

定向钢纤维混凝土的制备方法以及断裂性能 研究进展

李方元¹, 李文豪¹, 段昕智²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海 200031)

摘要: 对定向钢纤维混凝土(ASFRC)制备方法、纤维分布特性、断裂性能进行了系统阐述。分析总结了制备 ASFRC 常用方法各自的特点与适用性, 概括总结了钢纤维分布特性参数的确定方法, 详细论述了不同因素对钢纤维分布产生的影响。参照 ASFRC 断裂性能的试验方法与技术标准, 分析总结了常见的弯曲断裂试验及断裂指标。同时, 在钢纤维混凝土断裂性能已有的研究基础上, 归纳总结了 ASFRC 断裂性能的影响因素与断裂模拟现状。最后基于现有成果对 ASFRC 的可能研究方向进行了展望。

关键词: 定向钢纤维混凝土; 制备方法; 纤维分布特性; 断裂性能

中图分类号: TU528; TB332

文献标志码: A

Review on Preparation Methods and Fracture Properties of Aligned Steel Fiber Reinforced Concrete

LI Fangyuan¹, LI Wenhao¹, DUAN Xinzhi²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: This paper systematically elaborated the preparation method, fiber distribution characteristics, and fracture properties of directed steel fiber reinforced concrete (ASFRC) in combination with research achievements in recent years. It compared and introduced the characteristics and applicability of different methods for preparing ASFRC. By summarizing varieties of methods for determining the parameters to describe the distribution characteristics of steel fibers, it discussed the influence of different factors on the distribution of steel

fibers in detail. Referring to the test method and technical standard of ASFRC fracture performance, it compared different fracture indices obtained from bending fracture tests and results. Meanwhile, it summarized the influencing factors and fracture simulation based on the existing research on the fracture properties of ASFRC. Finally, it prospected the possible research directions of ASFRC.

Key words: directed steel fiber reinforced concrete (ASFRC); preparation method; fiber distribution characteristics; fracture property

钢筋混凝土作为土木建筑领域应用最广泛的材料, 其易开裂、韧性差等缺点限制了其应用场景。将钢纤维掺入水泥基复合材料中形成钢纤维混凝土(SFRC), 能够限制裂缝的萌生与扩展, 进而提高材料的抗拉强度、断裂能、冲击强度^[1-3]。一般来说, 钢纤维在 SFRC 内是随机分布的, 导致只有部分数量的钢纤维对抵抗外荷载是有效的。假定钢纤维在基体内各个方向等概率分布, 文献[4-6]研究表明, 三维随机分布钢纤维沿特定方向的定向系数不超过 0.5, 可见大部分钢纤维并没有起到增韧的效果。

通常大多数构件在荷载作用下其受力方向基本不变, 例如梁板类构件, 其底部长期受到拉应力作用, 因乱向 SFRC 构件中纤维的增强效率低, 为了保证受拉方向上有足够的纤维数量, 只能通过提高纤维掺量以增强结构的延性和抗裂性能, 造成钢纤维的浪费, 也增加了成本^[7]。因此, 通过采取一定的方法使纤维方向与构件的主拉应力方向尽可能保持一

收稿日期: 2023-03-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22120180318); 宁波市交通运输科技项目(202108); 上海市科学技术委员会资金(21DZ1202904, 21DZ1203305)

第一作者: 李方元(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新型建筑材料与结构应用。
E-mail: fyli@tongji.edu.cn

通信作者: 段昕智(1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为路桥工程新型材料和结构的研发与应用。
E-mail: 496024331@qq.com



论文
拓展
介绍

致,形成定向钢纤维混凝土(ASFRC),可极大提高纤维的增韧效率,实现对结构的精准灵活设计。

对 ASFRC 的研究始于 20 世纪 60 年代,随着磁场定向装置的发展,20 世纪 70 年代已经基本解决了钢纤维的定向与集中分布的问题。经过定向的钢纤维具有更好的增韧与桥接作用,ASFRC 构件具有优良的断裂韧性与阻裂特性。本文总结近年来关于 ASFRC 的研究成果,综述 ASFRC 的制备方法、纤维分布、断裂性能的研究进展,在此基础上分析目前主要存在的问题,基于现有成果对 ASFRC 可能的研究方向进行展望。

1 制备方法

控制纤维方向的方法最初起源于 20 世纪 70 年代,Edgington 等^[8]发现,适当延长试件的振捣时间可以影响钢纤维的排列方式。随后,Hannant 等^[9]认为混凝土的流变性能会影响振捣时钢纤维的分布与取向,确定了最佳的振捣时间,提出了制备单向钢纤维混凝土的设计方法。Abrishambaf 等^[10]在自密实混凝土的浇筑过程中发现,钢纤维的取向与浇筑的方向有关,钢纤维更倾向于沿垂直于浆体流动方向排列。在此基础上,Yoo 等^[11]将混凝土分别从试模的中间位置及试模的一端进行浇筑,验证了控制浇筑手段制备单向纤维混凝土的可行性。目前制备 ASFRC 的手段主要是剪切诱导法^[12-15]与磁场定向法^[16-19],另外 3D 路径导向法^[20-22]、电场诱导法^[23]以及其他新型方法^[24-25]也在积极探索中。

1.1 剪切诱导法

剪切诱导法结合了流体速度梯度与边壁效应(Wall Effect)^[26],在实际浇筑制备 ASFRC 时,通常是采用若干个平行排列的狭窄溜槽,如图 1 所示。

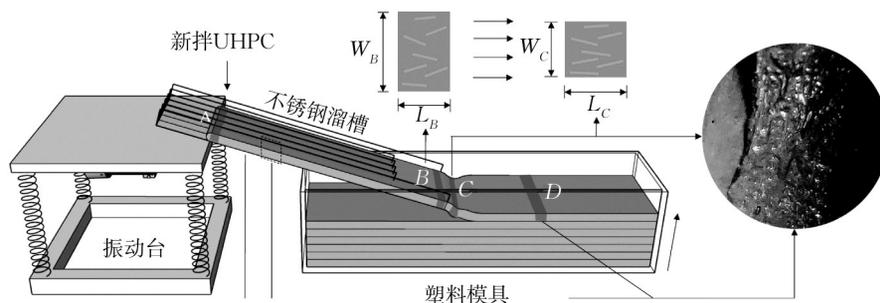


图2 加装振动台的溜槽浇筑装置^[12]

Fig. 2 Chute pouring device with vibration table^[12]

1.2 磁场定向法

在磁场定向中,磁场力 f_m 是钢纤维定向运动的

溜槽的边壁效应使靠近边壁附近的钢纤维倾向平行于溜槽壁的平面排列,槽内流体的速度场受到影响,流速在边壁处为零,随着离壁距离的增加而增加^[27]。当纤维取向与流动方向之间存在一定角度时,包裹纤维的流体中的速度梯度会驱动纤维平行于流动方向,从而实现钢纤维在水泥基体内的定向。

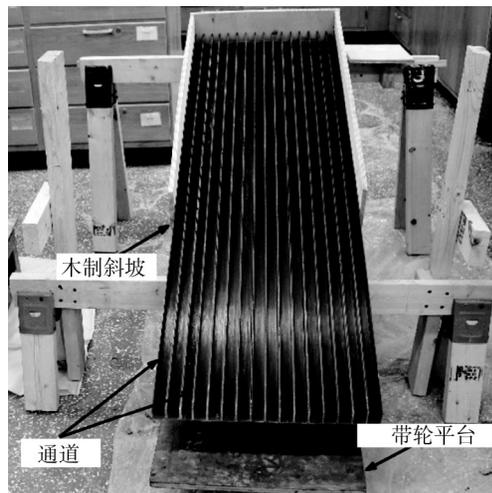


图1 剪切诱导浇筑装置^[15]

Fig. 1 Shear induced pouring device^[15]

此方法需要将溜槽以足够大的倾角放置以便于流体获得较高的速度梯度。为了能够达到更高纤维掺量以及改善水泥浆体的和易性,Qiu 等^[12]与 Zhang 等^[13]对图 1 的装置进行了改良,加入了振动台并在模板的底部加装了移动平台,如图 2 所示。控制塑料模板的水平移动速率(v_m)大于水泥浆体在溜槽内的流速(v_f),由于在 C 点产生了速度差,相当于对新拌水泥浆体施加了拉力,平行于流速方向的浆体被拉长($L_C > L_B$),垂直于流速方向的浆体长度缩短($W_C < W_B$)。这种变形使水泥浆体中钢纤维的倾斜角减小,并提高了纤维定向的有效性。

主驱动力,促使钢纤维发生转动,实现方向的有效控制,钢纤维受力如图 3 所示,在竖直方向上,钢纤维

自身重力 G 与浆体浮力 F 保持平衡。在运动初期,钢纤维在磁力矩的作用下角速率不断增加,钢纤维与浆体间产生相对滑动,产生的浆体绕流阻力 f_r 随着钢纤维的转动速率的增大而不断增大。当钢纤维旋转至与磁场方向接近时,磁力矩的分量不足以克服绕流阻力,钢纤维角速率逐渐减小直至零,最终实现钢纤维的定向。

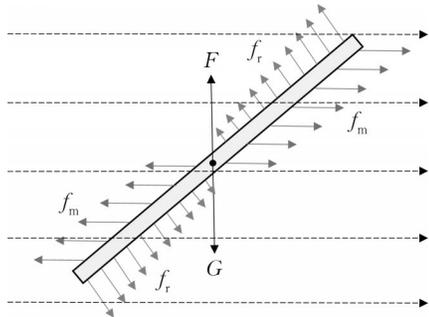


图 3 单根钢纤维的受力模型^[30]
Fig. 3 Force model of single steel fiber^[30]

在磁场定向中,最常见的是运用通电螺线管产生匀强磁场实现对钢纤维的定向。Ghailan 等^[28]、Wijffels 等^[29]、慕儒等^[30]设计了匀强磁场电磁生成装

置,该类装置主要是由一个方形或圆柱形的螺线管线圈组成,线圈内部预留空腔,将线圈沿螺线管道轴线垂直的方向缠绕在其周围,并放置在振动台上。当给线圈通入恒定的电流后,螺线管内的电流会形成与轴线相同的匀强磁场。在磁场力的作用下,水泥砂浆中的钢纤维发生转动进而与线圈轴线对齐。

为了消除通电螺线管空腔内空间的限制,刘昊奇^[31]提出了采用由很多小磁铁组成平板磁场来实现钢纤维定向的方法。该方法利用了串联磁铁间的漏磁效应,不同串联磁铁漏磁形成的外磁场之间的波峰磁力线相互挤压,呈波浪分布的磁力线在波峰的挤压作用下趋于直线分布,如图 4 所示。该方法可以实现从钢纤维混凝土拌合物单侧或者表面一侧对钢纤维进行方向控制。吴杭鹏^[32]通过 2 个直流电螺线管产生的磁场获得与设计的钢纤维方向分布一致的磁场。2 个螺线管的夹角与距离均会对合成的磁场进行干涉,使 2 个螺线管近端空腔和中间位置的磁力线的曲率发生变化,如图 5 所示。随着夹角 β 的增大,磁力线曲线曲率越来越大,通过该方法可以设计出钢纤维被磁化并沿磁力线方向分布的全场定向钢纤维混凝土构件。

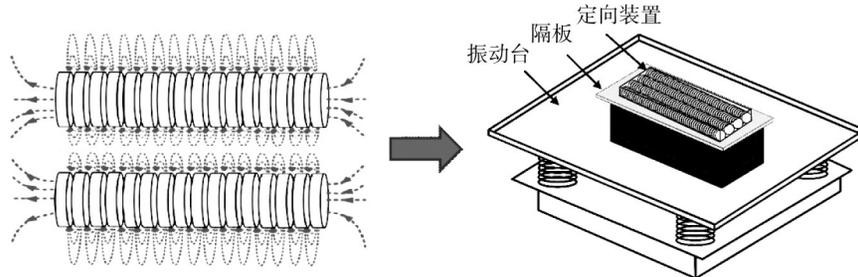


图 4 平板磁场定向装置^[31]
Fig. 4 Plate magnetic field orientation device^[31]

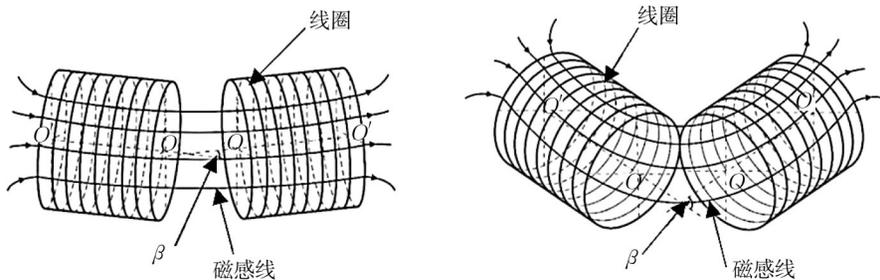
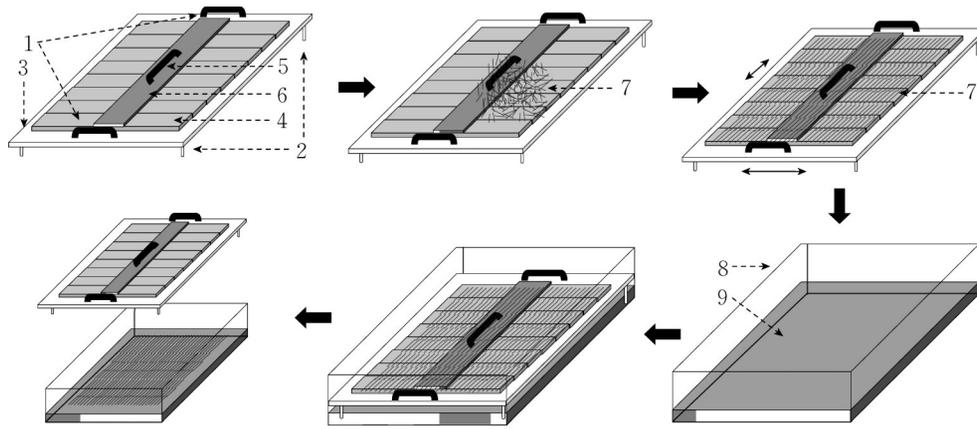


图 5 2 个螺线管夹角与距离对磁力线的影响^[32]
Fig. 5 Influence of angle and distance between two solenoids on magnetic field line^[32]

除此之外,苟鸿翔等^[33]设计了简易磁铁钢纤维定向装置,该装置由把手、平板、手柄、磁块、铁块把手以及铁块组成。定向前先把钢纤维随机铺洒在平板上,利用铁磁把手将短切钢纤维四周往复移动,实

现钢纤维的均匀、定向分布。当钢纤维完成定向排列后移除铁磁组件,钢纤维因失去磁力吸引落入事先浇筑在模板的水泥砂浆中,钢纤维的定向顺序如图 6 所示。



1-把手;2-平板;3-手柄;4-磁块;5-铁块把手;6-铁块;7-钢纤维;8-模板;9-水泥砂浆

图6 钢纤维定向均布装置^[33]

Fig. 6 Device for steel fiber directional uniform distribution^[33]

1.3 其他制备方法

随着3D打印技术的普及,通过挤压喷头控制纤维的取向有望实现新型纤维定向方式。文献[34]指出,包裹着钢纤维的新拌浆体经过3D打印机挤压喷嘴流出后,能够确保90%以上的钢纤维与打印路径的夹角低于30°,实现钢纤维良好的定向效果。Hambach等^[21]通过控制打印路径方向实现对碳纤维、玻璃纤维与玄武岩纤维在水泥浆内的定向,定向时需要事先对纤维材料进行加热处理,同时确保挤压喷头的直径远小于纤维的平均长度。对打印出的试件使用环境扫描电子显微镜(ESEM)观察,证实了该方法的确能够实现纤维在水泥浆中的高度定向,如图7所示。

Llewellyn-Jones等^[22]将超声波技术与3D打印相结合,运用超声波脉冲对光固化树脂系统内的玻璃纤维进行定向对准,通过打印时切换超声波驻波的轮廓实现精确定位,即可运用3D打印技术打印出

复杂的纤维结构。李方元^[24]提出了基于配筋率的3D打印纤维定向方法,采用双挤压头实现胶凝材料与钢纤维的打印,层间混凝土之间通过层外保留长度的钢纤维进行加强锚固与黏结。Lee等^[23]提出了一种能够利用电流体动力(EHD)喷射打印技术实现纤维材料定位的方法,通过流场与电场之间的相互作用以及纤维射流的机械拉伸成功地将纤维材料准确定位到聚合物基体内部。党岩^[35]提出了采用人工布置的分层浇筑、定向布置钢纤维的制备方法,将钢纤维的用量沿试件的高度均分4份,每浇筑一层混凝土的同时定向布置一份钢纤维,并保证一定的纤维间距以及在断面上的均匀分布。

采用磁场定向法是目前制备ASFRC的主要手段,通过磁力矩使钢纤维产生偏转,实现良好的定向效果;但是受制于磁场空间的限制,只能制备尺寸较小的构件,并且需要事先通过试验确定磁场的强度与磁场作用的时间,经济成本相对较高。相比之下,

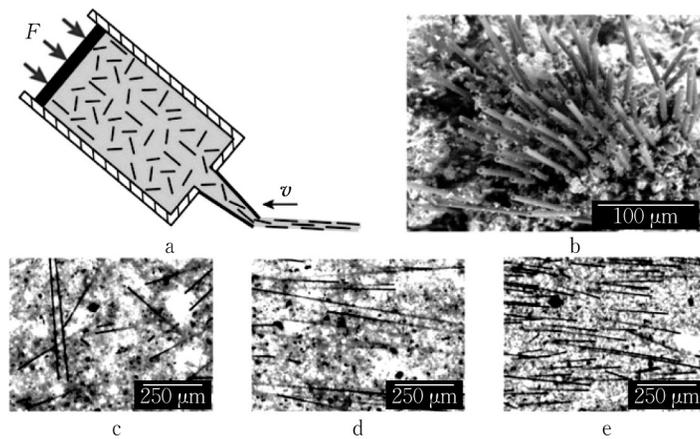


图7 环境扫描电子显微镜下纤维的定向效果^[21]

Fig.7 Effect of fiber orientation under environmental scanning electron microscope^[21]

剪切诱导法的成本低廉、工艺简单,能够实现大尺寸构件的制作,为实际工程的应用提供了依据,但是钢纤维取向主要取决于溜槽的宽度与基体的流变性,定向效果存在差异,有关该理论的研究需要进一步深入。其他制备方法如 3D 打印挤压定向、人工定向、超声波定向等均是不同角度针对不同纤维提供的特殊定向手段,可为今后实现钢纤维的定向提供新的解决思路。

2 钢纤维增强作用及分布特性

2.1 纤维增强机理

SFRC 作为钢纤维与水泥基浆体共同组成的多层次复合材料,弄清其钢纤维与基体的相互作用就显得尤为重要。目前主要有 2 种较为成熟的理论揭示 SFRC 的纤维增强机理,即复合材料理论与纤维阻裂理论。ASFRC 作为高度定向的 SFRC,其纤维增强效应的本质没有发生变化,因此有关 SFRC 的研究成果同样适用于 ASFRC。

复合材料理论是将钢纤维与水泥基体视为两种不同的材料,钢纤维仅起到外部增韧作用^[36],如图 8 所示。该理论假定纤维-基体界面没有任何相对滑动,纤维增强水泥基体系处于线弹性状态,复合性能是两者共同作用的叠加值。根据复合材料理论的基本假定,该理论仅能计算出复合材料的初裂强度^[37]。当基体开裂后,钢纤维承受来自基体转移的拉应力,目前很多试验表明钢纤维混凝土的极限抗拉强度远大于初裂强度。因此,一些学者^[38]对上述公式进行了修正,在引入纤维方向效应系数 η_θ 以及纤维有效长度系数 η_l 后,复合材料的极限抗拉强度为式(1):

$$\sigma_{t\max} = (1 - V_f)\sigma_{mu} + \eta_l\eta_\theta\tau\frac{l_f}{d_f}V_f \quad (1)$$

式中: $\sigma_{t\max}$ 为复合材料的极限抗拉强度; V_f 为纤维掺量(掺入纤维的体积分数); d_f 为钢纤维直径; σ_{mu} 为基体的抗拉强度; η_θ 为纤维方向效应系数; η_l 为纤维有效长度系数; l_f 为钢纤维长度; τ 为基体与钢纤维界面黏结强度。

James 等^[39]在 20 世纪 60 年代提出纤维阻裂理论,该理论考虑混凝土材料原生裂缝等缺陷的影响,认为在内部缺陷附近容易产生应力集中现象。钢纤维能够阻碍裂缝的进一步扩展,通过增加基体开裂过程的耗能来提高基体的延性。阻裂理论采用应力强度因子 K 描述材料的开裂状态。

$$K_c = K_a - K_b \quad (2)$$

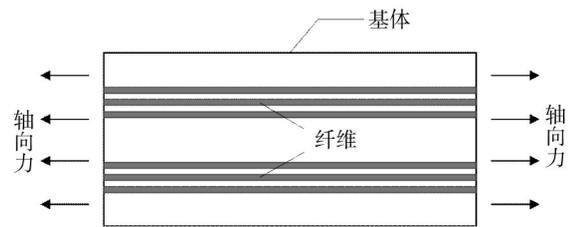


图 8 复合材料受力分析

Fig. 8 Stress analysis of composite materials

$$K_c = \frac{2\sqrt{a}}{\pi} (f_{fc} - Q_{\max}) \leq K_{1c} \quad (3)$$

式中: K_c 为总的应力强度因子; K_a 、 K_b 分别为裂缝端部、纤维约束效应强度因子; K_{1c} 为临界强度因子; f_{fc} 为沿纤维方向施加的轴向拉应力; Q_{\max} 为基体开裂后钢纤维的阻碍作用在纤维-基体面产生的最大剪应力。

在此基础上,James 与 Gordon^[40]认为纤维间距与纤维直径和掺量有关,Herbert^[41]结合前人的研究成果推导出 1D—3D 分布的平均纤维间距 S 与纤维掺量的关系,为

$$S_1 = \sqrt{\frac{A_f}{V_f}} = 0.886 \frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \quad (4)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} S_1 = 1.11 \frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \quad (5)$$

$$S_3 = \sqrt{2} S_1 = 1.25 \frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \quad (6)$$

式中: A_f 为纤维的横截面积。

通过减小钢纤维的直径以及增加纤维掺量可以提高纤维约束效应强度因子 K_b 。综合纤维增韧理论,增大纤维的长径比和纤维掺量是提高纤维增强效果的关键途径,但是过高的掺量与较长的钢纤维却不利于纤维在基体内的分布。当纤维长度过长时,钢纤维之间会结团缠绕反而不利于与基体之间的协同作用;当纤维掺量过高时,除了易发生结团之外,水泥基材料的流动性变差,不利于纤维在基体内的分布。

2.2 钢纤维分布特性

目前许多学者对纤维分布特性的描述方法及理论展开了大量研究,采用纤维分布系数 α_f 评判纤维在基体内分布的均匀性,纤维方向效应系数表征纤维在基体内的取向效果。在一些研究成果中,纤维方向效应系数的确定有 4 种方法。

(1)利用图像分析法,基于统计学理论得到钢纤维分布的概率密度函数 $p(\theta)$,并通过积分得到^[42]

$$\eta_{\theta} = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} p(\theta) \cos^2 \theta d\theta \quad (7)$$

式中： θ 为钢纤维与试件轴向的夹角。

(2)基于变换后的二值图像,通过检测到的纤维图像和堆积密度 F_c 以及图像中纤维的面积 A_{ob} 与纤维的外切圆面积 A_c 的关系来计算纤维取向^[43-44]。

$$\eta_{\theta} = F_c = \frac{A_{ob}}{A_c} = \frac{\pi d_i l_i / 4}{\pi l_i^2 / 4} = \frac{d_i}{l_i} = \frac{d_i}{d_i / \cos \theta} = \cos \theta \quad (8)$$

(3)采用纤维计数法记录钢纤维与试样轴线之间的角度(θ_i),该方法通常将角度划分为不同的区域

(如 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 等),通过式(9)累加得到^[45-46]:

$$\eta_{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \cos \theta_i}{N_i l_i} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \quad (9)$$

式中： N_i 为试件截面纤维的总根数。

(4)基于CT扫描无损检测技术,沿构件的轴线或高度的方向间隔固定的距离(如0.14mm)得到纤维的空间坐标数据,通过三维重构得到钢纤维在基体内部的分布情况^[47],如图9所示。

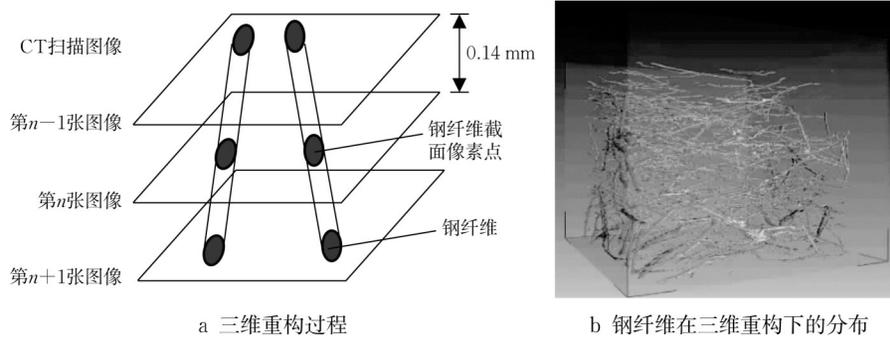


图9 X射线CT扫描技术原理^[47]

Fig.9 Principle of X-ray CT scanning technology^[47]

纤维分布系数的获取是将试件断面沿高度划分为若干相等的单元网格,假设每个单元网格内的纤维是均匀分布的^[16,48],利用式(10)即可得

$$\alpha_i = e^{-\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2}{N_i}}} \quad (10)$$

式中： x_i 为每个单元网格内的纤维数量。

钢纤维在水泥基复合材料内的分布特性决定了钢纤维的增韧效果,进而直接影响ASFRC的力学性能,因此均匀的分布与良好的取向是充分发挥钢纤维桥接作用的关键。ASFRC经过定向后,钢纤维的分布特性随着浇筑方法、纤维掺量、纤维长度、振捣效果、基体特性等因素的变化而不同。Kang等^[49]通过平行拉伸浇筑(PL)及横向多点浇筑(TL)实现钢纤维的定向,结果表明:PL试件的纤维方向系数为0.645,TL试件仅为0.431。与TL试件相比,PL试件的纤维分布更均匀,大多数纤维更倾向于与切面的法线方向平行。Yoo等^[50]发现增加纤维长度能够提高纤维分布系数;采用不同的浇筑方法时,纤维长度对纤维方向系数的影响也是不同的。此外,Yoo等^[11]还发现纤维的分布有明显的尺寸效应,在纤维掺量与浇筑方法不变的情况下,较小的试件尺寸能

实现更良好的实现定向,增加截面单位面积内的纤维数量。Ghailan等^[28]研究了振捣作用对纤维分布效果的影响,结果表明:经过振捣后的ASFRC试件的纤维方向系数能达到0.80~0.95,不经振捣的ASFRC试件的纤维方向系数约为0.5,SFRC试件的纤维方向系数仅约为0.3。马林翔^[51]发现ASFRC试件中钢纤维的分布更加均匀,纤维间距降低;与乱向分布试件相比,掺入纤维体积分数为0.5%~0.9%时,ASFRC试件中的纤维分布系数提高48%~77%,纤维间距分别降低69%~75%。马艳奉^[52]研究了基体特性对纤维分布的影响,发现ASFRC中纤维沉底比例降低,钢纤维的方向效应系数随着基体水胶比的增大进一步提升,降低基体内粗骨料含量以及最大粒径能够明显提高钢纤维分布的均匀性。

由上述分析可见,影响钢纤维分布的因素主要有四点:

一是纤维的定向方法。目前磁场诱导是定向最常见、效率最高的方法,其纤维方向效应系数能够达到0.85~0.95,并且随着 η_{θ} 的增大,ASFRC的纤维分布系数也有递增的趋势^[53]。在进行磁场定向时应统一磁场强度、诱导时间、偏转角度之间的关系。为

此慕儒等^[19]提出了在水泥净浆下钢纤维需转过的角度与磁场的作用时间 t 的计算式,如式(1):

$$\alpha = \frac{1.5B^2 S \sin \theta_s}{\mu_0 m l_t + 2\pi\eta\mu_0 l_t^2 (\ln \frac{l_t}{d_t} + \ln 2 - 0.5)} \quad (11)$$

式中: α 为钢纤维角加速度; θ_s 为与磁场方向的初始夹角; m 、 S 分别为钢纤维质量、截面面积; B 、 μ_0 分别为磁场强度、真空磁导率; η 为黏性水泥净浆的黏滞系数。

二是钢纤维的体积掺量及纤维构型。研究表明纤维掺量过大或纤维过于细长时,高掺量下水泥基流动性变差,长纤维相互搭接不利于分散^[54-55]。为此学者提出“纤维因子 K ”($K=V_f \times w$, 其中 w 为长径比)作为评判钢纤维掺加效果的标准。Martini 等^[56]及 Swamy 等^[57]的研究指出,为了避免振捣时纤维结团与引入过多气泡,纤维因子应不超过 4。

三是拌合物的流变性能与振捣时间。由于钢纤维的密度较大,在振捣过程中由于重力效应加速沉淀,造成试件钢纤维顶部数量较少、底部数量较多^[58]。王成^[59]对钢纤维在水泥净浆中进行受力分析,认为随着浆体絮状的形成,钢纤维在下沉时先加速后匀速最后静止,浆体的黏性直接影响下沉所需的时间。另外振捣也会影响钢纤维的取向与分布,Robins 等^[60]指出,钢纤维在低黏度混凝土中的振捣时间不超过 2min 时,纤维取向基本不发生变化,过度延长振捣时间会导致钢纤维沿横向偏析。

四是混凝土中粗骨料对纤维分布的影响。粗骨料占据钢纤维的分布空间,当粗骨料含量增多时,钢纤维的位置及分布受到限制,较大的粗骨料粒径会裹挟更多的钢纤维在其周围分布。为此,Oliviro 等^[61]和 Han 等^[62]在研究中建议粗骨料最大粒径与钢纤维长度的比值最好控制在 0.33~0.80。目前,随

着以 RPC 为基体的 UHPC(超高性能混凝土)应用的推广与普及,有关对定向钢纤维 RPC 材料的研究成为了热点,UHPC 具有超高性能、自流平、无粗骨料等特性,今后粗骨料将不再成为制约 ASFRC 发展的瓶颈。

3 断裂性能研究

自 20 世纪初提出钢纤维混凝土以来,SFRC 的研究与发展得到了长足的进步,许多成果已经从各个角度揭示了 SFRC 的力学性能、探究了不同因素的作用对 SFRC 静、动力性能的影响。ASFRC 作为改良的、优化后的钢纤维混凝土材料,定向后的钢纤维具有更好的桥接增韧作用,直接反映到材料本身是断裂性能的显著提高,因此相较于其他的力学性能(如抗压、抗剪、疲劳性能等),研究 ASFRC 的断裂性能非常关键且更有实际意义和价值。

3.1 断裂试验及断裂参数

为了全面地研究 ASFRC 的断裂性能,需要合理地通过试验来确定描述断裂性能所需要的参数。对 ASFRC 试件梁进行弯曲断裂试验是常见的测试方法,根据加载的方式不同,弯曲断裂试验通常分为带预制缺口的三点弯曲试验与不带缺口的四点弯曲试验,如图 10 所示。通过线性可变差动变压位移传感器(LVDT)与夹式引伸计分别得到跨中挠度与缺口张开位移。弯曲断裂试验能够观测加载过程中裂缝的开展过程,为了更精确获取裂缝开展信息,采用基于非连续变形测量(DDM)解决数字图像法裂纹边界识别模糊的缺陷^[63],得到裂缝扩展尖端的全场变形。同时,通过弯曲试验还可以获取荷载-跨中挠度($P-\delta$)、荷载-缺口张开位移($P-\Delta_{\text{CMOD}}$)以及荷载-缺口尖端张开位移($P-\Delta_{\text{CROD}}$)等测试曲线。

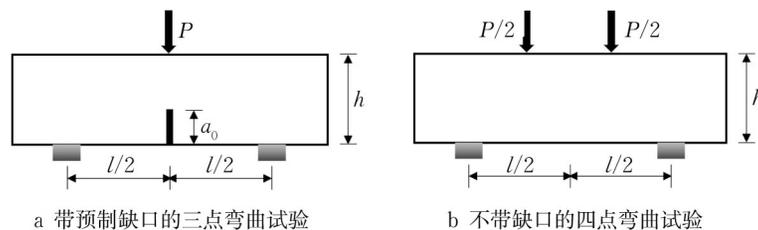


图 10 弯曲断裂试验加载模式

Fig. 10 Loading mode of bending fracture test

在断裂试验测试中,常见的是带预制缺口的三点弯曲试验,加载时缺口处的应力集中更明显,裂缝集中产生于原有的缺口附近。由于三点弯曲试验加

载点附近剪应力的波动大,断裂区主要受弯剪共同作用;四点弯曲试验中间加载点之间形成纯弯段,断裂区只受到弯曲应力,因此裂缝分布较为均匀。一

般来说,四点弯曲试验获得的峰值荷载与断裂指标较大,适合测定纤维混凝土的强度指标,而三点弯曲试验易明确裂缝萌生过程与纤维增韧机理^[64]。

通过断裂试验可以获取表征断裂性能的参数,这些断裂参数反映了钢纤维在基体开裂前后的阻裂与桥接作用。随着对纤维混凝土研究的不断深入,一些行业标准如 CECS13、EN 14651、RILEM TC 162-TDF、ASTM-C78、ASTM-C1609、UNI 11039-1 等相继出台,这些行业标准给出了断裂试验的标准测试方法与指标计算体系。结合现有的技术标准及测试方法,目前用于评价 ASFRC 材料断裂性能的断裂参数指标为弯曲强度 f_l 、残余强度 f_R 、等效抗弯强度 f_{eq} 、断裂能 G_F 、韧性指数(I_5 、 I_{10} 、 I_{20})和断裂韧度(T_{150} 、 K_{IC})等。

一般来说,断裂指标又可以分为两大类,一类是通过 $P-\delta$ 、 $P-\Delta_{CMOD}$ 试验曲线上直接获取或简单换算而得到的特征值,如开裂荷载、弯曲强度、残余强度等,这些指标反映了材料在某一时刻曲线上一点的量化关系;另一类是通过对试验曲线进行积分的形式,用以描述材料耗能以及开裂历程,如断裂能、等效抗弯强度以及韧性指数等。在对纤维混凝土断裂性能的描述中,等效抗弯强度 f_{eq} 是应用最广泛、可用性最好的参数指标,目前在 UNI 11039-1、RILEM TC 162-TDF 以及文献[65]中均涉及等效抗弯强度的计算表达式。与传统的弯曲强度计算方法不同,等效抗弯强度考虑了断裂过程中材料吸收能量的多少,能够反映出不同加载阶段钢纤维对基体的增韧

作用。由于等效抗弯强度是积分式,因此能够避免因试验曲线数据发生突变时造成试件弯曲强度的变化。

3.2 ASFRC的断裂性能

通过现场试验、数值模拟以及理论分析等方法对钢纤维混凝土力学性能的研究已经较为全面,相关的研究表明:混凝土基体特性(水泥强度、水胶比、骨料含量与粒径等)与钢纤维特性(纤维掺量、长度、形状以分布形式等)是影响 SFRC 力学性能最重要的因素。ASFRC 是在 SFRC 的基础上采用一定的手段对钢纤维实行高度定向。目前对 ASFRC 的研究文献相对较少,主要是以试验为手段的断裂性能研究。与 SFRC 类似,影响 ASFRC 断裂性能的因素可以归结为纤维层面与混凝土基体层面。在这些影响因素中,钢纤维掺量成为研究频率最高的因素,另外对 ASFRC 断裂参数的研究也更加多元化,许多学者从不同角度提出新的参数模型与研究思路。

3.2.1 纤维对 ASFRC 断裂性能的影响

纤维的掺量、长径比以及形状是在钢纤维层面影响 ASFRC 断裂性能最为主要的因素,这些因素影响了纤维的分布与间距、纤维与基体之间的黏聚力,进而改变了钢纤维的破坏形式与 ASFRC 开裂路径。目前的有关成果多为 SFRC 与 ASFRC 的横向对比研究,通过试验改变纤维相关参数,进而明确了 ASFRC 断裂性能的提高程度,在此基础上分析 ASFRC 的增强机理。表1列出了纤维对 ASFRC 断裂性能影响的部分研究成果。

表1 纤维对定向钢纤维混凝土性能影响的研究成果

Tab. 1 Some research achievements on the influence of fiber on the performance of ASFRC

序号	文献 编号	研究 因素	相关研究结论
1	[33]	纤维	定向钢纤维 RPC (ASFRPC) 的初裂强度、抗折强度随着纤维掺量的增加持续增大。此外,钢纤维掺入体积分数为 1.0%~1.8% 时,ASFRPC 的极限抗拉强度提高 39%~88%, I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 随着纤维掺量的增加,提高的比率越明显。
2	[66]	纤维	ASFRC 在相同荷载下具有更大的合成纤维力与更小的应变集中区,钢纤维掺入体积分数分别为 0.8%、1.2% 和 2.0% 掺量时,ASFRC 的断裂能分别提高 170.28%、156.68% 和 118.98%;断裂韧性分别提高 162.43%、139.01% 和 30.67%。
3	[67]	纤维	基于声发射(AE)技术发现,随着纤维掺量的提高,ASFRC 的弯曲强度及韧性指数 T_{150} 分别提高 44%~57%、32%~49%。
4	[68]	纤维	ASFRC 在断裂面处有更多数量的钢纤维被拔出,纤维拔出时断裂面处纤维周围基体的局部损伤程度更低。
5	[17]	纤维	采用概率方法及复合力学理论,从复合材料细观力学的角度定量分析了钢纤维增强水泥基复合材料的劈拉性能。结果表明,当纤维掺入体积分数为 1.2% 时,ASFRC 的劈拉强度与断裂能分别提高约 55%、68%。
6	[50]	纤维	根据线性回归方法,提出了计算等效初始断裂韧性的简化方法,开口梁的三点弯曲试验结果表明:等效初始断裂韧性随着纤维掺量的增加而缓慢增加,并最终趋于稳定。
7	[69]	纤维	发现极限抗弯强度不总是随着纤维长度的增加而提高,当纤维长度超过 19.5mm 时,由于断裂面处纤维数量的减少及纤维分布的不均匀性而导致弯曲性能劣化。
8	[70]	纤维	增加纤维的长度与掺量能够有效地提高 SFRC 与 ASFRC 的弯曲力学性能,尤其是增加纤维长度能够提升构件的变形性长度能。
9	[71]	纤维	采用端钩型、拱形等异性纤维的 ASFRC 的断裂参数(K_{IC} 、 G_{IC} 、 J_{IC} 、 G_F)均明显增加。就端钩形纤维而言,当纤维体积分数形状为 $10\sim 50\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,与 HSRFC 相比,ASFRC 试件的断裂能 G_F 的提高幅度可达 134.1%~298.3%。
		纤维	开展了基于 CECE13-2009 规范的三点开口梁弯曲标准试验,试验结果表明:端钩型等异性钢纤维能够通过增加纤维与形状基体的锚固长度进而提高钢纤维的增韧效果。

除了表1列出的部分成果外,文献[13,18,35,47,63]研究SFRC与ASFRC在不同纤维参数变化下的对比规律,纤维定向后显著提高开裂后刚度、初裂荷载、钢筋屈服荷载及峰值荷载,有效地抑制裂缝宽度的扩展。钢纤维对ASFRC断裂性能的影响可以主要概括为:①合理的钢纤维掺量能够显著提高ASFRC的断裂性能,抗弯强度、断裂能、断裂韧性等参数均可提高50%~180%,但是掺量过大会导致结团而造成纤维分布不均匀。一般来说,考虑到经济效益与定向增益效果,最佳的钢纤维掺入体积分数为1.5%左右;②短切钢纤维通过限制微裂缝的产生改善ASFRC的初裂性能,长纤维的桥接作用能够强化ASFRC的裂后性能与延性性能;③与圆直型钢纤维相比,端钩型、弓型等异性钢纤维能够通过增加纤维与基体的锚固长度提高钢纤维的增韧作用。

3.2.2 混凝土基体对ASFRC断裂性能的影响

定向钢纤维通过增强与基体两侧桥接的裂缝能力增加受荷时能量的吸收,减缓基体受拉区刚度退化的速度,从而使ASFRC呈现明显的应变强化现象。由于ASFRC常用自密实混凝土等不含粗骨料的基体材料,因此很少有文献研究对骨料含量与最大粒径进行研究。现有的研究表明:基体的配合比、龄期、试件尺寸、开口参数等参数都会影响钢纤维在基体内的分布、改变裂缝的萌生路径,进而ASFRC表现出不同的断裂特性。

Yang等^[69]发现SFRC与ASFRC的极限承载力与弯曲韧性均随着水胶比的增加而显著降低。Yoo等^[11]研究发现初裂强度及抗弯强度具有明显的尺寸效应,大尺寸梁在受拉方向上的纤维分布较差,相较于小尺寸梁表现为更低的弯曲性能。马林翔^[51]研究了纤维取向与尺寸效应的关系,发现断裂能均随着试件尺寸的增大而增大,并且这种增大的趋势更明显地体现在了ASFRC试件上。杨卓凡^[72]对不同龄期条件下的ASFRC进行了三点弯曲梁断裂试验,发现ASFRC的断裂能随龄期增加而增大,在7天龄期内的增长速度较快,之后变慢并趋于稳定。魏磊磊等^[63]获得了不同龄期的ASFRC裂缝断裂全曲线,研究表明:裂缝尖端水平应变随着构件龄期的增加而减小,表明ASFRC抵抗裂缝开展能力得到逐步增强。Sangeetha等^[73]研究了开口系数 α ($\alpha=0.1\sim 0.4$)对断裂性能的影响,结果表明:断裂韧性随着开口系数的增加而降低,开口深度决定了试件的峰值荷载。Qing等^[74]研究发现ASFRC的峰值荷载 P_{\max} 随着开口深度比 a/D 的减小而显著提高。Ahmad

等^[75]基于双K断裂准则(DKFC)的非线性断裂模型的研究表明:开口深度的增加对不稳定断裂韧度及初始断裂韧度没有显著影响。

由此可见,ASFRC的断裂性能随基体特性的波动而发生变化,并呈现一定的变化规律。如断裂能随着水灰比的减小而增大,并同时呈现较明显的尺寸效应;增大龄期能增加抵抗裂缝扩展的能力并提高ASFRC的强度。

3.2.3 ASFRC断裂模拟研究

与普通混凝土、SFRC相比,ASFRC在承受断裂荷载时裂缝的萌生与发展规律是不同的。大量研究成果表明:普通混凝土与SFRC在受弯破坏时形成了宽度较大的主裂缝,裂缝近似直线且数量较少;而ASFRC在断裂破坏时,裂缝萌生路径沿着初始裂缝朝着多向发展,产生裂缝的数量更多且宽度更小,通过分散吸收荷载而表现出更高的弯曲韧性。ASFRC在断裂面处有更多数量的钢纤维被拔出,纤维拔出时断裂面处纤维周围基体的局部损伤程度更低。此外,一些学者通过数值仿真的方法模拟基体的开裂过程。毕继红等^[76]将钢纤维弥散到混凝土中,将界面滑移量视为混凝土的开裂塑性应变,基于黏结滑移模型考虑了钢纤维的桥接作用,准确地模拟出混凝土的开裂准则与开裂方向。喻渴来等^[77]运用扩展有限元方法模拟了细观断裂的全过程,研究了骨料的分布以及掺量对基体裂缝开展过程的影响。刘博雄^[78]提出了采用非线性较模型来模拟混凝土裂缝的扩展过程,通过参数敏感性分析较好地模拟出ASFRC在不同纤维掺量下断裂裂缝的扩展。王晓婷^[79]基于扩展有限元法得到了ASFRC直偏裂缝梁的裂缝扩展轨迹以及裂缝扩展全曲线,并与试验结果吻合较好。卿龙邦等^[80]利用混合同余法生成ASFRC细观扩展有限元模型,得到了钢纤维与基体之间的滑移作用下的受拉断裂全过程,细观模型下的最大主应力云图能较好地与试验拉伸破坏图相吻合。

对于通过有限元程序来模拟ASFRC裂缝开展,选择合适的材料本构关系是非常关键的。目前关于本构模型构建的方法主要分为两大类:一类是将钢纤维弥散在基体内,把ASFRC材料视为各项均质的整体,该类方法需要通过大量试验来获得ASFRC指标参数,目前的研究相对较少。另一类是分别建立基体与钢纤维的本构关系,通过考虑两者之间的黏结滑移模拟基体的塑性行为,该类方法往往建立细观数值模型,是目前研究ASFRC开裂全过程较为常

见的方法。

4 总结与展望

结合近年的研究成果,对制备ASFRC的常用方法进行了总结,分析了各自的特点与适用性。从理论分析的层面分析了钢纤维的增韧机理,概括总结了描述钢纤维分布特性参数的确定方法。综合国内外研究钢纤维分布特性的因素,详细论述了拌合物流变性、浇筑方法、定向手段、纤维掺量及纤维构型等因素对钢纤维的分布产生的影响。参照目前ASFRC断裂性能的试验方法与技术标准,分析总结了常见的弯曲断裂试验及断裂指标。同时,在SFRC断裂性能已有的研究基础上,归纳总结了ASFRC断裂性能的研究现状与开裂模式。

通过总结国内外ASFRC制备方法、纤维分布及断裂性能的研究现状,发现仍存在一些问题有待研究:

(1)关于钢纤维的定向手段,现有的方法存在各自的适用范围与局限性,目前的研究仅限于尺寸较小的试验室构件的制备。由于经济成本与施工工艺的限制,还没有大规模实际应用的案例。大多数钢纤维混凝土的水泥基体中含有粗骨料,加之外部振捣共同影响了钢纤维的取向。活性粉末混凝土(RPC)具有自密实、高强度、易施工等特点,RPC中钢纤维的定向有望成为ASFRC新的发展方向。结合RPC自密实等特点,笔者提出2种用于制备定向钢纤维活性粉末水泥基复合材料的方法:①参照钢丝网片混凝土板的制备方法,在原有钢纤维网片的基础上,保留一个方向的纤维(受力纤维),另一个方向的纤维仅需隔一段距离布置(定位纤维),该方法可以制备通长的定向钢纤维RPC材料。②若制备短切定向钢纤维RPC材料,可将短切钢纤维通过一定孔径的筛网,预先根据试验找到筛网与浇筑面之间的距离与移动速度,保证较好的纤维取向系数,然后通过分层浇筑、分层定向的方法即可完成制备。

(2)ASFRC数值模拟所用本构模型的研究尚不成熟,目前的研究多集中于SFRC,且不同的研究成果存在较大的差异。针对ASFRC单轴受拉、受压的研究仍较少,继续沿用随机乱向SFRC的本构关系显然不太合适,因此,可以开展以试验为基础的基于不同纤维掺量、纤维构型、纤维定向率、基体强度的ASFRC本构模型研究,得出具有统计规律的普适性结论。建议可以开展单轴循环受拉、单轴循环受压

以及弯曲断裂试验,得到ASFRC损伤演化机理、应力-应变全曲线方程以及裂缝萌生规律,基于损伤力学理论建立ASFRC弹塑性损伤本构模型。根据损伤本构关系,得到ASFRC基本力学参数、塑性参数、损伤参数以及断裂参数,建立大型通用有限元软件(例如基于Abaqus软件的UMAT子程序)二次开发的ASFRC材料库,并在实际工程计算中提高ASFRC数值模拟的精确度。

(3)目前ASFRC中所用钢纤维的类型较为单一,异型钢纤维能够通过增强与基体之间的黏结作用改善ASFRC的工作性能。基于SFRC的研究成果表明:短纤维能改善裂缝分布与萌生路径,长纤维能提升构件的延性与裂后性能,因此,可以着重研究混杂钢纤维的定向方法,包括不同长径比、不同纤维构型下的钢纤维混杂模式。通过对混杂ASFRC断裂力学试验,得到经济性好的钢纤维体积掺量下受力性能最合理的纤维构型、纤维长度的掺量比例。

(4)现有的研究主要集中于单向分布的ASFRC,钢纤维的取向通常沿试件的轴线方向,对于混凝土板构件还存在对双向分布ASFRC试件的研究。无论是单向或双向,钢纤维的取向较为明确,但是对于一些主应力方向分布复杂(如箱梁腹板、深受弯构件)的区域,为了使钢纤维沿主应力方向分布,需要研究全场钢纤维定向分布的ASFRC制备方法。另外,构件的形状对ASFRC中钢纤维的分布也有较大的影响,大多数文献研究中ASFRC构件的形状多为梁、板等,对ASFRC柱、管等其他形状构件的研究有待开展。

作者贡献声明:

李方元:论文整体框架搭建,论文修改与写作指导。

李文豪:文献搜集整理,图表绘制,数据分析,论文写作与修改。

段昕智:协助完成论文内容,论文写作与修改。

参考文献:

- [1] GUO H, CHEN Y, LI D, *et al.* Effect of steel and polypropylene fibers on the quasi-static and dynamic splitting tensile properties of high-strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 224: 504.
- [2] SAHIN Y, KOKSAL F. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25 (4): 1801.
- [3] CAGGIANO A, GAMBARELLI S, MARTINELLI E, *et al.* Experimental characterization of the post-cracking

- response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 1035.
- [4] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(3): 391.
- [5] SOROUSHIAN P, LEE C D. Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1990, 87(5): 433.
- [6] WUEST J, DENARIE E, BRUHWILER E, *et al.* Determination of fibre distribution and orientation in fibre reinforced composites [J]. *Experimental Techniques*, 2009, 33(5): 50.
- [7] 慕儒, 赵全明, 田稳苓. 单向分布钢纤维增强水泥浆的制备与性能研究 [J]. *河北工业大学学报*, 2012, 41(2): 101.
MU Ru, ZHAO Quanming, TIAN Wenling. Investigation on the preparation and properties of aligned steel fibre reinforced cement paste [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2012, 41(2): 101.
- [8] EDGINGTON J, HANNANT D J. Steel fibre reinforced concrete: the effect on fibre orientation of compaction by vibration [J]. *Matériaux Et Construction*, 1972, 5(1): 41.
- [9] HANNANT D J, SPRING N. Steel-fibre-reinforced mortar: a technique for producing composites with uniaxial fibre alignment [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1974, 26(86): 47.
- [10] ABRISHAMBAF A, CUNHA V M C F, BARROS J A O. A two-phase material approach to model steel fibre reinforced self-compacting concrete in panels [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 162: 1.
- [11] YOO D Y, BANTHIA N, KANG S T, *et al.* Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 62.
- [12] QIU M H, ZHANG Y, QU S Q, *et al.* Effect of reinforcement ratio, fiber orientation, and fiber chemical treatment on the direct tension behavior of rebar-reinforced UHPC [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119311.
- [13] ZHANG Y, ZHU Y P, QU S Q, *et al.* Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251: 118893.
- [14] LI H, MU R, QING L B, *et al.* The influence of fiber orientation on bleeding of steel fiber reinforced cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 92: 125.
- [15] ROY M, HOLLMANN C, WILLE K. Influence of volume fraction and orientation of fibers on the pullout behavior of reinforcement bar embedded in ultra high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 582.
- [16] 田稳苓, 马林翔, 张楷婕, 等. 定向钢纤维水泥基复合材料的纤维分布研究 [J]. *建筑科学*, 2016, 32(3): 14.
TIAN Wenling, MA Linxiang, ZHANG Kaijie, *et al.* Investigation of fibre distribution on aligned steel fibre cement-based composite materials [J]. *Building Science*, 2016, 32(3): 14.
- [17] QING L B, CHENG Y H, MU R. Toughness enhancement and equivalent initial fracture toughness of cementitious composite reinforced with aligned steel fibres [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(11): 2533.
- [18] 慕儒, 李辉, 王晓伟, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(II): 制备及钢纤维增强作用 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(3): 387.
MU Ru, LI Hui, ZHANG Xiaowei, *et al.* Aligned steel fibre reinforced cement based composites (II): preparation and reinforcement of aligned steel fibres [J]. *Journal of Building materials*, 2015, 18(3): 387.
- [19] 慕儒, 邱欣, 赵全明, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(I): 钢纤维方向控制 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 208.
MU Ru, QIU Xin, ZHAO Quanming, *et al.* Aligned steel fibre reinforced cement based composites (I): orientation control of steel fibres [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2): 208.
- [20] 金晓菁. 基于3D打印的磁定向钢纤维增强水泥基复合材料制备及梁的力学性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
JIN Xiaojing. Fabrication and mechanical properties of magnetically oriented steel fiber reinforced cement-based composites based on 3D printing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [21] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 79: 62.
- [22] LLEWELLYN-JONES T M, DRINKWATER B W, TRASK R S. 3D printed components with ultrasonically arranged microscale structure [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(2): 02LT01.
- [23] LEE H, SEONG B, KIM J, *et al.* Direct alignment and patterning of silver nanowires by electrohydrodynamic jet printing [J]. *Small*, 2014, 10(19): 3918.
- [24] 李方元. 胶凝材料中增加基于配筋率的定向纤维的3D打印方法: CN106313272B [P]. 2018-07-03.
LI Fangyuan. 3D printing implementation method of adding directional fiber based on reinforcement ratio in cementitious materials: CN106313272B [P]. 2018-07-03.
- [25] HUANG H H, GAO X J, LI L S, *et al.* Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 709.
- [26] 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.
ZHANG Xiuzhi, BI Mengdi, LIU Tongjun, *et al.* Research progress in factors affecting fiber distribution in steel fiber concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(8): 1732.

- [27] KAY W, GUSTAVO J P-M. Effect of beam size, casting method, and support conditions on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2012, 109(3): 217.
- [28] GHAILAN D B, AL-GHALIB A A. Magnetic alignment of steel Fibres in self-compacting concrete [J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2020, 21(1): 333.
- [29] WIJFFELS M J H, WOLFS R J M, SUIKER A S J, *et al.* Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 80: 342.
- [30] 慕儒, 赵全明, 田稳苓. 制备单向分布钢纤维增强混凝土的方法及其专用设备: CN101913188B [P]. 2011-11-30.
MU Ru, ZHAO Quanming, TIAN Wenling. Method and special equipment for preparing unidirectional steel fiber reinforced concrete: CN101913188B [P]. 2011-11-30.
- [31] 刘昊奇. 平板磁场制备定向钢纤维增强水泥基复合材料及其性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
LIU Haoqi. Study on preparation and properties of aligned steel fiber reinforced cementitious composites using a plate magnetic field[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [32] 吴航鹏. 全场定向钢纤维增强水泥基复合材料设计、制备及力学性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
WU Hangpeng. Design, preparation and mechanical performance of full-field aligned steel fiber reinforced cement-based composites [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [33] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11):1756.
GOU Hongxiang, ZHU Hongbo, ZHOU Haiyun, *et al.* Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11):1756.
- [34] PHAM L, TRAN P, SANJAYAN J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: 118785.
- [35] 党岩. 定向纤维混凝土研制及其性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
DANG Yan. Development and performance study on unidirectional fiber concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土结构设计标准: JGJ/T 465—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel fiber reinforced concrete structures: JGJ/T 465—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [37] 邓红芬. 纤维混凝土研究进展 [J]. *山西建筑*, 2012, 38(4):136.
DENG Hongfen. Research progress of fiber reinforced concrete [J]. *Shanxi Architecture*, 2012, 38(4):136.
- [38] 黄土元, 蒋家奋, 杨南如. 近代混凝土技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
HUANG Shiyuan, JIANG Jiafen, YANG Nanru. Modern concrete technology [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002.
- [39] JAMES P R, JAMES A M. Tensile Strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1964, 61(6):27.
- [40] JAMES P R, GORDON B B. Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1963, 60(6):775.
- [41] HERBERT K. Fibre reinforced cement and concrete [M]. London: The Construction Press, 1975.
- [42] XIA M, HAMADA H, MAEKAWA Z. Flexural stiffness of injection molded glass fiber reinforced thermoplastics [J]. 1995, 10(1): 74.
- [43] KANG S T, KIM J K. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(10): 1001.
- [44] KANG S T, LEE B Y, KIM J K, *et al.* The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2450.
- [45] EIK Marika. Orientation of short steel fibres in concrete: measuring and modelling [D]. Helsinki: Aalto University, 2014.
- [46] LI F Y, LI L Y, DANG Y, *et al.* Study of the effect of fibre orientation on artificially directed steel fibre-reinforced concrete [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 8657083.
- [47] 慕儒, 马艳奉, 李辉, 等. 定向钢纤维混凝土中的钢纤维分布 X-ray CT 分析 [J]. *电子显微学报*, 2015, 34(6):487.
MU Ru, MA Yanfeng, LI Hui, *et al.* Analysis of the distribution of steel fiber in aligned steel fiber reinforced concrete using digital X-ray CT scanning [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2015, 34(6):487.
- [48] SPITI S, WORACHET P, SMITH S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10): 1967.
- [49] KANG S T, KIM J K. Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 57.
- [50] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64: 67.
- [51] 马林翔. 定向钢纤维水泥基复合材料的纤维分布及断裂试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
MA Linxiang. Experimental study on fiber distribution and fracture of directional steel fiber cement matrix composites [D].

- Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [52] 马艳奉. 定向钢纤维混凝土中钢纤维分布特性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
MA Yanfeng. Study on distribution characteristics of steel fiber in directional steel fiber reinforced concrete[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [53] 杨克家, 戴涛, 黄斌. 定向钢纤维混凝土制备及力学性能分析[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(10):119.
YANG Kejia, DAI Tao, HUANG Bin. Analysis on preparation and mechanical properties of aligned steel fiber [J]. Building Materials, 2018, 45(10):119.
- [54] 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(23):73.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHOU Huaxin, *et al.* Rheological properties of ultra-high performance concrete and its effect on the fiber dispersion within the material [J]. Materials Reports, 2017, 31(23):73.
- [55] OZYURT N, MASON T O, SHAH S P. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(2): 70.
- [56] MARTINIE L, ROSSI P, Roussel N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 226.
- [57] SWAMY R N, MANGAT P S. Influence of fibre-aggregate interaction on some properties of steel fibre reinforced concrete [J]. Matériaux et Construction, 1974, 7(5): 307.
- [58] 王睿. 基于纤维分布的UHPC制备及其渗透性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Rui. Study on preparation and permeability of UHPC based on fiber distribution [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [59] 王成. 单向钢纤维增强水泥砂浆的各向异性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
WANG Cheng. Study on anisotropy of unidirectional steel fiber reinforced cement mortar [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [60] ROBINS P J, AUSTIN S A, JONES P A. Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55(3): 225.
- [61] OLIVIRO R S, ZUCCARELLO F A. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete [J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(3): 246.
- [62] HAN J H, ZHAO M M, CHEN J Y, *et al.* Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 577.
- [63] 魏磊磊, 卿龙邦, 杨卓凡, 等. 基于DDM方法的定向钢纤维混凝土断裂特性研究[J]. 混凝土, 2021, 48(9):7.
WEI Leilei, QING Longbang, YANG Zhuofan, *et al.* Study on fracture characteristics of directional steel fiber reinforced concrete based on DDM method[J]. Concrete, 2021, 48(9):7.
- [64] 魏新江, 任梦博, 冯鹏, 等. 纤维混凝土断裂性能的研究现状及展望[J]. 工业建筑, 2022, 52(2):1.
WEI Xinjiang, REN Mengbo, FENG Peng, *et al.* Research status and prospect of fracture properties of fiber reinforced concrete[J]. Industrial Construction, 2022, 52(2):1.
- [65] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6):1274.
DENG Zongcai. Flexural toughness and evaluation method of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274.
- [66] CAO G R, QING L B, MU R, *et al.* Characterization of toughness enhancement of aligned steel fibers in cement-based composites based on DDM method and meso-scale simulation [J]. Construction and Building Materials, 2022, 347: 128517.
- [67] MU R, XING P, YU J H, *et al.* Investigation on reinforcement of aligned steel fiber on flexural behavior of cement-based composites using acoustic emission signal analysis [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 42.
- [68] 邱欣. 单向钢纤维增强水泥基复合材料制备技术与性能分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
QIU Xin. Preparation technology and performance analysis of unidirectional steel fiber reinforced cement matrix composites [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [69] YANG K J, SU H Z, DAI T, *et al.* Experimental study on the flexural tensile properties of aligned steel fiber - reinforced reactive powder concrete members [J]. Structural Concrete, 2022, 347(7): 1458.
- [70] LEE S J, HONG Y R, EOM A H, *et al.* Effect of steel fibres on fracture parameters of cementitious composites [J]. Composite Structures, 2018, 204: 658.
- [71] KHAN S, QING L B, AHMAD I, *et al.* Investigation on fracture behavior of cementitious composites reinforced with aligned hooked-end steel fibers [J]. Materials, 2022, 15(2): 542.
- [72] 杨卓凡. 龄期对定向钢纤维增强水泥基复合材料断裂性能的影响[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
YANG Zhuofan. Effect of age on fracture properties of directional steel fiber reinforced cement matrix composites[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [73] SANGEETHA S, SAKTHIESWARAN N, GANESH BABU O. Effect of steel fibre on fracture toughness of concrete [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 1036.
- [74] QING L B, LI Y, WANG X T, *et al.* Investigation of mixed-mode fracture of aligned steel fibre reinforced cementitious composites [J]. International Journal of Fracture, 2021, 228(2): 159.
- [75] AHMAD I, QING L B, KHAN S, *et al.* Experimental investigations on fracture parameters of random and aligned steel fiber reinforced cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122680.
- [76] 毕继红, 霍琳颖, 乔浩玥, 等. 单向受拉状态下的钢纤维混凝土本构模型[J]. 工程力学, 2020, 37(6):155.