

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2022.03.011

复相机敏混凝土弯敏特性研究

朱广富¹, 孙亚飞¹, 彭月月², 周天舒³, 吴发红¹

(1.盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 2.安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232000;
3.江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为了研究碳纤维(CF)、镀铜钢纤维(SF)、多壁碳纳米管(MWCNTs)和炭黑(CB) 4种功能材料掺量对复相机敏混凝土抗弯强度、电阻率与弯敏特性的影响规律,通过改变4种功能材料掺量方法设计了9组对比试验,分别采用二电极法、三点加载法测试试样的电阻率与弯敏性能。结果表明:(1)CF与SF是影响复相机敏混凝土弯敏特性的主要因素。(2)当4种导电材料的掺量比(CF:SF:MWCNTs:CB)为1.2:4:0.25:4时,试块28 d电阻率为887.5 Ω·cm;当4种导电材料掺量比为0.3:4:0.5:2时,试块抗弯强度最高;当构件挠度达到4 mm时,最大电阻变化率为158%,受弯机敏性较好,回归方程相关系数均大于0.95,复相机敏混凝土在受弯过程中电阻变化率与挠度变化关系相关性较好。

关键词:复相机敏混凝土;导电材料;抗弯强度;电阻率;灵敏度

中图分类号:TU528.59 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)03-0057-05

Study on Flexural Sensitivity of Smart Concrete with Compounding Functional Filler

ZHU Guangfu¹, SUN Yafei¹, PENG Yueyue², ZHOU Tianshu³, WU Fahong¹

(1.School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China; 2.School of Civil and Architectural Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232000, China; 3.School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract:The effects of conductive materials such as carbon fiber (CF), copper-coated steel fiber (SF), multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and carbon black (CB) on the bending strength, electric resistivity and flexural sensitivity of smart concrete with compounding functional filler were studied. Nine groups of comparative experiments were designed by changing the content of four functional materials, in which the two-electrode method and the three-point loading method were used to test the resistivity and flexural sensitivity of the samples. The results show that: (1)CF and SF are the main factors affecting the flexural sensitivity of the material. (2)When the content ratio of four conductive materials (CF:SF:MWCNTs:CB) is 1.2:4:0.25:4, the 28 d resistivity of the specimen is 887.5 Ω·cm; When the content ratio of four conductive materials is 0.3:4:0.5:2, the flexural resistance of the specimen is the highest; When the deflection of the structural member reaches 4 mm, the maximum resistivity change rate is 158%, the flexural sensitivity is better, the correlation coefficients of the regression equation are all greater than 0.95, and the correlation between the resistance change rate and the deflection change of the material during the bending process is better.

Keywords:smart concrete with compounding functional filler; conductive material; flexural strength; electric resistivity; sensitivity

0 引言

复相机敏混凝土是在普通混凝土中复掺导电功能材料使其具有以电阻率变化反映外部环境变

化的能力^[1]。为了及时掌握结构在服役期间的安全性与可靠性,在其内部埋置一些传感器自动感知在外界因素作用下发生的一些可逆或不可逆的变形或破坏^[2]。复相机敏混凝土自身具有较好的相容

收稿日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978597)。

作者简介:朱广富(1966—),男,江苏盐城人,高级工程师,硕士,研究方向:混凝土结构。

性、耐久性、实时并持续性感知结构应力变化等特点^[3]。在受弯状态下,复相机敏混凝土基体与受拉区纤维有相当大的黏结作用,随着弯矩的增大,导致脱黏过程的加剧,基体与纤维间电阻逐渐增大,当纤维完全拔出或断裂时,复相机敏混凝土电阻趋于无穷大;当外部荷载减小或取消时,纤维与基体间电阻逐渐降低^[4],表现出一定的弯敏特性。随着混凝土所掺功能材料类型与掺量的不同,复相机敏混凝土表现出不同的弯敏特性。目前国内外诸多学者采用复掺多种导电材料方法制备了一系列机敏混凝土,在结构健康监测等领域取得了一定的应用成果,但对导电性能优异的纳米级功能材料研究还不够深入,也较少涉及机敏混凝土应力-应变-电阻率变化的弯敏特性,电阻变化率与结构损伤的机理研究也不够明确^[5]。

本文采用碳纤维(CF)、镀铜钢纤维(SF)、多壁碳纳米管(MWCNTs)和炭黑(CB)4种功能填料进行复掺,通过互相搭接在混凝土内部形成互相连通的导电网络,使其具备导电能力和感应应变、损伤

的能力,研究功能填料掺量变化对机敏混凝土力学强度、电阻率和灵敏度的影响机理,为其在结构无损检测领域应用做理论探讨。

1 材料与方法

1.1 原材料

水泥采用江苏省某公司生产的P.C 42.5普通硅酸盐水泥,质量符合国标《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)要求;砂采用天然河砂;硅灰由四川省某公司生产;减水剂采用江苏省某公司生产的聚羧酸型减水剂,减水率约为30%;CF采用上海某公司生产的短切碳纤维,长度为 ± 6 mm;SF由河北省某公司生产,长度为 ± 35 mm;MWCNTs由北京某科技有限公司生产。

1.2 配合比及测试方法

为研究功能填料掺量变化对复相机敏混凝土弯敏特性的影响,保证试样成型时具有相似的流动性,根据项目组前期研究成果,设计了如表1所示试验配合比(注:以水泥质量为单位1)。

表1 复相机敏混凝土配合比

试件组	CF 掺量/%	SF 掺量/%	MWCNTs 掺量/%	CB 掺量/%	减水剂/%	分散剂/%	硅胶比	硅粉/%	砂率/%	含水率
B1	0.3	2	0.25	1	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B2	0.3	4	0.50	2	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B3	0.3	6	1.00	4	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B4	0.6	2	0.50	4	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B5	0.6	4	1.00	1	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B6	0.6	6	0.25	2	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B7	1.2	2	1.00	2	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B8	1.2	4	0.25	4	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8
B9	1.2	6	0.50	1	0.4	0.6	0.75	10	35	0.8

试块成型尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行抗折强度测试;试件弯敏性试验采用三点加载,加载方式微机控制(0.1 MPa/s),通过交流电桥实时记录电阻;采用同惠TH2810D交流电桥、二电极法对龄期为28 d的样品进行电阻值测量,以研究不同掺量的导电填料对混凝土电阻率的影响。

2 结果与讨论

2.1 电阻率因素分析

由图1a和1b可知,随着CF、SF掺量的增大,复相机敏混凝土电阻率呈下降趋势,但下降幅度有明显差异。当CF掺量分别为0.6%、1.2%时,复相机敏混凝土的电阻率相对于CF掺量为0.3%时分别下降了69%、88%;SF掺量分别为4%、6%时,复相机敏混

凝土的电阻率相对于SF掺量为2%时分别下降了1.2%、24%。由图1c和1d可知,随着MWCNTs和CB掺量的增大,复相机敏混凝土的电阻率均呈现先上升后下降的变化趋势,且变化幅值相似。当MWCNTs掺量为0.5%时,复相机敏混凝土的电阻率相对于MWCNTs掺量为0.25%时上升了10.5%,但MWCNTs掺量上升至1%,电阻率略有下降;当CB掺量为0.6%时,复相机敏混凝土电阻率相对于CB掺量为0.3%时上升了28.1%,但CB掺量上升至

1.2%,试块电阻率略微下降。原因可能是存在着导电材料的渗滤阈值,MWCNTs和CB掺量较小时,对复相混凝土电阻率影响并不明显,随着掺量增加至导电渗滤阈值时,试块的电阻率呈降低趋势。由图1还可知,当4种导电材料掺量比为1.2:4:0.25:4时,复相机敏混凝土28d电阻率最低,达887.5 Ω·cm。Chen等^[6]研究表明,水泥基材料电阻率在 $10\sim 10^3$ Ω·cm时具有良好的导电性能。

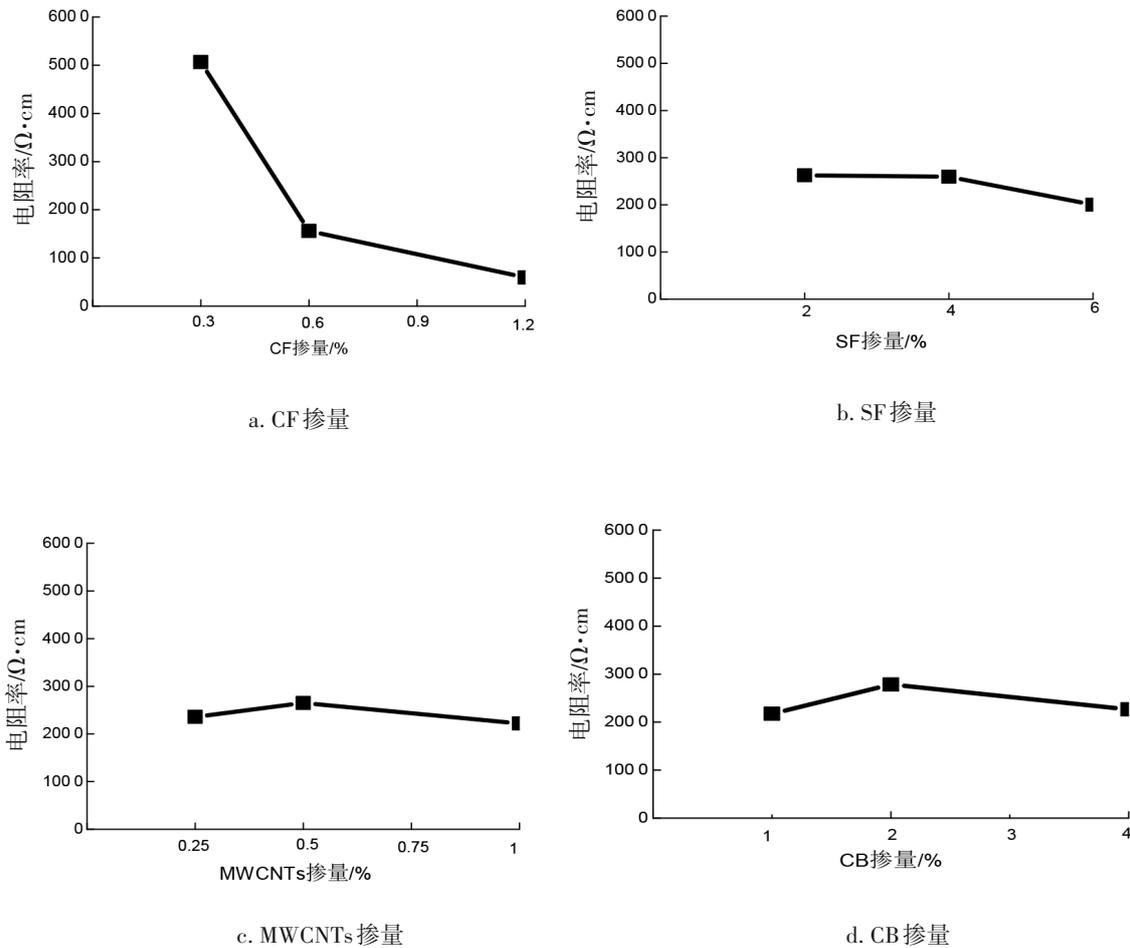


图1 掺4种导电材料复相机敏混凝土28d电阻率

2.2 复相机敏混凝土受弯荷载-挠度分析

大部分复相机敏混凝土试块在受弯状态下表现出明显的脆性破坏,试块B1~B9开裂荷载分别为4.58、5.38、4.13、4.70、5.23、4.61、3.41、4.26、4.88 kN;当试件在受弯状态下加载未达到开裂荷载时,试件挠度随加载的增大而增大;当试件加载达到开裂荷载后,试件已被破坏,承载力急剧降低(图2)。复相机敏混凝土属于纤维增强混凝土,SF的掺入可以提

高混凝土的抗折、抗弯强度和抗冲击性能;CF的掺入会提高复相机敏混凝土的抗拉和抗弯强度;同时,纳米尺度的MWCNTs可以填充复相机敏混凝土内部的孔隙,降低孔隙率,其与水泥基体的纳米增强作用可以抵消一部分作用于复相机敏混凝土的荷载,从而提高了力学性能。

2.3 复相机敏混凝土挠度-电阻变化率分析

试块B1~B9在加载过程中(开裂前)挠度和电

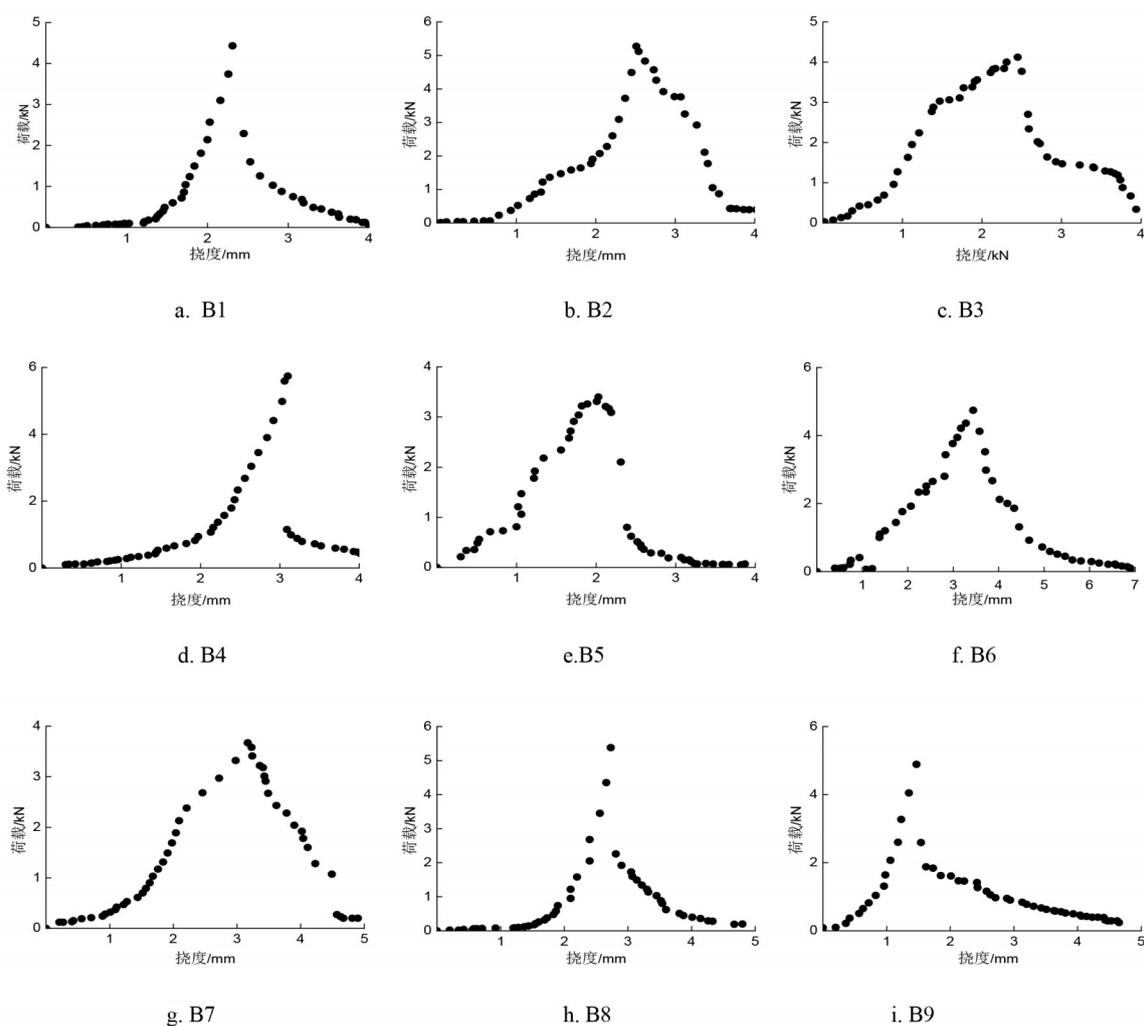


图2 试块B1~B9在受弯状态下的荷载-挠度曲线图

阻变化率具有明显的相关性,试块电阻变化率随着挠度的增加而增大(图3)。试块B1~B9的挠度和电阻变化率拟合相关系数分别为0.995、0.991、0.992、0.960、0.977、0.960、0.976、0.986、0.996。

复相机敏混凝土在受弯状态下,CF和其他3种导电材料距离较近,易互相搭接形成导电网络,随着荷载的不断增大,受拉区基体不断开裂,一部分导电网络被切断,导致基体电阻增大。同时,受压区部分导电材料间距不断缩小,互相搭接又形成新的导电通路,降低了基体受压区的电阻率,这2种作用的同时产生了电阻率缓慢增大的现象。韩壮^[7]的研究显示,在机敏混凝土开裂瞬间,纤维状导电材料大量地从基体中被拔出,相互拖粘,造成基体中大量导电网络被切断,从而导致基体电阻率迅速增大。开裂后,大量的纤维状导电材料不断被拔出基体,导致基体电阻率趋于无穷大。

试件B1~B9在受弯过程中最大电阻变化率分别为59.55%、28.44%、11.35%、47.46%、147.98%、

93.6%、157.95%、109.58%、82.48%,回归方程相关系数均大于0.95(图3)。这表明用一次函数可以较好地表示试件挠度和电阻率之间的关系,复相机敏混凝土代替传统混凝土构件进行结构健康监测在技术上具有可行性。

3 结论

本文研究了不同种类的导电材料对复相机敏混凝土敏电阻率、抗弯强度、挠度-电阻变化率的影响,主要结论有如下。

1)当导电材料掺量比(CF:SF:MWCNTs:CB)为1.2:4:0.25:4时,复相机敏混凝土的28 d电阻率最低,达 $887.5 \Omega \cdot \text{cm}$,4种导电材料对复相机敏混凝土电阻率的影响关系为:CF>SF>CB>MWCNTs。

2)当导电材料掺量比(CF:SF:MWCNTs:CB)为0.3:4:0.5:2时,复相机敏混凝土抗弯强度最高,对应的破坏荷载为5.27 kN。4种导电材料对复相机敏混凝土抗弯强度的影响关系为:SF>CB>CF>

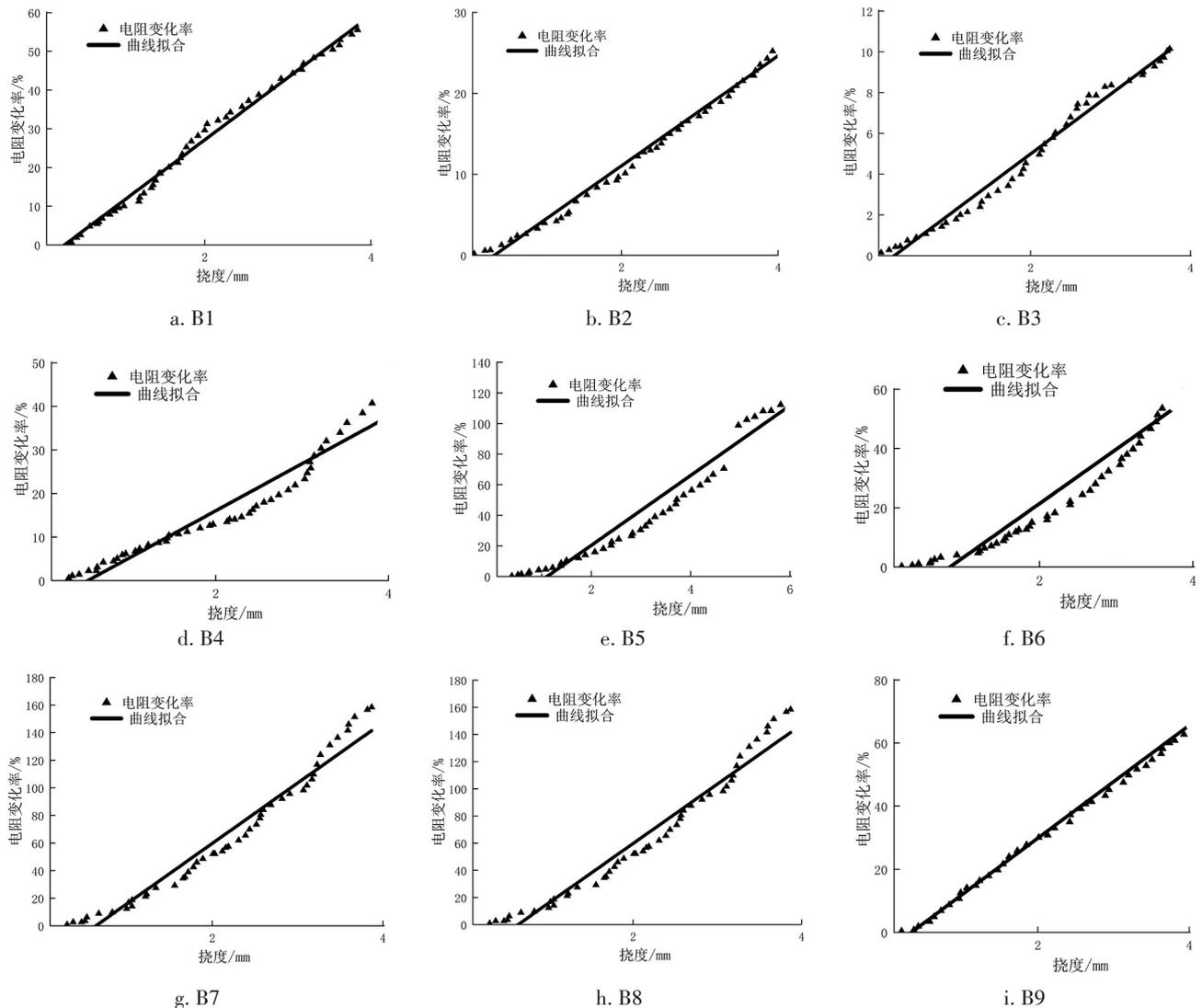


图3 复掺导电材料复相机敏混凝土的弯敏特性

MWCNTs。

3)复相机敏混凝土在受弯状态下具有良好的机敏性。当其挠度达到4 mm时,最大电阻率变化为158%,受弯机敏性最好。通过对复相机敏混凝土

的电阻变化率与挠度进行拟合发现,相关系数均大于0.95,复相机敏混凝土在受弯过程中电阻率与挠度变化关系相关性较好。

参考文献:

- [1] 宋凯,高培伟,孙亚飞,等.碳纤维-石墨导电混凝土力学性能及受弯机敏性研究[J].混凝土与水泥制品,2016(12):1-5.
- [2] 应文武.混凝土结构中钢筋无损检测技术的研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [3] ZHANG L Q, HAN B G, YANG J Q, et al. Multifunctionality of cement based composite with electrostatic self-assembled CNT/NCB composite filler[J].Archives of Civil & Mechanical Engineering,2017,17(2):354-364.
- [4] 周天舒,孙亚飞,彭月月.复掺功能填料机敏混凝土的压阻响应[J].材料科学与工程学报,2021,39(5):763-767.
- [5] 张苾铭,俞乐华.钢纤维-碳纳米管导电混凝土的受弯机敏性试验研究[J].混凝土,2017(9):49-56.
- [6] CHEN M, GAO P, GENG F, et al.Mechanical and smart properties of carbon fiber and graphite conductive concrete for internal damage monitoring of structure[J].Construction & Building Materials,2017,142:320-327.
- [7] 韩壮.纤维水泥基复合材料传感器受弯机敏性研究[D].大连:大连理工大学,2015.