第 49 卷第 10 期
2021 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 10
October，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210001

综 合 评 述

碳纳米管水泥基复合材料压阻效应研究进展

秦 煜[1,2]，胡魏凯[1]，王威娜[1]，阮鹏臻[1]，唐元鑫[1]

(1. 重庆交通大学土木工程学院，重庆 400074；2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司，重庆 400023)

摘 要：掺入适量的碳纳米管水泥基材料具有卓越的压阻性能，继而可帮助实现水泥基复合材料结构的自感知。碳纳米管水泥基复合材料的压阻效应受到材料组构和加载模式等因素的影响，然而现存研究对此问题的重视和深度不足，限制了水泥基材料结构智能化的发展。从材料组构和加载模式 2 个方面，讨论了碳纳米管掺量、水灰比和碳纳米管分散性等因素对材料受外力作用下各个阶段的压阻效应影响，分析了轴压、拉伸、冲击荷载以及加载速率、幅值等影响材料从开始加载至破坏整个过程压阻效应的特征，指出了目前研究中存在的问题，展望了碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的未来发展前景。

关键词：碳纳米管；水泥基复合材料；压阻效应；电阻率
中图分类号：TU528　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2021)10–2298–07
网络出版时间：2021–09–06

Research Progress on Piezoresistive Effect of Carbon Nanotube Cement Based Composites

QIN Yu[1,2], *HU Weikai*[1], *WANG Weina*[1], *RUAN Pengzhen*[1], *TANG Yuanxin*[1]
(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co. Ltd, Chongqing 400023, China)

Abstract: A cement-based material with an appropriate amount of carbon nanotubes has a superior piezoresistive effect, which can realize the self-sensing of cement-based composite structure. The piezoresistive effect of carbon nanotube cement-based composite is affected by the material fabric and loading mode, etc.. However, the lack of the corresponding research restricts the development of the intelligent structure of cement-based materials. This review discussed the carbon nanotube content, water cement ratio and carbon nanotube dispersion for the various stages of piezoresistive effect, and analyzed the axial compression, tensile, impact load and impact loading rate, and amplitude.. The characteristics of the piezoresistive effect were pointed out, and the existing problems were given. In addition, the future studies on the piezoresistive effect of carbon nanotubes cement matrix composites were also prospected.

Keywords: carbon nanotubes; cement-based composites; piezoresistive effect; resistivity

碳纳米管具有卓越的物理性能。适量的碳纳米管加入水泥基材料，可使其获得优异的压阻特性。应用碳纳米管水泥基复合材料的压阻效应，可实现水泥基材料结构的智能化监测。碳纳米管水泥基材料压阻效应受到大量因素的影响。因此，对碳纳米管水泥基复合材料的压阻效应进行研究很有必要。材料组构和加载模式对碳纳米管水泥基复合材料压阻性能具有一定的影响。掌握各因素的影响方式和力度，才能更好地发挥碳纳米管水泥基复合材料的智能化监测功能。目前，国内外开展了碳纳米管水泥基材料压阻效应的有关研究，并获得重大研究成果。然而，现存研究对碳纳米管水泥基复合材料的

收稿日期：2021–01–13。　修订日期：2021–03–22。
基金项目：国家自然科学基金项目(51978114，52078091)；重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0796，cstc2020jcyj-msxmX0624)。
第一作者：秦 煜(1983—)，男，博士，高级工程师。
通信作者：王威娜(1983—)，女，博士，副教授。

Received date: 2021–01–13.　**Revised date:** 2021–03–22.
First author: QIN Yu (1983–), male, Ph. D., Senior Engineer.
E-mail: qinyubridge@163.com
Correspondent author: WANG Weina (1983–), female, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: wwn0816@yeah.net

各个受力阶段的压阻效应关注远远不足，部分研究结论相差甚远。

为了厘清碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的研究现状，论述了材料组分和加载模式影响压阻效应等方面的研究成果，分析了现有的研究不足或有待完善之处，展望了碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的未来发展趋势。

1　材料组构对压阻效应的影响

1.1　多壁碳纳米管掺量

多壁碳纳米管的掺量是影响水泥基复合材料电学性能的主要因素。左俊卿等[1]研究了掺量(质量分数)为 0、0.1%、0.2%、0.5%、1.0%、2.0%的碳纳米管水泥净浆导电性能，其电阻率依次为 40、34、24、22、96 Ω·cm 和 100 Ω·cm。随着碳纳米管掺量增大，碳纳米管水泥净浆的直流阻抗呈减小趋势[2]，但是掺量过高的碳纳米管易团聚，反而导致电阻率增大。

随掺量增加，多壁碳纳米管水泥净浆的压阻效应呈规律性变化。掺量为 0.05%、0.10%、0.30%，0.50%的碳纳米管水泥净浆棱柱体试件压阻试验表明，其电阻率的变化幅值依次为 3.7%、4.5%、10.1%、17.0%[3]。质量分数为 0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、1.0%的多壁碳纳米管水泥净浆立方体试件，在循环加载下的电阻率变化幅值分别为 96%、64%、50%、37%、78%、54%[4]。掺量为 0.05%、0.10%和 1.00%的碳纳米管水泥净浆电阻随加载而减小，随卸载而增大，表现出稳定而规则的压阻响应，电阻最大变化值为 1 000、1 150 Ω 和 600 Ω[5]。这是由于在荷载作用下，相邻碳纳米管之间的绝缘基质厚度可能会发生较大的变化。压载导致接触区域的间隙减小，进而在接触区域发生隧道效应，从而降低了电阻[5]。Potschke 等[6]通过掺量为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的碳纳米管净浆棱柱体试件拉伸试验发现，其电导率分别为 10^{-17}、10^{-8}、10^{-2}、10^{-2} S/cm，随着掺量增加，碳纳米管净浆的电导率先是大幅度增加，当掺量达到 1.5%，增加幅度几乎无变化。

有较多的研究得出，碳纳米管掺量为 0.1%～0.2%时，多壁碳纳米管水泥净浆呈现较好的压阻响应[7–11]。亦有研究表明掺量为 0.5%时，多壁碳纳米管水泥净浆的压阻响应较佳[3, 12–13]。某些掺量的多壁碳纳米管水泥净浆的压阻响应存在跳跃、间断点、稳定性差等现象[10]。石小冬[14]研究表明当掺量为 0.05%时，加载初期的电阻变化率曲线不稳定；当掺量为 0.08%时，电阻变化率曲线趋于稳定，并具有上升和漂移的趋势。

多壁碳纳米管水泥砂浆亦具有良好的机敏性能。李云峰等[15]的碳纳米管水泥砂浆棱柱体循环荷载试验表明，掺量为 0.2%和 0.3%试件的压阻响应较好，无跳跃点和间断点。当掺量为 0.05%、0.10%、0.30%、0.50%、1.00%时，碳纳米管水泥砂浆电阻的变化幅值分别为 128、150、140、186、160 Ω，电阻值与压应力变化有较好的对应关系[16]。Zhang 等[17]研究了体积分数为 0.38%、0.75%、1.41%、2.14%的碳纳米管水泥砂浆棱柱体试件电阻率，结果表明，电阻率的变化分别为 1.8%、1.4%、13.4%、12.9%。总体来看，随着碳纳米管掺量增加，多壁碳纳米管水泥砂浆电阻率的变化呈先上升后下降的特点，掺量为 0.5%的多壁碳纳米管水泥砂浆的压阻效应较好[18–20]。原因是碳纳米管的高掺量和有效分散有利于形成更多的碳纳米管接触，减小了接触点之间的隧穿间隙，从而电导率提高[19]。

1.2　单壁碳纳米管掺量

Saafi 等[21]研究了在单调直接拉伸加载下单壁碳纳米管掺量对水泥净浆棱柱体电阻的影响，当单壁碳纳米管体积掺量为 0、0.5%、1.0%时，水泥净浆电阻逐渐减小。在单调拉伸加载的过程中，单壁碳纳米管的最佳掺量为 1.0%，电阻变化最大可达 110%。在拉力作用下，相邻碳纳米管之间的水泥基质厚度趋于增大，导致其有效电阻增加。随着应力继续增加，由于高应变集中，形成的损伤增大了碳纳米管之间发生电隧穿的间隙，继续增大了电阻。

1.3　碳纳米管分散性

碳纳米管均匀分散是复合材料发挥其功能的必要条件。碳纳米管分散不均会出现团聚现象，引起应力集中，对水泥基材料水化和强度有较大影响[22–23]。采用表面活性剂和超声波联合制备碳纳米管分散液，是有效的分散方法。

研究表明，多壁碳纳米管分散均匀时，形成的导电通路概率随多壁碳纳米管体积分数增加而增大，随碳纳米管掺量增大，水泥基复合材料的电阻率减小；而分散不均时，由于碳纳米管的团聚，导电通路概率不再随其体积分数变化，因此水泥基材料的电阻率与碳纳米管掺量之间关系呈不确定性[24–25]。这是由于分散不佳的碳纳米管相互缠绕和团簇，形成更多的无碳纳米管区域，减少了导电通路；碳纳米管分散质量高，则较少缠绕聚集，在水

泥基中不但可填充空隙，还起到联结作用，形成更多的导电通路[24–25]。

1.4 水灰比

水灰比是碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的重要影响因素。水灰比为 0.33、0.35、0.40 和 0.45 的碳纳米管水泥净浆棱柱体，在循环加载的过程中，试件电阻率的最大变化分别为–9.6%、–9.8%、–10.0%和–12.0%[11]。因为水灰比改变了复合材料的组构和导电网络，影响了压阻灵敏度[5, 11]。

水灰比为 0.45～0.60 时，碳纳米管水泥净浆/砂浆的压阻效应较好[5, 11, 26]。梁坤[27]实验表明水灰比为 0.60 的碳纳米管水泥砂浆棱柱体的压阻效应最佳，整个测试过程中的电阻率最大差值达 36 kΩ·cm，电阻率呈现逐渐减小的规律。碳纳米管水泥砂浆立方体循环加载试验表明，随水灰比 0.4、0.5、0.6 依次增加，试件电阻变化值均减小，分别为 3.2%，2.8%，0.5%[28]。左俊卿等[1]研究了水灰比 0.46、0.55、0.65 的碳纳米管水泥净浆棱柱体的导电性能，试件电阻率为 33.9、16.6 Ω·cm 和 14.2 Ω·cm，电阻率随水灰比增大而减小，其原因有 2 点：1) 在其他材料用量一定的情况下，水灰比的增大增加了材料的流动性，有助于碳纳米管在水泥基体中的均匀分散；2) 在水化反应整个过程中，过高的用水量使得水泥基体干缩率上升，减小了分散均匀的碳纳米管在基体中的相互间距，提高导电填料的连接概率，从而使材料整体导电性得到提升[1]。

2 加载模式对压阻效应的影响

2.1 轴压加载

在轴压加载过程中，碳纳米管水泥净浆的电阻率呈先减小后增大的特征。魏姗姗[11]研究表明随轴压增大，碳纳米管水泥净浆立方体的电阻率逐渐减至 75.5 kΩ·cm；当应力增大至非弹性阶段，电阻率稳定于 75.5 kΩ·cm；随压力继续增至试件破坏，电阻率急剧增加至 80 kΩ·cm。复合材料的电阻主要包括 3 部分：碳纳米管的电阻、水泥基的电阻和二者的接触电阻。试件受压时，复合材料展现 2 种状态：1)受压初期，电阻率降低，是由于碳纳米管接触形成导电通路；2)受压后期，试件内部出现微裂纹，碳纳米管有效接触减少，电阻率随之增大；随着裂纹进一步扩展，试件破坏，电阻率急剧增大[11]。尺寸为 40 mm×40 mm×80 mm 的碳纳米管水泥净浆棱柱体，当压力增至 8 MPa，试件电阻率达到最小值；当压力增至 15 MPa (试件破坏)，电阻率反而增大，电阻率的变化逾 70%[29–30]。碳纳米管掺量为 0.08%的水泥净浆棱柱体，在轴压荷载由 0 kN 增至 20 kN 的整个过程，试件电阻率从 58.9 kΩ·cm 近似线性减小至 32.1 kΩ·cm，表现出良好的压阻性能[31]。

Luo 等[32]试验表明随单轴压力增大，多壁碳纳米管掺量 1.31%的水泥砂浆电阻率逐渐减小；当压力达到 13.24 MPa，电阻率减小约 18.0%；压力继续增大，电阻率减小 17.5%并出现微裂纹。李庚英[33]研究表明在单轴加载至破坏的整个过程中，随压力逐渐增大，碳纳米管水泥砂浆棱柱体的电阻率先逐渐降低，当压力达到 40 kN，复合材料电阻率开始增加；在整个加载过程中，复合材料承受最大压力可达到 90 kN，复合材料电阻率的增大极值约 36%，减小极值约 30%。这是电容效应和隧穿效应共同作用的成果，若电容效应大于隧穿效应，则总电流随压应力的增加而减小，电阻相应增大；若电容效应小于隧穿效应，则总电流随压应力的增加而增大，电阻相应减小。同时，这亦受到材料损伤的影响，开裂导致碳纳米管之间的接触点减少，导电势垒增加，复合材料的导电能力下降[33]。

目前，现有研究仅开展了 10 cm 级的小型试件，未关注大尺寸的碳纳米管水泥基材料构件。实际工程应用中，偏心受压比轴压更常见，应得到足够的关注。同时，关于碳纳米管混凝土的研究尚少见。

2.2 循环轴压加载

在循环轴压加载过程中，碳纳米管水泥净浆呈现规律性的压阻效应。尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 碳纳米管水泥净浆立方体的循环轴压试验表明[34–36]：在弹性范围内，随加载/卸载，试件电阻率呈现线性减小/增大，具有良好的可逆性；碳纳米管掺量为 0.5%时，电阻变化达 1 300 Ω。在 5.2 MPa、8.6 MPa 循环加载下，碳纳米管掺量 0.1 %的水泥净浆电阻变化达 5.0%和 7.2%[37]。当压应力约 9 MPa 时，电阻变化可达 700 Ω[38]，电阻率变化为 8.2%[39]。在加/卸载过程中，碳纳米管从水泥基材料中挤入或拔出，导致碳纳米管与水泥基体间的接触电阻减小或增大[36]。

Li 等[40]研究表明在反复的压缩载荷(0～15 kN)作用下，碳纳米管水泥净浆棱柱体的电阻率变化可达 10%。当碳纳米管掺量为 0.05%且压载达到 1.48 kN 时，多壁碳纳米管水泥净浆的电阻率为 1.321 2 kΩ·m，最大变化为 25.3%[41]。在对棱柱体试件循环加载的整个过程，随着应力变化，掺量为 1.5%、2.0%和 2.5%的碳纳米管水泥净浆试件的电阻

变化达到 9.5%、1.2%和 4.3%[42]。随着载荷不断增大，基体内部导电相材料之间的平均距离减小，相互接触几率增大，形成更多的导电通路；同时，由于导电相材料之间的平均距离减小，导致势垒变窄，隧穿电流增大，电阻减小[42]。

在正弦循环压载的过程中，碳纳米管水泥净浆的电阻与压力并非始终呈线性关系。在小于 5 MPa 的压力作用下，复合材料电阻变化幅度比较大；在 5～10 MPa 作用区间，随压力逐渐增大，电阻线性减小但变化幅度较小[8]。在循环加载下，20 mm×20 mm×60 mm 的碳纳米管水泥净浆棱柱体的电阻率变化与压应力有较好的对应关系，加载时电阻率随荷载增大而减小，卸载时相反[43]。在循环压缩作用下，碳纳米管水泥净浆的应变灵敏度与电阻率变化表现出相似的规律[44]。Konsta-Gdoutos 等[45]研究了在循环压缩加载下，0.1%碳纳米管水泥净浆棱柱体电阻率的变化，在裂纹闭合的弹性区域，电阻率在加载过程中降低，卸载过程中裂纹张开区域的电阻率增加。在荷载变化的整个过程中，试件电阻率的平均变化量为 4.5%，有较好的压阻响应。这是因为外力改变了复合材料的体积，缩小了水泥基体中碳纳米管之间的距离，从而增加了接触点数量和增强了电子自动跃迁能力，在宏观上显示出较佳的机敏性能[43]。

Jeevanagoudar 等[46]研究了循环压缩荷载下，多壁碳纳米管水泥砂浆 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试件的电阻率变化，试验表明电阻率变化与外加应力有较好的对应关系。整个过程，多壁碳纳米管水泥砂浆具有较好的压阻响应，电阻率的最大变化可达 2.5%。碳纳米管水泥砂浆棱柱体的电阻变化率随应力增减而单调减增，呈现出明显的压阻效应，在 15 kN 压力下电阻的最大变化为 12%[33]。

综上所述，在循环轴压加载作用下的碳纳米管水泥基复合材料压阻效应研究成果较多，但大多数针对低应力状态，关于高应力或特定应力区间下的压阻效应相关研究很少。弹性阶段电阻变化研究较多，碳纳米管水泥基复合材料非弹性状态的压阻研究甚少。

2.3　拉伸荷载

拉伸荷载对碳纳米管水泥基材料压阻效应的影响引起了少量的关注。Yoo 等[47]研究了劈裂拉伸作用下多壁碳纳米管水泥净浆的电阻率，采用直径 100 mm、高度 200 mm 的圆柱体试件，在拉伸加载整个过程试件电阻率的变化随荷载呈线性增大，拉伸荷载达到 36 kN 时试件失效，电阻率出现突变，最大变化为 5.2%。这是由于随着拉应力的增大，基体出现裂纹，碳纳米管之间距离增大，导致电阻增加。Andrawes 等[48]研究了循环拉伸荷载下，掺量为 0.2%的碳纳米管水泥净浆的压阻性能，随着拉伸荷载增大，12.7 mm×12.7 mm×25.4 mm 棱柱体试件的电阻增加，卸载时试件电阻也相应减小，当拉应力达到最大值 300 kPa 时，试件电阻的变化达到 14%。因为拉伸载荷作用下，试样拉应变增大和损伤增加，卸载时相反。

碳纳米管高性能混凝土亦具有压阻性能。周健[49]研究了掺量为 0.3%的碳纳米管高性能混凝土在拉伸荷载下的压阻效应，随着拉伸荷载增大，350 mm×50 mm×10 mm 棱柱体试件电阻率的变化不断增大。在试件内部出现微裂纹之前，试件电阻率的增长变化比较慢，最大值仅为 0.23%。试件出现微裂纹后，电阻率的变化分数–时间曲线的斜率增长变化很大。随后试件出现稳态开裂，电阻率的变化维持上升趋势，试件破坏时电阻率的变化达到 80%。

目前，关于拉伸荷载对碳纳米管水泥基材料全过程压阻效应影响的试验研究整体较少，且主要针对小尺寸试件，碳纳米管水泥基材料构件的研究尚需开展。

2.4　加载速率

在一定范围内，增大加载速率，可以提高碳纳米管水泥基复合材料的压敏性能。当加载速率为 100、300 N/s 和 500 N/s 时，20 mm×20 mm×60 mm 碳纳米管水泥净浆棱柱体试件的最大电阻变化率分别为 4.42%、4.44%、4.73%[50]。加载速率为 50、100、200、300 N/s 和 500 N/s 时，碳纳米管水泥净浆 40 mm×40 mm×80 mm 棱柱体试件电阻变化率呈增大趋势，从 6%增大至约 14%[29–30]。碳纳米管水泥砂浆电阻变化率的最大值约 13%[17]。由于加载速率的增加，拉出和推入水泥基体的碳纳米管数量减少，导致复合材料的灵敏度随着加载速率增加而降低。

在加载速率为 0.10、0.20、0.25 cm/min 和 0.30 cm/min 时，碳纳米管水泥净浆 50.8 mm×50.8 mm×50.8 mm 立方体试件呈现大体相同的压阻响应，当加载速率低于 0.2 cm/min 时，加载速率几乎不影响试件的压阻响应，随着加载速率增大，影响程度也增大[51]。Zhang 等[52–53]研究了在循环加载下碳纳米管水泥砂浆 40 mm×40 mm×80 mm 棱柱体试件的压阻特性，当加载速率为 0.2、0.4 mm/min 和 0.6 mm/min 时，电阻率变化分别为 21.6%、22.1%和 20.9%。在整个循环加载过程，加载速率对电阻

率没有明显的影响，压阻对加载速率不敏感。

现有研究存在以下不足：应力加载速率和位移加载速率对压阻影响的研究成果，存在一定程度的矛盾。不同速率的拉伸加载下碳纳米管水泥基复合材料压阻效应研究较少。

2.5 加载幅值

加载幅值对碳纳米管水泥基复合材料的压阻效应亦有影响。40 mm×40 mm×80 mm 的碳纳米管水泥净浆棱柱体试件循环加载试验表明[30]，当加载应力为 1.250、3.125、6.250 MPa 和 9.375 MPa 时，试件电阻率变化最大值为 2.5%、5.0%、10.0%、16.0%。Yoo 等[47]研究了碳纳米管水泥净浆 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体试件，随着加载幅值的增大，电阻变化率变化最大值约 26%，当荷载达到 80 kN 时，试件失效且电阻变化率出现突变[47, 54–56]。当压应力幅值低于 10 MPa 时，碳纳米管水泥净浆处于弹性状态阶段，具有稳定可逆的压阻响应，当加载幅值达到 12 MPa，试件变形超出弹性范围，内部出现微小裂纹，从而使试件压阻响应不可逆。当加载幅值为 4、10 MPa 和 12 MPa 时，试件电阻变化最大为 5、9 kΩ 和 10 kΩ[50–51]。这是由于更高的加载幅度增加了导电网络，导电材料的间距减小，有助于碳纳米管相互接触和电子跃迁。

对于碳纳米管水泥砂浆，加载幅值为 6、8 MPa 和 10 MPa 时，立方体试件电阻率变化最大值分别为 16.0%、22.1%、25.4%[52–53]。当加载幅值为 2 MPa 和 4 MPa 时，碳纳米管水泥砂浆棱柱体试件的电阻率变化增至 7.84%和 11.89%[17]。在循环加载过程中，在一定应力范围内加载幅值越大，碳纳米管水泥基复合材料的压阻效应越明显。原因是碳纳米管之间的间距随应力幅值增大而减小，更容易发生隧道效应，可以明显降低复合材料的电阻率。

当挠度为 0.2 mm 时，碳纳米管高性能混凝土棱柱体处于弹性阶段，电阻率的变化较小仅 0.4%；当挠度为 0.4、0.6、0.8、1.0 mm 和 1.5 mm 时，试件已开裂处于塑性，电阻率的变化分别为 2.08%、6.65%、10.37%、15.44%、23.74%[49]。

目前，现有研究集中在小幅值(小变形/小位移)情况下的碳纳米管水泥基复合材料压阻效应，对于大变形和破坏情况的研究不足。

3 结论与展望

碳纳米管水泥基复合材料具有良好的压阻特性。在弹性承载到塑性破坏的整个过程中，碳纳米管水泥基复合材料呈现出一定的电阻率变化规律，通过电阻率的变化情况，可对水泥基复合材料结构实现智能化监测。

通过对碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的研究进展分析，可得到以下结论：各阶段下的压阻效应受到碳纳米管掺量和分散性、水灰比等材料组构的影响，亦受到轴压、拉伸以及加载速率、幅值等加载模式的影响；碳纳米管掺量和形态确定了碳纳米管的间距与搭接率，影响势垒高度和分散情况；水灰比影响水泥基材料孔隙率，孔隙与毛细水影响导电网络的形成，进而影响压阻特性优劣；轴压载荷增加了碳纳米管的介入概率，使得隧道效应更加明显，导致复合材料电阻下降；而拉伸荷载相反，拉应力增大导致复合材料的电阻增大；在一定范围内，加载速率和幅值越高，复合材料的压阻效应越明显。

此领域可从以下方面开展进一步的研究工作：

1) 混凝土是最常用的水泥基复合材料，开展碳纳米管混凝土的压阻效应的多尺度试验研究，从多个尺度揭示各因素对碳纳米管混凝土材料电阻率的影响方式和规律。

2) 考虑收缩徐变、干湿交替、冻融循环等因素，开展碳纳米管混凝土构件或结构的的压阻效应研究，分析开始加载到破坏整个过程的电阻(率)变化规律。

3) 针对中高应力、小偏心承压和纯弯等作用情况，开展碳纳米管水泥基复合材料构件压阻效应试验。

4) 模拟交通流车辆荷载，考虑随机加载速率和幅值的情况，构建物理模型，进行压阻效应变化规律研究。

5) 加载速率的荷载控制模式、位移控制模式，二者试验结果的对应性需要研究。中低速率的冲击作用对压阻效应影响研究。

参考文献:

[1] 左俊卿, 房霆宸, 廖刚. CNT-CF/水泥基材料导电性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3922–3926.
ZUO Junqing, FANG Tingchen, LIAO Gang. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2019, 38(12): 3922–3926.

[2] WANSOM S, KIDNER N J, WOO L Y, et al. AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites[J]. Cem Concr Compos, 2006, 28(6): 509–519.

[3] 刘小艳, 刘岩, 明维, 等. 碳纳米管/水泥基复合材料导电性与力敏特性研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2015(2): 6–9.
LIU Xiaoyan, LIU Yan, MING Wei, et al. Comprehe Util Fly Ash (in Chinese), 2015(2): 6–9.

[4] NAM I W, SOURI H, LEE H K. Percolation threshold and piezoresistive response of multi-wall carbon nanotube/cement composites[J]. Smart Struct Systems, 2016, 18(2): 217–231.

[5] HAN B, YU X, KWON E, et al. Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites[J]. J Compos Mater, 2011, 46(1): 19–25.

[6] POTSCHKE P, ARNALDO M H, RADUSCH H J. Percolation behavior and mehanical properties of polycarbonate composites filled with carbon black/carbon nanotube systems[J]. Polimery, 2012, 57(3): 204–211.

[7] COPPOLA L, BUOSO A, CORAZZA F. Electrical Properties of Carbon Nanotubes Cement Composites for Monitoring Stress Conditions in Concrete Structures[J]. Appl Mech Mater, 2011, 82: 118–123.

[8] 蒙井. 高分散性碳纳米管/水泥基复合材料压敏性能与导电机理[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
MENG Jing. Pressure-sensitive properties and conductive mechanism of highly dispersed carbon nanotubes/cement-based composites (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[9] 罗健林, 段忠东, 赵铁军. 纳米碳管水泥基复合材料的电阻性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(8): 1237–1241.
LUO Jianlin, DUAN Zhongdong, ZHAO Tiejun. J Harbin Instit Technol (in Chinese), 2010, 42(8): 1237–1241.

[10] 李云峰, 孙章平, 孙静, 等. 碳纳米管水泥基复合材料机敏性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(3): 7–12.
LI Yunfeng, SUN Zhangping, Sun Jing, et al. Concr Cem Prod (in Chinese), 2016(3): 7–12.

[11] 魏姗姗. 碳纳米管水泥基复合机敏材料的性能研究[D]. 山东大学建筑与土木工程, 2015.
WEI Shanshan. Study on properties of carbon nanotube cement-based composite Smart materials (in Chinese, dissertation). Shandong: Shandong University of Architecture and Civil Engineering, 2015.

[12] 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]. Cem Concr Compos, 2020, 108: 103517.

[13] 罗健林. 碳纳米管水泥基复合材料制备及功能性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
LUO Jianlin. Preparation and functional properties of Carbon nanotube cement-based composites (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[14] 石小冬. 碳纳米管水泥基复合材料压敏及高温力学性能研究[D]. 昆明理工大学, 2019.
SHI Xiaodong. Study on pressure sensitive and high temperature mechanical properties of carbon nanotube cement-based composites (in Chinese, dissertation). Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2019.

[15] 李云峰, 孙静, 王全祥. 碳纳米管水泥基复合材料传感器的工程结构监测应用[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(10): 34–37.
LI Yunfeng, SUN Jing, WANG Quanxiang. New Build Mater (in Chinese), 2015, 42(10): 34–37.

[16] 刘洋洋. 改性碳纳米管的掺入对混凝土性能影响[D]. 苏州科技学院; 苏州科技大学建筑与土木工程, 2018.
LIU Yangyang. Effects of incorporation of modified carbon nanotubes on concrete performance (in Chinese, dissertation). Jiangsu: Suzhou Institute of Science and Technology; Suzhou University of Science and Technology, Architecture and Civil Engineering, 2018.

[17] ZHANG L, DING S, LI L, et al. Effect of characteristics of assembly unit of CNT/NCB composite fillers on properties of smart cement-based materials[J]. Composites. Part A, Appl Sci Manuf 2018, 109: 303–320.

[18] QIN J, LI Y, QU J, et al. Electrical properties of cement-based composites with highly dispersed carbon nanotubes[C]//IOP Conference Series. Earth And Environmental Science, 2019, 358: 52023.

[19] HAN B, ZHANG K, YU X, et al. Fabrication of Piezoresistive CNT/CNF Cementitious Composites with Superplasticizer as Dispersant[J]. J Mater Civ Eng, 2012, 24(6): 658–665.

[20] 刘巧玲. 碳纳米管增强水泥基复合材料多尺度性能及机理研究[D]. 东南大学材料科学与工程, 2015.
LIU Qiaoling. Multi-scale properties and mechanisms of Cement-based composites reinforced by Carbon nanotubes (in Chinese, dissertation). Jiangsu: Materials Science and Engineering, Southeast University, 2015.

[21] SAAFI M. Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures[J]. Nanotechnology, 2009, 20(39): 395502.

[22] VAISMAN L, WAGNER H D, MAROM G. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2006, 128–130: 37–46.

[23] VAISMAN L, MAROM G, WAGNER H D. Dispersions of surface-modified carbon nanotubes in water-soluble and water-insoluble polymers[J]. Adv Funct Mater, 2006, 16(3): 357–363.

[24] 黎恒杆, 苏晴微, 林姝彦, 等. 多壁碳纳米管在水泥基材料中的分散性及其影响[J]. 新乡学院学报, 2019, 36(6): 24–29.
LI Henggan, SU Qingwei, LIN Shuyan, et al. J Xinxiang Univ (in Chinese), 2019, 36(6): 24–29.

[25] 黎恒杆, 王玉林, 罗昊, 等. 多壁碳纳米管分散性对水泥基材料导电性能和电热特性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3438–3443.
LI Henggan, WANG Yulin, LUO Hao, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2020, 39(11): 3438–3443.

[26] PARVANEH V, KHIABANI S H. Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes[J]. Mech Adv Mater Struct, 2019, 26(11): 993–1000.

[27] 梁坤. 混凝土导电特性及其影响因素试验研究[D]. 西南交通大学, 2018.
LIANG Kun. Experimental study on concrete conductivity and its Influencing factors (in Chinese, dissertation). Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[28] KIM H K, PARK I S, LEE H K. Improved piezoresistive sensitivity and stability of CNT/cement mortar composites with low water–binder ratio[J]. Compos Struct, 2014, 116: 713–719.

[29] 王琴, 王健, 刘伯伟, 等. 多壁碳纳米管水泥基复合材料的压敏性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9): 2733–2740.
WANG Qin, WANG Jian, LIU Bowei, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35(9): 2733–2740.

[30] 刘伯伟. 三种新型碳材料水泥基复合材料的制备及压敏性对比研究[D]. 北京建筑大学, 2016.
LIU Bowei. Preparation of three new carbon cement-based composites and comparative study on their pressure sensitivity (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jianzhu University, 2016.

[31] 花蕾, 王刘芸. 早龄期CNTs增强水泥基复合材料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1091–1095.
HUA Lei, WANG Liuyun. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019,

38(4): 1091–1095.

[32] LUO J, ZHANG C, DUAN Z, et al. Influences of multi-walled carbon nanotube (MCNT) fraction, moisture, stress/strain level on the electrical properties of MCNT cement-based composites[J]. Sensors Actuators. A. Phys, 2018, 280: 413–421.

[33] 李庚英. 碳纳米管水泥基材料的力学性能及机敏性能[D]. 同济大学; 同济大学材料科学与工程学院材料学, 2006.
LI Gengying. Mechanical properties and agility of carbon nanotube cement-based materials (in Chinese, dissertation). Shanghai: Tongji University; Materials Science, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, 2006.

[34] YOO D, YOU I, LEE S. Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(5): 1064.

[35] CHA S W, SONG C, CHO Y H, et al. Piezoresistive properties of CNT reinforced cementitious composites[J]. Mater Res Innov: CMSE-2013, 2014, 18(sup2): S2–S716.

[36] 马雪平. 碳纳米管水泥基复合材料压敏性能研究[D]. 山东大学道路与铁道工程, 2013.
MA Xueping. Pressure sensitive properties of carbon nanotube cement matrix composites (in Chinese, dissertation). Shandong: Road and Railway Engineering, Shandong University, 2013.

[37] YU X, KWON E. A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties[J]. Smart Mater Struct, 2009, 18(5): 55010.

[38] HAN B Y X K E. Piezoresistive Multi-Walled Carbon Nanotubes Filled Cement-Based Composites[J]. Sensor Lett, 2010, 2(8): 344–348.

[39] LUO J L, DUAN Z D, ZHAO T J, et al. Effect of Compressive Strain on Electrical Resistivity of Carbon Nanotube Cement-Based Composites[J]. Key Eng Mater, 2011, 483: 579–583.

[40] LI G Y, WANG P M, ZHAO X. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites[J]. Cem Concr Compos, 2007, 29(5): 377–382.

[41] 刘小艳, 傅峰, 刘静, 等. CNT/CC埋置前后循环力敏特性研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2015(4): 8–11.
LIU Xiaoyan, FU Feng, LIU Jing, et al. SCompreh Util Fly Ash (in Chinese), 2015(4): 8–11.

[42] 秦日建. 多尺度碳基水泥复合材料的导电、压敏及电热性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
QIN Rijian. Study on conductivity, pressure sensitivity and electrothermal properties of multi-scale carbon based cement composites (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[43] 李庚英, 王培铭. 表面改性对碳纳米管—水泥基复合材料导电性能及机敏性的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2007(6): 143–146.
LI Gengying, WANG Peiming. Sichuan Archit Sci Res (in Chinese), 2007(6): 143–146.

[44] L JIANLIN, KL CHUNG, L QIUYI, et al. Piezoresistive properties of cement composites reinforced by functionalized carbon nanotubes using photo-assisted Fenton[J]. Smart mater struct, 2017, 26(3): 35025.

[45] KONSTA-GDOUTOS M S, AZA C A. Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures[J]. Cem Concr Compos, 2014, 53: 162–169.

[46] JEEVANAGOUDAR Y V, KRISHNA R H, GOWDA R, et al. Improved mechanical properties and piezoresistive sensitivity evaluation of MWCNTs reinforced cement mortars[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 188–194.

[47] YOO D, YOU I, LEE S. Electrical and piezoresistive sensing capacities of cement paste with multi-walled carbon nanotubes[J]. Arch Civ Mech Eng, 2018, 18(2): 371–384.

[48] ANDRAWES B, LAI Y C. Compression and tension stress-sensing of carbon nanotube-reinforced cement[J]. Mag Concr Res, 2012, 64(3): 253–258.

[49] 周健. 碳纳米管对ECC力学性能及机敏性能影响的研究[D]. 山东大学, 2018.
ZHOU Jian. Effects of carbon nanotubes on the mechanical properties and alertness of ECC (in Chinese, dissertation). Shandong: Shandong University, 2018.

[50] HAN B, YU X, OU J. Dispersion of Carbon Nanotubes in Cement-Based Composites and Its Influence on the Piezoresistivities of Composites[C]. Asme Conference on Smart Materials, 2009.

[51] HAN B, YU X, ZHANG K, et al. Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors[J]. J Civ Struct Health Monitor, 2011, 1(1–2): 17–24.

[52] HAN B, ZHANG L, SUN S, et al. Electrostatic self-assembly CNT/NCB composite fillers reinforced cement-based materials with multifunctionality[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2015, 79: 103–115.

[53] ZHANG L, HAN B, OUYANG J, et al. Multifunctionality of cement based composite with electrostatic self-assembled CNT/NCB composite filler[J]. Arch Civ Mech Eng, 2017, 17(2): 354–364.

[54] YOO D, YOU I, ZI G, et al. Effects of carbon nanomaterial type and amount on self-sensing capacity of cement paste[J]. Measurement, 2019, 134: 750–761.

[55] YOO D, YOU I, YOUN H, et al. Electrical and piezoresistive properties of cement composites with carbon nanomaterials[J]. J Compos Mater, 2018, 52(24): 3325–3340.

[56] LEE S, YOU I, ZI G, et al. Experimental investigation of the piezoresistive properties of cement composites with hybrid carbon fibers and nanotubes[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(11): 2516.