

氧化石墨烯碳纤维水泥基材料综述

许文华¹, 王学志¹, 朱安标²

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²上海建工建材科技集团股份有限公司, 上海

收稿日期: 2026年7月3日; 录用日期: 2026年8月4日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

水泥基材料抗压性能优良、成本低廉, 广泛应用于基建工程, 但脆性高、抗裂性差, 难以适配大跨度、智能化高端工程。碳纤维(CF)可提升基体力学、耐久与传感性能, 然而其表面惰性导致界面黏结薄弱, 改性效果受限。氧化石墨烯复配碳纤维(GO-CF)可有效改善两相界面结合。本文综述GO-CF复合增强体制备工艺、界面增强机制及对水泥基材料的提升作用, 探讨聚羧酸减水剂、粉煤灰、硅灰对体系性能的调控效应, 并展望该复合材料后续研究方向。

关键词

氧化石墨烯, 碳纤维, 水泥基材料, 界面改性

Overview of Graphene Oxide Carbon Fiber Cement-Based Materials

Wenhua Xu¹, Xuezhi Wang¹, Anbiao Zhu²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Shanghai Construction Building Materials Technology Group Co., Ltd., Shanghai

Received: July 3, 2026; accepted: August 4, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

Cement-based materials, with their excellent compressive properties and low cost, are widely used in infrastructure projects. However, due to their high brittleness and poor crack resistance, they are difficult to adapt to large-span and intelligent high-end projects. Carbon fiber (CF) can enhance the mechanical, durability, and sensing properties of the matrix, but its surface inertness leads to weak interfacial bonding, limiting the modification effect. Graphene oxide (GO) compounded with carbon fiber (GO-CF) can effectively improve the interfacial bonding between the two phases. This

paper reviews the preparation process, interfacial reinforcement mechanism, and enhancement effect on cement-based materials of the GO-CF composite reinforcement system. It discusses the regulating effects of polycarboxylate superplasticizers, fly ash, and silica fume on the system's performance, and looks forward to the future research directions of this composite material.

Keywords

Graphene Oxide, Carbon Fiber, Cement-Based Materials, Interface Modification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泥基材料成本低、成型简便、抗压性能优异，是土木基建核心用材，广泛用于建筑、桥梁与隧道工程[1]。但其脆性大、抗裂韧性差，长期荷载、冻融及化学侵蚀作用下易开裂劣化，存在结构安全隐患[2]。随着现代工程向大跨度、智能化、高耐久性方向发展，传统水泥基材料已难以满足高端应用需求，亟需通过改性技术实现性能升级。

纤维增强技术是改善水泥基材料脆性的有效途径，其中碳纤维(CF)因具备超高抗拉强度(3~7 GPa)、高弹性模量(200~400 GPa)、导电耐蚀，可改善基体力学与耐久性能，并赋予压敏、电磁屏蔽等智能功能[3]。CF 不仅能显著提升水泥基材料的力学性能与耐久性，还可赋予其压敏、热电、电磁屏蔽等智能功能，实现水泥的“结构-功能-智能一体化”发展[4]。然而，CF 表面惰性、活性官能团匮乏，与水泥基体界面结合力弱，制约增强与传感效果[5]-[7]。

水泥基体含微孔隙、微裂缝及低强度 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，纳米材料可填充孔隙阻隔侵蚀离子还能与其反应可生成稳定的水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和钙矾石(Aft)，从而提高水泥基材料的强度提高水泥基材料的耐久性[8]，因此纳米改性纤维水泥基材料成为近年研究热点。

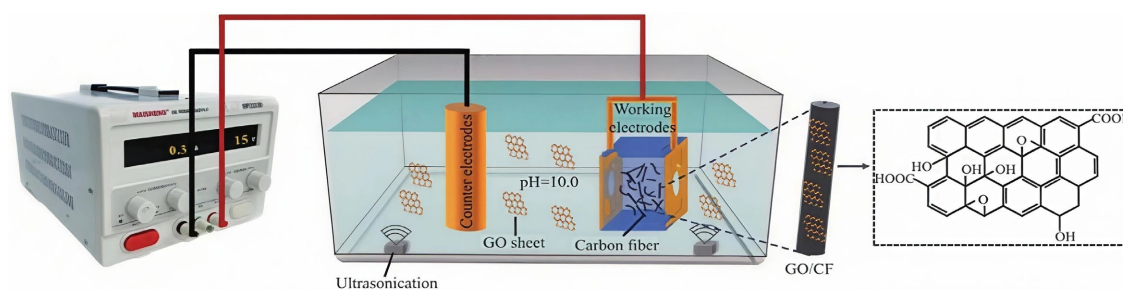


Figure 1. G and its derivatives, dispersion methods and strengthening mechanisms in cementitious materials

图 1. G 及其衍生物、在胶凝材料中的分散方法和强化机理[11]

石墨烯(Graphene, G)为二维 sp^2 杂化碳片层材料，弹性模量为 1.0 TPa，断裂强度为 130 GPa，平均弹性模量可达 $\Delta 32 \text{ GPa}$ [9]，力学性能优异，但其片层间范德华力强、疏水惰性，在水泥基中极易团聚、脱粘，难以发挥增强作用[7]。氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)经氧化改性，片层富含羟基、羧基等活性基团，削弱片层团聚、提升水分散性，且易与水泥基体产生界面结合[4] [12]。将 GO 与 CF 复合制备 GO-CF 复合增强体，可借助 GO 改善 CF 表面特性，优化其与水泥基体的界面作用如图 1 所示，成为解决 CF

界面黏结问题的有效路径[10]。前研究多聚焦 GO-CF 制备工艺、界面机理及其对水泥基力学、耐久、传感性能的提升效果，同时探究聚羧酸减水剂、粉煤灰、硅灰对复合体系的调控规律近年来[9] [10]。本文将围绕 GO-CF 水泥基材料的国内外研究现状，从 GO-CF 的制备，以及 GO-CF 水泥基材料的力学性能、耐久性、压敏性、热电性等方面阐述。

2. CF 表面枝接纳米材料方法

碳纤维表面接枝纳米材料的方法主要有表面沉积法、表面涂覆法、化学接枝法[11]等，其优缺点如表 1 所示。

表面沉积法包括化学沉积和电泳沉积。化学沉积是利用化学反应在碳纤维表面沉积纳米材料。电泳沉积与电化学氧化类似，均是利用碳纤维的导电性。电泳沉积基于电泳原理，即带电颗粒在外加电场的作用下朝其电性相反的方向移动，从而使纳米颗粒沉积在碳纤维表面。表面涂覆法是指通过涂层的方式将纳米材料接枝到碳纤维表面。将纳米材料加入上浆剂中或制成纳米材料溶液，通过上浆剂或在溶液中浸渍，从而将纳米材料接枝到碳纤维表面。

化学接枝法是将碳纤维与纳米材料通过化学反应形成化学键的结合，从而实现接枝的方法。碳纤维表面活性基团少，因此需对其进行处理，碳纤维表面氧化是化学接枝的基础。当碳纤维表面的活性基团无法与纳米材料的基团反应时，需借助具有双官能团的偶联剂等桥接物，其官能团分别与碳纤维和纳米材料形成化学键。表面沉积法和表面涂覆法中碳纤维与纳米材料的结合强度相对较低，但易于操作。化学接枝法中碳纤维与纳米材料之间具有较强的化学键结合，但是接枝过程中需要使用大量的化学试剂，操作步骤繁杂。

Table 1. Advantages and disadvantages of the method of grafting nanomaterials on the surface of carbon fibers
表 1. 碳纤维表面枝接纳米材料方法的优缺点

方法	优点	缺点
化学沉积	操作性强	化学键较少且使用大量的化学试剂[12]
电泳沉积	操作简单	结合强度低，电解液处理复杂[17]
表面涂层	操作简便	仅通过物理键结合，无化学键结合[17]
化学枝接	通过化学键形成强结合	使用大量化学试剂且操作复杂[26]

3. GO-CF 的制备及与水泥基体的界面强化

3.1. GO-CF 复合增强体的制备工艺

GO-CF 复合增强体的制备核心是实现 GO 在 CF 表面的均匀负载，以改善 CF 表面惰性、提升其与水泥基体的相容性，目前应用最广泛的制备方法为电泳沉积法，同时也存在化学接枝法等辅助工艺。电泳沉积(EPD)法凭借操作简便、负载均匀、可控性强等优势，成为制备 GO-CF 复合增强体的主流技术[12]-[26]。该方法通过电场驱动作用，使 GO 片层定向沉积并紧密包裹在 CF 表面，形成均匀的 GO 包覆层 EPD 处理装置如图 2 所示。Yan 等[16]证实利用超声波预处理结合减水剂使用一定时间可以使 GO 分散得更好。从图 3 可以看出，超声预处理 30 分钟后 GO 的分散效果较好。

研究表明，电泳电压、沉积时间、GO 溶液浓度是影响包覆效果的关键参数。He 等[17]通过调节电泳电压 30 V、沉积时间 15 min，实现 GO 在 CF 表面的均匀包裹，使 CF 表面粗糙度较纯 CF 提升 180%；石丽娜[18]通过正交试验优化得出最佳制备参数：电泳电压 40 V、沉积时间 20 min、GO 浓度 0.5 mg/mL，在此条件下制备的 GO-CF 可使水泥基材料 28 d 抗压强度达 72.1 MPa，较基准组提升 62%。此外，Lu 等

[19]提出一种新型电泳沉积法,利用 GO 溶液兼具分散介质的功能,借助静电排斥和空间位阻效应,使 GO-CF 在制备过程中同步实现均匀分散,为 GO 同时作为分散剂和表面改性剂应用提供了新路径。赵丹[20]、Chen 等[21]采用表面沉积法将氧化石墨烯成功接枝到碳纤维表面,接枝后的碳纤维表面粗糙,在水泥浆体中的分散性增强,且碳纤维表面生长了大量的水化产物,与水泥浆体结合良好。

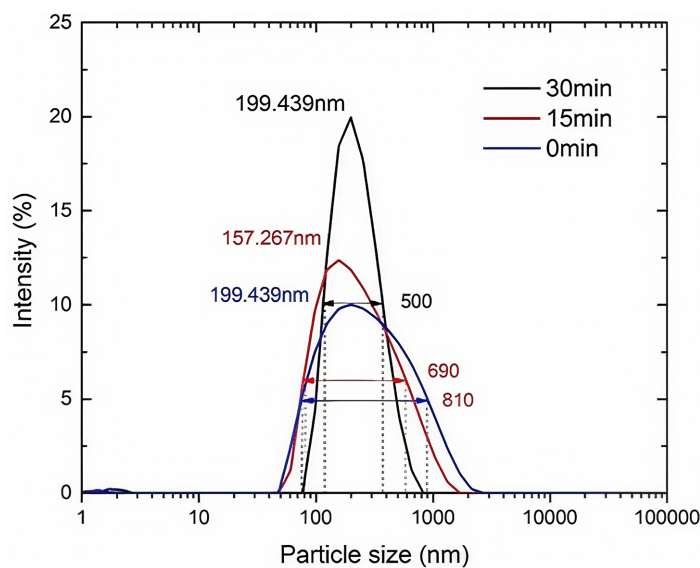


Figure 2. Schematic diagram of electrophoretic deposition (EPD) treatment device for preparing graphene oxide modified carbon fibers (GO/CF)

图 2. 用于制备氧化石墨烯改性碳纤维(GO/CF)的电泳沉积(EPD)处理装置示意图

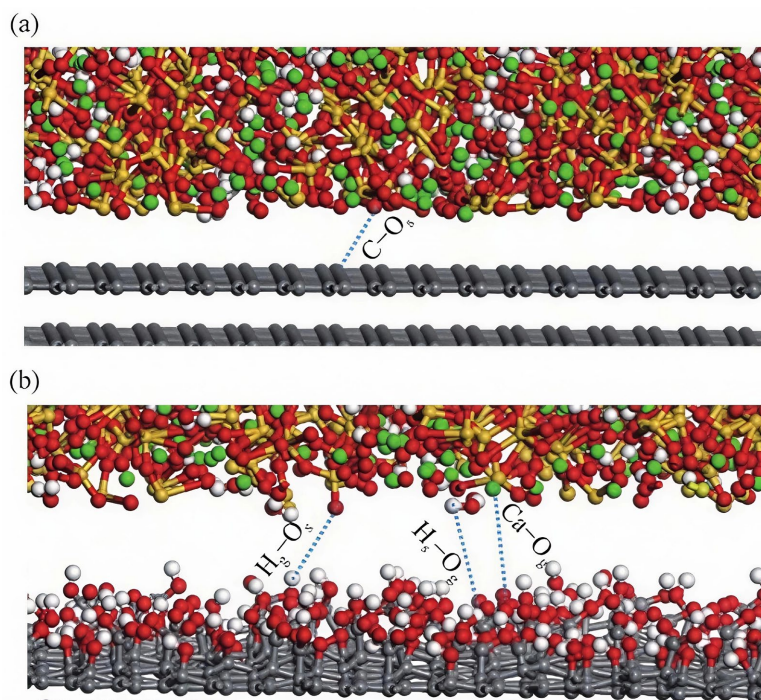


Figure 3. Size distribution of GO particles under different dispersion processes

图 3. 不同分散过程下 GO 颗粒的尺寸分布

此外, 氧化石墨烯接枝碳纤维对水泥浆体力学和电磁屏蔽性能的提高效果均优于未接枝碳纤维, 氧化石墨烯可以促进碳纤维的分散, 使碳纤维更易形成导电网络, 从而增强水泥浆体的电磁屏蔽吸收效能。Li 等[22]通过硅烷偶联剂实现了氧化石墨烯与碳纤维的化学接枝, 氧化石墨烯接枝碳纤维与水泥浆体具有良好的相容性, 氧化石墨烯提高了碳纤维的亲水性, 增强了碳纤维/水泥浆体界面的粘附力, 使得碳纤维的阻裂作用发挥更明显, 水泥浆体的强度和韧性提高。汤寅寅等[23]研究发现接枝氧化石墨烯后, 水泥浆体对碳纤维的浸润性能得到提高, 从而显著改善水泥浆体的界面性能和力学性能。

化学接枝法通过引入桥接物质实现 GO 与 CF 的化学键合, 进一步提升复合增强体的稳定性。王志航等[24]以氨基硅烷为桥接物, 通过化学键合制备氧化石墨烯接枝碳纤维(CF-GO), 表征结果证实 GO 成功接枝, CF-GO 的界面剪切强度较未改性 CF 提升 25.37%; Wang 等[25]采用“接枝”化学方法制备 CF-GO, 其在混凝土基体中的分散效果显著优于纯 CF, 且对混凝土的增强增韧效果更优。此外, 王思月[26]采用改进 Hummers 法制备 GO 后, 通过电泳沉积法对 CF 进行改性, 成功制备 GO-CF 杂化纤维, 有效提升了 CF 表面粗糙度和活性。

3.2. GO-CF 对水泥基体界面强化

GO-CF 对水泥基材料性能的提升核心在于强化 CF 与水泥基体的界面结合, 其作用机制可概括为物理机械咬合与化学键合双重协同, 通过多尺度表征手段已得到充分验证。

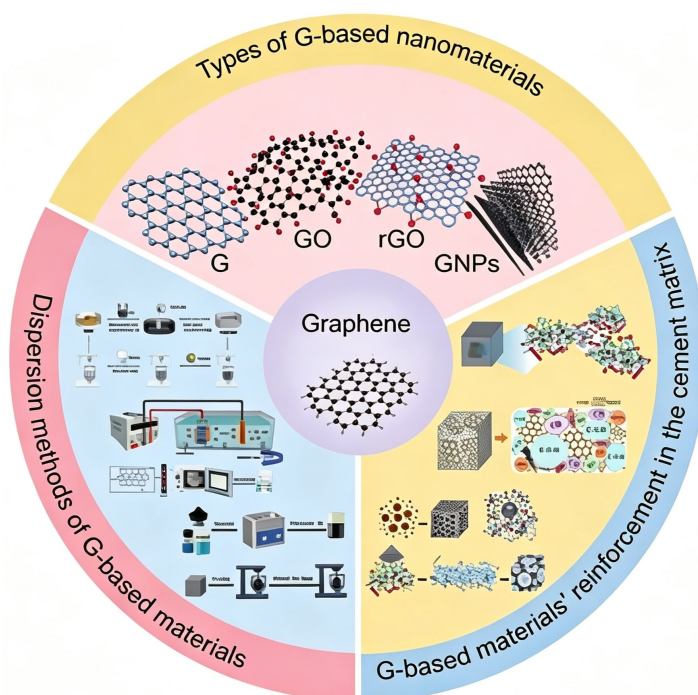


Figure 4. Schematic diagram of interface bonding between C-S-H/CF model (a) and C-S-H/GO/CF model (b)

图 4. C-S-H/CF 模型(a)和 C-S-H/GO/CF 模型(b)的界面键合示意图

物理机械咬合作用主要源于 GO 包覆后 CF 表面特性的改善。GO 片层具有褶皱结构, 负载于 CF 表面后可显著提升 CF 表面粗糙度与润湿性, 增大与水泥基体的物理接触面积[19]。He 等[17]通过 XPS 表征发现, GO 包裹使 CF 表面含氧官能团增多, 润湿性提升; Yan 等[16]分子动力学模拟结果显示, 经 GO 改性的 CF 接触角更小, 有利于改善与 C-S-H 凝胶的机械嵌合及相容性。当受到外力作用时, 粗糙的 GO

包覆层可通过界面摩擦作用阻碍 CF 与基体的相对滑动,提升应力传递效率,如孔祥清等[27]的单纤维拉拔试验证实,GO-CF 与水泥基体的平均黏结强度达 2.21 MPa,摩擦黏结强度达 0.99 MPa,分别较纯 CF 提高 121%、296%。Wang 等[28]利用电泳沉积法制备了氧化石墨烯接枝碳纤维,并研究了其与水泥浆体间的界面性能。碳纤维表面的氧化石墨烯增强了其与水泥浆体的机械咬合力,氧化石墨烯表面的活性基团与水泥浆体形成化学键合,氧化石墨烯接枝碳纤维/水泥浆体界面结合效果良好。

化学键合作用是界面强化的核心机制,主要通过 GO 表面的含氧官能团与水泥水化产物发生相互作用实现。孔祥清等[27]分子动力学模拟显示,在 C-S-H/CF 界面插入 GO 片后,最大脱黏力增加 200%,达到 9162.96 J/(mol·nm),如图 4 显示证实离子键和氢键的协同作用是界面增强的关键;He 等[17]通过 XPS 表征证实,GO 的羧基与 C-S-H 凝胶的 Ca^{2+} 形成配位键,环氧基与羟基发生开环反应形成氢键,双重化学作用显著增强界面结合;杨鑫等[29]研究表明,GO 可与 C-S-H 形成化学键和氢键,大幅提高界面的库伦相互作用,使界面剪切强度较未改性组提高 337%。此外,GO 还可调控水泥水化进程,促进 C-S-H 凝胶生成与聚合,优化界面过渡区微观结构,使界面过渡区裂缝宽度从 150 nm 缩减至 50 nm 以下[1]。

4. GO-CF 水泥基材料性能提升

GO-CF 复合增强体的引入可同步提升水泥基材料的力学性能、智能功能与耐久性,实现“结构-功能一体化”优化。

4.1. 力学性能提升

GO-CF 通过强化界面结合、阻碍裂纹扩展,显著提升水泥基材料的抗压、抗折强度及断裂韧性。王思月[26]研究表明,GO-CF 水泥砂浆 7 d、28 d 抗折强度分别提高 30.89%、38.37%,抗压强度分别提高 17.56%、14.32%;He 等[17]将 GO-CF 掺入水泥基材料后,28 d 抗压强度达 68.5 MPa,较纯 CF 水泥基材料提升 32%,较基准水泥提升 57%;石丽娜[18]制备的 GO-CF 水泥基材料 28 d 抗折强度达 9.5 MPa,断裂韧性达 $1.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,较基准组分别提升 85%、125%。此外,复掺效应可进一步优化力学性能,欧阳威等[30]发现 CF 和 GO 最佳掺量分别为 0.2% 和 0.15%,复掺时表现出“1 + 1 > 2”的正混杂效应,混凝土抗压、抗折强度较普通混凝土分别提升 38.52% 和 40.04%。

4.2. 智能功能改善

GO 与 CF 的协同作用可赋予水泥基材料压敏、热电等智能功能,为结构健康监测、智能温控提供支撑。

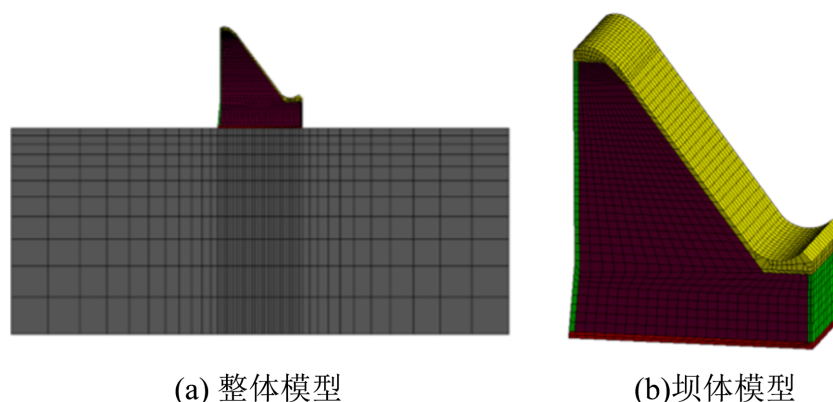


Figure 5. ANSYS calculation model. (a) overall model; (b) dam body model
图 5. ANSYS 计算模型。(a) 整体模型; (b) 坝体模型

在压敏性能方面,王思月[26]研究显示,GO-CF 使水泥基材料渗流阈值降至 0.5 wt%,压敏性能最优时电阻变化率提高 5.7%;Han 等[31]发现最佳条件制备的 rGO-CF 复合材料在 25 MPa 压力下电阻变化率达 3.18%,线性相关系数 0.984,具备良好的应力自感知能力。

在热电性能方面,杨森等[32]聚焦 GO 对多壁碳纳米管(MWCNTs)掺配水泥砂浆的改性作用。研究表明,MN、GO、MWCNTs 质量比 3:1:9 时 GO 分散最佳,GO 可协同 MWCNTs 提升砂浆力学性能、导电及压敏性,最优掺量下 28 天抗折、抗压强度分别提高 27.3%、20.9%,电阻率降低 18.2%。微观上,GO 能促进水泥水化、致密结构,为智能水泥基材料提供新路径。王悦等[33]通过 PCE 实现了 G 在水泥基材料中的有效分散,采用电子万能试验机与交流二电极法测试发现,G 分散改性后的水泥基材料电阻率显著低于空白对照组。王思月[26]的试验表明,GO-CF 水泥基材料电热升温最高达 30.45℃,较纯 CF 组翻倍,GO 包裹改性使 CF 水泥基材料电热升温效率较未改性组提升 2 倍。田维欣等[34]将不同掺量的氧化石墨烯(GO)掺入水泥基材料并制备混凝土重力坝模型,如图 5 所示,通过测试坝体各分区最高温度发现,当 GO 掺量为 0.02%时,重力坝内外温差显著减小,证实 GO 的掺入可提升混凝土的导热系数。Tian 等[35]的研究进一步表明,当 GO 质量分数为 0.02%时,水泥基材料的孔隙率与导热系数均达到峰值;该研究指出,GO 之所以能提高水泥基材料的导热性能,核心原因在于 GO 自身优异的导热特性,以及其对水泥基内部孔隙的细化作用。

单一掺加 GO 对水泥基材料导电性能的提升效果并不显著。Li 等[36]通过电阻率测试研究发现,GO 的掺入未提高水泥基材料的导电率,反而使其电阻率有所增大;该研究同时指出,过量 GO 的引入可促进水泥基内部离子扩散,进而降低电阻率。Li 等[37]进一步通过实验证实,GO 团聚体的绝缘性高于水泥浆体,这是影响导电性能的关键因素之一。田维欣等[34]采用电极法测试 GO 水泥基复合材料的电导率,结果表明,其电导率随 GO 掺量的变化规律与渗流理论相符。

4.3. 耐久性优化

GO-CF 通过优化微观结构、致密界面过渡区,显著提升水泥基材料的抗冻融、抗侵蚀等耐久性。林立等[38]将氧化石墨烯(GO)与碳纳米管按不同掺量复掺于水泥基材料中,系统探究其对材料耐久性的调控效应。研究结果表明,GO 的引入可显著提升水泥基材料的抗渗性能;冻融循环试验证实,掺加 GO 的试件质量损失率较未掺 GO 的基准组降低 33.3%,抗冻融能力得到有效强化。徐义洪等[39]以 GO 质量分数(0、0.01%、0.03%、0.05%)为变量制备水泥基试件,经 200 次盐冻循环后发现,掺加 GO 的试件抗压强度较基准组提升 34.83%,且质量损失率与动弹性模量损失率均为各组最低。微观表征结果揭示,GO 可通过促进水泥水化进程,细化材料内部微观结构,进而提升其抗盐冻性能。

偏酸性溶液易与水泥基材料表面组分发生化学反应,导致钙离子浸出并破坏 C-S-H 凝胶结构,加剧孔隙连通性,最终劣化材料耐久性。因此,提升水泥基材料的耐酸性是改善其长期服役性能的关键方向之一[40]。Murugan 等[41]通过掺入不同质量分数的 GO,探究其对水泥基材料抗盐酸侵蚀性能的影响。实验结果显示,随着 GO 掺量增加,水泥基试件的质量损失率与截面积损失率均呈下降趋势;微观结构观察表明,GO 可促使水泥基材料形成排列规整、致密的内部结构,有效细化孔隙;蚀变区域化学成分分析证实,体系中存在氧化铝-二氧化硅水凝胶,该产物可减少铝离子与硅离子的流失,抑制盐酸侵蚀过程中微裂纹的萌生与扩展,从而显著提升水泥基材料的抗酸性侵蚀能力。

在抗冻融性能方面,王思月[26]发现 200 次冻融后 1%掺量 GO-CF 试件强度损失率仅 32.7%,优于纯 CF 试件;徐义洪等[39]研究表明,适量 GO 可促进水泥水化,生成更多 C-S-H 凝胶,致密微观结构,盐冻 200 次后试件抗压强度提高 34.83%。在抗侵蚀性能方面,Gao 等[1]发现 GO/CF 改性组可使再生混凝土粉(RCP)替代率 40%的试件孔隙率降低 20.3%,界面过渡区裂缝宽度缩减至 50 nm 以下,抑制侵蚀介质

渗透; Lu 等[19]证实 GO-CF 可增强与水泥水化产物的相互作用, 提升材料抗氯离子侵入能力。

4.4. 外掺料对性能的提升

聚羧酸减水剂(PCE)作为高性能混凝土的关键外加剂, 具有减水率高(>35%)、坍落度损失小、与胶凝材料相容性好等优势[42]-[44], 其对 GO-CF 水泥基材料的调控核心在于优化分散性, 进而影响材料的宏观性能与微观结构。

PCE 可通过静电斥力和空间位阻效应, 有效抑制 GO-CF 团聚, 改善其在水泥基体中的分散均匀性[43]。吴一晨等[45]研究发现, 在复掺 GO/CNFs 的水泥基材料中, PC 的分散效果显著优于十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS), 0.05% GO + 0.5% CNFs 掺量下, PCE 分散组试件抗压强度达 70.1 MPa, 电阻率最小为 112.65 $\Omega\cdot\text{m}$, 且具备良好压敏响应; Lu 等[19]指出, PCE 可辅助 GO 溶液进一步提升 GO-CF 的分散性, 预先将 GO-CF 分散于 GO 溶液并添加 PCE 后, 水泥浆体抗折强度较仅用 GO 溶液分散组再提升 10.53%。Gu [46]通过酯化反应将带聚环氧乙烷侧链的 PCS 接枝到 GO 表面, 制备出 PCS@GO。研究表明, PCS 共价接枝显著改善 GO 的分散性与流动性, 缓解其在水泥基材料中的聚集问题。当 PCS@GO 掺量为 0.1 wt%时, 复合材料 28 天抗折强度达 8.2 MPa (较纯水泥、纯 GO 组分别提升 23.8%、7.3%), 抗压强度达 65.6 MPa (分别提升 47.8%、23.2%), 抗疲劳性能亦显著提升。XRD 测试显示, PCS@GO 可减小 CH 晶体尺寸, 致密固化结构, 进而优化材料性能。

粉煤灰与硅灰作为两类高性能矿物掺合料, 可与 GO-CF 形成差异化协同效应。其中, 粉煤灰凭借球形颗粒的润滑效应, 能有效平衡 GO-CF 导致的水泥浆体流动性劣化, 同时通过火山灰活性持续生成 C-S-H 凝胶, 提升材料长期力学性能与稳定性; 硅灰则以高火山灰活性构建“分散-水化-致密”一体化机制, 既助力 GO-CF 均匀分散, 又能消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 优化界面结构, 显著增强材料短期力学强度与抗侵蚀、抗冻融等耐久性, 二者互补适配 GO-CF 水泥基材料的综合性能优化需求。

张建武等[47]在含有 50%的粉煤灰高掺量粉煤灰水泥基材料中掺入 1%的 GO 通过 XRD 和 SEM 分析 GO 的作用机理。XRD 实验显示掺入 0.6% GO 的水泥基在 7 d 龄期时 SiO_2 衍射峰明显低于空白组而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 略高于空白组此时研究结果说明了 GO 的加入可以促进粉煤灰水化早期火山灰反应。杜长青等[48]聚焦硅灰对 GO 在水泥硬化浆体中分散性及性能的影响。通过超声法制备不同掺量硅灰/GO 混合悬浮液, 研究发现硅灰可剥离 GO 片层, 避免 Ca^{2+} 与 GO 交联团聚, 改善其分散稳定性。当 GO 掺量 0.25%、硅灰掺量 10%时, 复合材料 28 d 抗折、抗压强度分别达 12.3 MPa、73.2 MPa, 较无硅灰组提升 48.19%、18.06%。微观分析表明, 硅灰通过火山灰反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 填充 C-S-H 凝胶空隙, 致密内部结构, 协同 GO 提升水泥基材料力学性能。

5. 结论

本文围绕 GO-CF 水泥基材料的研究现状展开系统梳理, 聚焦材料制备、界面强化、性能提升及外掺料调控四大核心方向。

(1) 制备工艺方面, 电泳沉积法因操作简便、负载均匀成为 GO-CF 复合增强体的主流制备技术, 关键参数(电压、时间、GO 浓度)的优化可显著提升包覆效果, 化学接枝法则通过桥接物质实现 GO 与 CF 的化学键合, 进一步增强复合体系稳定性。界面强化机制上, GO-CF 通过物理机械咬合(提升 CF 表面粗糙度与润湿性)与化学键合(GO 官能团与水化产物形成配位键、氢键)双重作用, 大幅提升 CF 与水泥基体的界面黏结强度。

(2) 性能提升方面, GO-CF 复合增强体实现了水泥基材料力学性能、智能功能与耐久性的协同优化。力学上, 通过强化界面结合与阻碍裂纹扩展, 显著提升抗压、抗折强度及断裂韧性, 复掺体系更呈现“1 + 1 > 2”的正混杂效应; 智能功能上, 赋予材料优良的压敏与热电性能, 为结构健康监测和智能温控提

供支撑,且渗流阈值降低,导电与升温效率提升;耐久性上,通过优化微观结构、致密界面过渡区,增强材料抗冻融、抗侵蚀及抗渗能力。

(3) 外掺料调控是性能优化的重要补充,聚羧酸减水剂通过静电斥力与空间位阻效应改善 GO-CF 分散性,粉煤灰与硅灰则凭借各自特性形成差异化协同效应,分别适配流动性改善、长期性能提升与短期强度增强、耐久性优化的需求。

综上,GO-CF 水泥基材料通过制备工艺优化、界面作用强化及外掺料协同调控,实现了“结构-功能-智能一体化”发展,为土木工程材料高性能化与智能化提供了新路径,但仍需在多性能协同优化、长期服役稳定性等方面开展深入研究。

参考文献

- [1] Gao, Y., Zou, F., Wang, S., Sui, H., Yu, J., Xu, B., *et al.* (2025) Redefining the Cement Substitution Potential of Recycled Concrete Powder Using Graphene Oxide Coating. *Cement and Concrete Composites*, **164**, Article 106276. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106276>
- [2] Kong, X.Q., Wang, R.Z., Zhang, T.T., Sun, R.X., Fu, Y., *et al.* (2022) Effects of Graphene Oxygen Content on Durability and Microstructure of Cement Mortar Composites. *Construction and Building Materials*, **354**, Article ID: 129121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129121>
- [3] Fan, Y., Wei, H., Zheng, H. and Du, H. (2025) Effect of a Carbon Fibre-Steel Fibre-Graphite Conductive Filler on the Electrothermal Properties of Cementitious Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, **40**, 141-151. <https://doi.org/10.1007/s11595-025-3048-1>
- [4] Cassese, P., Rainieri, C. and Occhiuzzi, A. (2021) Applications of Cement-Based Smart Composites to Civil Structural Health Monitoring: A Review. *Applied Sciences*, **11**, Article 8530. <https://doi.org/10.3390/app11188530>
- [5] Bheel, N., Waqar, A., Radu, D., Benjeddou, O., Alwetaishi, M. and Almujiab, H.R. (2024) A Comprehensive Study on the Impact of Nano-Silica and Ground Granulated Blast Furnace Slag on High Strength Concrete Characteristics: RSM Modeling and Optimization. *Structures*, **62**, Article 106160. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106160>
- [6] Xiao, J., Han, N., Li, Y., Zhang, Z. and Shah, S.P. (2021) Review of Recent Developments in Cement Composites Reinforced with Fibers and Nanomaterials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **15**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0723-y>
- [7] 李子琪, 裴纯, 朱继华. 碳纤维增强水泥基复合材料界面优化设计研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5125-5145.
- [8] Armoosh, S.R., Oltulu, M., Alameri, I., Mohammed, H.M.A. and Karacali, T. (2022) The Combined Effect of Carbon Fiber and Carbon Nanotubes on the Electrical and Self-Heating Properties of Cement Composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **33**, 2271-2284. <https://doi.org/10.1177/1045389x221077447>
- [9] Park, G., Kim, S., Park, G.-K. and Lee, N. (2020) Influence of Carbon Fiber on the Electromagnetic Shielding Effectiveness of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Building Engineering*, **35**, Article 101982.
- [10] Wanasinghe, D., Aslani, F. and Ma, G. (2021) Electromagnetic Shielding Properties of Cementitious Composites Containing Carbon Nanofibers, Zinc Oxide, and Activated Carbon Powder. *Construction and Building Materials*, **285**, Article 122842. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122842>
- [11] 孔祥清, 班天一, 张筱萌, 等. 石墨烯在水泥基复合材料中的分散及其性能增强机理综述(英文) [J/OL]. 新型炭材料(中英文): 1-27. <https://link.cnki.net/urlid/14.1407.TQ.20250508.1019.001>, 2025-12-10.
- [12] 王志航, 白二雷, 黄河, 等. 碳纤维增强水泥基材料界面改性研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(5): 136-144.
- [13] 楚电明, 董乾鹏, 白文娟, 等. 碳纤维/碳纳米管界面增强技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(1): 1006-3536.
- [14] 李磊, 沈志刚, 屠晓萍, 等. 聚丙烯腈基高强高模碳纤维表面处理研究进展[J]. 上海纺织科技, 2024, 52(2): 1001-2044.
- [15] 张美会, 曹维宇, 肖建文. 碳纤维表面化学接枝研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 38-41+46.
- [16] Yan, X., Zheng, D., Yang, H., Cui, H., Monasterio, M. and Lo, Y. (2020) Study of Optimizing Graphene Oxide Dispersion and Properties of the Resulting Cement Mortars. *Construction and Building Materials*, **257**, Article 119477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119477>

- [17] He, J., Wang, X., Han, L., Wang, S. and Xin, M. (2024) Effect of Graphene Oxide on the Electrothermal and Pressure-Sensitive Properties of Carbon Fiber Cementitious Composites. *Materials*, **17**, Article 3928. <https://doi.org/10.3390/ma17163928>
- [18] 石丽娜. 水泥基复合材料导电性能及电热性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [19] Lu, Z., Hanif, A., Sun, G., Liang, R., Parthasarathy, P. and Li, Z. (2018) Highly Dispersed Graphene Oxide Electrodeposited Carbon Fiber Reinforced Cement-Based Materials with Enhanced Mechanical Properties. *Cement and Concrete Composites*, **87**, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.006>
- [20] 赵丹. 石墨烯对碳纤维表面修饰及其水泥基复合材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2015.
- [21] Chen, J., Zhao, D., Ge, H. and Wang, J. (2015) Graphene Oxide-Deposited Carbon Fiber/Cement Composites for Electromagnetic Interference Shielding Application. *Construction and Building Materials*, **84**, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.050>
- [22] Li, M., Wang, H., Zhang, C., Deng, S., Li, K. and Guo, X. (2019) The Effect of Graphene Oxide Grafted Carbon Fiber on Mechanical Properties of Class G Portland Cement. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **33**, 2494-2516. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1646848>
- [23] 汤寅寅, 金浩. 氧化石墨烯增韧碳纤维水泥基复合材料的力学特性研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(8): 162-165.
- [24] 王志航, 白二雷, 任彪, 等. 氧化石墨烯接枝碳纤维增强体改性混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5504-5515.
- [25] Wang, Z., Bai, E., Liang, L., Du, Y. and Liu, C. (2024) Comparison of Dynamic Mechanical Properties of Carbon Fiber and Graphene Oxide Grafted Carbon Fiber Modified Concrete. *Journal of Building Engineering*, **94**, Article 109989. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109989>
- [26] 王思月. 氧化石墨烯改性碳纤维水泥基复合材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2023.
- [27] 孔祥清, 乔万福, 班天一, 等. 氧化石墨烯增强碳纤维/水泥基体界面的试验和分子模拟[J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5216-5226.
- [28] Wang, S., Wang, X., He, J. and Xin, M. (2022) Mechanical Behavior and Microstructure of Graphene Oxide Electrodeposited Carbon Fiber Reinforced Cement-Based Materials. *Crystals*, **12**, Article 964. <https://doi.org/10.3390/cryst12070964>
- [29] 杨鑫, 张玉波, 刘艳慧. 氧化石墨烯改性碳纤维/C-S-H 界面结合及强韧化机制[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(9): 37-42.
- [30] 欧阳威, 王志航, 林茂, 等. 碳纤维-氧化石墨烯复合改性混凝土的力学性能及机理研究[J]. 化工新型材料, 2026, 54(4): 154-160.
- [31] Han, L., Wang, X., Geng, S., Fang, W., Hu, W., Wang, S., *et al.* (2025) Pressure Sensitivity, Compactness and Microstructural Characteristics of Cement Mortar Composites Enhanced by Density of Different Graphene Oxygen-Containing Functional Groups. *Construction and Building Materials*, **469**, Article 140486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140486>
- [32] 杨森, 王远贵, 齐孟, 等. 氧化石墨烯对多壁碳纳米管掺配水泥砂浆强度、压敏性能与微观结构的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2340-2355.
- [33] 王悦, 王琴, 郑海宇, 等. 分散剂对石墨烯水泥基复合材料压敏性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2515-2526.
- [34] 田维欣. 氧化石墨烯对水泥导热性能的改性机理及重力坝温控模拟[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [35] Tian, W., Chai, J. and Cao, J. (2023) Cement-Based Composites Modified by Graphene Oxide Nano-Materials: Porosity and Thermal Conductivity. *Journal of Physics: Conference Series*, **2553**, Article 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2553/1/012003>
- [36] Li, W., Li, X., Chen, S.J., Liu, Y.M., Duan, W.H. and Shah, S.P. (2017) Effects of Graphene Oxide on Early-Age Hydration and Electrical Resistivity of Portland Cement Paste. *Construction and Building Materials*, **136**, 506-514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.066>
- [37] Li, X., Wang, L., Liu, Y., Li, W., Dong, B. and Duan, W.H. (2018) Dispersion of Graphene Oxide Agglomerates in Cement Paste and Its Effects on Electrical Resistivity and Flexural Strength. *Cement and Concrete Composites*, **92**, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.008>
- [38] 林立. 氧化石墨烯/碳纳米管水泥基复合材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [39] 徐义洪, 范颖芳. 氧化石墨烯分散液对混凝土抗盐冻性能的影响[J]. 混凝土, 2022(2): 1-5.
- [40] 韩雷莹, 王学志, 辛明, 等. 氧化石墨烯复掺纤维水泥基复合材料研究综述[J]. 功能材料, 2024, 55(3): 3073-3082.

-
- [41] Muthu, M., Yang, E. and Unluer, C. (2021) Resistance of Graphene Oxide-Modified Cement Pastes to Hydrochloric Acid Attack. *Construction and Building Materials*, **273**, Article 121990. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121990>
- [42] 高淑星. 聚羧酸减水剂的合成及复配技术综述[J]. 江西建材, 2020(6): 4+6.
- [43] 金文. 聚羧酸高效减水剂品种对混凝土渗透性影响研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2015, 27(4): 65-68.
- [44] 袁小亚, 曾俊杰, 牛佳伟, 等. 不同减水剂对氧化石墨烯掺配水泥胶砂力学性能及微观结构的影响[J]. 功能材料, 2018, 49(10): 10184-10189.
- [45] 吴一晨, 郭荣鑫, 夏海廷, 等. 不同分散剂对复掺 GO/CNFs 水泥基复合材料力学和导电性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 731-740.
- [46] Gu, Y. (2025) Studying on the Influence of Modified Graphene Oxide on the Performance of Cement-Based Composite Materials. *RSC Advances*, **15**, 7609-7616. <https://doi.org/10.1039/d4ra08947b>
- [47] 张建武, 汪潇, 李志新, 等. 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰水泥基材料性能的影响及机理[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 240-243.
- [48] 杜长青, 王章轩, 仝腾, 等. 硅灰/氧化石墨烯在水泥硬化浆体中的分散性研究[J]. 无机盐工业, 2023, 55(11): 115-120.