文章编号:1007-9629(2025)12-1257-09

电化学改性CFPW对水泥基材料导电性能的影响

李文俊[1], 王 艳[2,3,*], 孙琳琳[2], 牛荻涛[1,3], 邢国华[4]

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2.西安建筑科技大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710055; 3.西安建筑科技大学 绿色建筑全国重点实验室,陕西 西安 710055; 4.长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:对碳纤维预浸料废弃物(CFPW)进行电化学改性处理。研究改性后CFPW性能变化,以及其对水泥基材料流动度、力学性能和导电性能的影响,并结合微观测试技术分析其导电机理。结果表明:当电流密度为80 mA/cm^{2}时,改性CFPW的表面树脂祛除效果优于60 mA/cm^2。此时,CFPW润湿性、表面粗糙度、石墨化程度均得到提升,密度增大,且表面引入了含氧官能团。将改性CFPW掺入水泥基材料后,材料抗压强度和抗折强度的最高增幅分别达31.05%和77.63%;同时,水泥基材料电阻率显著降低,且降低效果随养护龄期延长愈发显著,在0.3%纤维掺量下,电阻率下降幅度高达57.94%。

关键词:水泥基材料;电化学改性;碳纤维废弃物;力学性能;导电性能

中图分类号:TU528.58 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.010

Effect of Electrochemically Modified CFPW on Electrical Conductivity of Cement-Based Materials

LI Wenjun[1], *WANG Yan*[2,3,*], *SUN Linlin*[2], *NIU Ditao*[1,3], *XING Guohua*[4]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Materials Science and 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; 4. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Electrochemical modification treatment was carried out on carbon fiber prepreg waste (CFPW). The changes in performance of the modified CFPW and its impacts on the fluidity, mechanical, and electrical conductivity properties of cement-based materials were studied, and its electrical conduction mechanism was analyzed in combination with microscopic testing techniques. The results show that when the current density is 80 mA/cm^2, the surface resin removal effect of the modified CFPW is better than that at 60 mA/cm^2. At this time, the wettability, surface roughness, and graphitization degree of CFPW are all improved. Besides, the density is increased, and oxygen-containing functional groups are introduced into CFPW. After incorporating the modified CFPW into cement-based materials, the maximum increases in compressive strength and flexural strength reach 31.05% and 77.63%, respectively. Meanwhile, the resistivity is significantly reduced, and the effect becomes more pronounced with the extension of the curing age. At a fiber content of 0.3%, the resistivity decreases by as much as 57.94%.

Key words: cement-based material; electrochemical modification; carbon fiber waste; mechanical property; electrical conductivity

收稿日期:2025-03-09; 修订日期:2025-04-10

基金项目:国家优秀青年科学基金资助项目(52222806);国家自然科学基金资助项目(52078414)

第一作者:李文俊(1998—),男,河南洛阳人,西安建筑科技大学博士生。E-mail: liwenjun0504@163.com

通讯作者:王 艳(1982—),女,湖北随州人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士。E-mail: wangyanwjx@126.com

在恶劣的服役环境下，建筑结构极易发生损伤，进而引发结构失效问题[1]。为此，学者们尝试在水泥基材料中掺入碳纤维和石墨烯等导电相，赋予其感知性能，以此构建自诊断系统，达到损伤预警与及时维护的目的，最终提升建筑结构的安全性[2]。碳纤维凭借耐高温、耐腐蚀等优异性能，在航空航天、风力发电等诸多领域得到广泛应用[3]。但随着碳纤维复合材料服役期满以及生产环节的损耗，废弃碳纤维数量正急剧攀升[4]。在此背景下，如何高效且合理地实现废弃碳纤维的再利用，已成为当下亟待解决的关键问题。

据预测，至2025年，全球废弃碳纤维的年增量将达2万t，其中碳纤维预浸料废弃物(CFPW)占比超30%。这类废弃物主要涵盖生产环节产生的边角料，以及服役到期或报废的预浸料[5]。与短切废弃碳纤维相比，CFPW表面树脂含量更高，回收难度更大[6]。由于树脂具有化学惰性和疏水性，CFPW与水泥基材料界面黏结较差[7]。因此，需采用不同改性方式去除表面的环氧树脂，以增强其与水泥基材料的黏结效果，进而提高导电性能[8]。相关研究显示，酸碱[9-10]、等离子体[11]等改性方法可有效去除树脂，增加表面粗糙度并能够引入新的含氧官能团[12]。但这些方法存在操作危险、成本高等问题。相比之下，电化学改性不仅能够有效去除表面树脂、增加粗糙度，还具有成本低、安全性高、易于规模化应用等优势[13]。

鉴于此，本文将电化学改性技术应用于CFPW的处理过程，旨在高效去除其表面树脂，探究改性后CFPW的性能变化，并系统剖析该处理方式对水泥基材料流动度、力学性能和导电性能的影响机制。

1 试验

1.1 原材料

水泥为海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥。CFPW为碳纤维复合材料生产加工过程中产生的废弃边角料。处理时，先将CFPW裁剪至20 cm长度，进行电化学改性处理；再将其进一步裁剪为10 mm长的细丝状纤维，并成型为试块。改性后的CFPW与原始碳纤维(VCF)性能指标对比详见表1。

表1 CFPW和VCF的性能指标

Table 1 Physical properties of CFPW and VCF

Fiber	Diameter/μm	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Elongation/%	Resin content(by mass) /%
CFPW	8.00	1 399	133	1.70	32
VCF	7.00	4 900	230	2.10	0

1.2 CFPW的电化学改性过程

采用电化学方法改性CFPW的流程如图1所示。本研究以CFPW为阳极、石墨棒为阴极，采用质量分数为3.0%的NaCl溶液作为电解液[14]，系统探讨在不同电流密度(60、80 mA/cm²)下，电解6 h后改性CFPW的性能变化情况。试验时，先将剪切成20 cm长的CFPW纤维用电极夹连接并置于电解槽中，按设定电流密度进行表面电化学改性。改性完成后，先用去离子水冲洗纤维，再将其放入超声波清洗仪进一步净化，以去除残留杂质；清洗结束后，把纤维置于105 ℃烘箱中干燥24 h，最终得到不同改性条件下的试样(MCFPW)，分别命名为MCFPW-60和MCFPW-80。

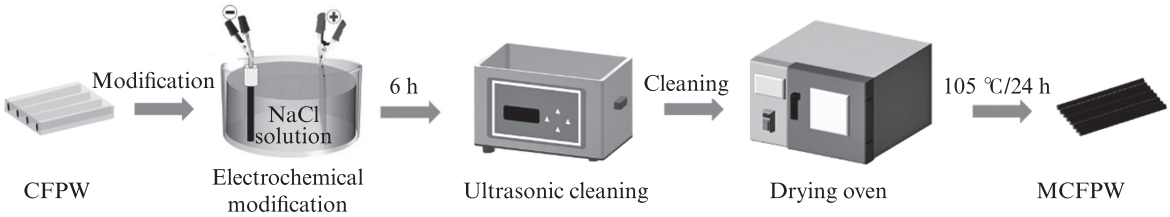


图1 电化学改性CFPW的流程

Fig. 1 Process to the electrochemical modification of CFPW

1.3 试件制备

本研究设定水泥净浆的配合比如下：水泥用量为1 800 kg/m³，水用量为540 kg/m³；MCFPW掺量(w)分别取水泥质量的0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和1.0%。以此制备尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的水泥净浆标准试块。同时，设置未掺加CFPW(纤维掺量为0%)的试件作为基准组(JZ)，用于对比分析。为提高MCFPW在水泥基材料中的分散效果，在制备过程中采用聚羧酸高效减水剂作为分散剂。具体操作是，将聚羧酸高效减水剂与MCFPW在水中搅拌均匀，制成分散液(减水剂掺量为水泥质量的1.0%)。搅拌时，先将分散液与水

泥充分混合，再加入剩余水，继续搅拌至目标成型状态。

1.4　试验方法

1.4.1　改性CFPW性能测试

采用扫描电子显微镜（SEM）、表面张力测定仪、原子力显微镜（AFM）、密度仪、拉曼光谱分析仪及傅里叶变换红外光谱分析仪（FTIR）等，对改性CFPW的表面微观形貌、接触角、最大粗糙度（R_a）、密度、石墨化程度及官能团进行系统分析。

1.4.2　流动度及力学性能测试

根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》和GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》，研究改性CFPW对水泥基材料流动度和力学性能的影响。

1.4.3　导电性能测试

本研究运用四电极法开展测试，该方法可有效规避极化效应[15]。测试中，选用不锈钢网作为电极片，相邻电极间距设定为40 mm。每组试验包括3个试件，采用直流电源供电，并利用数字万用表测试试件内侧两端电极片电压。根据式（1）计算试件电阻率（ρ，Ω·m），最终试验结果取3个试件测试值的算术平均值。

$$\rho=\frac{US}{IL} \tag{1}$$

式中：U为试件两端的电压，V；S为电极片与水泥基材料的接触面积，m^2；I为通过试件的电流，A；L为试件内侧两电极的间距，m。

电极网及其布置示意图如图2所示。

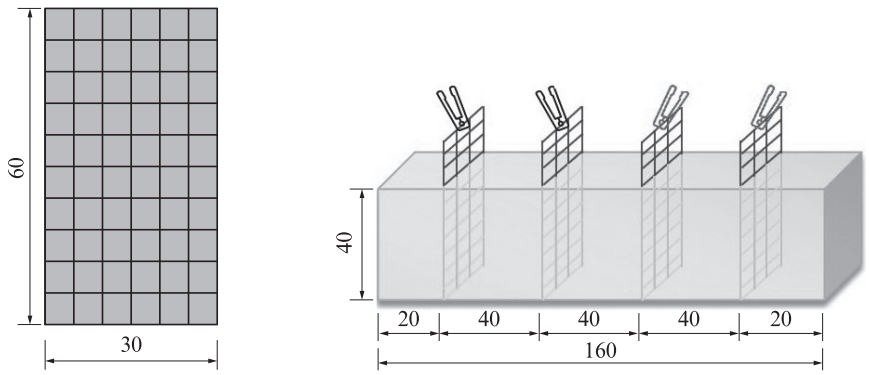


图2　电极网及其布置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of electrode mesh and its arrangement (size: mm)

2　结果与讨论

2.1　电化学改性后CFPW的性能

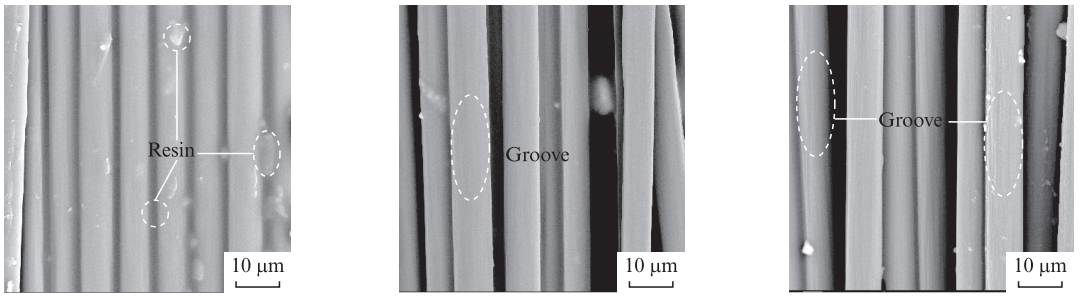
2.1.1　电化学改性后CFPW的表面微观形貌及接触角

未改性CFPW、MCFPW-60及MCFPW-80的表面形貌如图3所示。由图3可见：未改性CFPW表面覆盖厚树脂层，仅见轮廓，并附着杂质颗粒；经60 mA/cm^2电流密度改性后，纤维间树脂被去除，单纤维分离，表面趋于光滑但仍残留少量环氧树脂及杂质[16]；当电流密度增至80 mA/cm^2时，树脂刻蚀效果显著增强，纤维表面呈现明显的沟壑状形貌。这是由于在阳极氧化作用下，树脂发生分解：树脂高分子的化学键断裂，碳、氢等元素被氧化，生成CO_2、H_2O等小分子。增大电流密度可加速离子迁移与基团交换反应的速率，从而促进树脂的去除[17]。结果表明，NaCl溶液电化学改性能有效分离CFPW中的环氧树脂与纤维基体，改善纤维表面形貌，利于其回收再利用。

通过表面张力仪表征未改性CFPW、MCFPW-60和MCFPW-80的润湿性能，结果见图4。由图4可见：原始CFPW的接触角为128.6°，呈疏水性；经60 mA/cm^2电流密度改性后，CFPW的接触角降至68.5°，纤维表面变为亲水性，说明树脂刻蚀产生沟槽和颗粒，提高了润湿性；经80 mA/cm^2电流密度改性后，CFPW的接触角进一步降至54.8°，亲水性增强，分散性改善。这表明，电化学改性能够提高CFPW的润湿性能，且该性能随电流密度的增大而显著增强。

2.1.2　电化学改性后CFPW的最大粗糙度及密度

采用AFM对未改性CFPW、MCFPW-60和MCFPW-80的三维形貌及最大粗糙度进行表征，结果如图5和表2所示。图中x、y代表样品的平面位置，z代表距样品表面的高度，x、y、z三者可确定样品某一点的粗糙程度。由图5和表2可见：未改性CFPW表面光滑，仅有少量杂质凸起；经60 mA/cm^2电流密度改性后，CFPW的最大粗糙度由138 nm增至145 nm，并出现颗粒状凸起和浅沟壑，这源于环氧



(a) CFPW (b) MCFPW-60 (c) MCFPW-80

图3 电化学改性前后CFPW的SEM照片

Fig. 3 SEM images of CFPW before and after electrochemical modification

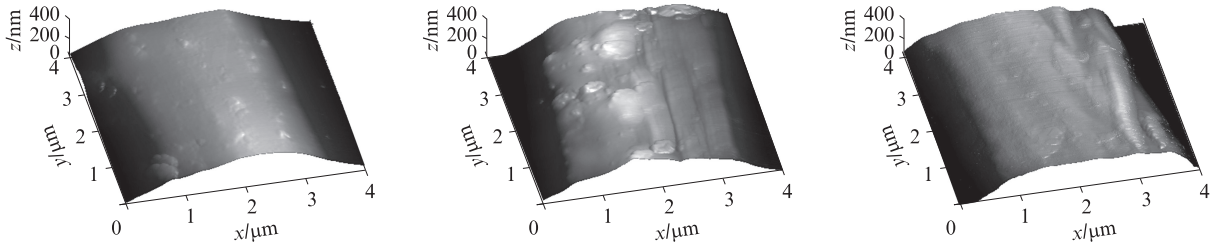
(a) CFPW (b) MCFPW-60 (c) MCFPW-80

图4 电化学改性前后CFPW的接触角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of contact angle of CFPW before and after electrochemical modification

树脂的不均匀刻蚀及残留物附着;当电流密度增加到80 mA/cm²时,CFPW的最大粗糙度升至177 nm,纤维表面沟槽加深、变宽,凸起颗粒减少,表明高电流密度加剧了刻蚀作用。

由于CFPW的表面粗糙度与其比表面积密切相关,因此计算了改性前后CFPW的比表面积,结果也列于表2。表2显示,经过不同电流密度改性后,MCFPW-60和MCFPW-80的比表面积分别增大了2.98%和10.71%,表明改性前后CFPW的比表面积与最大粗糙度变化趋势一致,即电化学改性可增大碳纤维的比表面积,且随着电流密度的增大比表面积呈增大趋势。



(a) CFPW (b) MCFPW-60 (c) MCFPW-80

图5 电化学改性前后CFPW的AFM图

Fig. 5 AFM images of CFPW before and after electrochemical modification

表2 电化学改性前后CFPW的最大粗糙度及比表面积

Table 2 Maximum roughness and specific surface area of CFPW before and after electrochemical modification

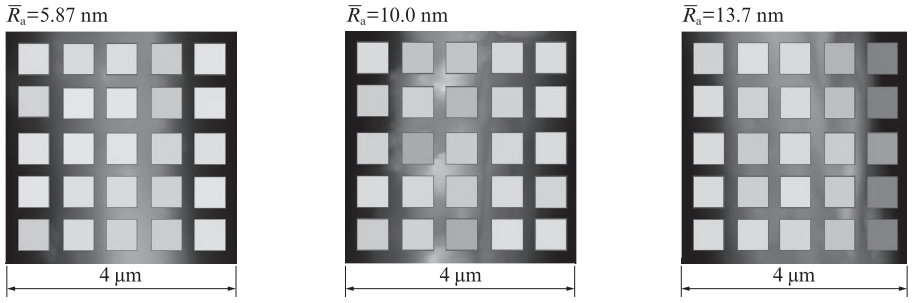
Sample	R_a/nm	Specific surface area/($m^2 \cdot g^{-1}$)
CFPW	138	16.8
MCFPW-60mA	145	17.3
MCFPW-80mA	177	18.6

借助NanoScope Analysis软件计算未改性CFPW、MCFPW-60和MCFPW-80的平均粗糙度$\overline{R}_a$,结果如图6所示。由图6可见:未改性CFPW的平均粗糙度为5.87 nm;经电化学改性后,MCFPW-60及MCFPW-80的平均粗糙度分别增大70.36%、133.39%。该结果进一步证实,电化学改性能够有效提高纤维表面粗糙度。

未改性CFPW、MCFPW-60及MCFPW-80的密度如图7所示。由图7可见,电化学改性可增大CFPW纤维的密度,且随着电流密度的增加呈上升趋势,当电流密度为60、80 mA/cm²时,纤维密度分别增大18.75%和34.13%。这表明,电化学改性不仅能去除CFPW表面的树脂,还会引入电解液中的Cl、O原子,进而增大纤维密度。并且,随着电流密度增大,引入的Cl、O原子数量增多,纤维密度进一步提升。

2.1.3 电化学改性后CFPW的石墨化程度及官能团

未改性CFPW、MCFPW-60和MCFPW-80的



(a) CFPW　(b) MCFPW-60　(c) MCFPW-80

图6　电化学改性前后CFPW的平均粗糙度

Fig. 6　Average roughness of CFPW before and after electrochemical modification

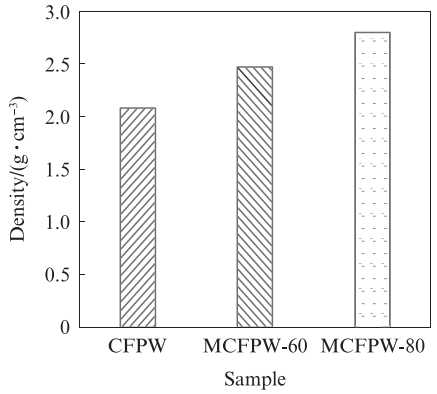
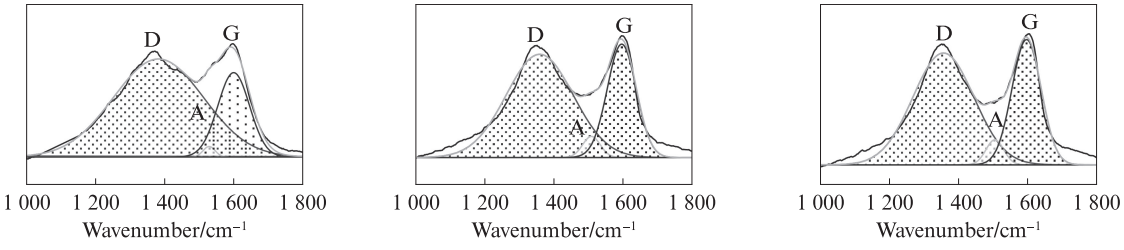


图7　电化学改性前后CFPW的密度

Fig. 7　Density of CFPW before and after electrochemical modification

拉曼光谱如图8所示。对拉曼光谱中的D峰、G峰及A峰进行拟合分析。其中，G峰代表石墨结构，D峰代表石墨边缘(亦称无序结构峰，可反应结构的无序化程度)，D峰与G峰的积分强度比(I_D/I_G)用于表征碳纤维表面石墨微晶的石墨化程度，该比值越小，表明石墨化程度越好。由图8可见，在D峰与G峰之间约1 500 cm^{-1}处存在A峰，其散射值也约为1 500 cm^{-1}，该峰与碳纤维的无定形碳结构和有机官能团的存在相关，利用A峰与G峰积分强度比(I_A/I_G)表征碳纤维表面的非晶态无定形碳质结构和表面有机官能团。

基于此，对这3个特征峰进行积分计算，所得不同波峰的位置、峰面积及积分面积强度比如表3所示。由表3可知：(1)电化学改性显著改变了CFPW的表面结构；改性后，其I_D/I_G减小，表明碳纤维表面石墨化程度提高，无序性降低；随着电流密度的增大，I_D/I_G值持续减小，说明无序碳区域优先于有序区域，被选择性刻蚀氧化(生成CO_2)，而非以碎片形式剥落[15]。这表明，碳纤维表面石墨化程度随电流密度增加而增强[18]。(2)改性后I_A/I_G升高，表明CFPW表面树脂被有效去除，并且生成或暴露出有机官能团。



(a) CFPW　(b) MCFPW-60　(c) MCFPW-80

图8　电化学改性前后CFPW的拉曼光谱

Fig. 8　Raman spectra of CFPW before and after electrochemical modification

表3　电化学改性前后CFPW的拉曼光谱参数

Table 3　Raman spectral parameters of CFPW before and after electrochemical modification

Sample	D peak		G peak		A peak		I_D/I_G	I_A/I_G
	Wavenumber/cm^{-1}	FWHM	Wavenumber/cm^{-1}	FWHM	Wavenumber/cm^{-1}	FWHM		
CFPW	1 382.93	306.84	1 600.02	108.16	1 529.19	40.92	3.30	0.05
MCFPW-60	1 358.69	228.47	1 596.12	98.87	1 508.52	60.12	2.10	0.11
MCFPW-80	1 356.33	207.25	1 597.10	99.61	1 504.83	60.49	1.86	0.12

Note：FWHM—Width of the wavelength or wavenumber range corresponding to half-maximum intensity of spectral peak.

采用FTIR对改性前后CFPW的官能团变化情况展开进一步分析，结果如图9所示。由图9可见：电化学改性后的CFPW红外光谱中出现新的特征峰。具体而言，在1 384 cm^{-1}处出现—OH的伸缩振动吸收峰，1 620 cm^{-1}处出现C=C拉伸振动峰；同时，在3 410 cm^{-1}处引入了羧基氧的—OH伸缩振动峰，这表明电化学改性成功在CFPW表面引入了含氧官能团；此外，800 cm^{-1}处出现C—Cl拉伸振动峰，该峰可能是除NaCl中Cl键外的另一种形式[19]。当CFPW作为电化学阳极进行电解时，在Cl^-存在的条件下，阳极区域会生成Cl_2，部分Cl_2与水反应生成强氧化性的HClO。生成的Cl_2和HClO可能破坏树脂，其还原产物Cl^-形成C—Cl拉伸振动峰。随着电流密度的增大，C—Cl拉伸振动峰增强，氧化程度加深，此时会生成更多Cl_2和HClO来刻蚀树脂，进而改善纤维表面的化学活性。

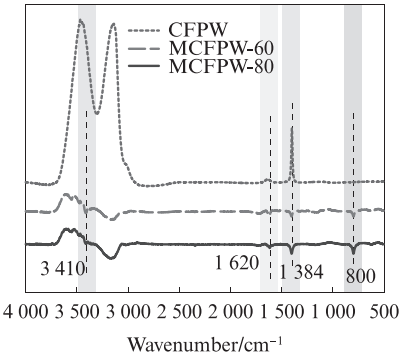


图9 电化学改性前后CFPW的傅里叶红外光谱

Fig. 9 FTIR spectra of CFPW before and after electrochemical modification

2.2 电化学改性后CFPW对水泥基材料性能的影响

2.2.1 电化学改性后CFPW对水泥基材料流动度的影响

图10为电化学改性前后CFPW对水泥基材料流动性的影响。由图10可见：(1)掺入未改性CFPW、MCFPW-60及MCFPW-80后，水泥基材料的流动性均有所降低；当碳纤维掺量为0.3%时，这3种材料对应的水泥基材料流动性差异不大；(2)当电流密度从60 mA/cm^2增至80 mA/cm^2时，掺入改性CFPW的水泥材料流动性会进一步降低；当碳纤维掺量为1.0 %时，与掺入未改性CFPW的水泥基材料相比，掺入MCFPW-60及MCFPW-80的水泥基材料，流动度分别降低15.15%和12.12%。这归因于电化学改性过程：树脂被去除后，纤维基体暴露出来，这极大地增加了纤维表面的粗糙度，改善了纤维的润湿性，进而增强了其亲水性。如此一来，水分更容易渗透到CFPW内部，导致体系中的自由水含量减少，最终使得水泥基材料的流动性下降。

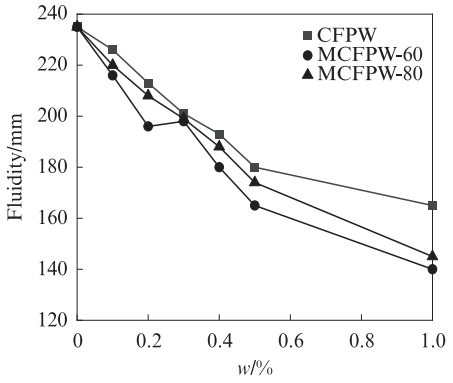


图10 电化学改性前后CFPW对水泥基材料流动性的影响

Fig. 10 Effect of CFPW before and after electrochemical modification on fluidity of cement-based materials

2.2.2 电化学改性后CFPW对水泥基材料力学性能的影响

图11为电化学改性前后CFPW对水泥基材料力学性能的影响。

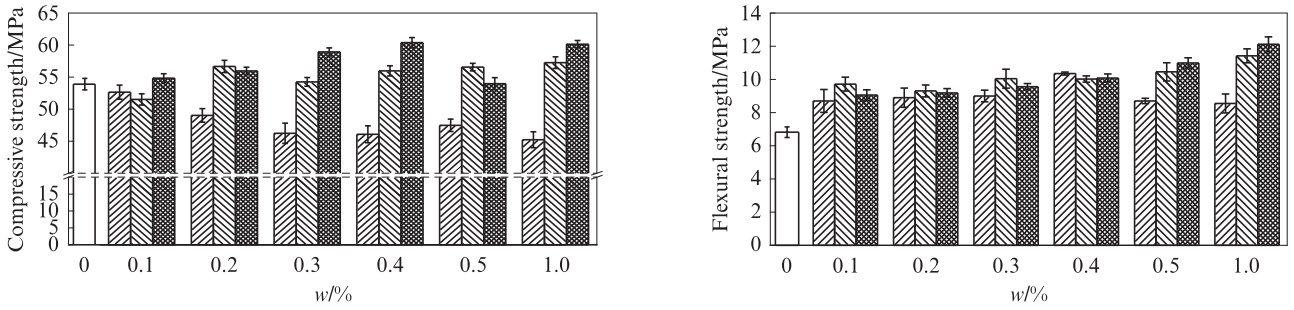
由图11(a)可见：(1)电化学改性CFPW可提升水泥基材料的抗压强度。(2)掺入MCFPW-60后，水泥基材料的抗压强度显著增强(碳纤维掺量为0.1%时除外)，当纤维掺量为1.0%时，抗压强度增幅最大，为10.07%。(3)掺入0.4% MCFPW-80后，水泥基材料的抗压强度增幅最大，为31.05%。这可能是由于电化学改性增大了纤维表面的粗糙度，改善了纤维与水泥基体的黏结性能[20]，进而使水泥基材料的抗压强度有所提升。

由图11(b)可见：除碳纤维掺量为0.4%的情况外，改性CFPW均能提升水泥基材料抗折强度，且随纤维掺量的增加，抗折强度持续升高；掺入MCFPW-60及MCFPW-80的水泥基材料抗折强度的最大增幅分别达67.44%和77.63%。这是因为电化学改性可剥离纤维表面树脂并增大其粗糙度[21]，从而显著改善纤维-水泥浆体的界面黏结性能。

图12为电化学改性前后CFPW-基体的界面形貌。由图12可见：未改性CFPW因环氧树脂的阻碍，在受力时易被拔出；经电化学改性后，随着电流密度的增加，树脂表面的剥离效果愈发明显，纤维表面性能得到进一步改善，进而增强了其与水泥基材料的黏结性[22]，最终提升了抗折强度。

2.2.3 电化学改性后CFPW对水泥基材料导电性能的影响

图13为不同养护龄期下电化学改性前后CFPW对水泥基材料电阻率的影响。由图13可见：(1)随着

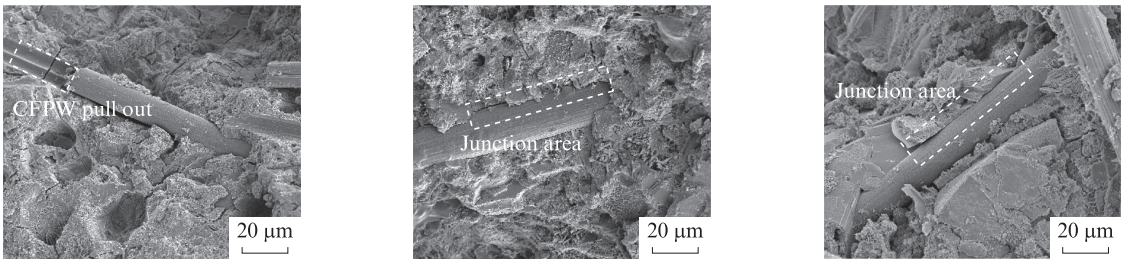


(a) Compressive strength　　(b) Flexural strength

□JZ; ▨CFPW; ▧MCFPW-60; ▩MCFPW-80

图11　电化学改性前后CFPW对水泥基材料力学性能的影响

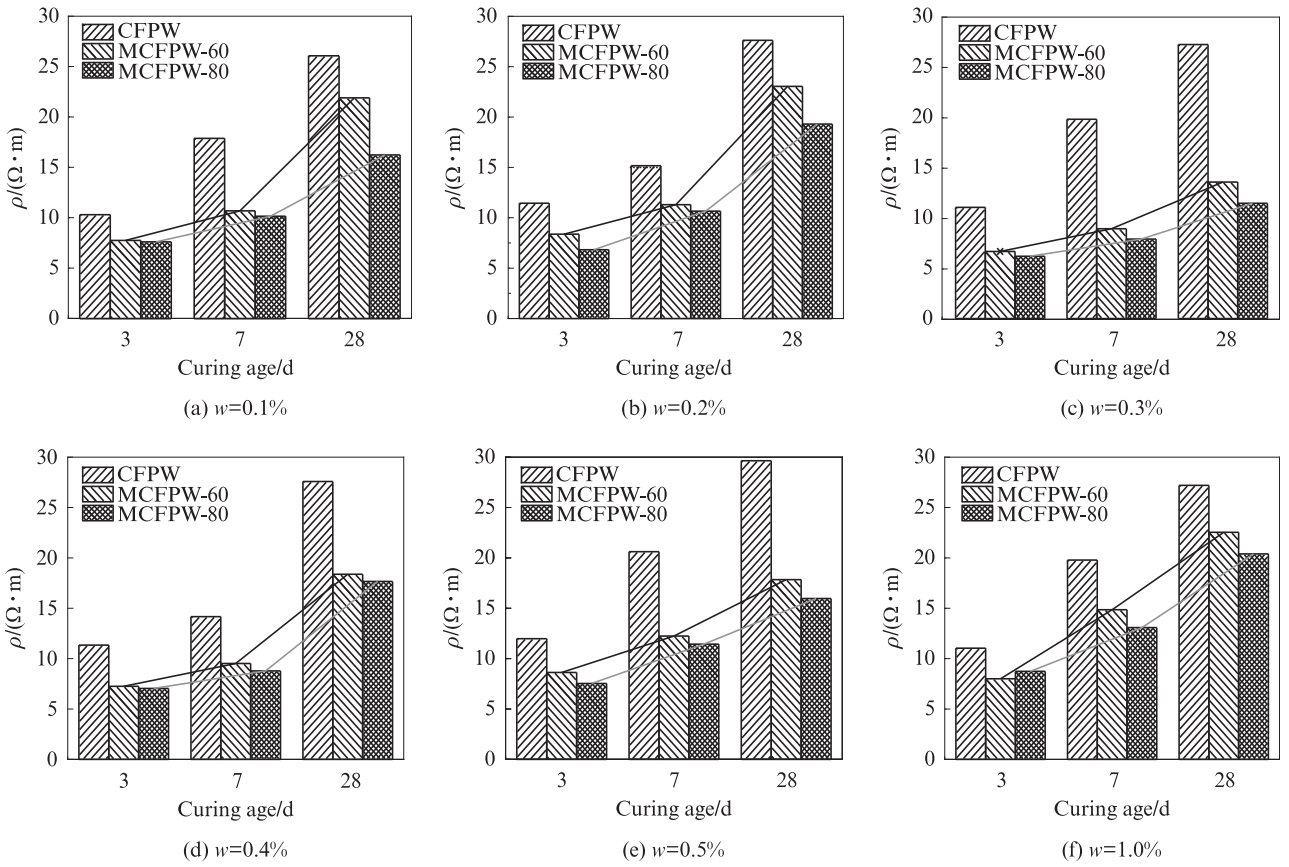
Fig. 11　Effect of CFPW before and after electrochemical modification on mechanical properties of cement-based materials



(a) CFPW　　(b) MCFPW-60　　(c) MCFPW-80

图12　电化学改性前后CFPW-基体的界面形貌

Fig. 12　Morphology of the interface between CFPW before and after electrochemical modification and the matrix of cement-based materials



(a) w=0.1%　(b) w=0.2%　(c) w=0.3%

(d) w=0.4%　(e) w=0.5%　(f) w=1.0%

图13　不同养护龄期下电化学改性前后CFPW对水泥基材料导电性能的影响

Fig. 13　Effect of CFPW before and after electrochemical modification on the electrical conductivity of cement-based materials under different curing ages

养护龄期的延长，掺入未改性CFPW、MCFPW-60及MCFPW-80的水泥基材料，其电阻率均呈上升趋势。(2)以0.2%碳纤维掺量为例，养护3 d时，掺入MCFPW-60和MCFPW-80的水泥基材料电阻率分别为8.37、6.83 Ω·m；养护至7 d时，二者电阻率分别增加34.93%和55.93%；养护至28 d时，电阻率增幅进一步扩大，分别达175.10%和182.58%。(3)随着电流密度的增大，水泥基材料的导电性能进一步提升，在0.3%碳纤维掺量下，电阻率下降幅度最为明显，为57.94%。

3 结论

(1)电化学改性后，CFPW表面环氧树脂的去除效果得到显著提升。随着电流密度的增大，纤维表面环氧树脂的刻蚀效应愈加显著，表现为接触角减小，润湿性能改善，同时表面粗糙度增大。此外，改性过程中引入了Cl、O原子，使CFPW的密度显著提高。通过拉曼光谱和傅里叶变换红外光谱分析发现，改性后的CFPW石墨化程度有所增强，并且在表面引入了新的含氧官能团。

(2)将电化学改性CFPW掺入水泥基材料后，该材料流动度下降，而抗压强度和抗折强度均显著提高。其中，掺入MCFPW-80的水泥基材料，其抗压强度和抗折强度提升幅度最大，分别达31.05%和77.63%。此外，随着养护龄期的延长，水泥基材料的电阻率呈上升趋势。并且，电流密度越大，水泥基材料的导电性能的提升效果越明显。当MCFPW-80掺量为0.3%时，水泥基材料的电阻率降低57.94%。

(3)尽管电化学改性CFPW能够有效去除表面环氧树脂，进而增强水泥基材料的力学性能和导电性能，但是目前该改性CFPW对混凝土性能的影响规律尚不明确。此外，改性CFPW掺入混凝土后引发的电热性能、压敏性能，以及对混凝土耐久性的作用效果，均有待开展更为深入的研究。

参考文献：

[1] D'ALESSANDRO A, MEONI A, ROMERO R R, et al. Full-scale testing and multiphysics modeling of a reinforced shot-earth concrete vault with self-sensing properties [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(10):105116.

[2] QIN S F, QIU J S. Relationship between electrical resistance and single CNT fiber displacement relative to cement matrix — New insights on the electric polarization and spreading at debonded/slipped interface[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 152, 105651.

[3] WANG W B, LIN Y D, HU Y, et al. The effect of fatigue loading on the mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced composites[J]. Composites Communications, 2025, 53, 102231.

[4] LEFEUVRE A, GARNIER S, JACQUEMIN L, et al. Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050[J]. Resources Conservation & Recycling, 2019, 141:30-39.

[5] JIN Z, VENKATA S C, HAO W, et al. Current status of carbon fiber and carbon fiber composites recycling[J]. Composites Part B:Engineering, 2020, 193:108053.

[6] LI A Y, WANG Y, ZHANG S H, et al. Study on the mechanical and electrical conductivity properties of waste short carbon fibers concrete and the establishment of conductivity models[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 95, 110296.

[7] XU Z C, YU H, JIA M J, et al. Enhancing mechanical properties of cementitious composites by boron nitride nanosheets modified carbon fiber[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 153, 105685.

[8] 谭忆秋，刘凯，王英园. 碳纤维/石墨烯导电沥青混凝土的非线性伏安特性[J]. 建筑材料学报，2019，22(2):278-283.
TAN Yiqiu, LIU Kai, WANG Yingyuan. The nonlinear voltage-current characteristics of carbon fiber/graphene conductive asphalt concrete[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):278-283.(in Chinese)

[9] 罗素蓉，姚佳敏，周恩泉，等. 氧化石墨烯改性纤维增强水泥基材料的拉伸性能[J]. 建筑材料学报，2024，27(5):400-407.
LUO Surong, YAO Jiamin, ZHOU Enquan, et al. The tensile properties of graphene oxide modified fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(5):400-407. (in Chinese)

[10] WANG Y, SUN L L, LI A Y, et al. Effect of modified recycled carbon fibers on the conductivity of cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2024, 415:135033.

[11] LEE H, OHSAWA I, TAKAHASHI J. Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties [J]. Applied Surface Science, 2015, 328:241-246.

[12] PERRARD A, RETAILLEAU L, BERJOAN R, et al. Liquid phase oxidation kinetics of an ex-cellulose activated carbon cloth by NaOCl[J]. Carbon, 2012, 50(6):2226-2234.

[13] KAREEM A A, HUSSEIN I S, POLU A R, et al. Li_2CO_3 as a modifier for PVA/PVP/PEG blend polymer electrolytes: Effects on structural integrity, electrical performance, thermal behavior and optical properties[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2025, 64(5):735-746.

[14] LI H Y, MARCO L, YANG J, et al. Electrochemical oxidation of recycled carbon fibers for an improved interaction toward alkali-activated composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,368:133093.

[15] WEN S H, CHUNG D D L. Electric polarization in carbon

fiber-reinforced cement[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(1):141-147.

[16] 葛楠, 胡卓君, 刘艳明, 等.碳纳米纤维改性水泥基材料的变形及抗裂性能[J].建筑材料学报, 2022, 25(10):1015-1020.
GE Nan, HU Zhuojun, LIU Yanming, et al. Deformation and crack resistance properties of cement-based materials modified with carbon nanofibers[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1015-1020. (in Chinese)

[17] SUN Y, LU Y G, YANG C L. Stripping mechanism of PAN-based carbon fiber during anodic oxidation in NaOH electrolyte[J]. Applied Surface Science, 2019, 486:128-136.

[18] 王志航, 白二雷, 周俊鹏, 等. VAE乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6):487-495.
WANG Zhihang, BAI Erlei, ZHOU Junpeng, et al. The mechanical properties of VAE latex powder/carbon fiber composite modified concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6):487-495. (in Chinese)

[19] SUN H F, WEI L L, ZHU M C, et al. Corrosion behavior of carbon fiber reinforced polymer anode in simulated impressed current cathodic protection system with 3% NaCl solution[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112, 538-546.

[20] LI H Y, MARCO L, YANG J, et al. Electrochemical oxidation of recycled carbon fibers for an improved interaction toward alkali-activated composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368, 133093.

[21] 马彬, 张永, 黄启钦, 等.纤维导电性对地聚合物压敏行为的影响[J].建筑材料学报, 2024, 27(3):223-229.
MA Bin, ZHANG Yong, HUANG Qiqin, et al. The influence of fiber conductivity on the piezoresistive behavior of geopolymers [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(3):223-229. (in Chinese)

[22] 赵昕, 黄存旺, 傅佳丽, 等. 石墨烯水泥基复合材料的电学性能[J].建筑材料学报, 2022, 25(1):8-15.
ZHAO Xin, HUANG Cunwang, FU Jiali, et al. Electrical properties of graphene cement-based composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):8-15. (in Chinese)