

回收碳纤维混凝土导电性

王艳 张彤昕 郭冰冰 牛荻涛

Conductivity of recycling carbon fiber concrete

WANG Yan, ZHANG Tongxin, GUO Bingbing, NIU Ditao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚丙烯纤维对混凝土损伤渗透特性的影响

Effect of polypropylene fiber on the damage and permeability of concrete

复合材料学报. 2021, 38(10): 3474–3483 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210223.001>

不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维增强工程水泥复合材料梁剪切韧性试验

Experimental study on shear toughness of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composite beams with different fiber contents

复合材料学报. 2019, 36(8): 1968–1976 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.006>

不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维/水泥复合材料徐变性能试验

Experimental study on creep performance of polyvinyl alcohol fiber/engineered cementitious composite with different fiber contents

复合材料学报. 2020, 37(1): 205–213 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190425.002>

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>

玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1926–1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>

纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验

Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete

复合材料学报. 2019, 36(10): 2458–2468 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190510.002>



DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.001

回收碳纤维混凝土导电性



分享本文

王艳^{*1,3}, 张彤昕¹, 郭冰冰^{2,3}, 牛荻涛^{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 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055)

摘要: 碳纤维增强树脂复合材料从生产、服役到退役的整个生命周期都会产生巨量废弃物, 带来了严重的环境污染与资源浪费问题。本文将生产过程中产生的废弃碳纤维添加到混凝土中, 研究其对混凝土强度及导电性的影响规律与机制。结果表明, 回收碳纤维对混凝土强度改善效果不明显, 这是由于工业碳纤维表面的涂层使其在混凝土拌合过程中更易聚集成束, 不易分散。回收碳纤维的掺入可明显提升混凝土导电性, 掺量为 0wt%~0.3wt% 时, 干燥/吸水过程改变混凝土孔结构且 C—S—H 凝胶重新排列、局部收缩与部分不可逆特性使混凝土产生新的导电路径, 电阻率随含水率降低呈现先升后降的趋势; 掺量为 0.4wt%~1.5wt% 时, 混凝土内部形成了稳定的物理接触导电网络, 龄期及含水率对导电率无明显影响。

关键词: 回收碳纤维; 纤维增强混凝土; 导电性; 纤维掺量; 含水率

中图分类号: TU528.582 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)06-2855-09

Conductivity of recycling carbon fiber concrete

WANG Yan^{*1,3}, ZHANG Tongxin¹, GUO Bingbing^{2,3}, NIU Dita^{2,3}

(1. College 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 in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The whole life cycle of carbon fiber reinforced polymer composite from production, service to retirement will produce huge amount of waste, bringing serious environmental pollution and resource waste. In this paper, the waste carbon fiber produced in the production process was added to the concrete to study its influence law and mechanism on the strength and conductivity of concrete. The results show that the recovery effect of carbon fiber on the strength of concrete is not obvious, because the coating on the surface of industrial carbon fiber makes it easier to gather into bundles and not easy to disperse in the process of concrete mixing. The incorporation of recycling carbon fiber can significantly improve the conductivity of concrete. When the content of recycling carbon fiber is 0wt%-0.3wt%, the drying/water absorption process changes the pore structure of concrete. And the C—S—H gel rearrangement, local shrinkage and partial irreversible characteristics make concrete produce a new conductive path. The resistivity increases first and then decreases with the decrease of water content. When the content is 0.4wt%-1.5wt%, a stable physical contact conductive network is formed in the concrete, and the age and moisture content have no obvious effect on the conductivity.

Keywords: recycling carbon fiber; fiber reinforced concrete; electrical conductivity; fiber content; moisture content

碳纤维具有不可替代的超高力学性能, 其优异的导电性及电磁屏蔽性能是其他材料无法比拟的^[1]。碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced plastics, CFRP) 具有可设计性强、耐腐

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-08-20; 网络首发时间: 2021-09-02 14:17:24
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.001>
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52078414); 陕西省自然科学基金面上项目 (2020JM-469)
通信作者: 王艳, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纤维混凝土、混凝土及混凝土结构耐久性 E-mail: wangyanwjx@126.com
引用格式: 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).

蚀、耐高温高压、超高比强度及比模量^[2]等特点被广泛应用于航天航空、风力发电等领域。考虑到磨损、维修成本、技术更新等问题,风力发电装置和飞机的使用寿命约为 20~25 年^[3]。预计到 2050 年,全球航空业每年处理的 CFRP 废弃物将达到 34.2 kt^[4]。CFRP 在整个生命周期内都会产生废弃物^[5-6]: (1)生产加工过程中产生的制造废弃物,如边角料、过期硬化的预浸料、有缺陷的不合格品、测试报废品等,约占生产总量的 30%~50%^[7]; (2)服役期内维护更换的废弃物; (3)寿命结束后的报废废物。由于热固性树脂的交联特性,CFRP 无法通过加热进行重复加工^[8-9]。巨量的 CFRP 废弃物造成了巨大的环境压力 and 资源浪费。

已有研究表明,在水泥基材料中加入适量的碳纤维能够明显提高其导电性^[10-11],从而使水泥基材料具有压敏性、温敏性、电热性、电磁屏蔽等功能^[12-13],实现混凝土的结构功能一体化^[14]。但碳纤维成本高昂^[15-17],极大程度上限制了碳纤维在智能混凝土领域中的发展及应用。回收碳纤维的成本低于建筑用碳纤维,可节省 30%~40% 的成本^[18-19]。但废弃碳纤维与碳纤维存在显著区别,废弃碳纤维是否具有优异的导电性能值得探索。

本文使用工业生产过程中废弃的碳纤维长丝,

将其加工成土木工程中常用的短切纤维,测试回收碳纤维混凝土的 28 天强度及不同掺量、不同龄期、不同含水状态下回收碳纤维混凝土的导电性能。

1 试验

1.1 原材料

试验所用水泥为陕西胜利水泥厂生产的冀东牌 P·O 42.5 水泥;细骨料为细度模数 2.42 的中砂;粗骨料选用粒径为 5~10mm 的砾石;减水剂为科之杰外加剂厂生产的聚羧酸系高效减水剂,减水率不低于 25%。使用的回收碳纤维是由盐城市翔盛碳纤维科技有限公司生产过程中产生的边角料加工而成,见图 1,回收碳纤维相关参数见表 1。水泥化学成分见表 2。

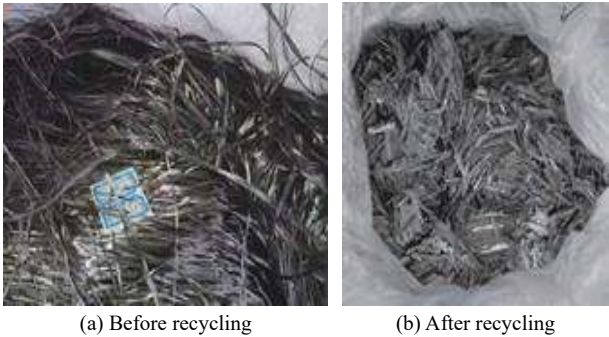


图 1 回收前后碳纤维形貌

Fig. 1 Carbon fiber morphologies before and after recycling

表 1 回收碳纤维参数

Table 1 Parameters of recycling carbon fiber

Length/mm	Diameter/ μm	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Elongation/%
20	7	1.76	3 530	230	1.5

表 2 水泥化学成分

Table 2 Chemical composition of cement

Composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	Else
Content/wt%	61.83	19.68	4.72	3.66	0.43	1.27	1.31	0.05	2.73	2.23

1.2 配合比设计及试件制作

回收碳纤维掺量为 0.1wt%~1.5wt%,共 15 个掺量,减水剂掺量为胶凝材料质量的 1%,具体配合比见表 3。根据 GB/T 50081—2019^[20]规定,成型立方体抗压强度试件及劈裂抗拉强度试件。导电性试验使用自制模具成型试件,试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,电极材料采用铜板,电极间距为 100 mm,具体参数见图 2。选取长度为 20 mm 的回收碳纤维掺入混凝土,成型 24 h 后拆模,在

标准养护 ((20±2)℃,相对湿度 95%)下养护至测试龄期。测试 7 天、28 天、60 天下试件电阻率及 60 天试件 (105±5)℃ 烘干至恒重下的电阻率。

1.3 试验方法

根据 GB/T 50081—2019^[20]规定,立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,每组设计 3 个试块,使用承载力为 1 000 kN 的电液式压力机进行测试。使用场发射扫描电子显微镜 (Gemini SEM 300) 对回收碳纤维及回收碳

表 3 回收碳纤维混凝土配合比

Table 3 Proportion of recycled carbon fiber concrete

kg/m ³				
Cement	Water	Sand	Calculus	Water reducer
474	120	667	1 087	4.7

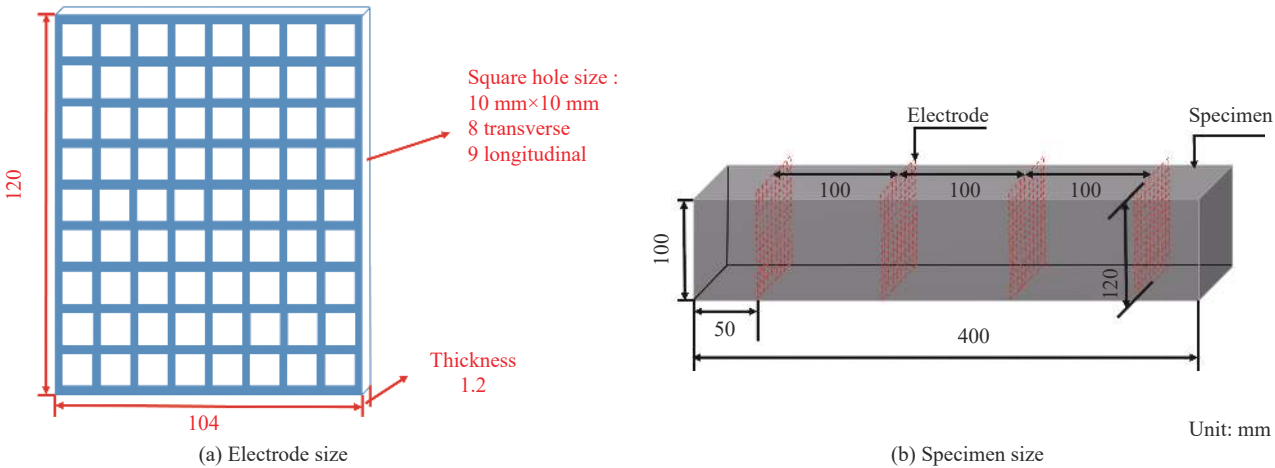


图 2 导电性试验试件成型参数

Fig. 2 Forming parameters of conductivity test specimens

纤维混凝土的微观结构进行表面形貌及断口分析。为降低极化效应的影响，导电性试验采用四电极方法进行，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，为了减小试验误差，每组设计 3 个试块，采用直流电源供电，同时使用数字万用表测试试件两端电压。具体测试方法见图 3，并根据下式计算得出试件电阻及电阻率：

$$R = \frac{U}{I} \tag{1}$$

$$\rho = \frac{S}{L}R \tag{2}$$

式中： R 为待测试件电阻 (Ω)； U 为待测试件两端的电压 (V)； I 为通过待测试件的电流 (A)； ρ 为试件电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$)； S 为试件横截面积 (m^2)； L 为试

件长度 (m)。

含水率试验采用将养护至 60 天的试件在 $(105\pm5)^{\circ}\text{C}$ 下干燥，在干燥过程中测量试件质量及电阻率直至试件烘干至恒重。干燥后将试件放置于常温下 3 天后再进行吸水试验，在吸水过程中测量试件质量及电阻率直至试件恒重。

2 试验结果与讨论

2.1 回收碳纤维对混凝土力学性能的影响规律

将不同掺量下回收碳纤维混凝土标准养护至 28 天后测试其抗压强度及劈裂抗拉强度，试验结果见图 4，回收碳纤维混凝土破坏后断面及回收碳纤维间黏贴现象见图 5，回收碳纤维的增韧阻裂作用见图 6。

由图 4 可知，回收碳纤维对混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度提升并不明显。纤维加入混凝土中一方面可通过纤维从基体中拔出、拔断及横跨裂纹两侧碳纤维的抗拉作用等方式阻碍裂缝的扩展(图 6)提高混凝土强度^[21]，但另一方面，由于纤维的加入在混凝土中引入更多的粘结界面，可能降低混凝土的性能。为了防止碳纤维在生产过程中产生毛丝造成纤维断裂影响纤维强度，通常会采用上浆技术在碳纤维表面涂覆一层树脂，碳纤维单丝间被树脂黏结起来(图 5(b))，从混凝土

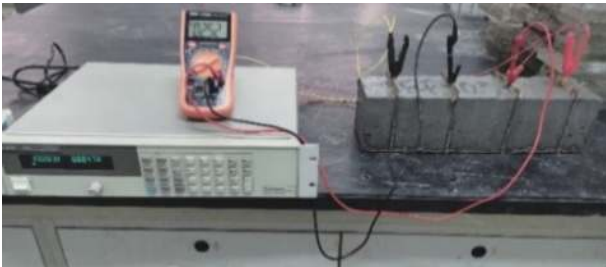


图 3 导电性试验

Fig. 3 Conductivity test

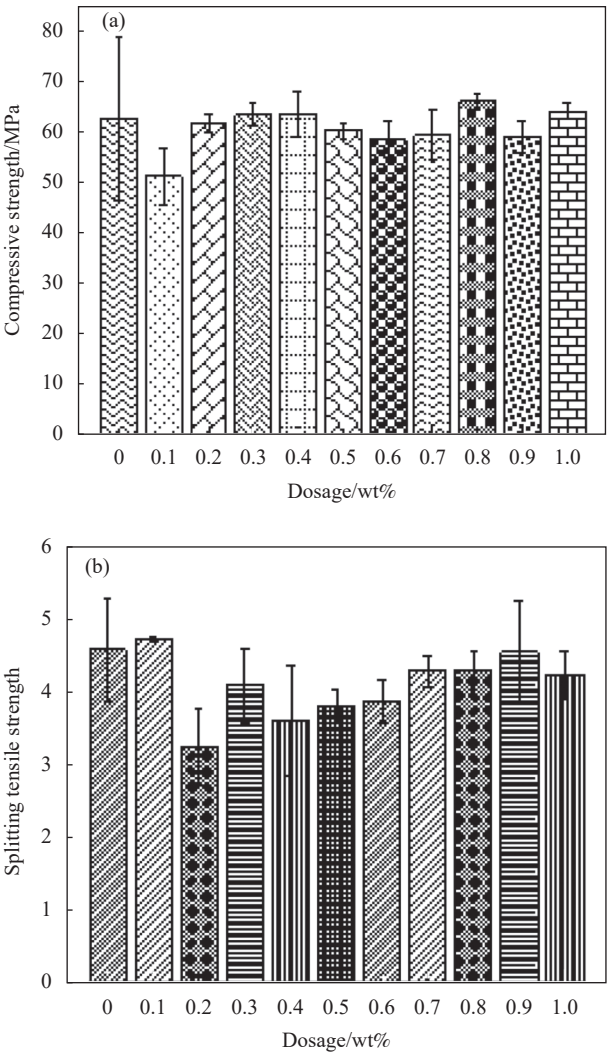


图 4 不同掺量下回收碳纤维混凝土 28 天力学性能

Fig. 4 28 days mechanical properties of concretes with different recycling carbon fiber contents

中应用的角度分析,回收碳纤维的这一显著特点造成纤维彼此黏结,带来的分散性差必将造成拌制过程中纤维结团,在混凝土内部引入更多的薄

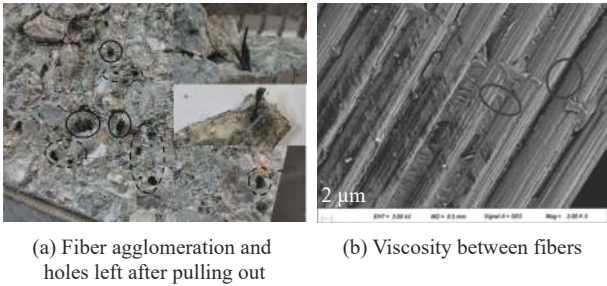


图 5 回收碳纤维混凝土破坏后断面及纤维间粘黏现象 (实线圈代表纤维团聚,虚线圈代表孔洞)

Fig. 5 Failure section of recycling carbon fiber reinforced concrete and fiber adhesion phenomenon (Solid lines ring represent fiber agglomeration, void lines ring represent hole)

弱结构面,增韧效果变差,对混凝土强度贡献少甚至有负作用。如图 5(a) 所示,试件断面处回收碳纤维在基体中聚集成束现象严重,分散性较差,成束的碳纤维更容易从基体中拔出并留下大尺寸孔洞。另外本实验采用的混凝土强度较高,混凝土脆性大,只有当柔性纤维的掺量较高并且分散良好时才能发挥明显的增强与增韧作用,本文主要目的是为获得良好的导电性,在力学实验中最高的掺量仅为 1wt%,因此强度提升效果不明显。

2.2 龄期及掺量对回收碳纤维混凝土导电性能的影响规律

将不同掺量下的回收碳纤维混凝土标准养护至 7 天、28 天和 60 天,测试不同龄期下回收碳纤维混凝土电阻率随掺量变化曲线,试验结果见图 7。图 8 为碳纤维在混凝土中的导电传输路径。

一般认为^[22-24],碳纤维混凝土导电可通过以下几种方式进行:(1)离子导电,由于自由水的存在,孔溶液中 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 OH^{-} 、 SO_4^{2-} 等自由离子运动形成;(2)电子导电,通过凝胶体、凝胶水及未反应的水泥颗粒的电子导电,主要是 Fe、

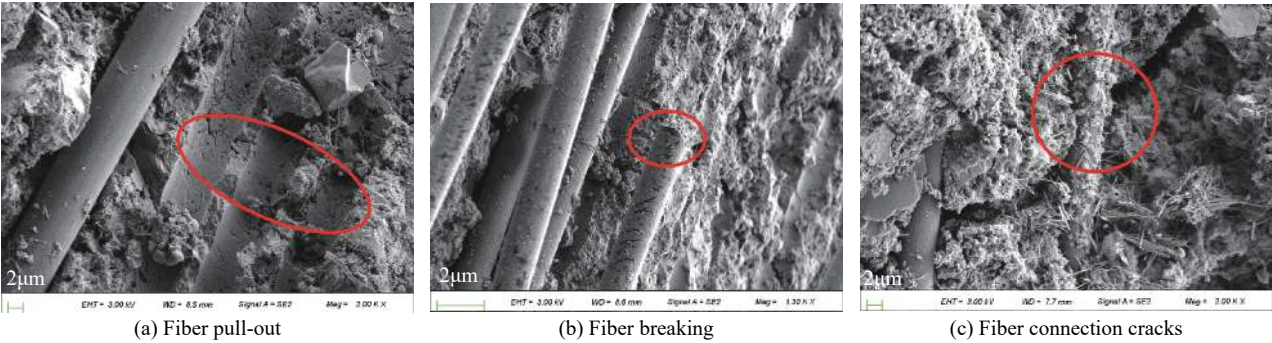


图 6 回收碳纤维的阻裂作用

Fig. 6 Toughening and crack resistance of recycling carbon fiber

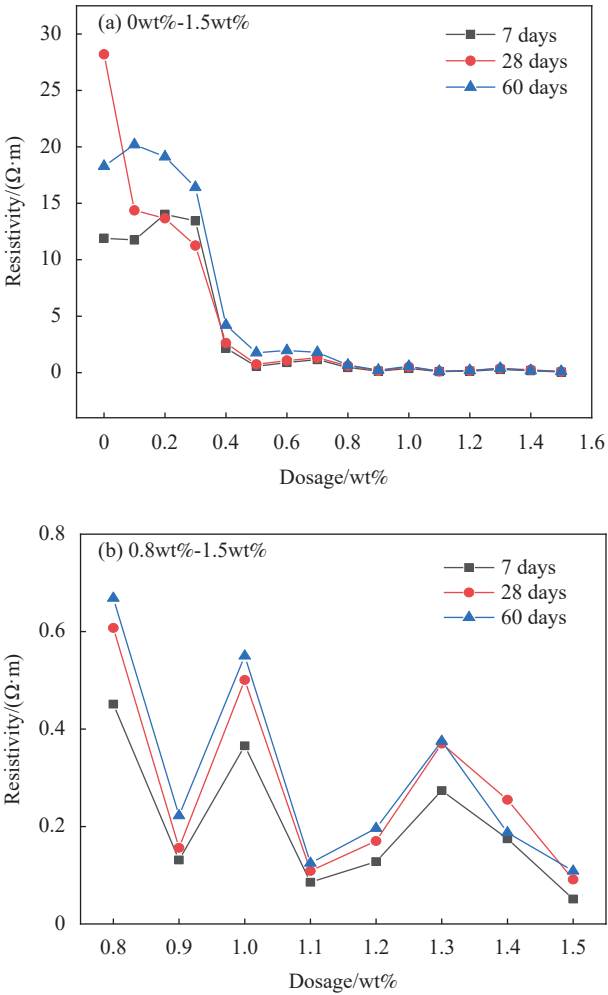


图7 不同龄期下回收碳纤维混凝土电阻率随掺量变化曲线
Fig. 7 Curves of resistivity of recycling carbon fiber reinforced concrete at different ages

Al、Ca 等化合物；(3) 空穴导电，通过电子在空穴间的迁移形成；(4) 碳纤维连接孔洞及纤维之间的搭接 (图 8)。

随着龄期的增长，一方面水化反应持续进行，水分子不断地转化为吸附水和胶凝水，自由水不断减少，水分作为离子迁移扩散的载体，被不断消耗，离子浓度不断降低，导电能力下降；另一方面，水化产物数量不断增加填充孔隙，水泥基体逐渐致密，碳纤维表面逐渐被水化产物包裹，导电通路被阻断，电阻率变大，导电性变差，电阻率随龄期增长整体呈增加趋势。

各龄期下，掺入回收碳纤维可降低混凝土电阻。但掺量小于 0.4wt% 时，混凝土内部没有形成完整的导电网络，此时的电阻率主要受混凝土基体控制；混凝土中水化产物的分布及数量、孔结构、回收碳纤维都会影响电阻率；故在此范围内

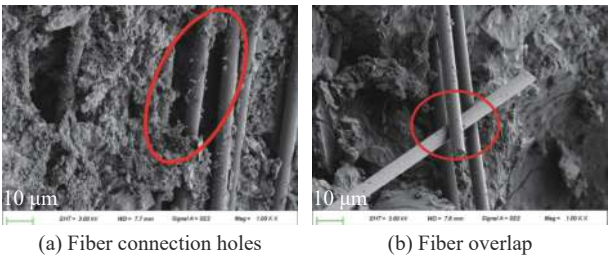


图8 碳纤维在混凝土中的导电传输路径
Fig. 8 Conductive transmission path of carbon fiber in concrete

的回收碳纤维混凝土电阻率存在波动性。掺量为 0.4wt% 时，回收碳纤维混凝土电阻率急剧下降，纤维相互搭接形成的导电网络开始占主导作用。当掺量大于 0.4wt% 时，碳纤维搭接已经在混凝土内部形成完整稳定的空间导电网络结构，几乎完全依靠碳纤维之间的接触导电，因此在此掺量范围内的混凝土电阻率能保持稳定，可以获得良好的导电性，而且掺量大于 0.4wt% 时随着养护龄期增长混凝土电阻率虽然增大但变化幅度很小。

2.3 含水性对回收碳纤维混凝土导电性能的影响

水泥基体的导电性主要受两种因素影响，孔隙连通/曲折度及饱水度。本试验将养护至 60 天的试件在 105℃ 下烘干至恒重，在干燥过程中测试其电阻率随含水率变化情况。烘干后，将试件放置于常温下 3 天后再进行吸水试验，直至试件吸水至恒重，在吸水过程中测试其电阻率随含水率变化情况。图 9 为不同掺量的回收碳纤维混凝土在干燥过程及吸水过程中的电阻率随含水率变化规律。

结果显示，对掺量为 0.1wt%~0.3wt% 的回收碳纤维混凝土来说，由于掺量小，水泥基体中纤维间距离较大无法形成有效的导电网络，导电方式主要以离子导电为主，水分对其电阻率影响显著。在干燥过程、吸水过程中，回收碳纤维混凝土电阻率随含水率的增加均呈现先升高后降低的趋势。

混凝土中的水以 3 种形式存在，分别为化学结合水、物理结合水和毛细水。烘干过程中：(1) 当含水率从 7% 降低到 1.5% 时，混凝土内部水分发生改变，自由水作为离子迁移的载体不断减少，水中导电的离子无法定向移动形成电流。烘干温度为 105℃ 时，混凝土中全部的物理结合水与毛细水最终会蒸发，电阻率显著提高；温度升高还会显著改变混凝土内部的孔隙结构，混凝土的阈值孔径随温度的升高而显著增大，总孔隙体积增

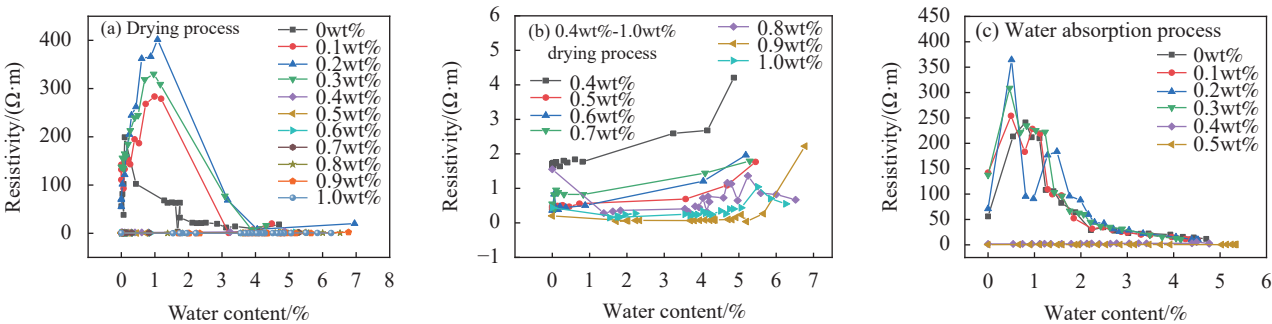


图 9 回收碳纤维混凝土电阻率随含水率变化
Fig. 9 Change of resistivity of recycling carbon fiber concrete with water content

大，一部分毛细孔随着温度的升高逐渐连通，形成大孔^[25]，即温度越高，混凝土的孔隙率越大，内部大孔越多，同时分布不均的碳纤维在混凝土中造成缺陷也使得混凝土电阻率增大；(2) 含水率在 0%~1.5% 左右时，电阻率又逐渐降低，这可能是由于：水泥基材料主要由具有巨大内部比表面积的纳米级无定形 C—S—H 凝胶组成，C—S—H 凝胶含有大量极细夹层和凝胶孔隙，而 C—S—H 凝胶的形态结构对水极度敏感，具有水敏性^[26]，在初始水饱和状态下，C—S—H 凝胶的层间孔隙被水溶液填充，如图 10 所示，干燥时，具有大量层间孔隙的 C—S—H 凝胶会重新排列并产生局部收缩，在分子间吸引力和表面力的作用下，层间细孔坍塌，C—S—H 骨架片与相邻骨架片逐渐接近甚至接触。大多数明显的 C—S—H 凝胶收缩将在其附近形成孔隙。这意味着，随层间孔隙水的排出，特征孔长度和连通性增加，细凝胶孔隙体积减少，水合物间孔隙体积及毛细管将明显变粗。C—S—H 凝胶的区域收缩将使其孔隙结构明显变

粗，临界孔隙半径增加，从而大大改变水泥基材料的孔结构。硬化水泥浆体显示出大孔体积增加，中孔和层间孔隙空间减少。水泥基材料在水饱和与完全干燥状态下具有绝对不同的孔隙结构，干燥作用下混凝土孔隙结构发生改变，产生了新的导电路径。因此，干燥过程不仅改变了混凝土中自由水和结合水的含量，更影响了混凝土内部的孔隙结构，从而导致了水泥基材料电阻率的改变。

从干燥过程中的电阻率变化来看，掺量大于 0.5wt% 后含水率对电阻率无明显影响，因此吸水试验选取 0wt%~0.5wt% 掺量进行。图 11 为 0wt%~0.5wt% 掺量混凝土在烘干及吸水过程中电阻率变化对比。

吸水过程中，混凝土电阻率变化规律整体趋势与干燥过程类似。干燥过程是一个由大孔到小孔的渐进脱水动力学过程，具有静态孔隙结构，但水泥基材料的吸水动力学不是一个简单的从细孔到粗孔的填充过程，而是伴随着 C—S—H 凝胶的显著膨胀和随后的动态孔隙结构演化^[27]。随着相对湿度的降低，层间孔隙水将逐渐流失，C—S—H 凝胶夹层孔隙空将在干燥过程中不断收缩，C—S—H 基底层越来越接近，以层间孔隙坍塌为代价，凝胶孔隙和水合物间孔隙的体积大大增加，C—S—H 凝胶产生显著收缩，基底 C—S—H 骨架片发生固体接触。水回注后，层间孔隙坍塌仅恢复一半左右，这是由于相邻基底 C—S—H 骨架片的固体接触太强而不能被水渗透分开。因此，约有一半的收缩在水分重新进入后是可逆的，而另一半则由于层间孔隙的不可逆坍塌，水分仅能渗透到凝胶孔隙和水合物间孔隙的空间中。在宏观上表现为试块吸水后质量无法恢复至干燥前质量，从图 11 中各掺量在烘干及吸水过程中的含水率可以看出，吸水后试块的含水率略低于烘干前

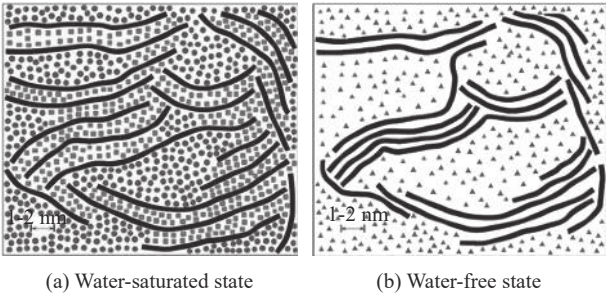


图 10 C—S—H 凝胶在水饱和和无水状态下的微观结构
(曲线、正方形、圆圈和三角分别代表 C—S—H 骨架片、层间孔隙水、凝胶孔隙水和其他非水惰性流体)^[26]
Fig. 10 Micro-structure of C—S—H gel at water-saturated and water-free states (Curve, square, circle and triangle represent the C—S—H backbone sheet, interlayer pore water, gel pore water and other inert fluids rather than water, respectively)^[26]

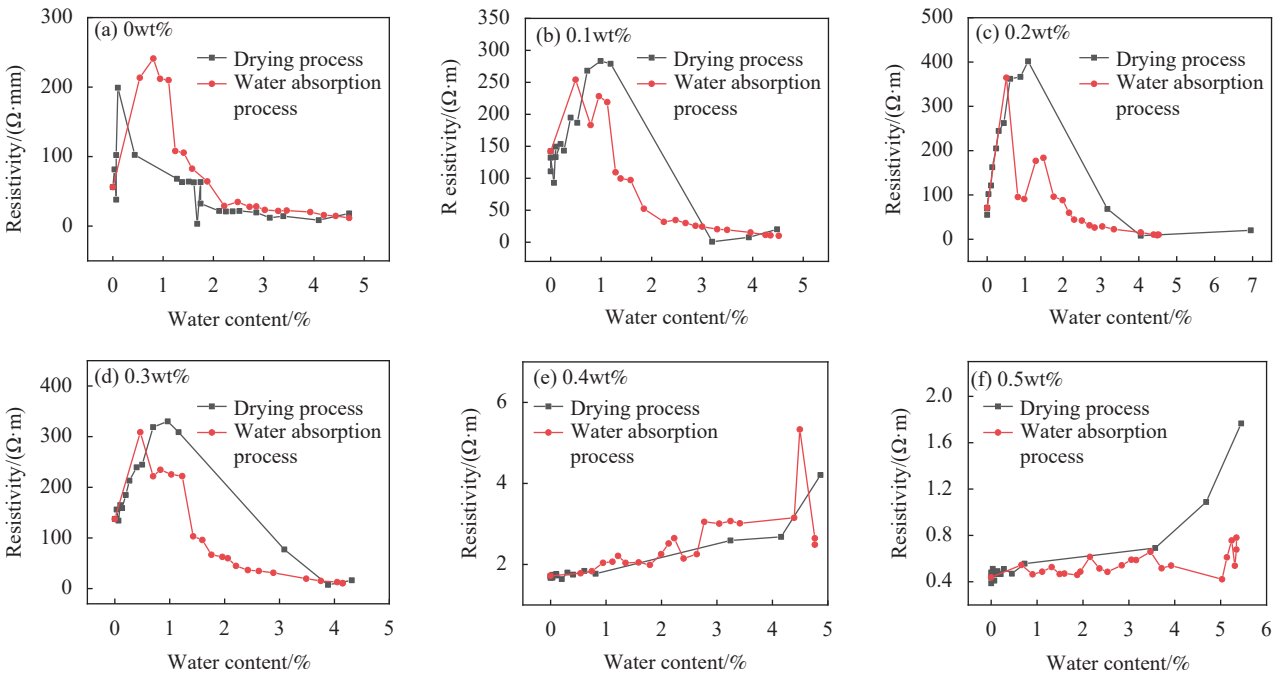


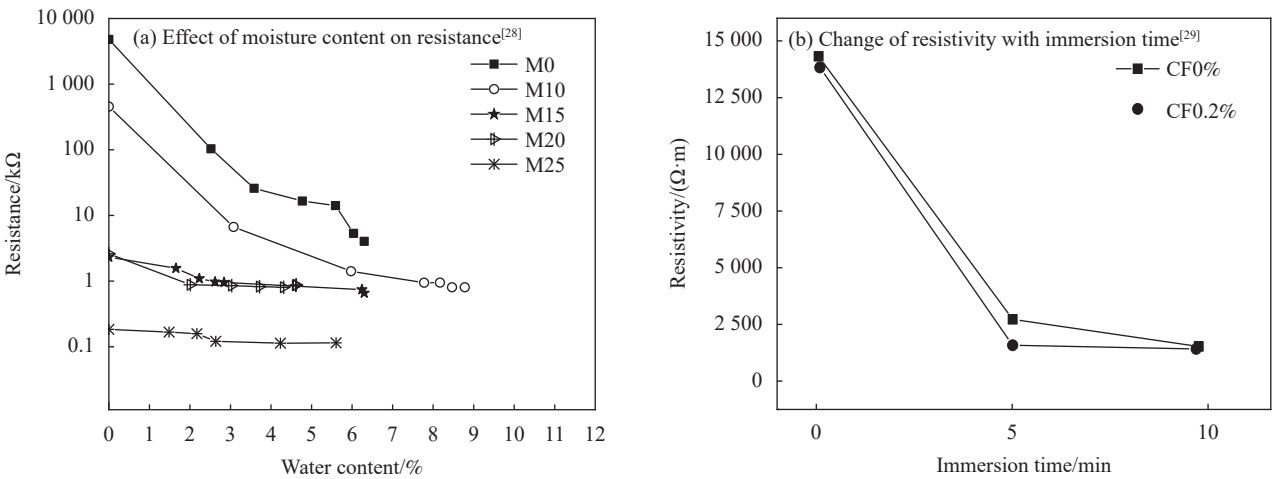
图 11 0wt%~0.5wt% 掺量下烘干及吸水过程下回收碳纤维混凝土电阻率变化

Fig. 11 Changes of resistivity of recycling carbon fiber concrete during drying and water absorption at 0wt%-0.5wt% dosage

试件的含水率。以上表明 C—S—H 凝胶结构对水分进入或移除具有特殊敏感性，C—S—H 凝胶在润湿或干燥过程中会发生显著膨胀或收缩，这种明显的孔隙结构演化导致了水泥基材料电阻率的改变。

以往文献中的含水率试验通常采用先干燥再浸泡试件至水饱和状态的方式来测试电阻率与含水率之间的关系，例如：文献 [28] 采用将试件放入 60℃ 的烘箱中干燥 72 h 后再把试件浸泡于水

中 4 天得到其饱水状态。文献 [29] 在 105℃ 下烘干至恒重，然后把试件置入水中，测试 5、10、30、120、240、1 200、1 440 min 的电阻和质量，直至试件的质量不再变化。图 12(a) 在含水率约为 1.5% 时测得第一个数据，图 12(b) 则在浸泡 5 min 后测得第一个数据点。由于吸水过程非常迅速，因此本文在试验时测试最短时间间隔以 s 为单位，测得了在含水率为 0%~1.5% 之间的电阻率会发生先升高后降低的规律。



M0-M25—Cement mortar specimens with nano carbon fiber contents of 0%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% cement volume;
CF0% and CF0.2%—Cement mortar specimens with carbon fiber contents of 0% and 0.2% of cement mass

图 12 烘干及吸水过程下回收碳纤维混凝土电阻率变化

Fig. 12 Change of resistivity of recycling carbon fiber concrete during drying and water absorption

对于掺量为 0.4wt%~1.5wt% 的回收碳纤维混凝土, 由于碳纤维已经在混凝土内部形成较完整稳定的导电网络结构, 试件的含水率对其影响不大, 含水率高时相对较大的电阻率可能是由于碳纤维表面存在吸附水膜使纤维间的接触电阻增大导致的。

3 结论

(1) 回收碳纤维对混凝土力学性能影响: 由于工业中使用的碳纤维表面通常涂覆一层上浆料, 碳纤维单丝被黏结成束, 回收后若不去除表面的涂层直接使用, 在混凝土中极易结团, 无法起到增强增韧效果。建议若要在水泥基材料中高效利用回收碳纤维, 须对其进行预处理、提高碳纤维分散性以避免碳纤维间的团聚。

(2) 回收碳纤维混凝土的导电性能: 掺量小于 0.4wt% 时, 混凝土内部没有形成完整的导电网络, 电阻率主要受混凝土基体控制。掺量为 0.4wt%~1.5wt% 时, 碳纤维已经在混凝土内部形成较完整稳定的导电网络结构, 可以获得良好稳定的导电性, 而且导电性能几乎不受龄期及含水率的影响。

(3) 干燥过程中, 混凝土内部水分蒸发及 C—S—H 凝胶重新排列、局部收缩与层间细孔坍塌使混凝土孔结构发生改变, 这种改变使混凝土内部形成新的导电路径, 混凝土电阻率在含水率从 1.5% 到 0% 时反而降低。吸水过程中, C—S—H 凝胶发生显著膨胀及结构部分可逆特性引发混凝土内部发生动态孔隙结构演化, 造成吸水过程中电阻率随含水率变化稍有波动。但总体来说, 干燥过程混凝土电阻率随含水率的变化关系与吸水过程一致, 即电阻率随含水率降低并非持续增大, 而是呈现先增大后减小的趋势。

参考文献:

- [1] YANG S, CHENG Y, XIAO X, et al. Development and application of carbon fiber in batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384: 123294.
- [2] 余乐卿. 碳纤维混凝土智能桥梁控制方法[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
SHE Leqing. Control of intelligent bridges of carbon fiber concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007(in Chinese).
- [3] ANDERSEN N, ERIKSSON O, HILLMAN K, et al. Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level[J]. *Energies*, 2016, 9(12): 999.
- [4] LEFEUVRE A, GARNIER S, JACQUEMIN L, et al. Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 125: 264-272.
- [5] LIU P, BARLOW C Y. Wind turbine blade waste in 2050[J]. *Waste Management*, 2017, 62: 229-240.
- [6] 齐德永. 碳纤维复合材料回收与再利用研究现状[J]. *中国化工贸易*, 2018, 10(4): 156.
QI Deyong. Research status of recycling and reuse of carbon fiber composite materials[J]. *China Chemical Trade*, 2018, 10(4): 156(in Chinese).
- [7] PICKERING S J. Recycling technologies for thermoset composite materials—Current status[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(8): 1206-1215.
- [8] WANG S, XING X, ZHANG X, et al. Room-temperature fully recyclable carbon fiber reinforced phenolic composites through dynamic covalent boronic ester bonds[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(23): 10868-10878.
- [9] KIM K W, LEE H M, AN J H, et al. Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203(3): 872-879.
- [10] DEHGHANI A, ASLANI F. The effect of shape memory alloy, steel, and carbon fibers on fresh, mechanical, and electrical properties of self-compacting cementitious composites[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2020, 112: 103659.
- [11] HAN B, ZHANG L, ZHANG C, et al. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 479-489.
- [12] 刘子田. 碳纤维智能混凝土的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
LIU Zitian. Preparation and performance of carbon fiber smart concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006(in Chinese).
- [13] 刘起. 碳纤维水泥基复合材料受拉构件破坏全过程研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
LIU Qi. Study on the whole fracturing process of cement based on carbon fibers composite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008(in Chinese).
- [14] 郑华升. 机敏混凝土结构的温差、变形自调节控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
ZHENG Huasheng. Research on the temperature differ-

- ence and deformation self-adjusting control system of smart concrete structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006(in Chinese).
- [15] TIAN Z, LI Y, ZHENG J, et al. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 177: 107437.
- [16] KIMM M, PICO D, GRIES T. Investigation of surface modification and volume content of glass and carbon fibers from fiber reinforced polymer waste for reinforcing concrete[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121797.
- [17] HE D, SOO V K, KIM H C, et al. Comparative life cycle energy analysis of carbon fiber pre-processing, processing and post-processing recycling methods[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 158: 104794.
- [18] ZHANG J, CHEVALI V S, WANG H, et al. Current status of carbon fiber and carbon fiber composites recycling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193: 108053.
- [19] FANCA G, SEGURA I, TORRENTS J M, et al. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 92: 135-144.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 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 Construction Industry Press, 2019(in Chinese).
- [21] 佟钰, 田鑫, 朱长军, 等. 短切碳纤维混凝土的力学强度实验与分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2281-2285, 2297.
- TONG Yu, TIAN Xin, ZHU Changjun, et al. experiments and analysis on mechanical strength of carbon fiber reinforced concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(8): 2281-2285, 2297(in Chinese).
- [22] 郭传慧, 汤婉, 刘数华. 碳纤维对导电混凝土性能和微结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3531-3535.
- GUO Chuanhui, TANG Wan, LIU Shuhua. Effect of carbon fiber on the properties and microstructure of conductive concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(10): 3531-3535(in Chinese).
- [23] 尚国秀. 碳纤维水泥基复合材料纤维分散性及导电性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- SHANG Guoxiu. Fiber dispersion and conductive performance experimental research on carbon fiber cement-based composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015(in Chinese).
- [24] 温晓尉. 水环境下碳纤维混凝土渗透性和导电机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- WEN Xiaowei. The permeability and the performance of the electric conduction of the carbon fiber reinforced cement composite under water[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010(in Chinese).
- [25] 申嘉荣, 徐千军. 高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究[J]. 材料导报, 2020, 34(2): 46-51.
- SHEN Jiarong, XU Qianjun. Characteristics of pore structure change and compressive strength reduction of concrete under elevated temperatures[J]. *Materials Review*, 2020, 34(2): 46-51(in Chinese).
- [26] ZHOU C, REN F, WANG Z, et al. Why permeability to water is anomalously lower than that to many other fluids for cement-based material? [J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100: 373-384.
- [27] ZHOU Chunsheng, REN Fangzhou, ZENG Qiang, et al. Pore-size resolved water vapor adsorption kinetics of white cement mortars as viewed from proton NMR relaxation[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 105: 31-43.
- [28] 汪晖. 环境条件对纳米碳纤维水泥基材料压阻性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG Hui. Influence of environmental condition on piezoresistivity of carbon nanofibers cement-based materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [29] 白轲. 碳纤维水泥基复合材料的导电性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- BAI Ke. Research on the electrical conductivity of carbon fiber cement-based composites[D]. Changsha: Central South University, 2009(in Chinese).