文章编号:1007-9629(2025)06-0573-08

碳纤维长度对硬化水泥净浆微波性能的影响

席 翔^{1,2}, 赵子杰³, 殷昊天³, 张文一⁴, 王 琳^{5,*}

 (1.安徽海螺产业技术研究院有限公司,安徽 芜湖 241002; 2.江苏省建筑科学研究院有限公司 高性能土木工程材料国家重点实验室,江苏 南京 210008; 3.河海大学 材料科学与工程学院,江苏 常州 213000; 4.北京理工大学 机电学院,北京 100081; 5.东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:针对不同长度的碳纤维改性硬化水泥净浆(CFRC),分析了碳纤维长度对其力学性能、介电性能和微波性能的影响规律,揭示了碳纤维长度对CFRC微波性能的影响机理。结果表明:CFRC的抗压强度和抗折强度随着碳纤维长度的增加而先增大后减小,当碳纤维长度为1mm时,材料的力学性能最优;CFRC对电磁波的损耗机制与碳纤维长度有关,当纤维长度为1、9、12mm时,损耗以反射为主,当纤维长度为6mm时,损耗以吸收为主;CFRC对电磁波的反射归因于阻抗不匹配,吸收则归因于偶极极化、弛豫极化和空间电荷极化。

关键词:水泥基材料;碳纤维;微波;电磁屏蔽;介电性能
 中图分类号:TU528.58
 文献标志码:A
 doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.011

Effects of Carbon Fiber Length on Microwave Behavior of Hardened Cement Paste

XI Xiang^{1,2}, ZHAO Zijie³, YIN Haotian³, ZHANG Wenyi⁴, WANG Lin^{5,*}

 Anhui Conch Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhu 241002, China; 2. State Key Laboratory of High-Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China;

4. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

5. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Carbon fibers, with different lengths, were used to modify the cement paste. The effects of carbon fiber length on the microwave behavior of carbon fiber-reinforced cement paste(CFRC) were studied by analyzing how the length affects the mechanical, dielectric, and microwave behavior. The results show that the compressive strength and flexural strength of CFRC increase first and then decrease with increasing carbon fiber length, such that the highest strengths are obtained at a length of 1 mm. The electromagnetic interference shielding mechanism of CFRC is dependent on carbon fiber length: the reflection is dominant at lengths of 1, 9, 12 mm, while absorption is dominant at a length of 6 mm. The reflection of CFRC to electromagnetic waves is due to the mismatch of impedance, while the absorption of electromagnetic waves is due to dipolar polarization, relaxation polarization, and space-charge polarization.

Key words: cement-based material; carbon fiber; microwave; electromagnetic interference shielding; dielectric property

收稿日期:2024-08-04;修订日期:2025-01-03

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2024M751209);江苏省自然科学基金资助项目(BK20230963)

第一作者:席 翔(1993—),男,广西百色人,安徽海螺产业技术研究院研究员,博士。E-mail:1264201781@qq.com

通讯作者:王 琳(1990-),女,江苏盐城人,东南大学讲师,博士。E-mail:linwang@windowslive.com

材料的微波性能是其与电磁波相互作用时所展 现出的性能。电磁屏蔽材料和吸波材料均体现了材 料的微波性能。对于需要"隐身"的建筑,如军用机 场、大坝等要求建筑材料能够最大程度地吸收电磁 波;而民用领域更多允许大部分电磁波被反射,从而 保护建筑物内的电子设备或人员不受外界电磁波的 干扰^[1-3]。

水泥基材料因导电性能较弱^[4]以及磁性响应不 显著,致使其在其微波频段的表现较差。提高水泥 基材料的导电性和/或磁性是提高其微波性能的有 效方法。为了提升水泥基材料的微波性能,研究人 员选择将碳材料掺入其中。如黄少文等^[5]在水泥浆 体中掺入15%的磁性膨胀石墨后,获得的总屏蔽效 能为30.2 dB;王飞等^[6]发现,当碳纤维掺量为0.3% 时,混凝土在2 GHz条件下的屏蔽效能为46.5 dB,较 对照组提高了约2.5倍;Xi等^[7]研究揭示,通过在碳纤 维表面镀上1层金属镍,可以有效提高碳纤维的介电 常数;Özturk等^[8]研究还发现,镀镍碳纤维比普通碳 纤维更能增强水泥基材料的电磁屏蔽效能。

由于碳纤维不具备磁性特性,碳纤维改性水泥 净浆(CFRC)的电磁屏蔽机制主要依赖于其导电性 和介电性能。具体而言,CFRC的导电性能越强,能 够反射的电磁波就越多;而那些未被反射的电磁波 会在CFRC内部被吸收,这一吸收过程涉及偶极极 化和弛豫极化等机制^[9-10]。截至目前,关于碳纤维长 度如何影响CFRC电磁屏蔽性能的研究尚未见诸报 道。因此,本文旨在探讨碳纤维长度对CFRC复介 电常数及电磁损耗的影响规律,进而揭示碳纤维长 度对CFRC微波性能的作用机理。

1 试验

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5级普通硅酸盐水泥;碳纤维为 东丽短切碳纤维,其前驱体为聚丙烯腈,密度为 1.76 g/cm³,弹性模量为 230 GPa,抗拉强度为 3 530 MPa,单根碳纤维直径为7 µm,纤维长度 *l*为1、 6、9、12 mm;硅灰由河南义翔新材料有限公司提供,外 观呈纯白色,比表面积为21 m²/g;试验用水为自来水。

1.2 试验方案

1.2.1 CFRC的制备

制备水泥净浆的水胶比(质量比,文中涉及的水胶 比、含量等除特别注明外均为质量比或质量分数)为 0.40,硅灰含量为20%(以水泥质量计),碳纤维掺量 (体积分数)为0.8%。试件制备流程如下:首先,将水 泥、硅灰和短切碳纤维混合并搅拌均匀;然后,加入称 量好的自来水,利用水泥净浆/砂浆搅拌器,将其搅拌 均匀;最后,倒入尺寸为22.9 mm×10.2 mm×4.0 mm (用于电磁屏蔽测量)、40 mm×40 mm×40 mm(用 于抗压强度测量)和40 mm×40 mm×160 mm(用于 抗折强度测量)的模具中,先在室温且相对湿度为 70%的环境下静置24 h,脱模后再置于20℃水中养 护28 d。

1.2.2 微结构表征

采用Zeiss Gemini 300型扫描电镜(SEM)观察 碳纤维的表面和截面形貌,联合X'Pert PRO MPD 型X射线衍射仪(XRD)和LabRam HR Evolution型 拉曼光谱仪(Raman)分析碳纤维的晶体结构。将养 护28d的试件破碎,取薄片样品,用SEM观察其微 观形貌。将破碎的样品研磨成粉,用XRD分析水化 产物的物相结构。

1.2.3 力学性能试验

参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,利用 TYE-300D 型电脑全自动水泥胶砂抗压试验机测试试件的抗压强度和抗折强度。

1.2.4 微波性能测试

采用 PNA-N5244A 型矢量网络分析仪,基于波导法测量 CFRC 的微波性能。微波性能测试示意图 如图 1 所示。





散射参数S是用于描述微波网络中信号散射特性的一组参数。在微波频段,由于无法直接测量电压和电流,S参数提供了一种方便的方式来表征网络性能。它描述了输入信号在网络端口之间的反射和传输情况。例如,S₁₁表征端口1的反射,S₂₁表征从端口1到端口2的传输,其余编号依此类推。采用矩形波导法测试样品的S₁₁和S₂₁,再通过得到的反射系数 *R*、透射系数T和吸收系数A计算出反射效能*R*、吸收

2

多犁沟。

结果与讨论

2.1 碳纤维的微观形貌

效能 A'和总效能 T'。需要说明的是,当电磁总损耗 大于 10 dB 时,因多级反射造成的损耗 M'可忽略不 计。以上各物理量计算式简化为:

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \tag{1}$$

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \tag{2}$$

$$A = 1 - R - T$$
(3)
$$R' = -10 \log(1 - R)$$
(4)

$$R' = -10 \lg(1-R)$$
(4)

$$A' = -10 \lg[T/(1-R)]$$
(5)

$$T' = A' + R' + M' \tag{6}$$



图 2 碳纤维的微观形貌 Fig. 2 Microscopic morphology of carbon fiber

图 3 为碳纤维的 XRD 图谱和拉曼光谱。由图 3 可见:(1)在 2θ=23°附近出现1个强衍射峰,为石墨 的(002)晶面;在 2θ=44°附近出现1个较弱的衍射 峰,为石墨的(100)晶面。(2)在约1350 cm⁻¹处存在 特征缺陷诱导缝(D峰),对应于具有 A_{1g}对称性的石 墨晶格振动模式,是石墨晶体颗粒减小而出现的无 序态或缺陷态的特征峰^[10];在1580 cm⁻¹处出现的特征峰(G峰)来源于 sp²杂化碳原子在理想石墨晶格基面上的伸缩振动,其峰强度可用来表征 sp²杂化碳原子结构的完整程度^[11];在2670 cm⁻¹处出现的特征峰(2D峰),用于衡量碳化过程中纳米石墨烯片的堆叠程度^[12]。

碳纤维在制备过程中,为了保持其束丝状态,通

常会外覆一层高分子材料。然而,这层高分子材料

具有疏水性质,导致碳纤维在水泥浆体或水中的分

散性能下降。图2为碳纤维的微观形貌。由图2可见,碳纤维形态均匀,去胶后的纤维表面粗糙,有较



Fig. 3 XRD pattern and Raman spectrum of carbon fiber

2.2 碳纤维改性硬化水泥净浆的微观形貌

图 4 为 CFRC 的微观形貌。由图 4 可见,短切碳 纤维良好地分散在水泥基体中,纤维周围被水化产 物包裹,在纤维和基体接触的界面附近出现裂缝。

图 5 为 CFRC 的 XRD 图谱。由图 5 可见:水泥的水化产物晶体包括钙矾石(AFt)、氢氧化钙(CH)、

方解石(calcite),以及部分未反应的硅酸二钙(C₂S) 和硅酸三钙(C₃S)等,符合通用硅酸盐水泥水化产物 的物相组成与结构^[13-14];在 2θ=20°~40°处出现了特 征非晶相结构,表明CFRC中还存在非晶态水化产 物。由于具有化学惰性的碳纤维不与水泥中的熟料 发生反应,因此碳纤维的制备参数对水泥水化产物



图 4 CFRC 的微观形貌 Fig. 4 Microscopic morphology of CFRC (*l*=12 mm)



的物相结构影响很小。

2.3 力学性能

图 6 为碳纤维长度对 CFRC 抗压强度和抗折强 度的影响。

由图 6(a)可见:掺入碳纤维可提高硬化水泥净 浆的抗压强度,当碳纤维长度为 1、6、9、12 mm 时,



CFRC的28d抗压强度 $f_{c,28}$ 分别较对照组(control)提高91.0%、63.0%、49.0%和34.0%;CFRC的抗压强度随着碳纤维长度的增大而下降,当碳纤维长度由1mm增至6、9、12mm时,CFRC的 $f_{c,28}$ 分别降低11.0%、20.0%和28.0%。

由图 6(b)可见:掺入碳纤维可提高硬化水泥净 浆的抗折强度,当碳纤维长度为1、6、9、12 mm时, CFRC 的 28 d 抗折强度 $f_{1,28}$ 分别较对照组提高 98.0%、89.0%、75.0%和59.0%;CFRC的抗折强度 随着碳纤维长度的增大而下降,当碳纤维长度由1 mm增 至 6、9、12 mm时,CFRC的 $f_{1,28}$ 分别降低4.5%、 11.0%和20.0%。

碳纤维长度的增加导致其在水泥基体中的分散 性变差。具体表现为较长的碳纤维容易相互缠绕, 形成尺寸较大的团聚体。由于这些团聚体难以被水 泥浆体完全渗透并浸润,他们会在水泥基体中引入 宏观缺陷,从而最终导致硬化水泥净浆强度下降。



图 6 CFRC 的力学性能 Fig. 6 Mechanical properties of CFRC

2.4 微波性能

2.4.1 介电性能

材料的复介电常数由实部ε'和虚部ε"组成,其中 实部与能量存储有关,虚部与介电损耗有关。一般 用损耗角δ的正切值 tan δ表征材料的能量损耗,计 算式为:

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \tag{7}$$

图7为碳纤维长度对CFRC介电性能的影响。

由图 7(a)可见:(1)对照组的ε[']随着频率f的增大 而缓慢下降,总体上维持在 1.5~2.0 F/m 之间。文 献[15]报道了硬化水泥净浆在1 MHz时的相对介电 常数为9.2,从频率维度上看此结果与本文接近,材料 的介电常数一般随着频率的增大而减小。(2)掺入碳 纤维后,CFRC的ε'增大,这是碳纤维的介电常数较 大所致。(3)CFRC的介电谱中出现多个明显的共振 弛豫峰。在任一频率下,CFRC的ε'均随碳纤维长度 增大而先增后减;当碳纤维长度为6 mm时,CFRC 的ε'达到最大值。

由图 7(b)可见:(1)CFRC 的 ε"随频率 f 的变化 规律与 ε'类似,其曲线也出现了多个极化弛豫过程。 随着碳纤维长度的增大,CFRC 中碳纤维相互搭接形 成导电网络的机会也会随之提升,进而增强了CFRC 的电导率。同时,电荷在电场作用下的迁移能力也 得到了加强,因此,CFRC中因焦耳热效应所导致的 电导损耗也相应增加。(2)在任一频率下,CFRC的ε" 随着碳纤维长度的增大而增大,与ε'的变化规律不 同。这是因为两者的影响机理不同:ε'的变化仅与极 化有关,而ε"的变化不仅与极化有关,还与电导 有关。

由图 7(c)可见:对照组的能量损耗处于最低水 平,这归因于其具有较高的电阻率;当碳纤维长度为 12 mm时,CFRC的能量损耗最大。



Fig. 7 Dielectric properties of CFRC

对于在储能领域应用的CFRC,例如作为水泥基 电池或超级电容器的电极材料时,通常期望其具有 较高的能量存储,同时保持较低的介电损耗^[16]。

采用经典的 Debye 弛豫理论进一步研究 CFRC 的极化与弛豫过程,计算式为:

$$\left(\boldsymbol{\varepsilon}' + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{s} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty}}{2}\right)^{2} + (\boldsymbol{\varepsilon}'')^{2} = \left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{s} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty}}{2}\right)^{2} \qquad (8)$$

式中: ε, 为静态介电常数; ε...为相对介电常数。

Cole-Cole 图是由物理学家 K.S. Cole 和 R.H. Cole 提出的一种复平面图,用于分析材料的介电弛 豫特性。图中以复介电常数的实部为横轴,复介电 常数的虚部为纵轴,通过绘制半圆或圆弧曲线,来反 映材料的弛豫时间分布及其他介电参数。通常1个 半圆代表1个 Debye 弛豫过程^[17],归因于极化损耗; 而直线部分与电导损耗有关^[18]。

图 8 为 CFRC 的 Cole-Cole 图。由图 8 可见: (1)在对照组中未出现 Debye 圆,表明其能量损耗 主要为电导损耗,这归因于孔隙溶液中的阴阳离 子。(2)对掺加不同碳纤维长度的 CFRC来说,其 Cole-Cole 图均出现多个 Debye 圆,表明存在多个 极化弛豫过程。这些物理现象的本质可归因于 CFRC 中因结构异质性(诸如碳纤维与水泥基体 间的界面效应)所导致的电荷非均匀分布特性。 此特性通过空间电荷极化与偶极子极化的双重机 制共同作用,最终促使该体系的能量损耗显著 上升。



2.4.2 电磁屏蔽性能

图 9 为碳纤维长度对 CFRC 吸收系数和反射系数的影响。由图 9 可见:(1) 对照组的反射系数大于 吸收系数,表明对照组的电磁屏蔽损耗以反射为主, 这是材料阻抗与周围环境阻抗的不匹配所致。(2) 掺加不同长度的碳纤维后,各 CFRC 的吸收系数均 大于对照组,因为 CFRC 的 ϵ' 更大(图7(a)); CFRC 的吸收系数随着碳纤维长度的增大而先增后减,当 碳纤维长度为 6 mm 时获得最大值,与 ϵ' 随碳纤维 长度变化的规律一致,表明 ϵ' 是影响 CFRC 吸收电

磁波的主要因素。(3)CFRC的反射系数 R 随着碳纤 维长度的增大而先减后增,这与 ε" 随碳纤维长度变 化的规律不同,因为反射系数主要受 CFRC 电导率 的影响, 而 ε" 受电导率和偶极摩擦共同影响, 偶极摩 擦主要影响吸收系数而非反射系数。

通过反射系数、吸收系数和透射系数可计算 CFRC的电磁屏蔽效能。图 10 为碳纤维长度对 CFRC电磁屏蔽效能的影响。

由图 10(a)可见:(1)掺加不同长度碳纤维后,各 CFRC 的总效能 T'均远大于对照组,在X波段内,





CFRC获得的最大总效能为 31.3 dB, 而对照组最大 总效能仅为 6.2 dB, 表明掺加碳纤维能够显著提高硬 化水泥净浆的电磁屏蔽效能。(2)在整个测试频率范 围内, CFRC的总效能 T'并未展现出与碳纤维长度 之间明确的变化趋势。具体而言, 当碳纤维长度为 6、9、12 mm时, CFRC的总效能随着频率的增大而缓 慢下降。相比之下,碳纤维长度为1 mm的 CFRC, 在整个 X 波段内, 其总效能稳定维持在 30~31 dB 之间。

由图 10(b)可见:当碳纤维的长度为6 mm 时, CFRC 的吸收效能 A'最大,与ε' 随碳纤维长度的变 化规律一致,表明ε'是影响 CFRC 吸收效能的主要因 素。电磁波中的交流电场迫使 CFRC 中的电荷发生 极化,ε'值越大,极化越容易发生^[10]。

由图 10(c)可见:当碳纤维长度为1 mm 时,

CFRC的反射效能*R*'最大,且在整个频率测量范围内,CFRC的*R*'均小于*A*'。

由于本研究中CFRC的反射系数R大于吸收系 数A,因此其电磁屏蔽的主要机制为反射,而当反射之 后剩余的电磁波进入到CFRC内部时,其主要机制才 转变为吸收。此时,吸收效能的机制主要为CFRC的 介电性能与电磁场中电场的相互作用,这种相互作用 通常发生在异质性,如晶界、相界、纤维-基体界面等 处。碳纤维的长度影响其在水泥基体中的分散,当碳 纤维长度过小时(1mm),纤维在水泥基体中未能充分 搭接形成闭合回路(涡电流损耗);而当纤维长度过大 时(12mm),纤维在水泥基体中的分散性变差,导致团 聚体出现从而滋生较大的孔隙,不利于对电磁波的吸 收;只有当碳纤维长度适中时(6mm),才能在保证分 散良好的前提下增加对电磁波的吸收。



3 结论

(1)碳纤维长度显著影响 CFRC 的力学性能。 具体而言, CFRC 的抗压强度和抗折强度均随着碳 纤维长度的增大而先增后减, 当碳纤维长度为1 mm 时均达到最大值。当碳纤维长度过大时,碳纤维在 水泥浆体中的分散性变差,导致 CFRC 力学性能

下降。

(2)CFRC复介电常数的实部ε'随着碳纤维长度 的增大而先增后减,虚部ε"则随着碳纤维长度的增 大而增大。二者变化规律不同,归因于影响机制不 同,ε'与极化发生的难易程度有关,而ε"与电导和偶 极摩擦有关。CFRC中的弛豫极化过程导致其介电 参数在某些频率处出现突变。碳纤维长度对CFRC 能量损耗的影响规律不明显。

(3)碳纤维长度对 CFRC 的电磁屏蔽机制有显 著影响。当碳纤维长度为6 mm时, CFRC 对电磁波 的损耗以吸收为主; 而当碳纤维长度为1、9、12 mm 时,该损耗以反射为主。CFRC 对电磁波的反射归因 于阻抗不匹配, 吸收则归因于偶极极化、弛豫极化和 空间电荷极化。

参考文献:

- [1] 马超, 解帅, 王永超, 等. 用于红外和雷达波隐身的水泥基复 合材料[J]. 材料导报, 2024, 38(5):26-34.
 MA Chao, XIE Shuai, WANG Yongchao, et al. Cement-based composite materials for infrared and radar wave stealth [J].
 Materials Reports, 2024, 38(5):26-34. (in Chinese)
- [2] 崔宝栋,刘军,李思琪,等.硫氧镁泡沫水泥吸波材料的制备及性能[J].建筑材料学报,2024,27(4):291-298.
 CUI Baodong, LIU Jun, LI Siqi, et al. Preparation and properties of magnesium oxysulfide foam cement microwave absorbing material [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27 (4):291-298. (in Chinese)
- [3] 魏胜斌,谢建斌,管洪涛,等.钢丝网增强复合石墨烯-铁氧体水泥砂浆电磁防护性能[J].建筑材料学报,2023,26(12): 1237-1246.

WEI Shengbin, XIE Jianbin, GUAN Hongtao, et al. Electromagnetic protection performance of steel wire mesh reinforced composite graphene-ferrite cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(12):1237-1246. (in Chinese)

- [4] 何丽,陈庆,蒋正武.基于水化进程的硬化水泥浆体电导率动态计算模型[J].建筑材料学报,2022,25(1):1-7.
 HE Li, CHEN Qing, JIANG Zhengwu. Hydration based dynamic calculation model for electric conductivity of hardened cement paste [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1): 1-7. (in Chinese)
- [5] 黄少文,胡隽,邓敏,等.掺磁性膨胀石墨水泥浆体的电磁屏 蔽效能[J].建筑材料学报,2014,17(3):450-453.
 HUANG Shaowen, HU Jun, DENG Min, et al. Electromagnetic shielding effectiveness of cement paste added with magnetic expanded graphite [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (3):450-453. (in Chinese)
- [6] 王飞,代伟,毛英辉,等.防护工程电磁屏蔽混凝土电磁损耗及屏蔽性能研究[J].混凝土,2022(12):185-188.
 WANG Fei, DAI Wei, MAO Yinghui, et al. Study on electromagnetic loss and shielding performance of concrete in protective engineering [J]. Concrete, 2022(12):185-188. (in Chinese)
- [7] XI X, CHUNG D D L. Effect of nickel coating on the stress-dependent electric permittivity, piezoelectricity and

piezoresistivity of carbon fiber, with relevance to stress self-sensing [J]. Carbon, 2019, 145:401-410.

- [8] ÖZTURK M, CHUNG D D L. Enhancing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-fiber reinforced cement paste by coating the carbon fiber with nickel [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41:102757.
- [9] LEE J, KANG H, SHIN B G, et al. Cement composites with carbon fiber for electromagnetic interference shielding applications [J]. Carbon, 2024, 220:118861.
- [10] WANASINGHE D, ASLANI F, MA G. W Electromagnetic shielding properties of carbon fibre reinforced cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 120439.
- [11] 杨宁,丁冬海,李子沛,等.高温处理对活性炭纤维毡电磁屏 蔽性能的影响[J].硅酸盐学报,2021,49(6):1143-1150.
 YANG Ning, DING Donghai, LI Zipei, et al. Effect of high-temperature treatment on electromagnetic shielding performance of activated carbon fiber felt [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(6):1143-1150. (in Chinese)
- [12] XI X, ÖZTÜRK M, CAI J M, et al. First study of quantitative relationship between electric polarization and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness of CFRP [J]. Carbon, 2024, 225:119095.
- [13] 胡亚茹,杜永康,杨少锋,等.煅烧凝灰岩对水泥水化产物和 硬化体孔结构的影响[J].建筑材料学报,2024,27(1):67-75.
 HU Yaru, DU Yongkang, YANG Shaofeng, et al. Effect of calcined trass on the hydrates of cement and pore structure of hardened paste [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(1): 67-75. (in Chinese)
- [14] 彭小芹,兰聪,王淑萍,等.水化硅酸钙粉体对水泥水化反应 过程及机理的影响[J].建筑材料学报,2015,18(2):195-201.
 PENG Xiaoqin, LAN Cong, WANG Shuping, et al. Effects of the C-S-H powder on the hydration process and mechanism of cement [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2):195-201. (in Chinese)
- [15] HADDAD A S, CHUNG D D L. Decreasing the electric permittivity of cement by graphite particle incorporation [J]. Carbon, 2017, 122:702-709.
- [16] 席翔,赵子杰,王琳,等.水泥基电池和超级电容器的制备及 储能机理的研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(11):3650-3662.
 XI Xiang, ZHAO Zijie, WANG Lin, et al. Energy storage mechanism and preparation of cement-based battery and supercapacitor: A review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(11):3650-3662. (in Chinese)
- [17] WANG Y, WU X, ZHANG W, et al. Fabrication of flower-like Ni_{0.5}Co_{0.5}(OH)₂@PANI and its enhanced microwave absorption performances [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 98:59-63.
- [18] XU R, XU D, ZENG Z, et al. CoFe₂O₄/porous carbon nanosheet composites for broadband microwave absorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427:130796.