材料的电阻率上升;而当卸载时,材料内部裂纹闭合,其电阻率下降。

(5) 惰性的水泥基材料在掺入适量的碳纤维后具有良好的机敏性,其表观电导率随碳纤维体积分数的增加而迅速增大,利用交流阻抗谱和渗流理论可很好地反映碳纤维水泥基材料内部的微观结构及其导电机理,碳纤维水泥基材料的表现电导特性与其受载过程和内部损伤有密切的关联性,根据这一特性可以及时预报水泥基材料内部潜在的损伤隐患,有效地防止脆性破坏。

(下转第 66 页)

DOA Algorithms for CDMA System

LIU Wen - ke , MA Chen - xin , JIN Liang

( School of Information Engineering , Information Engineering University , Zhengzhou 450002 ,China )

**Abstract** : In DS\_ CDMA system , the producing of the direction plot of intelligent antennas depends on the DOA estimation for the mobile . In this paper , first of all , the traditional MUSIC and ESPRIT algorithms are studied , which is based on the decomposition of subspaces , and with a large computation quantities . And then the improved DOA algorithms are expatiated and the performance of these algorithms is analyzed . Simulations show that the improv algorithms can be realized in real time .

**Key words** : DS\_ CDMA ; DOA ; MUSIC algorithm

( 上接第 47 页 )

参考文献 :

[ 1 ] 杨大智 . 智能材料与智能结构 [ M ] . 天津 : 天津大学出版社 , 2000 .

[ 2 ] FU X , LU W , CHUNG D D . Improving the strength - sensing ability of carbon fiber - reinforced by ozone treatment of the fibers [ J ] . Cem Concr Res , 1997 , 28 ( 2 ) : 183 ~ 187 .

[ 3 ] CHEN P W , CHUNG D D . Concrete as a new strain/stress sensor [ J ] . Composites , 1996 , 27B ( Part B ) : 11 ~ 13 .

[ 4 ] 姚 武 , 陈 兵 , 吴科如 . 三点弯曲负荷下碳纤维水泥基材料机敏性研究 [ J ] . 中国学术期刊文摘 , 2001 , 8 : 1049 ~ 1051 .

[ 5 ] 蒋正武 , 孙振平 , 王新友 . 导电混凝土技术 [ J ] . 混凝土 , 2000 ( 9 ) : 55 ~ 58 .

Research on Alert and Resourceful Characteristic of Carbon Fiber Concrete

WANG Chun - yang<sup>1 2</sup>

( 1 . School of Civil Engineering and Mechanics , Huazhong Univervsity of Science and Technology , Wuhan 430074 , China 2 . School of Civil Engineering , Pingdingshan Institute of Technology , Pingdingshan 467001 , China )

**Abstract** : In this paper , we make the carbon fiber concrete of different volume quantities ( 0 . 0 % 、 0 . 2 % 、 0 . 4 % 、 0 . 8 % and 1 . 2 % ) and compare that conductance capability , with the test sample being a cube of 100mm × 100mm × 100mm . This paper studies the relationship between the concrete pressure and the resistance rate under the action of monotony and the circulating load when different quantities of carbon fiber are added into the concrete . The study results indicate that , with the increase of carbon fiber , impedance curve gradually moves towards the left . When mixed into the same carbon fiber quantity is 1 . 0 % , differ age material ' s AC impedance chart is discrepancy very much , along with to hydrate age ' s add , C - S - H gel isa great deal of form , the solution resistance at the concrete is gradually aggrandizement , the carbon fibre of here qua transmit electricity quality disperse would leading effect of conductance . along with the add of exterior load , the transmit electricity quality of concrete is almost nothing change , till breakage , resistance change rate tempestuousness add , and that the resistance change rate along with inside stress linearity add of corbon fibre concrete in elasticity phase , when near peak value load , resistance rate just gradually add , indicate the test sample would be about to breakage .

**Key words** : alert and resourceful ; carbon fiber ; concrete ; model