

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.060

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



多尺度纤维复合增强水泥基材料的力学性能

张勤¹, 巩稣稣¹, 赵永胜², 吴耀青¹, 周继凯¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为改善水泥基材料抗拉强度低、韧性差以及易开裂等性能缺陷,采用微米级碳酸钙晶须和厘米级短切耐碱玻璃纤维复合增强高性能水泥基材料,并对不同纤维增强水泥基材料的基本力学性能进行研究。结果表明:微观碳酸钙晶须和宏观耐碱玻璃纤维均有利于水泥基材料力学性能的提高,且提高程度与纤维(或晶须)掺量及长度相关;采用碳酸钙晶须和耐碱玻璃纤维复合增强水泥基材料,可分别在微、宏观结构层次上发挥两种纤维的增强优势,增强水泥基材料的抗折和劈拉强度比未增强时最多可分别提高约60%和80%。

关键词:多尺度纤维;水泥基材料;复合增强;力学性能

中图分类号:TU528.572 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2021)02-0123-07

Mechanical properties of multi-scale fiber compound reinforced cement-based materials

ZHANG Qin¹, GONG Susu¹, ZHAO Yongsheng², WU Yaoqing¹, ZHOU Jikai¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: In order to improve the performance deficiency of cement-based materials such as low tensile strength, poor toughness and easy cracking, the basic mechanical properties of cement-based materials reinforced by micron grade CaCO₃ whisker and centimeter-grade short AR-glass fiber were studied by testing. The results show that the mechanical properties of reinforced cement-based material can be improved by the proper addition of CaCO₃ whisker and/or AR-glass fiber, and the improvement degree is related to the content and length of fibers. For the cement-based materials compound reinforced with CaCO₃ whisker and AR-glass fiber, the improvement of mechanical properties of the cement-based materials can be explained that the reinforcing roles of the two kinds of fibers can be played at the micro and macro structural levels respectively, and the flexural and tensile strength of reinforced cement-based materials can be increased by up to 60% and 80% compared with that of non-reinforced cement-based materials.

Keywords: multi-scale fiber; cement-based materials; compound reinforced; mechanical properties

收稿日期:2020-02-19

基金项目:国家自然科学基金(51508154,51978125);国家重点研发计划(2017YFC0404902)

作者简介:张勤(1983-),男,博士,副教授,主要从事钢筋混凝土结构抗震、耐久性 & 新型结构材料应用, E-mail: zhangqin8190@163.com。

Received: 2020-02-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51508154, 51978125); National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0404902)

Author brief: ZHANG Qin (1983-), PhD, associate professor, main research interests: seismic performance, durability and structural material applications of reinforced concrete structures, E-mail: zhangqin8190@163.com.

为改善水泥基材料(包括混凝土和砂浆等)抗拉强度低、韧性差以及易开裂等缺陷,在水泥基材料中掺入纤维以达到增强增韧目的是目前普遍认同的方法^[1-3]。通过对不同纤维(如钢纤维、聚丙烯纤维及耐碱玻璃纤维等)增强水泥基材料的受力性能、韧性及变形性能等的研究表明,掺入纤维可以有效提高水泥基材料的受力和变形性能,且提高效果在一定范围内随纤维掺量的增加趋于明显^[4-6]。研究还表明^[7-8],不同类型的纤维对水泥基材料受力和变形性能的增强效果不尽相同,而且单一纤维对于水泥基材料性能的提升通常侧重于某特定方面,在综合性能提升方面往往效果欠佳。因此,要综合提升水泥基材料的受力和变形性能,需要采用不同尺度的混杂纤维对水泥基材料进行复合增强,以起到协同互补的工作效应。学者们自 20 世纪 70 年代开始就陆续开展混杂纤维对水泥基材料力学性能改善的相关研究,包括不同长度或直径的同种纤维混杂、不同类型的两种纤维混杂(如钢-聚丙烯纤维混杂、钢-玄武岩纤维混杂以及聚丙烯-耐碱玻璃纤维混杂等)以及不同类型的 3 种或多种纤维混杂对水泥基材料力学性能的影响^[9-11]。这些研究表明,混杂纤维增强水泥基材料的各项力学性能及韧性均优于普通水泥基材料和单一纤维增强水泥基材料,不同纤维的增强作用在一定程度上可以叠加互补,可呈现良好的正混杂效应和复合增强效果。但之前的相关研究主要侧重于探讨宏观尺度纤维(如厘米级纤维)混杂后的增强效果,对于不同尺度,尤其是微观和宏观纤维混杂对水泥基材料增强效果的研究不多;而水泥基材料本质上是由微观、细观及宏观结构组成的多尺度结构,采用不同尺度的纤维在不同结构层次进行增强是提高水泥基材料综合性能的最有效措施之一^[12-16]。

综上所述,采用多尺度纤维复合增强水泥基材料能有效改善其力学性能,但关于微观纤维和宏观纤维的组合方式及掺量比例等对增强效果影响仍有待深入研究。笔者从工程应用的可行性和经济性角度考虑,以厘米级耐碱玻璃纤维作为宏观纤维、微米级碳酸钙晶须作为微观纤维混杂组成多尺度纤维体系,考虑纤维长度、掺量及混杂比例等参数影响,研究多尺度纤维对高性能水泥基材料受力和抗裂性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

为明确不同尺度纤维对水泥基材料力学性能的影响,以耐碱玻璃纤维为宏观纤维、碳酸钙晶须为微观纤维,考虑宏观纤维长度和混杂类型影响,设计了 8 组试件,如表 1 所示。其中,PC 为未掺纤维的普通水泥基材料对比组;CW 为微观纤维(即碳酸钙晶须)增强水泥基材料组,晶须质量掺量分别为 5%、10%和 20%;GF6、GF12 及 GF18 分别为 6、12、18 mm 长度的宏观纤维(即耐碱玻璃纤维)增强水泥基材料组,且纤维质量掺量分别为 2%、5%和 8%;CW+GF 组为微观碳酸钙晶须与宏观耐碱玻璃纤维混掺增强高性能水泥基材料组,该组合中考虑了耐碱玻璃纤维长度以及两种纤维掺量比例对混凝土增强效果的影响。需要说明的是,研究中两种纤维复合增强水泥基材料中的纤维总掺量取为 5%,主要基于课题组前期研究结果考虑了最佳纤维掺量及纤维增强水泥基材料工作性能等影响^[17]。

表 1 各组水泥基材料试件纤维掺量

Table 1 Fiber content of each type of cement-based materials

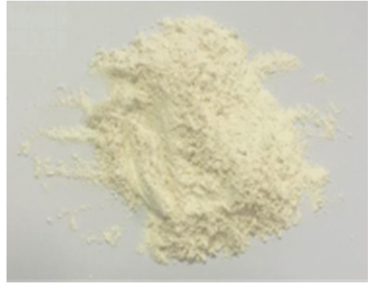
编号	$\varphi(\varphi')/\%$
PC	
CW	5、10、20
GF6	2、5、8
GF12	2、5、8
GF18	2、5、8
CW+GF6	5(1:4)、5(1.5:3.5)、5(2.5:2.5)、5(3.5:1.5)、5(4:1)
CW+GF12	5(1:4)、5(1.5:3.5)、5(2.5:2.5)、5(3.5:1.5)、5(4:1)
CW+GF18	5(1:4)、5(1.5:3.5)、5(2.5:2.5)、5(3.5:1.5)、5(4:1)

注:表中符号 φ 为掺量,纤维掺量均以占水泥质量的百分比计,括号内比值为混掺纤维固定掺量为 5% 时晶须和耐碱玻璃纤维混杂比例(φ')。

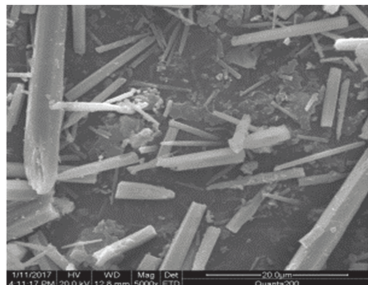
1.2 材料特性

试验的水泥基材料采用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)、河砂、自来水及 JM-PCA(I)减水剂等原材料进行配比,具体为:水泥:砂:水:减水剂=1:1.36:0.34:0.016。微观纤维采用峰竺 NP-CW2 型碳酸钙晶须,相对密度为 2.8 g/cm³,长度为 20~30 μm ,直径为 0.5~1.2 μm ,其外观及微观形态如图 1 所示。耐碱玻璃纤维采用亚泰达公司生产的 6、12、18 mm 短切纤维,相对密度为 2.7 g/m³,抗拉强度为

2 500~3 500 MPa,弹性模量为 80.4 N/mm²,纤维直径为 15 μm,其外观为白色束状,微观观测下每一根纤维束都由大量纤维单丝复合而成,外观及微观形态如图 2 所示。



(a) 外观形貌

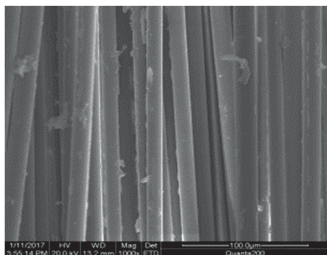


(b) 碳酸钙晶须微观形态

图 1 碳酸钙晶须

Fig. 1 CaCO₃ whisker

(a) 外观形貌



(b) 耐碱玻璃纤维微观形态

图 2 耐碱玻璃纤维

Fig. 2 AR-glass fibers

1.3 试件制作及试验方法

试验主要测试不同纤维增强高性能水泥基材料的抗压、抗折及劈拉性能,各试件制作及试验方法均参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)^[18]及《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T

17671—1999)^[19]的要求进行,抗压、劈拉试件尺寸为 70.7 mm 立方体,抗折试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体,试件成型 24 h 后拆模,放入水中常温养护 28 d 后取出,每种工况各制作 6 个试件,在万能材料试验机上进行试验。试验中,水泥基材料的抗压、抗折及劈拉强度计算式分别为

$$f_{cu} = \frac{P}{A}, f_{fu} = \frac{1.5PL}{b^3}, f_{tu} = \frac{2P}{\pi A} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为水泥基材料立方体抗压强度,MPa; f_{fu} 为水泥基材料抗折强度,MPa; f_{tu} 为水泥基材料劈拉强度,MPa; P 为试件破坏荷载,N; A 为试件受压面积,mm²; L 为试件净距,即为 100 mm; b 为棱柱体正方形截面的边长。

需要说明的是,试件制作过程中为防止纤维在混凝土中分散不均匀出现“聚团”现象,需对投料顺序及搅拌过程进行严格控制,即首先将称量好的砂和水泥倒入搅拌机中搅拌均匀,再边搅拌边均匀加入晶须持续搅拌 1 min,然后将搅拌均匀的水和减水剂的混合溶液倒入搅拌机搅拌 1~2 min;如加入宏观耐碱玻璃纤维,则需在上述过程之后边搅拌边将短切耐碱玻纤均匀撒入搅拌机,再持续搅拌 2~3 min。这一投料搅拌方式可使纤维在混凝土中比较均匀地分布,能很好地保证纤维混凝土的施工成型要求。

2 结果分析

2.1 单一纤维增强水泥基材料

表 2 给出了碳酸钙晶须和耐碱玻璃纤维分别增强水泥基材料抗压、抗折及劈拉强度 28 d 的实测平均值。从表 2 可以看出,微观碳酸钙晶须掺入对水泥基材料力学性能的增强作用明显,其抗压、抗折及劈拉强度最多可分别提高 8.31%、37.63%及 30%,且提高幅度与掺量相关,通常掺量越多强度越大,但掺量超过一定值后再增加反而起反作用,如当水泥基材料中碳酸钙晶须掺量从 10%增至 20%后,其抗压、抗折强度不仅未提高,反而呈现一定程度的降低。宏观耐碱玻璃纤维的掺入同样可提高水泥基材料的力学性能,当掺量在 5%及以上时,提高较明显,而且纤维长度越长,水泥基材料的力学性能提高效果越佳;宏观耐碱玻璃纤维增强的水泥基材料试件的抗压、抗折和劈拉强度最大可分别提高 7.79%、61.29%及 80.0%。

表 2 单一纤维增强水泥基材料的 28 d 强度

Table 2 Strengths of reinforced cement-based materials by single type fiber (28 d)

编号	抗压强度 f_{cu}/MPa	抗折强度 f_{tu}/MPa	劈拉强度 f_{tu}/MPa
PC	38.5	9.3	3
CW-5	39.2	10.6	3.4
CW-10	41.7	12.8	3.6
CW-20	36.4	11.2	3.9
GF6-2	37.5	9.8	3.7
GF6-5	38.6	11.9	4.6
GF6-8	38.8	14	4.1
GF12-2	38	11.4	3.8
GF12-5	39	14	3.9
GF12-8	40.3	14.4	4.6
GF18-2	39.7	12.3	5.2
GF18-5	41.5	13.3	5.4
GF18-8	41	15	4.7

注:表中 PC 为未采用纤维增强的细骨料混凝土;“CW-5”表示 5% 掺量的碳酸钙晶须增强细骨料混凝土;“GF6-2”表示长度为 2% 掺量的 6 mm 耐碱玻璃纤维增强细骨料混凝土,其他编号以此类推。

为进一步反映单一纤维增强水泥基材料的力学性能,图 3、图 4 分别给出了碳酸钙晶须、耐碱玻璃纤维增强水泥基材料的抗压、抗折及劈拉强度随纤维掺量的变化趋势。可见,碳酸钙晶须增强水泥基材料的劈拉强度随晶须掺量的增加呈增长趋势,但抗压和抗折强度随晶须掺量的增加呈先增后减的趋势,且抗折强度的降幅比较大;而耐碱玻璃纤维增强水泥基材料的抗压、劈拉强度随纤维掺量的增加大致呈先增后减的趋势,但抗折强度随纤维掺量的增加呈增长趋势。此外,碳酸钙晶须的质量掺量在 10% 左右时对混凝土的增强作用最明显,宏观纤维掺量在 5% 左右时,水泥基材料的综合力学性能提高幅度最大。同时,宏观纤维的长度(长径比)也是影响水泥基材料力学性能的重要因素,18 mm 耐碱玻璃纤维的增强效果要优于 12、6 mm 纤维,特别是在混凝土的抗压和劈拉性能提高方面尤为显著。

2.2 碳酸钙晶须和耐碱玻璃纤维复合增强水泥基材料

为分析微观和宏观纤维复合增强高性能水泥基材料的力学性能,表 3 给出了碳酸钙晶须和不同长度的耐碱玻璃纤维复合增强水泥基材料试件的抗

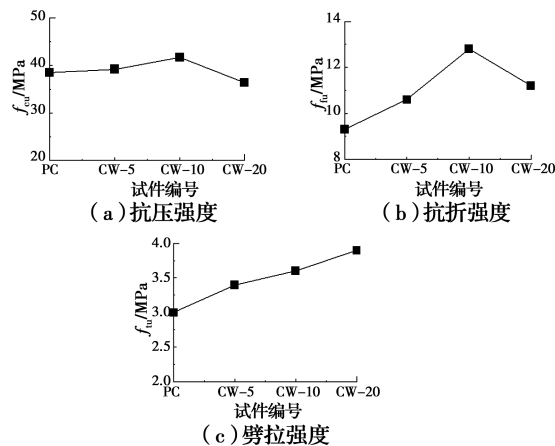


图 3 碳酸钙晶须增强水泥基材料强度实测值
Fig. 3 Experimental values of strength of cement-based materials reinforced by CaCO₃ whisker

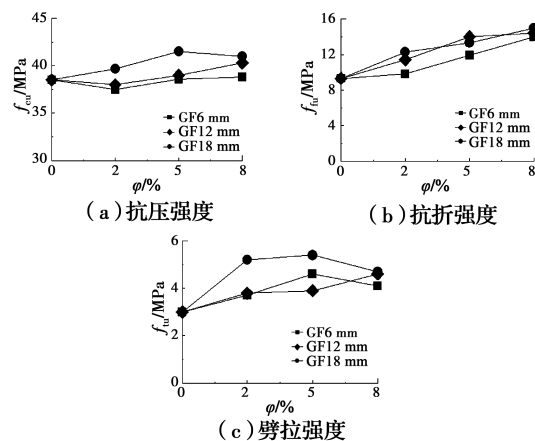


图 4 耐碱玻璃纤维增强水泥基材料强度实测值
Fig. 4 Experimental values of strength of cement-based materials reinforced by AR-glass fiber

压、抗折及劈拉强度 28 d 实测平均值。由表 3 的试验结果对比可看出,水泥基材料采用碳酸钙晶须和耐碱玻璃纤维复合增强后,其抗压强度比单一纤维增强时有明显提高,提高幅度与两种尺度纤维间混杂比例以及宏观纤维长度相关,当两种尺度纤维混杂比例相当(即掺量比例为 2.5:2.5)且宏观纤维较长时效果最佳,最大提高幅度约在 20%~30% 之间;而其抗折、劈拉强度介于两种尺度纤维单一增强时之间,比微观纤维单一增强时大、比宏观纤维单一增强时小,这与微观纤维和宏观纤维对水泥基材料的增强机理不同有关,在宏观裂缝控制及抗拉性能提高方面,厘米级的耐碱玻璃纤维比微米级的碳酸钙晶须更有优势,因此,宏观纤维掺量比例较大时,抗折及劈拉强度较大,反之较小,两种强度指标在不同纤维混杂比例下的平均变化范围约为 0~40%,

有较大的调整空间。因此,要使水泥基材料获得综合性能优越的增强效果,应根据需要调整不同尺度纤维的混杂比例以充分发挥复合增强效果。

表 3 碳酸钙晶须-耐碱玻璃纤维增强高性能水泥基材料 28 d 抗压强度

Table 3 Strengths of high performance cement-based materials reinforced by CaCO₃ whisker and AR-glass fiber(28 d)

编号	抗压强度 f_{cu} /MPa	抗折强度 f_{tu} /MPa	劈拉强度 f_{tt} /MPa
CW-1GF6-4	37.5	11	4.5
CW-1.5GF6-3.5	40.7	9.2	3.8
CW-2.5GF6-2.5	36.6	10	3.5
CW-3.5GF6-1.5	39.3	10.4	3.7
CW-4GF6-1	38	9.3	3
CW-1GF12-4	42.7	13.2	3.7
CW-1.5GF12-3.5	47.3	11.5	3.5
CW-2.5GF12-2.5	43.4	8.9	3.9
CW-3.5GF12-1.5	45.2	10.7	4.4
CW-4GF12-1	41.6	10	4
CW-1GF18-4	36.5	11.6	4.5
CW-1.5GF18-3.5	46.3	11.5	4.1
CW-2.5GF18-2.5	49.8	11.2	4.7
CW-3.5GF18-1.5	46.7	13.1	3.6
CW-4GF18-1	42.2	10.4	4

注:表中“CW-1GF6-4”表示细骨料混凝土中碳酸钙晶须和 6 mm 耐碱玻璃纤维的掺量比例为 1:4,其他试件编号以此类推。

为进一步明确不同尺度纤维对水泥基材料力学性能的增强效果,图 5 给出了不同掺量比例下两种尺度纤维复合增强水泥基材料强度的变化趋势。由

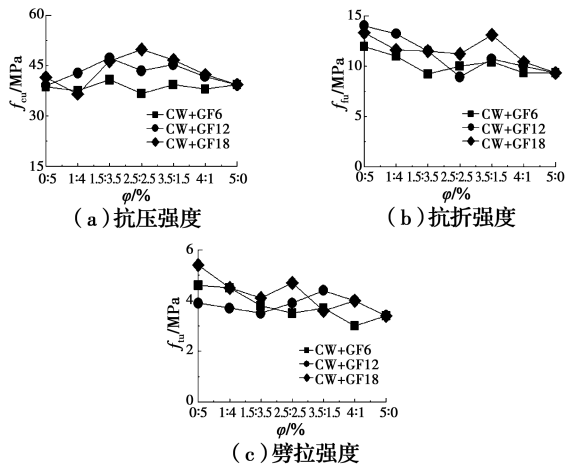


图 5 晶须-耐碱玻璃纤维复合增强水泥基材料强度实测值
Fig. 5 Experimental values of strength of cement-based materials reinforced by whisker and AR-glass fiber

图 5 可看出,多纤维复合增强水泥基材料的抗压强度随碳酸钙晶须掺量比例的增加(或耐碱玻璃纤维掺量比例的减少)大致呈先增后减的趋势,在合适的掺量比例下呈现明显的正相关效应(即波峰效应),该效应在两种纤维比例相当和宏观纤维长度较大时尤为明显;与此同时,多纤维复合增强水泥基材料的抗折、劈拉强度随碳酸钙晶须掺量比例的增加(或耐碱玻璃纤维掺量比例的减少)大致呈降低趋势。这进一步表明,水泥基材料的综合力学性能可通过调整不同尺度纤维的混杂比例予以控制。

3 增强机理

研究表明^[10,12],水泥基材料内部的微孔洞和微裂纹等结构缺陷可通过掺入适量纤维进行改善。纤维在水泥基材料中的增强作用主要有填充、阻裂和桥联等,但不同纤维对基体性能增强的侧重点不同。对于微米级的碳酸钙晶须,其增强作用主要表现在对水泥基材料内部结构的密实和微裂纹抑制方面,因而掺量合适时能有效提高水泥基材料的抗压强度,并能在一定程度上改善抗拉性能。图 6(a)、(b)分别给出了普通水泥基材料和碳酸钙晶须增强水泥基材料的微观形态扫描电镜图。可见,均匀分散的碳酸钙晶须一方面可填充水泥基材料内部微孔隙以改善强度,另一方面可抑制微裂缝开展,使得水泥基材料的破坏面呈现明显的凹凸不平状,而未进行纤维增强的水泥基材料破坏面则相对平整,破坏时的脆性特征相对显著。值得注意的是,尽管微观尺度的碳酸钙晶须较厘米级的短切纤维有更好的分散性,但掺量过多或搅拌不均匀,仍可能出现“团聚”现象,影响增强效果,如图 6(c)所示。对于厘米级的耐碱玻璃纤维,其增强作用更多地表现在对水泥基材料宏观裂缝抑制和内部结构桥联上,宏观纤维通过与基体发生滑移、摩擦以及自身断裂来消耗能量,从而阻止裂缝进一步开展,达到阻裂增韧的目的。图 6(d)给出的水泥基材料微观结构观测结果显示,如果水泥基体的裂缝间存在耐碱玻璃纤维,则裂缝间的应力可以通过宏观纤维有效传递,裂缝的扩展也能得到有效抑制。此外,宏观纤维还能够在基体内部孔隙和裂缝间起到桥联作用,可有效保证水泥基材料内部结构的整体性和协同受力能力,通常纤维长度越大桥联作用越明显。图 6(e)给出的纤维增强水泥基材料的微观形态可见,耐碱玻璃纤维可在

基体的内部空隙间起桥联作用。此外,宏观纤维的阻裂和桥联作用还与掺量有关,纤维掺量过大时,纤维会因“团聚”现象在基体内部形成空隙和缺陷,影响其增强效果,如图 6(f)所示。总的来说,采用不同尺度纤维复合增强水泥基材料可充分发挥各纤维的增强特点,达到在不同结构层次和受力阶段对水泥基材料发挥增强作用的目的。需要说明的是,图 6 所示的微观形态中未同时显示碳酸钙晶须和耐碱玻璃纤维复合增强水泥基材料的扫描电镜图片,这主要是由于两种纤维的尺度相差明显,无法在相同放大倍数下同时观察到各自的微观形态。

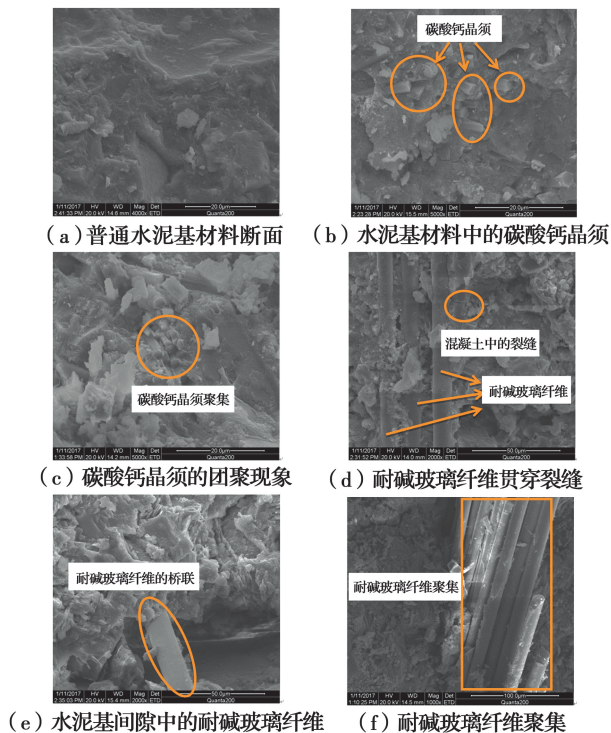


图 6 不同尺度纤维增强水泥基材料的微观结构形态

Fig. 6 Microscopic structural morphology of cement-based materials reinforced with different fibers

4 结论

1) 微观碳酸钙晶须和宏观耐碱玻璃纤维均可改善水泥基材料的抗压、抗折及劈拉性能,且改善程度与纤维掺量及长度相关。碳酸钙晶须的质量掺量约 10% 时,水泥基材料的力学性能提高幅度最大,其中,抗折强度较未增强时可提高近 40%;耐碱玻璃纤维 5% 掺量时,水泥基材料的综合力学性能表现最优,且基体的力学性能提高程度随纤维长度增加而增加,18 mm 耐碱玻璃纤维增强水泥基材料的抗折强度较未增强时的提高幅度最多可达 60%。

2) 采用微观碳酸钙晶须和宏观耐碱玻璃纤维复合增强高性能水泥基材料,可在不同结构层次上发挥两种纤维的增强优势。微、宏观纤维复合增强混凝土的抗压强度通常明显高于采用单一纤维增强时;而抗折、劈拉强度一般介于采用两种纤维单一增强之间,当复合纤维中宏观纤维比例增大时,增强高性能水泥基材料的抗折、劈拉强度提高幅度增大,反之亦然。

3) 不同尺度的纤维对水泥基材料的增强侧重点不同。微观碳酸钙晶须的增强作用主要表现为对水泥基材料内部缺陷的改善以及微裂缝的抑制,而宏观耐碱玻璃纤维的增强作用主要为对水泥基材料宏观裂缝的抑制和内部结构的桥联;多尺度纤维复合增强高性能水泥基材料的性能特征主要与纤维类型、掺量、混杂比例及长度等有关。

参考文献:

- [1] BANTHIA N. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices [J]. *Materials and Structures*, 2004, 37(10): 707-716.
- [2] 杨成蛟, 黄承逵, 车轶, 等. 混杂纤维混凝土的力学性能及抗渗性能 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1): 89-93.
- [3] YANG C J, HUANG C K, CHE Y, et al. Mechanical properties and impermeability of hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(1): 89-93. (in Chinese)
- [4] KWON S, NISHIWAKI T, KIKUTA T, et al. Development of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced cement-based composites [J]. *ACI Materials Journal*, 2014, 111(3): 309-318.
- [5] 王成启, 吴科如. 钢纤维和碳纤维混凝土力学性能的研究 [J]. *建筑材料学报*, 2003, 6(3): 253-256.
- [6] WANG C Q, WU K R. Study on the mechanical properties of carbon fiber and steel fiber concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2003, 6(3): 253-256. (in Chinese)
- [7] 邓宗才, 丁建明. BFRC 中玄武岩纤维分散性与弯曲韧性试验研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(1): 47-50.
- [8] DENG Z C, DING J M. Experimental study on the dispersibility and flexural toughness of basalt fibers in BFRC [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(1): 47-50. (in Chinese)
- [9] SINGH J, KUMAR M, KUMAR S, et al. Properties of glass-fiber hybrid composites: A review [J].

- Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, 56(5): 455-469.
- [7] 吴科如, 李淑进. 不同尺寸钢纤维混杂增强水泥砂浆的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 599-604. WU K R, LI S J. Study of mechanical properties of different size hybrid steel fiber reinforced cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(6): 599-604. (in Chinese)
- [8] ALSHAGHEL A, PARVEEN S, RANA S, et al. Effect of multiscale reinforcement on the mechanical properties and microstructure of microcrystalline cellulose-carbon nanotube reinforced cementitious composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 149: 122-134.
- [9] GHUGAL Y M, DESHMUKH S B. Performance of alkali-resistant glass fiber reinforced concrete [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006, 25(6): 617-630.
- [10] 刘伟静. 钢纤维混杂玄武岩纤维增强水泥砂浆的基本力学性能与增强机理试验研究[J]. 混凝土, 2013(12): 125-128. LIU W J. Experimental research on mechanical properties and strengthening mechanisms of steel and basalt hybrid fiber-reinforced cement mortar [J]. Concrete, 2013(12): 125-128. (in Chinese)
- [11] DE ALENCAR MONTEIRO V M, LIMA L R, DE ANDRADE SILVA F. On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 280-291.
- [12] 张聪, 曹明莉. 多尺度纤维增强水泥基复合材料力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 661-668. ZHANG C, CAO M L. Mechanical property test of a multi-scale fiber reinforced cementitious composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 661-668. (in Chinese)
- [13] LAWLER J S, ZAMPINI D, SHAH S P. Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 595-604.
- [14] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.
- [15] LI M, YANG Y J, LIU M, et al. Hybrid effect of calcium carbonate whisker and carbon fiber on the mechanical properties and microstructure of oil well cement [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 995-1002.
- [16] 高丹盈, 李哈. 纤维纳米混凝土的微观增强机理与强度计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(5): 47-55. GAO D Y, LI H. Micro enhancement mechanism and strength calculation method of fiber and nanosized material reinforced concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 47-55. (in Chinese)
- [17] 赵永胜, 张勤, 张正, 等. 掺入短切纤维的织物网增强混凝土薄板受弯性能[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 118-122. ZHAO Y S, ZHANG Q, ZHANG Z, et al. Flexural behavior of textile reinforced concrete sheets with chopped fibers [J]. Building Structure, 2019, 49(23): 118-122. (in Chinese)
- [18] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. Standard for test method of performance on building mortar: JGJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [19] 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. Method of testing cements-determination of strength: GB/T 17671-1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)

(编辑 胡玲)