PP纤维/碳纳米管协同增强水泥基复合材料的力学与电学性能研究

韩 磊[1],陈洪昌[2],付瑛琪[3]

(1.张家口职业技术学院,河北 张家口 075000;2.河北省建筑科学研究院有限公司,河北 石家庄 050000;
3.中国兵器工业集团北方工程设计研究院有限公司,河北 石家庄 050000)

摘 要:为解决普通水泥基材料缺乏导电功能和韧性差的缺陷,将碳纳米管(CNTs)及聚丙烯(PP)纤维复掺入普通水泥基材料中,系统探究水泥基复合材料(CBC)的力学性能与电学性能,揭示PP与CNTs的协同增强机理。结果表明:单掺CNTs时,CBC的孔隙率先减小后增大,力学性能先升高后降低,体积电阻率先降低后趋于稳定。复掺CNTs和PP纤维对普通水泥基材料具有显著的协同增强效应,在保持良好导电性能的同时提高CBC的力学性能,显著提高其冻融循环后的力学性能和电学性能的稳定性。当CNTs质量分数为0.10%、PP纤维质量分数为0.15%时,CBC的综合性能最佳,抗折强度和抗压强度均显著提升,冻融循环200次后,抗折强度损失率、抗压强度损失率及体积电阻率显著降低。研究结果为制备兼具优异力学性能与电学性能的CBC提供参考。

关键词:水泥基复合材料;碳纳米管;聚丙烯纤维;力学性能;电学性能

中图分类号:TQ172.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0113-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.021

Study on Mechanical and Electrical Properties of PP Fiber/Carbon Nanotubes Synergistically Reinforced Cement-based Composites

HAN Lei[1], CHEN Hongchang[2], FU Yingqi[3]

(1. Zhangjiakou Vocational and Technical College, Zhangjiakou 075000, China; 2. Hebei Academy of Building Sciences Co. , Ltd. , Shijiazhuang 050000, China; 3. China Ordnance Industry Group North Engineering Design and Research Institute Co. , Ltd. , Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To address the lack of electrical conductivity and poor toughness of ordinary cement-based materials, carbon nanotubes (CNTs) and polypropylene (PP) fibers were incorporated into ordinary cement-based materials. The mechanical and electrical properties of the cement-based composites (CBC) were systematically investigated, and the synergistic reinforcement mechanism of PP and CNTs was revealed. The results showed that with the addition of CNTs alone, the porosity of CBC first decreased and then increased, the mechanical properties first increased and then decreased, and the volume resistivity first decreased and then stabilized. The combined addition of CNTs and PP fibers exhibited a significant synergistic reinforcing effect on ordinary cement-based materials, improving the mechanical properties while maintaining good electrical conductivity, and significantly enhancing the stability of the mechanical and electrical properties after freeze-thaw cycling. At a CNTs mass fraction of 0.10% and a PP fiber mass fraction of 0.15%, the CBC achieved optimal overall performance, with both flexural and compressive strengths significantly improved. After 200 freeze-thaw cycles, the loss rates of flexural strength, compressive strength, and volume resistivity were significantly reduced. The results provide a reference for the preparation of CBC with excellent mechanical and electrical properties.

Keywords: CBC; CNTs; PP fiber; Mechanical properties; Electrical properties

收稿日期Submitted date 2025-10-10;修回日期Revised date 2025-11-04;录用日期Accepted date 2025-12-11

基金项目:2021年河北省建设科技研究指导性计划项目(2021-2123);2022年河北省建设科技研究指导性计划项目(2022-2260)

联系人,hanwhd@163.com

引用本文:韩磊,陈洪昌,付瑛琪.PP纤维/碳纳米管协同增强水泥基复合材料的力学与电学性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):113-118.

Citation:HAN L, CHEN H C, FU Y Q. Study on mechanical and electrical properties of PP fiber/carbon nanotubes synergistically reinforced cement-based composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 113-118.

普通水泥基材料绝缘性强，难以实现导电、电磁屏蔽或结构监测等功能，制约了其在智能建筑领域的功能化应用[1-2]。同时，普通水泥基材料脆性大，易在温度、应力及荷载作用下产生裂缝，导致耐久性下降[3-5]。研究人员常通过改性手段制备水泥基复合材料(CBC)，例如掺入导电填料以提升导电性能，掺入纤维以改善力学性能[6-9]。改性后的CBC在建筑、交通、水利等领域得到广泛应用[10-12]。

碳纳米管(CNTs)具有优异的导电与力学性能[13-15]。将CNTs掺入CBC可发挥双重作用：一方面，CNTs利用纳米填充效应促进水泥水化，改善界面过渡区密实度，从而提升力学性能[16-17]；另一方面，CNTs能够构建导电网络，赋予材料导电功能[18-19]。张驰宇等[20]向水泥砂浆中加入CNTs制备智能传感器发现，CNTs能够提升砂浆的导电性能，传感器具有良好的压敏特性。然而，CNTs作为纳米级粒子，对力学性能(尤其是抗折性能)的提升效果有限[21]。

聚丙烯(PP)纤维具有良好的抗拉强度与韧性，耐碱性优异且成本较低，在水泥基材料中应用广泛[22-23]。PP纤维通过“裂缝桥接”和“能量吸收”作用抑制宏观裂缝扩展，显著提升材料的强度、韧性与抗裂性[24-25]。覃源等[26]将0.9 kg/m^{3}的PP纤维掺入再生砂浆，发现PP纤维能够降低砂浆的脆性指数，提高其韧性与强度。

目前，关于CBC导电增强的研究多集中于单一导电填料，虽能显著提升导电性能，但综合力学性能的改善效果有限[27-28]。为同时实现导电功能与力学性能的双重提升，本研究提出CNTs-PP纤维协同增强策略，利用CNTs赋予导电功能，利用PP纤维改善宏观脆性，旨在通过二者协同作用突破单一增强体系的局限。本研究将揭示协同增强机理，确定最佳复掺比例，为高性能、多功能CBC的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

水泥，P·O 42.5，北京金隅水泥经贸有限公司，表1为水泥的物理性能；标准砂，厦门艾思欧标准砂有限公司；聚羧酸减水剂，PC-10，固含量20%，江苏苏博特新材料股份有限公司；CNTs，长度10~20 μm，直径20~50 nm，质量分数≥95%，上海巷田纳米材料有限公司；PP纤维，长度6 mm，直径15~20 μm，密度910 kg/m^3，抗拉强度≥560 MPa，泰安浩松纤维有限公司。

表1 水泥的物理性能

Tab.1 Physical properties of cement

标准稠度用水量/%	3 d抗折强度/MPa	3 d抗压强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
27.5	5.8	23.1	7.9	46.6

1.2 仪器与设备

压汞仪，AutoPore IV 9500 V1.07，麦克默瑞提克(上海)仪器有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，JSM-7001F，日本电子株式会社；压折一体机，DYE-300S，河北路科建试验仪器有限公司；干燥箱，DHG-9053A，上海捷呈实验仪器有限公司；精密磁性元件分析仪，3260B，深圳市稳科电子仪器有限公司；振动台，TDJC-682-2，沧州泰鼎恒业试验仪器有限公司。

1.3 样品制备

表2为CBC的配方。按表2配方将水泥、标准砂、水、减水剂以及CNTs先湿拌3 min，然后加入PP纤维湿拌2 min。将搅拌好的混合料倒入40 mm×40 mm×160 mm的模具中，置于振动台振动60 s。将成型后的试件放入温度20 ℃、相对湿度≥90%的标准养护箱中养护24 h。脱模后在20 ℃水中养护28 d。

表2 CBC的配方

Tab.2 Formula of CBC

样品编号	$m_{水泥}$/g	$m_{标准砂}$/g	$m_{减水剂}$/g	$m_{水}$/g	w_{CNTs}/%	$w_{PP纤维}$/%
基准样(JZ)	500	1 250	5	225	0	0
CNTs-0.05	500	1 250	5	225	0.05	0
CNTs-0.10	500	1 250	5	225	0.10	0
CNTs-0.15	500	1 250	5	225	0.15	0
CNTs-0.10/PP-0.10	500	1 250	5	225	0.10	0.10
CNTs-0.10/PP-0.15	500	1 250	5	225	0.10	0.15
CNTs-0.10/PP-0.20	500	1 250	5	225	0.10	0.20

注：w_{CNTs}和$w_{PP纤维}$分别为CNTs和PP纤维占混合料总质量的百分比。

1.4 性能测试与表征

SEM测试：取养护28 d试件的中心部位，经冷冻干燥、喷金处理后，采用扫描电子显微镜观察CBC基体、PP纤维和CNTs的界面结合状态及水化产物形貌。

孔隙率测试：采用压汞仪测试试件的孔隙率。

力学性能测试：按照GB/T 17671—2021对养护28 d的试件进行抗折强度和抗压强度测试，抗折和抗压测试加载速率分别为50 N/s和2 400 N/s，试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm。

电学性能测试：将养护28 d的试件置于60 ℃干燥箱中烘干至恒重，取出试件冷却至室温后，将两端截面打磨平整，用导电胶将铜片贴在截面上，待导电胶固化后，采用二电极法测量体积电阻率，测试用10 mV交流电，频率为100 kHz。

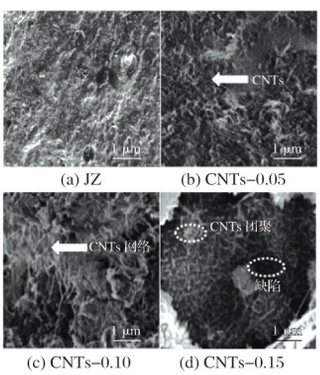
力学和电学性能稳定性测试：按照GB/T 50082—2024对试件进行力学和电学性能稳定性测试。对复掺组试件进行冻融循环处理，先在-18 ℃下冷冻4 h，再放入20 ℃水中融化4 h，此为一个循环过程。共循环200次，每50次循环后测试力学性能和体积电阻率。

2 结果与讨论

2.1 CBC的SEM分析

图1为单掺CNTs的CBC的SEM照片。从图1可以看出，与基准样相比，CNTs-0.05中存在较少的CNTs，CNTs

分散随机；CNTs-0.10 中 CNTs 分散均匀且形成连续的 CNTs 网络；CNTs-0.15 中 CNTs 出现部分团聚，形成孔隙缺陷，导致 CBC 结构劣化。

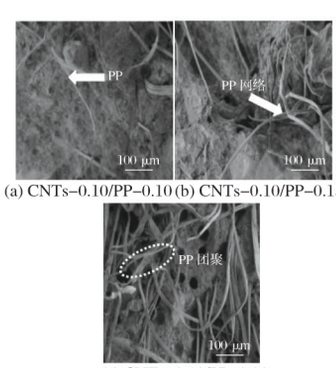


(a) JZ (b) CNTs–0.05
(c) CNTs–0.10 (d) CNTs–0.15

图 1 单掺 CNTs 的 CBC 的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of CBC doped with CNTs alone

图 2 为复掺 CNTs 和 PP 纤维的 CBC 的 SEM 照片。从图 2 可以看出，当掺入 0.10% CNTs 和 0.15% PP 纤维时，PP 纤维在基体中基本形成相互搭接的三维网络结构。当掺入 PP 纤维质量分数为 0.20% 时，PP 纤维出现团聚现象，CBC 出现明显的孔洞缺陷。以上结果表明，复掺 CNTs 和 PP 纤维的最佳质量分数分别为 0.10% 和 0.15%。



(a) CNTs–0.10/PP–0.10 (b) CNTs–0.10/PP–0.15
(c) CNTs–0.10/PP–0.20

图 2 复掺 CNTs 和 PP 纤维的 CBC 的 SEM 照片

Fig.2 SEM images of CBC doped with CNTs and PP fibers

2.2 CBC 的孔隙率分析

CBC 的孔隙根据孔径可分为 3 种：孔径小于 20 nm，无害孔；孔径处于 20~50 nm，少害孔；孔径大于 50 nm，多害孔。其中无害孔以凝胶孔为主，对强度及耐久性无负面影响；少害孔以细小毛细孔为主，对性能影响微弱；多害孔包含中毛细孔(50~1 000 nm)和大孔(>1 000 nm)，易导致强度下降、耐久性劣化。

图 3 为 CBC 的孔隙率。从图 3 可以看出，单掺入 CNTs 后，CBC 的总孔隙率($P_{总}$)和多害孔孔隙率均是先降低后升高，掺入 0.10% CNTs 时，$P_{总}$最小。其原因在于 CNTs 能够填充基体的微观界面孔隙，同时 CNTs 还能作为异相成核剂促进水泥水化，提高基体密实性，因此孔隙率降低且多害孔孔隙减少；而过量的 CNTs 容易团聚，在基体中造成界面缺陷，出现更多孔隙。在掺入 0.10% CNTs 的基础上掺入 PP 纤维，CBC 的 $P_{总}$先降低后升高。当 PP 纤维质量分数为 0.15% 时达到最小值。与基准样相比，无害孔孔隙率增多，多害孔孔隙率降低。其原因在于 PP 纤维在基体中形成“塑料筋”起锚固作用，能够连接水泥水化产物与骨料，使基体结构更致密，降低孔隙大小和数量。但过量的 PP 纤维会出现团聚等缺陷，使基体孔隙增多。因此，单掺 CNTs 的最优质量分数为 0.10%，复掺 CNTs 和 PP 纤维的最优质量分数分别为 0.10% 和 0.15%。

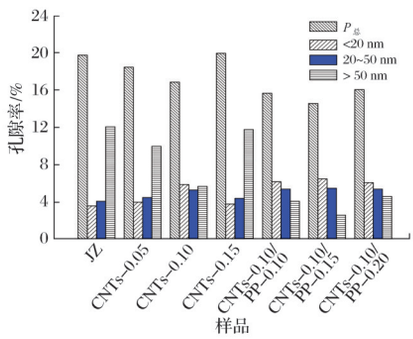


图 3 CBC 的孔隙率

Fig.3 Porosity of CBC

2.3 CBC 的力学和电学性能分析

图 4 为单掺 CNTs 的 CBC 的力学性能。从图 4 可以看出，与基准样相比，CNTs-0.10 的抗折强度从 5.70 MPa 提升至 6.80 MPa；抗压强度从 45.40 MPa 提升至 52.20 MPa。当 CNTs 的质量分数进一步增至 0.15% 时，CNTs-0.15 的力学性能开始下降，抗折强度和抗压强度分别为 5.90 MPa 和 49.60 MPa，较 CNTs-0.10 分别降低 13.24% 和 4.98%。

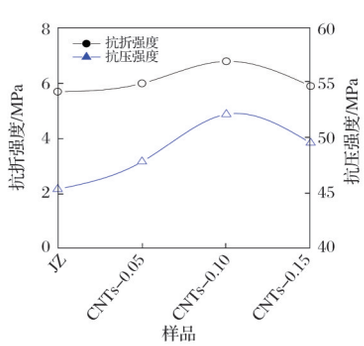


图 4 单掺 CNTs 的 CBC 的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of CBC doped with CNTs alone

CNTs 对 CBC 力学性能增强机理主要体现在微观增强与异相成核两方面[29]。一方面，CNTs 通过尺寸效应，填充水泥水化产物的微孔，细化水化硅酸钙凝胶，提升界面过渡区密实度，从而改善力学性能；另一方面，CNTs 还通过异相成核作用，促进水泥水化，增加水化产物，进而提高复合材料的力学性能。但过量的 CNTs 会出现团聚现象，使基体中出现孔洞和界面缺陷，破坏复合体系的连续性，限制 CNTs 对 CBC 力学性能的增强。在 CBC 受到外部荷载时，孔洞和界面缺陷容易引起裂纹扩展和基体破坏，降低复合体系的力学性能，因此过量的 CNTs 反而劣化 CBC 的

力学性能。CNTs对CBC抗压强度提高效果高于抗折强度。其原因在于CNTs填充了基体孔隙并促进水泥水化，显著改善了基体的界面密实性，进而提高抗压强度。

图5为单掺CNTs的CBC的体积电阻率。从图5可以看出，基准样的体积电阻率达到1.6×10^6 Ω·cm，说明其导电性能较差。其原因在于水泥骨料和水化产物属于非导电物质，测试前试件经过烘干处理，基体内部不存在游离水，因此基准样的体积电阻率较高。CNTs是一种导电组分，当CNTs质量分数为0.05%时，CNTs-0.05的体积电阻率降至7.5×10^4 Ω·cm。当CNTs质量分数为0.10%时，CNTs-0.10的体积电阻率显著降低，降至380 Ω·cm。当CNTs质量分数为0.15%时，CNTs-0.15的体积电阻率降至360 Ω·cm。这说明随着CNTs掺量的增加，CBC的导电性能逐渐提高。当掺入少量CNTs后，CBC的导电性能提高不明显；而当CNTs质量分数为0.10%时，导电性能基本达到稳定。原因是CNTs通过“点-点连接”构建导电网络，当CNTs掺量较低(质量分数为0.05%)时，CNTs在基体中独立分散，未形成相互连接的导电网络，因此对导电性能的提高效果不明显；当CNTs掺量达到“渗流阈值”(质量分数为0.10%)时，体积电阻率骤降，此时导电网络已经基本形成，复合体系的导电性能显著提高，继续增加导电组分对搭建导电网络作用不大。此外，过量CNTs不仅会团聚缠绕降低搭接效率，还会使CBC内部缺陷和孔隙率增加，破坏复合体系的连续性，进而阻隔部分导电通道，限制CNTs对CBC导电性能的增强效率。CNTs的孔洞中存在空气，空气的电传导性远低于CNTs，进而抑制CNTs增强CBC的导电性能，表现为体积电阻率降低幅度不明显。

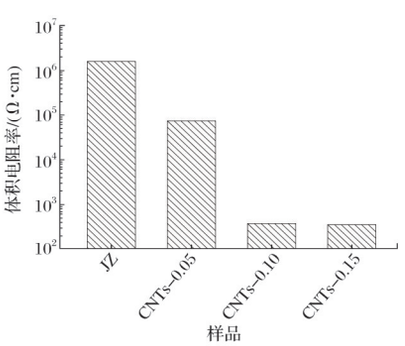


图5 单掺CNTs的CBC的体积电阻率

Fig.5 Volume resistivity of CBC doped with CNTs alone

图6为复掺CNTs和PP纤维的CBC的力学性能。从图6可以看出，与CNTs-0.10相比，CNTs-0.10/PP-0.15的抗折强度从6.80 MPa提升至10.50 MPa，提升54.41%，抗压强度从52.20 MPa提升至59.60 MPa，提升14.18%。当PP纤维质量分数为0.20%时，CNTs-0.10/PP-0.20的力学性能开始下降，抗折强度和抗压强度分别为9.90 MPa和57.20 MPa，较CNTs-0.10/PP-0.15分别降低5.71%和4.03%，但仍高于CNTs-0.10。与单掺CNTs相比，复掺CNTs和PP对CBC的力学性能具有协同效应，复掺CNTs和PP纤维的CBC抗折强度和抗压强度更高。复掺CNTs与PP纤维CBC的力学性能改善的主要原因为：PP纤维增强作用主要体现在“宏观增韧”，PP纤维分布在水泥基体中，当材料受弯或受压产生微裂缝时，PP纤维能够通过“桥接作用”拉住裂缝两侧基体，阻止裂缝扩展。PP纤维在断裂过程中会吸收能量，提升材料断裂韧性。PP纤维在搅拌过程中可形成“物理阻隔”，能够抑制CNTs团聚，从而使CNTs分散更均匀[24-26]。然而，PP纤维掺量过高会导致搅拌时团聚，形成缺陷和薄弱区，反而降低材料整体性能，进而导致力学性能下降。PP纤维对抗折强度的增强幅度明显优于抗压强度，这是因为抗压强度主要体现微观界面过渡区的性能以及基体密实度，PP纤维具有一定的长径比，在基体中相互搭接，能够显著提高CBC的韧性，因此PP纤维对CBC抗折强度的提高效果更明显。

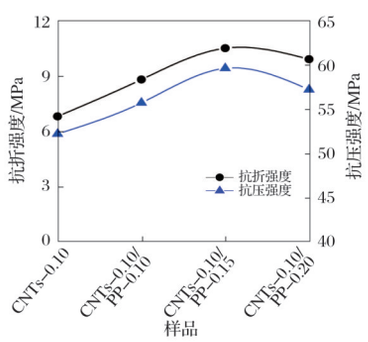


图6 复掺CNTs和PP纤维的CBC的力学性能

Fig.6 Mechanical properties of CBC doped with CNTs and PP fibers

图7为复掺CNTs和PP纤维的CBC的体积电阻率。从图7可以看出，与CNTs-0.10相比，CNTs-0.10/PP-0.15的体积电阻率从380 Ω·cm降至350 Ω·cm。当PP纤维质量分数增至0.20%时，体积电阻率上升至440 Ω·cm。其原因在于CBC的导电性能主要依靠形成导电网络的CNTs，而PP纤维自身具有绝缘性，不会对CBC整体导电性能造成影响。PP纤维掺量较低时，CBC导电性能提升幅度不大，可能是因为PP纤维提高了CBC的密实性，有助于电子传导，电子主要通过CNTs传递，因此CBC的体积电阻率降低幅度不大。当掺入过量的PP纤维时，CBC密实性下降，甚至出现部分孔洞，导致部分CNTs不连续，影响导电通道，因此体积电阻率反而上升。

2.4 CBC的力学和电学性能的稳定性分析

冻融破坏会破坏材料的结构和性能，是CBC最极端的一种破坏形式。上述研究发现，单掺时CNTs-0.10样品的力学性能和电学性能最佳；复掺时CNTs-0.10/PP-0.15样品的力学性能和电学性能最佳。为了探究导电CBC的耐冻融稳定性，测试了不同冻融循环次数下CNTs-0.10和CNTs-0.10/PP-0.15的力学性能和电学性能。

图8为冻融循环后CBC的力学性能。从图8可以看出，随着冻融循环次数的增加，CBC的抗折强度和抗压强度不断降低。与CNTs-0.10/PP-0.15相比，CNTs-0.10样品

的抗折强度和抗压强度降低幅度更大。CNTs-0.10在冻融循环50、100、150、200次后，抗折强度损失率分别为6.80%、14.50%、23.20%、34.80%；抗压强度损失率分别为4.50%、10.10%、17.20%、25.40%。CNTs-0.10/PP-0.15在冻融循环50、100、150、200次后，抗折强度损失率分别为4.20%、9.60%、16.20%、24.30%；抗压强度损失率分别为3.30%、6.90%、10.20%、18.50%。经过冻融循环后，抗折强度损失幅度比抗压强度大，其原因在于抗折强度对基体内部缺陷更敏感。

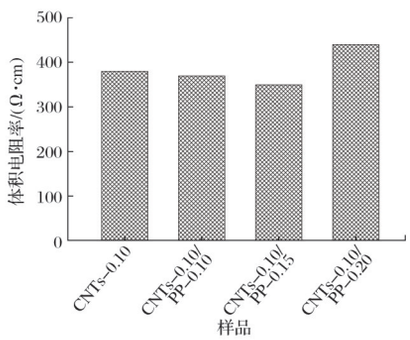
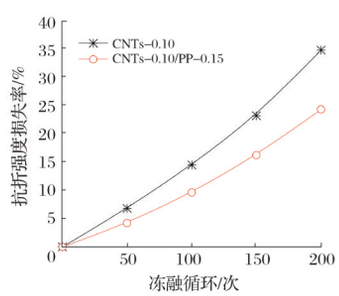
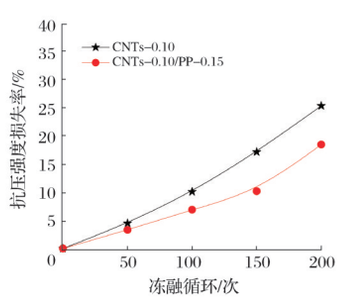


图7 复掺CNTs和PP纤维的CBC的体积电阻率

Fig.7 Volume resistivity of CBC doped with CNTs and PP fibers



(a) 抗折强度损失率



(b) 抗压强度损失率

图8 冻融循环后CBC的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of CBC after freeze-thaw cycles

图9为冻融循环后CBC的体积电阻率。从图9可以看出，随着冻融循环次数的增加，CBC的体积电阻率不断升高，与CNTs-0.10/PP-0.15相比，CNTs-0.10的体积电阻率升高幅度更大。CNTs-0.10%在冻融循环50、100、150、200次后，体积电阻率分别为450、540、780、1 120 Ω·cm。CNTs-0.10/PP-0.15在冻融循环50、100、150、200次后，体积电阻率分别为350、400、580、690 Ω·cm。结果表明：在冻融循环后，PP纤维能够显著增强CBC的力学性能和电学性能。其原因在于在冻融循环过程中，CBC内部水分结冰和融冰的过程伴随着体积变化，会对基体内部结构造成损伤，冻融次数越多损伤越大。PP纤维的搭接增强作用提升了复合材料的韧性，提高CBC在冻融循环下的变形能力，抑制基体在冻融过程中的破坏[24-26]。CNTs主要提高基体界面性能，在冻融过程中，基体体积膨胀，此时CNTs对抑制基体变形作用受限，因此CNTs-0.10的耐冻融性能较弱。加入PP纤维后，CBC的孔隙率更低，能够抑制水分进入基体，因此CNTs-0.10/PP-0.15的抗冻融性能更强。

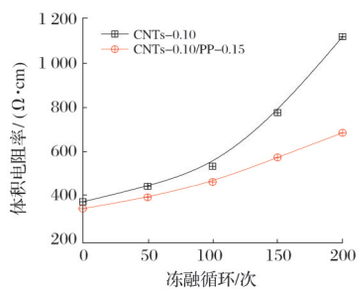
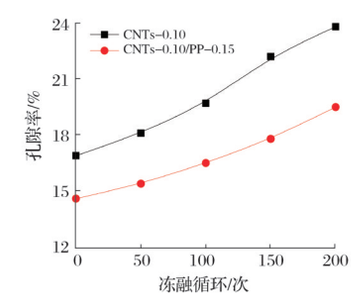


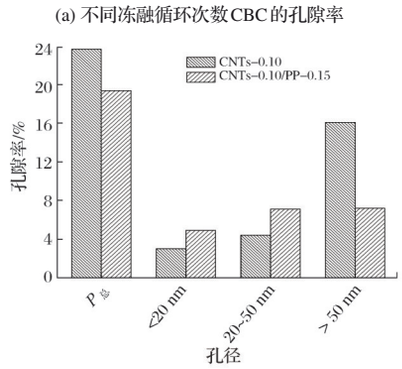
图9 冻融循环后CBC的体积电阻率

Fig.9 Volume resistivity of CBC after freeze-thaw cycles

图10为冻融循环后CBC的孔隙率。从图10可以看出，相同冻融循环次数下，CNTs-0.10/PP-0.15的孔隙率更小，随着冻融循环次数增加，孔隙率增长更缓慢。CNTs-0.10/PP-0.15的$P_{总}$更小且无害孔隙更多，说明经过200次冻融循环后，CNTs-0.10/PP-0.15的结构致密性和完整性更好。



(a) 不同冻融循环次数CBC的孔隙率



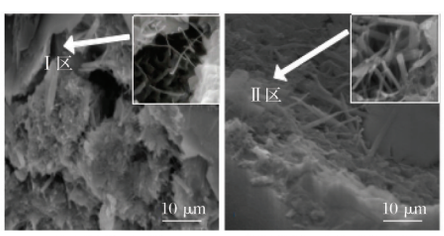
(b) 冻融循环200次CBC的孔隙率

图10 冻融循环后CBC的孔隙率

Fig.10 Porosity of CBC after freeze-thaw cycles

图11为冻融循环200次后CBC的SEM照片。从图11可以看出，CNTs-0.10的微观结构出现明显裂纹和孔洞，基

体冻融后出现膨胀破坏。I区显示，CNTs分布在裂纹和孔洞中，但是由于搭接力不够，部分被拔出，这些裂纹和孔洞破坏了连续的导电网络和完整的复合体系，因此力学性能和导电性能显著下降。与CNTs-0.10相比，CNTs-0.10/PP-0.15微观结构完整性和密实性更好，基体破坏程度较小，无明显裂纹，只出现少量小孔隙。II区显示，PP纤维相互搭接，布满孔隙。这说明PP纤维能够较好地保持基体冻融后的结构完整性，CNTs-0.10/PP-0.15力学性能和导电性能降低幅度更小。综合力学性能与电学性能，能够确定CBC最优增强配比为复掺0.10% CNTs与0.15% PP纤维，此时CBC的抗折强度和抗压强度最高，体积电阻率最低，冻融循环后力学性能和导电稳定性最优。



(a) CNTs–0.10 (b) CNTs–0.10/PP–0.15

图11 冻融循环200次后CBC的SEM照片

Fig.11 SEM images of CBC after 200 freeze-thaw cycles

3 结论

在普通水泥材料中掺入CNTs和PP纤维，制得CBC。单独掺入CNTs后，CBC的孔隙率先减小后增大；力学性能先升高后降低；体积电阻率先降低后趋于稳定。这说明单掺CNTs能够提高CBC的力学性能和导电性能，其中CNTs-0.10的综合性能最佳。复掺CNTs与PP纤维具有显著的协同增强效应，在维持良好导电性能的基础上，不仅能够提高CBC力学性能，还能够显著提高冻融后CBC的力学和电学性能的稳定性。随着PP纤维掺量的增加，CBC孔隙率先减小后增大，力学性能先升高后降低，其中CNTs-0.10/PP-0.15的综合性能最佳。与CNTs-0.10相比，CNTs-0.10/PP-0.15的抗折强度损失率、抗压强度损失率及体积电阻率均显著降低，抗冻融性能更强。本研究突破单一增强体系的性能局限，为制备兼具高力学性能与导电功能的CBC提供新方案。

参考文献

[1] 赵邦渝, 汪伟松, 旷文涛, 等. 不同种类导电相材料对混凝土性能的影响研究综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(4): 31-36, 41.
[2] 曹婷. 碳纤维不同掺量对混凝土导电性能的影响分析[J]. 合成纤维, 2024, 53(5): 76-78.
[3] 李坤鹏, 黄正财, 白星星, 等. 东庄水利枢纽工程硫酸盐化学腐蚀环境下水泥原材料选取[J]. 智能城市, 2024, 10(8): 69-72.
[4] 司秀勇, 高青宇, 潘慧敏, 等. 环境和疲劳荷载作用下开裂混凝土寿命预测研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1): 1-15.
[5] 马豪达, 白银, 陈波, 等. 水胶比和橡胶掺量对砂浆力学性能及能量演化规律的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(1): 194-200.
[6] 冯治国. 碳纤维导电混凝土在机场除冰雪的优势[J]. 江苏航空, 2024(3): 37-38.
[7] 张九思, 朱珊, 李婧铭, 等. 不同种类导电相材料在混凝土损伤检测领域的应用前景分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 1744-1747.
[8] 杨阳, 崔彦. 秸秆纤维对混凝土复合材料抗冻性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 75-77.
[9] 俎琪, 肖东, 彭德坤, 等. 聚丙烯-钢纤维混凝土蠕变特性的温度-荷载耦合效应[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 71-76.
[10] 于皓皓. 建筑混凝土疲劳寿命智能预测模型设计[J]. 混凝土, 2025(2): 167-171.
[11] 李向阳, 李雪峰. 低气压环境对引气混凝土孔隙结构特征及抗冻性能影响[J]. 公路交通科技, 2025, 42(8): 103-109.
[12] 虞洋, 何羽茜, 张娟, 等. 混杂纤维增强超高性能混凝土高温后性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 68-72.
[13] 刘云鹏, 李浩义, 李乐, 等. 用于光伏板静电除尘的单壁碳纳米管透明导电薄膜老化性能研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 864-877.
[14] 张文徽, 王锦, 韩俊峰, 等. 微量碳纳米管构建导电弹性体及其温度传感性能[J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43(1): 112-116.
[15] 马雅玲, 吴明生. 碳纳米管对羧基丁腈胶乳胶膜拉伸性能和导电性能的影响[J]. 橡胶工业, 2025, 72(5): 347-350.
[16] 马强, 杨鹏飞, 陈伟. 多壁碳纳米管分散性及其对砂浆力学性能影响研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(9): 94-97.
[17] 卯爱军. 基于GO与MWCNTs改性地聚合物砂浆的设计及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2024.
[18] 庄伟, 孙敏. 碳纳米管混凝土传感器的稳定性研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2023, 36(1): 51-56.
[19] 戴志辉, 谈彬彬, 朱敏涛. CNT/GO对高性能导电混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(4): 1-4.
[20] 张驰宇, 孙敏. 碳纳米管智能传感器压敏性能研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2024, 37(4): 53-58.
[21] 张立卿, 肖振荣, 许开成, 等. 单掺/复掺碳纳米管和纳米二氧化钛硫铝酸盐水泥复合材料力学与自感知性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2048-2061.
[22] 顾非, 李琮琦, 杨滢, 等. 聚丙烯纤维增强陶粒混凝土基本力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(10): 3572-3584.
[23] 张婷, 邱正, 苑丁杰. 纤维增强再生混凝土力学性能研究进展[J]. 四川水泥, 2024(9): 4-7.
[24] 苏小陆, 李威威. 聚丙烯纤维对高强混凝土流变性能和力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(5): 98-100.
[25] 贾毅, 赵强, 韦朝宽, 等. 聚丙烯纤维增强水泥基复合材料单轴拉伸损伤本构模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 4061-4071.
[26] 覃源, 胡守彬, 周恒, 等. 聚丙烯纤维对再生砂浆力学性能及微观结构的影响[J]. 功能材料, 2025, 56(7): 7189-7199.
[27] 赵燕茹, 姚波, 魏迪, 等. 石墨类导电混凝土电阻率及导电机理分析[J]. 功能材料, 2024, 55(3): 3150-3158.
[28] 范宝宝. 碳纳米管改性混凝土的应力应变与动态强度研究[J]. 合成纤维, 2025, 54(1): 86-90.
[29] 王伟. 碳纳米管对固废混凝土力学性能及微观结构的影响研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(10): 113-116.