

高延性水泥基材料纤维分布及其影响因素研究进展

王振波, 王鹏宇, 孙 鹏

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 纤维在基体中的分布和取向情况对高延性水泥基材料(ECC)的应变硬化、多缝开裂、裂缝自愈合等特征具有显著影响。在归纳近年来有关 ECC 纤维分布研究的基础上, 简要介绍了纤维分布的表征参数和方法, 从微观和宏观的层面详细阐述了纤维分布对 ECC 材料力学性能的影响, 从纤维本体特征、基材特征及成型工艺等 3 个方面重点分析了 ECC 纤维分布的关键影响因素。最后, 对目前 ECC 纤维分布研究中存在的问题进行评述, 并提出了对未来研究的建议。

关键词: 高延性水泥基复合材料; 纤维分布; 力学性能; 影响因素

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2284-12

网络出版时间: 2022-07-01



Review on Fiber Distribution Effect on Engineered Cementitious Composites

WANG Zhenbo, WANG Pengyu, SUN Peng

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The distribution and orientation of fibers in the matrix have a great impact on the characteristics of strain hardening, multiple cracking and crack self-healing of engineered cementitious composites (ECC). Based on recent work on ECC fiber distribution, this review briefly introduced the characterization parameters and methods of fiber distribution. Effect of fiber distribution on the mechanical properties of ECC was represented from micro- to macro-scale. Three factors affecting ECC fiber distribution are fiber characteristics, matrix characteristics and molding process. In addition, some problems in the current research of ECC fiber distribution were also discussed, and the future research aspects were given.

Keywords: engineered cementitious composites; fiber distribution; mechanical properties; influencing factors

在普通混凝土中掺入纤维, 制备纤维增强混凝土(FRC)是解决混凝土脆性开裂问题的常用做法。其中, 纤维在混凝土内部三维乱向分布, 可限制裂纹的萌生和发展, 在一定程度上改善混凝土的韧性。但传统 FRC 的力学性质始终不能摆脱混凝土的应变软化属性, 其抗拉应力-应变曲线在初裂后很快进入应力下降段, 裂纹扩展无法得到有效控制^[1]。1992 年, Li 基于细观力学和断裂力学设计出在拉伸和剪切荷载作用下呈现高延展性的水泥

基复合材料, 称之为高延性纤维增强水泥基复合材料^[2](ECC)。与普通混凝土和传统纤维混凝土相比, ECC 在抗裂性能、变形性能、耐久性能等方面取得了明显进步, 其卓越的应变硬化、多缝开裂、裂缝自愈特征甚至是革命性的。

实现 ECC 超高性能的关键在于纤维、基材和纤维/基材界面的匹配设计。依据细观力学原理, ECC 需要去除传统 FRC 中的粗骨料, 增大胶凝材料用量, 适当提高纤维掺量, 并定制纤维的品种和

收稿日期: 2021-11-19。 修订日期: 2022-04-13。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808545); 北京市自然科学基金资助项目(8184083); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022YQLJ05)。

第一作者: 王振波(1989—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2021-11-19. Revised date: 2022-04-13.

First author: WANG Zhenbo (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: wangzb@cumtb.edu.cn

界面力学参数。保证纤维均匀分布是实现 ECC 材料设计理念的重要前提,而这在胶材用量大、纤维数量庞大的 ECC 体系中无疑是具有挑战性的。研究表明, ECC 的最终破坏发生在纤维桥接能力最弱的截面,而与该截面上的缺陷尺寸无关^[3]。ECC 优异的性能离不开纤维在基体中的桥接能力,而纤维桥接能力的有效发挥又在很大程度上依赖于纤维在基体中的分布情况^[4]。Li 等^[5]指出纤维的分布情况决定了纤维的桥接强度、余能、临界裂纹尺寸和多裂纹饱和程度。当纤维由一维均匀排列变为三维随机分布时,纤维的桥接效率下降高达 50%,此时大量的纤维处于“无效”状态,并且容易结团、增加材料内部的缺陷,劣化材料的使用性能^[6-8]。只有与拉伸应力方向基本一致且均匀分布在基体材料中的纤维,才能充分发挥其阻裂增韧的作用,进而提高 ECC 的力学性能。与理论研究中假定的纤维均匀分布不同,在材料制备与工程建造中纤维的分布情况将受到基体材料特征^[9-11]、成型工艺^[12]、纤维本体特征^[13-14]等众多因素的影响,很难达到均匀分布的状态。此外,当 ECC 涉及到不同种类的纤维混杂时,纤维的分布情况将更难调控。有报道指出,如果不能妥善处理纤维的分布问题,纤维的有效利用率将从均匀排列时的 100% 下降至随机分布时的 30%^[15],造成材料的大量浪费,也提高了工程成本。当掺入的纤维都接近平行于断裂面,纤维甚至会丧失桥接裂纹的能力,使 ECC 完全失去应变硬化的优势。

可见,深入探究 ECC 内部的纤维分布问题对于提升材料的性能及可靠性至关重要。基于此,本文将结合近年来 ECC 纤维分布的相关研究,首先介绍纤维分布的表征参数和方法,然后从微观和宏观的层面详细阐述纤维分布对 ECC 材料力学性能

的影响,提炼总结出纤维分布的关键影响因素。最后对目前研究中存在的问题进行评述,并提出对未来研究的建议。

1 纤维分布的表征参数

纤维分布的准确表征和定量评价是理解 ECC 材料和结构力学行为的重要前提。目前在对 ECC 中纤维的分布情况进行评价时多采用数字图像分析技术,即通过试验仪器获取试件内部或截面上的纤维图像,利用图像分析软件提取纤维的特征参数,进而计算出纤维分散系数、取向系数等对纤维的分布情况进行综合评价^[4, 16-20]。

常见的纤维分散系数有以下 3 种表达形式^[3, 5, 12, 21]:

$$\alpha = \exp \left[-\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \right] \quad (1)$$

$$\alpha = \exp \left[-\sqrt{\frac{\sum (x_i - 1)^2}{n}} \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \exp \left[-\sqrt{\frac{\sum (x_i / x_{\text{average}} - 1)^2}{n}} \right] \quad (3)$$

式中: α 为纤维分散系数, $\alpha \in [0, 1]$, 其值越接近 1, 纤维分散越均匀。 n 为试样横截面所划分的单元数目, x_i 是第 i 个单元上的纤维数目, $\bar{x}$ 是单元上纤维平均数目, x_{average} 是单个或多个图像中的单元上纤维数目的平均值。

通常情况下,纤维在基体内部一般呈三维乱向分布,断裂面上的纤维横截面形态可分为圆形、椭圆形和条状,如图 1a 所示。此时纤维的取向可由纤维与试件轴线之间夹角的余弦值来表示,其值代表了单根纤维在试件横截面上的方向^[17, 22],表达式为:

$$\theta = \arccos(d_f / l) \quad (4)$$

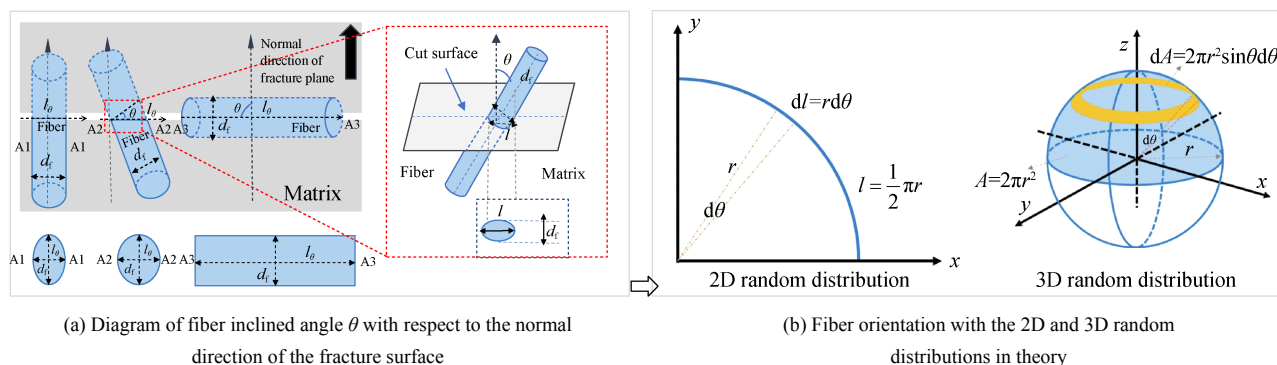


图 1 纤维分布状态及倾角示意^[4]
Fig. 1 Fiber distribution and fiber inclination^[4]

式中： θ 为纤维轴线与所在截面法线之间的夹角； d_f 为纤维直径； l 为纤维的椭圆图像上主轴长度(见图 1a)。考虑到 ECC 材料中纤维掺量较高，基体中的纤维分散后可以产生不同的取向分布。理论上，可以使用式(5)和式(6)分别计算二维及三维均匀分布时纤维取向的概率密度函数(见图 1b)。

$$p_{2D}(\theta) = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\theta} = \frac{2}{\pi} \quad (5)$$

$$p_{3D}(\theta) = \frac{1}{A} \frac{dl}{d\theta} = \sin \theta \quad (6)$$

在实际应用中，纤维并不是完美的二维或三维分布，而且材料的性能总是由多根纤维的共同作用决定。Xia 等^[23]提出了一种普遍情况下纤维的取向概率密度函数 $p(\theta)$ ，并用来评估纤维取向对纤维桥接能力的影响，表达式为：

$$p(\theta) = \frac{(\sin \theta)^{2r-1} (\cos \theta)^{2q-1}}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{2r-1} (\cos \theta)^{2q-1} d\theta} \quad (7)$$

式中， $\theta_{\min}$ 和 $\theta_{\max}$ 是纤维的理论最小和最大倾角，分别为 0 和 $\pi/2$ 。 r 和 q 是通过实验确定的形状参数，代表了随机纤维取向与参考方向之间倾角的变化情况^[3]。一般情况下 $r \geq 0.5$ ， $q > 0.5$ 。 r 值越大， $p(\theta)$ 曲线向大倾角偏移； q 值越大， $p(\theta)$ 曲线向小倾角偏移； r 和 q 值越大，定向分布越密集^[4]。

2 纤维分布对 ECC 宏观力学性能的影响

2.1 拉伸性能

根据 ECC 设计原理，当基体在拉伸荷载作用下开始出现裂缝时，跨越裂纹面的桥接纤维将承受外加应力以阻止裂纹的持续扩张。桥接应力将通过纤维/基体界面被转移回到周围基体，并允许开裂再次形成，然后应力再次重分布。如此循环往复，试件表面出现大量间隔的细小裂缝，直到最薄弱面的纤维桥接能力无法承受施加的荷载，多缝开裂过程结束^[2, 4]，如图 2 所示。

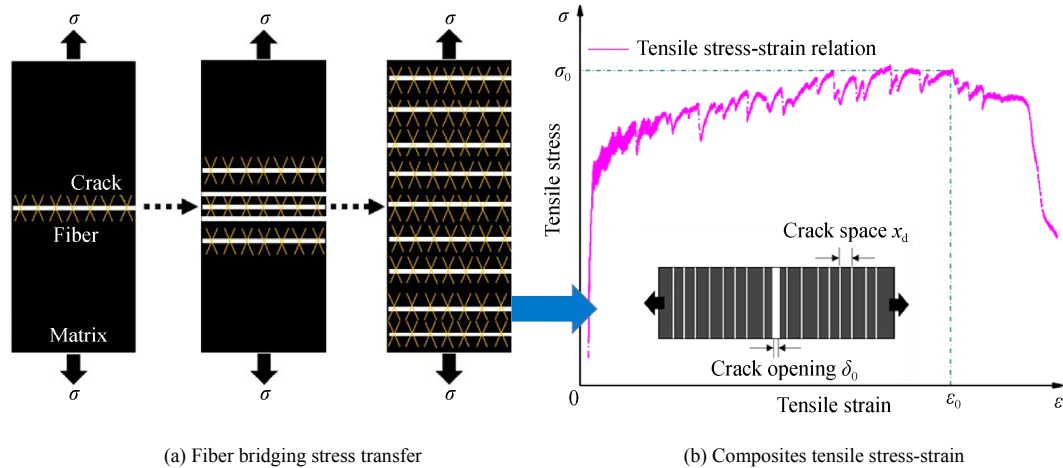


图 2 多缝开裂时纤维桥接应力示意图及相应的高延性行为^[24]

Fig. 2 Schematic diagram of the bridging stress for multiple cracking and the resulting high ductility behavior^[24]

研究表明，ECC 的拉伸应变硬化行为和拉伸应变能力大小与纤维分布情况密切相关^[25]。当纤维在裂纹处的分布情况较好时，可以有效地桥接裂纹，提高复合材料的拉伸性能和韧性。试验表明，沿加载方向倾斜较小的纤维能够显著提高材料的拉伸延性。但当纤维的取向较大时，纤维的桥接效率会大大降低，材料的力学性能也会受到负面影响^[4]，特别是极限抗拉强度。这是因为，纤维倾斜在增加纤维桥接应力的同时降低了纤维的抗拉强度，从而增加纤维的断裂比率。不同的纤维取向

分布将导致纤维断裂情况的变化，纤维在裂纹间的桥接作用相应也会受到影响^[26]。

研究发现，纤维的分散系数与 ECC 拉伸延性和抗拉强度之间存在明显的正相关关系。即纤维分散越好，拉伸延性和极限抗拉强度值越高^[3]。根据 Li 等^[5]的研究结果，纤维分布情况对纤维桥接应力-裂缝张开宽度曲线($\sigma-\delta$)有显著影响，特别是对最大纤维桥接应力 σ_0 。分布不均的纤维会使拉伸试样内部最弱截面处的有效纤维数量减少，进而使 σ_0 降低，试样也更容易发生断裂。与此同

时, σ - δ 曲线向下移动, 使最大补足能量 J_b 小于裂缝尖端的韧度 J_{tip} , 如图 3 所示。如此将违背 ECC 的设计准则, 甚至会使材料由应变硬化直接退化为应变软化。

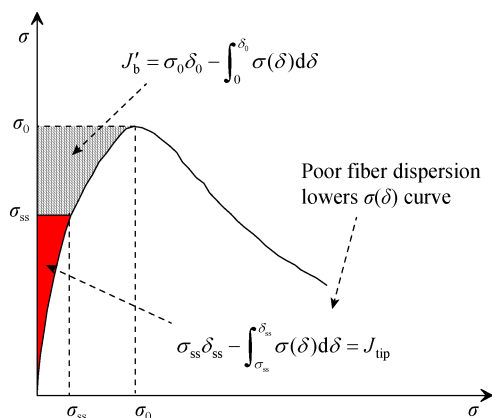


图 3 纤维分布对 σ - δ 曲线的影响^[5]

Fig. 3 Effect of fiber distribution on σ - δ curve^[5]

Soltan 等^[27]对比了 3D 打印 ECC 与浇筑 ECC 的纤维分布情况, 发现 3D 打印方法相较浇筑成型方法可使 ECC 获得更佳的拉伸性能。根据图 4 所示的拉伸应力-应变曲线, 3D 打印 ECC 的初始开裂强度、极限拉伸强度和极限拉伸应变均高于浇筑 ECC。其根本原因在于打印成型方法能够诱导纤维取向, 使 ECC 在拉伸方向上获得更优的纤维排布。应当注意的是, 3D 打印 ECC 的力学性能具有明显的方向性, 纤维排列方向力学性能的提升是以垂直方向力学性能的退化为代价的。

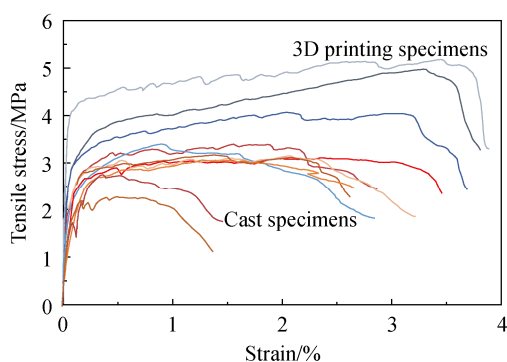


图 4 3D 打印与浇筑 ECC 拉伸性能对比^[27]

Fig. 4 Comparison of tensile properties between 3D printed and cast ECC^[27]

2.2 抗弯性能

在弯曲荷载作用下, ECC 中的纤维能够发挥桥接作用, 将裂缝限制在可控范围内。随荷载增大,

试件受拉部位开始出现多点开裂, 能够有效提高 ECC 的抗弯变形能力^[28]。Lei 等^[29]研究发现, ECC 的抗弯强度与纤维的分布情况存在明显的相关性。当纤维的分布较差时, 纤维承担、传递应力的能力会被削弱, 材料强度相应降低。分析认为, 由于基体内的纤维本身可视为一种缺陷, 当纤维分布不均时, 这种缺陷会被放大并引起应力集中, 导致试样延性降低、破坏提前^[4, 30]。因此, 纤维对抗弯强度及韧性的贡献在很大程度上取决于其在基体中的分布情况, 特别是纤维相对于断裂面的方向和分布的均匀性。

Ding 等^[4]进一步从微观和宏观的层面分析了纤维分布情况对 ECC 抗弯力学性能的影响(图 5)。该试验沿 X 轴浇筑试块, 养护成型后分别沿 0° 、 45° 和 90° 方向(相对于 X 轴)切割试样以获得不同的纤维取向分布。抗弯试验结果表明, 纤维取向越接近于受力方向, 材料应变硬化现象越明显。随着纤维倾角增大, 裂纹数量逐渐减少且应变硬化行为减弱。从微观角度分析, 纤维取向会改变纤维-基材相互作用进而影响 σ - δ 曲线趋势。具体而言, σ_0 和 J_b 会随着纤维倾角的减小而增加, 其原因在于倾斜度较小的纤维能够提供较大的桥接应力。然而, 较大的纤维倾斜度会增加聚乙烯醇(PVA)纤维的断裂比例, 导致纤维的桥接能力受到限制。宏观表现为材料的抗弯强度、极限跨中挠度呈下降趋势, 多点开裂现象不再明显。

需要指出的是, 上述定量研究均是针对单掺纤维 ECC 进行的。而随着工程应用的推广, 混杂 ECC 已在提高材料对复杂服役环境的适用性方面展现出优势。目前, 关于混杂纤维分布情况对 ECC 材料性能的影响研究仍比较有限, 且多为定性分析。例如, Ahmed 等^[31]在选取 2 种不同尺寸的 PVA 纤维进行混杂时发现, 2% 大尺寸纤维与 1% 小尺寸纤维混杂时的抗弯承载力、极限变形能力虽然高于单掺体系, 并实现了一定程度的应变硬化和多点开裂, 但总体来看, 纤维混杂带来的性能提升比较有限。分析认为, 其原因在于纤维总掺量较高, PVA 纤维在基材中的分散程度受到影响。可见, 无论是单掺纤维还是混杂纤维体系的 ECC, 在其材料设计及制备成型的过程中, 都要充分考虑纤维分布情况可能对材料力学性能带来的影响。上文涉及到的 ECC 纤维分布研究参数汇总于表 1。

2.3 抗压性能

相比而言, 探讨纤维分布如何影响 ECC 抗

压力学性能的研究比较有限。在已有的普通纤维增强水泥基材料研究中, Zhu 等^[32]通过电阻率测试发现纤维分散剂能够提高碳纤维在水泥基体中的分散性, 进而提高试块的抗压强度。王闯等^[33]研究发现, 碳纤维分散均匀时, 其抗压强

度与普通水泥砂浆试件相比可提高 19%; 而碳纤维分散不均匀时, 材料内部会发生纤维团聚并出现孔洞, 导致抗压强度下降。这些成果可为研究纤维分布对 ECC 抗压力学性能的影响规律提供借鉴。

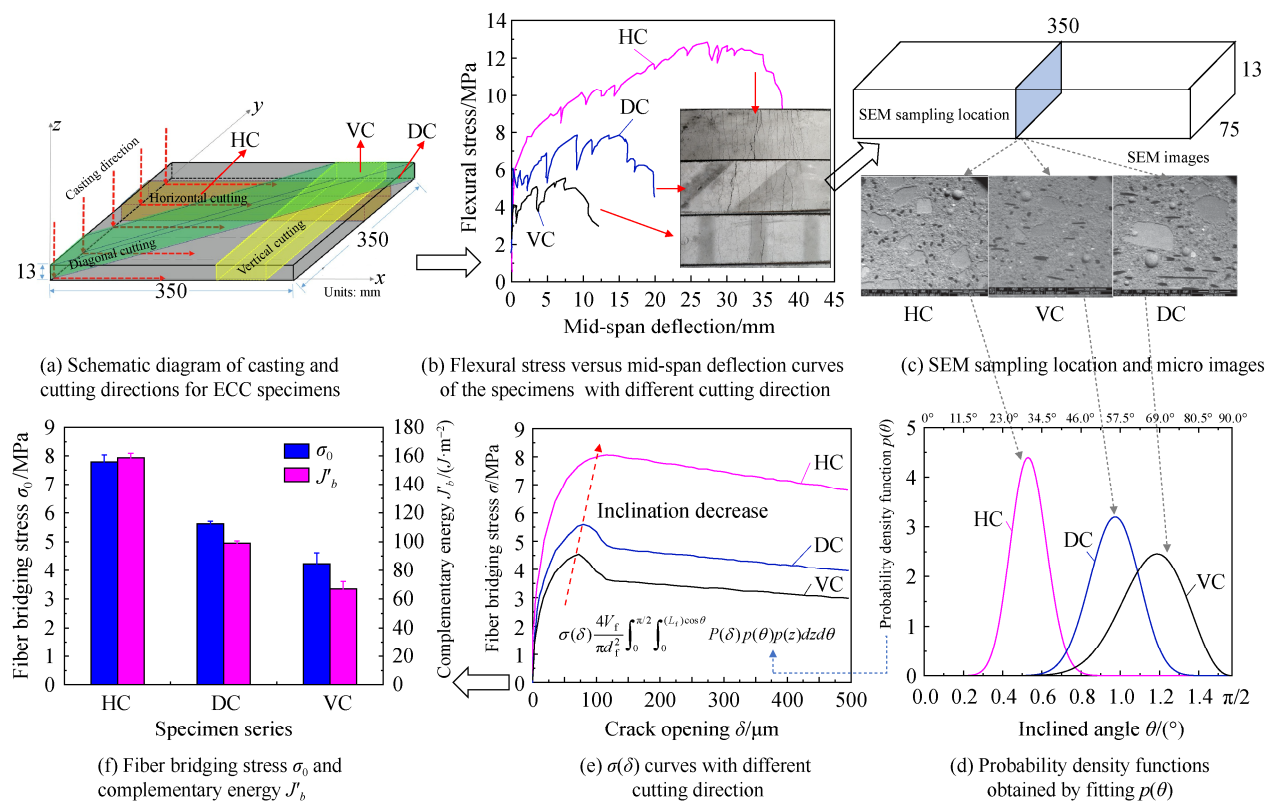


图 5 纤维取向对 ECC 抗弯性能的影响^[4]

Fig. 5 Effect of fiber orientation on the flexural performance of ECC^[4]

表 1 ECC 纤维分布研究汇总

Table 1 Summary of research on fiber distribution characteristics of ECC

Reference	Fiber type	Characterization methods	Evaluation index	Mechanical tests
[10,17]	PVA fiber	Fluorescence microscope	Fiber distribution	
[3, 21]	PVA fiber	Fluorescence microscope	Fiber distribution	Uniaxial tensile tests
[4, 14]	PVA fiber	SEM	Fiber orientation	Four-point bending tests/ Uniaxial tensile tests
[12]	PVA fiber	Optical microscope	Fiber distribution	Uniaxial tensile tests
[19]	PVA fiber	CT	Fiber orientation	Uniaxial tensile tests
[29]	Polyethylene (PE) fiber	Fluorescence analysis /SEM	Fiber distribution	Four-point bending tests/ Uniaxial tensile tests
[13]	polypropylene (PP) fiber	SEM	Fiber orientation	Uniaxial tensile tests
[9, 25]	High tenacity polypropylene (HTPP) fiber	SEM	Fiber distribution/ Fiber density maps	Four-point bending tests/ Uniaxial tensile tests

3 纤维分布的影响因素

分布不均匀的纤维在基体某些区域中不仅无法

有效发挥阻裂增韧作用, 而且可能形成更多的缺陷, 增加材料性能的变异性。因此, 如何改善纤维在基体中的分布情况是实现 ECC 材料高性能和可靠性的关

键问题,甚至可能是核心问题。目前,专门针对 ECC 纤维分布特性影响因素的研究相对有限,下文将以 ECC 材料为主线,融合借鉴类似材料的相关研究来阐述不同因素对纤维分布的影响规律和作用机理,以期在材料设计和制备阶段能够针对性的改善 ECC 的纤维分布情况,提高 ECC 的力学性能,也为今后 ECC 纤维分布的影响因素研究提供参考。

3.1 纤维因素

(1) 纤维种类

ECC 常用的纤维为 PVA、PP、PE 等有机聚合物纤维,而上述纤维在 ECC 中的分布情况是否存在明显差异仍有待检验。对于不同种类的纤维,其表观物理性质、形状、搅拌方法、临界掺量等均存在差异。例如,PVA 纤维表面具有亲水性,与水泥基体能够形成较强的界面化学粘结,同时纤维表面的羟基能够增加纤维在极性浆体中的润湿性,进而增强纤维在搅拌混合过程中的分散性。相比之下,PE 纤维的疏水表面并不能提供这种润湿作用来改善纤维分散^[34]。更进一步,不同种类纤维在混杂时的分布情况是否与单掺纤维存在明显差异,混掺纤维之间的相互作用对于改善纤维的分布情况是正效应、零效应还是负效应,作用机理如何,这些问题都有待研究。

(2) 纤维几何特征

纤维的几何特征主要包括纤维的长度、长径比、截面形状等。根据 ECC 的设计原理,纤维长度只有与自身性质相匹配时才能够充分发挥其桥接效应^[35]。具体而言,如果掺入的纤维长度较短,纤维桥接能力太弱,就无法维持裂纹的稳定扩展;而如果纤维长度过长,其在浆体中难以均匀分散,受力后的断裂比率也较高。表 2 汇总了目前 ECC 研究中常用的纤维尺寸。

Ding 等^[14]研究了 6、9、12、18 mm 和 24 mm 共 5 种不同长度的 PVA 纤维在 ECC 中的分散情况,试验结果表明,纤维分散系数随着纤维长度的增加而减小。在保证纤维有足够的桥接能力的前提下,可以通过缩短纤维长度来改善纤维的分散情况。Takashima 等^[13]进一步研究发现,纤维长径比显著影响 ECC 中的纤维分布情况。在体积一定时,较大的纤维长径比会增加拌合难度,纤维在基体中容易缠绕成网状结构从而导致纤维分散系数降低^[36-37]。因此,不合适的纤维长径比不仅会影响其自身在基体中的分布,还可能降低 ECC 延性,甚至无法实现应变硬化^[14]。

表 2 ECC 中常用纤维及其尺寸

Table 2 Common fibers and their sizes in ECC

Fiber type	Length /mm	Diameter / μm
PE	12	24
	18	24
	18	20
	6	20
Modified PE fiber	12	25
	6	20
PP	10	12
	12	31
	12	16
HTPP	10	12
PVA	12	39
	8	39
	18	20
	12	26

张丽辉等^[38]研究了三角形、三叶型、圆形共 3 种截面形状的 PP 纤维在砂浆中的分散性,试验结果如图 6 所示。以圆形截面 PP 纤维分散性能为基准,三角形和三叶型 PP 纤维在砂浆中的分散系数分别提高了 5.7%和 11.38%,有效利用率(单位面积内纤维实际根数与理论根数的比值)则分别提高了 17.62%和 30.70%。分析认为,异形截面(三角形、三叶型截面)纤维的本体抗弯刚度高于圆形截面纤维,有利于纤维的分散。但目前有关纤维几何特征对分布情况影响的研究较少,有些结论甚至还是矛盾的,须进一步开展研究验证。

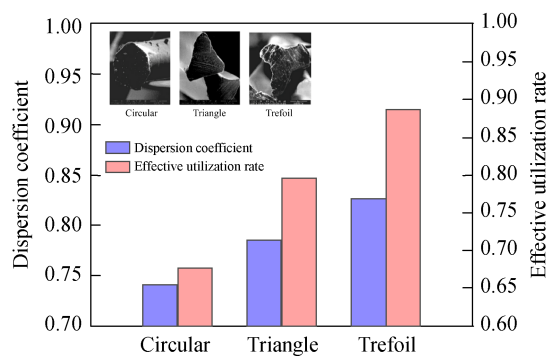


图 6 不同截面形状 PP 纤维的分散性能^[38]

Fig. 6 Dispersion properties of PP fibers with different cross sections^[38]

(3) 纤维掺量

对于一定体积且水胶比恒定的新拌浆料而言,纤维掺量越大意味着纤维数量越多,纤维间距越小,搅拌时纤维之间也更容易发生机械互锁和碰撞。碰撞会导致额外的能量损耗^[39],同时固体颗粒间的摩擦也会加大,浆体流动性随之变差,纤维在

水泥浆体中也就更容易结团^[10, 37]。而从另一个角度考虑, 纤维的成本要高于 ECC 中其他原材料, 在保证应变硬化行为的前提下应尽可能减少纤维用量。为此, Li^[28]基于 ECC 设计原理提出了最小临界纤维体积分数的概念, 即能够实现 ECC 应变硬化特征的最小纤维掺量。事实上, 更高的纤维含量并不一定意味着更优的材料力学性能。Takashima 等^[13]在对 PP-ECC 的研究中发现, 在纤维体积掺量高达 7.4% 时, PP-ECC 只有 0.55% 的极限拉应变。该掺量下的纤维分散性问题可能是导致上述现象的主要原因。ECC 的纤维掺量在 2% 左右可以实现高延性, 纤维掺量的可变范围很小, 因此, 也未见文献报道纤维掺量对 ECC 纤维分布的影响。

纤维混杂在实现 ECC 超高性能的同时将不可避免的增加纤维总掺量, 并且混杂纤维涉及到不同种类、不同几何特征的纤维组合^[40]。如果不能实现纤维的均匀分散, 混杂纤维对 ECC 带来的性能提升并不明显^[31]。因此, 不同纤维在混杂时临界掺量的界定尤为重要。Ahmed 等^[41]通过一系列试验提出了混杂纤维 ECC 的临界纤维体积分数理论, 该理论认为对于含有两种纤维的混杂纤维复合材料, 在满足基体的初裂强度 σ_{fu} 小于纤维最大桥接应力 σ_{cu} 的前提下, 可以固定其中一种纤维的体积分数 V_{f1} 以获得其他纤维的最小体积分数 V_{f2}^{min} 。此时混杂纤维复合材料的临界纤维体积分数 V_f^{crit} 为纤维 1 的体积分数加上纤维 2 的最小体积分数 V_{f2}^{min} , 即 $V_f^{crit} = V_{f1} + V_{f2}^{min}$ 。因此, 对于混杂纤维 ECC, 可以通过图 7 计算出 V_{f2}^{min} 。应当注意的是, 该理论的侧重点是计算能够实现应变硬化和多点开裂时的临界掺量, 并未关注混杂纤维的分散情况。

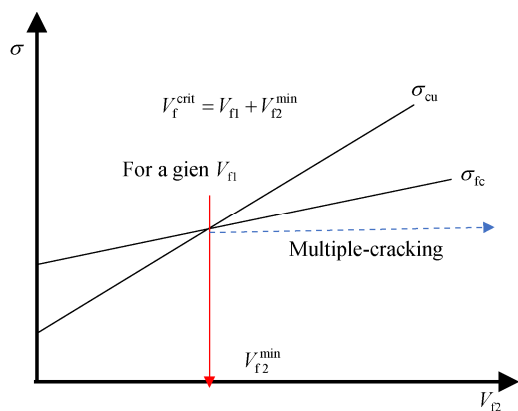


图 7 混杂纤维 ECC 中纤维临界体积分数的定义^[41]

Fig. 7 Definition of critical volume fraction of fiber in hybrid fiber ECC^[41]

此外, 在研究纤维掺量对纤维分布的影响时, 通常也要结合纤维的几何特征。例如, 有学者提出用纤维因子 $r\phi_f$ (其中 r 为纤维的长径比, ϕ_f 为纤维的体积掺量) 来综合考虑纤维体积掺量和纤维长径比对纤维分布的影响。Martinie^[42]等研究发现当以水泥浆为基体时, 钢纤维的纤维因子应小于 4, 否则钢纤维不易分散且容易引入气泡。上述理论的形成和发展, 为寻求混杂 ECC 中纤维分散均匀的临界掺量提供了参考。事实上, 混杂纤维体系的可变参数繁多, 加之水泥基材料本身具有的复杂性, 今后仍需要开展大量研究寻求纤维均匀分散的临界掺量确定方法, 以指导混杂纤维 ECC 材料的精细化设计。

3.2 基材特征

3.2.1 基体材料组成

(1) 骨料及水(砂)胶比

依据细观力学原理, 要实现 ECC 的应变硬化, 应当降低基材断裂韧度。而粗骨料的存在一般会增加基材断裂韧性, 从而降低拉伸应变能力。因此, ECC 通常选用细砂和特细砂作为骨料。一般认为, 当骨料的粒径大于平均纤维间距时会导致骨料颗粒间悬浮液中的纤维结团概率变大, 并且这种效应会随着最大颗粒尺寸的增加而更加明显^[43]。Sahmaran 等^[43]在研究骨料类型和尺寸对 ECC 延性和力学性能的影响时指出, 骨料尺寸的增加会对纤维的均匀分散产生不利影响。在一定的砂胶比下, 粗砂使纤维结团趋势增加, 纤维团聚阻碍了基体的包裹作用, 使纤维与基体间的结合减弱。这是影响 ECC 延性的重要因素。

表 3 给出了一种典型的 ECC 配合比。从 ECC 的设计原理分析, 较高的水胶比和较低的砂胶比能够降低基材断裂韧度, 从而有利于实现应变硬化准则^[44]。但根据 Yang 等^[45]的研究结果, 过高的水胶比会降低 ECC 砂浆的黏度, 并可能导致纤维分布不均, ECC 材料的抗拉强度和拉伸应变能力也会因此受到负面影响。反之, 如果水胶比过低, 砂浆内部颗粒间起润滑作用的自由水将减少, 并且水化后的固体颗粒在静电引力和范德华力的共同作用下更容易团聚, 浆体内部的絮凝和网状微结构增多^[46]。此时, 新拌浆体产生及保持流动所需的能量也随之变大, 流动较为困难, 纤维也容易结团。

砂作为一种表面不规则的颗粒, 在拌合物中的增稠作用要远高于水泥颗粒^[37]。当砂胶比增大, 拌合物中固体颗粒的数量也会增加, 新拌浆体的流动

性显著降低^[47], 纤维移动的摩擦阻力变大, 难以实现均匀分散。可见, 根据所设计的 ECC 材料特征

选择合适的水胶比和砂胶比对于改善纤维在基体中的分布十分重要。

表 3 典型 ECC 配合比^[48]
Table 3 Typical mix proportion of ECC^[48]

Mass ratio				Mass fraction			
Cement	Sand	Fly ash	Water	Superplasticizer	Viscosity agent	Defoamer	Volume fraction of fiber
1	1	0.11	0.42	0.012	0.049%	0.048%	2%

(2) 矿物掺合料及外加剂

纤维在基体中的均匀分布离不开其自身与基体界面的匹配设计。与普通水泥基材料相比, 掺入纤维后增加了 ECC 基体材料和纤维界面之间的缺陷数量^[49], 而缺陷的存在将在一定程度上影响纤维分布。在设计 ECC 基体配合比时通常添加矿物掺合料(如粉煤灰、高岭土、硅灰等)代替部分水泥。矿物掺合料密度和粒径较小, 能够优化颗粒级配, 降低浆体的黏度。Mustafa 等^[43]认为, 在胶凝材料总质量不变的情况下, 采用粉煤灰代替部分水泥使得浆体体积增加。浆体体积的增加减少了细骨料/浆体界面处的摩擦, 提高了塑性和粘聚性, 从而使 ECC 砂浆中的纤维分布更好。另一方面, 矿物掺合料具备良好的界面效应、填充效应及火山灰效应, 可以促成二次水化, 填充界面区孔隙, 减少纤维/基体界面的缺陷^[37]。张丽辉等^[10]试验发现, 合理调整配比中粉煤灰、减水剂和功能性组分的掺量, 可实现 PVA 纤维在浆体中的均匀分散。Gödek 等^[9]研究发现在基体中加入高岭土不仅可以改善 ECC 中 PP 纤维的分散情况, 而且可以提高 ECC 的抗弯强度和挠度。

除上述矿物掺合料以外, 在 ECC 的搅拌过程中通常也需要根据浆体的流动状态添加一定的化学外加剂, 以改善水泥浆体的流动性, 为纤维的均匀分散提供一个良好的基体环境。常用的化学外加剂如聚羧酸类减水剂、引气剂、增稠剂、黏度改性剂等对纤维分布的改善作用已在相关研究中得到证实^[11, 50-52]。应当注意, 外加剂用量都要控制在合理范围内, 否则会起到相反作用。如, 过量的减水剂会导致拌合物泌水, 严重影响纤维分散。

3.2.2 流变性

ECC 新拌砂浆的流变性通常由 Bingham 模型描述, 其参数主要包括屈服应力和塑性黏度。根据 Bingham 模型, 浆体流动的前提是克服本身的屈服应力(剪切应力最小值), 塑性黏度为流动后剪切应力和剪切速率的比值^[35]。Yang 等^[45]在其研究中发现, ECC 新拌砂浆的黏度在促进纤维分布的过程

中发挥着重要作用, 而其作用发挥的有效性影响着纤维桥接效率、复合材料硬化性能, 尤其是拉伸性能。Li 等^[5]的试验结果表明, 添加 PVA 纤维前 ECC 砂浆的流变参数、PVA 纤维的分散性和 ECC 复合材料拉伸性能之间存在着强相关性。在一定范围内增加 ECC 砂浆的塑性黏度可改善纤维分散性, 因为较高的剪切力可促进 PVA 纤维的均匀分布。而新拌浆料的屈服应力和塑性黏度主要受到水泥颗粒表面覆盖的水膜层厚度的影响, 随着颗粒间水膜层厚度的增大, 拌合物的塑性黏度与屈服应力都会显著降低^[53-54]。因此, 合理的水胶比对于 ECC 的制备来说十分关键。如果水胶比较低, 新拌浆料中颗粒表面水膜层厚将减小, 颗粒间作用力增强。同时, 搅拌过程中较高的减水剂用量使得间隙液黏度变大^[55], 此时纤维在浆体中的迁移阻力将会增加, 迁移速率随之降低, 纤维均匀分散较为困难^[56-57]。另一方面, 在浇筑过程中新拌浆料的流动性、流动扩展度等同样会影响纤维的分布和取向^[58]。一般认为, 在新拌浆料的运动过程中, 纤维的取向会随着基体流动而不断调整, 流动性较好的新拌浆料可使更多的纤维朝向浇筑方向, 而流动扩展度与屈服应力、流动速率与塑性黏度之间存在较高指数相关性^[37]。可见, 基体流变性对纤维分布的影响是深层次、多方面的。

为了定量表征基体流变参数对纤维分布的影响, 研究者们借助流变仪等精密仪器开展了大量试验。张丽辉等^[10]在试验中发现, 当 ECC 浆体的塑性黏度为 1.3~7.3 Pa·s 时, 颗粒间的斥力作用较强, 颗粒易于分散, 浆体中的絮凝结构也较少。此时 PVA 纤维分散系数大于 0.92, 可以实现大体积掺量下 PVA 纤维在 ECC 基体中的均匀分散。Li 等^[5]建立了 ECC 砂浆的 Marsh-cone 流速与塑性黏度之间的关系, 并给出了 24~33 s 的最佳 Marsh-cone 流速范围, 此时对应的 ECC 浆体塑性黏度为 1.50~11.59 Pa·s。在该范围内, PVA 纤维在 ECC 浆体中能够均匀分散, 极限拉应变可达到 3%以上。雷东移^[35]研究发现, 如果浆体黏度过高, 容易使纤维团

聚打结, 纤维分散度降低, 如图 8 所示。

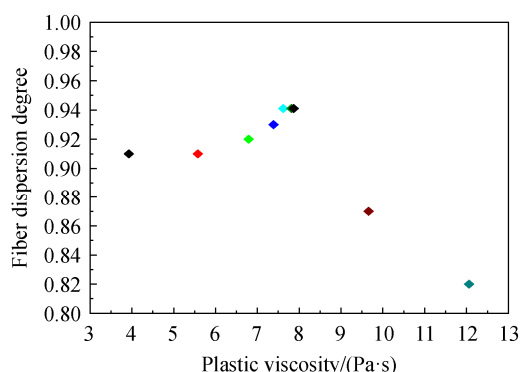


图 8 纤维分散度与水泥浆体塑性黏度的关系^[35]

Fig. 8 Relationship between the fiber dispersion and the viscosity of cement paste^[35]

可以看出, 为保持较高的纤维分散度, 新拌砂浆的塑性黏度应控制在合理范围。但由于试验过程中所采用的材料配比等存在差异, 不同研究给出的塑性黏度范围也很难具有普适性。同时注意到, 目前在定量研究 ECC 流变性对纤维分布的影响时多采用塑性黏度参数, 涉及到屈服应力的相对较少。这 2 个流变参数与纤维分散的关系尚不明确, 各自贡献的大小仍有争议, 其他纤维混凝土中的纤维分散研究也存在类似的问题^[59–61]。

3.3 成型工艺

(1) 加料顺序

根据搅拌过程中纤维相对于水泥的投放顺序, ECC 的加料方法可分为先掺法、同掺法和后掺法。目前, 国内外学者就加料顺序对纤维分布的影响进行了大量研究, 有些文献使用的加料顺序虽然不尽相同, 但其结论均指出加料顺序与纤维分布的显著相关性。Burak 等^[62]采用后掺法研究了基体流动性、纤维混合顺序对 ECC 力学性能的影响。结果显示, 加入纤维后, 随着混合时间的延长、混合速度的提高和搅拌器扭矩的增加, 纤维的成团现象减少。高速混合有利于新拌浆料中的纤维束完全分解。Zhou 等^[12]对传统的后掺纤维法进行了优化, 把部分水、固体材料和高效减水剂混合并经低速 1 min 及高速 2 min 搅拌后再加入 PVA 纤维, 随后再次高速搅拌 2 min 后加入剩余水。首先混合适量液体材料和固体材料的目的是为了获得良好纤维分布所需的塑性黏度。结果表明, 使用改进的投料顺序所制备出的砂浆流动性较好, 提高了纤维分布程度, 增强了 ECC 的拉伸延性和极限拉伸强度。

(2) 建造工艺

在工程施工及室内实验时, 多采用浇筑的方式制备 ECC, 模板壁效应、振捣作用、模板几何尺寸及表面粗糙度对纤维分布的影响均在文献中有所报道^[3, 63–64]。随着 ECC 应用范围的扩大, 采用喷射、挤压、3D 打印等技术建造 ECC 结构已经受到越来越多的关注。与传统施工方式中纤维的三维分布形式不同, 喷射及 3D 打印技术可实现纤维的二维甚至一维分布^[65–66]。Takashima 等^[13]在对比了浇筑成型和挤压成型的 PP-ECC 后发现, 浇筑成型的 ECC 中纤维的角度分布在 $9^{\circ} \sim 63^{\circ}$ 范围内, 而挤压成型的 ECC 中大约有 80% 的纤维方向能够与挤压方向对齐, 在较大程度上实现了纤维的定向分布。进一步研究表明, 喷射过程引起的剪切条件有利于纤维垂直于喷射方向排列^[67], 而 3D 打印可通过控制喷嘴运动方向诱导纤维在应力方向排列, 实现纤维的定向均匀分布。同时, 由于机械压实, 基体内部的孔隙率较低, 气孔分布也更均匀, 获得的 ECC 在拉伸性能、抗压强度及抗折强度等方面均有较大提升^[68–69], 这为改善纤维在材料内部的分布情况提供了新的方法。但上述技术仍然存在一些有待改进的问题。以 3D 打印为例, 由于纤维的平均长度较大, 在打印过程中容易出现堵塞喷嘴或管道的现象^[69]。将来需要不断优化 ECC 的建造工艺, 做到纤维分布的精准控制, 以期实现 ECC 建造性能与力学性能的协调统一。

4 总结与建议

ECC 作为一种新型高性能纤维增强水泥基复合材料, 近年来已在土木工程领域逐步扩大应用。而随着研究与实践的不断推进, ECC 中的纤维分布问题越来越多的引起国内外学者与工程界的关注。从归纳的研究进展来看, 已有研究成果为改善纤维在水泥基体中的分布提供了重要借鉴, 也为提升 ECC 的材料性能及可靠度建立了坚实基础。有关 ECC 纤维分布的研究仍在持续深入, 结合文献调研结果提出以下几点研究建议:

1) 用于制备 ECC 的纤维以聚合物纤维居多, CT 图像中空隙和纤维的灰度值范围存在一些重叠。在不断优化扫描成本的同时仍需开发新的分割技术, 对 ECC 纤维分布情况进行精细化的三维表征。

2) 已有工作大部分仅限于研究纤维分布对 ECC 宏观力学性能的影响, 今后还需要考虑纤维分

布对ECC耐久性能,如渗透性、自愈合等的影响。

3) 纤维种类、几何特征对纤维分布的影响,以及多尺度纤维混杂时各自的临界掺量还需要在今后的研究中进一步明确。

4) 不同纤维在混杂时的相互作用对其自身在基体中的分布是否存在正/零/负效应,其作用机理如何。这也是混杂纤维ECC研究中的重要方向。

5) 如何在ECC严格的制备过程中综合考虑材料参数、基体特征等因素的影响,探索出一套简单易行的纤维分散方法仍需着重考虑。

参考文献:

- [1] 董振英,李庆斌,王光纶,等. 钢纤维混凝土轴拉应力-应变特性的试验研究[J]. 水利学报, 2002(5): 47-50.
DONG Zhenying, LI Qingbin, WANG Guanglun, et al. J Hydraul Eng(in Chinese), 2002(5): 47-50.
- [2] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Int. J Eng Fluid Mech, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [3] TOSUN-FELEKOĞLU K, FELEKOĞLU B, RANADE R, et al. The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC[J]. Compos, Part B, 2014, 56: 536-545.
- [4] DING C, GUO L, CHEN B. Orientation distribution of polyvinyl alcohol fibers and its influence on bridging capacity and mechanical performances for high ductility cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2020, 247: 118491.
- [5] LI M, LI V C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites[J]. Mater Struct, 2012, 46(3): 405-420.
- [6] LI V C, WANG Y, BACKER S. A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites[J]. J Mech Phys Solids, 1991, 39(5): 607-625.
- [7] QING L, LI Y, WANG X, et al. Investigation of mixed-mode fracture of aligned steel fibre reinforced cementitious composites[J]. Int. J Fract, 2021, 228(2): 159-178.
- [8] 卿龙邦, 苏怡萌, 喻渴来, 等. SFRC细观数值建模方法及纤维方向对断裂性能影响的分析[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(3): 480-486.
QING Longbang, SU Yimeng, YU Kelai, et al. J Mater Sci Eng(in Chinese). 2019, 37(3): 480-486.
- [9] GÖDEK E, FELEKOĞLU K T, KESKİNTATES M, et al. Development of flaw tolerant fiber reinforced cementitious composites with calcined kaolin[J]. Appl Clay Sci, 146: 423-431.
- [10] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J]. 东南大学学报(自然科学版). 2014, 44: 1037-1040.
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. J Southeast Univ: Nat Sci Ed(in Chinese), 2014, 44: 1037-1040.
- [11] YU J H, LI V C. Research on production, performance and fibre dispersion of PVA engineering cementitious composites[J]. Mater Sci Technol, 2009, 25(5): 651-656.
- [12] ZHOU J, QIAN S, YE G, et al. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(3): 342-348.
- [13] TAKASHIMA H, MIYAGAI K, HASHIDA T, et al. A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding[J]. Eng Fract Mech, 2003, 70(7/8): 853-870.
- [14] DING C, GUO L, CHEN B. An optimum polyvinyl alcohol fiber length for reinforced high ductility cementitious composites based on theoretical and experimental analyses[J]. Constr Build Mater, 2020, 259: 119824.
- [15] SWAMY R N. Fibre reinforcement of cement and concrete[J]. Mater Constr, 1975, 8(3): 235-254.
- [16] LORENZONI R, CUROSU I, PACIORNIK S, et al. Semantic segmentation of the micro-structure of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by applying deep learning on micro-computed tomography scans[J]. Cem Concr Compos, 2020, 108: 103551.
- [17] LEE B Y, KIM J-K, KIM J-S, et al. Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(6): 408-417.
- [18] ZHENG D, SONG W, FU J, et al. Research on mechanical characteristics, fractal dimension and internal structure of fiber reinforced concrete under uniaxial compression[J]. Constr Build Mater, 2020, 258: 120351.
- [19] LORENZONI R, CUROSU I, LEONARD F, et al. Combined mechanical and 3D-microstructural analysis of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by *in-situ* X-ray microtomography[J]. Cem Concr Res, 2020, 136: 106139.
- [20] 毛雅倩. CaCO₃晶须-PVA-钢纤维水泥基材料的纤维分散性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
MAO Yaqian. Study on the fiber dispersion of calcium carbonate whisker-PVA-steel fiber reinforced cementitious composites (in Chinese, dissertation). Da Lian: Dalian University of Technology, 2018.
- [21] TORIGOE S I, HORIKOSHI T, OGAWA A, et al. Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite[J]. J Adv Concr Technol, 2004, 1(3): 265-268.
- [22] RANADE R, STULTS M D, LEE B, et al. Effects of Fiber Dispersion and Flaw Size Distribution on the Composite Properties of PVA-ECC[C]. 6th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 2011: 107-114.
- [23] XIA M, HAMADA H, MAEKAWA Z. Flexural stiffness of injection molded glass fiber reinforced thermoplastics[J]. Int Polym Proc, 2013, 10(1): 74-81.
- [24] DING C, GUO L P, CHEN B. Theoretical analysis on optimal fiber-matrix interfacial bonding and corresponding fiber rupture effect for high ductility cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2019, 223: 841-851.
- [25] FELEKOĞLU B, TOSUN-FELEKOĞLU K, GÖDEK E. A novel method for the determination of polymeric micro-fiber distribution of cementitious composites exhibiting multiple cracking behavior under tensile loading[J]. Constr Build Mater, 2015, 86: 85-94.

- [26] LIN Z, KANDA T, LI V C. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites[J]. *Concr Sci Eng*, 1999, 1(3): 173–184.
- [27] SOLTAN D G, LI V C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 90: 1–13.
- [28] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications[J]. *J Adv Concr Technol*, 2003, 1(3): 215–230.
- [29] LEI D Y, GUO L P, CHEN B, et al. The connection between microscopic and macroscopic properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC)[J]. *Compos Part B*, 2019, 164: 144–157.
- [30] PEREIRA E B, FISCHER G, BARROS J A O. Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites[J]. *Cem Concr Compos*, 2012, 34(10): 1114–1123.
- [31] AHMED S F U, MIHASHI H. Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites[J]. *Mater Struct*, 2011, 44(6): 1179–1191.
- [32] ZHU H, ZHOU H, GOU H. Evaluation of carbon fiber dispersion in cement-based materials using mechanical properties, conductivity, mass variation coefficient, and microstructure[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 266: 120891.
- [33] 王闯, 王爱玲, 张修身. 短碳纤维的分散性对CFRC力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2007(5): 125–128.
WANG Chuang, WANG Ailing, ZHANG Xiushen. *Mater Rep(in Chinese)*, 2007(5): 125–128.
- [34] KONG H J, BIKE S G, LI V C. Constitutive rheological control to develop a self-consolidating engineered cementitious composite reinforced with hydrophilic poly(vinyl alcohol) fibers[J]. *Cem Concr Compos*, 2003, 25(3): 333–341.
- [35] 雷东移. 生态纳米超高强超高延性水泥基复合材料设计与关键性能[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LEI Dongyi. *Design and Key Performance of Eco-nano Ultra-high Strength and Ultra-high Ductility Cementitious Composites (in Chinese, dissertation)*. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [36] BANFILL P F G, STARRS G, DERRUAU G, et al. Rheology of low carbon fibre content reinforced cement mortar[J]. *Cem Concr Compos*, 2006, 28(9): 773–780.
- [37] 司雯, 曹明莉, 冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的流动性与流变性研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 819–825.
SI Wen, CAO Mingli, FENG Jiaqi. *Mater Rep(in Chinese)*, 2019, 33(5): 819–825.
- [38] 张丽辉, 刘建忠, 阳知乾, 等. 不同截面形状PP纤维对砂浆抗塑性开裂的影响及机理[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46: 160–164.
ZHANG Lihui, LIU Jianzhong, YANG zhiqian, et al. *J Southeast Univ: Nat Sci Ed(in Chinese)*, 2016, 46: 160–164.
- [39] 张秀芝, 毕梦迪, 刘同军, 等. 钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(8): 1732–1742.
ZHANG Xiuzhi, BI Mengdi, LIU Tongjun, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(8): 1732–1742.
- [40] 王振波, 张君. 混杂纤维水泥基复合材料力学性能研究进展[J]. *混凝土*, 2018(4): 65–69.
WANG Zhenbo, ZHANG Jun. *Concrete(in Chinese)*, 2018(4): 65–69.
- [41] AHMED S F U, MAALEJ M, PARAMASIVAM P. Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites[J]. *J Mater Civ Eng*, 2007, 19(7): 527–539.
- [42] MARTINIE L, ROSSI P, ROUSSEL N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: Classification and prediction[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(2): 226–234.
- [43] SAHMARAN M, LACHEMI M, HOSSAIN K M A, et al. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. *ACI Mater J*, 2009, 106(3): 308–316.
- [44] 曹明莉, 许玲, 张聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(5): 632–642.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. *J Chin Ceram Soc*, 2015, 43(5): 632–642.
- [45] YANG E-H, SAHMARAN M, YANG Y, et al. Rheological control in production of engineered cementitious composites[J]. *ACI Mater J*, 2009, 106(4): 357–366.
- [46] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 246–252.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(2): 246–252.
- [47] 马昆林, 龙广成, 谢友均, 等. 水泥-粉煤灰-石灰石粉浆体塑性黏度的影响因素[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41: 1481–1486.
MA Kunlin, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2013, 41: 1481–1486.
- [48] LI V C, HORIKOSHI T, OGAWA A, et al. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite[J]. *ACI Mater J*, 2004, 101(3): 242–248.
- [49] 王振波, 左建平, 张君, 等. 混杂纤维延性水泥基材料单轴受压力学特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21: 639–644.
WANG Zhenbo, ZUO Jianping, ZHANG Jun, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2018, 21: 639–644.
- [50] GARG M, DAS C S, GUPTA R. Use of silica particles to improve dispersion of -COOH CNTs/carbon fibers to produce HyFRCC[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 250: 118777.
- [51] 丁聪, 郭丽萍, 雷东移, 等. 轻质保温高延性水泥基复合材料的拉伸性能与耐久性能[J]. *材料导报*, 2019, 33: 1652–1658.
DING Cong, GUO Liping, LEI Dongyi, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2019, 33: 1652–1658.
- [52] KONG H J, BIKE S, LI V C. Constitutive rheological control to develop a self-consolidating engineered cementitious composite reinforced with hydrophilic poly(vinyl alcohol) fibers[J]. *Cem Concr Compos*, 2003, 25(3): 333–341.
- [53] KWAN A K H, FUNG W W S, WONG H H C. Water film thickness, flowability and rheology of cement-sand mortar[J]. *Adv Cem Res*, 2010, 22(1): 3–14.
- [54] FUNG W W S, KWAN A K H. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar[J]. *Cem Concr Compos*, 2010, 32(4): 255–264.
- [55] LIU J, WANG K, ZHANG Q, et al. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 149: 359–366.

- [56] 张倩倩, 刘建忠, 张丽辉, 等. 矿物掺合料对低水胶比浆体流变性能的影响机制研究[J]. 材料导报, 2020, 34: 22054–22057+22086.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHANG Lihui, et al. Mater Rep(in Chinese), 2020, 34: 22054–22057+22086.
- [57] 张倩倩, 刘建忠, 周华新, 等. 超高性能混凝土流变特性及其对纤维分散性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31: 73–77.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rep(in Chinese), 2017, 31: 73–77.
- [58] RANJBAR N, ZHANG M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review[J]. Cem Concr Compos, 2020, 107: 103498.
- [59] PEREZ VILLAR V, FLORES MEDINA N, HERNANDEZ-OLIVARES F. A model about dynamic parameters through magnetic fields during the alignment of steel fibres reinforcing cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2019, 201: 340–349.
- [60] KHAYAT K H, MENG W, VALLURUPALLI K, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete - An overview[J]. Cem Concr Res, 2019, 124: 105828.
- [61] OZYURT N, MASON T O, SHAH S P. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs[J]. Cem Concr Compos, 2007, 29(2): 70–79.
- [62] FELEKOGLU B, TOSUN-FELEKOGLU K, RANADE R, et al. Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC[J]. Compos Part B, 2014, 60: 359–370.
- [63] ZERBINO R, TOBES J M, BOSSIO M E, et al. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(2): 191–200.
- [64] SVEC O, ZIRGULIS G, BOLANDER J E, et al. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements[J]. Cem Concr Compos, 2014, 50: 60–72.
- [65] LI V C, BOS F P, YU K, et al. On the emergence of 3D printable engineered, strain hardening cementitious composites (ECC/SHCC)[J]. Cem Concr Res., 2020, 132: 106038.
- [66] ZHU H, YU K, LI V C. Sprayable engineered cementitious composites (ECC) using calcined clay limestone cement (LC3) and PP fiber[J]. Cem Concr Compos, 2021, 115: 103868.
- [67] KAUFMANN J, FREEH K, SCHUETZ P, et al. Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications[J]. Constr Build Mater, 2013, 49: 15–22.
- [68] ZHU B, PAN J, NEMATOLLAHI B, et al. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction[J]. Mater Des, 2019, 181: 108088.
- [69] HAMBACH, MANUEL, MLLER, et al. Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (>100 MPa)[J]. Cem Concr Res, 2016, 89: 80–86.