

不同输送方式对超高性能混凝土力学性能影响

方 志¹, 蒋宜洋¹, 单 韧¹, 姜友生², 阳先全³

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖北省交通运输厅, 武汉 430030;

3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430052)

摘 要:为明确不同输送和浇筑方式对超高性能混凝土(UHPC)力学性能的影响,以输送方式(未经输送直接浇筑、螺杆泵输送、活塞泵输送)、浇筑方向(无特定方向、平行浇筑、垂直浇筑)和钢纤维掺量(0%、1%、2%)为试验参数,对 UHPC 的力学性能进行了试验研究,并采用图像处理定量分析了不同输送和浇筑方式对 UHPC 内部纤维取向的影响。结果表明:螺杆泵输送可显著提高 UHPC 中钢纤维的定向程度。与未经泵送直接浇筑的 UHPC 试件相比,纤维掺量分别为 1%和 2%的螺杆泵送浇筑的 UHPC 试件,其内钢纤维取向系数分别增大了 33.7%和 38.2%,弯曲极限强度提高了 15.0%和 31.9%。活塞泵送浇筑的试件,其力学性能和纤维分布特性均与直接浇筑试件相近。依据试验结果给出了不同输送方式和浇筑方向下 UHPC 中钢纤维取向系数的建议取值,进而预测了不同输送方式和浇筑方向 UHPC 的抗弯强度,预测结果和实测结果吻合良好。

关键词:超高性能混凝土;螺杆泵输送;活塞泵输送;弯曲强度;纤维取向

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3282-13

网络出版时间: 2025-09-24



超高性能混凝土(UHPC)是基于最大密实度和纤维增强理论配制的一种新型水泥基复合材料,具有超高的力学性能和耐久性能,在土木工程中具有广泛的应用前景。此外, UHPC 所具有的良好工作性能及可设计性能,使其特别适用于既有混凝土结构的薄层加固和 3D 打印结构的建筑材料^[1-3]。

混凝土泵送技术施工效率高、连续性好、应用场景区灵活,已成为土木工程领域最常用的施工方式之一,螺杆泵与活塞泵是工程中常用的两种泵送设备。

螺杆泵依靠定子和转子之间的过盈配合推动拌合物沿螺旋路径前行而实现拌合物的输送,其泵送过程连续无脉冲,适用于具有较高黏度拌合物的连续输送^[4]。

活塞泵通过液压驱动活塞交替进行前后往复运动来完成拌合物的吸料与送料过程,其泵送效率高、流量大,且泵送过程为断续的脉冲输送^[5]。

对于免模板成型的挤喷式 UHPC 钢筋网薄层加固和 3D 打印 UHPC 结构施工,需要更高黏度的 UHPC 且能连续均匀出料,以增强挤喷式 UHPC 薄层加固仰面和侧面施工时 UHPC 拌合物的抗坠落性

能或 3D 打印 UHPC 结构的自稳定性能,此时螺杆泵更为适用。

混凝土泵送过程中所遭受的强剪切、高压、高温升等多种作用耦合^[6-7],会使其硬化后力学性能受到影响。已有学者对普通混凝土经不同泵送设备输送后的性能变化开展了相应研究。罗碧丹等^[4]对普通混凝土(NC)和高性能混凝土(HPC)经活塞泵输送前后物理、力学性能的变化进行了试验研究,结果表明:泵送后 NC 的早期抗压强度降低 6%, HPC 的早期抗压强度提高 15.1%,弹性模量基本不变; Li 等^[6]对自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)泵送后性能的试验研究表明:经活塞泵输送后 SCC 的孔隙体系变化显著,气孔间距因子平均增加 0.045 mm,抗压强度降低 5%~14%; Vosahlik 等^[7]对活塞泵输送前后 NC 和 SCC 的孔隙变化进行了试验研究,结果表明:泵送压力和流量大小与 NC 孔隙系统的变化无明显相关性,而泵送流量会导致 SCC 孔隙间距发生变化; Alarrak 等^[8]对比了螺杆泵输送浇筑和直接浇筑 PVA 纤维增强砂浆试件的弯曲性能,结果表明:泵送后试件延性显著提高,0.5%

收稿日期: 2025-03-10。 修订日期: 2025-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金(51938012)。

第一作者: 方 志(1963),男,博士,教授。

Received date: 2025-03-10. Revised date: 2025-08-04.

First author: FANG Zhi (1963-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: fangzhi@hnu.edu.cn

和 1% 纤维掺量试件的残余强度较直接浇筑试件分别提高了 39% 和 87%。上述研究表明: 不同种类的混凝土泵送后的性能变化趋势有所不同。而 UHPC 与 NC 和 SCC 的组分差异较大, 有必要明确 UHPC 材料泵送前后的性能变化。

此外, 作为 UHPC 中不可或缺的组成部分, 钢纤维对 UHPC 性能特别是抗拉性能的增强作用与其内纤维取向及分布密切相关。Huang 等^[9]采用 L 型窄通道浇筑工艺, 使纤维取向系数从 0.4~0.6 提高到 0.7~0.9, UHPC 的弯曲强度、韧性和断裂模量分别提高了 64.3%、65.1% 和 77.1%; 张阳等^[10]使用改进的振动取向装置分层浇筑 UHPC, 研究了其内纤维取向的相应变化, 并提出了评估纤维取向对 UHPC 抗拉强度影响的指标; 林泽文等^[11]采用一端下料自流浇筑的方式研究了 UHPC 自身的流动特性对其内钢纤维取向的影响, 结果表明: 纤维取向的程度随 UHPC 流动距离的增加而增加。尽管已有研究探讨了人工浇筑方式下 UHPC 中的钢纤维取向变化, 但对不同泵送方式输送前后钢纤维取向变化的研究鲜见报道。UHPC 泵送过程中, 其内钢纤维的分布和取向变化仍有待明确。

基于此, 采用未经输送的直接浇筑、经螺杆泵和活塞泵输送后浇筑等 3 种方式浇筑不同纤维掺量的 UHPC 试件, 分别实测了各自的力学性能, 并采用图像识别技术对试件切面的纤维取向分布进行了测试和分析, 以期明确不同泵送工艺对 UHPC 材料力学性能的影响规律, 为免模板成型的挤喷式 UHPC 钢筋网薄层加固的合理设计和施工提供有价值的参考。

1 实验

1.1 输送设备

1.1.1 螺杆泵 采用浙江沃工泵业有限公司 G30-1 型单轴螺杆泵进行输送, 如图 1 所示。泵的额定功率为 2.2 kW, 配备减速机后转速为 204 r/min, 出口压力为 1.2 MPa, 出口直径为 40 mm, 螺杆泵转子直径 d 为 32 mm, 偏心距 e 为 6 mm, 螺距 L_d 为 70 mm, 共有四级, 每个腔室垂直于螺杆轴线方向的最大高度 h_d 为 12 mm。螺杆泵工作时, 由钢制转子和橡胶定子的过盈配合将螺杆泵分隔为多个独立密封腔室, 定子转动时拌合物沿定子内螺纹做螺旋运动实现泵送^[12]。

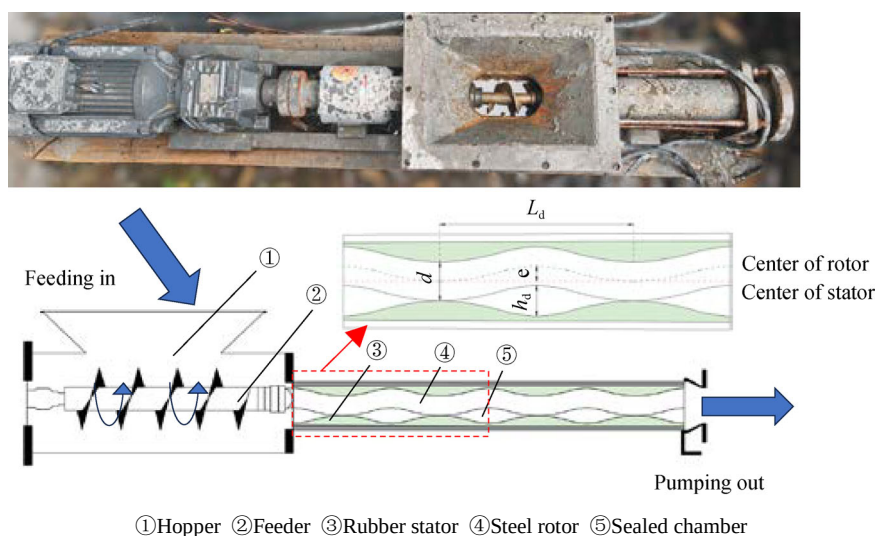


图 1 螺杆泵构造

Fig. 1 Structure of screw pump

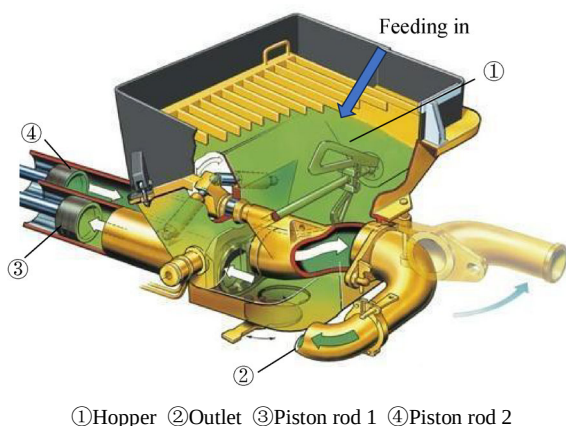
1.1.2 活塞泵 采用为圣重工 ZX-15-6 型活塞泵进行输送, 如图 2 所示。其电机额定功率为 15 kW, 出口压力为 6 MPa, 输送缸直径为 120 mm, 行程为 550 mm。工作时活塞杆交替进行前后往复运动来完成吸料与送料过程并实现混凝土的泵送。

1.1.3 输送管 受限与螺杆泵出口直径和出口压力的大小, 一般采用直径在 25~80 mm 之间的输送管。本工作考虑到在免模板成型的挤喷式 UHPC 钢

筋网薄层加固和 3D 打印施工的工艺可行性, 采用内径 38 mm 的钢丝编织软管作为输送管。

1.2 原材料及配合比

所用 UHPC 为商品预混料, 设计强度等级为 120 MPa, 由水泥、石英砂、硅灰、粉煤灰、膨润土、触变剂、减水剂和水拌制而成, 其配合比如表 1 所示。水泥选用湖南桃江南方水泥有限公司生产的 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积为 30 m²/kg;



①Hopper ②Outlet ③Piston rod 1 ④Piston rod 2

图2 活塞泵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of piston pump

粉煤灰细度 45 μm ; 硅灰粒径为 0.1~0.2 μm , SiO_2 含量为 93%, 比表面积为 18 500 m^2/kg ; 所使用 3 种石英砂, 其粒径分别为 20~40、40~70 目和 200 目; 减水剂采用聚羧酸高效减水剂, 减水率为 30%; 所掺钢纤维为抗拉强度 2850 MPa 的镀铜平直型钢纤维, 公称直径为 0.2 mm, 长度为 13 mm, 长径比为 65, 弹性模量为 200 GPa。

1.3 试件制作及养护

以输送方式(未经输送直接浇筑、螺杆泵输送、活塞泵输送)、浇筑方向(分别为无特定方向随机浇筑、平行浇筑、垂直浇筑)。这里将沿棱柱体试块长边方向浇筑定义为平行浇筑, 垂直于棱柱体试块长边方向浇筑定义为垂直浇筑)、钢纤维体积掺量(0%、

1%、2%)等为试验参数, 设计制作了 11 组试件, 每组试件包含 4 个棱柱体用以测试 UHPC 的弯拉强度和 4 个立方体试件(由棱柱体试件切割所得)用以测试 UHPC 的立方体抗压强度, 试件参数如表 2 所示。试件编号中 R 表示未经输送直接浇筑, LG 表示螺杆泵输送, HS 表示活塞泵输送; P 表示平行浇筑, V 表示垂直浇筑; 字母代码后的数字表示钢纤维体积掺量。依据《水泥胶砂强度检验方法》^[13], 弯拉强度测试试件采用 40 mm×40 mm×160 mm(宽度×高度×长度)的棱柱体, 抗压强度测试试件采用 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体且从棱柱体试件上切割制备而成。

表2 试件参数

Table 2 Specimen parameters

Specimen code	pumping method	Casting direction	Steel fiber volume fraction
R-0%	Direct casting	Random	0%
R-1%		Random	1%
R-2%		Random	2%
LGP-0%	Screw pump	Parallel	0%
LGP-1%		Parallel	1%
LGP-2%		Parallel	2%
LGV-0%	Piston pump	Vertical	0%
LGV-1%		Vertical	1%
LGV-2%		Vertical	2%
HSP-1%	Piston pump	Parallel	1%
HSV-1%		Vertical	1%

表1 UHPC 配合比

Table 1 Mixture proportion of UHPC

Cement	Silica fume	Quartz sand-1	Quartz sand-2	Quartz sand-3	Bentonite	Fly ash	thixotropic agent	Superplasticizer	Water
752	67	200	434	50	20	161	6	6.4	200

UHPC 的拌合流程如下: 1) 将 UHPC 预混料倒入强制搅拌机中干拌 2 min; 2) 在混合料中加入提前混合好的触变剂与水混合液后继续搅拌 4 min; 3) 在 8 min 内将钢纤维筛入拌合物中搅拌至均匀; 4) 将拌和后的 UHPC 加入泵机料斗进行输送后浇筑试块, 而未经输送组则从搅拌机出口取料后直接浇入试模内。

对泵送前、后拌合物分别取样进行坍落扩展度测试, 结果如表 3 可知: 钢纤维掺量(体积分数)为 1%时, 较泵送前拌合物, 经螺杆泵、活塞泵输送后的拌合物, 其坍落度分别提高 3.8%和降低 5.5%, 扩展度分别降低 0.7%和 1.1%; 可见泵送前后拌合物的工作性能变化较小, 是由于泵送程中拌合物持

续受泵送压力影响致使其絮凝过程减缓, 因而仍保有较好的工作性能。

表3 坍落/扩展度测试结果

Table 3 Slump/Spread test result

Pump type	Before pumping	After pumping
Screw pump	131 mm /279 mm	136 mm /277 mm
Piston pump	127 mm /271 mm	120 mm /268 mm

Volume fraction of fiber content is 1%.

将未经输送(从搅拌机出口取料)和经泵送后(从输送管末端泵出)的拌合物分别浇入试模中形成所需试件, 试件成型时均未经振捣, 以反映免模板成型 3D 打印或挤喷 UHPC 薄层加固时必须免振捣的工程实际。浇筑完成后的试件自然养护 48 h 后

拆模并在 $(90\pm 2)^\circ\text{C}$ 的蒸汽中继续养护 48 h, 待其自然冷却后进行力学性能测试。

1.4 试验方法

1.4.1 力学性能测试 UHPC 抗压强度参照《水泥胶砂强度检验方法》^[13]进行测试。试件的弯曲性能根据 ASTM C1609/C1609M-12^[14]使用四点弯曲试验进行测试, 试件的加载过程采用位移控制加载, 加载速率为 0.4 mm/min, 加载装置及测点布置示意如图 3 所示。

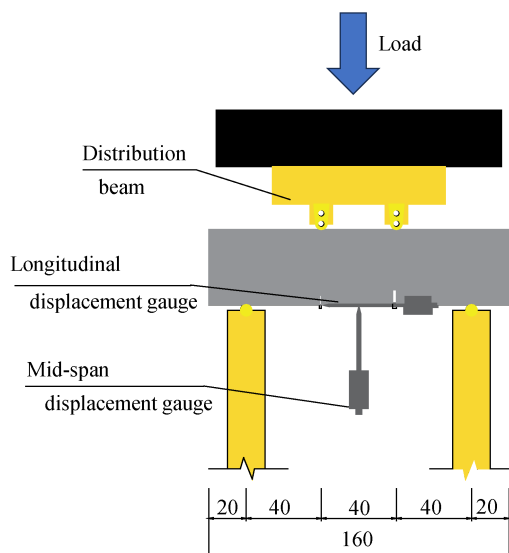


图 3 加载装置及测点布置示意

Fig. 3 Loading device and measuring point arrangement

试件底部粘贴标距 20 mm 的电阻应变片, 用于测定试件开裂前纯弯段内底面的纵向应变; 跨中竖向布置 1 个高精度位移传感器量测跨中挠度; 试件底部两侧纵向各布置 1 个高精度位移传感器量测试件纯弯段底部的伸长量, 借此获得试件纯弯段内受力全过程的纵向平均拉应变。应变片及高精度位移计数值采用 JM3812 多功能静态应变仪采集, 试验载荷由 UTM-600 试验机施加并记录。

1.4.2 钢纤维取向评估 采用图像处理法评价 UHPC 内部钢纤维取向状态^[9], 评估流程如图 4 所示。将弯曲试验结束后的试件切割获得 4 个切面, 用高清相机对各个切面拍照获得一系列切面图, 再通过图像处理软件对试件切面图片进行分析; 将拍摄所得 RGB 图像转化为仅有黑白 2 种像素的二值图像, 图中白色部分代表钢纤维, 黑色部分为 UHPC 基体。

通过计算机图像处理技术, 对切面图像中的钢纤维进行椭圆拟合得到切面钢纤维断面图, 据此确定切面上所有钢纤维与截面法向的夹角 θ 即纤维倾

角如式(1)所示^[9]。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{d_f}{a} \quad (1)$$

式中: d_f 为钢纤维直径; a 为图像中钢纤维的长轴长度。可使用纤维平均取向角 α_θ 对截面上纤维取向进行总体评价如式(2)所示^[9]。

$$\alpha_\theta = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} \cos \theta_n \quad (2)$$

式中: N_f 为穿过分析切面的纤维总数; θ_n 为第 n 根纤维的倾角。采用式(3)确定纤维取向系数 η_θ ^[9]。

$$\eta_\theta = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} p(\theta) \cos^2 \theta d\theta \quad (3)$$

式中: $p(\theta)$ 为纤维取向的概率密度函数, 这里采用图像分析所得各切面的平均分布概率。如果截面内所有纤维取向与截面法向平行, 则纤维取向系数为 1; 如截面内所有纤维取向均与截面法向垂直, 则纤维取向系数为 0。

2 结果与讨论

2.1 纤维取向特征

2.1.1 纤维整体取向特征 图 5 为不同浇筑方式和纤维掺量条件下试件切面纤维取向角的概率密度分布及相应的高斯拟合曲线, 表 4 列出了试件切面各部分纤维的取向特征值。

与直接浇筑试件相比, 螺杆泵送平行浇筑试件的直方图呈现左偏分布, 表明试件的大部分纤维具有较小的倾角, 螺杆泵送垂直浇筑试件则相反。活塞泵输送试件的概率密度分布直方图与人工浇筑试件呈现出相近的分布特征。

如表 4 所示, 螺杆泵输送后浇筑对试件纤维取向有显著影响。相较于直接浇筑试件, 纤维掺量为 1% 时, 螺杆泵输送平行浇筑试件全切面的纤维取向角减小了 9.8° , 取向系数由 0.454 增大至 0.607; 纤维掺量为 2% 时, 螺杆泵输送平行浇筑试件全切面的纤维取向角减小了 10.6° , 取向系数由 0.461 增大至 0.637。表明螺杆泵输送平行浇筑可以显著增强拌合物中纤维取向性, 且不同纤维掺量时的纤维取向效果相近。

活塞泵输送后浇筑对纤维取向的影响并不显著。与人工浇筑试件相比, 纤维掺量为 1% 时, 螺杆泵输送组平行和垂直浇筑试件的纤维取向角减小了 4.4% 和 0.4%, 纤维取向系数分别提高了 5.7% 和 0.4%。表明纤维在经历活塞泵输送时并未产生明显的取向行为。

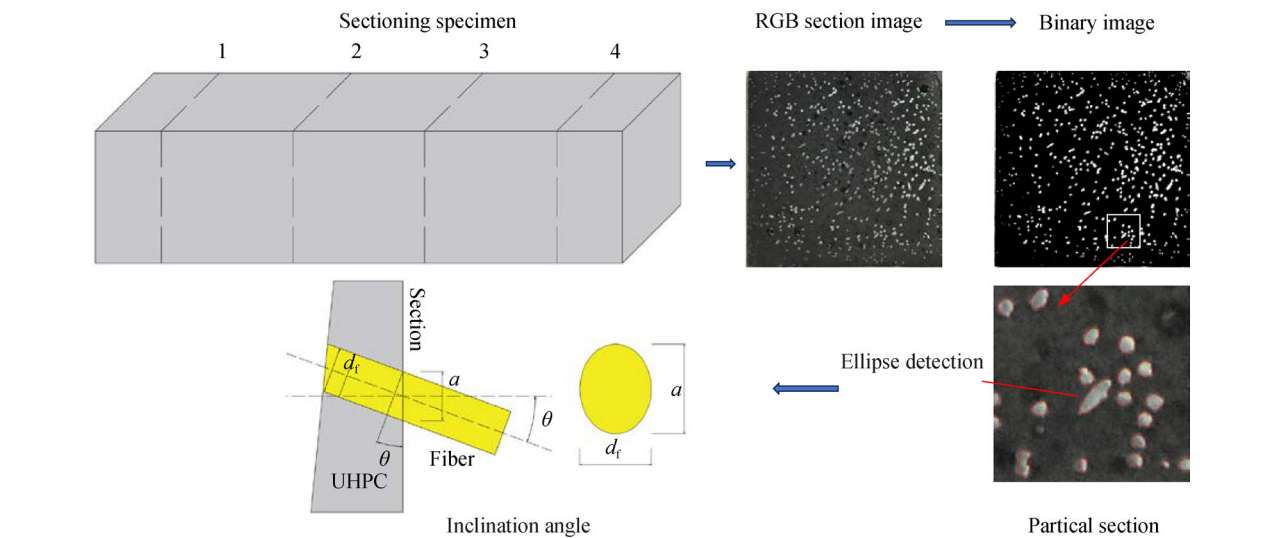


图 4 纤维取向图像处理流程

Fig. 4 Image analysis procedure for evaluating fiber orientation

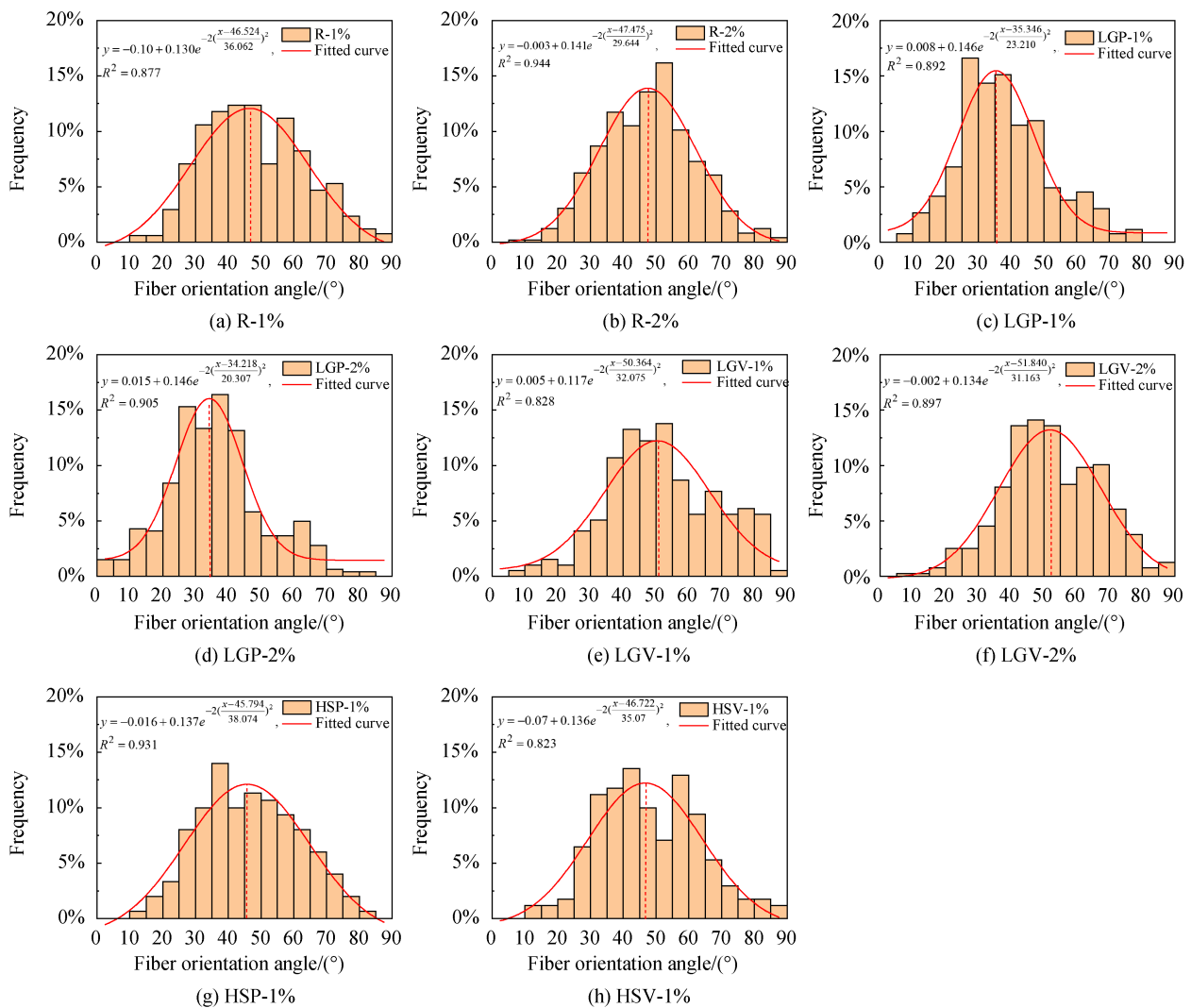


图 5 纤维取向频率直方图

Fig. 5 Frequency histogram of fiber orientation

表 4 切面上的纤维取向分布特征
Table 4 Fiber orientation in cross-section

Specimen No.	Average fiber orientation angle α_θ / average angle $\bar{\theta}$			Fiber orientation coefficient η_θ		
	Center area	Side area	Entire section	Center area	Side area	Entire section
R-1%	0.565/55.5°	0.680/47.2°	0.641/50.1°	0.361	0.501	0.454
R-2%	0.603/52.9°	0.694/46.1°	0.655/49.1°	0.394	0.511	0.461
LGP-1%	0.740/42.2°	0.788/38.0°	0.763/40.3°	0.577	0.643	0.607
LGP-2%	0.773/39.4°	0.793/37.6°	0.783/38.5°	0.618	0.657	0.637
LGV-1%	0.514/59.1°	0.621/51.6°	0.579/54.5°	0.304	0.413	0.382
LGV-2%	0.522/58.5°	0.638/50.4°	0.590/53.9°	0.306	0.442	0.386
HSP-1%	0.635/50.6°	0.683/46.9°	0.667/48.2°	0.438	0.501	0.480
HSV-1%	0.609/52.4°	0.663/48.5°	0.644/49.9°	0.415	0.488	0.456

2.1.2 截面上的纤维取向分布特征 既有研究表明^[11]：UHPC 浇筑过程中，模板边壁的约束作用会影响纤维在其内部的转动迁移，使得截面上不同区域的纤维取向特征会有所不同，即存在所谓的边壁效应。

如图 6 所示，将所获得的试件切面划分成受边壁影响的边部区域(①~⑧)和不受边壁影响的中部区域(⑨)，图中的 l_f 为纤维长度。发现边部区域的纤维切面较小且接近于圆形(如图中的局部大样图 6 中 A 区)，而中部区域则更接近于椭圆(如图中的局部大样图 6 中 B 区)，表明边部区域的纤维平均取向角确实小于中部。

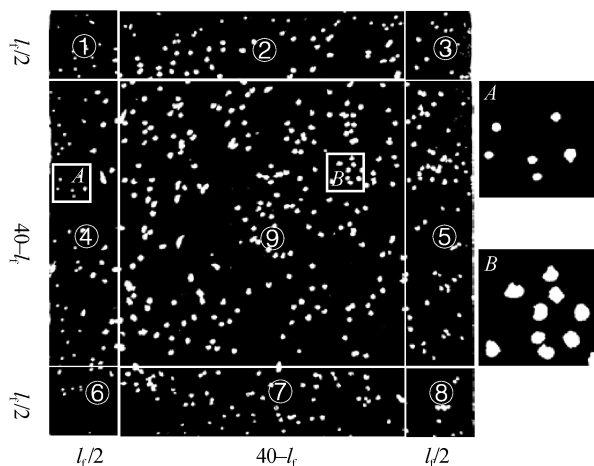


图 6 切面区域划分

Fig. 6 Cross-sectional area zoning

试件各切面不同区域纤维取向角和纤维取向系数统计结果如表 4 可知：所有试件的边部纤维取向系数均高于中部纤维取向系数，且不同浇筑方式和浇筑方向试件的纤维分布不同。对于直接浇筑试件，其边部和中部纤维取向系数差异可达 30%~35%；螺杆泵输送组平行浇筑试件中，这一差异可以降低到

5%~10%，垂直浇筑试件则增加到 35%~45%；在活塞泵输送组中，平行浇筑、垂直浇筑试件边部和中部纤维取向差异均在 15%~20%。这是由于边壁效应使试件靠近模板处纤维受到取向而更倾向平行于模板，螺杆泵输送平行浇筑使得更多纤维倾向于平行方向，从而减小了截面纤维取向分布的不均匀性，螺杆泵输送垂直浇筑则起相反作用。

2.1.3 纤维取向机理分析 UHPC 经螺杆泵输送后，其内钢纤维取向明显，源于泵送过程中 UHPC 拌合物的流动方向和厚度不断发生变化。

图 7 显示了输送时各阶段转子位置及拌合物流动过程^[12]。拌合物中所掺钢纤维长度为 13 mm，而腔室垂直于螺杆轴线方向的最大高度 h_d 为 12 mm。当 UHPC 在螺杆泵中沿定子内螺纹做螺旋运动时，受限于腔室空间的大小，钢纤维仅能以特定方向通过，进而对钢纤维形成明显的取向作用。

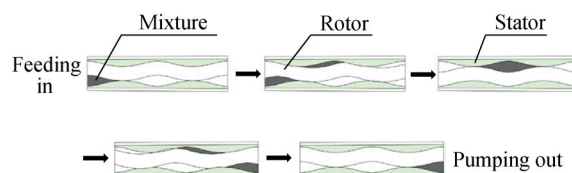


图 7 螺杆泵输送过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of screw pump conveyance process

UHPC 经活塞泵输送后，对纤维取向的影响程度较螺杆泵的弱，源于泵送过程中 UHPC 拌合物的流动厚度保持不变。且有研究表明^[15]：拌合物在输送缸内的流动行为与输送管中的相似。

泵送过程中，管道内拌合物的横截面上存在剪应力梯度沿径向接近线性分布，导致拌合物在截面上产生不同的流速和剪切速率分布，并形成润滑区、剪切区和柱塞区等不同的流动区域如图 8 所示^[13]，且柱塞区的大小取决于拌合物屈服应力和黏度，屈

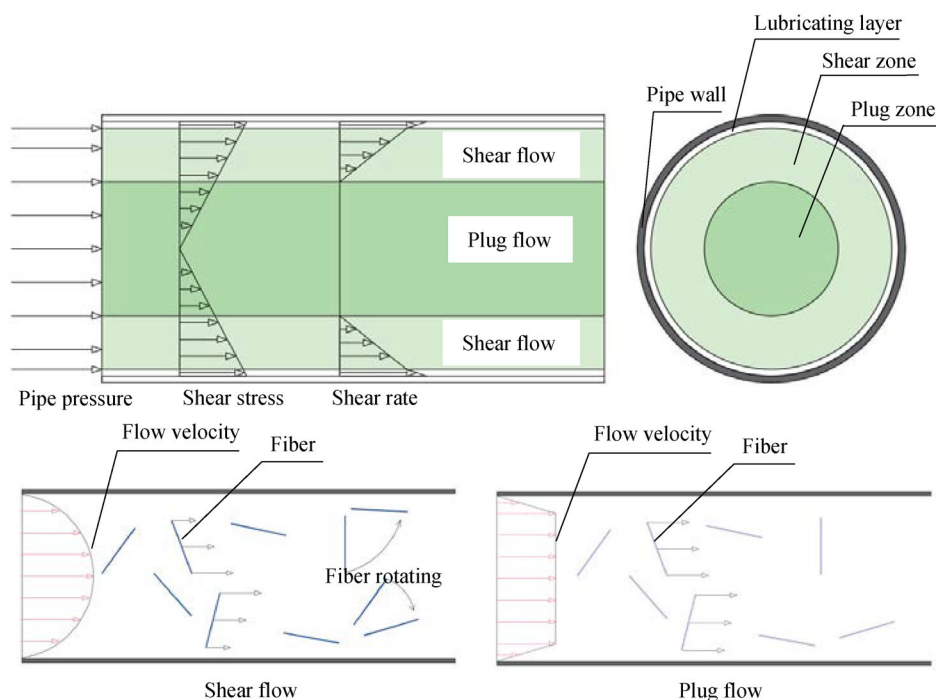


图8 拌合物管道流动行为
Fig. 8 Flow behavior of mixture in pipeline

服应力和黏度越大，柱塞区越大^[15–16]。

纤维的取向程度与拌合物的流动行为有关^[11]。当管内拌合物具有低屈服应力和低黏度时，其流动行为往往表现为剪切流动，此时流动过程中纤维会发生转动使其取向趋于与流动方向平行；当拌合物的屈服应力和黏度较高时，中心附近区域拌合物的剪切应力小于其屈服应力，表现为柱塞流动。此时柱塞区内没有层间相对滑动，其内纤维几乎不转动。而本文实验所配制的 UHPC 拌合物具有较高屈服应力和黏度，其在管道中的流动更多地呈现柱塞流状态，因而对纤维取向作用并不明显，与未经泵送直接浇筑的 UHPC 相近。

2.2 抗压强度

不同输送方式、浇筑方向和纤维掺量的试件，其实测抗压强度如图 9 所示。可见：不同浇筑方式和不同浇筑方向试件的抗压强度均随钢纤维掺量的增加而提高。钢纤维掺量为 1% 和 2% 的直接浇筑试件，其抗压强度较无钢纤维试件分别提高了 13.4% 和 20.5%；钢纤维掺量为 1% 和 2% 的螺杆泵输送平行浇筑试件，其抗压强度较无钢纤维试件分别提高了 16.2% 和 22.8%，垂直浇筑试件的抗压强度较无钢纤维试件分别提高了 10.9% 和 20.1%。

经螺杆泵和活塞泵输送后，试件的抗压强度较未经输送直接浇筑试件均有所下降，且泵送方式、浇筑方向和纤维掺量对抗压强度下降的幅度影响并

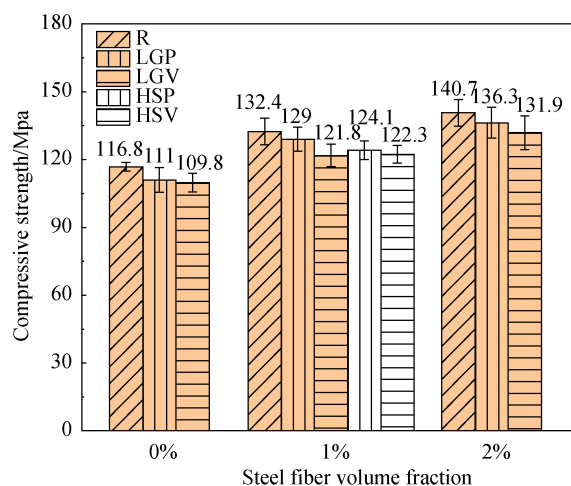


图9 抗压试验结果
Fig. 9 Compressive test result

不显著，抗压强度的降低幅度均处于 2.6%~8.0%。纤维掺量为 0% 时，较未经输送试件，螺杆泵输送组平行、垂直浇筑试件的抗压强度分别下降 5.0%、6.0%；纤维掺量为 1% 时，较未经输送试件，螺杆泵输送组平行、垂直浇筑试件的抗压强度分别下降 2.6%、8.0%，活塞泵输送组平行、垂直浇筑试件的抗压强度分别下降 6.3%、7.6%；纤维掺量为 2% 时，较未经输送试件，螺杆泵输送组平行、垂直浇筑试件的抗压强度分别下降 3.1%、6.3%。泵送后 UHPC 的抗压强度有所降低，是由于泵送过程影响了 UHPC 的孔隙体系，较小气孔合并成大气孔导致试件的初始缺

陷有所加剧, 进而导致抗压强度有所降低^[7]。

与螺杆泵输送垂直浇筑试件相比, 平行浇筑试件的抗压强度在纤维掺量为 0%、1% 和 2% 时分别提高了 1.1%、5.9% 和 3.3%; 与活塞泵输送垂直浇筑试件相比, 纤维掺量为 1% 时平行浇筑试件的抗压强度仅提升 0.38%。表明浇筑方向对不同纤维掺量试件的抗压强度影响并不显著。

2.3 弯曲强度

2.3.1 受力破坏过程 不同试验参数试件的破坏形态如图 10 所示。所有试件均在纯弯段内形成一条明显的主裂缝而发生弯曲破坏。未掺纤维试件其裂缝较为平直; 而对于掺有钢纤维的试件, 纤维掺量越多, 主裂缝周围微裂缝数量越多, 破断裂缝面也更为曲折。

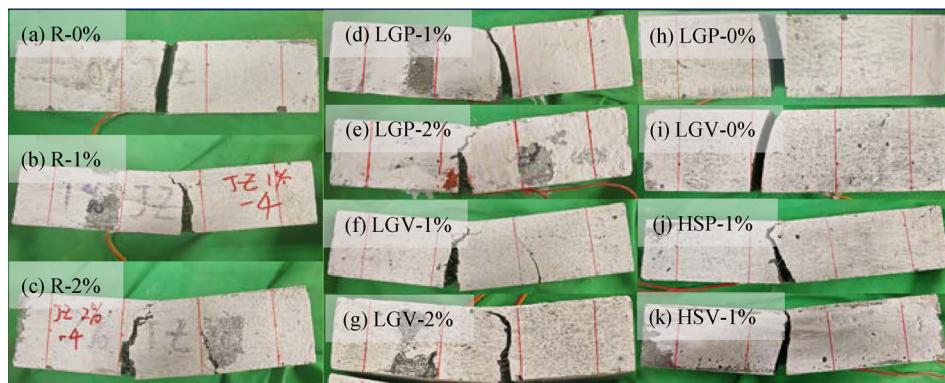


图 10 试件破坏形态

Fig. 10 specimen failure mode

2.3.2 荷载-跨中挠度曲线 图 11 为不同参数弯拉试件的荷载-跨中挠度平均曲线。可见: 所有掺钢纤维试件的受力破坏过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段等 3 个阶段。而未掺钢纤维试件则表现出明显的脆性特征, 初裂即断裂, 试件的开裂强度即为弯曲极限强度。基于式(4)~式(7)可分别确定描述试件弯曲性能的初裂强度 f_{cr} 、极限强度 f_u 、等效强度 f_e 和韧性比 R_e 等性能指标^[17]。相应的计算结果列如表 5, 结果讨论详见下文。

$$f_{cr} = \frac{F_{cr} l}{bh^2} \quad (4)$$

$$f_u = \frac{F_u l}{bh^2} \quad (5)$$

$$f_e = \frac{\Omega_k l}{bh^2 \delta_k} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{f_e}{f_{cr}} \quad (7)$$

式中: l 为支座中心间距; 这里 $l=120$ mm, b 、 h 为试件截面宽度和高度; 取跨中挠度 δ_k 为 $l/75$ 来评估试件的弯曲韧性^[17], 这里 $\delta_k=1.6$ mm; Ω_k 表示跨中挠度为 δ_k 时荷载挠度曲线与横轴所围面积。

2.3.3 初裂强度 各试件的初裂强度如图 12 和表 5 可知: 不同输送方式、浇筑方向试件的初裂强度均随钢纤维掺量的提高而提高。

表 5 四点弯曲试验结果

Table 5 Four-point bending test results

Specimen No.	Cracking strength f_{cr} /MPa	Ultimate strength f_u /MPa	Equivalent strength f_e /MPa	Toughness ratio R_e
R-0%	11.1	11.1		
R-1%	12.5	18.7	14.6	1.17
R-2%	13.0	27.3	20.7	1.59
LGP-0%	10.5	10.5		
LGP-1%	12.6	21.5	16.7	1.33
LGP-2%	14.2	36.0	25.2	1.77
LGV-0%	10.3	10.3		
LGV-1%	10.3	15.4	12.2	1.19
LGV-2%	11.0	19.1	14.7	1.34
HSP-1%	12.4	19.4	15.2	1.22
HSV-1%	12.3	17.7	14.1	1.15

经泵送的无钢纤维试件, 其初裂强度较直接浇筑试件有所降低。与直接浇筑无钢纤维试件相比, 螺杆泵输送平行、垂直浇筑无钢纤维试件的初裂强度分别降低 5.4%、7.2%, 与抗压强度表现出相似规律, 也是由于泵送后基体的初始缺陷有所增加所致。

浇筑方向对螺杆泵输送后浇筑试件的初裂强度影响显著。相较于直接浇筑的 1%、2% 钢纤维掺量试件, 螺杆泵输送组平行浇筑试件的初裂强度提高了 0.1%、9.2%, 而垂直浇筑试件初裂强度则降低

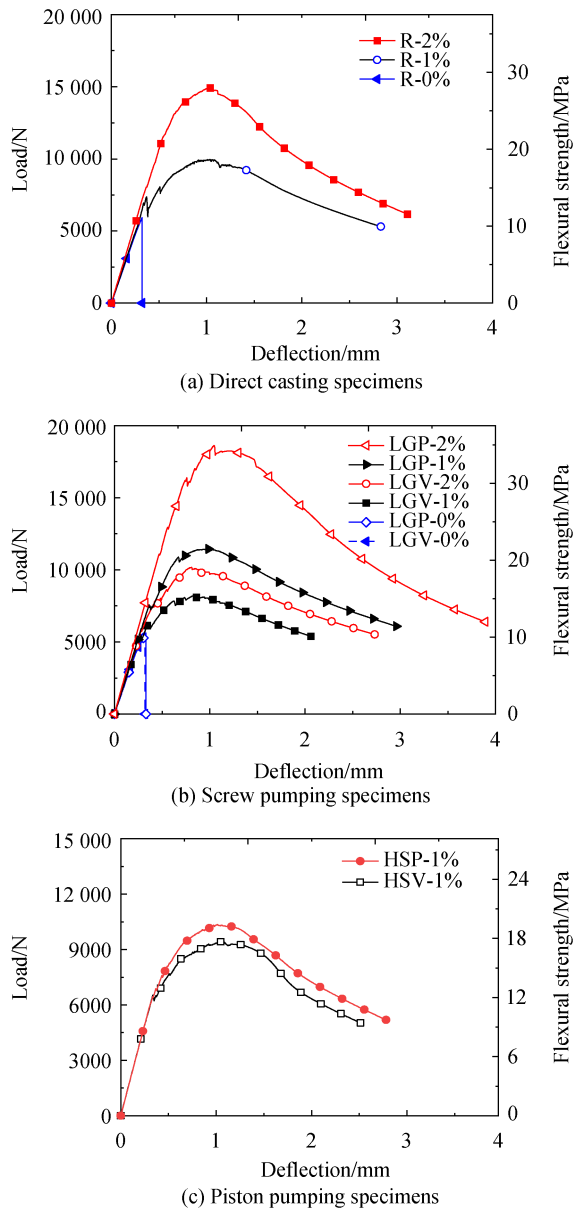


图 11 试件的荷载(弯曲应力)-挠度曲线

Fig. 11 Load(flexural strength)-deflection curve

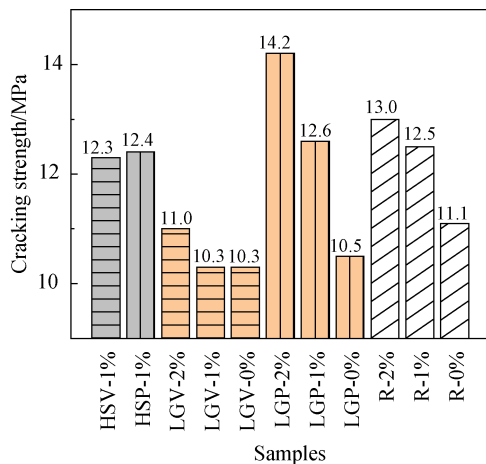


图 12 初裂强度

Fig. 12 Cracking strength

12%、15.4%。源于螺杆泵输送后，UHPC 中的钢纤维取向明显，且平行浇筑时纤维方向与截面拉应力方向接近，垂直浇筑时则相反，致使纤维对受弯方向基体的约束作用相差悬殊。

浇筑方向对活塞泵输送后浇筑试件的初裂强度影响较小。活塞泵输送平行、垂直浇筑试件较直接浇筑试件仅分别下降 0.8%、1.6%，与直接浇筑试件相近。

2.3.4 极限强度 各试件的弯曲极限强度如图 13 和表 5 所示。可见：螺杆泵输送后浇筑对试件弯曲极限强度影响显著，且与浇筑方向相关。钢纤维掺量为 1% 时，对比直接浇筑试件，螺杆泵输送平行浇筑试件的弯曲极限强度提升 19.9%，垂直浇筑试件则降低 17.6%；钢纤维掺量为 2% 时，对比直接浇筑试件，螺杆泵输送平行浇筑试件的弯曲极限强度提升 32.1%，垂直浇筑试件则降低 30.0%。是由于螺杆泵输送时，钢纤维更易沿拌合物流动方向排列，平行浇筑后更多纤维与拉伸方向分布，显著增强试件的弯曲极限强度，垂直浇筑则起相反效果。

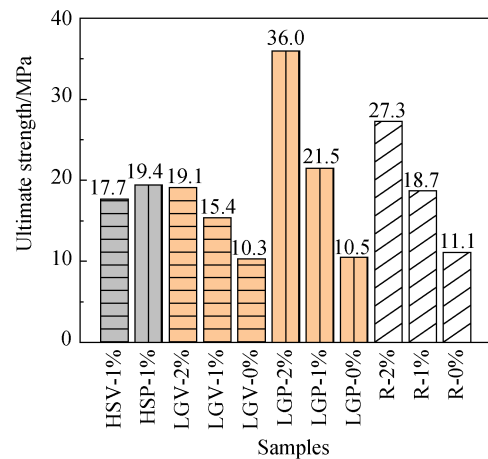


图 13 弯曲极限强度

Fig. 13 Ultimate strength

活塞泵输送后浇筑对试件弯曲极限强度的影响并不显著，不同浇筑方向试件的弯曲极限强度也相近。活塞泵输送平行浇筑试件的弯曲极限强度仅提升 3.9%，而垂直浇筑试件的弯曲极限强度则降低 5.3%。在于活塞泵输送影响纤维取向能力较弱，导致对弯曲极限强度的影响较小。

上述结果表明：UHPC 经螺杆泵输送后，其内钢纤维取向明显，进而使得 UHPC 的浇筑方向对其力学性能产生显著影响；而 UHPC 经活塞泵输送后，即使输送管直径仅为 38 mm，其内纤维取向和力学性能的变化仍不明显，均与未经泵送直接浇筑的

UHPC 相近。

因此, 实际施工时, 采用螺杆泵输送宜根据结构的主要受力方向选择布料的行走方式, 而采用活塞泵输送时对行走布料的方向性则没有特别要求。

2.3.5 弯曲韧性 各试件弯曲韧性比 R_e 如图 14 和表 5 所示。不同浇筑方式、浇筑方向试件的弯曲韧性均随纤维掺量提高而提高。

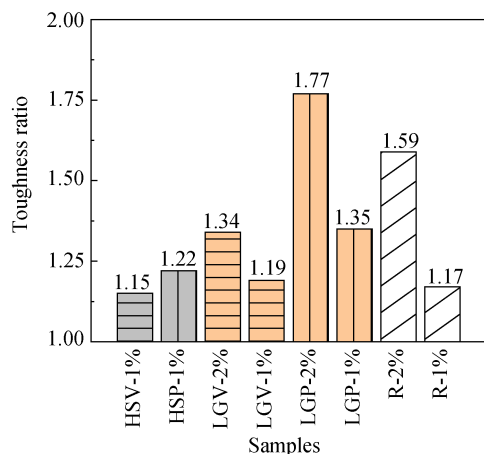


图 14 弯曲韧性比 R_e

Fig. 14 Toughness ratio R_e

螺杆泵输送后浇筑对试件的弯曲韧性影响显著, 且与浇筑方向相关。相较于直接浇筑试件, 螺杆泵输送平行浇筑 1%、2% 纤维掺量试件其弯曲韧性分别提升 15.4%、11.3%, 垂直浇筑试件则分别下降 1.7%、15.7%。同样源于 UHPC 经螺杆泵送后, 其内钢纤维的取向度增加所致。

活塞泵输送后浇筑对试件弯曲韧性的影响并不显著, 且浇筑方向对试件弯曲韧性的影响也较小。

与直接浇筑试件相比, 纤维掺量为 1% 时活塞泵输送平行浇筑试件的弯曲韧性仅提高 4.3%, 而垂直浇筑试件则下降 2.7%, 均与直接浇筑试件相近。

3 弯曲强度与纤维取向系数

UHPC 主要由钢纤维和基体两部分组成, 其力学性能也由纤维特性和基体特性共同决定。基于复合材料理论, 采用式(8)对 UHPC 的弯曲极限强度进行预测^[19]:

$$\sigma_{fc} = \sigma_{fm}(1 - V_f) + \eta_\theta \frac{l_f}{d_f} V_f \tau_f \beta \quad (8)$$

式中: σ_{fc} 和 σ_{fm} 分别为 UHPC 和基体的抗弯强度; V_f 为纤维的体积掺量分数; η_θ 为纤维取向系数, 文献^[19]建议取值 0.5。 l_f 、 d_f 分别为纤维长度和直径; τ_f 为纤维与基体的粘结强度, 平直型钢纤维与基体的粘结强度与基体抗压强度呈正相关, 依据实测抗压强度取值为 9.5 MPa^[20-22]; β 为 UHPC 的抗弯/抗拉强度比, 取值如式(9)所示^[21]:

$$\beta = 2.02 + 0.35 \frac{l_f}{d_f} V_f \quad (9)$$

基于式(8)预测的 UHPC 抗弯强度 σ_{fc} 与试验结果的比较如表 6 可知: 除螺杆泵输送垂直浇筑试件被高估外, 其余试件的抗弯强度均被低估, 且螺杆泵输送平行浇筑试件低估较多。是由于式(8)中假定纤维取向系数 η_θ 依据无泵送直接浇筑的试验结果取为定值 0.5, 并未考虑不同输送方式和浇筑方向对纤维取向系数的影响, 而试验结果表明: 螺杆泵输送及输送后的浇筑方向对纤维取向系数影响显著。

表 6 弯曲强度预测结果及纤维取向系数建议取值

Table 6 Bending strength prediction results and recommended values of fiber orientation coefficients

Sample No.	σ_u /MPa	σ_{fc} /MPa	σ_{fc} / σ_u	Recommended value for η_θ	Prediction results using the recommended value of η_θ	
					σ_{fc} /MPa	σ_{fc} / σ_u
R-1%	18.7	17.928	0.959	0.5	17.928	0.959
R-2%	27.3	26.161	0.958		26.161	0.958
LGP-1%	21.5	17.334	0.806	0.62	19.000	0.884
LGP-2%	36.0	25.573	0.710		29.241	0.812
LGV-1%	15.4	17.136	1.113	0.38	15.471	1.005
LGV-2%	19.1	25.377	1.329		21.709	1.137
HSP-1%	19.4	17.235	0.888	0.5	17.235	0.888
HSV-1%	17.7	17.235	0.974		17.235	0.974
Average value / Variable coefficient			0.967/0.177		0.952/0.091	

对无泵送直接浇筑和活塞泵输送后浇筑的 UHPC, 表 4 的实测结果表明: 钢纤维掺量为 1%、2% 时, 直接浇筑试件 η_0 的实测值分别为 0.454、0.461; 纤维掺量为 1% 时, 活塞泵输送平行浇筑、垂直浇筑试件 η_0 的实测值分别为 0.480、0.456, 均与直接浇筑试件相近, 考虑到本文的试验样本较少, 且实测的 η_0 值均与文献[19]建议的 0.5 极为接近, 因此对无泵送直接浇筑和活塞泵输送后浇筑的 UHPC, 建议 η_0 同样取值为 0.5。

对于螺杆泵输送的 UHPC, 表 4 的实测结果表明: 钢纤维掺量为 1%、2% 时, 平行浇筑试件 η_0 实测值分别为 0.607、0.637, 垂直浇筑试件则分别为 0.382、0.386。且纤维掺量的改变对值的影响较小。因此对于螺杆泵输送平行浇筑和垂直浇筑的 UHPC, 建议 η_0 分别取值为 0.62 和 0.38; 对于螺杆泵输送无定向随机浇筑的 UHPC, 考虑到此时的纤维接近随机分布, 与直接浇筑时近似, 故建议此时的 η_0 取平行和垂直浇筑的平均值, 即取值为 0.5。

将建议的 η_0 取值带入式(8)计算相应 UHPC 的弯曲极限强度, 结果如表 6 所示。预测值与试验值之比的平均值为 0.952, 变异系数为 9.1%, 二者吻合良好, 表明考虑不同输送方式和浇筑方向的影响后, 采用式(8)仍可较好地预测 UHPC 的弯曲强度。

4 结论

分别使用螺杆泵和活塞泵两种泵送设备对不同钢纤维掺量的 UHPC 进行泵送浇筑, 研究了不同输送方式、浇筑方向及钢纤维掺量对 UHPC 力学性能和纤维分布的影响。基于试验结果, 可得出以下主要结论:

1) 泵送前后 UHPC 的工作性能变化较小。钢纤维掺量为 1% 时, 较泵送前拌合物, 经螺杆泵和活塞泵输送后的拌合物, 其扩展度仅分别降低 0.7% 和 1.1%。

2) 经螺杆泵和活塞泵输送后, UHPC 的抗压强度较未经输送直接浇筑试件的均有所下降, 且泵送方式、浇筑方向和钢纤维掺量对抗压强度下降幅度的影响并不显著, 抗压强度的降低幅度均处于 2.6%~8.0% 范围内。

3) 螺杆泵输送显著增强了 UHPC 中钢纤维的定向作用, 使更多纤维沿泵送方向分布, 进而使 UHPC 沿泵送方向的抗拉强度大幅提高, 且钢纤维掺量的变化对取向效果的影响较小; 活塞泵输送对纤维的取向作用影响较小且与无泵送直接浇筑

UHPC 的情形相近。钢纤维掺量为 1%、2% 时, 较无泵送直接浇筑的 UHPC, 螺杆泵输送平行浇筑使纤维取向系数分别增大 33.7% 和 38.2%, 弯曲强度分别提高 19.9% 和 32.1%; 钢纤维掺量为 1% 时, 较无泵送直接浇筑的 UHPC, 活塞泵送试件中的纤维分布与直接浇筑试件相近, 纤维取向系数提高 5.7%, 弯曲强度提高 3.7%。因此, 实际施工时, 采用螺杆泵输送宜根据结构的主要受力方向选择布料的行走方式, 而采用活塞泵输送时对行走布料的方向性则没有特别要求。

4) 依据试验结果给出了不同输送和浇筑方式下 UHPC 中钢纤维取向系数的建议取值, 进而预测了不同输送方式和浇筑方向 UHPC 的抗弯强度, 预测结果与实测结果吻合良好。

需要说明的是, 仅采用特定的螺杆泵和活塞泵在特定的转速和泵送压力下完成了 UHPC 的输送, 并仅基于实验研究, 明确不同输送方式对 UHPC 中钢纤维分布及力学性能(主要是弯拉性能)的影响。并未研究设备技术参数对泵送 UHPC 性能的影响, 也未建立施工工艺与 UHPC 性能的关系模型, 这些问题的研究对于泵送 UHPC 设备参数的合理选取、施工工艺的科学确定极具价值, 值得进一步研究。

参考文献:

- [1] TAY Y W D, QIAN Y, TAN M J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test[J]. Compos Part B Eng, 2019, 174: 106968.
- [2] 湖南大学. CECS 242—2008 水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [3] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 5–174.
- [4] FEYS D, DE SCHUTTER G, FATAEI S, et al. Pumping of concrete: Understanding a common placement method with lots of challenges[J]. Cem Concr Res, 2022, 154: 106720.
- [5] 罗碧丹, 刘文利, 林伟才. 混凝土泵送前后性能的对比试验研究[J]. 混凝土, 2015(4): 123–126.
- [6] LUO Bidan, LIU Wenli, LIN Weicai. Concrete, 2015(4): 123–126.
- [7] LI H L, SHI Y, RONG H, et al. Effect of additives on the performance of 3D-printing ultra-high performance concrete[J]. J Build Eng, 2025, 104: 112451.
- [8] VOSAHLIK J, RIDING K A, FEYS D, et al. Concrete pumping and its effect on the air void system[J]. Mater Struct, 2018, 51(4): 94.
- [9] ALARRAK R, JEON B, BRAND A S. Flexural toughness of extruded fiber-reinforced mortar with preferentially aligned fibers[J]. Constr Build Mater, 2023, 407: 133528.
- [10] HUANG H H, GAO X J, LI L S, et al. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 188: 709–721.
- [11] 张阳, 屈少钦, 卢九章, 等. UHPC 纤维定向法及对受拉性能影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 74–80.

- ZHANG Yang, QU Shaoqin, LU Jiuzhang, et al. *J Chongqing Jiaotong Univ Nat Sci*, 2021, 40(5): 74–80.
- [11] 林泽文, 陈浩, 水中和, 等. 浇注方式对超高性能纤维增强混凝土中纤维取向及分布的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2010–2015.
- LIN Zewen, CHEN Hao, SHUI Zhonghe, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2019, 38(7): 2010–2015.
- [12] 张静, 周婧, 段国林. 基于螺杆泵送料的陶瓷三维打印机挤出机理[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(10): 1252–1259.
- ZHANG Jing, ZHOU Jing, DUAN Guolin. *China Mech Eng*, 2020, 31(10): 1252–1259.
- [13] 中国建筑材料科学研究总院有限公司、厦门艾思欧标准砂有限公司、安徽海螺水泥股份有限公司、浙江礼显试验仪器制造有限公司、北京国建联信认证中心有限公司、广西建科建设工程质量检测与评价有限责任公司、黄河勘测规划设计研究院有限公司、河南豫美建设工程有限公司检测有限公司等. GB/T 17671—2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading): ASTM C1609/C1609M-12[S]. ASTM International, 2012.
- [15] FASIH A, LIBRE N A. From pumping to deposition: A Comprehensive review of test methods for characterizing concrete printability[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 414: 134968.
- [16] CHOI M S, KIM Y J, JANG K P, et al. Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 66: 723–730.
- [17] 大连理工大学. CECS 13—2009 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [18] XIONG Y M, YANG M, YUAN Y, et al. Anisotropic behavior in the flexural properties of aligned steel fiber UHPC produced by electromagnetic field[J]. *J Build Eng*, 2024, 94: 109854.
- [19] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 90: 193–201.
- [20] BASTIEN-MASSE M, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 67: 111–125.
- [21] TANG Z L, FANG Z, PENG F, et al. Behavior of ultra-high-performance concrete under combined tensile and bending action[J]. *J Build Eng*, 2024, 89: 109388.
- [22] QI J N, WU Z M, MA Z J, et al. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 191: 764–774.

Effects of Different Transport Methods on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete

FANG Zhi¹, JIANG Yiyang¹, SHAN Ren¹, JIANG Yousheng², YAN Xianquan³

(1. College of Civil Engineering, University, Changsha 410082, China; 2. Department of Transport of Hubei Province, Wuhan 430030, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430052, China)

Extended Abstract

Introduction Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) demonstrates substantial potential in civil engineering applications owing to its superior mechanical characteristics and enhanced durability. The material's exceptional workability and structural adaptability make it particularly effective for thin-layer strengthening of aging concrete structures. Pumping technology has become prevalent in construction operations due to operational efficiency and site adaptability. Existing investigations have documented performance variations in conventional concrete materials under diverse pumping conditions. These studies indicate material-specific response patterns, with post-pumping mechanical properties exhibiting notable disparities across concrete categories. However, the mechanical behavior evolution of UHPC under pumping conditions remains insufficiently explored, particularly given its distinct material composition compared to conventional concrete. This study conducts a controlled experimental investigation to evaluate the mechanical performance variation of UHPC subjected to three transport-casting conditions: non-transported baseline, screw pump transportation, and piston pump transportation. Through systematic comparison of pre- and post-pumping mechanical parameters, the research aims to clarify the pumping-induced performance modifications in UHPC.

Methods With transport methods (direct casting without transport, screw pump transport, piston pump transport), casting directions (random casting, parallel casting, perpendicular casting; Here parallel casting denotes casting along the long axis of prismatic specimens, while perpendicular casting denotes casting perpendicular to this axis), and steel fiber volume fractions (0%, 1%, 2%) as test parameters, 11 specimen groups were fabricated. Each group comprised 4 prismatic specimens for flexural strength testing and 4 cubic specimens (cut from the prisms) for cubic compressive strength testing. During flexural testing, electrical resistance strain gauges with a 20 mm gauge length were bonded to the tensile face of specimens to quantify longitudinal strain development within the pure bending zone prior to crack initiation. High-precision displacement transducers were vertically aligned at mid-span to quantify flexural deflection, complemented by dual auxiliary sensors longitudinally mounted on opposing sides of the specimen's tensile surface to monitor elongation within the pure bending zone. Following mechanical testing, prismatic specimens were longitudinally divided into four sections. Each exposed surface was digitally imaged using high-resolution photographic equipment. Subsequent computational analysis quantified the angular deviation between steel fiber orientations and corresponding cross-sectional normals through dedicated image processing algorithms.

Results and discussion Screw pump transport casting significantly influenced fiber orientation in specimens. Compared with directly cast specimens, at a 1% fiber content, the fiber orientation angle of screw-pumped parallel-cast specimens decreased by 9.8° across the full section, with the orientation coefficient increasing from 0.454 to 0.607; at 2% fiber content, the orientation angle decreased by 10.6° , and the coefficient increased from 0.461 to 0.637. Which indicates that screw pump transport with parallel casting significantly enhances fiber orientation in the mixture, with similar orientation effects across different fiber contents. Piston pump transport had no significant impact on fiber orientation. Compared to direct casting, at 1% fiber content, the piston-pumped parallel and perpendicular casting methods reduced fiber orientation angles by 1.9° and 0.2° , respectively, and increased the orientation coefficients by 5.7% and 0.4%, indicating no obvious fiber orientation occurred during piston pump transport. A significant wall effect was observed in fiber distribution across specimen sections: fiber orientation coefficients at the edges were higher than those in the middle for all specimens, with notable differences across casting methods. The difference in orientation coefficients between edge and middle sections reached 30%–35% for directly cast specimens; this was reduced to 5%–10% for screw-pumped parallel-cast specimens but expanded to 35%–45% for perpendicular-cast specimens; piston-pumped specimens exhibited edge-middle differences of 15%–20%. Compression tests showed that UHPC compressive strength decreased by 2.6%–8% after transport, though the reduction was not significantly affected by pumping method, casting direction, or fiber content—primarily attributed to disturbance of the UHPC pore structure during pumping. Flexural tests revealed that at 1% and 2% steel fiber contents, screw pump transport with parallel casting increased flexural strength by 19.9% and 32.1%, respectively, compared to non-pumped direct casting. Flexural strength of piston-pumped specimens remained similar to direct casting, with differences within 6%.

Conclusions Based on the test results, the recommended values for the steel fiber orientation coefficient in UHPC under different transport and casting methods are as follows: 0.5 for UHPC with direct casting or piston pump transport-casting, 0.62 for UHPC with screw pump parallel casting, and 0.38 for UHPC with screw pump perpendicular casting. When screw pumps are employed, material placement direction should align with the structure's principal stress direction. No directional constraints are required for piston pump applications. The flexural strength of UHPC under different transport methods and casting directions was predicted using the proposed fiber orientation coefficients, and the predicted results closely matched the experimental measurements.

Keywords ultra-high performance concrete; screw pump; piston pump; flexural performance; fiber orientation