



回收碳纤维对混凝土电热性能的影响

王艳 李文俊 李奥阳 孙琳琳 郭冰冰

Effect of recycled carbon fiber on the electrothermal properties of concrete

WANG Yan, LI Wenjun, LI Aoyang, SUN Linlin, GUO Bingbing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240324.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚吡咯/碳纤维纸电热复合材料的制备及性能

Preparation and properties of polypyrrole/carbon fiber paper electrothermal composites

复合材料学报. 2020, 37(6): 1426–1433 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191021.002>

电场诱导多壁碳纳米管有序排列对多壁碳纳米管/环氧树脂复合材料性能的影响

Effect of aligned multiwalled carbon nanotubes induced by electric field on properties of multiwalled carbon nanotubes/epoxy resin composites

复合材料学报. 2018, 35(9): 2387–2396 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171207.002>

超薄预浸料对碳纤维/环氧树脂复合材料导电性能的影响

Effect of ultra-thin prepreg on conductive properties of carbon fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(3): 539–545 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190527.002>

玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验

Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber–carbon fiber/slag concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190930.001>

基于介电性能研究碳纤维/环氧复合材料单向板电热作用机制

Electro-thermal influencing mechanism of carbon fiber/epoxy unidirectional laminated composites based on dielectric properties

复合材料学报. 2017, 34(2): 270–277 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160418.003>

纬编双轴向织物/环氧树脂电加热复合材料电热及层间剪切性能

Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial fabric/epoxy resin electrically heated composites

复合材料学报. 2020, 37(8): 1997–2004 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191129.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240324.001

回收碳纤维对混凝土电热性能的影响



分享本文

王艳^{*1,3}, 李文俊¹, 李奥阳¹, 孙琳琳¹, 郭冰冰^{2,3}

(1. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;

3. 西安建筑科技大学 绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055)

摘要: 碳纤维在生产使用过程中会产生大量的废弃料, 将回收碳纤维(Recycle carbon fiber, RCF)掺入混凝土中既能减少RCF对环境造成的污染, 又能实现高利用价值。本文研究了回收碳纤维混凝土(Recycle carbon fiber concrete, RCFC)在不同RCF掺量下的力学性能、导电性能和电热性能。结果表明, 随RCF掺量的增加, RCFC抗压强度降低, 但抗折强度略有提升, 而电阻率明显下降, 最大降幅为99.11%。通电一定时间后, RCFC的热传导效果显著, 且升温速率随着RCF掺量、输入电压的增加而增大。当环境温度为20℃、-10℃、-30℃时, 能使RCFC产生电热性能的最小纤维掺量分别为1.0vol%、1.5vol%、2.0vol%, 所对应的最高升温速率分别是2.267℃/min、2.525℃/min和1.45℃/min。

关键词: 回收碳纤维混凝土; 力学性能; 导电性能; 电热性能; 传热机制

中图分类号: TU528.582; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)12-6664-10

Effect of recycled carbon fiber on the electrothermal properties of concrete

WANG Yan^{*1,3}, LI Wenjun¹, LI Aoyang¹, SUN Linlin¹, GUO Bingbing^{2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. State Key Laboratory of Green Building, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Carbon fiber in the production and use of the process will produce a large number of waste materials, the recycled carbon fiber (RCF) into the concrete can reduce the pollution caused by RCF to the environment, but also to achieve a high value of utilization. In this paper, the mechanical properties, electrical conductivity and electro-thermal properties of recycle carbon fiber concrete (RCFC) were investigated under different RCF mixing amounts. The results showed that with the increase of RCF dosage, the compressive strength of RCFC decreased, but the flexural strength slightly increased, while the electrical resistivity decreased significantly, with a maximum decrease of 99.11%. After a certain time of energization, the heat conduction effect of RCFC is significant, and the warming rate increases with the increase of RCF doping and input voltage. When the ambient temperature is 20℃, -10℃ and -30℃, the minimum fiber doping amount that can make RCFC produce electrical and thermal performance is 1.0vol%, 1.5vol% and 2.0vol%, respectively, and the corresponding maximum temperature rise rate is 2.267℃/min, 2.525℃/min and 1.45℃/min, respectively.

Keywords: recycled carbon fiber concrete; mechanical property; electrically conducting properties; electro-thermal performance; heat transfer mechanism

据统计, 我国70%以上的公路会受到冬季低温天气影响^[1], 路面覆冰会对人们的日常交通出

行带来严重威胁。研究表明^[2]路面、桥面覆冰造成公路交通事故占冬季总交通事故的30%以上,

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-03-06; 录用日期: 2024-03-13; 网络首发时间: 2024-03-26 20:12:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240324.001>

基金项目: 国家自然科学基金(52078414); 陕西省自然科学基金(2020JM-469)

National Natural Science Foundation of China (52078414); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM-469)

通信作者: 王艳, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为混凝土结构耐久性、智能材料及结构系统 E-mail: wangyanw@126.com

引用格式: 王艳, 李文俊, 李奥阳, 等. 回收碳纤维对混凝土电热性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6664-6673.

WANG Yan, LI Wenjun, LI Aoyang, et al. Effect of recycled carbon fiber on the electrothermal properties of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(12): 6664-6673(in Chinese).

机场覆冰造成的飞机飞行事故占总航空事故的 25% 以上。由此可见，去除路面覆冰是提高冬季出行安全性的必要措施。

目前常用的除冰方法包括人工除冰、机械除冰和化学盐除冰等，其中人工除冰效率较低，机械除冰容易对路面造成损伤^[3]，化学盐除冰价格较高，且易腐蚀损坏路面，降低服役寿命。以上均属于“被动式”除冰，存在除冰效率滞后，残冰率高，容易对路面造成破坏等缺点^[4]，因此寻找一种高效、经济、环保的“主动式”除冰方法迫在眉睫。

混凝土通过掺入导电填料(钢纤维、石墨烯、碳纤维等)可赋予其良好的导电性能，持续通电后自身可产生一定的热量，因此可将导电混凝土应用于路面面层，来实现主动除冰的目的。陈洋臣^[5]将钢纤维掺入混凝土中，可使混凝土在 50 V 输入电压下升温至 45℃。宁涛^[6]探究了石墨烯复相导电混凝土的电热性能，当石墨烯掺量为 1.0wt% 时，可使混凝土导热系数达到 3.7 W/(m·K)，2 h 内可融化 21 cm 的雪层。魏建强^[7]进行了低温下碳纤维混凝土的升温试验，通入 36 V 电压可使混凝土在 180 min 内从 -25℃ 上升至 57.3℃。谭忆秋等^[1]对碳纤维、钢纤维、石墨、炭黑等导电填料掺入混凝土后的电热性能进行对比，结果表明碳纤维具有更加良好的电热性能和长期稳定性。支雁飞等^[8]的研究也同样证明了碳纤维混凝土用于路面除冰，具有良好的升温效果，能适应更复杂环境。但碳纤维集中应用于航空航天、风力发电、汽车制造等先进领域，在普通工程中应用相对较少，同时高昂的价格也制约了碳纤维混凝土的发展。

随着各领域对碳纤维的需求量增加，碳纤维复合材料在生产过程中会有大量的产品淘汰，淘汰率高达 20%~30%^[9]。这些在生产过程中淘汰下来的碳纤维可达到原始碳纤维 85%~90% 的性能^[10]，并且能节约 40% 成本。然而，现有文献指出回收碳纤维的处理方式存在污染大、能耗高、无法大量处理等问题^[11]，这制约了回收碳纤维的高二次利用价值。

本课题组对回收碳纤维的应用也做了相关研究，探究了回收碳纤维掺入混凝土^[12]与高强水泥基材料^[13]中力学性能与导电性能的影响规律，并深入分析导电机制。

经过上述研究表明，回收碳纤维在建筑领域

具有较高的二次利用价值，但目前对回收碳纤维混凝土电热性能的相关研究较少，想应用于实际工程仍存在较多难题：RCFC 导电与发热之间关系亟待深入研究；纤维掺量、输入电压、环境温度对升温速率的影响尚未明确；能使 RCFC 发热的纤维掺量与传热机制有待探究。

基于此，本文针对生产过程中的碳纤维废弃料进行机械回收后，将其掺入混凝土中，研究不同回收碳纤维(Recycle carbon fiber, RCF)掺量下对混凝土力学性能与导电性能的影响规律，以及不同输入电压、环境温度下 RCFC 的电热性能与升温速率，探究升温速率与纤维掺量之间的关系，并分析传热机制，以期为实际路面工程融雪化冰提供参考依据。

1 试验

1.1 试验概况

以回收碳纤维混凝土(Recycle carbon fiber concrete, RCFC)的导电性能为基础，探究 RCF 掺量(0vol%、0.5vol%、1.0vol%、1.5vol%、2.0vol%、2.5vol%)对混凝土的抗压、抗折强度与电阻率的影响，进一步对 RCFC 的电热性能进行研究，探究不同输入电压(10 V、20 V、30 V)、外界环境温度(20℃、-10℃、-30℃)对混凝土电热性能的影响规律，计算升温速率并分析不同环境温度下能使混凝土温度升高的最小 RCF 掺量，分析传热机制。

1.2 RCF 性能

本文所用 RCF 为盐城市翔盛碳纤维科技有限公司在碳纤维复合材料生产过程中的废弃料，经过机械加工而成(图 1(a))^[14]。原始碳纤维(Virgin carbon fiber, VCF)为日本东丽公司生产的高性能碳纤维(图 1(b))。RCF、VCF 长度为 10 mm，单丝直径 7 μm，纤维尺寸大致相同。



(a) RCF^[14]

(b) VCF

图 1 回收碳纤维(RCF)与原始碳纤维(VCF)外观

Fig. 1 Recycle carbon fiber (RCF) and virgin carbon fiber (VCF) appearance

RCF 与 VCF 的分散性能和表面微观形貌如图 2、图 3 所示。RCF 为浸渍少量上浆剂后的废弃

料经机械加工而成，在水中不易分散，与 VCF 相比表面更为光滑，通过 SEM 观察 RCF 表面无明显沟壑，但部分纤维在回收过程中存在损伤。

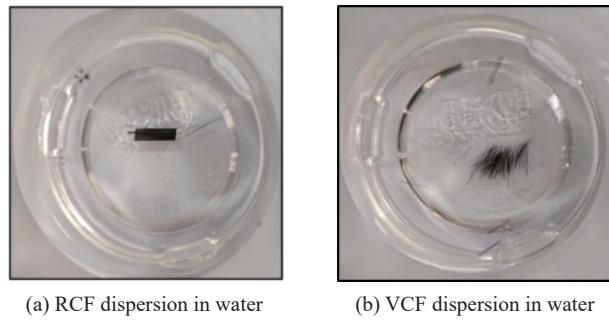


Fig. 2 Dispersion properties of RCF and VCF in water

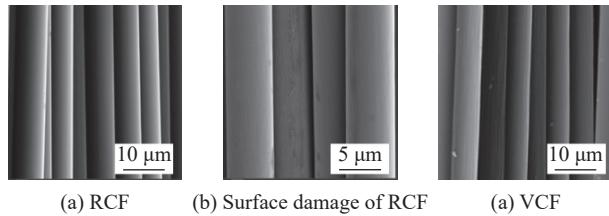


Fig. 3 Micro-morphology of RCF and VCF under SEM

通过对纤维 EDS 图谱进行分析（图 4、图 5），其主要组成元素都为 C、N、O，其中 C 为碳纤维基本组成元素，并含有少量 N、O 元素，但 RCF 存在 Si 元素，这是由于在生产过程中常用硅烷偶联剂来增强复合材料之间的粘结性能^[15]。

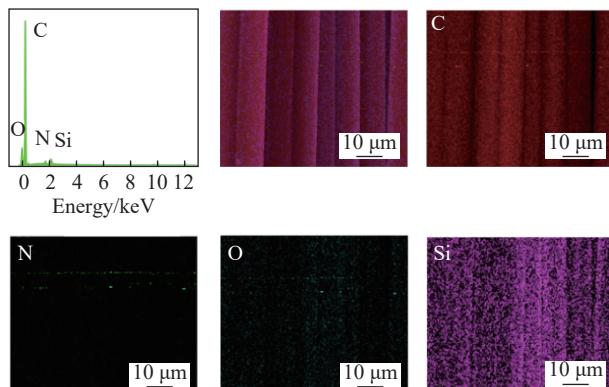


Fig. 4 EDS spectrum of RCF

1.3 试验原材料及试件制备

水泥为海螺牌 P·O 42.5，化学成分如表 1 所示。砂子为 0~4.75 mm 的河砂，细度模数 2.43，表观密度 2.630 g/cm³，堆积密度 1.47 g/cm³。粗骨料为

粒径为 5~10 mm 的碎石，表观密度 2.82 g/cm³，堆积密度 1.43 g/cm³。分散剂选用山东优索化工科技有限公司生产的羧甲基纤维素，减水剂为上海臣启化工科技有限公司生产的高效聚羧酸减水剂，减水率为 30%。

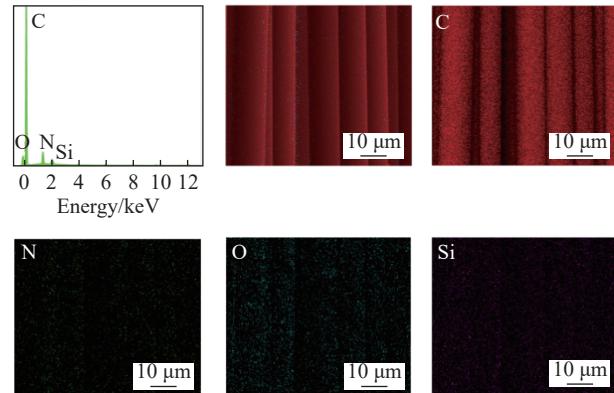


Fig. 5 EDS spectrum of VCF

表 1 水泥化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of cement (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Else
19.05	4.64	3.71	58.28	2.45	3.92	1.11	0.28	0.31	6.25

水泥起到纤维与骨料之间的粘结作用，掺量较少无法保证混凝土的和易性和纤维的分散性，故在预实验的基础上适当增加水泥占比^[14] 来保证纤维均匀分散。确定 RCFC 配合比为：水泥 550 kg/m³、砂石分别为 550 kg/m³、1 100 kg/m³、水胶比为 0.50，分散剂和减水剂掺量均为水泥质量的 1.0%。

试件制备过程如下：首先按照配合比称取材料用量，为进一步提高纤维在混凝土中的分散性，提前将 RCF 与水、分散剂搅拌成分散液备用，然后加粗细骨料搅拌均匀^[16]，再将分散液、水泥、减水剂依次倒入其中，搅拌完成后测试其坍落度，RCF 掺量为 0vol%~2.5vol% 时，其坍落度分别为 194 mm、177 mm、168 mm、153 mm、136 mm、102 mm，满足成型要求。坍落度测试结束后装入模具，24 h 后进行脱模，并放入标准养护室养护 28 d。

1.4 试验方法

力学性能试验，根据 GB/T 50081—2019^[17]《混凝土物理力学性能试验方法标准》测定 RCFC 抗压强度与抗折强度，抗压强度试验仪器

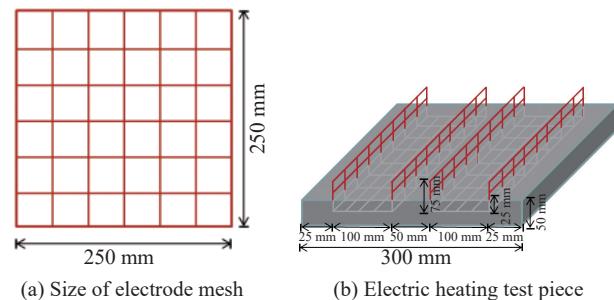
为浙江礼显试验仪器制造有限公司型号为 YAW-2000 的电液伺服压力机，试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm，加载速率为 0.5 MPa/s。抗折强度试验仪器为陕西力源仪器设备检测有限公司型号为 CMT5105-100 的电子万能试验机，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，加载速率 0.05 MPa/s。抗压与抗折强度测试结果均取 3 个试件的测试值算数平均值作为该组试件的强度。

导电性能试验，本文采用四电极法测量混凝土电阻率，四电极法可以有效降低混凝土与电极片之间的接触电阻^[18]，使电阻率测量更为精准。试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，电极片采用 0.8 mm×15 mm×120 mm 紫铜片，电源采用 A-BF 直流稳压电源。测量时通入 10 V 电压，用万用表读出电极两端电压，电源读出通电电流。根据公式(1)计算电阻率，电阻率取 3 个试件测试值的算术平均数作为试验结果。

$$\rho = \frac{US}{IL} \quad (1)$$

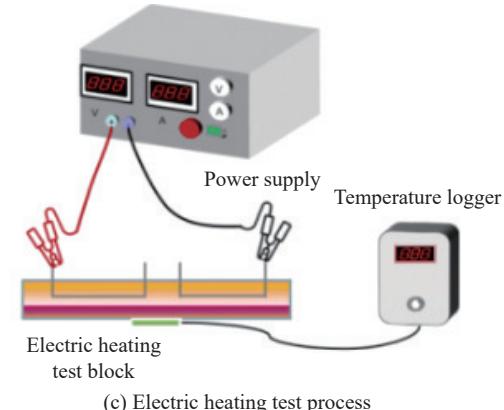
式中： U 为试块两端电压(V)； I 为通过试块的电流(A)； ρ 为试件的电阻率($\Omega\cdot\text{m}$)； S 为电极片与混凝土接触面积(m^2)； L 为试件内两侧电极间距(m)。

电热性能试验，为保持通电电压稳定，电源采用 A-BF 直流稳压电源，温度计为精创 RC-4 温度记录仪(量程 -30~90℃，精度 0.1℃)，电极网丝径为 0.4 mm，尺寸为 250 mm×250 mm 的不锈钢网(图 6(a))，电极网两边向上折叠 75 mm，埋置深度为 25 mm(图 6(b))。试件尺寸为 50 mm×300 mm×300 mm。为避免成型面粗糙对试验影响，试验时



(a) Size of electrode mesh

(b) Electric heating test piece



(c) Electric heating test process

图 6 电热升温试验

Fig. 6 Electrothermal heating test

将温度记录仪探针固定在 RCFC 板成型面下侧中心位置，通电后记录温度变化，若达到温度记录仪量程后手动停止，每个试件进行 3 次试验取平均值作为最终结果，试验流程见图 6(c)。

2 结果与讨论

2.1 RCFC 力学与导电性能

RCFC 在 28 d 时的抗压强度与抗折强度如图 7(a) 所示。由图可知，随着 RCF 掺量的增加，

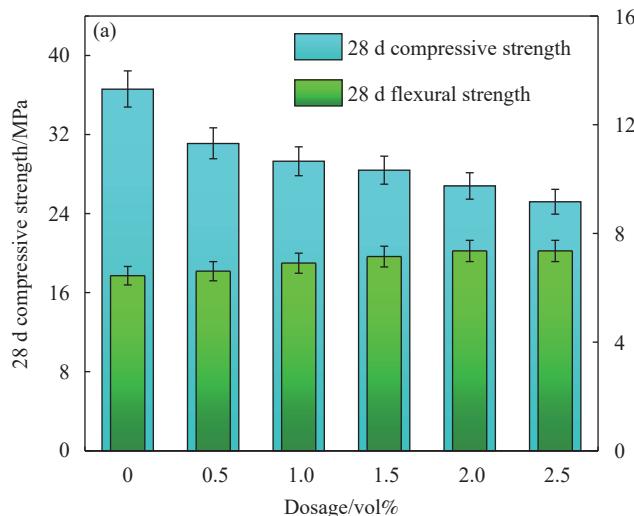
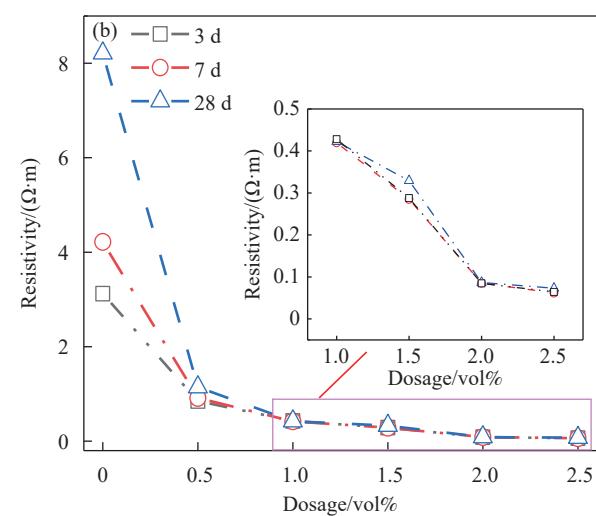


图 7 回收碳纤维混凝土(RCFC)力学和导电性能

Fig. 7 Mechanical and electrical properties of recycle carbon fiber concrete (RCFC)



RCFC 的抗压强度下降幅度为 15.0%~31.14%。RCFC 的抗压强度随着 RCF 摊量增加而持续下降, 这是由于过多的纤维摊量在混凝土搅拌成型时会带入孔隙, 生成较多的薄弱结点, 同时 RCF 光滑的表面会削弱与混凝土间的界面黏结力, 导致混凝土抗压强度下降^[19]。

RCF 摊入后会使混凝土抗折强度提高, 最大增幅约为 14.1%。原因是 RCF 具有较高的拉伸模量, 当混凝土承受荷载时, 基体产生微小裂缝, 此时纤维在裂缝两端可有效阻止裂缝发展, 起到抑制作用, 延缓贯穿式裂缝生成, 使混凝土抗折强度提高。但当 RCF 摊量达到 2.0vol% 后, 对抗折强度提升不明显, 这是由于 RCF 表面较为光滑, 当 RCF 摊量过高时, 纤维间距变小, 粘结较差^[20]。

RCFC 的电阻率随龄期、纤维摊量变化如图 7(b) 所示。当 RCF 摊量为 0vol% 时, RCFC 的电阻率随着养护龄期增加而变大, 但掺入 RCF 后, 混凝土 3 d、7 d、28 d 的电阻率变化较小。这是由于未掺入 RCF 时混凝土的导电性能由内部基体决定, 导电方式为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 等离子在孔溶液中通过自由水移动来导电或者依靠凝胶体、凝胶水来导电^[12]。掺入 RCF 后, RCF 在混凝土内部搭接形成导电通路, 此时混凝土内部的导电方式由离子导电转向纤维导电。但需要注意的是, 随着水化反应进行, 水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等水化产物包裹在纤维表面, 会对电子传输造成影响, 但当纤维在混凝土内部搭接已经形成导电网络^[21], 电子通过导电网络进行移动, 即使表面覆盖水化产物也不会影响电子在纤维内部的移动^[22]。

随着 RCF 摊量的增加, 混凝土的电阻率不断降低。RCF 摊入后在混凝土内部搭接(图 8), 形成导电网络, 使混凝土电阻率大幅下降。当 RCF 摊

量从 0.5vol% 提升到 2.5vol% 其电阻率下降幅度为 86.09%~99.1%。以 28 d 为例, 当 RCF 摊量为 0.5vol% 时, 混凝土电阻率有了大幅下降, 降幅为 86.09%, RCF 的掺入改变了原有的导电方式, 从离子导电转变为纤维网络导电, 但纤维摊量较少, 纤维间距较大且互相搭接较少, 继续增加纤维摊量到 1.0vol% 后混凝土电阻率降幅为 94.9%, 纤维网络搭接增多, RCF 摊量 $\geq 1.0\text{vol}\%$ 时, 混凝土的电阻率随纤维摊量的增加仍会降低, 但不会使混凝土电阻率产生数量级的变化, 意味着导电网络已形成, 达到混凝土导电阈值^[23]。

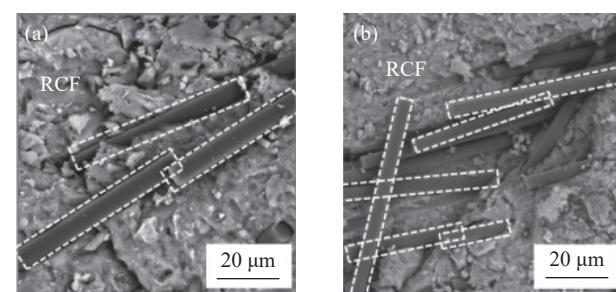


图 8 RCFC 内部搭接

Fig. 8 RCFC internal lap joint

2.2 RCFC 电热性能

2.2.1 20℃ 下 RCFC 电热性能

图 9 为 20℃ 下 RCFC 的电热升温曲线。RCFC 的电热升温速率随着 RCF 摊量的增加而加快。以 10 V 电压通电 120 min 为例, 当 RCF 摊量 $< 1.0\text{vol}\%$ 时, 混凝土温度无变化, 提高摊量至 1.0vol% 和 1.5vol% 后, 混凝土最终可升温至 54.2℃、75.2℃, 继续提高摊量到 2.0vol%、2.5vol% 的混凝土可升温至 90℃, 且所需时间仅为 70 min 和 60 min, 升温速率大幅提高。当输入电压从 10 V 增大到 30 V, RCF 摊量 $\geq 1.0\text{vol}\%$ 的混凝土均能升温至 90℃, 所

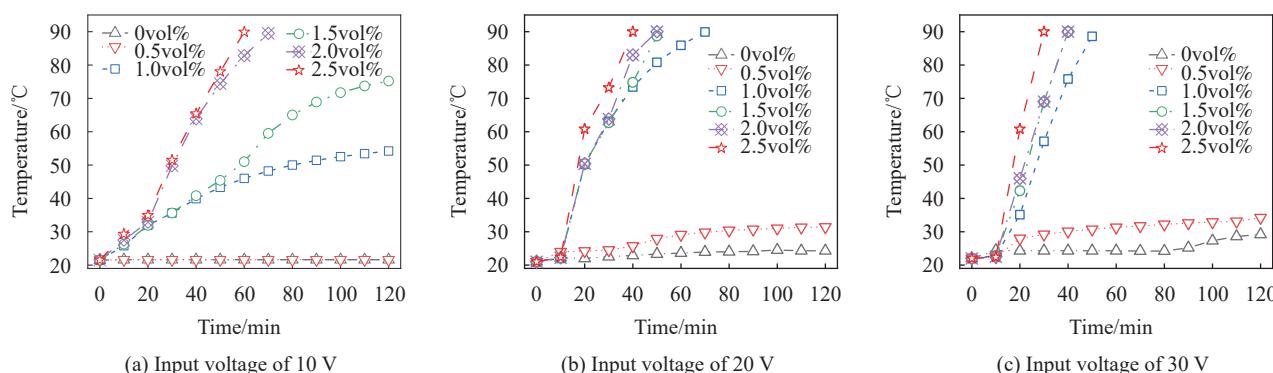


图 9 20℃ 下 RCFC 的电热性能

Fig. 9 Electrical and thermal performance of RCFC at 20℃

需时间分别为 50 min、40 min、40 min、30 min。RCF掺量和输入电压的提高可以有效提高混凝土的电热性能的原因是：(1) RCF在混凝土内部为纤维间相互搭接和纤维间未搭接两种状态，未搭接的纤维无电流通过，无法产生电热效应；(2)纤维掺量较低时，未搭接的纤维较多，通电后无电流通过，无法发热。当纤维掺量提升后，纤维搭接率提高，发热量大幅提高^[24]；(3)当电流通过RCF时，电子在其内部移动，与RCF内的原子或分子相互作用，发生振动或碰撞产生热量。电压升高后，流经RCF的电流增大，电子移动速率增大，碰撞速率上升，发热量增多^[25]。

2.2.2 -10℃与-30℃下RCFC电热性能

图10、图11为-10℃、-30℃下RCFC的电热升温曲线。当环境温度为-10℃，纤维掺量≤1.0vol%时，通入电压后混凝土表面温度不变。RCF掺量

为1.5vol%时，通电后才能使混凝土表面温度升高，但电热升温速率较20℃相比有了明显降低，在10V、20V、30V电压下分别降低了51.7%、76.4%、66.7%。RCF掺量为2.0vol%、2.5vol%的混凝土在-10℃仍具有较好的升温效果，在各输入电压下均可升温至90℃，升温速率随着电压增大而变快。RCF掺量为2.5vol%时升温效果最好，通入不同电压后，可在60 min、40 min、40 min使混凝土升温至90℃。

当环境温度降低到-30℃，RCFC的升温效果大幅下降，通电后RCF掺量≤1.0vol%的混凝土表面温度无明显变化波动。在30V电压下，2.0vol%的RCFC通电120 min后升温至82℃，2.5vol%的RCFC可在80 min升温至90℃，升温速率较20℃、-10℃有了大幅降低。基于上述分析可知，外界温度降低需要提高RCF掺量来使混凝土发热。

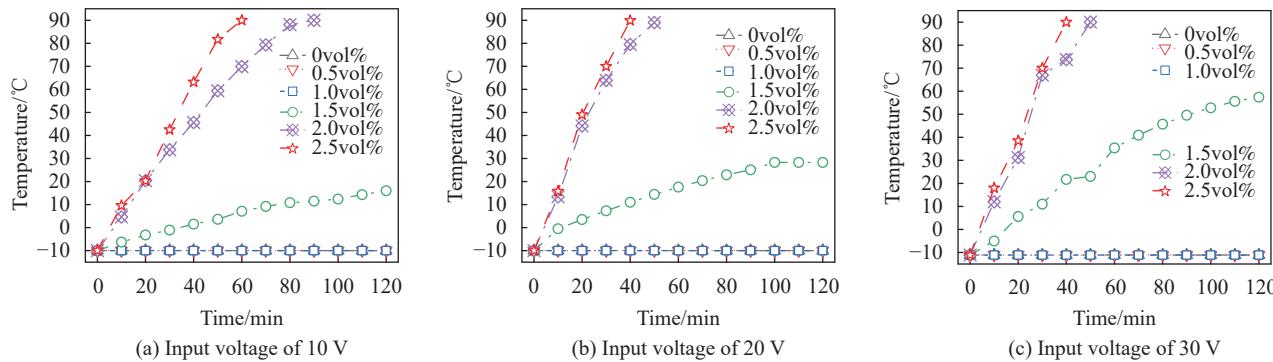


图10 -10℃下RCFC的电热性能

Fig. 10 Electrical and thermal performance of RCFC at -10°C

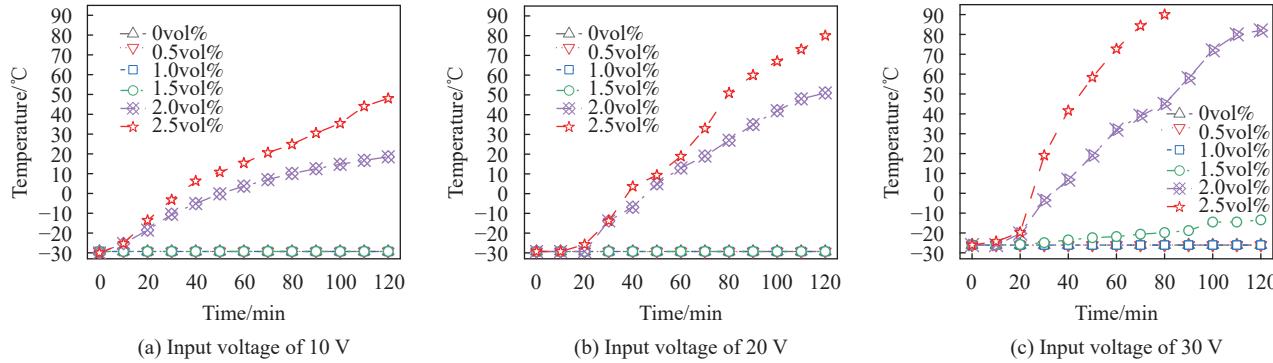


图11 -30℃下RCFC的电热性能

Fig. 11 Electrical and thermal performance of RCFC at -30°C

Gwon等^[26]探究了炭黑和碳纤维复掺后水泥基复合材料的电热性能，通电后最高可使水泥基复合材料最高升温达77℃。李卓球团队^[24]研究了碳纤维混凝土板的电热性能，碳纤维掺量为

1.85vol%时，通电300 min后，表面温度从10℃上升至60℃。魏建强^[7]将碳纤维(0.5vol%)掺入混凝土中进行-25℃下的升温试验，发现通入36V电压，180 min内可从-25℃上升至57.3℃。以本

文 -30°C 的试验环境温度为例，输入30V电压、通电120 min后，可使RCF掺量为2.0vol%的混凝土板升温至82℃。相较于上述研究结果，本文使用的回收碳纤维同样能使混凝土具备良好的电热性能。然而，相较于碳纤维，以及更低的环境温度，需提高回收碳纤维的掺量以满足混凝土电热性能的要求。

2.2.3 RCFC传热机制

热量的传递主要包括3个方式：热传导、热对流和热辐射^[27]。热传导主要在固体间，或同一物体的温差较大两部分间进行的热量传递，基本不发生宏观上的相对位移。热对流发生在气体、液体中，通过物体流动进行热量的传递。热辐射通过辐射的形式进行热量传递。

RCFC的传热机制如图12所示。RCFC包含固、液、气三相体系，热量传递包含了RCF与混凝土基体间的热传导、细小孔隙间的热对流以及高温产生的热辐射，但以热传导为主^[28]，机制如下：当恒定电流经过混凝土内部的RCF后，电子在纤维中做无规则的布朗运动，摩擦产生大量热能，RCF开始发热，然后，RCF温度较高会使分子在基体周围产生剧烈振动并将热量传递到混凝土表面，使其升温。此外，当环境温度较低时，热量传递到混凝土表面后，仍需与周围冷空气进行热对流^[29]，环境温度越低，向周围热对流传递的热量越多，当混凝土表面与周围空气温度热交换达到平衡后，温度保持稳定^[30]，这也是环境温度降低后混凝土电热性能下降的主要原因。

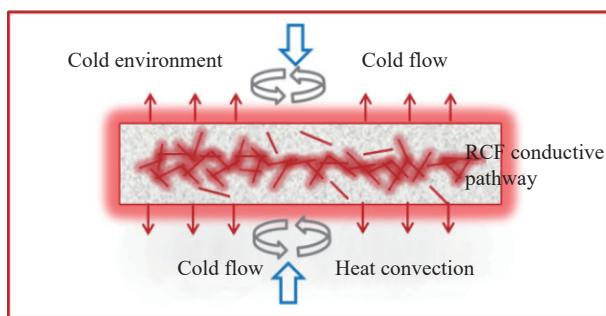


图12 RCFC传热机制

Fig. 12 Heat transfer mechanism of RCFC

2.2.4 RCFC的电热升温速率

混凝土升温速率计算结果如图13、图14、图15所示。RCFC的升温速率随着RCF掺量和输入电压的增大而提高，随着温度降低而减小。当RCF掺量 $< 1.5\text{vol\%}$ 时，电热升温速率随着温度的降低而减缓。RCF掺量 $\geq 2.0\text{vol\%}$ 时， -10°C 下的RCFC电热升温速率大幅提升，且大于 20°C 下对应的升

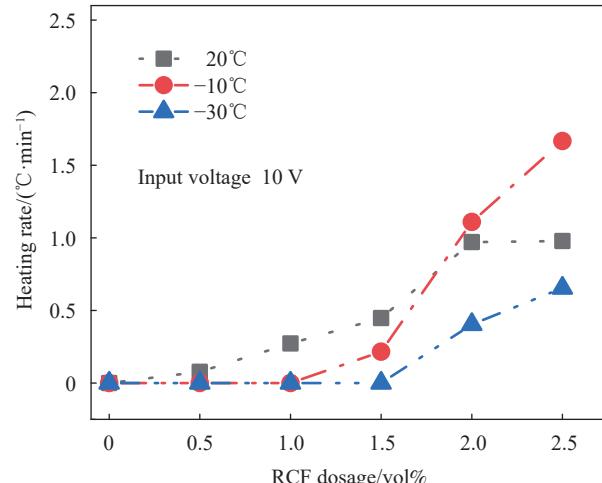


图13 10 V电压下RCFC升温速率

Fig. 13 Heating rate of RCFC at 10 V voltage

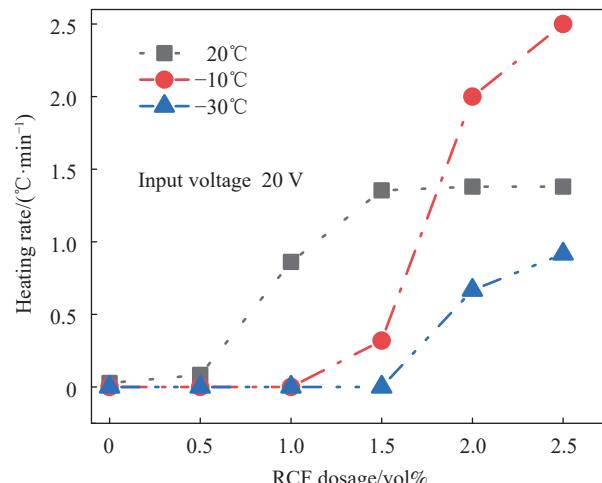


图14 20 V电压下RCFC升温速率

Fig. 14 Heating rate of RCFC at 20 V voltage

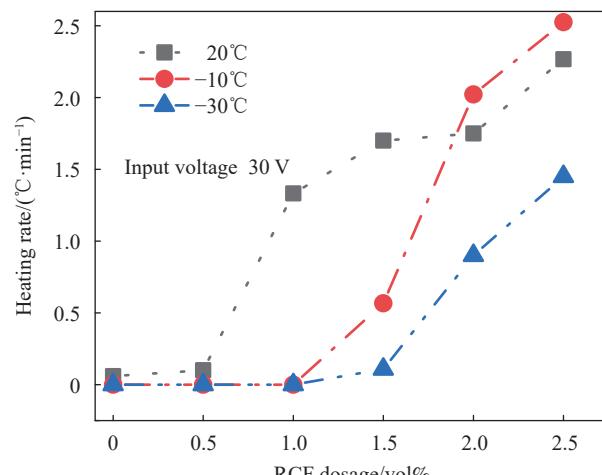


图15 30 V电压下RCFC升温速率

Fig. 15 Heating rate of RCFC at 30 V voltage

温速率。这是由于 RCF 掺量 $\geq 2.0\text{vol\%}$ 后,两个不同环境温度下的 RCFC 均能达到 90°C ,且所需时间接近,但 -10°C 下的 RCFC 升温前后温差较大,因此升温速率更高^[3]。

高纤维掺量下的混凝土对环境温度变化有着更好的适应性,输入 30V 电压, 20°C 、 -10°C 、 -30°C 环境温度下,能使混凝土通电发热的纤维掺量分别为 1.0vol\% 、 1.5vol\% 、 2.0vol\% ,升温速率为 $1.332^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $0.567^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $0.9^\circ\text{C}/\text{min}$ 。因此,可适当提高纤维掺量,通过控制电压和通电时间来面对实际复杂的环境温度变化。

3 结论

(1) 回收碳纤维(RCF)掺入后会使混凝土坍落度和抗压强度下降,但抗折强度提高。RCF可在混凝土内部搭接形成导电网络,使回收碳纤维混凝土(RCFC)的电阻率下降,降幅约为 $86.09\%-99.1\%$ 。

(2) 在环境温度为 20°C ,RCF 掺量为 1.0vol\% 时通电后即可使混凝土发热,环境温度降低后需要增加纤维掺量来使混凝土发热, 20°C 、 -10°C 、 -30°C 下,能使 RCFC 发热的纤维掺量分别为 1.0vol\% 、 1.5vol\% 、 2.0vol\% ,并可通过增大输入电压、延长通电时间来进一步提高升温速率。

(3) RCFC 的传热机制以热传导为主,热对流和热辐射导热效果较弱。环境温度降低后,会增加传递过程中的热量的损失,使混凝土电热升温效果降低。

(4) 本文从 RCF 掺量、环境温度、输入电压、通电时间等多方面探究了混凝土的电热性能。实际工程中可根据环境温度、能耗要求,适当提高纤维掺量,并在使用过程中通过控制输入电压、通电时间来达到路面除冰的需求。

参考文献:

- [1] 谭忆秋,张驰,徐慧宁,等.主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J].中国公路学报,2019,32(4): 1-17.
TAN Yiqiu, ZHANG Chi, XU Huining, et al. Summary of research on the characteristics and road performance of active deicing and snow melting on road surface[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 1-17(in Chinese).
- [2] 郭德栋.基于微波与磁铁耦合效应的融雪除冰路面技术研究[D].西安:长安大学,2011.
GUO Dedong. Research on snow melting and deicing road

technology based on the coupling effect of microwave and magnet[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011(in Chinese).

- [3] LIU K, XU P X, WANG F, et al. The accumulated stress damage and residual life prediction of unreinforced concrete pavement with electric heating pipes[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122258.
- [4] 徐慧宁,谭忆秋,周纯秀,等.太阳能-土壤源热能耦合桥面融雪系统温度分布特性的研究[J].太阳能学报,2012,33(11): 1920-1925.
XU Huining, TAN Yiqiu, ZHOU Chunxiu, et al. Temperature distribution characteristic in solar-ground source coupled snow-melting system for bridge deck[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(11): 1920-1925(in Chinese).
- [5] 陈洋臣.钢纤维石墨导电混凝土电热性能及工程应用研究[D].广州:广州大学,2017.
CHEN Yangchen. Research on the electric heating performance and engineering application of steel fiber graphite conductive concrete[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017(in Chinese).
- [6] 宁涛.严寒环境石墨烯复相导电混凝土的制备及其融雪行为研究[D].常州:常州大学,2022.
NING Tao. Preparation and snow melting behavior of graphene multiphase conductive concrete in severe cold environment[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022(in Chinese).
- [7] 魏建强.低温下碳纤维混凝土电热效应实验[J].西安科技大学学报,2018,38(3): 473-478.
WEI Jianqiang. Experimental study on electric heating effect of carbon fiber reinforced concrete at low temperature[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(3): 473-478(in Chinese).
- [8] 支雁飞,王辉,刘建颖.CFRC 道面板电热效应模拟研究[J].中国民航大学学报,2023,41(5): 42-48.
ZHI Yanfei, WANG Hui, LIU Jianying. Simulation study on electrothermal effect of CFRC pavement slab[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2023, 41(5): 42-48(in Chinese).
- [9] 成焕波,郭立军,周金虎.再生碳纤维回收利用及其增材制造复合材料性能评价[J].机械工程学报,2023,59(7): 375-388.
CHENG Huanbo, GUO Lijun, ZHOU Jinhu, et al. Recycling of carbon fiber and performance evaluation for its reinforced composites made of additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 375-388(in Chinese).
- [10] CHENG H B, WANG H F, ZHOU J H, et al. Performance analysis of recycled carbon fiber under recycling process parameters optimized using response surface methodology[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 57(18): 2857-

- 2872.
- [11] WANG Y, LI A Y, ZHANG S H, et al. A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 367: 130361.
- [12] 王艳, 张彤昕, 郭冰冰, 等. 回收碳纤维混凝土导电性 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2855-2863.
- WANG Yan, ZHANG Tongxin, GUO Bingbing, et al. Conductivity of recycling carbon fiber concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2855-2863(in Chinese).
- [13] 王艳, 全志平, 张少辉. 回收碳纤维对高强水泥基材料力学性能与导电性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1332-1343.
- WANG Yan, QUAN Zhiping, ZHANG Shaohui. Effects of recycled carbon fibers on mechanical property and conductivity of high-strength cement-based material[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(5): 1332-1343(in Chinese).
- [14] 张彤昕. 废弃碳纤维对混凝土力学性能与导电性能影响研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- ZHANG Tongxin. Study on the influence of waste carbon fiber on the mechanical properties and electrical conductivity of concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022(in Chinese).
- [15] 楠顶, 李鑫, 徐宇, 等. 硅烷偶联剂改性氧化石墨烯增强环氧树脂复合涂料的防腐性能 [J]. 化学工业与工程, 2023, 40(6): 130-135.
- NAN Ding, LI Xin, XU Yu, et al. Epoxy resin composite coating with silane coupling agent modified graphene oxide generating effective corrosion protection[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2023, 40(6): 130-135(in Chinese).
- [16] 王振波, 王鹏宇, 孙鹏. 高延性水泥基材料纤维分布及其影响因素研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2284-2295.
- WANG Zhenbo, WANG Pengyu, SUN Peng. Research progress on fiber distribution and influencing factors of high ductility cement-based materials[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 2284-2295(in Chinese).
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [18] 范文茹, 雷建, 董玉珊, 等. 基于四电极法的 CFRP 结构损伤检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 961-968.
- FAN Wenru, LEI Jian, DONG Yushan, et al. Damage detection of CFRP laminate structure based on four-probe method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 961-968(in Chinese).
- [19] 陈宇良, 李堂, 姜锐, 等. 碳纤维再生混凝土复合受剪力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4107-4116.
- CHEN Yuliang, LI Tang, JIANG Rui, et al. Experimental study on the composite shear mechanical properties of carbon fiber reinforced recycled concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4107-4116(in Chinese).
- [20] AKBAR A, KODUR V K R, LIEW K M. Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104069.
- [21] KIM T, LEY T M, KANG S, et al. Using particle composition of fly ash to predict concrete strength and electrical resistivity[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107: 103493.
- [22] XUE J, WANG X M, WANG Z R, et al. Investigations on influencing factors of resistivity measurement for graphite tailings concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 123: 104206.
- [23] 张立卿, 占小静, 韩宝国, 等. 静电自组装碳纳米管/二氧化钛水泥基复合材料的自感知性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(9): 5225-5240.
- ZHANG Liqing, ZHAN Xiaojing, HAN Baoguo, et al. Self-sensing performance of cementitious composites with electrostatic self-assembly carbon nanotube/titanium dioxide[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(9): 5225-5240(in Chinese).
- [24] 唐祖全, 李卓球, 钱觉时. 碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究 [J]. 建筑材料学报, 2004(2): 215-220.
- TANG Zuquan, LI Zhuoqiu, QIAN Jueshi. Research on the application of carbon fiber conductive concrete in road surface deicing and snow removal[J]. *Journal of Building Materials*, 2004(2): 215-220(in Chinese).
- [25] GOMIS J, GALAO O, GOMIS V, et al. Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 442-449.
- [26] GWON S, KIM H, SHIN M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 137: 104942.
- [27] TU J S, WANG Y J, ZHOU M, et al. Heat transfer mechanism of glazed hollow bead insulation concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40: 102629.
- [28] 路鹏程, 毕亚芳, 王志平, 等. 电热作用对碳纤维树脂基复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2223-

- 2229.
- LU Pengcheng, BI Yafang, WANG Zhiping, et al. Effects of electric thermal effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(10): 2223-2229(in Chinese).
- [29] DING S X, DONG S F, WANG X Y , et al. Self-heating ultra-high performance concrete with stainless steel wires for active deicing and snow-melting of transportation infrastructures[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 138: 105005
- [30] UK T K, KYOUNG M K, WOONG J P, et al. Effects of temperature and humidity on self-stress sensing capacity of smart concrete blocks[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 69: 106227.
- [31] 桂尊曜, 蒲云东, 张惠一, 等. 水中可分散型石墨烯对水泥净浆导电、发热及热电性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(11): 6336-6350.
- GUI Zunyao, PU Yundong, ZHANG Huiyi, et al. Effects of dispersible graphene in water on the electrical conductivity, heat generation and thermoelectric properties of cement slurry[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11): 6336-6350(in Chinese).