

# 基于混凝土切割面统计方法的纤维取向分布研究

邓永刚, 杨元品

(沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159)

**摘要:** 纤维分布和取向是影响纤维增强混凝土力学性能的重要因素。本文采用混凝土切割面统计方法研究不同水胶比和振捣时间对钢纤维混凝土中纤维分布及取向的影响。结果表明:随着水胶比和振捣时间的增加,边壁效应对纤维分布影响减弱;高水胶比条件下纤维在垂直于振捣方向上出现了偏析现象(垂直方向上的不均匀分布),随振捣时间增加,偏析更显著;对于高性能混凝土,增加振捣时间有利于纤维的均匀分布,而普通混凝土应缩短振捣时间。此外,统计结果表明,钢纤维取向角分布呈现高斯分布规律,峰值处于 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。当水胶比为0.45,振捣时间为20 s,纤维取向角在 $45^{\circ}$ 附近,纤维数量占比最大,纤维取向系数达到0.73。

**关键词:** 钢纤维;切割面统计;取向;水胶比;振捣时间

中图分类号: TU528 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.02.011

## Study on the Distribution and Orientation of Fibres Based on Statistics Method of Concrete Cutting Section

DENG Yonggang, YANG Yuanpin

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** The distribution and orientation of fibres exert important effect on the properties of fibre-reinforced concrete (FRC). In this study, the effect of water/binder ratio and vibration time on the distribution and orientation of fibres in concrete were investigated by statistical method. The results showed that with increase in water/binder ratio and vibration time, the effect of boundary on the distribution of fibres decreased and an obvious segregation of fibres (uneven gradient distribution) appeared in the vertical direction of vibration. Furthermore, as the vibration time increased, the fibres was evenly distributed, the impact was more pronounced for the low water/binder ratio. In order to improve the dispersibility of fibers, it is better to increase vibration time for high performance concrete and reduce the time for ordinary concrete. In addition, the statistical analysis indicated that the orientation of fibers on cutting section took on a Gauss distribution, the peak point of the curve was at about  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ . When the vibration time was 20 s, the water/binder ratio was 0.45, the fiber dispersion coefficient reached the maximum of 0.73.

**Key words:** steel fibres; statistical for cutting surfaces; orientation; water/binder ratio; vibration time

混凝土的破坏大多表现为拉伸能力不足,在水泥基材料中使用纤维作为增强相可以显著改善

基体的脆性<sup>[1]</sup>。纤维分散程度是影响纤维对基体物理力学性能提高的一个主要因素,包括纤维在基体内的位置和排列方式,非均匀分散的纤维使得纤维的“桥接”作用不能充分发挥,甚至使基体产生较多缺陷,从而使基体性能降低<sup>[2-4]</sup>。目前,对于纤维在混凝土基体内分布及取向的研究相对较少,文献[5-6]提出了一种考虑模板约束的纤维取向理论计算方法。慕儒等<sup>[7]</sup>通过电磁作用使纤维在基体内部具有单一取向,并对其抗拉性能进行研究,发现与随机取向的纤维混凝土相比,定向纤维混凝土沿着纤维取向方向的抗拉强度更高。Hung等<sup>[8]</sup>基于 Jeffery 模型从理论上预测了纤维在混凝土基体流动过程中的取向分布。Ponikiewski等<sup>[9]</sup>通过将纤维混凝土流体流入矩形通道,研究了流体黏度对纤维取向的影响。Torrijos等<sup>[10]</sup>通过切面统计纤维数量的方法研究了浇筑方式对短梁中钢纤维分布形态的影响。Gettu等<sup>[11]</sup>研究了不同的振捣方式对钢纤维混凝土圆柱体与棱柱体试件内纤维分布的影响。

随着科技的发展,纤维分布及取向的研究技术越来越多,图像分析<sup>[12-14]</sup>技术被广泛使用于纤维表面特征提取,但现有技术可能具有破坏性且耗时较长。随着电子测量技术在建筑材料中的应用,对于监测复合材料中的应变、损伤、复合材料尺寸及变形更加精确。Chung<sup>[15-16]</sup>研究了纤维增强混凝土的直流电性能,通过电阻变化研究基体内部微观结构变化,复合材料在静态或动态载荷下的纤维拔出、纤维重新排列及纤维间距变化。Vicente等<sup>[17]</sup>利用计算机断层扫描(CT)技术研究了纤维取向和含量对钢纤维混凝土(SFRC)在静态和循环压缩荷载下性能的影响,并观察了纤维的阻力机制。

本文通过对混凝土试件切割断面纤维统计分析,研究振捣作用及水胶比对钢纤维混凝土中纤维分布及取向的影响,为钢纤维混凝土的制备提供理论指导。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料及混凝土配合比

为研究不同振捣时间对各水胶比混凝土中纤维分布及取向的影响,振捣时间取为 10、20 和 30 s(额定功率 1 200 W,额定频率 50 Hz),混凝土水胶比选用 0.25(高性能混凝土)和 0.45(普通混凝土)。样品尺寸为 100 × 100 × 400 mm 的长

方体试样。胶凝材料采用普通硅酸盐水泥、硅灰和 I 级粉煤灰;纤维为直线型钢纤维,体积掺入量为 0.5%,其特征参数如表 1 所示。混凝土配合比如表 2 所示。

表 1 纤维参数

Table 1 Fibre parameters

直径/mm	长度/mm	抗拉强度/MPa
0.80	30	1 162

表 2 混凝土配合比设计

Table 2 Mix design of concrete matrix kg/m<sup>3</sup>

水	水泥	砂	石	硅灰	粉煤灰	减水剂
150/270	450	595	1 105	60	90	12

### 1.2 纤维分布表征

本试验采用数码显微镜(ST1000w,苏州德欣顺商贸有限公司)进行图像采集,采用 Hiview 软件对图像进行尺寸矫正及钢纤维数量、钢纤维长轴长度等数据获取,用以量化试件断面分布。混凝土切割面纤维统计过程如图 1 所示。

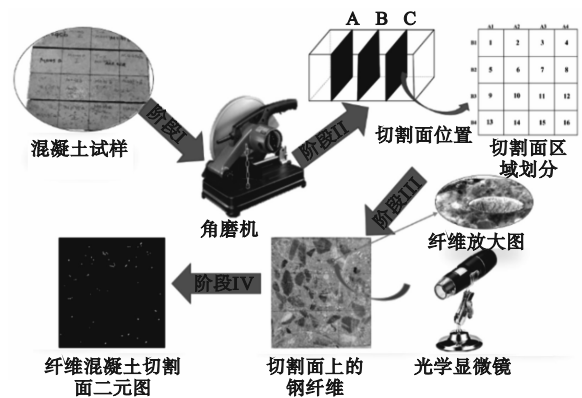


图 1 混凝土切割面纤维统计过程示意图

Fig. 1 Flowchart of the analysis

纤维切割面密度( $d_n$ )是用来定性研究纤维表面分散程度的分布特征之一,其计算式为

$$d_n = \frac{n_f \times A_s}{A_c} \quad (1)$$

式中: $n_f$ 为切割面上纤维的总根数; $A_s$ 为纤维截面面积; $A_c$ 为切割面的面积。各体积掺量下的纤维切割面密度值取每组试件的平均值。

纤维分散系数( $g_d$ )是用来定量表征纤维分散程度的分布特征之一,其计算式为

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

式中: $n$ 为图像上的纤维总数; $x_i$ 为第  $i$  单位中纤

维的数量。通过上式可知,所有纤维的分散系数  $g_d$  的取值范围在 0 和 1 之间,其中 1 表示纤维均匀分散,0 表示纤维在混合物中非均匀分散。

### 1.3 纤维取向表征

纤维取向因子( $g_h$ )代表纤维的取向分布,是纤维分布特征之一,其计算式为

$$g_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{b}{a} \quad (3)$$

式中: $a$  为纤维椭圆切面的长轴长; $b$  为纤维椭圆切面的短轴长,其值等于纤维的直径。通过上式可以得到所有纤维的取向因子, $g_h$  的范围在 0 和 1 之间,1 代表纤维的取向垂直于切割面,0 代表纤维取向平行于切割面。

由于钢纤维的刚度较大,在搅拌及浇筑过程,大多数纤维保持平直状态,因此切割面上的纤维呈现圆形或椭圆形。根据文献[18-19]的观点,试样沿垂直于拉力方向切割时,切割面上纤维的椭圆形状与拉力方向的夹角有关(见图 2),单根纤维取向系数计算式为

$$\eta = \frac{l_{proj}}{l} = \cos \theta = \frac{b}{a} \quad (4)$$

式中: $l$  为钢纤维的长度; $l_{proj}$  为钢纤维在垂直于切割面方向上的投影长度; $\eta$  为单根纤维取向因子; $\theta$  为纤维取向角。

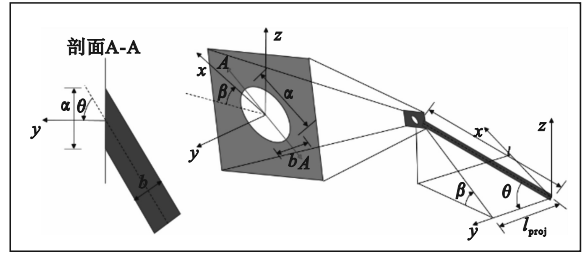


图 2 切割面上纤维的参数定义

Fig. 2 Parameter definition of fibres on the cutting surface

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同水胶比及振捣时间对纤维分布的影响

图 3 为混凝土切割面纤维分布统计结果,由图 3(a)~3(c)可知,当水胶比为 0.25,振捣时间为 10 s 时,由于边壁效应的影响,纤维在紧靠模具区域出现了聚集,纤维占比达到 68.3%,这主要是由于水胶比较小,纤维在基体内运动较为困难。随着振捣时间增加,边壁效应降低,20 s 时边壁纤维占比 56.3%,30 s 时为 45%。由图 3(d)~3(f)可知,当水胶比为 0.45 时,没有出现边壁效应,但是在垂直方向出现了纤维分布不均匀现象,且随着振捣时间的增加,不均匀现象明显(最下层纤维由 31.2% 增加到 39.7%)。

2	2	4	5	16.5%	3	2	6	6	23.9%	0	4	5	3	16.9%
7	7	2	16	40.5%	6	2	3	3	26.8%	4	6	6	6	31%
10	3	3	5	26.6%	6	7	0	4	23.9%	4	5	4	6	26.8%
3	4	0	6	16.4%	7	8	3	5	32.5%	5	5	4	4	25.3%
27.8%	20.3%	11.4%	40.5%	31.0%	26.8%	16.9%	25.3%	18.2%	28.2%	26.8%	26.8%			
(a) 水胶比 0.25, 振捣时间 10 s				(b) 水胶比 0.25, 振捣时间 20 s				(c) 水胶比 0.25, 振捣时间 30 s						
2	3	4	2	17.2%	3	4	0	0	10.6%	2	2	1	5	15.9%
3	5	4	2	21.9%	2	4	7	5	27.3%	2	3	3	3	17.4%
3	4	8	4	29.7%	3	4	5	8	30.3%	3	4	4	6	27%
3	6	5	6	31.2%	5	5	8	3	31.8%	5	5	10	5	39.7%
17.2%	28.1%	32.8%	21.9%	19.7%	25.8%	30.3%	24.2%	19.0%	22.2%	28.6%	30.2%			
(d) 水胶比 0.45, 振捣时间 10 s				(e) 水胶比 0.45, 振捣时间 20 s				(f) 水胶比 0.45, 振捣时间 30 s						

图 3 切割面纤维统计结果

Fig. 3 Statistical results of fibres on the cutting surface

纤维在浆体中的运动可分为加速和匀速阶

段,纤维在浆体中的位移  $y$  可由下式得出。

$$y = \int_0^t \frac{(\rho_1 - \rho)R^2 g}{2h(\ln\psi + \ln 2 - 0.5)\cos\varphi} [1 - e^{\frac{2h(\ln\psi + \ln 2 - 0.5)\cos\varphi}{\rho_1 R^2}}] \cdot dt + \frac{(\rho_1 - \rho)R^2 g}{2h(\ln\psi + \ln 2 - 0.5)\cos\varphi} (t_2 - t_1) \quad (5)$$

式中:  $t_1$  为加速运动时间;  $t_2$  为振捣时间;  $\rho_1$  和  $\rho$  分别为钢纤维和浆体的密度;  $\psi$  和  $R$  均为纤维的特征参数;  $h$  为浆体的黏度;  $\varphi$  为纤维与水平方向的夹角。由式(5)可知,随水胶比和振捣时间的增加,位移  $y$  增大,导致纤维在垂直方向的不均匀分布现象(偏析)。

为进一步分析振捣作用对纤维在切割面的分布影响,采用切割面密度( $d_n$ )及纤维分散系数( $g_d$ )表征纤维分散程度,统计分析结果如表3所示。

为0.45、振捣时间为10 s时,钢纤维分散系数最大值为0.816。GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中提出最宜振捣时间为20 s,从钢纤维切割面密度和纤维分散系数分析可知,对于高性能混凝土应增大振捣时间,而对于普通混凝土需要缩短振捣时间。

## 2.2 不同水胶比及振捣时间对纤维取向的影响

为研究振捣作用对纤维取向的影响,本试验通过测量切割面纤维长轴尺寸,得到纤维与切割面夹角。纤维取向参数如表4所示。

表3 不同振捣时间及水胶比下纤维混凝土钢纤维分布参数

Table 3 Parameters of steel fibre distribution in fibre concrete with different pounding times and water-cement ratios

样品		$d_n$	极差	$g_d$	极差
水胶比	振捣时间/s				
0.25	10	0.003 97		0.713	
	20	0.003 57	0.000 4	0.792	0.143
	30	0.003 57		0.856	
0.45	10	0.003 22		0.816	
	20	0.003 32	0.000 15	0.761	0.055
	30	0.003 17		0.767	

表4 振捣时间和水胶比对混凝土纤维取向的影响

Table 4 Impact of pounding time and water-cement ratios on fibre orientation parameters

水胶比	时间/s		
	10	20	30
0.25	0.68	0.66	0.64
0.45	0.61	0.73	0.71

由表3可知,当水胶比为0.25时,切割面纤维密度  $d_n$  明显高于水胶比为0.45的样品。振捣时间对  $d_n$  影响不大,尤其在低水胶比条件下,极差仅为0.000 15。当水胶比为0.25、振捣时间为30 s时钢纤维分散系数最大值为0.856;当水胶比

由表4可知:当水胶比为0.25时,随着振捣时间的增加,纤维取向因子逐渐减小;当水胶比为0.45时,随着振捣时间的增加,纤维取向因子先增大后减小。

不同水胶比及振捣时间下混凝土切割面纤维取向角散点分布如图4所示,切割面纤维取向数值统计结果如图5所示。

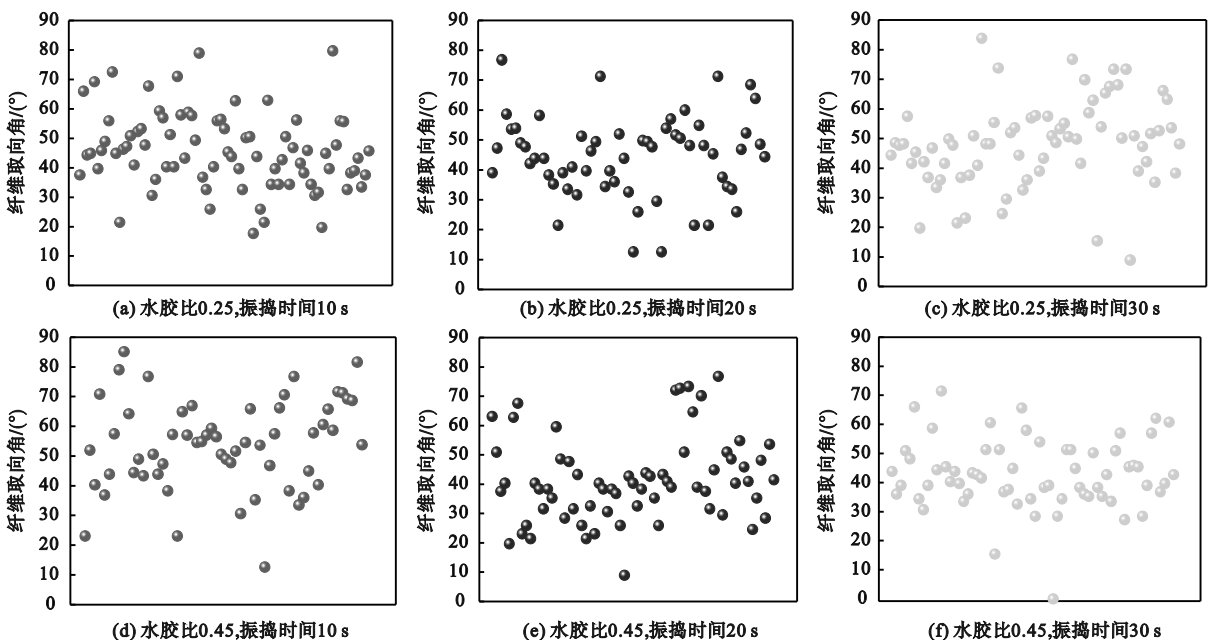


图4 不同水胶比及振捣时间下混凝土切割面纤维取向角散点图

Fig. 4 Scatter plot of fibre orientation for the cutting surface with different water-cement ratios and pounding times

由图4(e)可知:当水胶比为0.45、振捣时间为20 s时,纤维取向因子达到最大值0.73;由图4(a)~4(c)可知,当水胶比为0.25时,振捣时间对纤维取向影响变化范围为 $47.12^\circ \sim 49.77^\circ$ ,相差5.62%;由图4(d)~4(f)可知,当水胶比为0.45时,振捣时间对纤维取向影响范围为 $43.43^\circ \sim 52.11^\circ$ ,相差19.99%。当水胶比较小时,由于基体内部浆体含量较少,振捣作用不能充分使纤维在基体内移动、旋转,因此纤维取向相差

较小。当水胶比较大时,基体内部浆体含量较多,随着振捣作用持续,浆体上浮导致部分纤维产生上浮,粗骨料下沉导致部分纤维产生下沉,直到平衡。

当振捣时间为10 s时,随着水胶比增加,钢纤维取向角离散程度增加;当振捣时间为20 s和30 s时,各水胶比纤维取向角集中。这是由于振捣时间短,混凝土内部各成分未达到平衡,随着振捣时间增加,基体内部各成分逐渐平衡,纤维取向角离散程度逐渐降低。

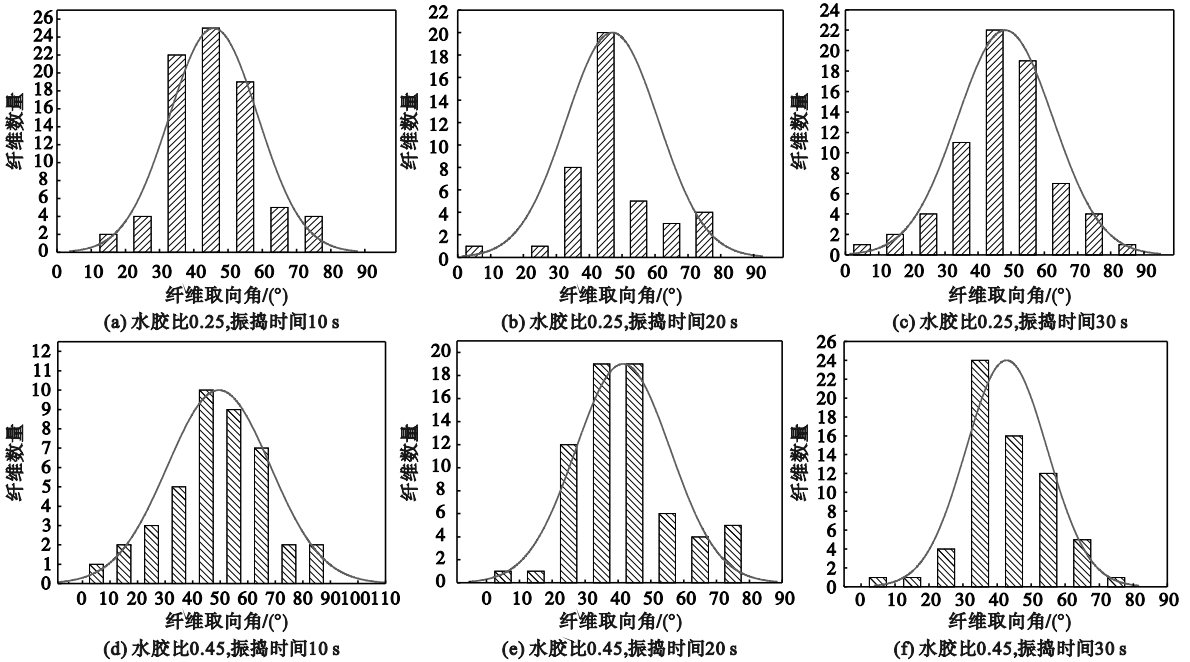


图5 不同水胶比及振捣时间下纤维取向统计结果

Fig.5 Statistical results of fibre orientation under different water-cement ratio and poundinging time

由图5可见,钢纤维取向角数值统计结果呈高斯分布。当振捣时间为10 s时,随着水胶比增加,高斯分布峰值在 $50^\circ$ 附近占比最大;当振捣时间为20 s和30 s时高斯分布峰值在 $45^\circ$ 附近占比最大。单纤维拉伸试验研究表明<sup>[20]</sup>,当纤维与截面法向呈 $45^\circ$ 角时,纤维与基体界面粘结强度和界面能达到最大值,从而充分发挥纤维桥接作用,显著改善混凝土的拉伸性能。

### 2.3 不同水胶比及振捣时间对混凝土力学性能的影响

为研究不同振捣时间对钢纤维混凝土力学性能的影响,本试验通过三种振动时间(10、20、30 s)研究钢纤维混凝土的力学性能。按照现行标准 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》规定,通过液压伺服压力试验机对钢纤维混凝土抗压、抗折强度进行测试,28 d 力学性

能测试结果如图6所示。

由图6可知,当水胶比为0.25时,钢纤维混凝土抗压、抗折强度随振捣时间的延长而增大,涨幅分别约为7.7%和10.5%。此时由于水胶比较小,混凝土和易性较差纤维在基体内运动较为困难,但是随着振捣时间增加,纤维在各区域内逐渐分布均匀,钢纤维混凝土内部密实,力学性能有所提升。当水胶比为0.45时,钢纤维混凝土抗压、抗折强度随振捣时间的延长而减小,降幅分别约为11.7%和16.4%。此时钢纤维运动幅度随着水胶比的增加而增加,混凝土内部粗骨料下沉,浆体上浮带动内部钢纤维运动,钢纤维在各区域逐渐分布均匀,但是随着振捣时间的延长,持续的振捣导致粗骨料下沉,浆体上浮带动钢纤维运动,导致钢纤维产生明显非均匀分布,力学性能下降。

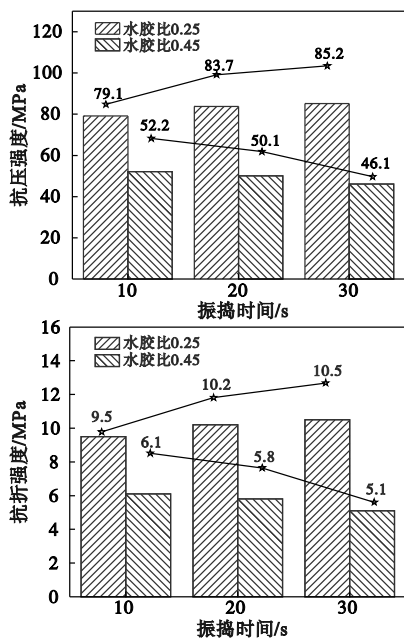


图6 不同水胶比及振动时间下纤维混凝土 28 d 抗压、抗折强度

Fig. 6 Compressive and flexural strength of fibre reinforced concrete with different water-cement ratios and pounding time at curing age of 28 d

### 3 结论

本文采用混凝土切割面统计方法研究不同水胶比和振捣时间对钢纤维混凝土中纤维分布及取向的影响,得到如下结论。

1) 在低水胶比和较短的振捣时间下,纤维受边壁效应影响明显,纤维在垂直于振捣方向上出现了偏析现象,且随着振捣时间的增加,偏析现象显著。

2) 在低水胶比条件下,延长振捣时间有利于纤维的均匀分布,而高水胶比条件下缩短振捣时间有利于纤维的分布。

3) 所有条件下钢纤维取向角分布呈现高斯分布规律,峰值处于  $40^\circ \sim 50^\circ$ 。

4) 延长振捣时间能提高低水胶比条件下钢纤维混凝土的力学性能,但是会降低高水胶比条件下钢纤维混凝土的力学性能。

#### 参考文献 (References):

[1] GONG J H, MA Y W, FU J Y, et al. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete; A review [J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 241: 109995.  
 [2] LATIFI M. Engineered polymeric fibrous materials [M]. Duxford; Woodhead Publishing, 2021.  
 [3] MOBASHER B, STANG H, SHAH S P. Microcracking in fi-

ber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(5): 665 - 676.

[4] YOO D Y, KIM S, KIM J J, et al. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers [J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 46 - 61.  
 [5] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 391 - 398.  
 [6] 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]. Cement and Concrete Composites, 2017, 77: 29 - 48.  
 [7] 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 R, QIU X, ZHAO Q M, et al. Aligned steel fibre reinforced cement based composites (I): orientation control of steel fibres [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 208 - 213. (in Chinese)  
 [8] HUNG C F, SHEN Y K. Numerical simulation of fiber orientation in injection mold filling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1995, 22(6): 791 - 802.  
 [9] PONIKIEWSKI T, GOŁASZEWSKI J, RUDZKI M, et al. Determination of steel fibres distribution in self-compacting concrete beams using X-ray computed tomography [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(2): 558 - 568.  
 [10] TORRIJOS M C, BARRAGÁN B E, ZERBINO R L. Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 1078 - 1085.  
 [11] GETTU R, GARDNER D R, SALDÍVAR H, et al. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens [J]. Materials and Structures, 2005, 38(1): 31 - 37.  
 [12] AKKAYA Y, PICKA J, SHAH S P. Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(3): 272 - 279.  
 [13] CHERMANT J L, CHERMANT L, COSTER M, et al. Some fields of applications of automatic image analysis in civil engineering [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(2/3): 157 - 169.  
 [14] LAWLER J S, WILHELM T, ZAMPINI D, et al. Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar [J]. Materials and Structures, 2003, 36(3): 197 - 208.  
 [15] CHUNG D D L. Composite materials for electronic functions [M]. Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications, 2000.  
 [16] CHUNG D D L. Applied materials science: applications of engineering materials in structural, electronics, thermal, and other industries [M]. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2001.  
 [17] VICENTE M A, RUIZ G, GONZÁLEZ D C, et al. Effects of fiber orientation and content on the static and fatigue behavior of SFRC by using CT-Scan technology [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 128: 105178.  
 [18] LEE Y, LEE S, YOUN J, et al. Characterization of fiber orientation in short fiber reinforced composites with an image processing technique [J]. Materials Research Innovations, 2002, 6(2): 65 - 72.  
 [19] ZAK G, PARK C B, BENHABIB B. Estimation of three-dimensional fibre-orientation distribution in short-fibre composites by a two-section method [J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(4): 316 - 339.  
 [20] YOO D Y, KIM S, KIM J J, et al. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers [J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 46 - 61.