**文章编号:**1007-9629(2024)05-0400-08

# 氧化石墨烯改性纤维增强水泥基材料的拉伸性能

罗素蓉<sup>1,\*</sup>, 姚佳敏<sup>1</sup>, 周恩泉<sup>1</sup>, 王世杰<sup>2</sup> (1.福州大学土木工程学院,福建福州 350116; 2.福建省建筑设计研究院有限公司,福建福州 350001)

摘要:为了提高聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基材料的力学性能,将氧化石墨烯(GO)引入PVA纤维增强水泥基材料中,探究GO掺量在0%~0.05%范围内对材料单轴拉伸性能的影响.结果表明: 掺入适量的GO能够有效提高材料的单轴拉伸性能,当GO掺量为0.01%时,28d时材料的初裂拉伸强度、极限拉伸强度和极限拉伸应变均达到最大值,与未掺GO的对照组相比分别提高了26.97%、 31.28%、23.25%;适量的GO可以优化孔隙结构,减少材料内部缺陷,促进水化产物的生成,使微观 结构致密化,增强纤维和基体间的界面结合力,从而改善PVA纤维增强水泥基材料的宏观性能. 关键词:氧化石墨烯;水泥基材料;单轴拉伸性能;微观性能;聚乙烯醇(PVA)纤维 中图分类号:TU528.57 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.003

# Tensile Properties of Fibers Reinforced Cementitious Materials Modified by Graphene Oxide

LUO Surong<sup>1,\*</sup>, YAO Jiamin<sup>1</sup>, ZHOU Enquan<sup>1</sup>, WANG Shijie<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;2. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Corporation, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In order to improve the mechanical properties of cementitious materials reinforced with polyvinyl alcohol (PVA) fibers, graphene oxide(GO) was introduced into cementitious materials reinforced with PVA fibers, and the effects of GO dosage in the range of 0%-0.05% on the uniaxial tensile properties of the materials were investigated. The results show that the appropriate GO dosage can effectively improve the uniaxial tensile properties of the materials, and the initial crack tensile strength, ultimate tensile strength and ultimate tensile strain of the cementitious materials reaches the maximum value, increased by 26.97%, 31.28% and 23.25%, respectively compared with the control group without GO at the age of 28 d, when GO dosage is 0.01%. An appropriate GO dosage can optimize the pore structure, reduce internal defects in the material, facilitate the formation of hydration products, enhance the density of the material's microscopic properties of the materials reinforced with PVA fibers. **Key words:** graphene oxide; cementitious material; uniaxial tensile property; polyvinyl alcohol(PVA) fiber

传统的水泥基材料在土木工程领域中广泛应用,但其存在易开裂和韧性差等问题<sup>[1]</sup>.为弥补这些 不足,常通过添加包括聚乙烯醇(PVA)纤维在内的 纤维材料来增强水泥基材料韧性并减少裂纹扩展<sup>[2]</sup>, PVA纤维可以降低其内部缺陷处的应力从而提高水 泥基材料的韧性<sup>[3]</sup>.Haskett等<sup>[4-5]</sup>研究发现,PVA纤维 有效地减少了材料的裂纹数量,即使出现裂纹,含 PVA纤维的复合材料也具有应变硬化性能.然而,由

收稿日期:2023-07-06;修订日期:2023-10-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078139)

第一作者(通讯作者):罗素蓉(1963—),女,福建尤溪人,福州大学教授,硕士生导师,学士.E-mail:lsr@fzu.edu.cn

于 PVA 纤维与基体之间的结合强度相对较小, PVA 纤维在拉伸时容易被拔出.Li等<sup>[6]</sup>发现,在纤维与基体之间结合力过低的情况下,材料很难达到显著的应变硬化性能和高拉伸应变能力.

纳米材料也越来越多地应用于水泥基材料的改性,其对浆体微观结构的改善为解决水泥基材料的 脆性问题提供了新的可能性<sup>[7]</sup>.氧化石墨烯(GO)会 使水泥浆体产生更规整有序的水化产物<sup>[8-10]</sup>和更致密 的微观结构<sup>[11-12]</sup>,同时GO可以抑制微裂纹的开展<sup>[13]</sup>, 经GO改性后的材料具有更高的力学性能和耐久性 能.李欣等<sup>[14]</sup>研究发现,适量GO能加速水泥水化进 程,促进生成高密度水化硅酸钙凝胶(C-S-H),掺加 0.03% GO的水泥砂浆起裂荷载提高了 30.3%.Lu 等<sup>[15]</sup>采用PE纤维表面涂覆GO的方式实现了纤维与 基体间更强的结合.总之,GO是一种具有潜力的纳 米增强材料,但目前关于GO对PVA纤维增强水泥 基材料单轴拉伸性能的研究还比较有限.

本文主要探究引入GO后制备的PVA纤维增强 水泥基材料的单轴拉伸性能,并从微观结构方面分 析GO在PVA纤维增强水泥基材料中的改性机制.

## 1 试验

#### 1.1 材料及制备

胶凝材料采用炼石牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥和 Ⅱ级粉煤灰(FA),其主要化学组成<sup>10</sup>见表1.使用石英砂 作为细骨料,并根据紧密堆积理论采用多级配砂,其中 0.212~0.425 mm 占比 25%,0.106~0.212 mm 占比 55%,0.04 mm 以上占比 20%.减水剂采用型号为 Point-PC300的聚羧酸系高效减水剂.纤维使用日本可乐 丽公司生产的K-Ⅱ型PVA纤维,其性能指标见表2.

表1 胶凝材料的主要化学组成

Table 1 Main chemical compositions	(by mass) of cementitious materia	ls
------------------------------------	-----------------------------------	----

							Unit:%
Material	$\mathrm{SiO}_2$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe_2O_3}$	CaO	MgO	$SO_3$	IL
Cement	21.70	4.35	3.32	62.53	2.08	2.92	1.62
Fly ash	45.10	24.20	3.11	5.60	2.08	1.78	3.52

	表 2	PVA纤维的性能指标
Fabla 2	Per	formance index of PVA fiber

Table 2 Terrormance muck of TVA fibers						
Length/mm	Diameter/µm	$Density/(g \boldsymbol{\cdot} m^{-3})$	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%	
2.08	1.21	45.10	24.2	3.11	5.6	
试验所用G		公石墨烯溶液,固			~	

体质量占溶液质量的1.0%,来源于中国科学院成都有机化学有限公司.采用多功能钨丝灯扫描电镜(SEM)对GO的形貌进行表征,结果如图1所示. 从图1可以看出,GO呈薄纱状,且表面具有褶皱. 采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)测定GO的官能团,结果如图2所示.由图2可见,GO含有比较多



Fig. 1 SEM image of GO



的羟基O—H(3 426 cm<sup>-1</sup>), 羧基C=O(1 783 cm<sup>-1</sup>) 和环氧基(890 cm<sup>-1</sup>), 在 1 616 cm<sup>-1</sup>处还有烯烃键 (C—C和—C=C—)存在.采用X射线光电子能谱 仪(XPS)获得GO的光电子能谱, 如图 3 所示.由图 3 可见, 在 286.41 eV 处出现C 1s峰, 532.89 eV 处出 现O 1s峰, 这说明GO包含氧和碳 2 种元素.由图 3 (b)可知, GO 中碳元素以不同基团形式存在: 284.85 eV 处对应的是C—C键, 286.80 eV 处对应 的是C=O键.使用X射线衍射仪(XRD)对GO进

<sup>1)</sup>文中涉及的组成、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

行表征,如图4所示.由图4可见,GO在10.50°处有 1个尖锐的衍射峰,根据布拉格公式计算GO片层 间距约0.84 nm,大于石墨烯的片层间距(0.34 nm). 这说明含氧官能团的引入增大了层间距,降低了层 与层之间的范德华力,有助于在超声波下实现GO 的更好分散.



在本研究中,水泥与粉煤灰的质量比为72: 153,水胶比为0.30,砂胶比为0.36,纤维用量( $\varphi_{\rm F}$ ,与 水泥基材料的体积比)为2%.根据课题组前期的研 究工作<sup>[14]</sup>,GO 掺量w(GO)采用胶凝材料质量的 0%、0.01%、0.03%和0.05%,对应试件分别记作 G0、G0.01、G0.03、G0.05.研究不同龄期(14、28、 56 d)下GO 掺量对试件抗压强度、抗折强度以及单 轴拉伸性能的影响,分析GO 掺量对力学性能的影 响规律.

#### 1.2 测试与表征

10

0

20 30

40 50

2θ/(°) 图4 GO的XRD图谱

Fig. 4 XRD pattern of GO

60 70

80

90

参照 DL/T5150—2017《水工混凝土试验规程》, 制备了尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试 件,采用 3 000 kN 电液伺服压力试验机进行抗压强 度测试.参照 GB/T 17617—1999《水泥胶砂强度检 测方法(ISO法)》,制备了尺寸为 40 mm×40 mm× 160 mm 的试件,采用 DYE-300 型全自动抗压抗折强 度试验机进行抗折强度测试.所有试件均标准养护 采用 250 kN MTS 疲劳试验机进行 PVA 纤维增 强水泥基材料的单轴拉伸试验,监测了不同 GO 掺量 的试件在拉伸状态下的应力-应变曲线.在研究 PVA 纤维增强水泥基材料等应变硬化材料的直接拉伸性 能时,常采用哑铃型薄板试件.这种选择基于哑铃型 试件具有较小的厚度,有助于减少拉力在厚度方向上 的偏心影响.为了确保试验结果的科学性和可比性, 参考文献[16]并根据试验机的规格和要求设计了试 件的尺寸和加载模式.试件尺寸如图 5 所示.试验采 用位移控制模式,加载速率为 0.02 mm/min,直至出 现主裂缝破坏为止.同时通过内置的力传感器和外置 的 10 mm引伸计来测量试件受到的荷载和变形.

通过SEM观察PVA纤维增强水泥基材料破坏 断面上的纤维表面形态,以评估GO对纤维与基体界



面结合性能的影响.使用压汞仪(MIP)测定不同GO 掺量的浆体在28 d时的孔隙结构特征.

# 2 结果与分析

#### 2.1 抗压和抗折强度

不同GO掺量下PVA纤维增强水泥基材料的力 学性能如图6所示.由图6可见:在14、28、56d时,随



着 GO 掺量从 0% 增加到 0.05%, 材料的抗压强度和 抗折强度均先升后降, 其中 0.01%的 GO 掺量下试件 力学性能最佳; 在 14、28、56 d时, 未掺 GO 的对照组 抗压强度分别为 34.1、41.3、46.3 MPa, 抗折强度分别 为 8.07、11.61、13.66 MPa, 添加 0.01%的 GO 后, 试 件抗压强度分别增加了 18.18%、15.98%、13.82%, 抗折强度分别增加了 15.86%、20.93%、14.71%.





在 28 d时, 掺 0.01% GO 的试件 G0.01 表现出多 缝开裂和良好延性, 如图 7 所示. 总体而言, 掺入适量 的 GO 能够改善 PVA 纤维增强水泥基材料的力学性 能, 但随着 GO 掺量的增加, 改善效果逐渐减弱. 这可 能是因为:低掺量的GO能够有效分散在水泥基体 中<sup>[12]</sup>,促进水化反应,提高晶体秩序,从而提高材料性 能;高掺量的GO可能导致粒子团聚,形成孔洞和缺 陷,从而降低材料力学性能<sup>[17-19]</sup>.





(a) Compressive damage pattern
 (b) Flexural multi-seam cracking diagram
 图 7 28 d 试件 G0.01 的抗压试验破坏形态和抗折试验多缝开裂图
 Fig. 7 Compressive damage pattern and flexural multi-seam cracking diagram of specimen G0.01 at 28 d

#### 2.2 单轴拉伸性能

图 8 展示了不同 GO 掺量下 PVA 纤维增强水泥 基材料 28 d 的应力-应变曲线.由图 8 可见,应力-应 变曲线可分为 3 个阶段:(1) 在拉伸试验的早期,曲线 呈现弹性阶段,类似于普通混凝土材料.(2) 随着载荷 的增加,曲线进入应变硬化阶段,试件产生裂纹,应 力-应变曲线发生波动,类似于钢筋的屈服阶段,表 现出明显的应变硬化.此时,试件表面在拉伸应变不 断增加的同时产生细长裂纹,如图9所示,但由于纤 维的桥连作用,PVA纤维增强水泥基材料的应力并 没有大幅下降.(3)在拉伸试验后期,曲线进入应变软 化阶段,试件的有效区域内最大缺陷裂纹变宽,成为 主裂纹,同时存在一些小且均匀的裂纹.这个阶段伴 随着纤维拉断声,表示PVA纤维在主裂纹中被拉出 或从基体中拔出.应力-应变曲线虽下降,但在纤维 约束下,不会急剧下降,展现出PVA纤维增强水泥基



图 8 不同 GO 掺量下 PVA 纤维增强水泥基材料 28 d 的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of PVA fiber reinforced cementitious materials with different GO dosages at 28 d



图 9 28 d 试件 G0. 01 的拉伸损伤形态 Fig. 9 Tensile damage pattern of specimen G0. 01 at 28 d

材料的韧性破坏特性.对比试验数据发现,不同GO 掺量的试件韧性表现不同.值得注意的是,在极限荷 载状态下,拉伸应变并非随着GO掺量的增加而增大, 掺0.01%GO的试件G0.01具有最大的拉伸应变.

图 10显示了不同 GO 掺量下 PVA 纤维增强水 泥基材料的单轴拉伸性能.由图 10可见:随着 GO 掺 量的增加,试件的初裂拉伸强度、极限拉伸强度和极 限拉伸应变均呈现出先增大后减小的趋势;在14、 28、56 d时,对照组的初裂拉伸强度分别为2.02、 2.31、2.52 MPa,而试件G0.01与之相比分别提高了 20.74%、26.97%和16.25%;相比于初裂拉伸强度, 极限拉伸强度普遍更高,在14、28、56 d时,对照组的 极限拉伸强度分别为2.36、2.68、3.18 MPa,而试件 G0.01分别提高了29.30%、31.28%和17.82%;极限 拉伸应变也呈现相似趋势,在14、28、56 d时,对照组 的极限拉伸应变分别为2.15%、2.32%和2.18%,而 试件G0.01分别提高了18.02%、23.25%和18.88%; 当GO掺量增至0.03%时,试件G0.03的极限拉伸应 变改善效果却不如试件G0.01;当GO掺量为0.05% 时,甚至出现试件的极限拉伸应变低于对照组的情 况.因此,GO掺量不是越多越好,当GO掺量为 0.01%时,材料单轴拉伸性能的改善效果最显著.

PVA纤维增强水泥基材料的抗拉强度主要与纤 维/基体间的摩擦黏结力和化学黏结力相关<sup>[20]</sup>.在研究 中,通过向PVA纤维增强水泥基材料中掺入适量的 GO,改善了浆体的微观结构,提高了纤维与基体的结 合力<sup>[21-22]</sup>;另外,GO的掺入增加了界面的致密度,增强 了浆体的紧密度,这也有助于提高纤维与基体的结合 力.GO的微观形貌呈薄纱状,表面具有褶皱,这些褶 皱可覆盖PVA纤维表面,增加其粗糙度,从而在纤维 从基体中拔出时产生更大的摩擦黏结力.高结合力有 利于提高纤维桥接余能与裂纹尖端断裂韧度的比 值<sup>[23]</sup>,进一步提升PVA纤维增强水泥基材料的应变硬 化性能.然而,高GO掺量可能会降低材料的变形能 力,这是因为纤维与基体的界面结合强度过高会导致 纤维在脱黏之前断裂,不利于实现材料的应变硬化性 能.此外,上文提到的高GO掺量产生的团聚问题也可 能是降低材料应变能力的原因之一[24].



Fig. 10 Uniaxial tensile properties of PVA fiber reinforced cementitious materials with different GO dosages

2.3 微观形貌

28 d时 PVA纤维增强水泥基材料破坏断面处纤维的微观形貌如图 11 所示.由图 11(a)可见,未掺 GO

的对照组断面处 PVA 纤维表面光滑,因此在荷载作 用下纤维从基体中拔出时摩擦力较小.图11(b)给出 了掺入0.01%GO的 PVA 纤维增强水泥基材料在不



图 11 28 d时 PVA 纤维增强水泥基材料破坏断面处纤维的 SEM 图像 Fig. 11 SEM images of fibers at the section of PVA fiber reinforced cementitious materials at 28 d

同放大倍率下的微观结构.由图 11(b)可以明显观察 到纤维表面附着了一定数量的水化产物,此时荷载状 态下的纤维在拔出时会受到更大的阻力;进一步观察 断面处纤维的末端,由于纤维从基体拔出的过程中受 到很大的摩擦力,纤维末端会发生翘曲;但即使纤维 在拔出过程中与基体发生摩擦,在纤维末端依然能观 察到水化产物黏附,这更进一步说明掺入0.01%GO 的试件中,纤维与基体之间的结合力较强.适量GO在 PVA 纤维增强水泥基材料中能促进水化产物的形 成<sup>[13-14]</sup>,使材料的微观结构更加致密,提高了水化产物 对PVA纤维的黏附性<sup>[25]</sup>,也增强了纤维和水泥基体间 的界面结合力.另外,PVA纤维是一种含羟基的高分 子纤维,由上文可知GO含有较多的羟基、羧基和环氧 基.Lu等<sup>[24]</sup>研究得出GO中的羧基可以与PVA纤维 中的羟基发生反应形成酯键,Pan等<sup>[26-27]</sup>研究得出GO 能够与水泥基体形成较强的界面黏附,将不同的水泥水化产物(C-S-H和Ca(OH)<sub>2</sub>)连接在一起,有助于提高PVA纤维与基体间的界面结合力.

#### 2.4 孔隙结构

表3显示了28d时不同GO掺量下PVA纤维增强水泥基材料的孔隙率和孔径分布.由表3可见:掺入适量GO显著改善了PVA纤维增强水泥基材料的 孔隙结构;试件总孔隙率随着GO掺量的增加呈现先 下降后上升的趋势,依次为G0>G0.05>G0.03> G0.01;最佳效果出现在GO掺量为0.01%时,试件 G0.01的孔隙率与对照组相比降低了8.84%;GO的 适度掺入提高了无害孔和少害孔(孔径d<50 nm)的 比例,同时减少了有害孔和多害孔(d>50 nm)的比 例,特别是当GO掺量为0.01%时,有害孔和多害孔 的比例减少了31.25%.

表 3 28 d 时不同 GO 掺量下 PVA 纤维增强水泥基材料的孔隙率和孔径分布 Table 3 Porosity and pore size distribution of PVA fiber reinforced cementitious materials with different GO dosages at 28 d

Specimen	Total porosity(by	Mode pore-size/	Pore size distribution(by volume)/ $\%$				
	volume)/%	nm	Harmless hole	Less harmful hole	Harmful hole	Porous hole	
G0	27.30	42.65	38.51	33.06	21.36	7.07	
G0.01	24.89	33.52	42.17	37.16	12.01	8.66	
G0.03	25.62	35.97	40.38	39.01	13.06	7.55	
G0.05	28.51	42.19	35.53	35.76	21.95	6.76	

适量GO的掺入还优化了孔径分布,如图12所 示.由图12可见:在0.01%的GO掺量下,孔径分布 曲线中的峰值(最可几孔径)下降了21.41%;但当 掺入0.05%的GO时,试件G0.05的孔隙结构参数 略有不利变化,总孔隙率、最可几孔径和有害孔所 占比例均略高于对照组.适量的GO有助于填充孔 隙,促进水化过程,进而在孔隙和孔洞中形成更致 密的水化产物<sup>[28]</sup>.试验结果表明,掺入适量的GO 可以改善孔隙结构,形成更致密的微观结构,降低 试件断裂部位的内部缺陷,提高纤维与水泥基体之 间的黏结强度,改善试件的脆弱部分,增加试件的 韧性.



图 12 28 d 时不同 GO 掺量下 PVA 纤维增强水泥基材 料的孔径分布曲线

Fig. 12 Pore size distribution curves of PVA fiber reinforced cementitious materials with different GO dosages at 28 d

# 3 结论

406

(1)氧化石墨烯(GO)在PVA纤维增强水泥基 材料中的应用能有效提高材料的力学性能,相对于 单独采用PVA纤维增强的水泥基材料,0.01%GO 的掺入使材料28d时的初裂拉伸强度、极限拉伸强 度和极限拉伸应变分别提高了26.97%、31.28%、 23.25%;但GO掺量过多容易发生团聚,对PVA纤 维增强水泥基材料的提升效果反而降低.

(2)从微观形貌来看,相对于单独采用PVA纤 维增强的水泥基材料,掺入适量GO能够促进水化产 物形成,增强水化产物与PVA纤维的黏附性,使界面 结合得更紧密,增加了PVA纤维与水泥基体之间的 结合强度.

(3) 在 PVA 纤维增强水泥基材料中加入适量 GO 能够改善材料的孔隙率,并优化孔隙结构的分 布,减少其内部缺陷,使微观结构更加致密均匀,从 而改善了试件在断裂时的薄弱环节,有效提高了试 件的延性.

## 参考文献:

- JALAL M, MANSOURI E, SHARIFIPOUR M, et al. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles [J]. Materials & Design, 2012, 34: 389-400.
- [2] 牛恒茂,武文红,邢永明,等.纤维桥接裂缝过程与分布对水 泥基材料弯曲性能影响[J].建筑材料学报,2016,19(2):352-358.
   NIU Hengmao, WU Wenhong, XING Yongming, et al. Effects of the process of polyvinyl alcohol(PVA) fiber bridging cracks and fiber distribution on the bending properties of cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 352-358. (in Chinese)
- [3] LIQH, SUNCJ, XUSL. Thermal and mechanical properties of ultrahigh toughness cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers at elevated temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176:107201.
- [4] HASKETT M, SADAKKATHULLA M M, OEHLERS D J, et al. Adelaide research and scholarship:Deflection of GFRP and PVA fibre reinforced concrete beams[C]//Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012). Rome:[s.n.], 2012:13-15.
- [5] LING Y F, WANG K J, LI W G, et al. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164:747-757.
- [6] LIHD, XUSL, LEUNGCKY. Tensile and flexural properties of ultra high toughness cemontious composite[J]. Journal of

Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2009, 24 (4):677-683.

- [7] 李庆华, 徐松杰, 徐世烺,等.采用碳纳米管提高纤维砂浆的起裂断裂韧度[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):186-190.
   LI Qinghua, XU Songjie, XU Shilang, et al. Improvement of the initial fracture toughness of fiber mortar by carbon nanotubes[J].
   Journal of Building Materlals, 2017, 20(2):186-190. (in Chinese)
- [8] LI H D, WEI J J, LONG W J. Quantifying the difference of uniformly dispersed and re-agglomerated graphene oxide-based cement pastes on rheological and mechanical properties[C]//3rd International Conference on Civil Engineering and Materials Science, ICCEMS 2018. Chengdu: MATEC Web of Conferences, 2018, 206:03003.
- [9] LÜSH, MAYJ, QIUCC, et al. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 121-127.
- [10] 吕生华,张佳,殷海荣,等.氧化石墨烯调控水化产物增强增 韧水泥基复合材料的研究进展[J].陕西科技大学学报,2019, 37(3):136-145.

LÜ Shenghua, ZHANG Jia, YIN Hairong, et al. Research progress of graphene oxide reinforced and toughened cement-based composites[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2019, 37(3):136-145. (in Chinese)

[11] 吕生华,孙婷,刘晶晶,等.氧化石墨烯纳米片层对水泥基复 合材料的增韧效果及作用机制[J].复合材料学报,2014,31(3): 644-652.

LÜ Shenghua, SUN Ting, LIU Jingjing, et al. Toughening effect and mechanism of graphene oxide nanosheets on cement matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3):644-652. (in Chinese)

- [12] WANG Q, WANG J, LU C X, et al. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement[J]. New Carbon Materials, 2015, 30(4):349-356.
- [13] TONG T, FAN Z, LIU Q, et al. Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro- properties of cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106:102-114.
- [14] 李欣,罗素蓉.氧化石墨烯增强水泥复合材料的断裂性能[J]. 复合材料学报,2021,38(2):612-621.
  LI Xin, LUO Surong. Fracture properties of graphene oxide reinforced cement composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021,38(2):612-621. (in Chinese)
- [15] LU Z Y, YAO J, LEUNG C K Y. Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 126:105899.
- [16] KANAKUBO T. Tensile characteristics evaluation method for ductile fiber-reinforced cementitious composites [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1):3-17.
- [17] 周健.碳纳米管对 ECC 力学性能及机敏性能影响的研究[D].
   济南:山东大学, 2018.
   ZHOU Jian. Mechanical behavior and self-sensing property of

multi-walled carbon nanotubes reinforced engineered cementitious composites[D]. Jinan: Shangdong University, 2018. (in Chinese)

- [18] 牛旭婧,朋改非,何杰,等.多尺度钢纤维组合与碳纳米管对RPC 力学性能影响[J].建筑材料学报,2020,23(1):216-223.
  NIU Xujing, PENG Gaifei, HE Jie, et. al. Influence of multiscale steel fiber combination and carbon nanotube on mechanical properties of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020,23(1):216-223. (in Chinese)
- [19] 何威,许吉航,焦志男.少层石墨烯对水泥净浆流动性能及力学 性能的影响[J]. 复合材料学报,2022,39(11):5637-5649.
  HE Wei, XU Jihang, JIAO Zhinan. Effect of few-layer graphene on the fluidity and mechanical properties of cement paste[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11):5637-5649. (in Chinese)
- [20] KANDA T, LI V C. Effect of fiber strength and fiber-matrix interface on crack bridging in cement composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(3):290-299.
- [21] LONG W J, WEI J J, XING F, et al. Enhanced dynamic mechanical properties of cement paste modified with graphene oxide nanosheets and its reinforcing mechanism[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93:127-139.
- [22] 崔鑫有.氧化石墨烯对水泥粉煤灰体系的性能影响及作用机理 研究[D].北京:北京建筑大学,2018.

CUI Xinyou. Effect of graphene oxide on properties and

mechanism of cement fly ash system [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)

- [23] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC) [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(1):104-111.
- [24] LU C, LU Z Y, LI Z J, et al. Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious composites
   [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120:457-464.
- [25] JIANG W G, LI X G, LÜ Y, et al. Cement-based materials containing graphene oxide and polyvinyl alcohol fiber: Mechanical properties, durability, and microstructure [J]. Nanomaterials, 2018, 8(9):638.
- [26] PAN Z, HE L, QIU L, et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 58:140-147.
- [27] LI G Y, WANG P M, ZHAO X H. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes [J]. Carbon, 2005, 43 (6) : 1239-1245.
- [28] QURESHI T S, PANESAR D K. Impact of graphene oxide and highly reduced graphene oxide on cement based composites[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206:71-83.