http://pmse.scu.edu.cn

碳纤维增强碳基复合材料的介电性能对应力的自感知

席 翔[1,2]，李海龙[1]，陈友元[1]，裴景奇[1]，廖城坤[1]，薛 琳[3]，储洪强[1]，冉千平[2,4]

(1. 河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210098; 2. 江苏省建筑科学研究院有限公司 高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏 南京 210008; 3. 河海大学 材料科学与工程学院，江苏 常州 213000; 4. 东南大学 材料科学与工程学院，江苏 南京 211189)

摘要：碳纤维增强碳基复合材料(C/C)具有优异的力学和导电性能，但其介电性能的报道较为罕见。文中采用LCR测量仪测量C/C的相对介电常数，采用电流源和纳伏表通过四电极法测量C/C的电阻率，研究了C/C的相对介电常数和电阻率随压应变的变化规律。研究表明，单位应变下相对介电常数的变化率(528±8)是电阻率变化率(111±5)的4.7倍，说明C/C复合材料的介电性能对其微观结构的改变更敏感。此外，压应变下C/C介电性能的增强归因于应变诱导的微缺陷提供了部分电子和空穴参与空间电荷极化的场所，以及压应变改善了极化连续性。单位压应变下增加的参与极化的电子或空穴的数量为$(1.37\pm0.02)\times10^{10}$。C/C的相对介电常数低于碳纤维和石墨，可归因于碳基体中较高的孔隙率及较多的界面。

关键词：碳纤维；复合材料；介电性能；自感知；极化；介电常数

中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)05-0115-10

由于兼具导电、抗热冲击、减摩抗磨等优异性能，碳纤维增强碳基复合材料(C/C)被广泛应用于航空航天领域，如导弹发射台、空间飞行器、飞机刹车片等[1,2]。在复杂受力工况下，C/C不可避免地会受到应力/应变对其微观结构可逆或不可逆的影响。可逆影响包括弹性形变范围内碳纤维的伸缩、碳基体内空隙体积的改变、碳材料和碳基体间化学键的伸缩等。不可逆的影响则包括过大应力/应变下碳纤维与碳基体间的剥离，疲劳作用下微裂纹的产生及扩展等。因此，监测C/C的受力状态尤为重要。

基于电阻的监测方法已获得大量关注，且研究对象多为碳纤维增强水泥基复合材料和碳纤维增强高分子基复合材料，监测的工况包括应力/应变、温度、疲劳与冲击等[3-5]。单位应变下的电阻变化率和单位应变下的电阻率变化率通常用来表征压敏效应的灵敏度。电阻与材料的电阻率及尺寸有关，因此电阻的变化耦合了应力/应变对材料电阻率及尺寸的影响。此外，适中的电阻及电阻率能获得较大的灵敏度。过大或过小的电阻及电阻率都不利于获得较大的灵敏度：如高分子材料的绝缘特性使得电阻仪无法测量其巨大的电阻；而水泥基材料虽然是离子导体，但离子的浓度及移动速率远低于金属和碳材料中电子的浓度及移动速率，因此水泥基材料的电阻率也较大，一般可达10^4~10^6 Ω·m数量级。因此，加入碳纤维的目的是为了降低高分子基和水泥基的电阻率以获得更明显的压敏特性[3,4]。而对于C/C，碳纤维和碳基体均为导体，因此，C/C的电阻率较小，导致由弹性形变范围内产生的可逆性微观结构改变所引起的电阻的变化很小，灵敏度较低；而因应变过大、疲劳或冲击产生的不可逆性微观结构的改变如裂纹等才能获得较大的灵敏度。

除了电阻和电阻率，电容和相对介电常数（后称

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0090
收稿日期：2023-07-06
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(B240201072)；国家自然科学基金资助项目(52079048)；江苏省重点研发计划(BE2020780)
通讯联系人：薛琳，主要从事铁基非晶纳米晶软磁材料、稀土基非晶/高熵合金微观结构与磁热性能、海洋环境表面防护涂层材料等研究，E-mail: linxue06@163.com

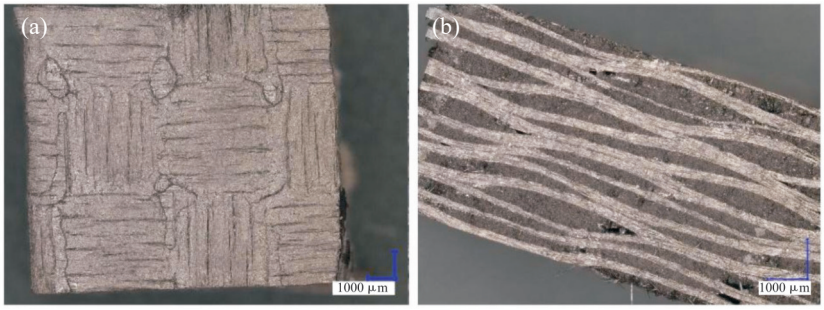


Fig. 1 Optical micrographs of the C/C composite
(a): top image of the C/C composite; (b): cross-sectional image of the C/C composite

介电常数）也被证明可用来监测材料的状态[6,7]，它们和材料的介电性能有关。关于介电性能的研究，人们多关注在非导体材料如钙钛矿陶瓷材料和高分子材料[8,9]；而对于导体材料，则鲜有关于介电性能的报道，因为人们普遍认为导体过低的电阻率不足以让极化发生。然而，本课题组通过实验的方法测出了低频(2 kHz)下聚丙烯腈基碳纤维的介电常数高达12000[10]，这归因于带电粒子与原子的相互作用，且这种作用多发生在缺陷处，从而导致空间电荷分布不均匀而产生极化。研究表明，石墨单位体积内的晶界面积的增大对介电常数的影响大于电阻率，表明介电性能对微观结构的改变更敏感[11]。此外，C/C表面的孔洞会降低其电容值，主要是因为孔隙削弱了电偶极子间的相互作用[7]。课题组研究了基于电容及介电常数的聚丙烯腈基碳纤维和各向同性石墨的拉敏特性，研究表明，单位应变下碳纤维和石墨的介电常数变化率分别为1900和1400[6,12]，但未曾报道C/C基于电容和介电常数的压敏行为。

综上所述，本文旨在研究C/C在压应力下的电容变化规律，并通过解耦接触电容获得C/C的体积电容，进一步计算介电常数随压应力的变化规律；此外，通过与基于电阻率的压敏行为进行对比，分析压应力影响C/C介电与导电行为的不同机制。以期未来能将电容或介电常数应用于C/C的状态监测中。

1 实验部分

1.1 主要原料

C/C：商用材料，由CFC CARBON CO. LTD公司提供，密度为1.68 g/cm^3，碳含量≥99.99%，抗压强度为150 MPa，抗弯强度为130 MPa，层间剪切强度为15 MPa，碳纤维编织平面内的电阻率为2.24×10^{-5} Ω·m，灰含量≤100×10^{-6}，碳纤维的体积分数为38.6%。

C/C制备方法采用液相浸渍-碳化法，其中碳纤维增强相为沥青基碳纤维。使用光学显微镜获得C/C的表面和截面形貌图，如Fig.1所示。横向和纵向碳纤维相互编织成二维平面，并且在三维方向上进行堆叠。碳纤维层与层之间的厚度为100~800 μm之间不等。本文中所有的电学测量方向均平行于编织的碳纤维平面，而压应力的施加方向为垂直于编织碳纤维平面。

1.2 介电常数测量

电容测量采用的平行板电容器模型如Fig.2(a)所示，介电常数测量结构如Fig.2(b)所示，图中尺寸单位均为毫米，材料厚度为5.68 mm。电容测量采用LCR测量仪(HIOKI IM3536 (HIOKI E.E. Corporation, Nagano, 日本))。共有6个电极缠绕在样品的4个表面。电极材料采用宽度为6 mm的铝膜和样品通过6层双面胶相连。电极材料和样品间用绝缘层隔开。实际测量的电容（C_m）为材料体积电容（C_v）和2个接触电容（C_i）通过串联的方式连接，串联电容公式如式(1)所示

$$\frac{1}{C_m}=\frac{1}{C_v}+\frac{2}{C_i} \tag{1}$$

式中：C_m——电容测量值, pF；C_v——C/C的体积电容, pF；C_i——电极与C/C之间的接触电容, pF。

材料的体积电容与介电常数的关系如式(2)所示：

$$C_v=\frac{\varepsilon_0\kappa A}{l} \tag{2}$$

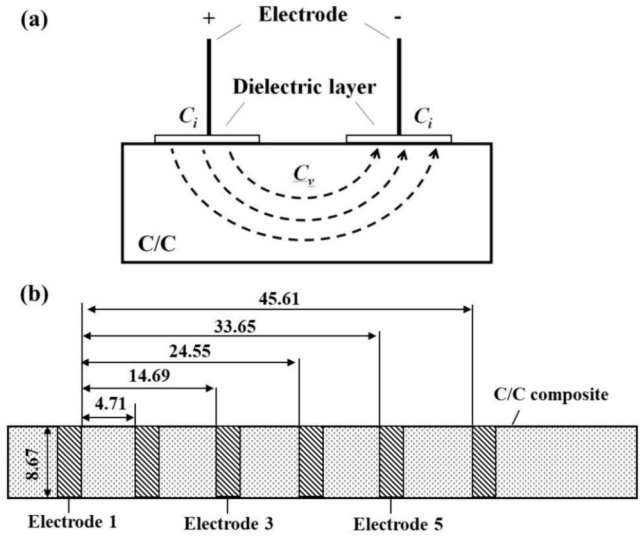


Fig. 2 Testing method of capacitance and relative permittivity of C/C
(a): parallel capacitor model for capacitance measurement; (b): testing configuration of relative permittivity

其中:ε_0——真空中的介电常数,8.85×10^{-12} F/m;κ——材料的介电常数;A——材料的横截面积, m^2;l——被测材料的长度, m^2。

由式(1)和式(2)可得

$$\frac{1}{C_m}=\frac{1}{\varepsilon_0\kappa A}+\frac{2}{C_i} \tag{3}$$

由式(3)可知,电容测量值的倒数与C/C的长度成线性相关,且斜率为$1/(\varepsilon_0\kappa A)$。因此只需测量不少于3个长度的电容值,以电容测量值的倒数为纵坐标、长度为横坐标绘制图形,然后通过直线拟合求出斜率值,即可算出κ。此方法可成功从电容测量值中解耦出体积电容。直线与纵坐标轴的截距即为$2/C_i$。如Fig.2(b)所示,实验中共测量5段长度的电容值。测试使用的电场强度为21.2 V/m,频率为2 kHz。

1.3　压敏性测试

基于电容的压敏性测试示意图如Fig.3所示。因电接触为未受到压应力的影响,因此压应力作用过程中电极与C/C之间的接触电容不变,从而可以根据式(1)计算出体积电容,由式(2)计算出介电常数随压应力的变化规律。

基于电阻的压敏性测试与Fig.3的区别在于,电阻测量采用四电极法,因此4个电极布置在C/C表面;电极与C/C之间涂覆银胶作为导电界面材料。根据式(4)计算出材料的电阻率。为避免焦耳热对电阻测量产生影响,测量全程用手持温度测试仪测量温度。

$$\rho=\frac{RA}{L} \tag{4}$$

式中:ρ——电阻率, $\Omega\cdot m$;R——体积电阻, Ω;A——材料横截面积, m^2;L——被测材料长度, m。

使用电子万用试验机(Hydraulic eXpert 1000)对C/C施加压力。压应力设计为低载荷(30 MPa)、中载荷(60 MPa)和高载荷(120 MPa)。每次应力值做5次循环来考察测量值的可逆性。

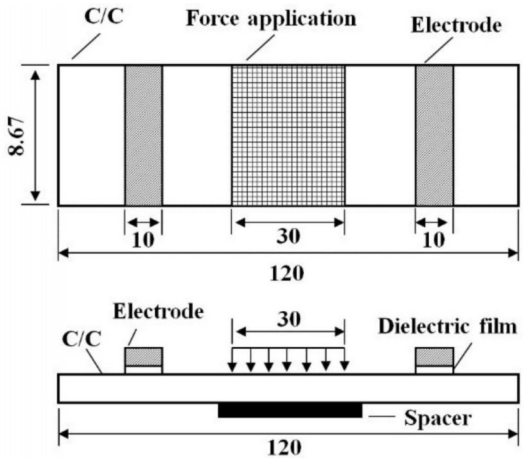


Fig. 3 Compression test configuration for capacitance -based

2　结果与讨论

2.1　C/C的介电常数

电极距离与电容的关系如Fig.4所示。根据式

(3)可计算出C/C的介电常数为578±13。C/C的碳基部分是通过高分子基炭化得来，碳基体中还存在较高的孔隙率，孔隙中空气的介电常数接近1。因此C/C的介电常数介于碳纤维和石墨之间[12,13]。

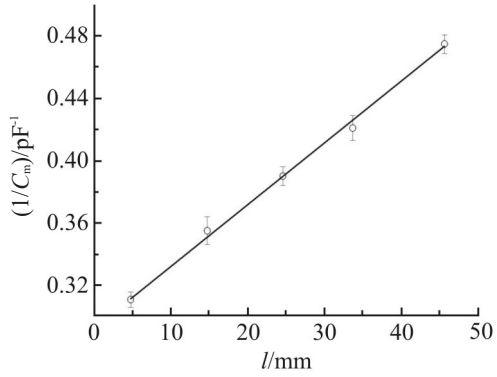


Fig. 4 Dependence of inter-electrode distance on reciprocal of the measured capacitance

2.2 C/C的结构分析

C/C中的碳纤维为沥青基碳纤维，密度为1.92 g/cm³[12]，C/C的密度为1.68 g/cm³，碳纤维的体积分数为38.6%，因此碳基体的体积分数为61.4%。根据混合法则公式(式(5))，可以算出碳基体的密度为1.53 g/cm³，此密度远低于理想石墨的密度(2.26 g/cm³)，反映出了碳基体中较高的孔隙率，

$$\rho_{C/C}=\rho_{CF}V_{CF}+\rho_{C}V_{C} \tag{5}$$

式中：$\rho_{C/C}$——C/C的密度，g/cm³；ρ_{CF}——碳纤维的密度，g/cm³；V_{CF}——碳纤维的体积分数；ρ_{C}——碳基体的密度，g/cm³；V_{C}——碳基体的体积分数。

C/C中碳纤维的电阻率为1.20×10^{-3} Ω·cm[12]，C/C的电阻率为2.04×10^{-3} Ω·cm。将C/C分为2个电阻：一个电阻是体积分数为19.3%的纵向碳纤维，另一个电阻是体积分数为80.7%的横向碳纤维及碳基体，如Fig.5所示。若2个电阻为并联关系，则根据式(6)可计算出横向碳纤维和碳基体的电阻率为2.45×10^{-3} Ω·cm。若采用串联模型(式(7))，则横向碳纤维和碳基体的电阻率为2.24×10^{-3} Ω·cm。可见，串并联模型获得的电阻率相近，

$$\frac{1}{\rho_{C/C}}=\frac{V_{CF}}{\rho_{CF}}+\frac{V_{CF\text{-}C}}{\rho_{CF\text{-}C}} \tag{6}$$

$$\rho_{C/C}=\rho_{CF}V_{CF}+\rho_{CF\text{-}C}V_{CF\text{-}C} \tag{7}$$

式中：$\rho_{C/C}$——C/C的电阻率，Ω·m；ρ_{CF}——纵向碳纤维的电阻率，Ω·m；V_{CF}——纵向碳纤维的体积分数；$\rho_{CF\text{-}C}$——横向碳纤维和碳基体的电阻率，Ω·m；$V_{CF\text{-}C}$——横向碳纤维和碳基体的体积分数。

C/C中碳纤维的介电常数为3960[12]，C/C的介电常数为573。将C/C分为2个电容：一个电容是体积分数为19.3%的纵向碳纤维，另一个电容是体积分数为80.7%的横向碳纤维及碳基体(Fig.5)。若2个电容为并联关系，则根据式(8)可计算出横向碳纤维和碳基体的介电常数为负值，因此并联模型并不适用。若采用串联模型(式(9))，则横向碳纤维和碳基体的介电常数为475。以上数据表明，基体的密度小于碳纤维的密度；横向碳纤维和碳基体的电阻率大于碳纤维的电阻率；横向碳纤维和碳基体的介电常数小于碳纤维的介电常数。

$$\kappa_{C/C}=\kappa_{CF}V_{CF}+\kappa_{CF\text{-}C}V_{CF\text{-}C} \tag{8}$$

$$\frac{1}{\kappa_{C/C}}=\frac{V_{CF}}{\kappa_{CF}}+\frac{V_{CF\text{-}C}}{\kappa_{CF\text{-}C}} \tag{9}$$

式中：$\kappa_{C/C}$——C/C的介电常数；κ_{CF}——纵向碳纤维的介电常数；V_{CF}——纵向碳纤维的体积分数；$\kappa_{CF\text{-}C}$——横向碳纤维和碳基体的介电常数；$V_{CF\text{-}C}$——横向碳纤维和碳基体的体积分数。

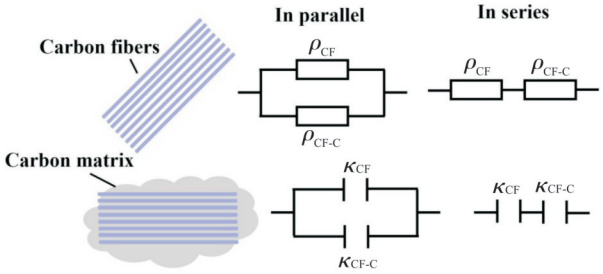


Fig. 5 Electrical model of the C/C composite

2.3 C/C的压敏行为

低载荷下C/C的压敏行为如Fig.6所示。电容随着压应力的增大而增大，而电阻随着压应力的增大而减小。从图中可以看出，电容和电阻都能在压应力卸载后回到初始值，表明电容和电阻的可逆性较好。当压应力为30 MPa时，电容值为2.21 pF，比初始状态的电容值(2.11 pF)增大约4.7%；介电常数增大约14.1%；电阻值为2.41×10^{-2} Ω，比初始状态的电阻值(2.48×10^{-2} Ω)减小约2.8%，电阻率减小为2.66%。单位应变下电容和介电常数的变化率分别为199和564；单位应变下电阻和电阻率的变化率均为106。介电常数的灵敏度是电阻率的5倍，表明介电常数相比于电阻率对材料微观结构的变化更为敏感。

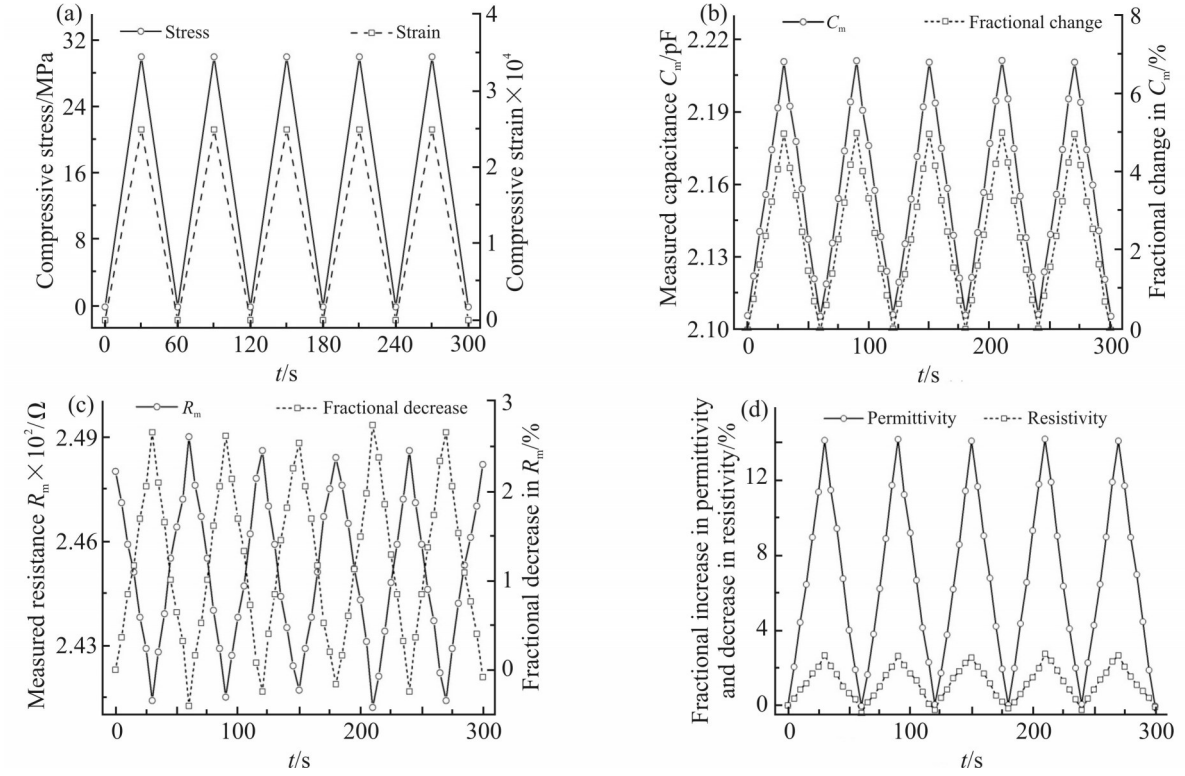


Fig. 6 Dependence of low stress/strain on capacitance, relative permittivity, resistance and resistivity

(a): stress and strain; (b): effect of stress/strain on C_m; (c) effect of stress/strain on R_m; (d) effect of stress/strain on fractional increase in permittivity κ and decrease in resistivity ρ

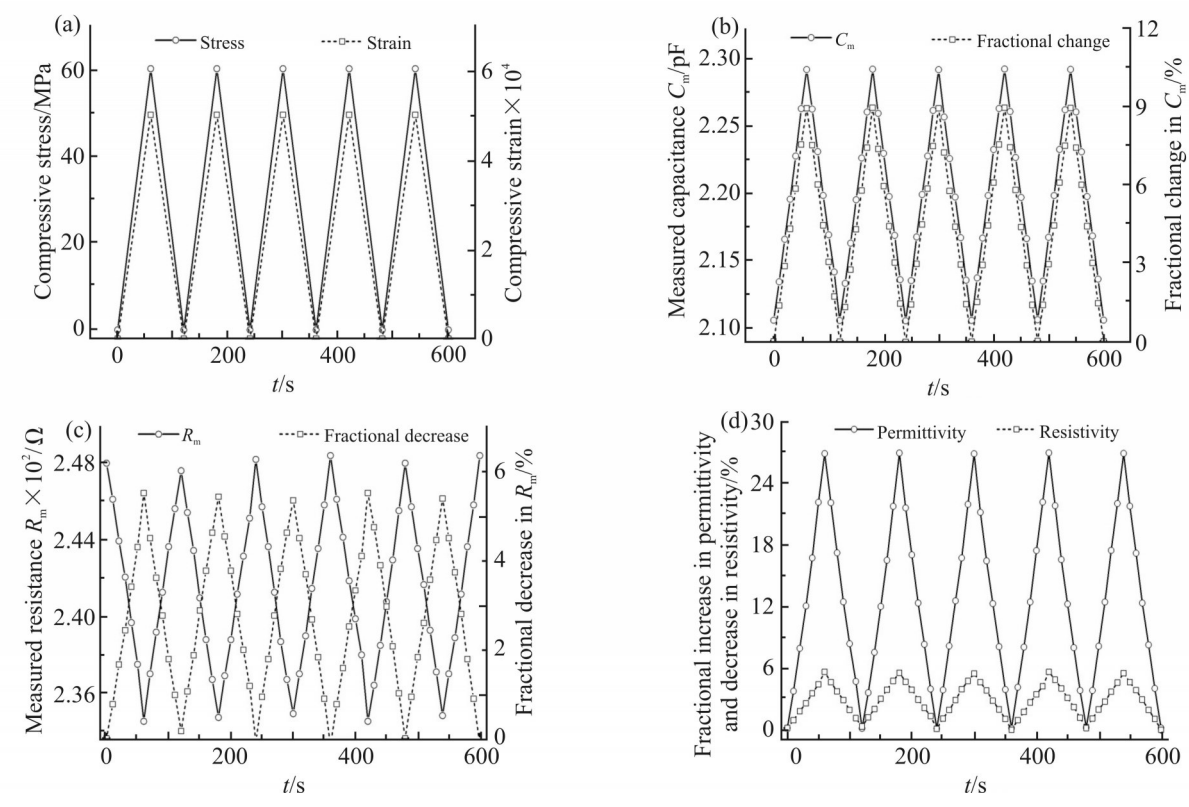


Fig. 7 Dependence of medium stress/strain on capacitance, relative permittivity, resistance and resistivity

(a): stress and strain; (b): effect of stress/strain on C_m; (c) effect of stress/strain on R_m; (d) effect of stress/strain on fractional increase in κ and decrease in ρ

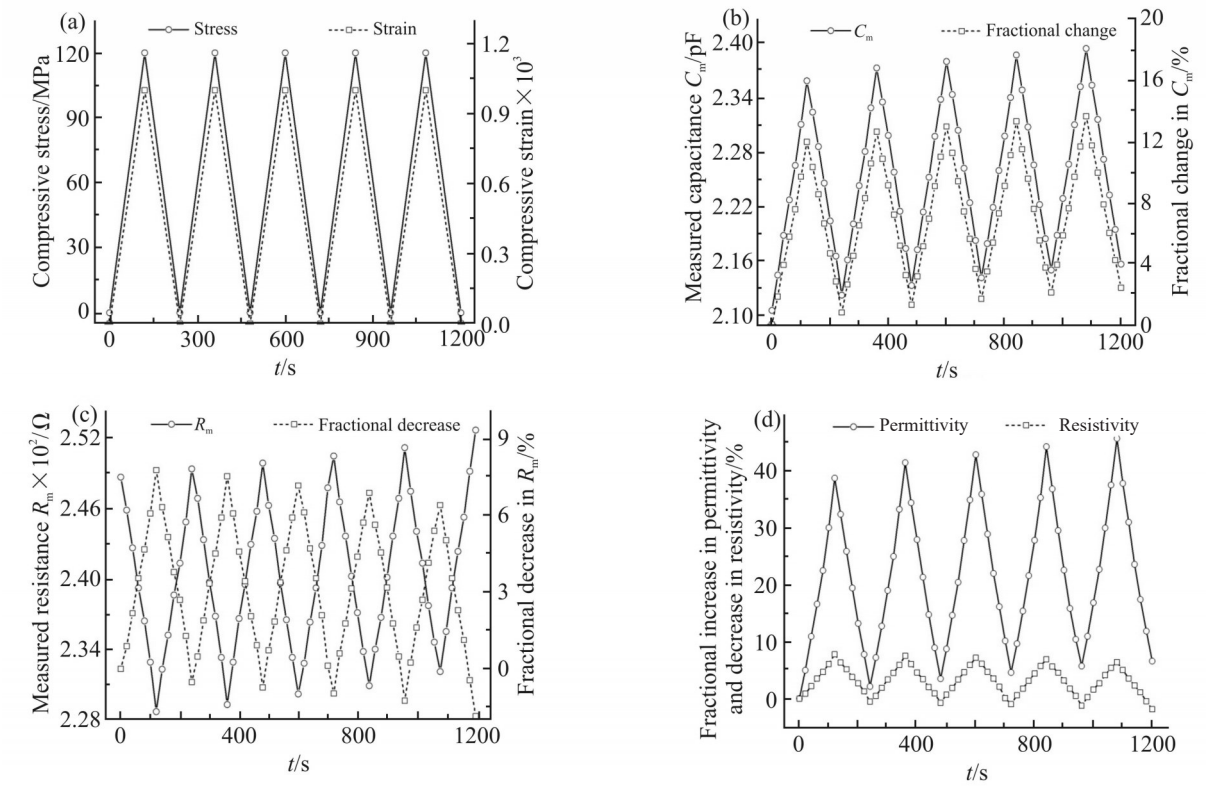


Fig. 8 Dependence of high stress/strain on capacitance, relative permittivity, resistance and resistivity
(a): stress and strain; (b): effect of stress/strain on C_m; (c) effect of stress/strain on R_m; (d) effect of stress/strain on fractional increase in κ and decrease in ρ

中载荷(60 MPa)下C/C的压敏行为如Fig.7所示。同样，电容随着压应力的增大而增大，而电阻随着压应力的增大而减小。电阻和电阻率的灵敏度均为109；电容和介电常数的灵敏度分别为177和536。可见增大载荷增强了电阻和电阻率的灵敏度，而削弱了电容和介电常数的灵敏度。60 MPa下，电阻、电阻率、电容和介电常数均体现出较好的可逆性，表明在该应力作用下产生的微观结构的改变对电学性能的影响是可逆的。

在高载荷(120 MPa)下，4个电学参数均表现出一定的不可逆性(Fig.8)。不可逆性与高载荷下碳纤维的塑性变形、碳纤维与碳基体间过大的位移甚至拔出有关。在5次应力循环之后，电阻率较初始值增大了1.6%，介电常数较初始值增大了6.6%，可见大应变下微观结构的不可逆性对介电性能的影响大于导电性能。此外，随着压应力循环次数的增加，C/C的导电性能逐渐减弱而介电性能逐渐增强，表现在第5次压应力下的电阻率比第1次压应力下的电阻率增大了1.5%，而介电常数增大了5.0%。

为求出压阻系数(单位压应变下的电阻率变化率)和压介系数(单位压应变下的相对介电产常数变化率)，绘制了60 MPa下电阻率和介电常数变化率随压应变的变化关系图，如Fig.9所示。对比Fig.9(a)和Fig.9 (b)发现，介电常数的数据比电阻率的更收敛，数据的收敛表征了测量参数在卸载后恢复数值的程度。通过直线拟合可得压介系数为528±8，压阻系数为111±5。单位应变下介电常数的变化率是电阻率的4.7倍，可见基于介电常数的压力灵敏度比基于电阻率的高。

聚丙烯腈基碳纤维和石墨的拉介系数(单位拉应变下介电常数的变化率)分别为1900和1400[6, 12]，均高于C/C复合材料的压介系数。其原因可能为拉应变下产生的微缺陷比压应变下的多，表现为复合材料的抗拉强度通常小于其抗压强度，而微缺陷的增多是介电性能强化的主要原因之一，Fig.10示出了120 MPa作用后C/C的微观截面图，从图中可看出，高载荷作用下碳基体出现明显的裂缝和孔洞，且部分碳纤维被从碳基体中拔出，这些高应变诱导的微

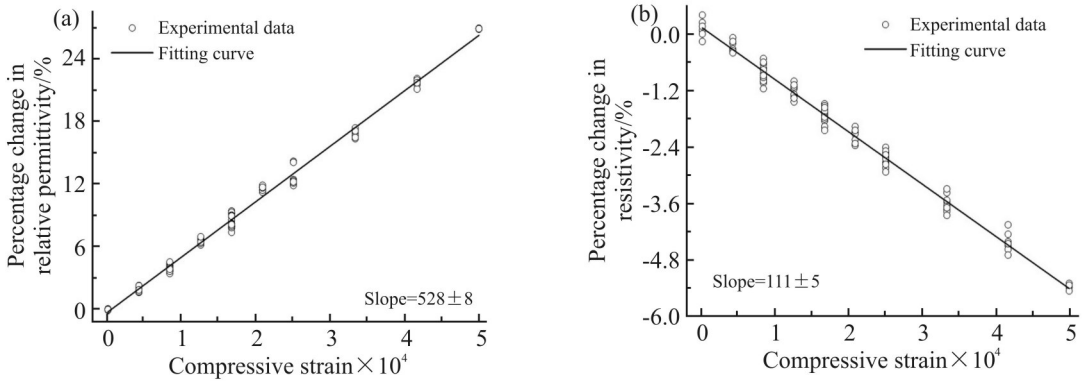


Fig. 9 Effects of compressive strain on percentage change in relative permittivity and resistivity
(a): percentage change in relative permittivity vs. compressive strain; (b): percentage change in resistivity vs. compressive strain

观缺陷可成为势阱捕获运动中的载流子,从而增强空间电荷极化效应。

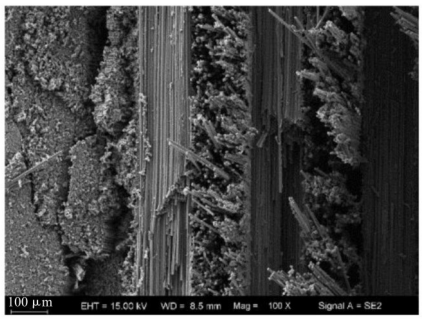


Fig. 10 Flaws in the C/C composites

2.4 压敏行为中导电和介电机制

压敏行为中的导电机制已有诸多文献报道,主要是因为应力/应变对复合材料中的导电通路的影响。如在高分子基材料中,当碳纤维体积分数小于渗流阈值时,应力/应变对复合材料电阻率的影响很小,因为此时体系的电阻率很大;当碳纤维体积分数在渗流区时,碳纤维和碳纤维之间还未完全接触,此时电子通过"轨道效应"传导,压应力可减小"轨道"距离,导致复合材料的电阻率呈现下降趋势;当碳纤维的体积分数超过渗流阈值时,基体中碳纤维相互搭接形成导电通路,在压应力下碳纤维之间接触点增多,因此电阻率在压应力下显著下降。而对于C/C,碳基体和碳纤维均为导体,因此不存在渗流阈值现象。压应力下C/C电阻率的降低主要是归因于碳基体中孔隙体积的减小,以及碳纤维与碳纤维之间、碳纤维和碳基体之间界面孔隙体积的减小。如Fig.6~Fig.8所示,在弹性形变范围内,当外力撤除后,孔隙的体积恢复,因此电阻率开始增大。

C/C的介电性能源于载流子(电子和空穴)和原子的相互作用,这种静电式的作用主要发生在缺陷处,如晶界、相界、界面等,例如,37%的冷加工可使金属铜的介电常数增大了12.5%[13]。介电常数与体积电容有关(式(2)),体积电容与参与极化的电量有关,如式(10)所示

$$C_v = \frac{Q}{V} \tag{10}$$

式中:C_v——体积电容, pF;Q——参与极化的电量, C;V——LCR测试仪施加的交流电压, V。

电压和电场强度的关系为$E = V/l$,再结合式(2)和式(3)可计算出参与极化的电量,如式(11)所示

$$Q = \varepsilon_0 \kappa A E \tag{11}$$

式中:ε_0——真空中的介电常数(8.85×10^{-12} F/m);κ——材料的介电常数;A——材料的横截面积, m^2;E——交流电场强度, V/m。每个电子或空穴携带的电量为1.6×10^{-19} C。因此可计算出载流子的个数随压应变的变化关系如Fig.11(a)所示。石墨在300 K下电子或空穴的浓度为7.4×10^{24} m^3[14],电子和空穴均参与极化过程,因此,在考虑石墨载流子浓度时,应同时考虑电子和空穴的影响,即浓度为1.4×10^{25} m^{-3}。碳纤维和石墨具有相似的电子结构[15],因此可假设碳纤维和碳基体均为"半金属",且与石墨具有相似的能带结构。因此,可近似认为C/C的载流子浓度为1.4×10^{25} m^{-3}。由此可计算出载流子个数占所有载流子个数的百分比随压应变的变化关系,如Fig.11(b)所示。

由Fig.11可以看出,参与极化的载流子个数和载流子占比随着应变的增大而增大。单位应变增加

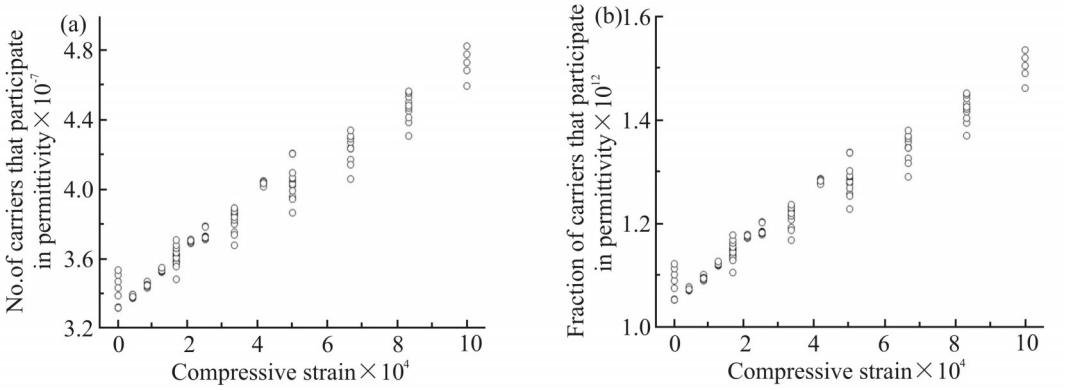


Fig. 11 Effects of compressive strain on the number of carriers and fraction of carriers that participate in relative permittivity
(a): number of carriers that participate; (b): fraction of carriers that participate

参与极化的载流子个数为(1.37±0.02)×10[10]，表明压应力增强了C/C的极化性能。其机制可归纳如下。其一，异质结构数量(heterogeneity)的增加：在压应力下，碳纤维与碳基体之间微分离产生的微裂纹和孔隙体积的变化可为空间电荷极化的发生提供场所，如石墨和金属铜在晶粒尺寸减小后介电性能均得到增强[11, 13]。压应变增加了参与极化的带电粒子数，因此增大了电容和介电常数。在弹性形变范围内，微结构的变化能在应力应变卸载后消除，因此对应的极化现象也会消失，表现出在低载荷(Fig.6)和中载荷(Fig.7)作用下，电容能在应力应变卸载后恢复原来的数值。而在大载荷作用下(Fig.8)，部分微观结构的改变未能在外力卸载后恢复，因此空间电荷极化现象也不能被完全消除。此外，一些微观缺陷(如微裂纹等)会随着应力循环次数的增加而增加，从而剩余的空间极化也会随着应力循环次数的增加而增加，表现在每次压应力卸载后的电容均比上一次的压应力卸载后的电容大(Fig.8)，例如第5次压应力撤除后的电容比第4次增大了0.3%，比第3次增大了0.7%，比第2次增大了1.1%，比第1次增大了1.6%。因此，可利用电容来表明一些微观结构中的不可逆变化。其二，极化连续性的增强(用于衡量表征电偶极子之间相互作用的强弱)：极化连续性类似并区别于水泥基和高分子基复合材料中的导电连通性，导电连通性依赖于导电相在非导电基体中的分布，而极化连续性依赖于材料微观结构的致密性及其择优取向。在无外力作用时，部分电偶极子在交流电作用下发生定向排列，在压应力作用下更多的电偶极子发生更为明显的排列，电偶极子的增多是因为压应力增加了参与极化的载流子浓度(Fig.11)。在以上机制共同作用下，压应力增强了C/C的介电性能，并且能利用电容或介电常数来感知压应变。

3 结论

利用C/C的介电性能(电容/介电常数)和导电性能(电阻/电阻率)可实现对自身应力/应变的状态监测。压应力可同时增强C/C的介电性能和导电性能，表现在电容/介电常数随着压应力的增大而增大，电阻/电阻率随着压应力的增大而减小。在中、低载荷下，电信号在卸载后表现出良好的可恢复性，在高载荷下，电信号的可恢复性能下降，原因为微观结构的不可逆变化对导电性能和介电性能的不可逆影响。单位应变下C/C介电常数的变化率为528，电阻率的变化率为111，表明C/C的介电性能对材料弹性形变范围内微观结构的改变更敏感。C/C对应力/应变的自感知机理可归结于压应变增加了参与空间电荷极化的电荷数，以及增强了极化连续性。利用电信号监测C/C的应力/应变状态具有操作简单、灵敏度高等优点，可将这种方法应用到航空发动机的叶片和涡轮盘等关键部件，以及汽车车身、发动机和传动系统等关键部件的状态监测中。

参考文献：

[1] Wang L, Tian W, Chen L, *et al*. Investigation of carbon-carbon nozzle throat erosion in a solid rocket motor under acceleration

conditions[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2021, 22: 42-51.

[2] 翟兆阳, 曲雅静, 张延超, 等. 碳纤维增强碳基复合材料加工技术研究与探讨[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2014-2033.
Zhai Z Y, Qu Y J, Zhang Y C, *et al*. Research and discussion on processing technology of carbon fiber reinforced carbon matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 2014-2033.

[3] 李斌, 张学勇, 付朝阳, 等. 改性材料对炭黑填充压敏硅橡胶导电性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(11): 92-97.
Li B, Zhang X Y, Fu C Y, *et al.* Effect of nano-modified materials on the conductive properties of conduct silicone rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(11): 92-97.

[4] Shin P S, Baek Y M, Kim J H, *et al*. The factor influencing self-sensing property of carbon fiber[J]. Composites Science and Technology, 2023, 238: 110017.

[5] Chung D D L. A review to elucidate the multi-faceted science of the electrical- resistance- based strain/temperature/damage self-sensing in continuous carbon fiber polymer- matrix structural composites[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 483526.

[6] Chung D D L, Xi X. Piezopermittivity for capacitance- based strain/stress sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113028.

[7] Xi X, Chung D D L. Capacitance-based self-sensing of flaws and stress in carbon- carbon composites, with reports of the electric permittivity, piezoelectricity and piezoresistivity[J]. Carbon, 2019, 146: 447-461.

[8] 胡静文, 段广宇, 胡祖明, 等. 改性钛酸钡/聚间苯二甲酰间苯二胺复合薄膜的制备与介电性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(5): 50-59.
Hu J W, Duan G Y, Hu Z M, *et al.* Preparation and dielectric properties of modified barium titanate/polyisophthaloyl metaphenylene diamine composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(5): 50-59.

[9] 张全平, 陈瑞超, 杜芳艳, 等. 高填充钛酸钡/氟硅橡胶纳米复合材料制备及介电性能调控[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(2): 17-23.
Zhang Q P, Chen R C, Du F Y, *et al.* Preparation and dielectric properties of highly filled barium titanate/fluorinated silicone runner nanocomposites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(2): 17-23.

[10] Xi X, Chung D D L. Colossal electric permittivity discovered in polyacrylonitrile (PAN) based carbon fiber, with comparison of PAN-based and pitch-based carbon fibers[J]. Carbon, 2019, 145: 734-739.

[11] Xi X, Chung D D L. Role of grain boundaries in the dielectric behavior of graphite[J]. Carbon, 2021, 173: 1003-1019.

[12] Xi X, Chung D D L. Piezoelectric and piezoresistive behavior of unmodified carbon fiber[J]. Carbon, 2019, 145: 452-461.

[13] Xi X, Chung D D L. Effects of cold work, stress and temperature on the dielectric behavior of copper[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 270: 124793.

[14] Mcclure J W. Analysis of multicarrier galvanomagnetic data for graphite[J]. Physical Review, 1958, 112: 715-721.

[15] Burghard W, Umeno M, Wiech G, *et al*. X- ray spectroscopic study of carbon fibers and graphitic carbon[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1983, 16: 4243-4258.

Self-Sensing Behavior of Carbon Fiber Reinforced Carbon Matrix Composite Based on Dielectric Behavior

Xiang Xi [1,2], Hailong Li [1], Youyuan Chen [1], Jingqi Pei [1], Chengkun Liao [1], Lin Xue [3]
Hongqiang Chu [1], Qianping Ran[2,4]

(*1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Research Institute of Building Science Co. Ltd., Nanjing 210008, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China*)

ABSTRACT: Carbon fiber reinforced carbon matrix composites (C/C) are popular due to their excellent mechanical and conductive properties, while their dielectric behavior has received little attention. The LCR meter was used to measure the relative permittivity of C/C. The resistivity was measured by current source and nano-voltage meter combined with four- probe method. The results show that the fractional change in relative permittivity per unit strain is 528±8, which is 375% higher than the fractional change in resistivity per unit strain, indicating that the dielectric behavior is more sensitive to changes in microstructures. In addition, the enhancement of dielectric behavior of C/C is due to compressive strain inducing micro defects, such as grain boundaries, interfaces, etc., that provide sites for space polarization involving a fraction of electrons and holes; on the other hand, the polarization continuity of C/C is enhanced by compression. The increase in the number of electrons and holes that participate in polarization per unit compressive strain is $(1.37\pm0.02)\times10^{10}$. The relative permittivity of C/C is lower than both carbon fiber and graphite due to high porosity and interfaces.

Keywords: carbon fiber; composites; dielectric behavior; self-sensing; polarization; permittivity