第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200760

综 合 评 述

钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展

张秀芝[1]，毕梦迪[2]，刘同军[3]，孙海龙[1]，张 冲[1]，慕 儒[2]

(1. 济南大学材料科学与工程学院，济南 250022；2. 河北工业大学土木与交通学院，天津 300401；
3. 中国电建集团山东电力管道工程有限公司，山东 泰安 271000)

摘 要：钢纤维在基体中的分散和取向对钢纤维混凝土力学性能和耐久性能都有显著影响。从钢纤维混凝土组分、拌合物流变性与施工工艺、构件形状 4 个方面分别阐述了影响钢纤维混凝土中纤维分散和取向的因素。分析表明：在材料成型硬化之前，纤维分布特性是各因素综合作用的结果，在不同的工况下，各因素显著程度不同，因此改善纤维分布需要根据实际工况进行调节；依据影响因素可将纤维分散性不良的情况分为 3 种；针对不同的施工工艺，总结了改善纤维取向效果的 3 种方式，并结合构件形状提出了改善纤维分布的方法；最后指出了当前钢纤维混凝土中纤维分布特性研究存在的问题和研究方向。

关键词：钢纤维；混凝土；分散性；取向效果；流变性
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1732–11
网络出版时间：2021–06–17

Research Progress in Factors Affecting Fiber Distribution in Steel Fiber Concrete

ZHANG Xiuzhi[1], *BI Mengdi*[2], *LIU Tongjun*[3], *SUN Hailong*[1], *ZHANG Chong*[1], *MU Ru*[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
3. Powerchina Shandong Pipeline Engineering Corporation Limited, Tai'an 271000, Shandong, China)

Abstract: The dispersion and orientation of steel fibers in the matrix have a significant impact on the mechanical properties and durability of steel fiber concrete (SFC). Some factors affecting the dispersion and orientation of fibers in SFC were summarized in terms of mixing proportion, rheology of the mixtures, construction technology and element shape. The results showed that the distribution characteristics of the fibers were affected synergistically by various factors before the mixtures were formed and hardened. Moreover, the distribution of steel fibers was optimized accordingly under different working conditions. There were three types of poor dispersion of steel fibers. Besides, three approaches were used to improve the orientation of steel fibers based on the construction technologies and the element shapes. In addition, some problems in steel fiber distribution characteristics and possible future research direction were also discussed.

Keywords: steel fiber; concrete; dispersion; orientation; rheology

钢纤维混凝土(Steel fiber concrete, SFC)自问世以来，以其优越的力学性能和变形性能而得到广泛研究[1–2]。相较于普通混凝土，钢纤维的引入明显提高了基体的延性和抗裂性，使其具有了更高的抗拉、抗剪性能，克服了混凝土材料拉伸强度弱、延性变形差等缺点[3]。按钢纤维长短可以将钢纤维混凝土分为连续纤维增强型与短切纤维增强型，其中短切钢纤维混凝土的应用更广泛。

收稿日期：2020–10–09。　修订日期：2020–11–03。
基金项目：国家自然科学基金项目(51778269)。
第一作者：张秀芝(1974—)，女，博士，副教授。
通信作者：张秀芝(1974—)，女，博士，副教授。
慕 儒(1971—)，男，博士，教授级高级工程师。

Received date: 2020–10–09.　**Revised date:** 2020–11–03.
First author: ZHANG Xiuzhi (1974–), female, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: mse_zhangxz@ujn.edu.cn
Correspondent author: ZHANG Xiuzhi (1974–), female, Ph. D., Associate Professor.
MU Ru (1971–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: mse_zhangxz@ujn.edu.cn; ru_mu@hotmail.com

理论研究中，一般假定短切钢纤维随机乱向且均匀分布在基体中，但是在实际工程中受拌合物的组分、性能以及施工工艺和构件形状等各种条件的影响，钢纤维在基体中往往分散不均匀[4]。同时，构件在服役过程中承担的荷载和应力具有方向上的规律性，只有与拉应力方向基本一致的钢纤维才起到增强作用，而与拉应力方向垂直的钢纤维所起到的作用微乎其微。研究表明，乱向分布的钢纤维在某一方向上的有效系数为 0.405，也就是说钢纤维的有效利用率仅为 40%左右，大部分钢纤维并未起到增强作用而导致了材料的浪费[5]。因此，改善钢纤维的分散和取向不但有利于力学性能的提升，还能节约材料，降低工程造价。进一步研究表明，均匀分散在基体中完全定向的钢纤维比钢筋更能起到阻碍裂缝生成和扩展的作用，进而提高结构或构件的耐久性[1]。从力学性能和耐久性双重角度考虑，改善钢纤维在基体中的分布位置和分布方向均尤为重要。

改善钢纤维在基体中的分布位置和分布方向，需要明确二者的影响因素，从而做到有的放矢。众多学者分别从不同方面对钢纤维分布特性的影响因素进行了研究。Martinie 等[6]和 Han 等[7]从钢纤维分散性的角度分别给出了纤维的“临界掺量”以及钢纤维和粗骨料的最佳搭配参数；Wang 等[8]和 Khayat 等[9−10]的研究表明拌合物的流变参数会影响钢纤维在基体中的分布，且流变参数越大，钢纤维的分散性和取向效果越不好；进一步，王成[11]和 Alberti 等[12]分别推导了振捣状态下钢纤维下沉位移公式和浇筑状态下边壁效应对钢纤维取向系数影响的模型；此外，Elena 等[13]和 Zirgulis 等[14]分别研究了不同的构件形状内钢纤维的分布状况。由此可见，拌合物的组成及其性能、施工工艺以及构件形状等因素均会对钢纤维的分布产生影响，因此对钢纤维分散性和取向效果的研究应该贯穿于整个生产施工过程[15]。但是，目前研究缺少综合系统地考虑这些因素，而且即使对于同一影响因素往往有不同的结论。因此，有必要从不同的生产施工阶段入手对钢纤维分散性和取向效果的影响因素进行总结，以期为后续研究提供方向并为工程应用奠定基础。

本文从钢纤维混凝土组分、拌合物流变性、施工工艺和构件形状 4 个方面对影响钢纤维分散性和取向效果的因素进行了综合分析，分析了不同施工阶段中各因素对钢纤维分散和取向的影响机理与效果，总结了钢纤维分散性不良的 3 种情况以及改善钢纤维取向效果的 3 种方法，并对钢纤维分布特性的研究提出了展望。

1　钢纤维混凝土组分

钢纤维混凝土的配合比设计主要是根据工程需求选择原材料，并确定基体的水灰比、砂率、骨料粒径和外加剂掺量等参数，然后根据需要掺入钢纤维。混凝土组分的变化会改变拌合物的流变性进而影响钢纤维在基体中的分散和取向。为方便叙述，本节仅讨论钢纤维和骨料自身参数对纤维分散和取向的影响，其他组分对钢纤维分散和取向的影响统一归为拌合物流变性的影响。

1.1　钢纤维

1) 加工工艺与外形特征

当前常见的钢纤维加工工艺主要有冷拔钢丝剪断法、钢带切割法、熔抽法、钢块铣削法、棒材振动切削法和滚压钢丝剪断法，生产出来的钢纤维的外形主要包括圆直型、端钩型、哑铃型和波浪型。不同形貌的钢纤维与混凝土基体的粘结强度不同，进而会导致钢纤维混凝土硬化后的力学性能有较大差异。李加种[16]比较了不同加工工艺生产的钢纤维对混凝土力学性能的影响，发现通过钢带切割法和钢块铣削法生产出来的钢纤维增强效果最好，这可能是由于利用这两种方法生产出来的钢纤维具有扭曲、带钩的特点从而通过提高与基体的机械锚固力而改善粘结性能。尽管研究表明钢纤维掺量越高其增强效应越好，但是异形钢纤维的掺量一般应在 2.0%以下，掺量太高时容易因“结团”导致分散不均。为了在增加粘结强度的基础上改善钢纤维的分散性，当前端钩型钢纤维的生产工艺中利用了水溶性胶水将单根钢纤维粘结成排，制成联排端钩钢纤维，该方法可使钢纤维在搅拌过程实现“两次分散”，保证了钢纤维不“结团”、分散均匀[17]。其他的钢纤维表面改性方法如使用纳米二氧化硅[18]或硅烷偶联剂[19]处理，尽管研究表明能提高界面粘结性能，但是对钢纤维分散的影响还未见报道。

通过控制钢纤维的分布角度使其沿指定方向排布，这便是定向钢纤维混凝土(Aligned steel fiber concrete, ASFC)的由来[20]。当前 ASFC 的制备主要通过外加磁场磁化钢纤维从而使其转动到沿磁极方向排布[21]。在钢纤维定向过程中，除了场强、拌合物工作性等外界因素会影响钢纤维的取向，钢纤维的外形特征也不能忽视。林建军[21]推导了磁场定向时不同外形特征的钢纤维转动角速度与初始角度的

关系，发现钢纤维形状对其在基体中的方向控制有一定影响，但是无论纤维形状如何改变，钢纤维的方向均受磁场、纤维长度和浆体塑性黏度等的影响，且影响趋势基本一致。

2) 长径比与体积掺量

长径比和体积掺量作为钢纤维混凝土的两个重要参数，对钢纤维在基体中的分散和取向有显著影响。钢纤维体积掺量不变时，长径比越大(或长度越长)，钢纤维互相搭接成网状的概率越大，钢纤维越不容易分散[22]。Alberti 等[12]的研究表明，钢纤维长度越长，试模底部纤维占比越多，分散越不均匀。当长径比不变时，体积掺量越大，钢纤维之间越容易发生碰撞和机械互锁。钢纤维之间的碰撞会导致额外的能量损耗，降低拌合物的流动性，从而导致分散性更差；机械互锁则更容易导致钢纤维“结团”[23]。由于钢纤维长度太长或体积掺量太大均不利于分散，因此有学者提出了“纤维因子”($F=\varphi_f \times r$，其中 φ_f 为钢纤维体积掺量，r 为长径比)这一概念以综合考虑钢纤维长度和体积掺量对钢纤维分散性的影响。Martinie 的研究表明[6]，当以水泥净浆为基体时，“纤维因子”的临界值应小于 4，否则钢纤维就倾向于“结团”并引入较多的气泡。Swamy 等[24]则认为，钢纤维存在“临界纤维掺量”，高于该掺量时拌合物无法流动，钢纤维也容易发生“结团”。需要指出的是，“纤维因子”这一概念从钢纤维分散的角度揭示了钢纤维长度和体积掺量之间的辩证关系，当确定好钢纤维长度后，便可相应地确定体积掺量，而高于该体积掺量时钢纤维就有“结团”的可能，因此该掺量亦可称为“临界纤维掺量”。但是，“纤维因子”仅考虑了钢纤维这一种影响因素，所以适用于砂浆或净浆中。而对于混凝土来说，还应考虑粗骨料掺量和粒径对钢纤维分散和取向的影响。

1.2 粗骨料

在混凝土中，粗骨料是必不可少的一个组分。一方面由于粗骨料充当刚性骨架，因此粗骨料可以提高混凝土的抗压强度和弹性模量[25]，减少体积变形；另一方面由于粗骨料占据了一部分空间，势必会影响钢纤维在基体中的分布进而有可能降低其力学性能[26–27]。因此，众多学者着重考虑的是粗骨料与钢纤维的协同作用，在不显著影响钢纤维分散性的前提下，调整粗骨料粒径以及钢纤维长度和掺量使二者分别发挥刚性骨架和桥联裂缝的作用，进而改善钢纤维混凝土的力学性能。考虑到纤维理论间距，马军[28]认为粗骨料最大粒径对钢纤维混凝土力学性能的影响取决于钢纤维掺量。增大钢纤维掺量时，粗骨料最大粒径应适当减小。我国制定的《钢纤维混凝土》规范中规定粗骨料的尺寸不应超过 3/4 钢纤维长度或 25 mm。Olivito 等[29]和高丹盈等[30]提出粗骨料的最大粒径不应超过钢纤维长度的0.5倍以确保纤维均匀分布。根据钢纤维的增强效应，Han[7]建议钢纤维长度与粗骨料最大粒径之比为 1.25～3.00。上述学者分别从“骨料粒径-纤维长度”和“骨料粒径-纤维掺量”的角度进行了研究，而考虑骨料掺量时，对钢纤维长度和掺量的选取需要通过试验进行判定。

在 ASFC 的制备过程中，由于粗骨料会阻碍钢纤维在基体中的转动，因此粗骨料粒径和掺量亦会对钢纤维的定向效果产生影响。关于 ASFC 的配合比，在保证一定工作性和场强使钢纤维转动到设计方向的基础上，一般粗骨料的粒径控制在 20 mm 以内，砂率控制在 50%左右，且钢纤维不宜太长[31–32]。但是这仅仅停留在定性分析上，关于粗骨料粒径和掺量对钢纤维定向效果的定量分析还需进一步研究。

2 拌合物流变性

拌合物的流变性也是影响纤维分散和取向的重要因素。流变参数主要包括屈服应力和塑性黏度。屈服应力指的是流体开始流动的最小剪切应力，用来表征混凝土拌合物流动的难易程度，由固体颗粒形成絮凝网状结构以及各颗粒间的附着力和摩擦力产生[33]。塑性黏度则用来表征新拌混凝土在剪切应力作用下发生变形的速率，主要来源于颗粒之间的作用力[34]。颗粒之间的作用力可分为引力(van der Waals 力)和斥力(空间位阻和静电斥力)。引力可使拌合物形成絮凝网状结构，导致黏度增加。斥力则会使絮凝结构发生分散，而导致黏度减小，因此塑性黏度的变化取决于颗粒之间引力和斥力的大小[35]。

流变参数对钢纤维分散和取向的影响，主要存在以下分歧：一方面是屈服应力和塑性黏度这两个个参数中某一个参数还是 2 个参数均会产生影响存在争议；另一方面是当钢纤维分散性和取向效果最佳时对应的流变参数范围尚不明确。

针对第 1 个分歧，众多学者分别研究了超高性能混凝土和钢纤维自密实混凝土等不同类型混凝土的流变性与分布特性的关系。有些学者认为仅单一的流变参数如屈服应力[8,36–38]或塑性黏度[9–10,13,39–40]会对钢纤维的分散和取向产生影响，而有些学者则发现这两个流变参数会同时影响钢纤维的分散和

取向[22–23, 41]。由于混凝土是由水泥浆和固相颗粒组成的一种随时间和环境变化的非均质多相混合材料，而流变参数测试又必须保证拌合物的均匀性，因此测试结果会存在较大差异，这属于正常现象[42]。此外，混凝土流变参数主要是通过流变仪测出扭矩和转速，再利用内置软件对二者进行拟合，最后根据 Reiner-Riwlin 公式[43]推导出流变参数。一方面流变仪的几何构造会对测量结果产生很大影响[44]，另一方面目前大多数内置软件是基于 Bingham 模型对扭矩和转速进行线性拟合[45]，故对非 Bingham 流体求解流变参数可能会造成误差。事实上，在用流变仪测得扭矩和转速后，可对二者利用其他流变模型进行拟合，如 ConTech 5 型同轴圆筒流变仪内置 Bingham 模型[45]，Wu[9]用 Modified-Bingham 模型拟合依然可得到较高的相关系数。再者，一些研究仅通过测量流动参数来表征流变参数，尽管二者之间具有一定的相关性，但是钢纤维混凝土的流动-流变关系尚不清楚，这也导致研究结论存在较大分歧。关于流变参数对钢纤维分散和取向的影响，一般认为当流变参数处于低水平时，钢纤维倾向于“沉底”；当流变参数处于高水平时，拌合物又不易发生流动，导致基体中的钢纤维不易转动而且有“结团”的可能[9, 36]。但是由于屈服应力和塑性黏度分别表示流体不同的性能，仅靠上述解释还不能说明根本问题，因此需要从流变学理论入手对屈服应力和塑性黏度对钢纤维分散和取向的影响机理进行分析。同时当前文献中，一般是通过掺入矿物掺合料或者改变外加剂掺量来改变屈服应力和塑性黏度，但是二者并不一定同时向同一个方向变化，这也对阐明屈服应力和塑性黏度对钢纤维分散和取向的影响效果及机理增加了难度。

针对第二个分歧，有学者研究了如何调控流变参数以改善钢纤维的分散性和取向效果。Khayat[9–10]分别通过掺加黏度改性剂(viscosity modified admixture, VMA)和硅灰来调节拌合物的塑性黏度以改善钢纤维的分散性和取向效果，发现当掺加 VMA 使塑性黏度在(53.0±3.0)Pa·s、掺加硅灰使塑性黏度在 47.0 Pa·s 时，钢纤维的分散性和取向效果均最好。Ozyurt 等[22]研究了减水剂和黏度改性剂对钢纤维自密实混凝土流变参数的影响，发现 VMA 的掺入能使拌合物的塑性黏度由单掺减水剂时的 1.2 Pa·s 提高到 5.5 Pa·s，相应地使钢纤维分散性的离散标准差由 0.5%左右降低到 0.02%左右。为了明确钢纤维分散系数和方向系数对应的流变参数范围，现将不同文献中的研究结果分别总结在图 1 至图 4 中，相应的拌合物类型也进行了标注。可以看出，文献之间屈服应力对钢纤维分散系数和方向系数的影响呈现较大差异，但是图 2 和图 4 中收集到的塑性黏度数据在 35.0～75.0 Pa·s，且拌合物几乎均为 UHPSFC 时，各文献之间得出的分散系数和方向系数均比较好，具有一定的参考意义。

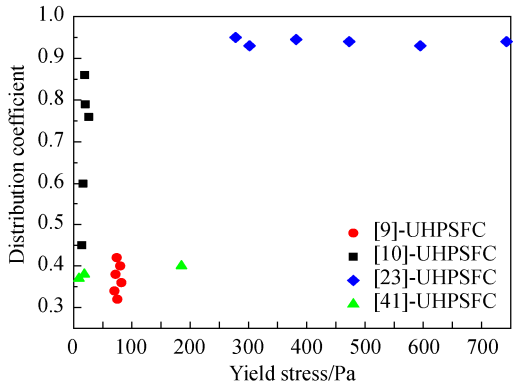


图 1　屈服应力对钢纤维分散系数的影响

Fig. 1　Influence of yield stress on distribution coefficient of steel fiber

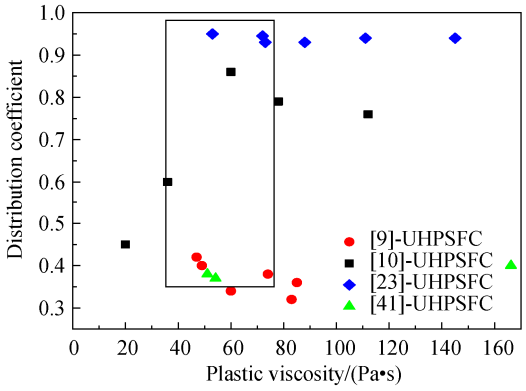


图 2　塑性黏度对钢纤维分散系数的影响

Fig. 2　Influence of plastic viscosity on distribution coefficient of steel fiber

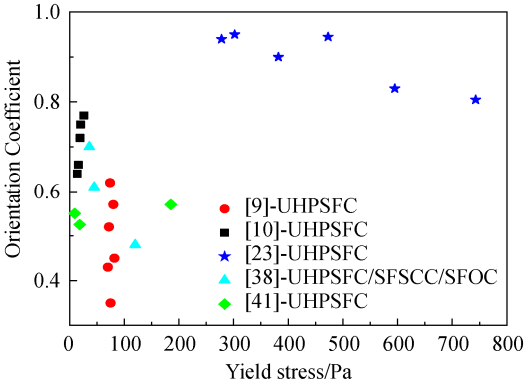


图 3　屈服应力对钢纤维方向系数的影响

Fig. 3　Influence of yield stress on orientation coefficient of steel fiber

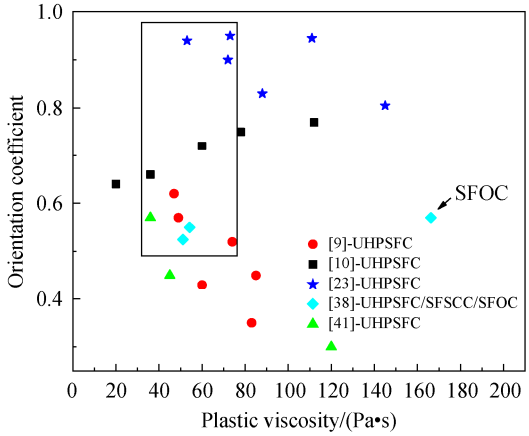


图 4 塑性黏度对钢纤维方向系数的影响

Fig. 4 Influence of plastic viscosity on orientation coefficient of steel fiber

(UHPSFC: Ultra-high performance steel fiber concrete; SFSCC: Steel fiber self-compacting concrete; SFOC: Steel fiber ordinary concrete.)

3 施工工艺

实际施工中，振捣和浇筑这两种施工工艺对于钢纤维的分散与取向也有一定的影响。对于传统的振捣型混凝土，主要依靠外力振捣作用使拌合物密实成型，在这一过程中振捣作用会倾向于使钢纤维下沉和沿水平方向分布；对于钢纤维自密实混凝土，无需振捣仅依靠流动过程中其自身重力便可密实填充模板，但是拌合物自身的抗离析性会影响钢纤维的分散，同时流动过程中的剪切诱导作用和边壁效应(Wall effect)亦会改善钢纤维的取向。

3.1 振捣

对于振捣型混凝土，需要通过振捣使拌合物密实填充模板。混凝土振捣过程中，由于钢纤维的密度大于拌合物的密度，因此不可避免地会发生钢纤维“沉底”的现象而造成钢纤维上下分布不均匀[46]。王成[11]分析了拌合物振捣情况下钢纤维的受力情况，认为重力、浮力和绕流阻力共同影响着钢纤维运动。

在钢纤维下沉过程中，先做加速度减小的加速运动，而后做匀速运动，直到振捣结束。随着外界振动力的减弱，浆体间的絮凝结构逐渐增加，钢纤维也随之静止。最终其下沉位移为：

$$y=\int_0^{t_1}\frac{(\rho_1-\rho)R^2g}{2h(\ln\psi+\ln2-0.5)\cos\varphi}\left[1-\mathrm{e}^{-\frac{2h(\ln\psi+\ln2-0.5)\cos\varphi}{\rho_1R^2}}\right]\mathrm{d}t+\frac{(\rho_1-\rho)R^2g}{2h(\ln\psi+\ln2-0.5)\cos\varphi}(t_2-t_1) \tag{1}$$

式中：ρ_1 为钢纤维密度，kg/m^3；R 为钢纤维半径，m；ρ 为基体材料密度，kg/m^3；ψ 为钢纤维长径比；h 为基体黏度，Pa·s；φ 为钢纤维与水平面的夹角，rad；t_1 为钢纤维变加速运动的时间，s；t_2 为振捣时间，s。

以上仅对单根钢纤维下沉情况进行了分析。在多根钢纤维共存情况下，由于钢纤维之间的相互影响，钢纤维的运动变得更加复杂[47]，同时细长颗粒下沉过程中往往伴随着横向漂移[48]，因此多根钢纤维的下沉情况需要进一步研究。

振捣不但影响钢纤维的分布，还会影响钢纤维的取向[49–50]。Robbins[51]发现，当拌合物仅振捣 1～2 min，混凝土流动性不太高时，振捣对钢纤维取向的影响不显著，而过度振捣会导致钢纤维倾向于沿水平方向分布并出现偏析(即钢纤维垂直方向上分布不均匀)，因此在振捣情况下存在钢纤维水平取向和偏析的矛盾。同时，正如 Laranjeira 等[52]所言，尽管振捣对钢纤维水平取向的定性影响无可争议，但是振捣能量、频率和持续时间对不同状态拌合物中钢纤维水平取向的定量影响还需进一步研究。

3.2 浇筑

对于钢纤维自密实混凝土，主要依靠拌合物流动过程中其自身重力来密实填充模板。拌合物在流动过程中，一般假定拌合物为层流[53]，如图 5 所示。在此状态下，穿过层间边界线的钢纤维将倾向于与流动方向对齐，从而改善钢纤维的取向。同时在距底面为钢纤维长度一半的范围内，由于钢纤维无法与底面垂直从而也能使钢纤维倾向于水平分布，这种因为试模边壁而造成的钢纤维的择优取向称为边壁效应(Wall effect)。考虑到试模边壁对钢纤维取向的影响，Alberti 等[12]建立了试模中钢纤维的取向模型，其模型示意图见图 6。结合图 6 可以发现，试模底部 2 个边角处因各存在 2 个边壁，因此该处钢纤维的取向系数最大，而中间位置的钢纤维由于没有边壁效应对其产生影响，因此该处钢纤维取向系数仅为各向异性状态下的 0.5 这一理论值。基于以上分析，既可以通过增大钢纤维长度以增加边壁效应影响区，也可以通过减小边壁间距以降低非边壁效应影响区，二者均可以改善钢纤维的取向。但是由于增大钢纤维长度往往容易因互相搭接造成分散性不好，因此文献中大都是通过减小边壁间距以改善钢纤维的取向[54–55]。另外，边壁效应原理的应用还常见于拌合物在管道中的流动，如泵送混凝土和 3D 打印混凝土。关于混凝土泵送过

程中钢纤维取向的研究还未见报道，但是在 3D 打印混凝土中有研究表明，通过喷嘴挤出后，90%的钢纤维与打印路径的夹角在 0°～30°范围，即具有较好的取向效果[56]。

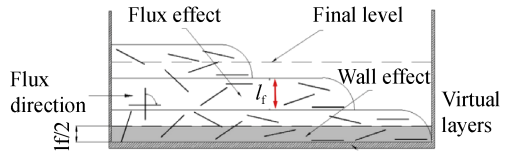
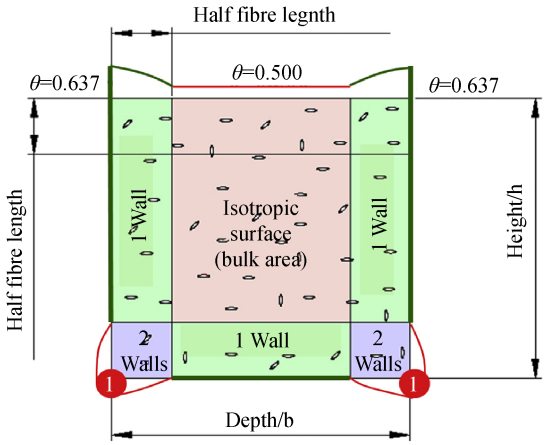
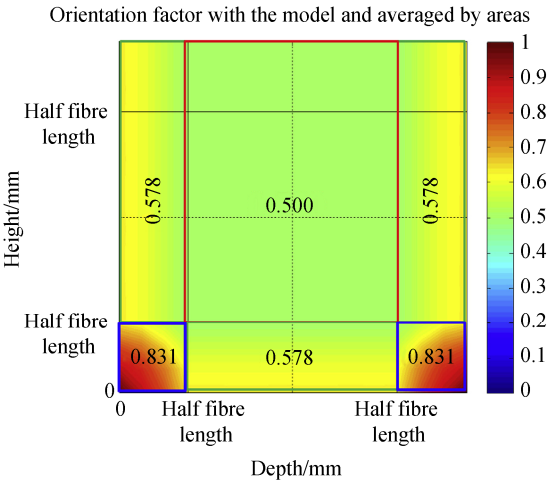


图 5　拌合物层流示意图[57]

Fig. 5　Schematic diagram of laminar flow of mixture[57]



(a) Regional division of specimen section according to the degree of wall effect



(b) The orientation factor of steel fiber in different regions

图 6　考虑边壁效应建立的试模中钢纤维取向模型[12]

Fig. 6　A model of steel fiber orientation in a mold established by considering wall effect[12]

钢纤维除了受到模板壁产生的边壁效应导致的择优取向外，也会因流动剪切诱导而改善钢纤维的取向。流动剪切诱导指的是拌合物在流动过程中，钢纤维的轴线方向会与拌合物的流线方向重合，从而通过剪切诱导改变钢纤维的分布方向。这种效应在流速较高时更强[58]，因此这可能与拌合物的塑性黏度和浇筑时的速度有关。需要指出的是在实际浇筑过程中，剪切诱导的取向效果优于边壁效应，这在钢纤维自密实混凝土中尤为突出[59]，即在浇筑过程中，拌合物的流变参数越小，剪切诱导取向效果越好。但是 Elena 的研究结果表明[13]，尽管较低的流变参数能使钢纤维的取向系数最高可达 0.6，但低黏度下也容易导致钢纤维偏析。因此，同振捣一样，在流动状态下仍应调节流变参数以平衡取向效果和分散性之间的矛盾。

在浇筑过程中基于流动剪切诱导或边壁效应的原理可较好地实现钢纤维的定向，该方法操作简单，既可应用于预制构件也可应用于现场浇筑。磁场定向钢纤维混凝土中纤维的定向系数可达到 0.968[60]，是目前使纤维完全定向最有效的方法，但是由于设备的限制，该方法只能应用于预制构件，因此将磁场定向的原理应用到现场浇筑中是未来的一个方向。

以上分析表明，钢纤维在拌合物中分散性不良的情况可以分为 3 种。第 1 种是钢纤维发生“沉底”现象，即构(试)件的同一截面处顶部纤维数量少，底部纤维数量多，造成这种现象的主要原因是由于在浇筑或振捣状态下，拌合物的流变参数较低；第 2 种是钢纤维发生“结团”现象，这主要是由于拌合物的流变参数过大亦或是钢纤维掺量过大或长度过长。第 3 种是骨料粒径过大造成钢纤维在骨料周围聚集导致钢纤维分散不均匀，尽管这种现象无法避免，但是应调节钢纤维与粗骨料参数以使钢纤维混凝土的力学性能达到最佳。

4　构件形状

除了混凝土的配合比和工作性以及施工工艺会对钢纤维分散性和取向效果产生影响外，构件形状的影响也不容忽视。在构件中钢纤维的分散性和取向效果往往是拌合物流变参数、边壁效应、流动剪切诱导和振捣等因素综合作用的结果，不同的构件形状使得这些因素显著程度不同，因此钢纤维的分散性和取向效果也是不同的。

4.1　梁

关于梁中钢纤维的分散，一般考虑的是浇筑完成后某一位置垂直方向上的钢纤维分散以及到浇筑点不同长度处钢纤维数量的多少。在拌合物流动过

程中，钢纤维的垂直分散与拌合物的稳定性特别是动态稳定性相关，拌合物的动态稳定性越好，钢纤维的分散性越好。动态稳定性与屈服应力有关[61]，因此当钢纤维有“沉底”的趋势时，应适当增大拌合物的屈服应力，但是屈服应力太大又容易导致钢纤维的“结团”[37]。另外有研究发现，拌合物流动性过大时，随着到浇筑点的距离增加，钢纤维数量有所增多[13, 28, 62]，这又导致了距浇筑点不同长度处钢纤维浓度分布不均。

对于梁中钢纤维的取向，在浇筑状态下一方面由于梁宽度较小，会受到边壁效应的影响，另一方面由于梁长度较长，也容易因为剪切诱导造成钢纤维的择优取向。且流动距离越长，拌合物流动性越大，钢纤维长度越长，其取向效果越好[62–63]。而Nis[64]的研究发现随着梁深度与钢纤维长度之比增加，钢纤维取向降低，因此当需要浇筑深梁时，可以选择分层浇筑以改善钢纤维的取向。

4.2 板

与梁不同，板的特点是高度小而长度和宽度大，因此在浇筑板时边壁效应并不显著。同时由于板是从一点浇筑让拌合物均匀地向四周流动，因此拌合物的流线方向往往呈放射状，此时钢纤维则更容易沿垂直于流线的方向分布，钢纤维的取向示意图和板内钢纤维的取向分布见图 7[65]。从图 7 b 可以看出，钢纤维主要垂直于流线方向排列，但是当钢纤维接触到四周边壁时，则会因为边壁效应造成轻微重新分布。此外 Zirgulis 等[14]的研究结果表明，底板表面的光滑程度也会对钢纤维的取向有影响。底板表面越光滑，在竖直方向上钢纤维沿径向分布的深度越大。这是因为底板表面的光滑程度决定了拌合物流动过程中竖直方向上的流速恒定区，表面越光滑流速恒定区越大，相应的钢纤维沿径向分布的深度越深。相反，底板表面粗糙时，由于表面施加给拌合物的约束摩擦力造成不同深度处流速不一致，拌合物更容易因出现紊流而造成钢纤维趋向于随机乱向分布。模板表面的光滑程度与流速恒定区的示意图见图 8。

板的长度和宽度对钢纤维的取向效果影响不明显，板的厚度则不同。具体而言，Michels[66]发现钢纤维的取向因子 η 与试模厚度 h 之间呈指数递减的关系，如式(2)所示。

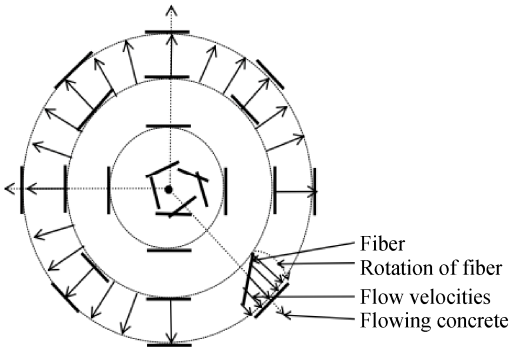
$$\eta = 0.699 \times \mathrm{e}^{-0.0024h} \tag{2}$$

进一步，Martinie[67]考虑钢纤维长度 l_f 和试模厚度 h 的共同作用，建立了如下关系式：

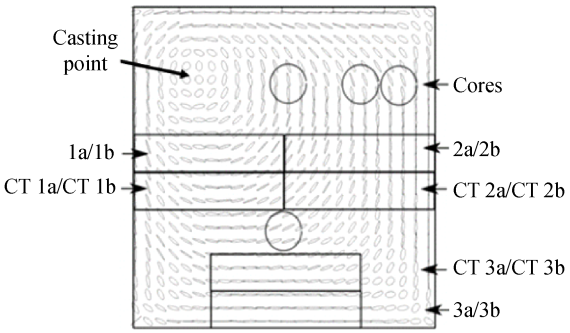
$$\eta = \eta_{\mathrm{isotropic}} + l_\mathrm{f} / 20h \tag{3}$$

其中，$\eta_{\mathrm{isotropic}}$ 为各向同性系数，一般取 0.5。

式(2)和式(3)均通过试验验证了公式的正确性，但是模型的适用条件(如拌合物流变参数、钢纤维类型、掺量等)还需要进一步研究。



(a) Schematic diagram of steel fiber orientation[37]



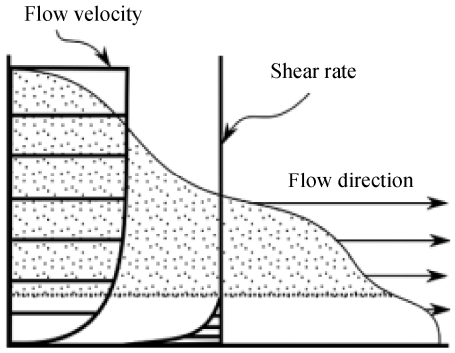
(b) Schematic diagram of the orientation of steel fibers in the slab[65]

图 7 放射流状态下钢纤维的取向示意图和板内钢纤维取向示意图

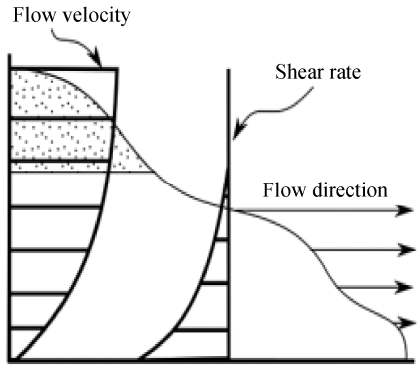
Fig. 7 Schematic diagram of the orientation of steel fibers and schematic diagram of the orientation of steel fibers in the slab at the radial state

4.3 其他构件形状

除了梁和板外，钢纤维混凝土在柱和隧道混凝土管片这两种构件形状中也较常应用。柱的特点是高度远大于长度和宽度，因此边壁效应、流动剪切诱导并不显著，而直接浇筑并振捣有可能造成钢纤维偏析现象严重，在这种情况下可像梁式构件一样采取分层浇筑的形式，这不但有利于钢纤维在竖直方向上的均匀分布，还可以防止因内外温差大导致温度裂缝的产生，这对于大体积混凝土尤为重要[68]。对于隧道管片来说，有研究表明浇筑和振捣之后，外表面附近纤维少而内表面附近纤维多，即钢纤维发生了偏析[69]。由于管片厚度限制，分层浇筑无法实现，因此可以采取调节拌合物流变参数的方法使钢纤维均匀分布。



(a) Slip surface



(b) Rough surface

图 8　模板表面的光滑程度与流速恒定区的示意图[14]

Fig. 8　Schematic diagram of the smoothness of the slab surface and the constant flow rate zone[14]

5　结论与展望

综上所述，钢纤维混凝土的组分、拌合物流变性、施工工艺和构件形状均会影响纤维的分散性和取向效果。科学合理的配合比是保证材料工作性能及力学性能的基础，这是钢纤维分散和取向最初的影响因素。拌合物的工作性决定了是否需要通过振捣以确保拌合物能密实成型。对于钢纤维自密实混凝土，拌合物在自由流动过程中钢纤维与基体的密度差也易使钢纤维发生离析进而造成分散不均匀。最后，在拌合物填充模板过程中，模板的形状亦会影响钢纤维的运动轨迹，从而改变钢纤维的分散和取向。因此，在钢纤维混凝土成型硬化之前，纤维的分布是上述因素综合作用的结果，而且在不同工况下，各因素显著程度不同，从而造成了钢纤维分散和取向不同。结合前文分析总结如下：

1) 尽管流变仪之间存在数据不互通的缺点，但是不同研究均表明当 UHPSFC 的塑性黏度在 35.0～75.0 Pa·s 时，钢纤维的分散性和取向效果最好。

2) 钢纤维和骨料参数对钢纤维分散和取向的影响不可忽视，需要考虑钢纤维与骨料的协同作用使二者充分发挥桥联裂缝和刚性骨架的作用。

3) 浇筑时可通过边壁效应和流动剪切诱导等方式改善钢纤维取向，振捣可使钢纤维沿水平方向分布。此外，在振捣时通过施加外加磁场可使钢纤维的定向系数高达 0.968。

4) 钢纤维分散性不良的情况主要有 3 种，分别是“沉底”、“结团”以及因粗骨料挤压造成的分散不均。改善钢纤维分散性需要从配合比入手调节拌合物的流变参数以分别适应不同施工工艺和构件形状。

目前，对于钢纤维分散性和取向效果的研究仍存在一些问题，为改善钢纤维在基体中的分布以实现复合材料最佳的力学性能，以下几个方面可能是以后的研究方向：

1) 由于不同型号流变仪之间测得的数据存在差异，导致流变参数对钢纤维分散性和取向效果的影响存在争议。为解决此问题，一方面需要开发出更适合纤维混凝土流变特性的流变仪；另一方面，钢纤维增强水泥基材料流动参数与流变参数间的关系还需进一步研究，并建立适用于含钢纤维的拌合物流动-流变关系[70]。

2) 在定向钢纤维混凝土研究中，主要考虑纤维如何均匀且单向分布，但是结构或构件在实际受力过程中各部位往往受力不均匀且应力方向不一致，因此如何根据应力大小和应力方向实现钢纤维的“非均匀分布”和“全场定向”是今后的一个发展方向。同时，不同构件形状的定向钢纤维混凝土制备与力学性能研究也需进一步深入[71]。

3) 基于边壁效应和流动剪切诱导的原理可较好地改善钢纤维取向，通过外加磁场的方法可实现真正意义上的钢纤维定向，但是三者均存在一定的应用限制。将磁场定向的原理应用到现场浇筑中以使钢纤维的定向不受磁场定向设备的限制也是未来研究的一个方向。

4) 振捣和浇筑过程中，需要考虑钢纤维的水平取向和偏析之间的矛盾，一方面可采取分层浇筑的方法降低钢纤维偏析，另一方面还需要从调节拌合物流变参数这一根本入手以适应不同工况需求。

参考文献:

[1] 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]. Constr Build Mater, 2020, 256: 15–23.

[2] LIU Y W, SHI C J, ZHANG Z H, et al. Mechanical and fracture

properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume[J]. Cem Concr Compos, 2020, 112: 103665.

[3] 苏捷, 史才军, 秦红杰, 等. 超高性能混凝土抗折强度尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(44): 1740–1746.
SU Jie, SHI Caijun, QIN Hongjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(44): 1740–1746.

[4] ZHANG S, ZHANG C, LIAO L. Investigation on the relationship between the steel fibre distribution and the post-cracking behaviour of SFRC[J]. Constr Build Mater, 2019, 200(200): 539–550.

[5] GETTU R, GARDNER D R, SALDíVAR H, et al. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens[J]. Mater Struct, 2005, 38(1): 31–37.

[6] MARTINIE L, ROSSI P, ROUSSEL N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(2): 226–234.

[7] HAN J, ZHAO M, CHEN J, et al. Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 209: 577–591.

[8] WANG R, GAO X, HUANG H, et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 65–73.

[9] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105876.

[10] MENG W, KHAYAT K H. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar[J]. Compos Part B-Eng, 2017, 117: 26–34.

[11] 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 the anisotropy properties of aligned steel fiber reinforced cement mortar (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[12] ALBERTI M G, ENFEDAQUE A, GáLVEZ J C. On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2017, 77: 29–48.

[13] JASIŪNIENĖ E, CICĖNAS V, GRIGALIŪNAS P, et al. Influence of the rheological properties on the steel fibre distribution and orientation in self-compacting concrete[J]. Mater Struct, 2018, 51(4): 103–110.

[14] ZIRGULIS G, SVEC O, GEIKER M R, et al. Influence of reinforcing bar layout on fibre orientation and distribution in slabs cast from fibre-reinforced self-compacting concrete (FRSCC)[J]. Struct Concr, 2016, 17(2): 245–256.

[15] ABRISHAMBAF A, BARROS J A O, CUNHA V M C F. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels[J]. Cem Concr Res, 2013, 51: 57–66.

[16] 李加种. 增强混凝土钢纤维加工技术及特性[J]. 新技术新工艺, 1992(5): 2–8.
LI Jiazhong. New Tech New Proc (in Chinese), 1992(5): 2–8.

[17] 谢秉洪, 韩水生. 我国钢纤维生产发展的现状与展望[C]//全国第五届纤维水泥与纤维混凝土学术会议, 广东, 1994: 567–573.
XIE Binghong, HAN Shuisheng. The status quo and prospects of the development of steel fiber production in China[C] //The 5th National Conference on Fiber Cement and Fiber Concrete, Guangdong, China, 1994: 567–573.

[18] PI Z, XIAO H, DU J, et al. Interfacial microstructure and bond strength of nano-SiO2-coated steel fibers in cement matrix[J]. Cem Concr Compos, 2019, 103: 1–10.

[19] LIU T J, WEI H N, ZHOU A, et al. Multiscale investigation on tensile properties of ultra-high performance concrete with silane coupling agent modified steel fibers[J]. Cem Concr Compos, 2020, 111: 103638.

[20] HANNANT D J, SPRING N. Steel-fibre-reinforced mortar: a technique for producing composites with uniaxial fibre alignment[J]. Mag Concr Res, 1974, 26(86): 47–48.

[21] 林建军. 水泥基材料中钢纤维的方向控制及增强效应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
LIN Jianjun. Investigation on orientation control and enhancement effect of steel fibers in cementitious materials (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[22] OZYURT N, MASON T O, P.SHAH S. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs[J]. Cem Concr Compos, 2015, 29(2): 70–79.

[23] 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): 73–77.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rep (in Chinese), 2017, 31(23): 73–77.

[24] SWAMY R N, MANGAT P S. Influence of fiber-aggregate interaction on some properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Mater Struct, 1974, 7(41): 307–314.

[25] WU F, XU L, CHI Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate[J]. Compos Struct, 2020, 236: 111810.

[26] ZHANG L H, LIU J Z, LIU J P, et al. Effect of steel fiber on flexural toughness and fracture mechanics behavior of ultrahigh-performance concrete with coarse aggregate[J]. J Mater Civ Eng, 2018, 30(12): 13–21.

[27] JOON S, JANG, JUN Y, et al. Influence of fiber volume fraction and aggregate size on flexural behavior of high strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Appl Mech Mater, 2013, 372: 223–226.

[28] 马军, 杨向宁, 李秋义. 钢纤维混凝土粗骨料最大粒径的选择[J]. 低温建筑技术, 1997(2): 37–38.
MA Jun, YANG Xiangning, LI Qiuyi, et al. L Tempe Archi Tech (in Chinese), 1997(2): 37–38.

[29] OLIVITO R S, ZUCCARELLO F A. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete[J]. Compos Part B-Eng, 2010, 41(3): 246–255.

[30] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献

出版社, 1994..

[31] 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. Analysis of the distribution of steel fiber in aligned steel fiber reinforced concrete (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.

[32] 李辉. 单向分布钢纤维混凝土的制备以及力学性能试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
LI Hui. Investigation on the preparation and properties of the aligned steel fiber reinforced concrete (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.

[33] QIAN Y, KAWASHIMA S. Distinguishing dynamic and static yield stress of fresh cement mortars through thixotropy[J]. Cem Concr Compos, 2018, 86: 288–296.

[34] KOVLER K, ROUSSEL N. Properties of fresh and hardened concrete[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(7): 775–792.

[35] LAVERGNE F, BELHADI R, CARRIAT J, et al. Effect of nano-silica particles on the hydration, the rheology and the strength development of a blended cement paste[J]. Cem Concr Compos, 2019, 95: 42–55.

[36] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2012, 27(1): 6–14.

[37] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(9): 1664–1671.

[38] VILLAR V P, MEDINA N F, HERNáNDEZ-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.

[39] STAHLI P, CUSTER R, VAN MIER J G M. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC[J]. Mater Struct, 2007, 41(1): 189–196.

[40] MU R, LI H, QING L, et al. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 309–316.

[41] KANG S-T, KIM J H, LEE B Y. Effects of water reducing admixture on rheological properties, fiber distribution, and mechanical behavior of UHPFRC[J]. Appli Sci, 2019, 9(1): 29–40.

[42] 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.

[43] FEYS D, WALLEVIK J E, YAHIA A, et al. Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers[J]. Mater Struct, 2013, 46(1): 289–311.

[44] 刘豫, 史才军, 焦登武, 等. 新拌水泥基材料的流变特性、模型和测试研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(05): 708–716.
LIU Yu, SHI Caijun, JIAO Dengwu, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(05): 708–716.

[45] 史才军, 元强. 水泥基材料测试分析方法[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.

[46] 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. Research on preparation and permeability of UHPC based fiber distribution (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[47] MARTINIE L, LATASTE J-F, ROUSSEL N. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations[J]. Mater Struct, 2013, 48(4): 947–957.

[48] 王怡, 李芸博, 杨小妮, 等. 细长颗粒物自由沉降过程中横向迁移特性研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 647–653.
WANG Yi, LI Yunbo, YANG Xiaoni, et al. J Saf Environ (in Chinese), 2020, 20(2): 647–653.

[49] GETTU R, GARDNER D R, SALDíVAR H, et al. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens[J]. Mater Struct, 2005, 38(1): 31–37.

[50] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections[J]. Cem Concr Compos, 2005, 27(3): 391–398.

[51] ROBINS P J, AUSTIN S A, JONES P A. Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete[J]. Mag Concr Res, 2003, 55(3): 225–235.

[52] LARANJEIRA F, AGUADO A, MOLINS C, et al. Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(6): 752–768.

[53] HOSSEINPOOR M, KHAYAT K H, YAHIA A. Numerical simulation of self-consolidating concrete flow as a heterogeneous material in L-Box set-up: Effect of rheological parameters on flow performance[J]. Cem Concr Compos, 2017, 83: 290–307.

[54] HUANG H, GAO X, ZHANG A. Numerical simulation and visualization of motion and orientation of steel fibers in UHPC under controlling flow condition[J]. Constr Build Mater, 2019, 199: 624–636.

[55] ZHANG Y, ZHU Y, QU S, et al. Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers[J]. Constr Build Mater, 2020, 251: 118893.

[56] PHAM L, TRAN P, SANJAYAN J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance[J]. Constr Build Mater, 2020, 250: 13–22.

[57] ALBERTI M G, ENFEDAQUE A, GáLVEZ J C. A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete[J]. Compos Part B-Eng, 2018, 151: 274–290.

[58] LAPPA L. High strength fibre reinforced concrete: static and fatigue behavior in bending[D]. Delft University of Technology, Netherlands, 2007.

[59] ALBERTI M G, ENFEDAQUE A, GALVEZ J C. Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and

construction procedures[J]. Compos Struct, 2016, 140(15): 506–524.

[60] 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): 208–213.
MU Ru, QIU Xin, ZHAO Quanming, et al. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(2): 208–213.

[61] 李文旭, 马昆林, 龙广成 等. 自密实混凝土拌合物稳定性动态监测及数值模拟研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2206–2213.
LI Wenxu, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Mater Rep (in Chinese), 2019, 13(33): 2206–2213.

[62] SARMIENTO E V, GEIKER M R, KANSTAD T. Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer–steel FRC[J]. Constr Build Mater, 2016, 109: 166–176.

[63] BI J, ZHAO Y, GUAN J, et al. Three-dimensional modeling of the distribution and orientation of steel fibers during the flow of self-compacting concrete[J]. Struct Concr, 2019, 20(5): 1722–1733.

[64] NIŞ A, ÖZYURT N, ÖZTURAN T. Variation of flexural performance parameters depending on specimen size and fiber properties[J]. J Mater Civ Eng, 2020, 32(4): 04020054.

[65] ŽIRGULIS G, ŠVEC O, SARMIENTO E V, et al. Importance of quantification of steel fibre orientation for residual flexural tensile strength in FRC[J]. Mater Struct, 2015, 49(9): 3861–3877.

[66] MICHELS J, WALDMANN D, MAAS S, et al. Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction-Experimental investigation and design[J]. Constr Build Mater, 2012, 26(1): 145–155.

[67] MARTINIE L, ROUSSEL N. Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(10): 993–1000.

[68] LI J Q, WU Z M, SHI C J, et al. Durability of ultra-high performance concrete-A review[J]. Constr Build Mater, 2020, 255: 13–29.

[69] CARMONA S, MOLINS C, AGUADO A, et al. Distribution of fibers in SFRC segments for tunnel linings[J]. Tun Unde Spa Tech, 2016, 51: 238–249.

[70] 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.

[71] MU R, XUE Y, QING L, et al. Preparation and mechanical performance of annularly aligned steel fiber reinforced cement-based composite pipes[J]. Constr Build Mater, 2019, 211: 167–173.