

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.133



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



纳米碳纤维增强混凝土的介电特性

王志航¹, 许金余^{1,2}, 吴云泉³, 黄哲¹, 任彪¹, 聂良学¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072;
3. 空军广州工程设计室, 广州 510045)

摘要:为研究纳米碳纤维增强混凝土的介电特性,发现纳米碳纤维增强混凝土对电磁波的反射与损耗规律,采用波导法测试纤维掺量为0、0.1%、0.2%、0.3%、0.5%的纳米碳纤维增强混凝土在1.7~2.6 GHz频率范围内的介电常数。分别从相对复介电常数实部、相对复介电常数虚部、损耗角正切等方面分析了纤维掺量、频率对纳米碳纤维增强混凝土介电特性的影响,并对比分析0.3%纤维掺量下纳米碳纤维和普通碳纤维对混凝土材料介电特性的影响。结果表明:纳米碳纤维的掺加提高了混凝土材料相对复介电常数实部和虚部、损耗角正切,增强了混凝土材料对电磁波的损耗能力;纤维掺量越大,纳米碳纤维增强混凝土介电特性越强,对电磁波的损耗能力越大;纳米碳纤维对混凝土材料介电特性的提高效果强于碳纤维。

关键词: 纳米碳纤维; 混凝土; 介电常数; 电磁波损耗

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0134-08

Dielectric properties of nano-carbon fiber reinforced concrete

WANG Zhihang¹, XU Jinyu^{1,2}, WU Yunquan³, HUANG Zhe¹, REN Biao¹, NIE Liangxue¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China;
2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, P. R. China;
3. Air Force Guangzhou Engineering Design Office, Guangzhou 510045, P. R. China)

Abstract: In order to study the dielectric properties of nano-carbon fiber-reinforced concrete, and find the law of reflection and loss of nano-carbon fiber-reinforced concrete to electromagnetic waves, the waveguide method was used to test the dielectric properties of nano-carbon fiber reinforced concrete with a fiber content of 0, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.5% in the frequency range of 1.7 GHz to 2.6 GHz constant. The effects of fiber content and frequency on the dielectric properties of nano-carbon fiber-reinforced concrete were analyzed from the aspects of relative dielectric constant real part, imaginary part and loss tangent. At the same time, the effects of nano-carbon fiber and ordinary carbon fiber on the dielectric properties of concrete materials with 0.3% fiber content were compared and analyzed. The test results show that: nano-carbon fiber can increase the real part and imaginary part of the complex dielectric constant and loss tangent

收稿日期: 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(51208507、51378497)

作者简介: 王志航(1996-),男,主要从事混凝土防护结构研究, E-mail: wangzhihangafeu@163.com。

许金余(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: xujinyuafeu@163.com。

Received: 2020-06-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51208507, 51378497)

Author brief: WANG Zhihang (1996-), main research interest: concrete protective structure, E-mail: wangzhihangafeu@163.com.

XU Jinyu (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xujinyuafeu@163.com.

of the concrete material, and enhance the loss ability of the concrete material to electromagnetic waves; the greater the amount of nano-carbon fiber, the stronger the dielectric properties of nano-carbon fiber-reinforced concrete and the greater the loss of electromagnetic waves; the effect of nano-carbon fibers on the improvement of the dielectric properties of concrete materials is stronger than carbon fibers.

Keywords: nano-carbon fiber; concrete; dielectric constant; loss of electromagnetic wave

混凝土材料的介电常数^[1-2]是分析其对电磁波反应的一个重要参数,再结合电磁波传播理论,形成了混凝土结构的无损检测技术,并且该技术正在逐渐取代传统钻孔取芯对混凝土结构检测的方法。目前电磁无损检测技术主要包括探地雷达法(Ground Penetrating Radar, GPR)、时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)和矢量网络分析仪法(Vector Network Analyzer, VNA),基本原理为:发射天线向被测介质发射电磁波后,电磁波在介质表面发生反射,同时传入介质内部的电磁波也会发生多次反射,然后分析接收天线收到的各类发射波信号,或者测定被测介质的介电常数,进而对介质内部的物理性质进行分析^[3]。由此可见,对混凝土材料介电常数的分析不仅可以深入地探讨其对电磁波的反射和损耗规律^[4-5],还可为结构的质量监控及后期的损伤检测提供参考依据,具有十分重要的理论价值和工程意义。

纳米碳纤维增强混凝土是以普通混凝土为基材,以纳米碳纤维为增强材料制成的性能良好的复合型材料。同普通混凝土相比,纳米碳纤维增强混凝土不仅力学性能^[6-8]和耐久性^[9-10]有明显改善,而且电磁性能^[11-12]也有大幅提升。目前,学者们针对纳米碳纤维增强混凝土的力学性能及电阻、压敏等电学特性^[13-15]做了大量研究工作,但针对纳米碳纤维增强混凝土介电特性的研究鲜有报道。鉴于此,笔者采用波导法,测试了不同纤维掺量下的纳米碳纤维增强混凝土在1.7~2.6 GHz频率范围内的介电常数,通过分析相对复介电常数实部、相对复介电常数虚部、损耗角正切与电磁场频率、纤维掺量的关系,研究了不同频率、不同纤维掺量对纳米碳纤维增强混凝土介电特性的影响。另外,以0.3%纤维掺量为例,对比分析了纳米碳纤维和普通碳纤维对混凝土材料介电特性的影响。

1 试验

1.1 试验材料

制备纳米碳纤维增强混凝土的原材料为:水泥、

碎石、砂、添加剂(减水剂、消泡剂)、水和纳米碳纤维。水泥:陕西秦岭水泥集团生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其化学组成和物理性能如表1和表2所示;砂:产自灞河的洁净中砂,级配良好,细度模数为2.8,整体含泥量1.1%,容重为2 630 kg/m³,堆积密度为1 500 kg/m³;碎石:石灰岩碎石,粒径5~20 mm,整体含泥量0.2%,容重为2 700 kg/m³,堆积密度为1 620 kg/m³;减水剂:陕西浩宇混凝土外加剂有限公司生产的JKPCA-02型FDN高效减水剂;消泡剂:陕西蓝鑫化工有限公司生产的磷酸三丁酯消泡剂;水:采用符合检测标准的自来水;纳米碳纤维:北京德克岛金科技有限公司生产的纳米碳纤维(如图1所示),其主要技术指标如表3所示。

表1 P·O 42.5普通硅酸盐水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition of P·O 42.5 ordinary

Portland cement						%
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	碱
22.13	62.45	5.34	4.63	1.40	2.31	0.30

表2 P·O 42.5普通硅酸盐水泥物理性能指标

Table 2 Physical properties of P·O 42.5 ordinary

Portland cement					
初凝时 间/min	终凝时 间/min	稳定 性	细度	28 d抗压 强度/MPa	28 d抗折 强度/MPa
163	264	合格	1.6	46.2	6.9

表3 纳米碳纤维主要性能指标

Table 3 Main performance indexes of nano-carbon fiber

纯度 /%	单丝直 径/nm	长径 比	导热系 数/(W· m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	电阻率/ (Ω·cm)	热膨胀 系数/ °C ⁻¹	比表面 积/(m ² · g ⁻¹)	密度/ cm ⁻³
99.9	100~200	70	2 000	<0.012	1	300	0.18

1.2 试件制备

纳米碳纤维增强混凝土配合比如表4所示。其中编号PC表示不掺纳米碳纤维的基准组试件,CNFC01、CNFC02、CNFC03、CNFC05表示纳米碳纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%、0.3%和0.5%

的纳米碳纤维增强混凝土试件。



图1 纳米碳纤维

Fig. 1 Nano-carbon fiber

表4 纳米碳纤维增强混凝土配合比

Table 4 Mixing ratio of nano-carbon fiber

试件 编号	reinforced concrete						kg/m ³
	水泥	碎石	砂	水	消泡 剂	减水 剂	
PC	495	1 008	672	180	0	0	0
CNFC01	495	1 008	672	180	0.30	5.0	0.18
CNFC02	495	1 008	672	180	0.45	7.5	0.36
CNFC03	495	1 008	672	180	0.60	10.0	0.54
CNFC05	495	1 008	672	180	0.90	15.0	0.90

试件的制备基于裹砂石法。PC组混凝土试件制备时,先将全部的碎石、砂和部分水倒入搅拌机中拌和1 min,再加入全部的水泥拌和2 min,最后将剩余水加入拌合物中拌和5 min,将均匀的混凝土拌合物装入模具振捣成型。CNFC组混凝土制备时,先将减水剂加入水中搅拌均匀,然后将纳米碳纤维加入消泡剂中搅拌均匀,再将两者组成混合液,将全部的碎石、砂和部分混合液倒入搅拌机中拌和1 min,再加入全部的水泥拌和2 min,最后将剩余混合液加入拌合物中拌和5 min,将均匀的混凝土拌合物装入模具振捣成型。24 h后脱模,试件置于标准条件下养护28 d。养护结束后,利用混凝土磨平机对各个试件的测试端面进行磨平加工,使试件尺寸误差控制在±0.5 mm以内,同时保证试件表面不平行度小于0.02 mm。试件的尺寸为108.22 mm×53.61 mm×40.00 mm,如图2所示。

1.3 试验原理

在电场作用下,主要起束缚电荷作用的物质称为电介质。混凝土材料也是一种电介质。在没有外加电场的情况下,电介质内部电荷按照同号电荷相



图2 试件

Fig. 2 Specimen

互排斥、异号电荷相互吸引的原则进行分布,对外显示中性。当电介质置于电磁场中,其内部电荷受外加电场的作用将会重新排列,正负电荷的中心位置不能继续重合,且在电介质表面产生一定数量的感应电荷,从而削弱电场,这种现象称为极化。通常用介电常数这个物理量来描述和反映电介质极化特性,介电常数随着电介质极化能力的强弱而变化,极化能力强,则其介电常数值大;极化能力弱,则其介电常数值小。

电介质的介电特性是指在外电场作用下电介质对电能进行储蓄和损耗的性质,通常用介电常数、电导率、磁导率来表示。介电常数为外加电场与最终电介质中电场的比值,用来表征电介质的极化特性,电介质极化能力越强则介电常数越大;电导率为电阻率的倒数,用来表征电介质的导电特性,导电性能越强则电导率越大;磁导率为磁感应强度与磁场强度之比,表征磁化特性。

对于水泥混凝土这类非磁性材料,其磁导率近似为1,介电常数和电导率可用相对复介电常数综合表达。

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = \epsilon'(1 - j \tan \delta_c) \quad (1)$$

式中: $\tilde{\epsilon}$ 为电介质的相对复介电常数; ϵ_0 为真空的介电常数; ϵ 为电介质的介电常数; σ 为电介质的电导率; ω 为电磁波角频率; ϵ' 为相对复介电常数实部; ϵ'' 为相对复介电常数虚部; j 为虚数单位符号; $\tan \delta_c$ 为损耗角正切。

1.4 试验方案

采用波导法(传输反射法)对纳米碳纤维增强混凝土的相对复介电常数进行测试。波导法测试系统主要由测试夹具、矢量网络分析仪和计算机(包括数据处理软件)3部分组成,被测介质应填充满测试夹具的矩形腔体,电磁波作用于被测介质后由矢量网

络分析仪得到其散射参数 S , 分析时基于 NRW 传输/反射(T/R)法便可求出被测介质的相对复介电常数。试验所用矢量网络分析仪如图 3 所示, 该设备为双端口网络分析仪, 可满足频率范围 100 kHz~4.5 GHz 的单向测量, 宽带范围 1~300 Hz, 功率扫描范围和动态范围分别高达 48、120 dB, 可以方便地进行相对复介电常数测试, 测试结果精确。



图 3 R&S ZND 型矢量网络分析仪

Fig. 3 R&S ZND vector network analyzer

图 4 为配合波导法使用的测试夹具, 该设备为混凝土相对复介电常数测试专用夹具, 可选择的频率范围为 1.7~2.6 GHz, 在该频率范围内能够实现试件的连续扫描测试。试件填充于夹具内部的情况如图 5 所示, 图 6 为实测图。

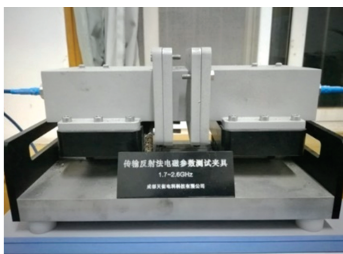


图 4 电磁参数测试夹具

Fig. 4 Electromagnetic parameter test fixture



图 5 试件填充于夹具内部

Fig. 5 Test piece is filled inside the fixture

试验采用波导法测试各组纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数, 测试的频率范围为 1.7~2.6 GHz, 测试前需先对设备进行校准和精度检验, 同一批次的测试只需校准一次即可。



图 6 相对复介电常数测试

Fig. 6 Relative complex dielectric constant test

2 结果与分析

2.1 相对复介电常数

相对复介电常数是描述材料极化性质(介电特性)的表征参量, 反映了材料在电磁场作用下的极化能力。在外加电磁场作用下, 由于介质的极化速度与外电磁场无法瞬时同步, 因此介质的介电常数 ϵ^* 包含有实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' 两部分, ϵ' 体现了介质对电磁能量的存储和释放能力, 而 ϵ'' 则体现介质对电磁能量的耗散能力。

普通混凝土和纳米碳纤维增强混凝土试件在 1.7~2.6 GHz 频率范围内的相对复介电常数测试结果如图 7 所示。从图中可以看出, 在 1.7~2.6 GHz 频率范围内, 普通混凝土和各组纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数受电磁场频率的影响较小; 整体上, 相对复介电常数实部 ϵ' 远大于相对复介电常数虚部 ϵ'' , 表明普通混凝土和纳米碳纤维增强混凝土材料对电磁能量的存储和释放能力远大于损耗能力; 纳米碳纤维增强混凝土的相对复介电常数实部与虚部都比普通混凝土的相对复介电常数实部与虚部大, 表明纳米碳纤维的掺加提高了混凝土材料对电磁能量的存储、释放和损耗能力。纳米碳纤维具有大比表面积、较高的导电性及介电常数, 将其与混凝土材料复合, 能够增加混凝土材料对电磁波的反射和损耗, 从而增强混凝土材料的介电特性。

2.2 相对复介电常数实部

相对复介电常数实部 ϵ' 表征介质对电磁能量的存储和释放能力。普通混凝土和纳米碳纤维增强混凝土试件相对复介电常数实部 ϵ' 随电磁场频率的变化规律如图 8 所示。从图中可以看出, 在 1.7~2.6 GHz 频率范围内, 纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数实部远大于普通混凝土试件, 说

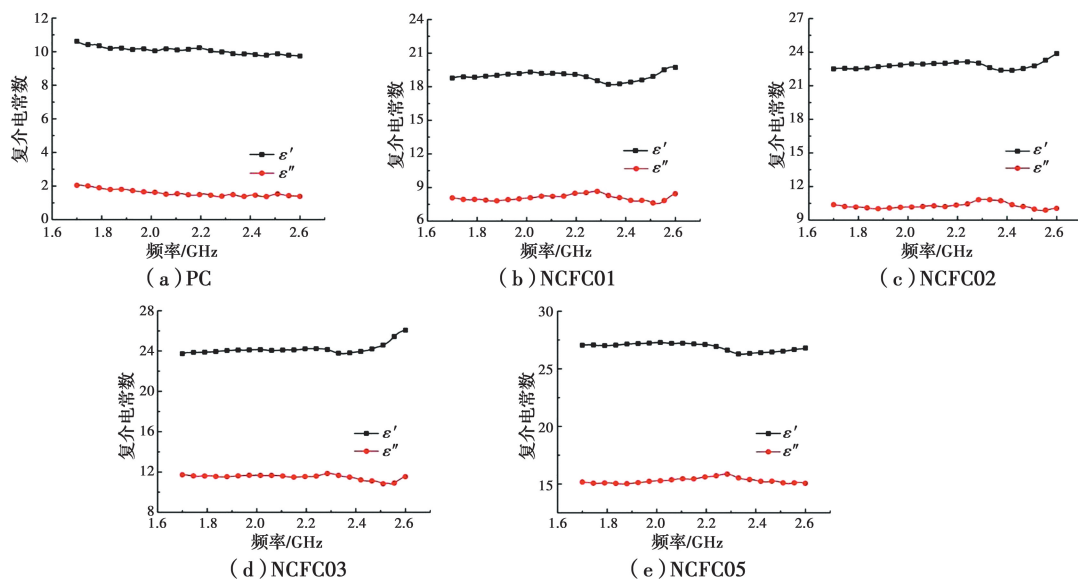


图 7 各组试件相对复介电常数测试结果

Fig. 7 Test results of the relative complex dielectric constant of each group of test pieces

明纳米碳纤维的掺入使混凝土相对复介电常数实部的值得到了大幅提升, 纳米碳纤维可以有效改善混凝土材料对电磁能量的存储与释放能力; 随着纳米碳纤维掺量的增加, 纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数实部不断增大, 即纳米碳纤维增强混凝土对电磁能量的存储与释放能力随着纳米碳纤维含量的增加而不断增强; 随着电磁场频率的增大, 纳米碳纤维增强混凝土试件相对复介电常数实部呈现出先基本平缓, 随后略有降低, 最后显著升高的趋势。随着频率的增加, 由于极化的惯性或滞后性, 以至在不同频率电磁场中极化来不及响应电磁场的变化而出现频响效应, 从而导致相对复介电常数实部出现先降低后升高的现象。

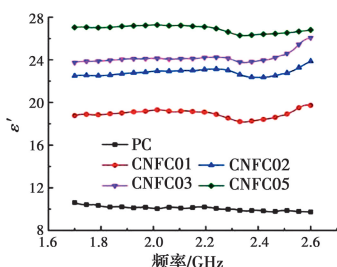


图 8 相对复介电常数实部随电磁场频率变化关系

Fig. 8 Relationship between the real part of the relative complex permittivity and the frequency of the electromagnetic field

2.3 相对复介电常数虚部

相对复介电常数虚部 ϵ'' 表征介质对电磁能量的损耗能力, 介质内部由于外电场的施加导致大量的

束缚电荷发生移动, 从而发生摩擦, 产生热量, 进而损耗电磁能量。普通混凝土和纳米碳纤维增强混凝土试件相对复介电常数虚部 ϵ'' 随电磁场频率的变化规律如图 9 所示, 其变化规律基本与相对复介电常数实部变化规律一致。从图中可以看出, 在 1.7 ~ 2.6 GHz 频率范围内, 纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数虚部远大于普通混凝土试件; 随着纳米碳纤维掺量的增加, 纳米碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数虚部不断增大; 纳米碳纤维可以提高混凝土材料对电磁能量的损耗能力, 且纳米碳纤维掺量越大, 提高效果越明显。

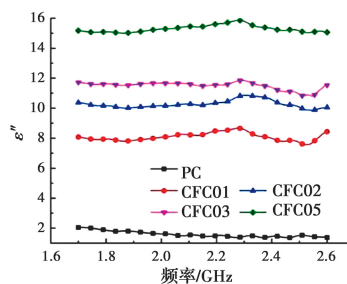


图 9 相对复介电常数虚部随电磁场频率变化关系

Fig. 9 Relationship between the imaginary part of the relative complex permittivity and the frequency of the electromagnetic field

2.4 损耗角正切

损耗角正切 $\tan \delta_e$ 为相对复介电常数虚部与实部的比值, 即介质在极化过程中损耗的能量与存储的能量之比。

$$\tan \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

损耗角正切 $\tan \delta_e$ 同样反映的是介质在极化过程中对电磁能量的损耗能力。普通混凝土和纳米碳纤维增强混凝土试件损耗角正切 $\tan \delta_e$ 随电磁场频率的变化规律如图 10 所示。从图中可以看出,在 1.7 ~ 2.6 GHz 频率范围内,纳米碳纤维增强混凝土试件的损耗角正切远大于普通混凝土试件的损耗角正切,纳米碳纤维对混凝土材料的损耗角正切影响极大,即使掺加少量的纳米碳纤维,对损耗角正切也具有十分显著的增强作用。且整体上随着纳米碳纤维掺量的增加,纳米碳纤维增强混凝土试件的损耗角正切不断增大。随着电磁场频率的增大,纳米碳纤维增强混凝土试件的损耗角正切呈现出先缓慢增长,随后略有降低的趋势。在电磁场作用下,混凝土材料的损耗角正切是导电媒质中热损耗的一种度量,主要由导电物质来决定。纳米碳纤维的掺加,增加了混凝土材料内部的导电物质,从而提高了混凝土材料的损耗角正切;且纳米碳纤维掺量越大,导电物质越多,损耗角正切越大。

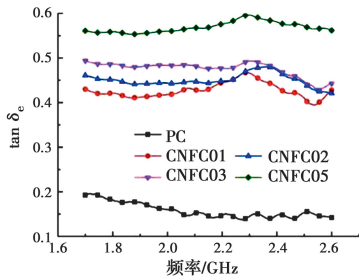


图 10 损耗角正切随电磁场频率变化关系
Fig. 10 Relationship between the loss tangent and the frequency of the electromagnetic field

2.5 与碳纤维的对比分析

通过以上各指标的分析可知,掺入纳米碳纤维能增大混凝土材料的相对复介电常数实部、相对复介电常数虚部和损耗角正切,对混凝土材料存储、释放、损耗电磁能量的能力具有明显的增强效果。以 0.3% 纤维掺量为例,对比分析纳米碳纤维和普通 3 mm 短切碳纤维对混凝土材料介电特性的影响。碳纤维增强混凝土的制备、试验条件等与 CNFC03 组纳米碳纤维增强混凝土一致。

碳纤维和纳米碳纤维对相对复介电常数实部 ϵ' 、相对复介电常数虚部 ϵ'' 的影响规律对比如图 11

和图 12 所示。从图中可以看出,0.3% 的纤维掺量下,碳纤维和纳米碳纤维都能够提高混凝土材料的相对复介电常数实部、相对复介电常数虚部;且纳米碳纤维的增强效果显著高于碳纤维。碳纤维增强混凝土试件的相对复介电常数实部和相对复介电常数虚部随着电磁场频率的增大而减小,其对高频波的存储和释放能力逐渐减弱。在不同频率的外加电磁场作用下,纳米碳纤维和普通碳纤维的频散效应^[16]不同,导致了纳米碳纤维增强混凝土和碳纤维增强混凝土的复介电常数实部、虚部随频率变化规律的不同。

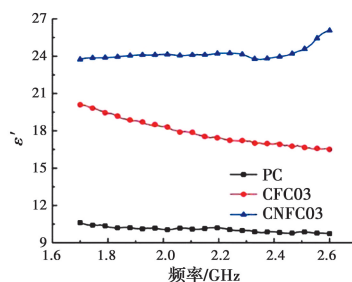


图 11 碳纤维和纳米碳纤维对相对复介电常数实部影响规律对比

Fig. 11 Comparison of the influence of carbon fiber and nano-carbon fiber on the real part of the relative complex dielectric constant

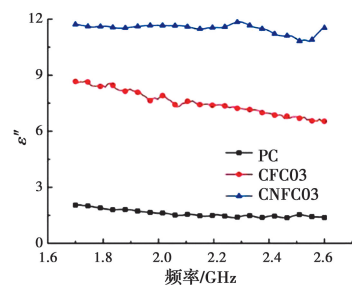


图 12 碳纤维和纳米碳纤维对相对复介电常数虚部影响规律对比

Fig. 12 Comparison of the influence of carbon fiber and nano-carbon fiber on the imaginary part of the relative complex dielectric constant

碳纤维和纳米碳纤维对损耗角正切 $\tan \delta_e$ 的影响规律对比如图 13 所示。从图中可以看出,碳纤维的掺加也能提高混凝土材料的损耗角正切,且提升效果较好,但仍不及纳米碳纤维对混凝土材料损耗角正切的提高。与碳纤维相比,纳米碳纤维还具有尺寸小、比表面积大等纳米材料的特性,这使得纳米

碳纤维增强混凝土介电特性优于碳纤维增强混凝土。

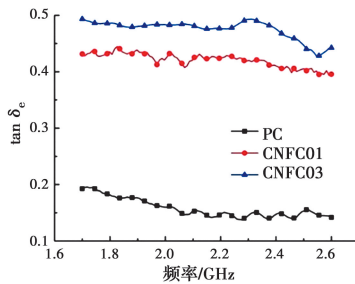


图 13 碳纤维和纳米碳纤维对损耗角正切影响规律对比

Fig. 13 Comparison of the influence law of carbon fiber and nano-carbon fiber on the loss tangent

2.6 分析讨论

纳米碳纤维不仅具备碳系材料的诸多优异性质,同时也具备纳米材料的量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、表面界面效应等性质,是一种应用前景广阔的介电损耗型吸收材料。将纳米碳纤维掺入混凝土材料内部,制备纳米碳纤维增强混凝土,形成纳米碳纤维/混凝土复合材料,能够充分利用纳米碳纤维的优异性能,提高混凝土材料的相对复介电常数实部和虚部,增强混凝土材料的极化能力和对电磁能量的损耗能力。

纳米碳纤维提高混凝土材料介电特性可以从两方面分析。一方面,纳米碳纤维是一种电阻率很低的材料,能赋予水泥基材料优异的导电性能,掺入混凝土材料内部后,混凝土材料的导电性有所增强,从而促进了混凝土材料内部偶极子的极化运动,提升了其对电磁能量的转化能力,进而提高了混凝土材料的相对复介电常数。纳米碳纤维材料属于活性纳米材料,对偶极子极化的促进作用强于碳纤维材料,因而使混凝土材料具有更高的相对复介电常数。另一方面,在掺有纳米碳纤维的混凝土材料中,可以把纳米碳纤维看作偶极子,纳米碳纤维偶极子在电磁场的作用下也会发生极化运动。掺入纳米碳纤维后,混凝土材料内部偶极子增多,极化能力增强,从而提高了纳米碳纤维增强混凝土的介电特性。

3 结论

1)在 1.7~2.6 GHz 频率范围内,纳米碳纤维增强混凝土相对复介电常数实部大于相对复介电常数虚部。

2)在 1.7~2.6 GHz 频率范围内,纳米碳纤维

增强混凝土相对复介电常数实部呈现出先基本平缓,随后略有降低,最后显著升高的趋势。纤维掺量越大,纳米碳纤维增强混凝土相对复介电常数实部越大。

3)随着纳米碳纤维掺量的增加,纳米碳纤维增强混凝土相对复介电常数虚部、损耗角正切不断增大,其对电磁波的损耗能力越强。

4)纳米碳纤维对混凝土材料相对复介电常数的提升强于碳纤维。

参考文献:

- [1] 王子敬. 沥青混合料介电常数影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 45-49.
WANG Z J. Research of the influential factors of asphalt mixture permittivity [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016, 35(2): 45-49. (in Chinese)
- [2] 孟美丽. 基于频率和温度的混凝土与沥青混合料介电模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
MENG M L. Research on dielectric model of concrete and asphalt mixture based on frequency and temperature [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)
- [3] 钟顺时. 电磁场与波 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
ZHONG S S. Electromagnetic fields and waves [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [4] OZTURK M, AKGOL O, SEVIM U K, et al. Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 58-63.
- [5] MAZZOLI A, CORINALDESI V, DONNINI J, et al. Effect of graphene oxide and metallic fibers on the electromagnetic shielding effect of engineered cementitious composites [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 18: 33-39.
- [6] LUDVIG P, CALIXTO J M, LADEIRA L O, et al. Analysis of cementitious composites prepared with carbon nanotubes and nanofibers synthesized directly on clinker and silica fume [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(6): 06017001.
- [7] MENG W N, KHAYAT K H. Effect of graphite

- nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 105: 64-71.
- [8] ZHU X Y, GAO Y, DAI Z W, et al. Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 49-63.
- [9] 王腾蛟, 许金余, 彭光, 等. 纳米碳纤维增强混凝土耐久性试验[J]. *功能材料*, 2019, 50(11): 11114-11121. WANG T J, XU J Y, PENG G, et al. Durability test of carbon nanofiber reinforced concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(11): 11114-11121. (in Chinese)
- [10] 孟博旭, 许金余, 彭光. 纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2458-2468. MENG B X, XU J Y, PENG G. Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2458-2468. (in Chinese)
- [11] MICHELI D, PASTORE R, VRICELLA A, et al. Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete composite reinforced with carbon nanotubes in the mobile phones frequency band [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2014, 188: 119-129.
- [12] MICHELI D, VRICELLA A, PASTORE R, et al. Electromagnetic properties of carbon nanotube reinforced concrete composites for frequency selective shielding structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 267-277.
- [13] 汪晖. 环境条件对纳米碳纤维水泥基材料压阻性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. WANG H. Effect of environmental conditions on the piezoresistive properties of nano-carbon fiber cement-based materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] WANG H, GAO X J, WANG R. The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134: 673-683.
- [15] WANG H, GAO X J, LIU J Z, et al. Multi-functional properties of carbon nanofiber reinforced reactive powder concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 699-707.
- [16] 李宝毅, 张换换, 王东红, 等. 氧化处理对碳纤维表面碳纳米管修饰效果及其电磁性能的影响研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(10): 10075-10079. LI B Y, ZHANG H H, WANG D H, et al. The effect of oxidation treatment on the surface modification of carbon nanotubes on carbon fiber and its electromagnetic properties [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(10): 10075-10079. (in Chinese)

(编辑 黄廷)