第 49 卷第 11 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 11
2021 年 11 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　November，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20210310

钢纤维掺量及其 3D 空间结构对超高性能混凝土性能的影响

余　睿[1]，范定强[1,2]，孙美娟[1,2]，张晶晶[1,2]，水中和[1]，候东帅[3]，王鑫鹏[3]，冯　元[1]

(1. 硅酸盐建筑材料国家重点实验室，武汉 430070；2. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；
3. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033)

摘　要：为了提高钢纤维的使用效率以及实现超高性能混凝土(UHPC)的性能调控，开展了钢纤维掺量及其形成的 3D 空间网络结构对 UHPC 的性能影响研究。采用改良的 Andreasen 和 Andersen(MAA)颗粒堆积模型设计了 UHPC 基础配合比，提出了优化纤维取向的浇筑方式，之剖析了钢纤维 3D 空间网络结构的形成，并研究了钢纤维掺量及其 3D 空间结构对 UHPC 性能的影响。结果表明：采用单侧浇筑方式可优化 UHPC 钢纤维空间取向与分布；钢纤维掺量越高，纤维取向更加无序化且搭接概率越大，这导致了 UHPC 堆积结构的破坏和工作性能的下降；钢纤维的掺入可显著提高 UHPC 的力学性能，但掺量过高时，愈加紊乱的网络结构会导致增强效率的下降。钢纤维对 UHPC 的性能影响具有双面性，合理地优化与调控 UHPC 钢纤维掺量及其形成的 3D 空间网络结构，可有效提高钢纤维使用效率以及实现 UHPC 性能的提升。

关键词：超高性能混凝土；钢纤维掺量；钢纤维网络结构；性能评估
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2313–09
网络出版时间：2021–10–11



Effects of Steel Fibre Content and 3D Network on Performance of Ultra-High Performance Concrete

YU Rui[1], *FAN Dingqiang*[1,2], *SUN Meijuan*[1,2], *ZHANG Jingjing*[1,2], *SHUI Zhonghe*[1],
HOU Dongshuai[3], *WANG Xingpeng*[3], *FENG Yuan*[1]

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 430070, Shandong, China)

Abstract: To improve the application efficiency of steel fibres and the properties of ultra-high performance concrete (UHPC) composites, the formation and optimization of fibres content and its 3D network in UHPC matrix were investigated. A basic UHPC mixture was designed using a modified Andreasen & Andersen (MAA) particle packing model. The formation of fibres network and the effect of steel fibres on the UHPC properties were analyzed. The experimental results reveal that casting at one side of the mould benefits the orientation of steel fibres, and a higher steel fibres content results in more disordered orientation of steel fibres and increases the possibility of fibres connection, which is not conductive to the development of particle packing structure and workability of UHPC. The addition of steel fibres contributes to the development of UHPC mechanical properties, but the excessive addition of steel fibres will cause the reduction of the fibre application efficiency. The use of steel fibres has both positive and negative effects on the UHPC properties, thus there is a need for the optimization of steel fibre 3D network to improve the fibre application efficiency and obtain expected UHPC products.

Keywords: ultra-high performance concrete; steel fibre content; steel fibres network; performance evaluation

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有超高强度，超高耐久和高韧性的新型水泥基复合材料[1–4]。自从 20 世纪 90 年代初期被研发至今，在世界范围内围绕着 UHPC 制备技术、基本性能与应用的研究以及相关标准规范的制定迅速成为了热点，引起了大量学者以及科研机构的广泛关注，并得到了快速而有

收稿日期：2021–04–25。　修订日期：2021–05–30。
基金项目：国家自然科学基金项目(U2006224，52008220)。
第一作者：余　睿(1986—)，博士，研究员。

Received date: 2021–04–25.　**Revised date:** 2021–05–30.
First author: YU Rui (1986–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: r.yu@whut.edu.cn

效的发展[5–7]。不同于普通混凝土，UHPC 基本的制备原理是形成内部颗粒的最紧密堆积结构以及掺入钢纤维进行基体增强[8–10]。因此，对于 UHPC 而言，为了保证其优异性能，进行配合比组成的优化设计以及钢纤维的优化调控是至关重要的。

目前，关于 UHPC 组成的优化设计主要采用一些经典的颗粒堆积模型，如线性堆积模型、可压缩堆积模型、Aim-Goff 模型以及改良的 Andreasen-Andersen(MAA)模型等[11]。其中，MAA 模型由于兼具较高的理论性与实用性，被广泛应用于混凝土材料的配合比优化设计中[12–14]。Yu 等[15]最早提出采用 MAA 模型进行 UHPC 的组成优化设计，通过优化原材料级配组成，制备了一种具有密实堆积结构的 UHPC，并指出采用 MAA 模型可有效制备出生态价值高、性能表现优异的新型 UHPC。之后，在 MAA 设计理论的指导下，余睿[16]将各种功能材料、替代材料纳入 UHPC 体系，制备了各种功能型与生态型 UHPC，充分验证了 MAA 模型的可行性与包容性。然而，作为 UHPC 不可或缺的关键组分，钢纤维的掺入大多是基于经验法，缺乏深入的理论设计与优化调控，尤其是钢纤维的掺入形成的 3D 空间网络结构对 UHPC 颗粒堆积以及相关性能的影响不明确[17]。这种类似于“黑盒效应”的处理方法常常导致实际制备出来的 UHPC 存在着匀质性不好，纤维利用率不足等问题。

通常，纤维都是在混凝土内部随机作用，整个混凝土类似于一个“黑盒”，其内部纤维的取向与分布以及形成的 3D 空间网络结构是未知的。研究表明，钢纤维对 UHPC 性能的增强作用与其内部纤维的分布与取向密切相关，在二维尺度上，当纤维在混凝土内部均匀分布且纤维沿着与受力方向垂直排列时，对混凝土的增韧效果最为明显[18–20]。Huang 等[21–22]优化了 UHPC 浇筑方式并采用二值图像处理法定量评价纤维的取向，结果表明该浇筑方法可有效优化纤维取向，同时优化取向后的 UHPC 力学性能(抗压强度、抗折强度、韧性和挠度)得到了显著的提升。此外，Huang 等[23–24]亦采用光滑粒子流体力学方法模拟了纤维在浇筑时的运动过程与取向变化，验证了 L 形装置优化纤维取向的可行性，并指出控制新鲜混合物的流动距离和方向是制备高均匀度 UHPC 的关键。在 UHPC 实际应用中，其内部大量钢纤维在三维尺度上由于相互的搭接会形成钢纤维网络结构，这也会对 UHPC 性能带来显著的影响[25–27]。例如，钢纤维在 UHPC 制备过程中是存在掺量阈值，过量的钢纤维会降低纤维的增强效率，甚至会降低显著 UHPC 的力学性能以及工作性能[21–22, 28–29]。此外，已有研究表明，纤维的纳入会对水泥基材料体系的颗粒堆积带来影响。De Larrard 等[27]研究了纤维对混凝土材料的颗粒堆积的影响，指出纤维会对颗粒堆积结构造成扰乱与破坏，并将这种负面作用称为松动效应和附壁效应。Li 等[30]研究了不同种纤维对砂浆的湿堆积密实度的影响，结果表明纤维的种类、含量与长细比均是影响砂浆颗粒堆积结构的关键参数。需要指出的是，这些研究均是基于普通混凝土体系，而关于钢纤维的掺入对 UHPC 颗粒堆积的影响的相关研究鲜有报道。作为 UHPC 性能的 2 个关键因素，钢纤维的掺入和 UHPC 堆积密实度的关系需要更加深入的研究与剖析。综上所述，揭示 UHPC 中钢纤维及其网络结构与 UHPC 性能的关系，实现 UHPC 钢纤维 3D 空间网络结构的优化，对提高钢纤维的使用效率具有显著意义的。

为了实现钢纤维的高效利用与 UHPC 的功能化调控，开展了钢纤维 3D 网络结构对 UHPC 的性能影响及调控研究：采用 MAA 模型进行 UHPC 基础配合比设计；提出了优化纤维取向的 UHPC 浇筑方式，并制备了一系列具有不同钢纤维掺量的 UHPC；之后，剖析了钢纤维掺量对 UHPC 的 3D 空间网络结构形成的影响；阐明并验证了钢纤维掺量与网络结构对 UHPC 各项性能的影响，包括堆积结构、工作性能与力学性能。

1 实验

1.1 原材料

胶凝材料分别为湖北黄石华新水泥厂生产的 PO 52.5 水泥、武汉阳逻电厂生产的粉煤灰、成都东蓝星科技发展有限公司生产的硅灰，其化学成分见表 1。骨料：选用 2 种洗净的连续级配河砂(0~0.60 mm 及 0.60~1.25 mm)，含泥量小于 0.5%。

表 1 胶凝材料的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of cementitious materials

w/%

Material	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	LOI
Cement	0.09	1.61	4.18	19.2	0.09	3.35	0.78	64.93	3.32	2.49
Silica fume	0.13	0.47	0.25	94.65	0.17	0.69	0.84	0.36	0.15	2.29
Fly ash	0.33	0.23	38.01	46.44	0.06	0.69	0.88	7.50	3.12	2.79

w is mass fraction.

减水剂为江苏苏博特公司生产的高效聚羧酸减水剂，固含量为 20%。采用贝卡尔特公司生产的镀铜圆直钢纤维(长度为 13 mm，截面直径为 0.2 mm，抗拉强度为 2 GPa)。

1.2　配合比优化设计

利用 MAA[15]设计的混凝土配合比如表 2 所示。

表 2　超高性能混凝土的配合比

Table 2　Mixtures of the UHPC

kg/m^3

Sample No.	C	FA	SF	Sand-1	Sand-2	Water	SP	SSF
UHPC-0.0%	750	200	144	770	220	190	30	0
UHPC-0.5%	750	200	144	770	220	190	30	39
UHPC-1.0%	750	200	144	770	220	190	30	78
UHPC-1.5%	750	200	144	770	220	190	30	117
UHPC-2.0%	750	200	144	770	220	190	30	156
UHPC-2.5%	750	200	144	770	220	190	30	195
UHPC-3.0%	750	200	144	770	220	190	30	234

C: Cement; FA: Fly ash; SF: Silica fume; Sand-1: 0–0.60 mm; Sand-2: 0.60–1.25 mm; SSF: Straight steel fibers; SP: Superplasticizer.

1.3　制备方法

制备 UHPC 的搅拌流程如下：1) 将各种胶凝材料与河砂倒入 JJ-5 型砂浆搅拌锅，慢搅 90 s；2) 在慢搅过程中将 70%的水和全部减水剂的混合液缓慢倒入搅拌锅中，直至成浆；3) 静置 30 s 后加入剩余水慢搅 180 s 再快搅拌 120 s；4) 加入钢纤维并慢搅 90 s。搅拌完成后将浆体倒入相应尺寸模具，养护 24 h 后拆模并置于标准养护室[(20±2) ℃，相对湿度>95%]养护至相应龄期。

1.4　测试

1.4.1　钢纤维取向评估方法

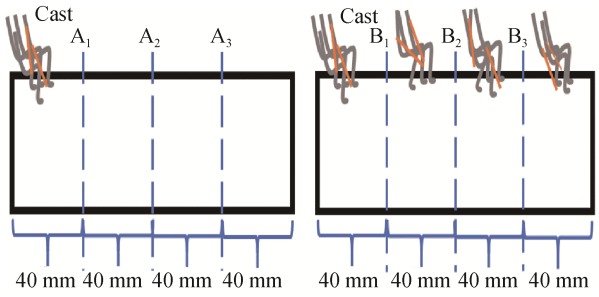
为了研究 UHPC 内部钢纤维取向受自身流动作用的影响，采用优化浇筑(单侧浇筑，浆体沿模具方向流动成型)和非优化浇筑(随机浇筑，无明显的浆体流动过程)分别对 UHPC 成型。采用图像处理方法评价 UHPC 内部钢纤维的取向状态。将尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的 UHPC 试样平均切割成 4 份得到 3 个截面，分别定义为 1、2、3；用 A 和 B 代表优化浇筑和非优化浇筑(如图 1 所示)。用高清相机对试样的各个截面拍照，获得一系列截面图；再通过图像处理软件对试样截面分析；图像中只有黑、白 2 个像素，白色代表钢纤维，黑色为 UHPC 基体；利用 MATLAB 程序分析处理图像，可得到白色像素与黑色像素的数量；根据下式，可得到截面信息。

$$\rho = \frac{n_{\mathrm{w}}}{n_{\mathrm{w}} + n_{\mathrm{b}}} \tag{1}$$

$$S_{\mathrm{aver}} = \frac{\rho * S_{\mathrm{N}}}{n_{\mathrm{f}}} \tag{2}$$

$$\cos\theta_{\mathrm{aver}} = \frac{d}{l} = \frac{S_{\mathrm{f}}}{S_{\mathrm{aver}}} \tag{3}$$

式中：n_{w} 与 n_{b} 分别为白色像素与黑色像素的数量；ρ 为截面中钢纤维所占的面积比；S_{N} 为横截面的面积；n_{f} 为横截面中钢纤维的数量；S_{aver} 为横截面中的纤维平均面积；S_{f} 为纤维的横截面积；θ_{aver} 为截面中纤维的平均角度。由于当纤维与某平面和另一空间轴的夹角都一定时，该纤维在三维空间中的范围可形成了圆锥体表面，此表面范围的纤维取向在空间三维方向都是相同的。因此，可以采用 UHPC 试样横截面上的平均纤维面积(S_{aver})表征此位置的纤维取向[29]。



(a) Optimized casting　　(b) Random casting

Notes: A and B represent optimized pouring and random pouring; 1,2 and 3 represent three different cross-sectional positions.

图 1　UHPC 不同位置处的横截面

Fig. 1 Cross-section of UHPC at different locations

1.4.2　密实度

UHPC 的密实度采用湿堆积密实度[30–31]法进行测量，该方法的核心思想是通过调整水固比以获得最大的密实度即为湿堆积密实度，如式(4)所示：

$$\tau = \frac{M / V}{\rho_{\mathrm{w}} R_{\mathrm{w}} + \rho_{\mathrm{f}} R_{\mathrm{f}} + \rho_{\mathrm{a}} R_{\mathrm{s}} + \sum \rho_{\mathrm{x}} R_{\mathrm{x}}} \tag{4}$$

式中：τ 为湿堆积密实度；M 和 V 分别为浆体质量与容器体积；ρ_{w} 为水的表观密度；ρ_{s} 为砂的表

观密度；ρ_f为钢纤维表观密度；ρ_x是胶凝材料(水泥、粉煤灰、硅灰)的表观密度；R_w为水体积与所有固体总体积的比值；R_s为砂体积与所有固体总体积的比值；R_f为钢纤维体积与所有固体总体积的比值；R_x为胶凝材料的体积与所有固体总体积的比值。

1.4.3 工作性能

根据 GB/T 2419—2005[32]对掺钢纤维的 UHPC 新鲜砂浆的流动度进行了测试。将新鲜的 UHPC 砂浆倒入一个锥体模具直至填满，把多余的砂浆刮去使砂浆与模具上表面平齐后，将模具垂直向上提。当新鲜砂浆稳定不再流动后，在没有任何震动的情况下对其相互垂直的 2 个直径进行测量和记录，其平均值即为试样的流动度。

1.4.4 力学性能

根据 GB/T 17671—2020[33]对 UHPC 的力学性能(抗压强度与抗折强度)进行了测试。将搅拌后的新鲜 UHPC 浆体倒入一个 40 mm×40 mm×160 mm 的三联模具中，成型 24 h 后脱模，置于标准养护室中养护至实验所需的测试龄期后采用 JES–2000A 型试验机进行抗压与抗折强度测试。每个实验组测试 3 个试块，其平均值即为试样的抗压强度和抗折强度。

1.4.5 纤维 3D 空间网络结构量化分析

采用 Xradia 510Versa 型高分辨三维 X 射线显微成像仪对 UHPC 内部结构进行了测试，测试试样尺寸为 40 mm×40 mm×100 mm。将获得的二维图片导入 ORS visual SI 软件并对 UHPC 试样进行 3D 重构。由于 UHPC 内部不同组分的密度也不相同，它们呈现的灰度也不相同，因此可以进一步通过软件对 UHPC 内部相互搭接和未相互搭接的钢纤维进行量化分析[34]。

2 结果与讨论

2.1 钢纤维取向的评估与优化

图 2 和图 3 为优化浇筑和非优化浇筑 2 种方式下 UHPC 中不同截面位置、不同钢纤维掺量的横截面纤维平均面积，其中黑白图像均为钢纤维掺量为 2%时在不同截面处的截面图。当内部钢纤维均沿着模具即试样长度排列时，增韧效果最好，此时试样横截面上的平均纤维面积是最小的。对比图 2 和图 3 可以看出：采用优化浇筑成型时，在 A_2 截面位置的 S_{aver} 最小，这表示 A_2 截面位置的纤维取向最优，说明在 UHPC 流动过程中，钢纤维的 S_{aver} 有先减小后增加的趋势，这是归因于 UHPC 基体自身的流动

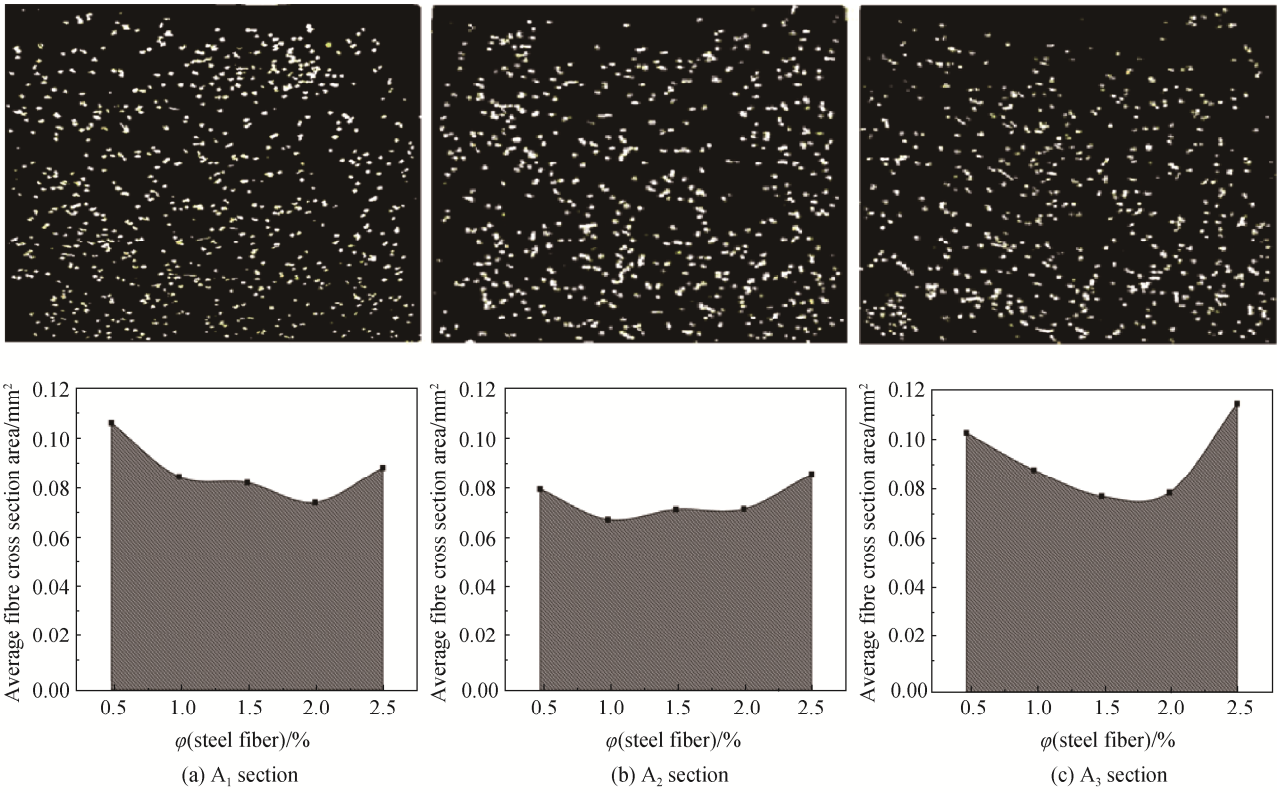


图 2 优化浇筑成型的 UHPC 中不同位置、不同纤维掺量的横截面纤维平均面积

Fig. 2 Average fibre cross section area of optimized cast UHPC sample at different locations and different fibre content

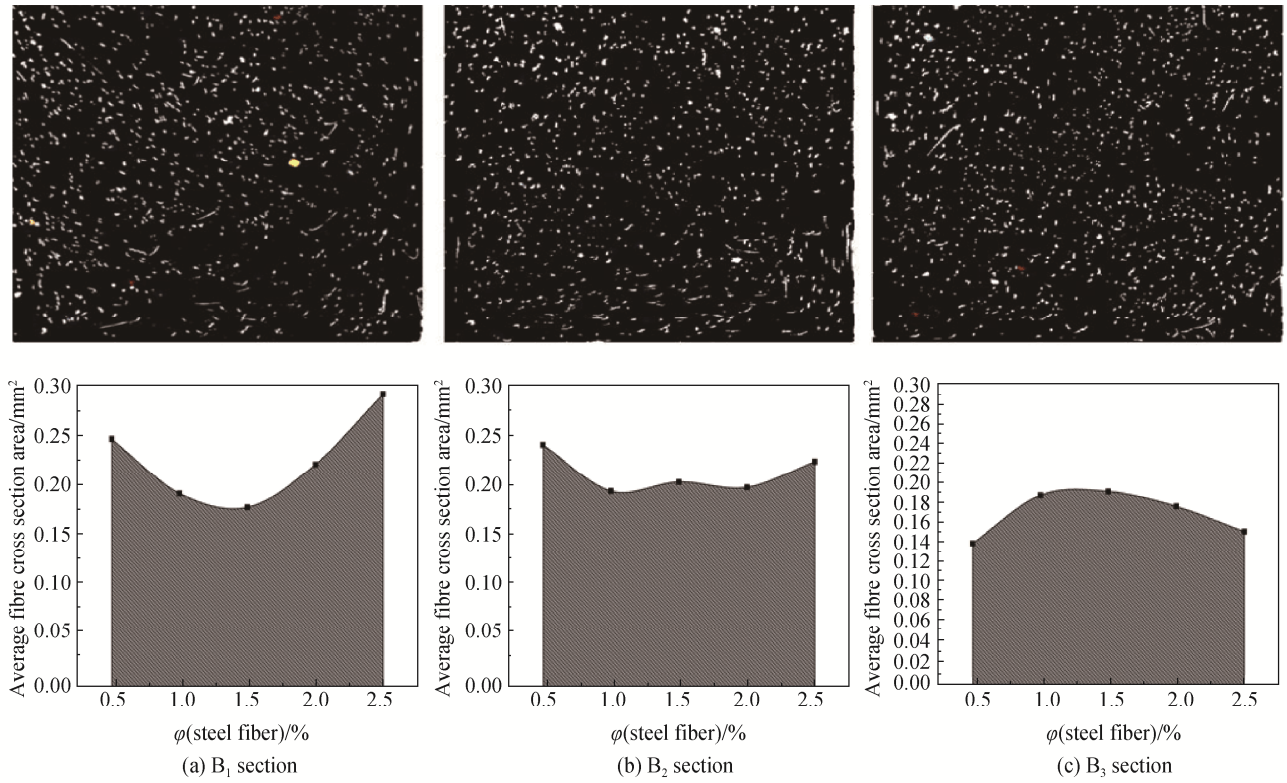


图 3　随机浇筑成型的 UHPC 中不同位置、不同纤维掺量的横截面纤维平均面积

Fig. 3　Average fibre cross section area of randomly cast UHPC sample at different locations and different fibre content

作用导致的。另外，对比所有钢纤维掺量在 A_2 截面处的 S_{aver} 发现：当钢纤维体积掺量为 1.0%时，试样的 S_{aver} 最小，这表明优化浇筑 UHPC 时，当钢纤维体积掺量为 1.0%时，在 A_2 截面处更趋向沿着模具即试样长度排列。然而，在随机浇筑成型中未观察到类似的现象，且不同截面位置处的 S_{aver} 是无规律的。另外，对比 2 种浇筑方式下 UHPC 试样在相同截面位置处的 S_{aver}，可以明显发现：优化浇筑成型的 S_{aver} 均小于随机浇筑成型的 S_{aver}，这表明采用优化浇筑成型的 UHPC 试样中的纤维取向排列更好，对 UHPC 基体的增韧效果更好。这进一步证实了可以通过改善浇筑方式影响 UHPC 自身的流动状态，以实现基体内部纤维取向的优化控制，并且这是一种非常有效的方式。

如图 4 所示，UHPC 内部钢纤维的取向主要归因于基体自身的流动。当浆体有足够的时间与空间流动时，钢纤维会随之不断的流动发生运动和旋转。当采用优化浇筑时，浆体在模具内有充分的流动过程，钢纤维随浆体流动的过程可分为混乱阶段、稳定阶段和再混乱阶段。首先，钢纤维浇筑后在重力的作用下其取向是混乱的；然后，钢纤维随着 UHPC 的流动而发生运动与旋转，直到大部分钢纤维的取向几乎与流动方向保持一致，此时处于一个稳定阶

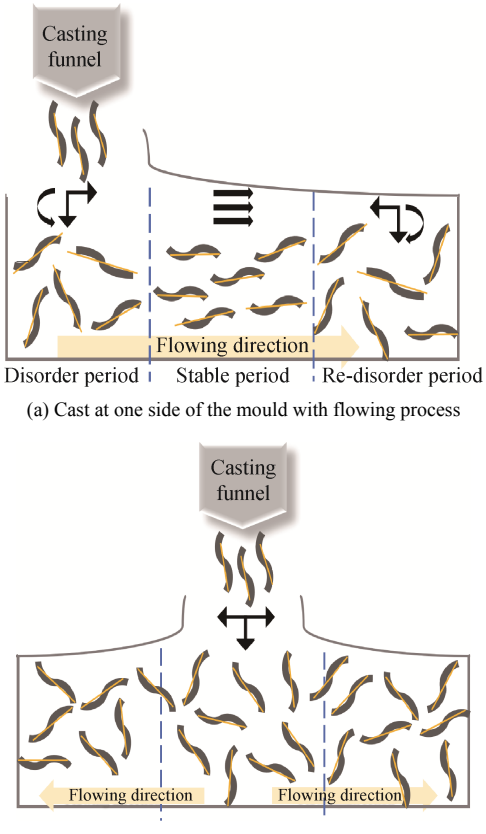


图 4　UHPC 浇筑方式对钢纤维分布的影响

Fig. 4　Influence of UHPC pouring method on steel fiber distribution

段；最后，随着 UHPC 流动距离的进一步增加，钢纤维会受到模具壁产生的“墙效应”，对浆体及钢纤维产生一个阻碍力，使已经与流动方向保持一致的钢纤维取向再次混乱，此时处于再混乱阶段。但 3 个阶段之间的交界区域划分并不明显，尚无法定量表征，其交界线区域对纤维取向性的影响仍待后期深入研究。

结合实验数据，UHPC 内钢纤维的取向可能还受钢纤维掺量的影响。如图 5 所示，当钢纤维掺量较小时，钢纤维在模具空间里有充分的运动和转动空间，因此所有钢纤维均具有较大的自由度，使其能很好的随着 UHPC 的流动发生取向优化。但当掺量较大时，钢纤维之间会相互影响，阻碍纤维旋转与运动，使最终的取向处于混乱状态。由此可见，钢纤维体积掺量也是影响纤维取向优化效率的关键因素。

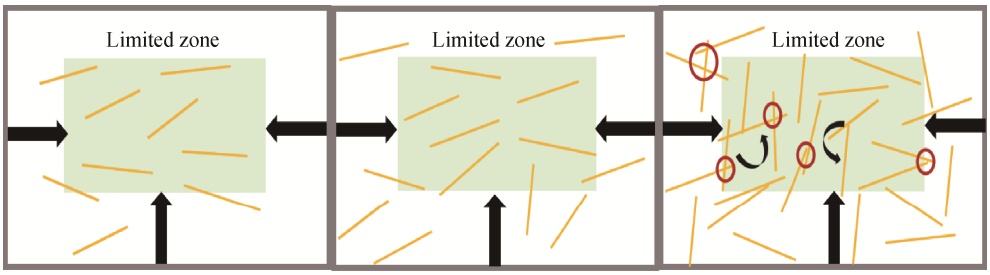
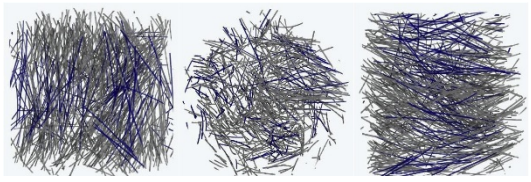


图 5 优化浇筑模式下 UHPC 内部纤维动态过程分析(钢纤维掺量的影响)

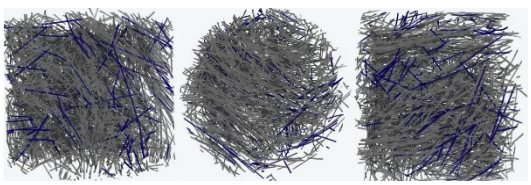
Fig. 5 Fibre dynamic process analysis of the UHPC based on optimized casting method (the effect of steel fibre content)

2.2 钢纤维 3D 空间结构的形成

为了探究不同体积掺量对形成钢纤维 3D 网络的影响，采用 X 射线 CT 对纤维搭接情况进行了量化统计分析，结果如图 6 和图 7 所示。可以看出，钢纤维内部相互搭接的钢纤维数量均大于没有相互搭接的，且随着钢纤维体积掺量的增大，相互搭接的钢纤维数量逐渐增大；未相互搭接的随之先增后减，掺量为 2%时未相互搭接的钢纤维体积最大。此外，钢纤维在 UHPC 中的搭接概率随着体积掺量的增大而增大。当钢纤维体积掺量小于 2%时，钢纤维的搭接概率增幅很小，增大幅度在 0.05%以内；当钢纤维体积掺量大于 2%时，钢纤维的搭接概率显著增大，增大幅度超过 1%。



(a) UHPC with 1% (volume fraction) steel fibres



(b) UHPC with 2.5% steel fibres

图 6 基于 X-CT 技术的 UHPC 钢纤维 3D 分布情况

Fig. 6 3D structures of designed UHPC rebuilt by X-CT technique

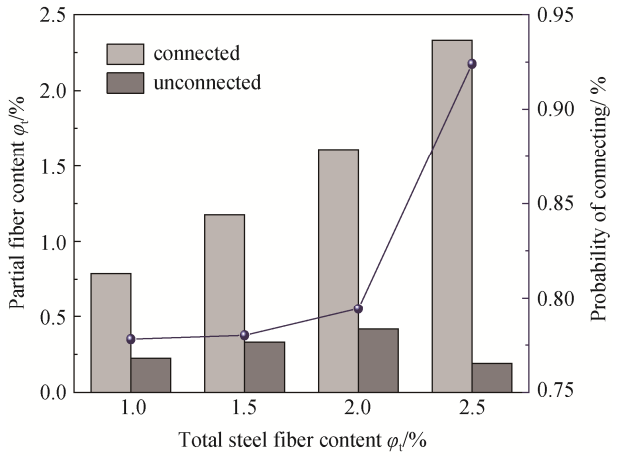


图 7 钢纤维掺量对 UHPC 内部钢纤维搭接的影响

Fig. 7 Effects of steel fibre content on the steel fibre connection of UHPC

经分析，钢纤维的搭接状态可能是由钢纤维体积掺量与其可运动空间之间的关系引起的。当钢纤维体积掺量小于 2%时，钢纤维可运动空间充足，钢纤维鲜明地分成相互搭接的部分与未相互搭接的部分，所以两部分的数量都随钢纤维体积掺量的增大而增大。但当钢纤维体积掺量大于 2%时，钢纤维可运动空间有限，相互搭接的钢纤维大幅增多，所以未相互搭接钢纤维反而减少。由此可见，2%的钢纤维是限制钢纤维大量相互搭接形成网络的关键掺量。

2.3 钢纤维对 UHPC 堆积的影响

图 8 为钢纤维掺量对 UHPC 湿堆积密实度的影响。由图 8 可知，UHPC 湿堆积密实度会随着钢纤

维掺入而下降，但变化规律较为复杂。具体地，未掺钢纤维的 UHPC 对照组的湿堆积密实度为 0.820 48，而掺入 0.5%~3.0%体积分数的钢纤维后，湿堆积密实度依次为 0.815 77，0.809 13，0.812 80，0.817 00，0.809 47，0.794 26，相比对照组分别下降了 0.57%，1.38%，0.94%，0.42%，1.34%，3.20%。可以注意到，随着钢纤维掺量的增加，UHPC 的湿堆积密实度呈现先减小后增大最后再减小的趋势，尤其是在钢纤维掺入超过 2%时湿堆积密实度显著降低，意味着此时钢纤维对 UHPC 的负面影响显著加剧。由此，为了提高钢纤维使用效率，保证 UHPC 密实的基体，钢纤维掺量不宜超过 2%。钢纤维对 UHPC 的复杂影响规律可以解释如下(图 9)：1) 通常情况下，钢纤维的加入会引入松动效应、壁效应、楔入效应以及网络搭接效应从而破坏 UHPC 堆积结构，导致湿堆积密实度的降低[27, 30, 35]；2) 另一方面，细微钢纤维亦具有一定的填充效应，可以填补骨料之间的空隙从而提高 UHPC 的堆积密实度[30, 36–37]；3) 总的来说，钢纤维对 UHPC 堆积密实度是呈现负面

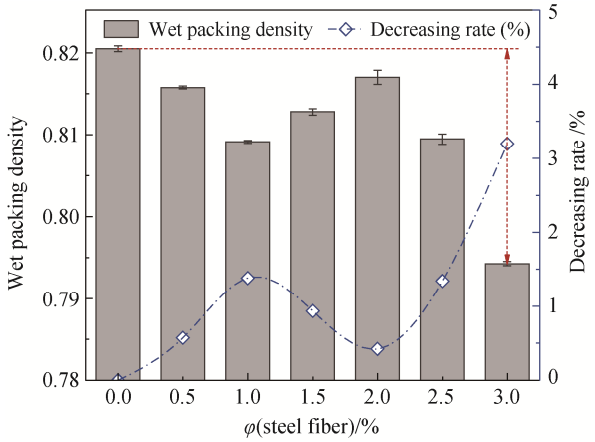


图 8　钢纤维掺量对 UHPC 湿堆积密实度的影响

Fig. 8　Effects of steel fibre content on the wet packing density of UHPC

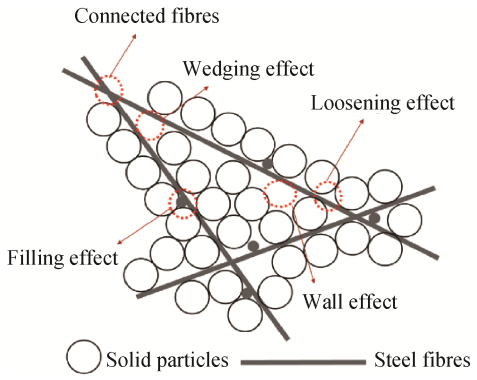


图 9　钢纤维对颗粒堆积的影响

Fig. 9　Effects of steel fibre content on the particle packing

效果，但掺量相对较低时，负面效果相对更小，然而当钢纤维掺量过大(>2%，体积分数)时，钢纤维 3D 网络的搭接效应显著增大，导致 UHPC 的颗粒堆积结构遭到更加显著的破坏，因此应当合理限制钢纤维掺量以提高钢纤维使用效率。

2.4　钢纤维对 UHPC 工作性能的影响

图 10 为不同体积掺量的钢纤维对 UHPC 工作性能的影响。由图 10 可以看出，当钢纤维的体积掺量增大时，UHPC 浆体的流动性逐渐下降，下降过程分为 3 个阶段：当钢纤维体积掺量从 0.5%增至 2%时，UHPC 浆体的流动性下降速率较小；当钢纤维体积掺量从 2%增至 2.5%时，UHPC 流动性下降速率显著增大；当钢纤维体积掺量从 2.5%增至 3%时，UHPC 流动性又大幅下降。

经过分析，UHPC 流动性随钢纤维体积掺量的增大而下降可能与 UHPC 内部形成的钢纤维网络有关，而流动性下降过程分为 3 个阶段是由钢纤维掺量和钢纤维可运动空间之间的关系引起的。随着钢纤维体积掺量的增加，钢纤维相互搭接形成网络，增大了浆体的流动阻力，从而降低了其流动性[38]。当钢纤维体积掺量小于 2%时，钢纤维可运动空间较大，且相互搭接的数量较少，钢纤维掺量增大并不会大幅提高浆体的流动阻力，故 UHPC 流动性降低速率缓慢。但当钢纤维体积掺量从 2%增至 2.5%时，钢纤维可运动空间减小，钢纤维可运动的空间低于其可自由运动的临界空间大小，且相互搭接形成网络的数量增多，显著降低了流动性。当体积掺量增至 3%时，因为钢纤维可运动的空间本来就较少，即使相互搭接形成网络的钢纤维进一步增加，流动性变化也不大。综上所述，2%的钢纤维是制备大流动性 UHPC 的关键掺量。

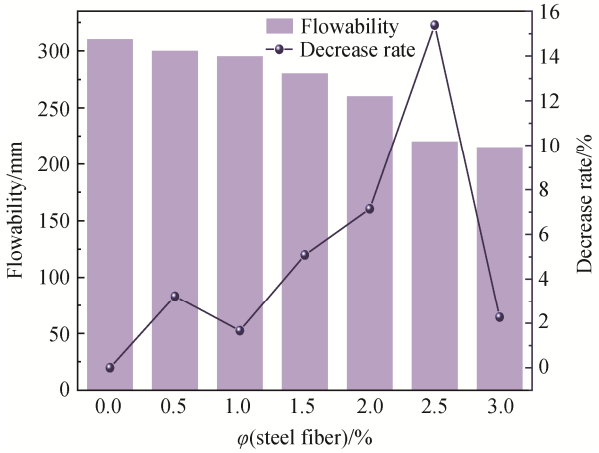


图 10　钢纤维掺量对 UHPC 工作性能的影响

Fig. 10　Effects of steel fibre content on the workability of UHPC

2.5 钢纤维对 UHPC 力学性能的影响

图 11 为不同体积掺量的钢纤维对 UHPC 抗压强度的影响。由图 11 可知，UHPC 的抗压强度随着钢纤维体积掺量的增大而增大，但当钢纤维的体积掺量超过 2%时，UHPC 的抗压强度增幅有限，钢纤维体积掺量为 2.5%和 3%的 UHPC 抗压强度提升率仅有不到 2%。图 12 为不同体积掺量的钢纤维对 UHPC 抗折强度的影响。由图 12 可知，随着钢纤维体积掺量的增大，UHPC 的抗折强度也增大，且掺量从 0.5%增至 1%时增幅最大，但是从 2%增至 2.5%及 2.5%增至 3%时增幅减小，降至 10%以下，可见钢纤维的体积掺量大于 2%后，其对 UHPC 韧性的提升效率下降。

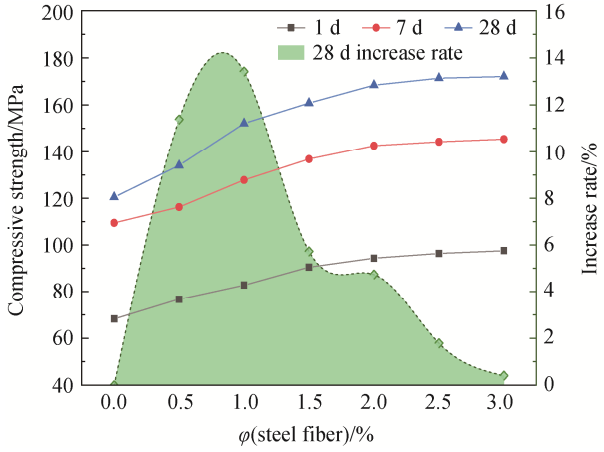


图 11 钢纤维掺量对 UHPC 抗压强度的影响

Fig. 11 Effects of steel fibre content on compressive strength of UHPC

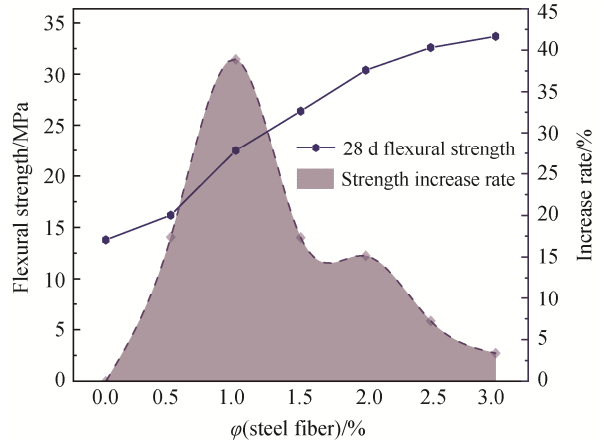


图 12 钢纤维掺量对 UHPC 抗折强度的影响

Fig. 12 Effects of steel fibre content on flexure strength of UHPC

以上现象可以解释为：当 UHPC 基体受力出现裂缝时，贯穿裂缝的钢纤维可以抑制裂缝扩展，提高了 UHPC 的力学性能[28, 39]，所以 UHPC 的抗压强度和抗折强度均随着钢纤维体积掺量的增大而增大。但是，钢纤维体积掺量超过 2%时，大量的钢纤维相互搭接形成纤维网络，显著降低了 UHPC 的流动性，引起密实度的降低，从而降低了钢纤维对力学性能的增强效果。高掺量的钢纤维相互搭接形成的纤维网络还会削弱钢纤维抑制裂缝扩展的能力，即纤维取向紊乱程度过大会引起 UHPC 力学性能增强效果变差。因此，从钢纤维对力学性能的增强效率和经济效益角度考虑，2%的钢纤维是制备具有优异力学性能的关键掺量。

3 结论

1) 采用模具单侧浇筑方式可优化 UHPC 钢纤维 3D 空间的取向分布；钢纤维的掺量对纤维取向以及纤维搭接状态具有一定影响，钢纤维掺量越高，纤维 3D 网络结构越趋向无序化。

2) 钢纤维 3D 网络结构对 UHPC 堆积密实度和工作性能主要呈现负面效果，但掺量相对较低时(小于 2%，体积分数)，负面影响不显著，因此应当合理限制钢纤维掺量，以提高钢纤维使用效率。

3) 钢纤维的掺入可显著提高 UHPC 的力学性能，但是当钢纤维体积掺量大于 2%时，由于钢纤维 3D 网络结构的紊乱性其对力学性能的提升效率降低。

4) 钢纤维的掺入及其形成的 3D 空间网络结构对 UHPC 的性能影响具有双面性，因此应当合理设计 UHPC 钢纤维的掺量，以提高 UHPC 的整体性能与钢纤维的使用效率。

参考文献:

[1] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 10–20.
CHEN Baochun, WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. J Archit Civ Eng (in Chinese), 2019, 36(2): 10–20.

[2] 黄政宇, 阳东翱. 超高性能混凝土基体的组成与微结构关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4104–4111.
HUANG Zhengyu, YANG Dongao. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(12): 4104–4111.

[3] 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.

[4] 韩方玉, 刘建忠, 刘加平, 等. 超高性能混凝土钢桥面铺装层收缩约束应力分析[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1700–1705.
HAN Fangyu, LIU Jianzhong, LIU Jiaping, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1700–1705.

[5] 朱平, 池颜海, 易笃韬, 等. 混杂钢纤维对钢纤维–超高性能混凝土界面黏结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1669–1681.

ZHU Ping, CHI Yanhai, YI Dutao, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1669–1681.

[6] 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(11): 1740–1746.
SU Jie, SHI Caijun, QIN Hongjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1740–1746.

[7] 冯滔滔, 蒋金洋, 刘志勇, 等. 机制砂超高性能混凝土的冲击压缩力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1177–1187.
FENG Taotao, JIANG Jinyang, LIU Zhiyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1177–1187.

[8] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741–751.

[9] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.

[10] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res, 1994, 24(6): 997–1009.

[11] FAN Dingqiang, YU Rui, SHUI Zhonghe, et al. A novel approach for developing a green Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with advanced particles packing meso-structure[J]. Constr Build Mater, 2020, 265: 120339.

[12] 赵筠, 路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(三)[J]. 混凝土世界, 2019(12): 42–51.
ZHAO Jun, LU Xinying. Build Decor Mater World (in Chinese), 2019(12): 42–51.

[13] BROUWERS H J H, RADIX H J. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(11): 2116–2136.

[14] SNEHAL K, DAS B B. Application of Andreassen and Modified Andreassen Model on Cementitious Mixture Design: A Review[M]. Cement Concrete Comp: Recent Develop Sustain Infrastr, 2021: 729–750.

[15] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Cem Concr Res, 2014, 56: 29–39.

[16] 余睿. 解密 UHPC 材料的优化设计方法及未来发展方向[J]. 混凝土世界, 2020(8): 30–37.
YU Rui. Build Decor Mater World (in Chinese), 2020(8): 30–37.

[17] FAN D Q, YU R, SHUI Z H, et al. A new design approach of steel fibre reinforced ultra-high performance concrete composites: Experiments and modeling[J]. Cem Concr Compos, 2020, 110: 103597.

[18] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flexural behavior of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading[J]. Constr Build Mater, 2016, 126: 253–262.

[19] MARTINE L, ROUSSEL N. Simple tools for fibre orientation prediction in industrial practice[J]. Cem Concr Res, 2011, 41: 993–1000.

[20] EIK M, PUTTONEN, HERRMANN H. An orthotropic material model for steel fibre reinforced concrete based on the orientation distribution of fibres[J]. Compos Struct, 2015, 121: 324–336.

[21] HUANG H, GAO X, LI L, et al. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 188: 709–721.

[22] HUANG H, SU A, GAO X, et al. Influence of formwork wall effect on fiber orientation of UHPC with two casting methods[J]. Constr Build Mater, 2019, 215: 310–320.

[23] 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.

[24] HUANG H, GAO X, LI Y, et al. SPH simulation and experimental investigation of fiber orientation in UHPC beams with different placements[J]. Constr Build Mater, 2020, 233: 117372.

[25] 安明喆, 宋子辉, 李宇, 等. 不同钢纤维含量 RPC 材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 34–38.
AN Mingzhe, SONG Zihui, LI Yu, et al. China Rail Sci (in Chinese), 2009, 30(5): 34–38.

[26] ZHENG W, LI H, WANG Y. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperature[J]. Constr Build Mater, 2012, 35(10): 931–940.

[27] DE LARRARD F. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach[M]. CRC Press, 1999.

[28] WU Z, SHI C, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 103: 8–14.

[29] MENG W, KHAYAT K H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC[J]. J Mater Civ Eng, 2018, 30(4): 04018030.

[30] LI L G, ZHUO H X, ZHU J, et al. Packing density of mortar containing polypropylene, carbon or basalt fibres under dry and wet conditions[J]. Powder Technol, 2019, 342: 433–440.

[31] WONG H H C, KWAN A K H. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method[J]. Mater Struct, 2008, 41(4): 689–701.

[32] GB/T 2419–2005. 水泥胶砂流动度测定方法[S].
GB/T 2419–2005. Test method for fluidity of cement mortar[S].

[33] GB/T 17671–2020. 水泥胶砂强度检验方法[S].
GB/T 17671–2020. Method of testing cements-Determination of strength[S].

[34] WANG R, GAO X J., ZHANG J Y, et al. Spatial distribution of steel fibers and air bubbles in UHPC cylinder determined by X-ray CT method[J], Constr Build Mater, 2018, 160: 39–47.

[35] WONG V, KWAN A K H. A 3-parameter model for packing density prediction of ternary mixes of spherical particles [J]. Powder Technol, 2014, 268: 357–367.

[36] CHU S H, JIANG Y, KWAN A K H. Effect of rigid fibres on aggregate packing[J]. Constr Build Mater, 2019, 224: 326–335.

[37] RAMEZANIANPOUR A A, ESMAEILI M, GHAHARI S A, et al. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers[J]. Constr Build Mater, 2013, 44: 411–418.

[38] 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.

[39] YOO D Y, KANG S T, LEE J H, et al. Effect of shrinkage reducing admixture on tensile and flexural behaviors of UHPFRC considering fiber distribution characteristics[J]. Cem Concr Res, 2013, 54: 180–190.