

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.010

温度和湿度对 P-CNT 自感知混凝土压敏性的影响

孙 敏¹, 朱浩然¹, 庄 伟²

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 中国建筑第五工程局一公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为研究温度与湿度对自感知混凝土(SSC)感知性能的影响,通过低温等离子体改性处理技术对碳纳米管(CNT)进行官能团嫁接,使其在水性体系下获得较好的分散性,并将改性后的 CNT (P-CNT)加入混凝土中制备 P-CNT/SSC 传感器,通过改变含水率与温度条件研究 P-CNT/SSC 传感器的极化效应与循环加载下的自感知性能。试验结果表明:过高或过低的含水率均不利于 SSC 的感知性能,其中变化最为明显的是饱水状态下的 P-CNT/SSC 传感器,其应力敏感系数下降 89.8%,并且压敏曲线极不稳定;在变温试验中,P-CNT/SSC 传感器的电阻率与温度之间呈现负相关性,高温和低温下的应力敏感系数相较于常温组试件,分别下降了约 35.66% 和 44.53%,并且压敏曲线整体出现了上移或下滑的趋势;P-CNT/SSC 传感器在工程应用中的最佳测试环境为常温、自然含水率。

关键词: 自感知混凝土;碳纳米管;压敏性;低温等离子体改性;极化效应;循环加载

中图分类号: TU528.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0072-07

Effect of temperature and humidity on the pressure sensitivity of P-CNT self-sensing concrete

SUN Min¹, ZHU Haoran¹, ZHUANG Wei²

(1. College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. China Construction Fifth Engineering Bureau I, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to explore the impact of temperature and humidity variations on self-sensing concrete (SSC) efficacy, the functional group of carbon nanotube (CNT) was performed by the low-temperature plasma modification to enhance the dispersion in aqueous systems. The resulting modified carbon nanotubes (P-CNT) were integrated into the concrete to form P-CNT/SSC sensors. Varying water content and temperature conditions were tested to assess the polarization effect of P-CNT/SSC sensor and SSC's self-sensing capabilities under cyclic loading. Results show that too high or too low water content impaired SSC's sensing abilities, with the most significant impact observed under full water conditions, leading to an 89.8% decrease in stress sensitivity coefficient and unstable pressure-sensitivity curves. Moreover, during temperature variation tests, P-CNT/SSC resistivity exhibited a negative correlation with temperature. Stress sensitivity coefficients decreased by approximately 35.66% and 44.53% at high and low temperatures, respectively, compared to room temperature specimens, and the pressure-sensitivity curves displayed upward shifts or downward slides. Thus, the study suggests that the optimal testing condition of P-CNT/SSC applications involves room temperature and natural moisture content.

Key words: self-sensing concrete; carbon nanotubes; pressure sensitive; low-temperature plasma modification; polarization effect; cyclic loading

在结构与智能一体化发展的背景下,结构的健康监测技术也在不断发展^[1-2]。自感知混凝土(self-sensing concrete, SSC)是指通过在混凝土中添加导电填料制备而成的一种具有自我感知能力的智能材料。区别于依托胶黏剂附着于结构表面的监测方式^[3],自感知混凝土可以实现对结构健康的实时、长期、智能的

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_3291)

作者简介: 孙敏(1970—),女,副教授,博士,主要从事桥梁结构监测研究。E-mail:sunmin@mail.usts.edu.cn

通信作者: 朱浩然(1999—),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构监测研究。E-mail:596131625@qq.com

引用本文: 孙敏,朱浩然,庄伟. 温度和湿度对 P-CNT 自感知混凝土压敏性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):72-78.

SUN Min, ZHU Haoran, ZHUANG Wei. Effect of temperature and humidity on the pressure sensitivity of P-CNT self-sensing concrete [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 72-78.

数字化监测。由于采用混凝土为载体,SCC 与结构的相容性较好,可以长期埋置于结构内部,通过应力与电阻的线性对应关系直接反映结构的受力情况^[4-6]。

目前 SSC 填料一般可以分为两类,以纳米碳纤维、碳纳米管(carbon nanotube, CNT)、氧化石墨烯为主的碳系纤维和以不锈钢纤维、镍粉等为主的金属系填料^[7-11]。由于金属系填料的尺寸一般较大,并且金属填料在水泥基的碱性环境中稳定性较差,所以碳系纤维的应用更为广泛。而 CNT 自身的超高长径比和优异的电学性能^[12],使其成为一种极具潜力的 SSC 导电填料。根据渗流阈值理论^[8],随着纤维填料浓度的逐渐提高,SSC 会经历绝缘区、渗流区、导电区,其中灵敏度最高的是第 2 个区域。在渗流区掺量下,如果填料彼此之间分散均匀,纤维与纤维之间广泛依靠隧穿效应,则可以实现对应力的高响应。而当填料浓度进一步提高,SSC 开始进入导电区,此时的试件内部,纤维与纤维之间彼此搭接,能够产生隧穿效应的网络数量较少,应力的灵敏程度会出现下降,但整体导电网络的稳定性却会得到提高^[13]。

在 CNT 作为 SSC 填料应用时,需要对其进行分散性预处理,以避免纤维聚团和疏水性质带来的负面影响,目前针对 CNT 的分散处理多采用浓酸强氧化方式,虽然这种处理方法可以获得较好的分散效果,但会导致试件的表面残留大量的酸根离子,并在后续的水化反应中在 CNT 表面生成结晶,从而对力学与电学性能产生负面影响,同时这种处理方法比较烦琐,不便于实际应用^[14-16]。针对这个问题,目前比较高效且不会对 CNT 材料表面产生损伤的处理方法为利用低温等离子改性,对 CNT 进行官能团嫁接以此来获得分散性与亲水性,同时在水化过程中改性处理后的 CNT(P-CNT)与水泥基之间还可以形成更强的界面附着力^[17-18]。

在 SSC 的应用过程中,其周围的环境温度与湿度随时都在变化。而根据 SSC 的导电机理可以发现,在这一变化过程中,隧穿效应和离子导电效应对压敏稳定性的影响程度也在发生变化^[19]。目前针对温度和含水率对 SSC 压敏性能影响的研究很少,本文通过制备改性碳纳米管自感知混凝土(P-CNT/SSC)传感器,并在不同含水率和温度下进行极化效应与循环加载测试,来分析温度和湿度对 SSC 压敏效应的影响。

1 试验设计

1.1 CNT 预处理

SSC 的内部一般可以划分为三相,第一相是由水泥等胶凝材料组成的基体相,第二相是由导电填料组成的导电相,第三相则是前两者的交界相^[20]。本文通过低温等离子改性处理方法对 CNT 材料进行亲水性预处理^[21],这种处理方法主要通过电极放电所产生的活性物质在材料表面引入大量的亲水基团,使其同时兼备亲水性与分散性,并且可以最大限度地避免碳纳米管表面受到损伤。在嫁接基团选择上,综合相关研究^[22],最终选用对 CNT 分散效果和压敏性均有利的羧基(—COOH)。试验选用的 P-CNT 由苏州第一元素纳米技术有限公司提供,根据课题组以往试验所得的渗滤阈值掺量制备试件(P-CNT 占水泥基质量的 0.3%),P-CNT 的具体参数:管径为 50~90 nm,长度为 5~10 μm,碳相对含量(纯净度)大于或等于 96%,体电阻率为 30.72 mΩ·cm。

1.2 传感器外观设计

P-CNT/SSC 传感器的安装方式为埋入式,外观尺寸设计为 40 mm×40 mm×80 mm。电极的布置采用四电极设计,这种设计可以最大限度地避免两电极式设计带来的测量误差。电极片的设计选用 20 mm×50 mm 的 20 目紫铜网,内置 50 mm×10 mm 的不锈钢骨架,采用半插入的形式,电极片之间的净间距为 15 mm,如图 1 所示。

1.3 传感器配比设计

传感器以自密实混凝土材料为基础,水泥采用海螺牌 P·O42.5 硅酸盐水泥,粗骨料粒径范围为 5~20 mm,级配良好,细骨料采用天然河沙,粒径小于等于 4.75 mm,细度模数为 2.68,表观密度为 2 654 kg/m³,粉煤灰选用一级粉煤灰,颜色为灰黑色,孔隙率在 50%~80% 之间,每立方米 SCC 中水泥、粉煤灰、硅灰、石子、砂、水、减水剂分别为 424.9、121.4、60.7、868.56、782.39、151.75、3.035 kg。

试件的浇筑流程:先将称好的胶凝材料(水泥、粉煤灰和硅灰)以及细骨料(河沙)和减水剂加入搅拌锅

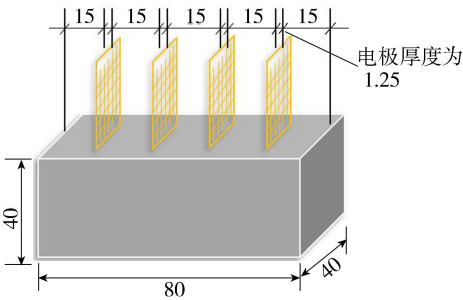


图 1 P-CNT/SSC 传感器(单位:mm)

Fig.1 P-CNT SSC sensor (unit:mm)

中搅拌 1 min 使之均匀分散;然后将称好的粗骨料(石子)加入其中并搅拌 1 min;在搅拌的过程中接取一半质量的水,将 P-CNT 加入其中并用玻璃棒充分搅拌,目的是让 P-CNT 能够均匀分散于水中。在搅拌机搅拌的过程中将含有减水剂和 P-CNT 的水溶液沿四周倒入,使其充分而均匀地接触。随后,称取剩余一半质量的水倒入刚刚的容器之中,使少量挂壁的 P-CNT 分散其中,并倒入搅拌锅中搅拌 2 min,最后将浇筑好的试件放入标养箱中养护 28 d。

1.4 试验设计

1.4.1 加载设计

为了评价 P-CNT/SSC 传感器压敏曲线的稳定性和应力灵敏程度,试验采用单轴循环加载的测试方式。通过电液伺服压力机循环加载,同时利用 Agilent 34401A 型数字万用表读取电阻值,加载制度为 2~10 kN 循环加载 10 次,加载速度为 1 kN/s,具体加载装置示意图如图 2 所示。

1.4.2 含水率影响试验设计

为了分析含水率对试件压敏性的影响,对 P-CNT/SSC 传感器进行自然、干燥与饱水 3 种状态下的极化与循环加载测试。首先在自然室温条件下对传感器进行称重,记为初始质量 m_0 ,并进行极化试验和循环加载测试;随后将 P-CNT/SSC 传感器完全浸没于水中约 12 h,利用湿毛巾擦去传感器表面水珠,并对饱水状态下的传感器称重记为 m_1 ,为了防止极化和加载测试过程中水分挥发,测试前利用保鲜膜对试件进行包裹;最后将试件放入干燥箱中,60℃ 条件下烘干 6 h,以达到绝对干燥状态,待干燥结束后立即称重,记为 m_2 。由于刚刚取出的传感器温度较高因此不宜进行试验,需放置于自然条件下冷却,期间用保鲜膜包裹隔绝空气中的水分,待传感器冷却到室温后,再进行导电性和压敏性试验并保存试验数据。如此往复 3 轮试验以确保数据的可靠性,其中以 m_2 为基础记录为含水率 0%, m_1 记录为含水率 100%,并通过换算得到常温下含水率为 47.78%。

1.4.3 温度影响试验设计

温度变化对于压敏性影响的试验环境分为高温、常温和低温 3 个状态,分别为 60、25、0℃,试件在测试前涂抹防水胶,避免水分变化带来的影响。高温试验时,先将试件放入加热箱中加热至 60℃,并在这一过程中完成极化,测得极化后稳定电阻,然后移至压力机下立即进行加载试验。低温试验,通过将试件放入冷冻箱中降温,并在这一过程中完成极化,随后移至压力机下完成加载试验。

1.5 分析指标

为了精准分析不同温度和含水率对 P-CNT/SSC 传感器压敏性的影响,引入电阻率 ρ 、电阻率变化率(电阻率的变化值和初始值所构成的比值) F 、应力灵敏系数 S 、荷载-电阻率相关性系数 4 个分析指标。 F 可以反映 P-CNT/SSC 传感器在加载过程中对应力的响应变化, S 可以反映不同组 P-CNT/SSC 传感器在同等荷载作用下的电阻率响应灵敏程度的差异。荷载-电阻率相关性系数由 Origin 拟合而得,以循环加载过程的峰值应力和谷值应力与对应的电阻率连线为基础,可以反映 P-CNT/SSC 传感器压敏曲线的稳定程度。

2 结果与分析

2.1 极化试验

与一般的致密单一体系材料不同,混凝土材料内部存在大量的孔隙,其内部孔隙率可达 10%~20%,这些孔隙中含有一定量的水分,并且随着水化反应的进行,在这些水溶液中会生成大量的离子。当 P-CNT/SSC 传感器通电之后,这些阴阳离子会分别向阳极和阴极定向移动,导致传感器的电阻呈现上升趋势,并在一定时间后,趋于平稳,这一过程被称为极化效应,此时的电阻率称为极化后稳定电阻率。经过换算,在不同含水率和不同温度下极化后的稳定电阻率如图 3 所示。

由图 3(a)可知,含水率与 P-CNT/SSC 传感器极化后稳定电阻率呈现负相关性,即含水率的增大会导致 P-CNT/SSC 传感器内部电流通路数量增加。而在 P-CNT/SSC 传感器的内部,导电行为主要由两部分完成,分别是 P-CNT 和混凝土的基体相。同时混凝土基体相的导电也可以划分为两类:一部分是由孔隙内的水分完成的离子导电,即水分中的 Ca^{2+} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等离子在外加电场下定向移动而导电,另一部分是通过凝

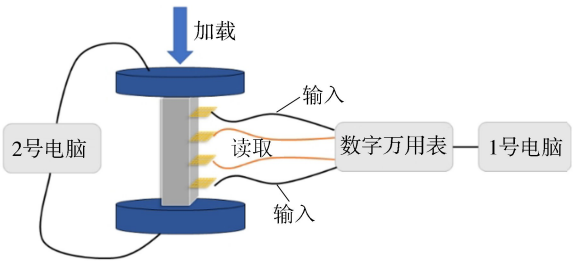


图 2 加载装置示意图
Fig. 2 Diagram of the loading device

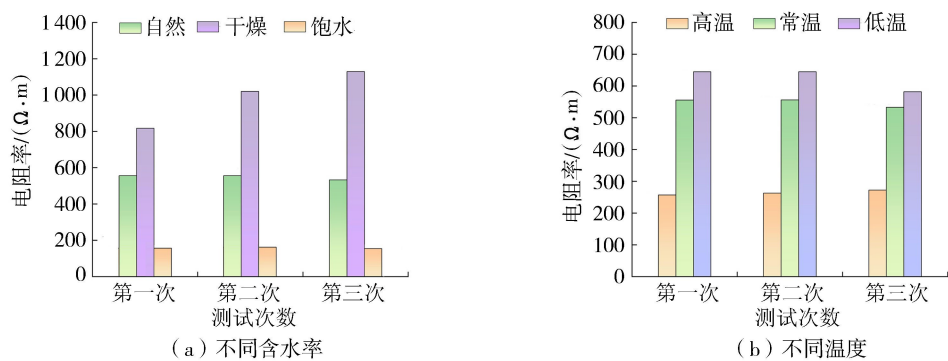


图 3 不同含水率和不同温度下极化后的稳定电阻率

Fig. 3 Stable resistivity after polarization at different water contents and temperatures

胶和未反应的水泥颗粒的电子导电。当含水率逐渐增大时,电流经过孔隙内液相通路的数量增加,相应的被短路的基体相体积也随之增大。且随着含水率的逐渐增大,试件内部的导电通路逐渐由隧穿效应转变为以离子导电为主,综合表现即为总电阻下降^[23]。

P-CNT/SSC 传感器的电阻率呈现出随着温度升高而减小的趋势(图 3(b))。SSC 能够实现对应力的响应,其本质是因为在应力作用下,大量的导电填料间距被压缩至 1~10 nm,进而产生电子跃迁行为,而对于非加载情况下,部分填料间距本就处于 1~10 nm 之间,也是可以形成电子跃迁效应的。通过 Simmons^[24] 提出的普适性隧道效应方程可以发现电流密度与隧道间隙宽度和间隙势垒密切相关,而这两项与温度皆存在正相关性,即温度的提高会对电子克服跃迁势垒有促进作用,增大电流流量。并且在温度的热胀冷缩作用下,P-CNT 之间的距离也会相应随之变化,高温下彼此间的距离被缩短,增加了可以发生电子跃迁的通路数量。同时,导体-绝缘体复合材料中依赖温度的电阻率公式与试件填料的渗流阈值掺量有关^[25]。当 SSC 中导电填料的浓度接近渗流阈值时,温度的升高会加剧电子或电子空穴的热运动,从而造成电阻率随着温度的升高而降低,试验选用的 P-CNT 掺量为课题组以往试验实测所得的渗流阈值掺量,所以试验中所表现出的温度与电阻率的负相关性是合理的。

2.2 不同含水率下的循环加载试验

含水率影响分析主要是将不同含水率下的 P-CNT/SSC 传感器进行循环加载测试,同时将荷载-电阻率的曲线进行线性拟合,用以表征压敏曲线的稳定性,理想的拟合结果应当为一条无离散现象的斜直线。由测试结果(图 4 与图 5)可知,含水率的变化会显著影响 P-CNT/SSC 传感器压敏曲线的稳定性。

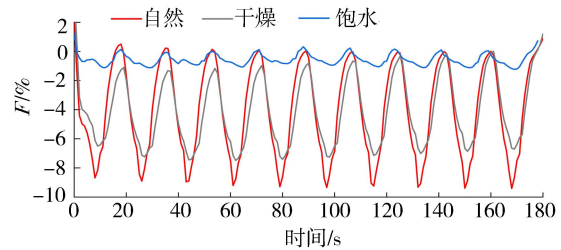


图 4 不同含水率下 P-CNT/SSC 传感器的循环加载测试结果

Fig. 4 Cyclic loading test results of P-CNT/SSC sensor under different moisture content conditions

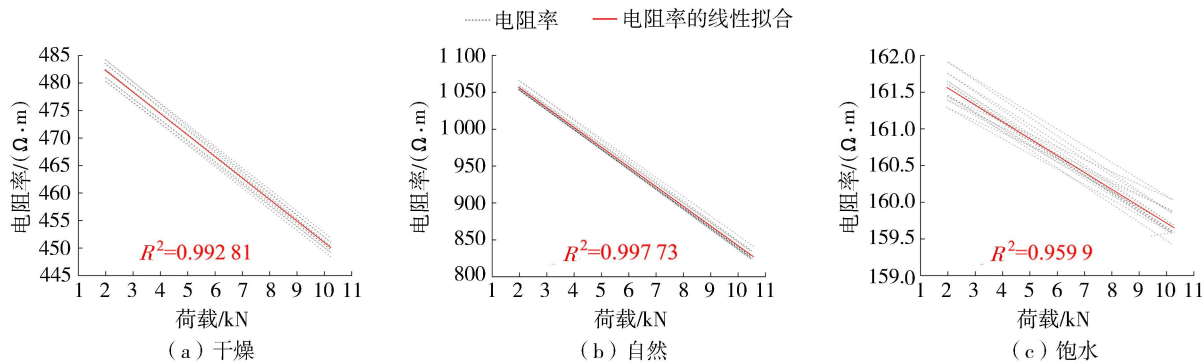


图 5 P-CNT/SSC 传感器在不同含水率下的荷载-电阻率关系

Fig. 5 Load-resistivity diagram of P-CNT/SSC sensor at different moisture contents

当 P-CNT/SSC 传感器处于饱水状态时,试件内部孔隙被水分填充,此时 SSC 内部的导电通路以离子导电为主,并且导电填料(P-CNT)会被液相所包裹,电子跃迁的效率也会被显著降低。同时,在加载过程中,液相的包裹作用会对 P-CNT 的受力起到一定的缓冲,而这会造成饱水状态试件内部的P-CNT在荷载作用下与干燥状态的试件相比受力不足,造成部分填料之间的间距无法被压缩至 1 ~ 10 nm 区间形成隧穿效应通路,进而无法为电流通量的增大做出贡献,最终表现为表 1 中饱水状态下试件电阻率相对变化值 ΔF 的下降,以及 S 的显著降低,并且压敏曲线极不稳定。

当 SSC 试件处于干燥状态时,从图 4 与表 1 中可以发现,试件压敏曲线的稳定性与自然状态下的试件曲线稳定性相近,但 ΔF 和 S 却低于自然状态下,造成这一现象的原因主要是:在长时间的干燥过程中,试件内部造成了一些微裂缝,对 P-CNT 之间的导电通路造成了破坏。同时,由于缺少液相的缓冲作用,P-CNT 纤维在循环加载过程中会由于纤维与基体相之间的“拉拔”作用形成折断或者是损伤,进而影响到导电通路的工作,并造成压敏曲线的不稳定以及 S 的下降。

对于处于自然状态下的 P-CNT/SSC 传感器,其内部的含水率既可以在加载过程中为 P-CNT 提供一定的缓冲作用,避免纤维受到损伤,同时还可以避免 SSC 内部基体相由于过度干燥而形成微裂缝对导电通路造成破坏,所以该组试件的压敏曲线稳定性与应力敏感特性均为最好。

2.3 不同温度下的循环加载试验

不同温度下的测试结果如图 6 所示,其中常温下的测试与自然状态下的测试为同组测试,该组荷载-电阻率关系图如图 5(b)所示。

由图 6 可知,P-CNT/SSC 传感器在高温和低温两种环境因素下的压敏效应测试结果均表现出不稳定的滑移现象,其中高温下的 SSC 压敏曲线整体表现为向上滑移趋势,低温下的 SSC 压敏曲线则表现为向下滑移趋势。

以常温测试结果为参考基准,对比表 2 的数据结果可以发现,高温和低温下的 P-CNT/SSC 传感器应力敏感系数分别下降了 35.66% 和 44.53%,并且 ΔF 分别下降 35.67% 和 44.56%,变化明显,但荷载-电阻率的线性相关性的下降幅度并不高,仅为 2% 左右。造成这一现象的原因在于:在高温和低温的测试中,试件与周围环境存在温度的交互,造成高温试件逐渐降温,低温试件逐渐升温,结合电阻率与温度之间的依赖性,可以发现,降温会导致 P-CNT/SSC 传感器电阻率上升,升温则会导致P-CNT/SSC 传感器电阻率下降,而这也正是造成在持续加载过程中压敏曲线整体呈现上移与下滑趋势的核心原因。由于 P-CNT 是一种准一维的高长径比材料,其和基体相之间存在较大的接触面积,在试件的加载与卸载过程中,P-CNT 和水泥基之间存在“挤入”与“拔出”效果,在这个过程中会造成 P-CNT/SSC 传感器电阻值的波动。同时,由于 P-CNT/SSC 传感器内部环境温度的升高或者降低也会造成 P-CNT 的热胀冷缩,导致 P-CNT 与基体相之间的接触面积发生改变,进一步加剧接触电阻的波动,并最终导致压敏曲线稳定性的下降,即图 7 中的荷载-电阻率相关系数的下降。

表 1 P-CNT/SSC 传感器在不同含水率下循环加载的关键指标

Table 1 Key indexes of P-CNT/SSC sensors under different moisture contents and cyclic loading

含水率状态	S	$\Delta F/\%$	荷载-电阻率 相关系数
自然	1.848	9.242	0.99773
干燥	1.284	6.419	0.99281
饱水	0.188	0.939	0.95990

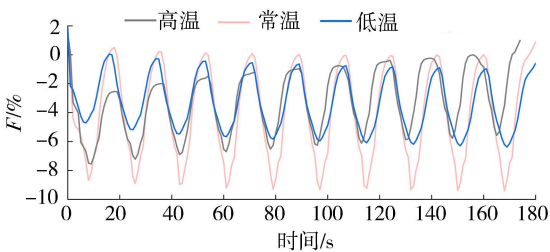


图 6 不同温度下 P-CNT/SSC 传感器的循环加载测试结果
Fig. 6 Cyclic loading test results of P-CNT/SSC sensor under different temperature conditions

表 2 P-CNT/SSC 传感器在不同温度下循环加载的关键指标

Table 2 Key indexes of P-CNT/SSC sensors for cyclic loading tests at different temperatures

温度状态	S	$\Delta F/\%$	荷载-电阻率 相关系数
高温	1.189	5.945	0.97524
常温	1.848	9.242	0.99773
低温	1.025	5.124	0.97255

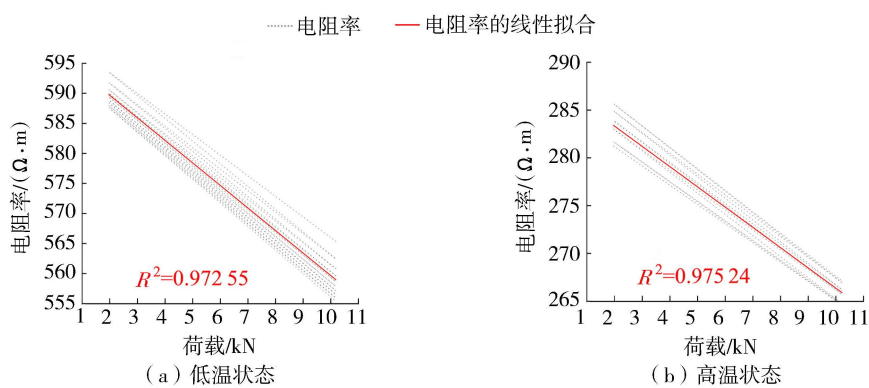


图 7 P-CNT/SSC 传感器在高温与低温状态下的荷载-电阻率关系

Fig.7 Load-resistivity diagram of P-CNT/SSC sensor at high and low temperatures

3 结 论

- a. 温度的升高会对电子克服跃迁势垒有促进作用,增大电流流量,造成试件的极化后稳定电阻率随着温度的升高而下降,增强 SSC 的自感知能力;含水率的增大会导致自感知混凝土内部的离子位移极化效应过多参与,造成电阻率的持续增加,削弱 SSC 的自感知能力。
- b. 自然状态下的 P-CNT/SSC 传感器应力敏感系数、荷载-电阻率线性相关性均为最佳。而含水率过高会导致 P-CNT 隧穿效应通路失效,整个试件以离子导电为主,应力灵敏程度下降约 89.8%,同时压敏曲线极不稳定。因此,在实际应用的过程中为避免含水率波动对 P-CNT/SSC 传感器感知能力的干扰,可在埋置前对其进行隔水预处理,保证其内部含水率的稳定。
- c. 由于温度与电阻率的负相关性,P-CNT/SSC 传感器在加载过程中,温度的波动会导致压敏曲线出现整体上移或者下滑的现象,同时应力灵敏程度下降约 40%,稳定性也会下降约 2%。

参考文献:

[1] 黄侨,李维珍,任远,等. 基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):61-68. (HUANG Qiao,LI Weizhen,REN Yuan,et al. Status assessment method of key restraint devices for long span suspension bridge based on monitoring date[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):61-68. (in Chinese))

[2] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):81-88. (LU Yi,SONG Zezhuo,LIU Jin,et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):81-88. (in Chinese))

[3] 艾亿谋,杜成斌,于国军. 压电智能材料在悬臂梁结构振动控制中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):695-698. (AI Yimou,DU Chengbin,YU Guojun. Vibration control of cantilever beams with piezoelectric intelligent materials[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2007,35(6):695-698. (in Chinese))

[4] LIU L,XU J,YIN T,et al. Improving electrical and piezoresistive properties of cement-based composites by combined addition of nano carbon black and nickel nanofiber[J]. Journal of Building Engineering,2022,51:104312.

[5] JOSHI B,WANG J,LI X,et al. Development of robust ultra-high-performance carbon nanofiber aggregates (UHPCNFAs) for structural health monitoring[J]. Engineering Structures,2023,279:115559.

[6] DONG W,LI W,TAO Z,et al. Piezoresistive properties of cement-based sensors:review and perspective[J]. Construction and Building Materials,2019,203:146-163.

[7] LI W,LI X,CHEN S J,et al. Effects of nanoalumina and graphene oxide on early-age hydration and mechanical properties of cement paste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2017,29(9):04017087.

[8] LI W,LI X,CHEN S J,et al. Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste [J]. Construction and Building Materials,2017,136:506-514.

[9] YOO D Y,KIM S,LEE S H. Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2018,276:125-136.

[10] DONG W, LI W, SHEN L, et al. Piezoresistivity of smart carbon nanotubes (CNTs) reinforced cementitious composite under integrated cyclic compression and impact[J]. *Composite Structures*, 2020, 241:112106.

[11] 曹亚龙, 徐金霞, 蒋林华, 等. 自感知镍纳米线/水泥基复合材料的制备及压敏性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(4):957-963. (CAO Yalong, XU Jinxia, JIANG Linhua, et al. Fabrication and piezoresistivity of self sensing Ni nanowire/ cement composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4):957-963. (in Chinese))

[12] YE F, CAO Y, LIANG J, et al. Fabrication and electromagnetic absorbing properties of CNTs modified PDCs-SiOC[J]. *Materials Characterization*, 2023, 203:113037.

[13] HAN B, DING S, YU X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: a review[J]. *Measurement*, 2015, 59:110-128.

[14] ARRECHEA S, GUERRERO-GUTIÉRREZ E M, VELÁSQUEZ L, et al. Effect of additions of multiwall carbon nanotubes (MWCNT, MWCNT-COOH and MWCNT-Thiazol) in mechanical compression properties of a cement-based material[J]. *Materialia*, 2020, 11:100739.

[15] MUSSO S, TULLIANI J M, FERRO G, et al. Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(11/12):1985-1990.

[16] YUAN X, ZHU B, CAI X, et al. Influence of different surface treatments on the interfacial adhesion of graphene oxide/carbon fiber/epoxy composites[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 458:996-1005.

[17] SHI T, LI Z, GUO J, et al. Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202:290-307.

[18] LI G Y, WANG P M, ZHAO X H. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes[J]. *Carbon*, 2005, 43(6):1239-1245.

[19] 未立煌, 夏海廷, 郭荣鑫, 等. 温度和湿度对纳米石墨烯片水泥基复合材料压敏性能的影响[J]. *混凝土*, 2023(401):7-11. (WEI Lihuang, XIA Haiting, GUO Rongxin, et al. Influence of temperature and humidity on the piezoresistive properties of graphene nanoplatelets reinforced cement-based composites[J]. *Concrete*, 2023(401):7-11. (in Chinese))

[20] 丁思齐, 韩宝国, 欧进萍. 本征自感知混凝土及其智能结构[J]. *工程力学*, 2022, 39(3):1-10. (DING Siqi, HAN Baoguo, OU Jinping. Intrinsic self-sensing concrete for smart structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3):1-10. (in Chinese))

[21] CHOU W J, WANG C C, CHEN C Y. Characteristics of polyimide-based nanocomposites containing plasma-modified multi-walled carbon nanotubes[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(10):2208-2213.

[22] RAO R, SINDU B S, SASMAL S. Synthesis, design and piezo-resistive characteristics of cementitious smart nanocomposites with different types of functionalized MWCNTs under long cyclic loading[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 108:103517.

[23] 罗健林. 碳纳米管水泥基复合材料制备及功能性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[24] SIMMONS J G. Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(9):2581-2590.

[25] FENG L, SHAO W, ZHEN L, et al. Cu₂O/Cu cermet as a candidate inert anode for Al production[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2007, 4(5):453-462.

(收稿日期:2023-06-12 编辑:刘晓艳)