

3D 打印超高性能混凝土受压损伤断裂机理的多尺度研究

张 慧¹, 武 杰¹, 黄宇劼¹, 董彦莉¹, 彭程明², 武圣凯¹, 徐世烺³

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 太原 030051; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072;

3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要:近年来, 建筑 3D 打印技术与超高性能混凝土结合(即 3DP-UHPC), 可同时发挥 3D 打印快速建造、成型可控和 UHPC 超高强、高韧等多重优势。已有 3DP-UHPC 的相关工作由于受到打印技术限制, 大多针对较短钢纤维(6 mm 和 10 mm), 而工程中 UHPC 常用钢纤维长度为 13 mm。另外, 3DP-UHPC 的微细观结构特征及其引起的各向异性力学性能和损伤断裂机理的研究较为缺乏。因此, 研究了 13 mm 钢纤维及其掺量(0、0.5%、1.0%、2.0%)对 3DP-UHPC 各向异性压缩力学行为的多尺度影响规律。利用数字图像相关技术(DIC)捕捉了试件裂缝的起裂、扩展和贯通等行为, 开展了基于微观 X 射线计算断层扫描技术的微细观扫描实验, 揭示了 3DP-UHPC 内部孔隙和纤维等特征。结果表明: 3DP-UHPC 的压缩破坏模式由层条间薄弱界面及孔隙主导, 同时受到纤维沿打印方向的定向分布和打印工艺(条带堆叠)等因素的耦合作用, 为 3DP-UHPC 的材料设计与工程应用提供了数据参考。

关键词: 3D 打印混凝土; 超高性能混凝土; 损伤断裂; X 射线计算断层扫描技术; 各向异性

中图分类号: TU501 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3313-16

网络出版时间: 2025-10-20



混凝土 3D 打印(3DCP)是近年来兴起的一种增材制造技术, 具备智能化、信息化和自动化等特征, 该技术通过逐层堆叠实现材料分布与几何形状的精确控制, 既可应用于创新结构制造^[1-2], 又能显著缩短工期、降低人工成本, 并减少模板的使用^[3-4]。然而, 其进一步推广应用仍面临两方面制约。其一为配筋技术限制: 层叠工艺使传统配筋方法难以实施, 从而制约了打印构件的承载能力^[5]。其二为材料性能限制: 无模板施工易引发干缩裂纹, 加之层间堆叠形成的界面缺陷可能导致耐久性问题, 而打印工艺对材料工作性的苛刻要求限制了材料优化范围^[6]。随着 3DCP 在结构层面上的推广应用, 对其力学性能的要求将日益提高。因此, 亟须研究替代传统配筋技术的增强工法, 并开发具备高性能的可打印建筑材料。

为解决上述问题, 研究者开始将超高性能混凝土(UHPC)引入 3D 打印体系^[7]。UHPC 以无机固体

颗粒材料(包括水泥、细沙、石英粉和硅灰等)、化学外加剂(如高效减水剂等)作为基体材料, 并掺入抗拉强度大于 2000 MPa、直径 0.10~0.30 mm、体积比 1%~10%的钢纤维作为增强材料^[8]。由于不含粗骨料且水灰比较低, UHPC 初始缺陷较少、基体密实度较高且有高强纤维发挥阻裂作用^[9], 其典型抗压、抗拉和抗弯强度可达 150~200 MPa、8~12 MPa 和 20~40 MPa, 均显著优于普通混凝土^[10-11]。近期, 3D 打印 UHPC 已应用于曲线梁桥^[12], 该桥采用空间大曲率设计, 桥面由高强高韧的 3D 打印 UHPC 建造, 展示了该技术在复杂构型结构设计与高效建造方面的潜力。

相较于浇筑构件, 3D 打印超高性能混凝土(3DP-UHPC)的制备需进行配合比设计以满足流动性和可建造性等打印要求。例如, 考虑到浇筑 UHPC 拌合物密实度高、流动性弱的问题, 姚一鸣等^[13]和 Yao 等^[14]在砂浆基体中加入快硬硫铝酸盐水泥、

收稿日期: 2025-04-09。 修订日期: 2025-07-11。

基金项目: 国家自然科学基金(52208296; 52578336)。

第一作者: 张 慧(1990—), 女, 博士, 副教授。

通信作者: 黄宇劼(1988—), 男, 博士, 副教授;

董彦莉(1982—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2025-04-09. Revised date: 2025-07-11.

First author: ZHANG Hui (1990—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: zhangh@nuc.edu.cn

Correspondent author: HUANG Yujie (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

DONG Yanli (1982—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: mpcyujie@nuc.edu.cn; dongyli82@nuc.edu.cn

黏土和乳胶粉,以调整 UHPC 的流动性和可建造性能,制备的试件抗压、抗弯和层间强度分别为 205.2、22.8 MPa 和 9.9 MPa。Arunothayan 等^[15]发现纳米黏土颗粒会增加 UHPC 静、动态屈服应力和表观黏度,制备出的试件早期屈服应力 (60 min)可超 40 kPa。Arunothayan 等^[16],还将 60%的水泥替换为粉煤灰提升了流动性,试件抗压和抗弯强度分别为 144.6 MPa 和 34 MPa。Yang 等^[17]提出在胶凝材料中加入少量纳米碳酸钙有利于颗粒分级并增强密实程度,制备的打印 UHPC 抗压强度为 184 MPa。以上 3DP-UHPC 研究均采用 6 mm 或 10 mm 长度的纤维,原因主要是短纤维便于挤出和打印。然而,目前工程中 UHPC 常用钢纤维长度为 13 mm^[18]。但是,13 mm 长度的钢纤维在挤出过程中易在喷嘴处堆积并发生团聚,导致堵塞和打印中断,严重影响打印效率及工艺稳定性。解决上述问题对于推动中长纤维(≥ 13 mm)增强的 UHPC 在 3D 打印中的应用至关重要。

目前,仅有少量 3D 打印研究掺入了 13 mm 钢纤维。如白刚等^[19]应用化学促凝和物理絮凝协调控制基体的改性方法,通过优化硫铝酸盐水泥、纤维素和黏土比例,所制备 3DP-UHPC 的抗压、抗拉和抗弯强度分别为 130.5 MPa 和 16 MPa。朱春红等^[20]利用金尾矿砂替代部分细骨料制备 3D 打印 UHPC,发现当金尾矿砂掺量为 20%时,UHPC 抗压强度和弯曲强度最高,分别为 119 MPa 和 15 MPa。

另一方面,3DP-UHPC 的力学性能呈现出一定的各向异性特征。例如,Yang 等^[21]研究表明,当钢纤维掺量为 1.0%、长度为 10 mm 时,3DP-UHPC 在 x 、 y 、 z 3 个方向的抗压强度分别为 52.64、81.24 MPa 和 152.33 MPa,其中 z 方向强度较 x 和 y 方向分别高出 189.4%和 87.5%, y 方向强度较 x 方向高出 54.3%。姚一鸣等^[13]发现,在不同钢纤维掺量下(6 mm,体积分数 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%),3DP-UHPC 抗压强度均呈现各向异性特征,掺量为 2.0%时试件 x 、 y 、 z 3 个方向的抗压强度分别为 173.2、179.2 MPa 和 205.2 MPa。可见,打印 UHPC 力学性能各向异性的程度具有较大随机离散性,这与原材料组成、纤维分布和层条间界面等微结构特征有关^[22]。

在微细观尺度下,UHPC 是由纤维、砂浆基体、界面、孔隙和初始裂缝等组分构成的复合材料,其宏观力学行为和破坏特征决定于这些微细观组分的体积分数、形貌、分布和物理力学性能。特别是对

于打印 UHPC 材料,分层成型的方式会引入层条间薄弱界面和局部非连续性^[6],也可能影响钢纤维的分布^[23–24]。因此需进一步开展 3DP-UHPC 微细观结构特征对各向异性力学性能的多尺度影响机理的系统性研究。

综上,为阐明微细观结构特征对 3DP-UHPC 各向异性宏观力学性能的影响机理,本研究利用 13 mm 长度钢纤维,制备了不同纤维体积分数(0%、0.5%、1.0%、2.0%)的 3DP-UHPC,并利用数字图像相关技术(DIC)获得了其在压缩荷载下裂缝的起裂、扩展和贯通等行为。基于微观 X 射线计算断层扫描(X-CT)技术获得了 3DP-UHPC 内部层条间界面、纤维分布、孔隙的微结构特征,揭示了 3DP-UHPC 内部结构特征对其损伤断裂演化的多尺度影响机理。

1 实验

1.1 材料组成与配比设计

1.1.1 3DP-UHPC 砂浆基体的原材料 用于制备 3DP-UHPC 砂浆基体的主要原材料包括:符合国家标准 GB175—2023^[25]的 P.O 52.5 普通硅酸盐水泥(OPC)、比表面积为 6339 m²/kg 的硅灰,以及莫氏硬度为 7.0 的石英砂。石英砂按中值粒径(D_{50})分为细砂(83.9 μm)、中砂(411.4 μm)和粗砂(1073 μm) 3 种级配。为调节拌合物流动性,掺入了一种基于三聚氰胺基高性能水溶性减水剂(HRWRA),为填充微细孔隙,加入粒径范围为 10~100 nm 的纳米碳酸钙(NCC)。增强材料采用镀铜平直钢纤维,直径 0.2 mm,长度 13 mm,详细参数见表 1。

表 1 镀铜钢纤维参数
Table 1 Parameters of copper-coated steel fibres

Diameter/mm	Length/mm	Elastic modulus/GPa	Density/(g·cm ⁻³)	Strength/MPa
0.2	13	200	7.85	>2400

1.1.2 基于颗粒紧密堆积原理的配比设计 所用水泥、硅灰和 3 种石英砂的粒度分布通过型号为 Bettersize2600 的激光粒度分析仪测得。采用修正的 Andreasen 和 Anderson (A & A)^[26]模型计算 3DP-UHPC 砂浆基体中各组分的混合比例,以最大化材料的颗粒堆积密度为目的。在修正的 A & A 模型中,目标粒径分布曲线的数学表达式如下:

$$P_w(D) = \frac{(D^q - D_{\min}^q)}{(D_{\max}^q - D_{\min}^q)} \quad (1)$$

式中: D 为粒径, $P_{\text{tar}}(D)$ 为粒径小于 D 的总颗粒的比例; D_{max} 和 D_{min} 分别为混合物的最大和最小粒径。本研究中, $D_{\text{max}} = 2600 \mu\text{m}$, $D_{\text{min}} = 0.142 \mu\text{m}$ 。参数 q 是分布模量, q 控制了 $P_{\text{tar}}(D)$ 的曲率, 本研究中采用 $q=0.23$ ^[27]。图 1 展示了各原材料的粒径分布曲线及所配 3DP-UHPC 基体的粒径分布拟合结果。可看出, 基体的粒径分布曲线与目标粒径分布相似, 拟合优度达 $R^2 = 0.9904$ 。各组分比例依据目标粒径分布曲线, 结合最小二乘法进行优化计算, 最终确定的配合比列于表 2 中。

表 2 3DP-UHPC 配合比

Table 2 Mixture proportions of 3DP-UHPC $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$							
OPC	Silica fume	Fine sand	Medium sand	Coarse sand	Water	HRWRA	NCC
0.70	0.30	0.25	0.475	0.775	0.22–0.23	0.029	0.026

Note: All values are mass ratios of the binder mass, except for fibre volume fraction; Fibre volume fraction is 0, 0.5%, 1.0%, 2.0%, respectively.

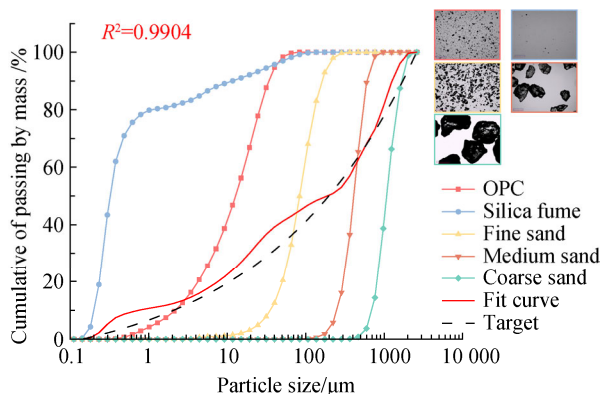


图 1 基于紧密堆积原理的 3DP-UHPC 基体材料粒径分布、微观结构、拟合曲线与目标曲线

Fig. 1 Particle size distribution, microstructure, fitting curve, and target curves of 3DP-UHPC mortar matrix based on dense packing theory

1.2 试件制备

1.2.1 拌合过程 3D 打印和浇筑的试件组编号与钢纤维掺量在表 3 中给出, 如 C-F1.0 代表钢纤维体积分数为 1.0% 的浇筑组, P-F1.0 代表钢纤维掺量为 1.0% 的 3D 打印组, 所有试件的基础配合比均采用表 2。根据研究^[15], 钢纤维掺量增加会显著提高材料的屈服应力及纤维间的互锁效应, 因此需提高 W/B 比以增大材料流动性(详见 1.3 节)。同时, 随着材料屈服应力上升, 挤出所需力增大。为避免螺旋挤出杆在高阻力下卡滞, 需将其转速降至最低($2\pi \text{ r/s}$), 以提升扭矩并确保材料能顺利挤出。此外, 为保证打印条带的连续性与宽度稳定, 应根据纤维体积分数调整打

印头的水平移动速度。各参数详见表 3。

表 3 试件编号、水胶比、流动度及打印头移动速度
Table 3 Specimen IDs, w/b ratio, flowability, and print head speeds under varying steel fibre volume fractions

Volume fraction of steel fibre/%	Cast ID	Printed ID	W/B ratio	Flowability/mm	Printing head speed/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	C-F0	P-F0	0.2225	127.8	50
0.5	C-F0.5	P-F0.5	0.2250	133.9	48
1.0	C-F1.0	P-F1.0	0.2275	144.6	45
2.0	C-F2.0	P-F2.0	0.2300	151.9	40

Note: In the specimen ID, the letters C, P, and F represent the cast group, printed group, and fibre volume fraction, respectively. For example, “P-F0.5” refers to a 3DP-UHPC mixture with a fibre volume fraction of 0.5%.

在搅拌过程中, 为了确保减水剂能够快速发挥作用, 先将减水剂与 100% 的水混合制成溶液, 并确保溶液均匀且无絮凝现象。再将干燥物料倒入 60 L 的搅拌机中预混 3 min。接着加入减水剂溶液, 继续搅拌 5 min。之后缓慢加入钢纤维, 需确保纤维均匀分散, 避免成团。最后, 继续搅拌 10 min。

1.2.2 流动度测试 采用 NLD-3 型电动跳桌流动度测定仪, 依据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[28]对 3DP-UHPC 材料的流动度进行测试。需指出的是, 测试的 3DP-UHPC 材料中掺有钢纤维。试模由截锥圆模和模套组成, 内表面光洁平整。圆模尺寸为: 下口内径 100 mm、上口内径 70 mm、高度 60 mm, 下口外径 120 mm, 壁厚大于 5 mm。

测试过程中, 先将拌合好的 3DP-UHPC 材料分两次装入圆模: 第一次填入约 2/3 高度, 使用捣棒捣实 15 次后, 继续填入剩余部分, 使其高出圆模约 20 mm, 再插捣 10 次。随后使用小刀刮平模具上方多余的浆体, 并清理跳桌上滴落的残料。缓慢提起模具后, 启动跳桌跳动 25 次, 随后使用量程为 300 mm 的卡尺测量试样在互相垂直方向的两个扩展直径, 取其平均值作为流动度。整个实验过程应在 6 min 内完成。

图 2 上排展示了不同钢纤维掺量下(分别对应 0%、0.5%、1.0%、2.0%)的 UHPC 拌合物流动度测试结果, 下排为对应钢纤维掺量下的打印条带表面形貌, 随着钢纤维掺量的增加, 打印层表面的粗糙度增加。

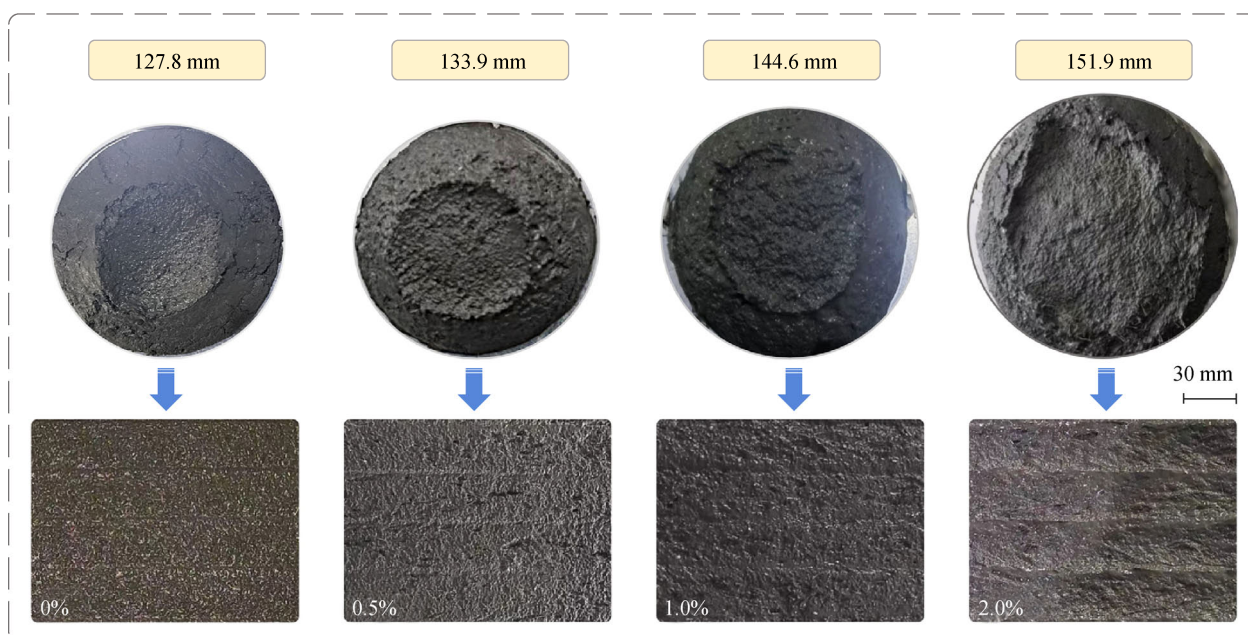


图2 不同钢纤维体积分数 3DP-UHPC 的流动性与打印条带表面特征

Fig. 2 Flowability and printed filament surface characteristics of 3DP-UHPC with different steel fibre volume fractions

1.2.3 3D 打印与浇筑试件的制备方法 使用钢架龙门式 3D 打印机,有效打印空间为 1.8 m(长)×1.7 m(宽)×1.5 m(高),机械控制精度为 ± 0.1 mm。打印头配有内径为 30 mm 的圆形可拆卸喷嘴(图 3),安装于龙门架系统的执行器上,并通过计算机实现运行控制。通过 CAD 软件绘制三维模型并导出 STL 格式文件,利用定制程序控制三轴直线运动。打印头水平移动速度为 40~45 mm/s。打印条带的宽度与厚度分别为 36 mm 和 17 mm。

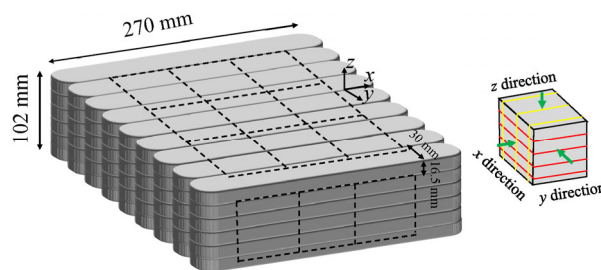
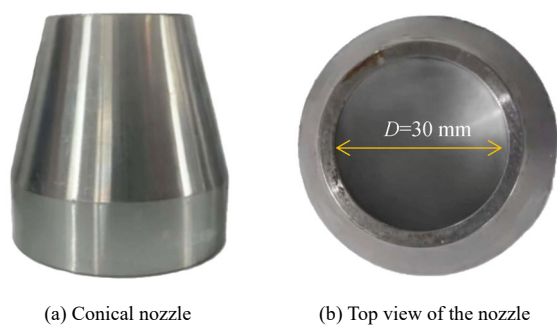


图4 试件切割示意图与各向异性方向定义

Fig. 4 Specimen cutting and anisotropic direction definition



(a) Conical nozzle

(b) Top view of the nozzle

图3 出口直径为 30 mm 的锥形喷嘴及其俯视图

Fig. 3 Conical nozzle with 30 mm outlet and its top view

如图 4,首先打印出尺寸为 270 mm×270 mm×102 mm 的块体,随即将所有块体置于室温(23 ± 3) °C 覆膜养护 24 h 以减少早期收缩裂缝,再将块体置于热水养护箱中(水位高于块体约 50 mm),以 90 °C 高温养护 72 h(总养护周期 4 d)。

养护完成后,采用红外线桥切机(配备金刚石锯片和红外线定位功能),从块体中切割 70.7 mm 立方体抗压试件。切割位置位于块体厚度方向的中心,以去除打印过程中形成的表面不平整区域,避免影响抗压强度测试。由于采用湿法切割,且试件中钢纤维直径较小,不会引起表面缺陷,切割后试件表面平整,无需额外处理。图 4 展示了试件的切割示意图及各向异性方向的定义(图 4 中红色实线代表层间,黄色实线为条间);图 5 为打印设备、打印流程以及后续的养护与切割过程。

图 6 展示了浇筑 UHPC 试件的制备流程。所用材料的配合比与 3D 打印试件保持一致。制备过程中,均匀混合后的基体材料分层浇入已涂脱模剂的模具中,并进行 20 s 振动排气。浇筑完成后,覆盖保鲜膜养护 24 h,脱模后在热水中继续养护 72 h,养护条件与打印试件相同。

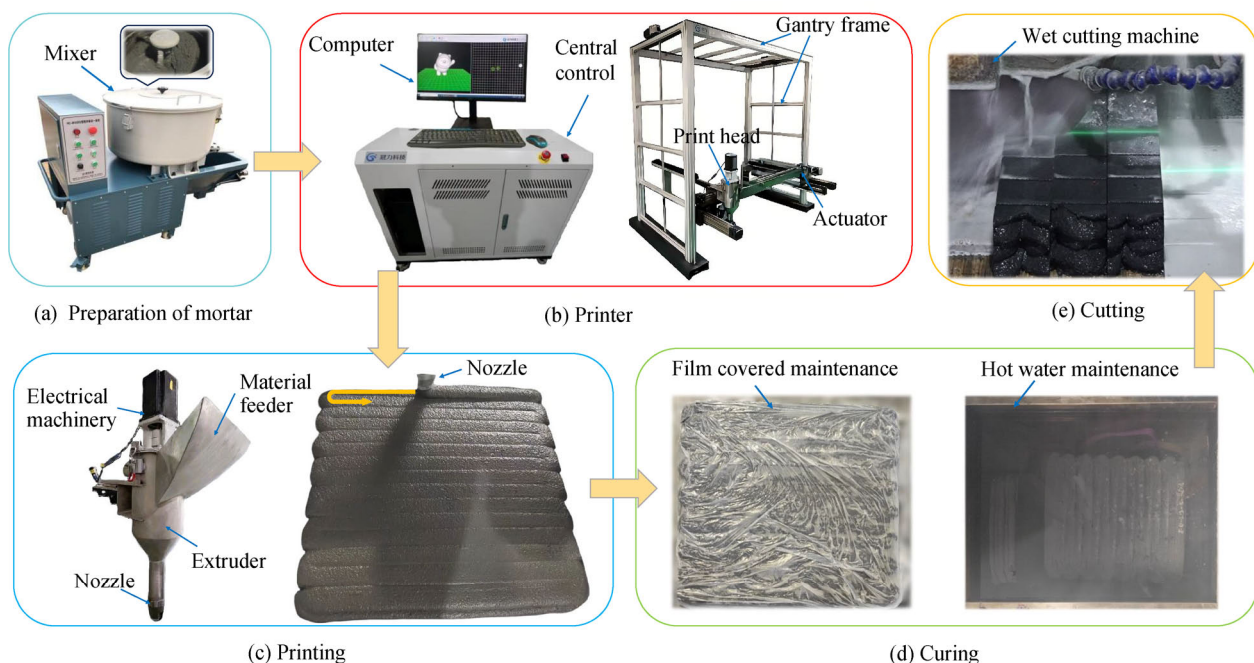


图 5 拌合、打印、养护与试件切割流程

Fig. 5 Flowchart of mixing, printing, curing, and specimen cutting



图 6 浇筑 UHPC 试件的成型与养护

Fig. 6 Fabrication and curing procedures of mold-cast UHPC specimens

1.3 测试方法与设备

1.3.1 计算断层扫描(CT)实验 为观察 3DP-UHPC 内部孔隙结构和钢纤维结构特征,采用 X-CT 技术,并利用 Avizo 软件对孔隙与钢纤维进行三维重建与定量分析。X-CT 通过多角度采集 X 射线图像,重建获得样品内部的三维灰度图像^[29-30]。由于材料密度不同,其对 X 射线的吸收能力也存在差异,从而在图像中呈现出不同的灰度值:钢纤维具有最高的灰度值(最亮),砂浆基体灰度居中,而孔隙的灰度值最低,接近黑色。具体图像示意图见 2.1 节。图像重建后,通过灰度阈值分割与相关算法,提取孔隙的数量、体积和连通性等参数,并获取钢纤维的空间分布、取向角、体积分数等特征,为 3DP-UHPC 压缩力学行为分析提供支撑。

研究采用 RMCT4000 型 X-CT 设备,对边长 70.7 mm、钢纤维掺量 1.0% 的立方体试件进行扫描。扫描精度为 50 μm ,设备配备微焦点射线源(300 kV/500 W)与非晶硅探测器,扫描范围 $\phi 665\text{ mm}\times$

800 mm,样品最大 $\phi 900\text{ mm}\times 1100\text{ mm}$,载重 $\leq 150\text{ kg}$ 。

1.3.2 DIC 实验 采用 DIC,在物体表面喷涂散斑并捕捉变形前后图像,基于高斯加权归一化平方差和拉格朗日插值形函数构建亚像素迭代优化模型,实现位移场高精度求解^[31]。DIC 技术的优势在于非接触式测量、高精度、全场应变分析和可视化能力,能够直观反映物体表面的应力分布状态。试件表面先喷涂哑光白色底漆,干燥后再施加黑色散斑以形成特征标记。需指出的是,由于 3D 打印试件经过切割后表面平整,其散斑喷涂方式与浇筑试件一致。接着,使用工业相机(2000 万像素)精确捕捉变形前后的图像数据。最后,通过 Vic-2D 软件分析图像,测定表面散斑的位移及应变分布。

1.3.3 压缩实验 如图 4 所示,为研究 3DP-UHPC 在压缩荷载下的各向异性力学性能,试件需进行 x、y、z 3 个方向的压缩测试。为保证试验数据的可靠性,每个加载方向进行不少于 6 个试件的测试,其中至少 3 个结果满足有效性判定标准,

即变异系数(CoV)不超过 15%^[32], 定义为标准差(σ)与算术平均值(μ)之比。抗压强度测试采用 WAW-1000 型微机控制电液伺服万能试验机, 加载方式为恒定位移控制, 加载速率为 0.06 mm/min。3D 打印压缩试件的命名规则如下: 如“P-F1.0-Z”, 其中“P”表示打印试件, “F1.0”表示钢纤维掺量为 1.0%, “Z”表示沿着 z 方向压缩。同时, 开展了浇筑试件的压缩实验。

2 结果和讨论

2.1 基于 CT 的 3DP-UHPC 微细观结构特征分析

2.1.1 孔隙结构特征 采用 Avizo 软件对 CT 扫描数据进行处理, 数据为 8 位灰度图, 灰度范围为 0~255。首先, 考虑到 X 射线散射效应^[33]会导致图像边缘区域质量较低的现象, 需对原始 raw 数据文件进行三维裁剪。在保留层条间等主要结构特征的前提下, 选取边长为 54.95 mm 的中心区域进行分析。

其次, 进行孔隙、纤维、砂浆各相材料的阈值分割。一般需通过 Avizo 软件的 Line-probe 方法初步确定阈值范围, 再开展孔隙体积分数阈值的敏感性分析精确定阈值。如图 7 所示, 随机选取 3 张二维切片, 分别选取 3 条线段 AB、CD、EF, 并在每条线段上均匀布设 500 个采样点, 用于采集和分析灰度值分布。结果显示, 灰度值在 0~255 内波动, 反映出线段路径上穿过了不同材料相, 主要包括钢纤维、砂浆基体以及孔隙区域(包括普通孔隙和层条间界面孔隙)。初步分析确定钢纤维(亮白色区域)和孔隙(深黑色区域)的灰度阈值范围分别为 145~255 和 0~60, 介于两者之间的灰度值 61~144 代表砂浆基体。

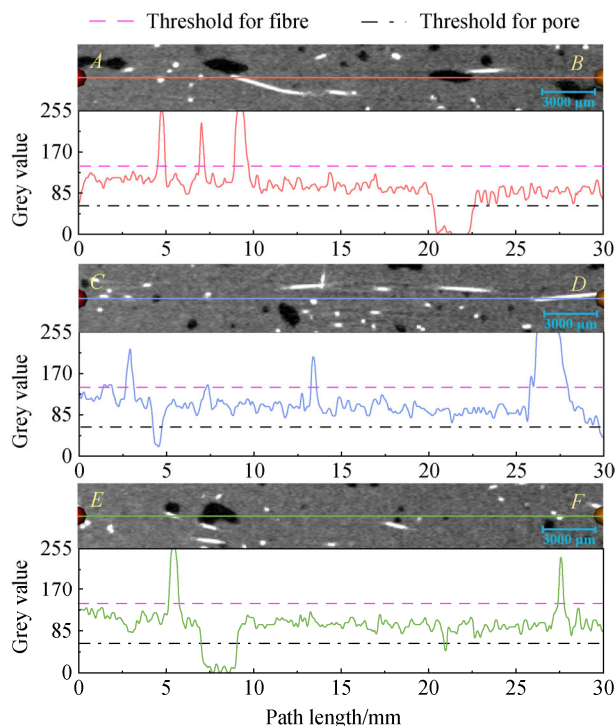
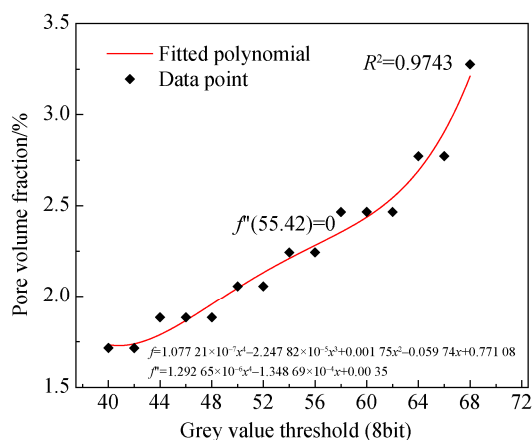


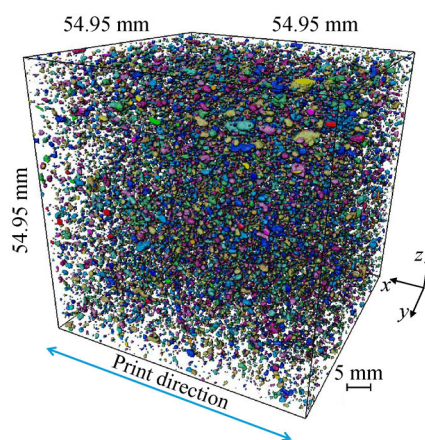
图 7 基于 Line-probe 方法的 3DP-UHPC 灰度阈值的初步分析(孔隙 0~60、砂浆 61~144、纤维 145~255)

Fig. 7 Grey value threshold analysis of 3DP-UHPC using the Line-probe method (pores 0~60, mortar 61~144, fibres 145~255)

进一步, 开展孔隙体积分数阈值(φ_p)的敏感性分析精确定阈值。图 8a 展示了 φ_p -孔隙阈值曲线, 通过拟合得到该曲线斜率最小的位置, 即二阶导数为零的点确定阈值^[34]。根据分析结果, 确定最优孔隙阈值范围为 0~55。基于该阈值提取孔隙, 并进行三维可视化体积渲染的孔隙分布如图 8b。共计提取孔隙 81 511 个, 总体积约 3710 mm³, 总孔隙率 2.24%, 低于浇筑 UHPC (3.45%^[34]与 3.9%~5.9%^[35])。



(a) Optimal threshold determination



(b) 3D rendering of pore structure

图 8 基于四次多项式拟合的孔隙体积分数阈值敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of pore volume fraction to threshold based on the fourth-order polynomial fitting

图 9 展示了其中一张二维切片在不同阈值下对应的孔隙识别图像。当阈值过高时, 切片中某些砂浆基体将被误划分为孔隙, 从而增大孔隙率。相反, 则可能遗漏部分孔隙, 导致孔隙率较低。

图 10 通过三维形态学方法对孔隙等效直径(d_e)进行了筛分, 展示了孔隙的等效直径和数量等特征,

分别对应 0~3200 μm 、800~3200 μm 、1600~3200 μm 区间内的孔隙等效直径。根据分析, 等效直径在 0~400 μm 内的孔隙数量占比 79.6%, 0~800 μm 占比 96.5%, 大于 1600 μm 的孔隙仅占 3.5%。受 CT 设备分辨率和试件尺寸限制, 62 μm 以下的孔隙未能被检测到。

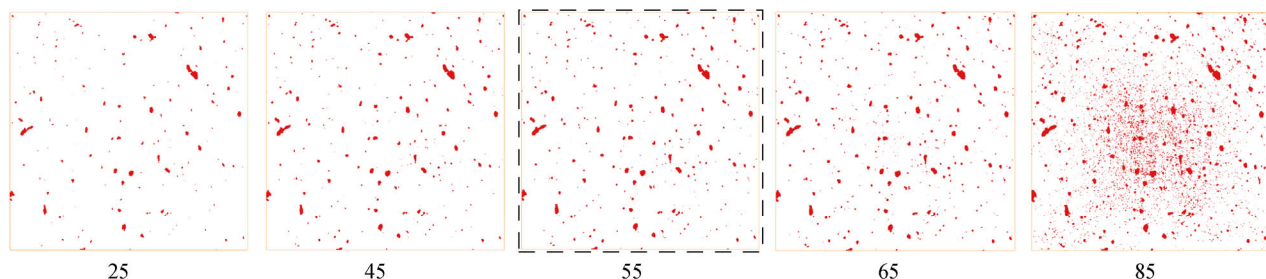


图 9 不同灰度阈值下同一二维切片中孔隙识别的图像

Fig. 9 Pores identified using different thresholds in the same image slice

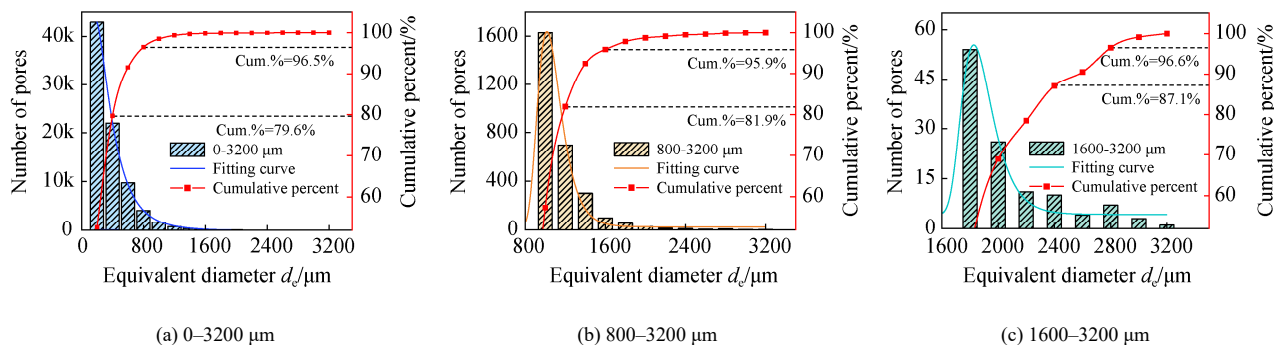


图 10 孔隙等效直径(d_e)频率分布

Fig. 10 Frequency distribution of pores' equivalent diameters (d_e)

图 11 展示了不同 d_e 区间内的孔隙数量及其对应的平均球形度($\bar{\varphi}$)。其中, 等效直径被划分为 5 个区间: 0~250 μm 、250~500 μm 、500~1000 μm 、1000~2000 μm 、2000~3200 μm 。结果显示, 随着等效直径减小, 孔隙数量显著增加, $\bar{\varphi}$ 也相应提高。从 x-y、y-z、x-z 平面观察单个孔隙形貌可见, 小尺寸孔隙多呈近球形或椭球形, 对应的 $\bar{\varphi}$ 值趋近于 1, 这与常见浇筑 UHPC 试件中的孔隙形态相似^[34-35]。在 2000~3200 μm 范围内, 存在 37 个较大的不规则孔隙, 这些孔隙的体积占总孔隙体积的 7.805%, 占试件体积的 0.174%。经过观察发现, 这些孔隙均位于打印层条间界面处。其余 92.195% 的孔隙形状接近规则的球形或椭球形。在此基础上, 依据孔隙的等效直径和形成机制将其划分为 2 类: 一类为等效直径在 2000~3200 μm 范围内、由堆叠成型工艺产生的打印层间及条带间

的结构性孔隙(2000~3200 μm), 另一类为等效直径 ≤ 2000 μm 、砂浆自身在拌合或硬化过程中形成的砂浆内部孔隙。

需指出的是, 本研究 3DP-UHPC 试件的孔隙平均等效直径($d_e = 264$ μm)较 Zhang 等^[34]报道的浇筑 UHPC($d_e = 700$ μm)显著降低。这种差异可能源于拌合物在打印过程中内部气泡的压实与排出。需注意的是, 需开展更多微细观结构分析, 才能得出确定性的结论。综上, 尽管引入了层条间界面孔隙, 但 3DP-UHPC 总孔隙率较小。另外, 经过孔隙连通性分析(Axis Connectivity), 二值图像中孔隙标记均为 0(min-max: 0...0), 未检测到连通孔隙区域, 模块输出节点数与喉道数均为 0, 因此可判定该试件整体不具备连通性喉道。验证了本研究所设计的打印 UHPC 配合比在颗粒级配与堆积密实性方面表现优异, 有助于提升材料强度与耐久性。

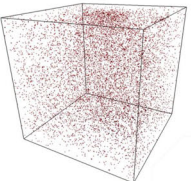
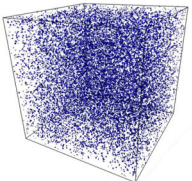
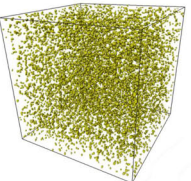
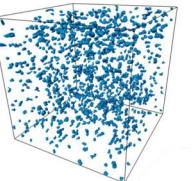
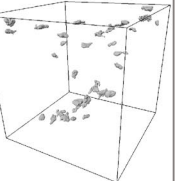
d_e	0.00–0.25 mm	0.25–0.50 mm	0.50–1.00 mm	1.00–2.00 mm	2.00–3.20 mm
					
n	49 958	20 837	9505	1174	37
$x-y$					
$y-z$					
$x-z$					
$\bar{\psi}$	0.98	0.90	0.85	0.76	0.59

图 11 不同等效直径(d_e)孔隙的数量与平均球形度($\bar{\psi}$)

Fig. 11 Pore quantity and mean sphericity ($\bar{\psi}$) at different equivalent diameters (d_e)

2.1.2 纤维结构特征 图 12 通过高精度三维重构技术提取了钢纤维掺量 1.0%的打印 UHPC 试件中的纤维分布情况,纤维提取分为 3 步:第 1 步,通过灰度值的阈值分割提取高密度纤维相,计算得到钢纤维的体积分数是 1.88%,相较于设计值 1.0%偏差较大,原因是存在某些孤立或附着于纤维的高密度矿物质干扰(如图 12a)。第 2 步通过形态学滤波方法设定三维连续长度阈值($\text{Length } 3D>1.4 \text{ mm}$),以去除孤立球状矿物质。该阈值基于球状物与钢纤维

(13 mm)在 $\text{Length } 3D$ 维度上的显著差异,可较好地地区分球状物与钢纤维,并经可视化筛分验证,从而确保剔除的准确性,筛除后纤维体积分数降至 1.51%(图 12b)。第 3 步消除附着于纤维的矿物质,通过圆柱体相关模型(直径 0.2 mm)进行纤维轴向的拓扑重构,三维重构后的纤维空间分布如图 12c 所示,此时钢纤维的体积分数为 0.83%,略低于设计值 1.0.0%,这与搅拌、切割过程中的纤维不均匀分布有关。

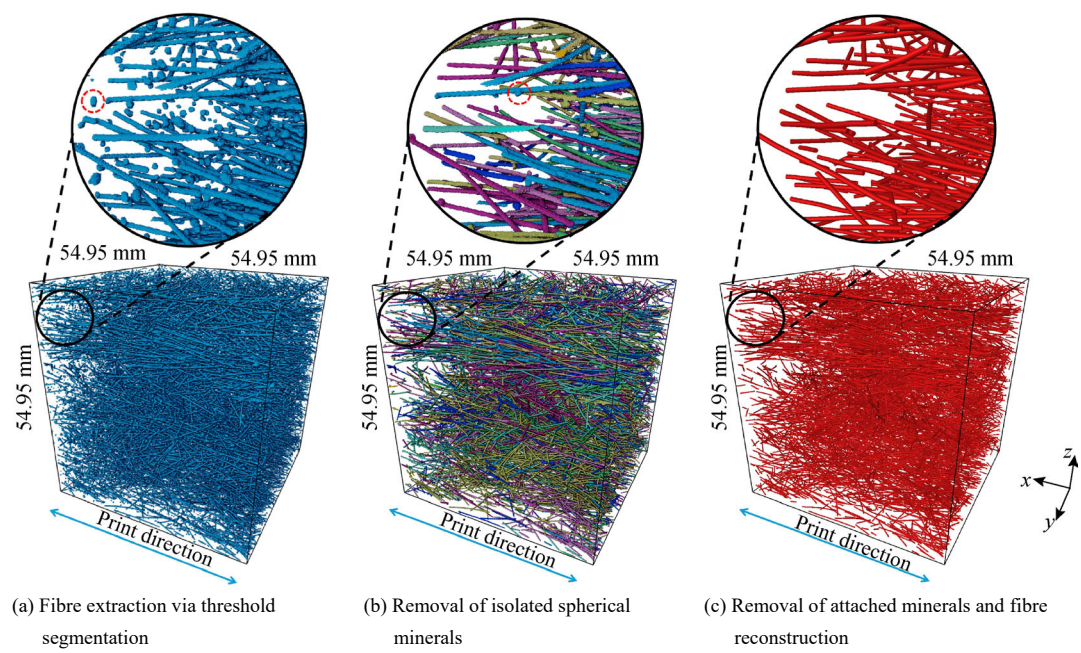


图 12 钢纤维三维重建流程: 阈值分割提取纤维, 消除孤立球状矿物, 去除附着矿物并重建纤维

Fig. 12 3D reconstruction process of steel fibres: threshold segmentation to extract fibres, removal of isolated spherical minerals, removal of attached minerals and fibre reconstruction

为评估纤维的空间分布, 图 13a 定义了 2 个朝向角度 φ 和 θ , 分别为钢纤维在 x - y 和 x - z 平面的二维投影与 y 轴和 z 轴夹角。以图 13b 中平行于打印方向的钢纤维为例, 其 $\varphi = 90^\circ$ 且 $\theta = 90^\circ$ 。

图 14a 和图 14b 分别展示了 P-F1.0 试件中钢纤维朝向角度 φ 和 θ 的分布直方图。 φ 角和 θ 角均反映纤维具有定向的特征, 即纤维趋向于沿打印方向

x 分布。这是由于打印过程中喷嘴挤出和 3DP-UHPC 材料流动的协同作用, 促使钢纤维移动并沿 x 方向定向排列。但是, x - z 平面中 θ 角定向程度更明显, $\theta = 75^\circ \sim 90^\circ$ 的纤维占比可达 65.2%, 远高于 $\varphi = 75^\circ \sim 90^\circ$ (x - y 平面) 的比例 32.8%。原因是打印层高 (17 mm) 小于打印宽度 (36 mm), 层高范围内形成的空间约束使 θ (x - z 平面) 的定向效果更显著。

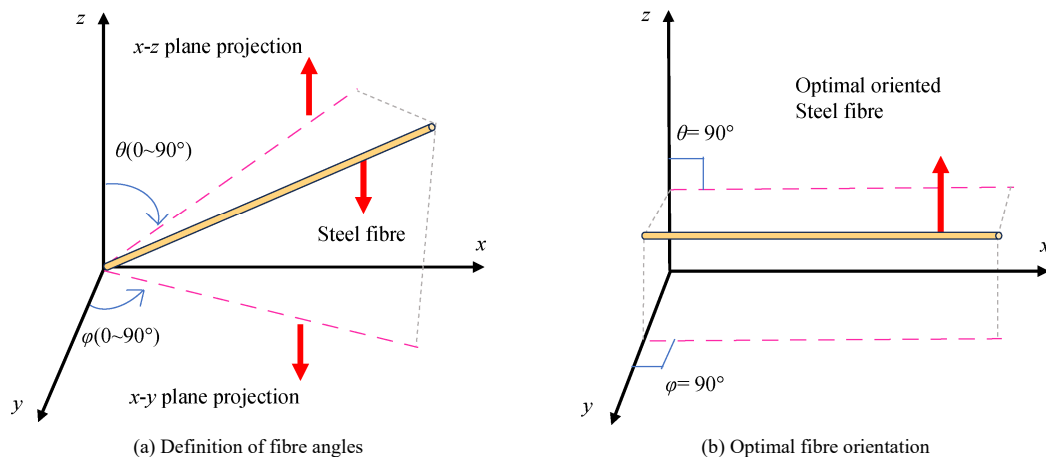


图 13 钢纤维空间分布的朝向角度定义(φ 和 θ)

Fig. 13 Definition of spatial orientation angles (φ and θ) for steel fibres

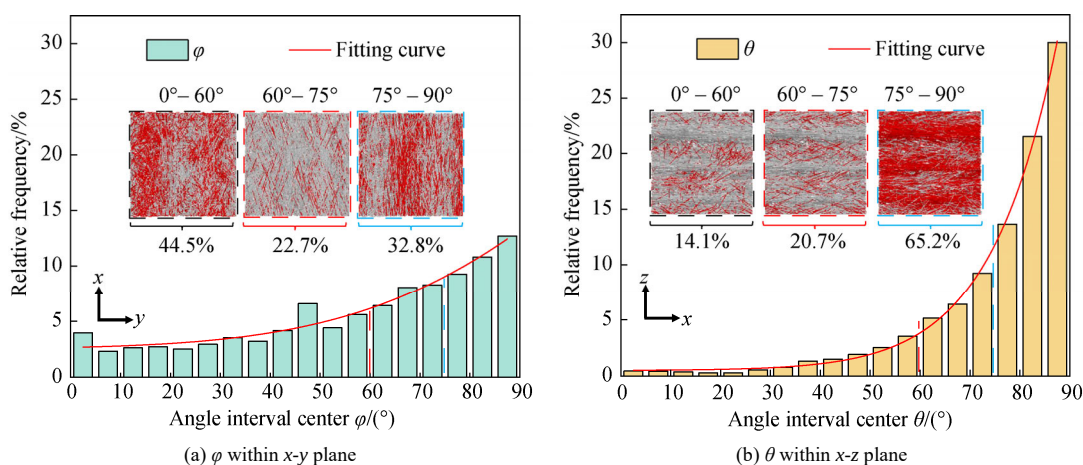


图 14 3DP-UHPC 试件的钢纤维空间取向统计

Fig. 14 Statistical distribution of fibre orientation in 3DP-UHPC specimens

为直观对比钢纤维在 φ 角与 θ 角方向上的分布特征, 图 15a 呈现了其在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的数量分布及对应的柱形散点图。结果表明, θ 角在高角度区间的数量峰值约为 φ 角的 2 倍, 且数据点密度显著更高。图 15b 展示了 φ 和 θ 双角度的朝向分布图, 根据统计, 约 26.8% 纤维 (1711 根) 同时满足高定向标准, 即 φ 和 θ 角度均在 $75^\circ \sim 90^\circ$, 约 52% 纤维 (3324 根) 的 φ 和 θ 角度均在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内。纤维的定向

分布会影响 UHPC 试件的力学性能, 具体见 2.3 节。值得指出的是, 为更全面了解不同掺量及成型方式 (打印与浇筑) 对材料性能的影响, 有必要开展更多试件的微细观结构研究。

2.2 基于 DIC 技术的压缩损伤破坏特征分析

图 16 展示了打印试件 P-F2.0-Z 与 P-F2.0-X 的压缩应力-应变 (σ - ϵ) 曲线与 DIC 测试结果 (主应变分布云图), 拍摄面为试件的 x - z 平面。曲线上的 I~VI

点依次对应弹性阶段点I、初裂点II及裂缝扩展阶段点III~VI。其中,点I是未出现裂缝的点,点II为出现位移场不连续且主应变约为 0.065 时的初裂点(第 1

条明显裂缝),点III~VI依据裂缝扩展程度选取,用于表征裂缝发展过程。图 16a 和图 16b 所示试件中,红色实线代表层间,黄色实线为条间。

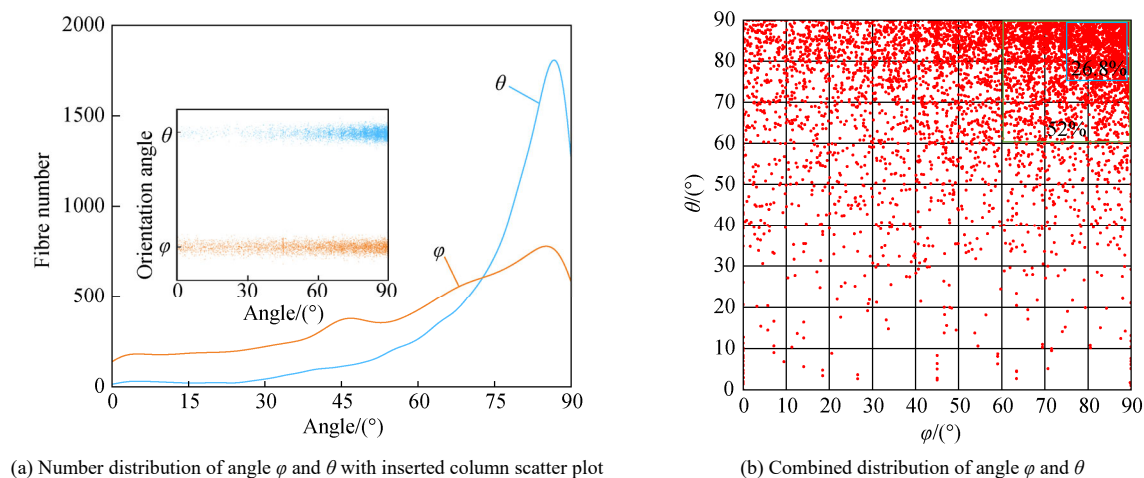


图 15 3DP-UHPC 试件的钢纤维角度分布分析

Fig. 15 Analysis of steel fibre orientation in 3DP-UHPC specimen

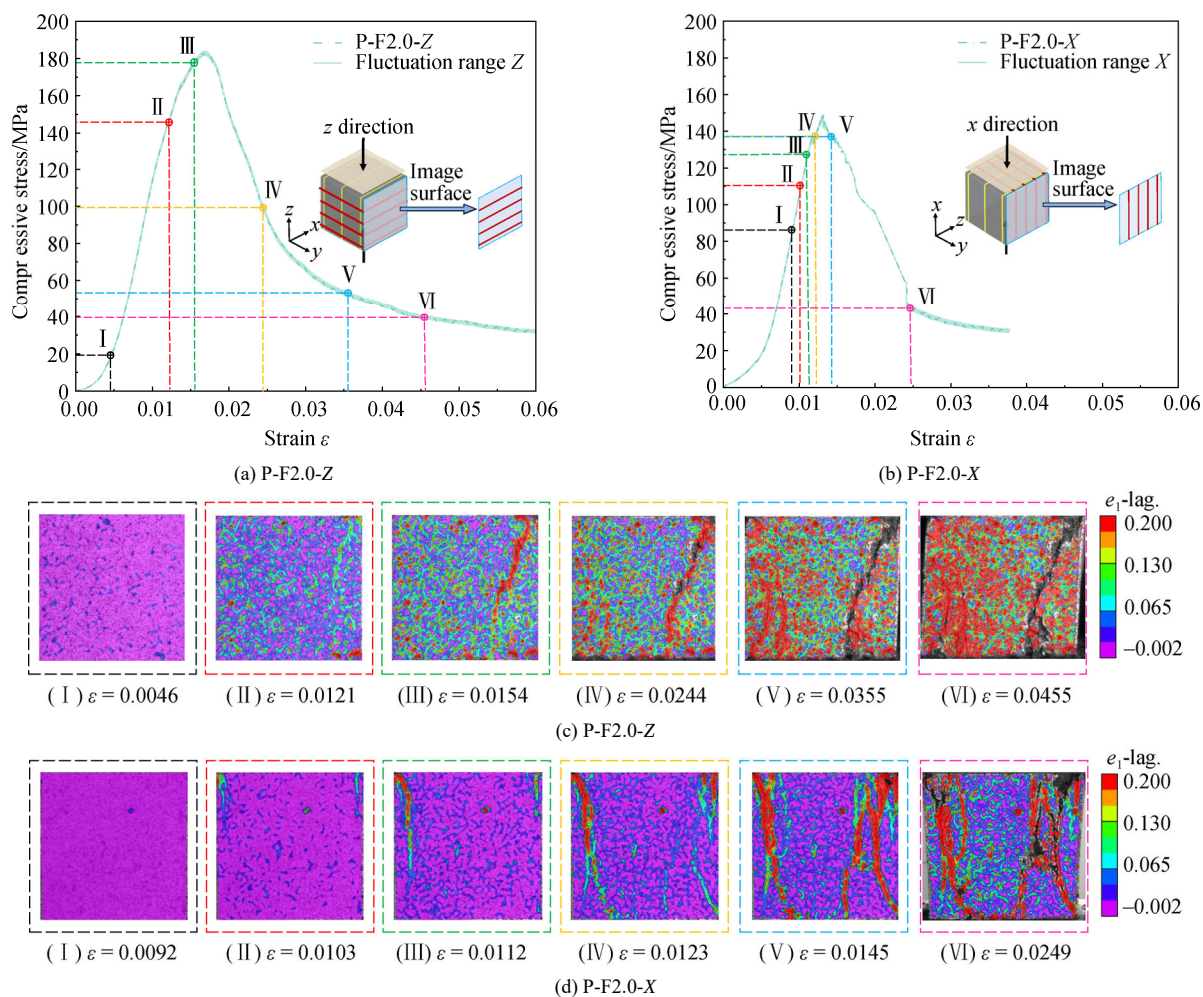


图 16 打印试件的压缩应力-应变曲线与 DIC 测试结果(加载名义应变 ε , 主应变 e_1)

Fig. 16 Compressive stress-strain curves and DIC test results of printed specimens (loading nominal strain ε , principal strain e_1)

由图 16 可见, 在弹性阶段, 2 组试件均未出现裂缝。P-F2.0-Z 与 P-F2.0-X 试件的初裂荷载分别为峰值荷载的 80% 和 68%, 体现了 P-F2.0-X 试件由于层条间弱界面更易开裂。在裂缝扩展过程中, P-F2.0-Z 试件的 I~VI 点分布均匀, 而 P-F2.0-X 试件的 I~V 点集中于峰值荷载附近, 表明其裂缝扩展更为迅速。在 VI 点, P-F2.0-X 出现多条沿层间界面扩展的纵向裂缝。上述差异主要是由于纤维朝向和层条间界面引起, 详见图 18 所示破坏机理图。

图 17 展示了纤维掺量为 1.0% 和 2.0% 浇筑

试件 C-F1.0 和 C-F2.0 的压缩曲线与 DIC 测试结果。图 17c 所示, 纤维掺量为 1.0% 的浇筑试件在主应力图左侧较早出现裂缝并伴有剥落破坏(红色实线框内), 且纤维掺量为 0.5% 和 1.0% 的低掺量试件中, 该类破坏模式的发生概率相对较高。主要原因在于纤维掺量较低时, 砂浆屈服应力较小, 钢纤维在振捣过程中易发生沉降, 难以形成均匀的悬浮分布; 同时, 材料颗粒和气泡在振动作用下分别下沉和上浮, 使试件底部更加致密, 导致整体力学性能分布不均^[35-37]。

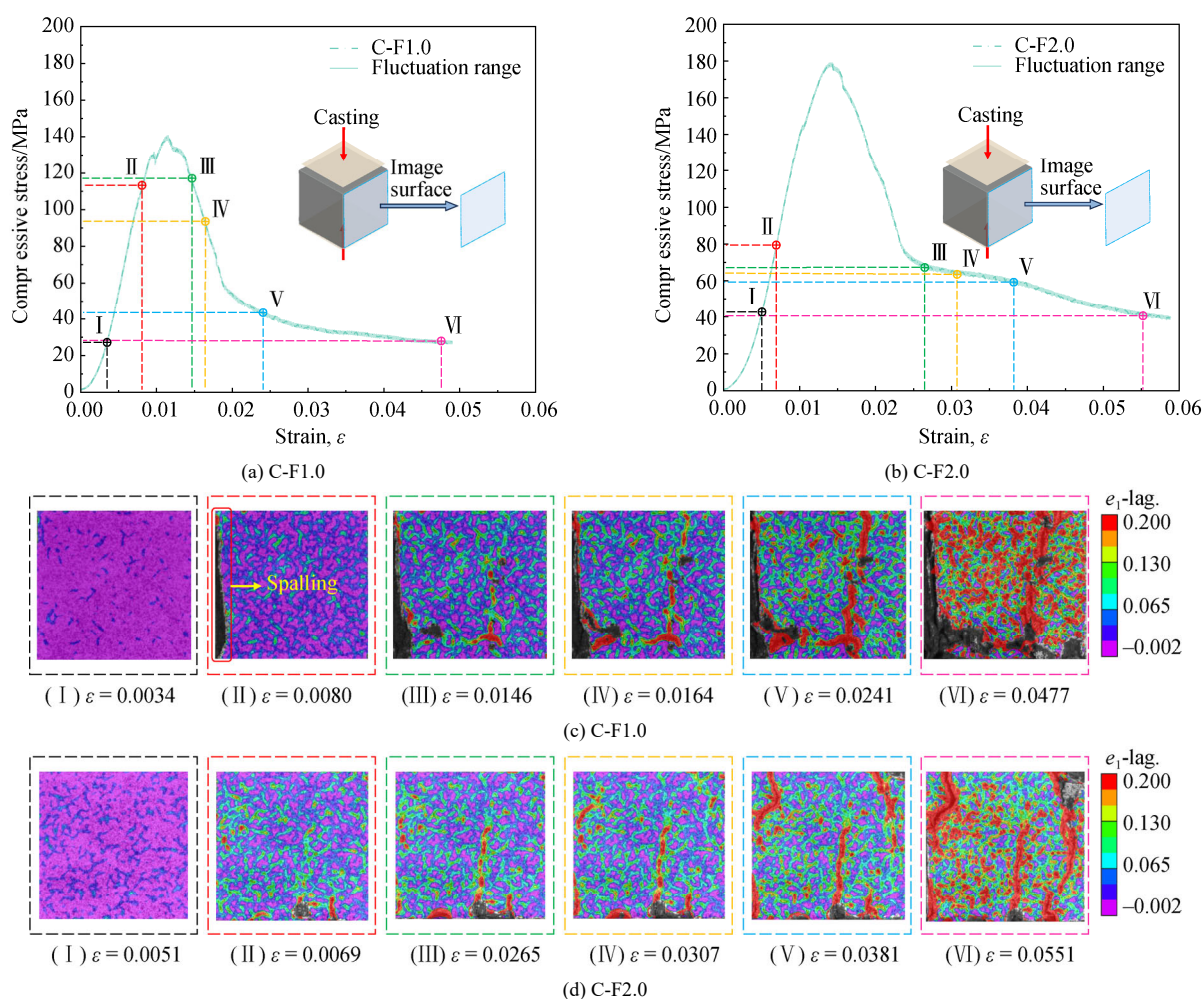


图 17 浇筑试件压缩应力-应变曲线与 DIC 测试结果(加载名义应变 ϵ , 主应变 e_1)

Fig. 17 Compressive stress-strain curves and DIC test results of cast specimens (loading nominal strain ϵ , principal strain e_1)

如图 17d 中 I~VI 所示, 在纤维掺量为 2.0% 的试件(C-F2.0)中, 剥落现象基本消失, 其原因在于钢纤维掺量的增加显著提升了 UHPC 基体的屈服应力, 有效抑制纤维沉降, 并阻碍材料颗粒和气泡在振动过程中的下沉与上浮, 从而改善整体均质性, 避免早期开裂及由此引发的剥落破坏。此外, 钢纤维体积分数的增加也有利于减少孔隙数量^[35]。对于纤维

掺量 2.0% 的浇筑试件, 加载末期时裂缝未完全贯通, 与 3D 打印试件的裂缝形态存在显著差异, 这主要与两者的纤维分布方式不同。浇筑试件中钢纤维分布和朝向较为随机, 而 3D-UHPC 则展现出纤维定向特征, 详见 2.1.2 节。

图 18 展示了 3D 打印和浇筑 UHPC 的受压破坏机理图, 图中标出了纤维、层条间界面及层条

间孔隙, 主裂缝与次裂缝。图 18a 为钢纤维掺量为 0% 的打印试件在 z 方向的受压破坏图。可以看到, 主裂缝宽度较大, 且次裂缝出现在层间界面。图 18b 为钢纤维掺量为 0.5% 的打印试件在 z 方向的受压示意图, 由于钢纤维桥联作用(图中桥联主裂缝和次裂缝的钢纤维分别用红色和蓝色标记), 裂缝宽度显著降低^[38]。图 18c 展示了钢纤维掺量为 2.0% 的打印试件在 x 方向的受压示意图, 图 18c 中裂缝主要集中在层间界面和层间孔隙处。同时, 由于受压方向与钢纤维的定向方向一致, 纤维对于竖向裂缝的桥联作用较弱。图 18d 为钢纤维掺量为 2.0% 的浇筑试件的受压示意图。钢纤维的随机分布对裂缝的扩展有一定抑制作用, 裂缝更倾向于形成 π 字形。

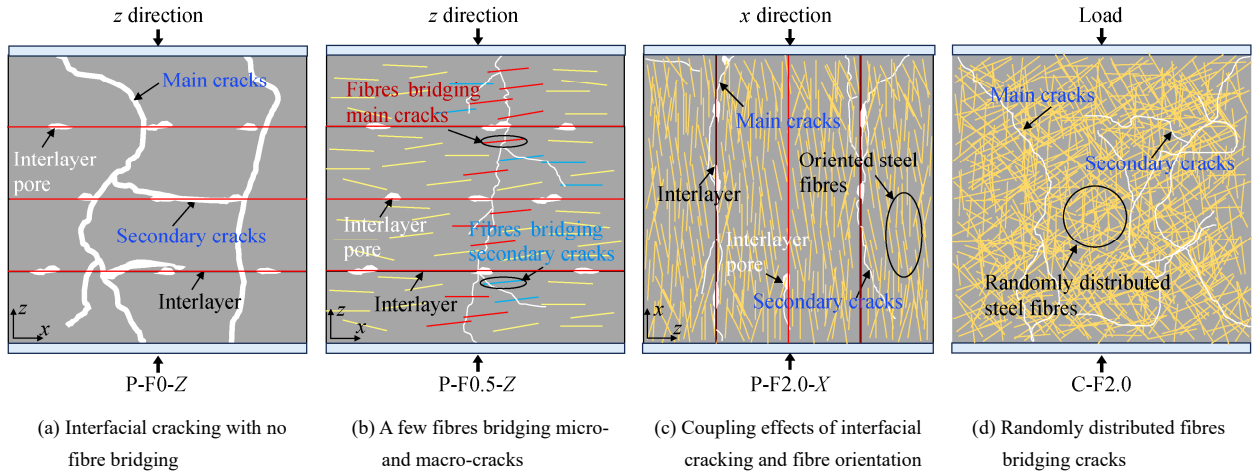


图 18 UHPC 受压破坏机理示意图

Fig. 18 Fracture mechanisms of UHPC under compression

2.3 受压状态下 3DP-UHPC 各向异性力学性能分析

图 19 展示了在不同钢纤维掺量和不同加载方向下, 浇筑与 3D 打印 UHPC 试件平均抗压强度的柱状图与折线图(每组数据基于不少于 3 个有效试件)。在不同钢纤维掺量下, 浇筑试件的抗压强度总体呈随掺量增加而提高的趋势。当钢纤维掺量由 0% 提高至 2.0% 时, 抗压强度从 112.5 MPa 增至 168.6 MPa, 增幅达 49.9%。掺量从 0% 到 0.5% 时, 强度提升 16.8%,

而从 0.5% 到 1.0% 时, 增幅仅 2.7%, 增幅不均匀可能与搅拌时纤维分散不均及振捣导致纤维沉降有关。3D 打印试件在不同压缩方向上表现出类似趋势, 即纤维掺量越高, 试件抗压强度越高。纤维掺量从 0% 增加到 2.0% 时, 3DP-UHPC 试件在 x 、 y 、 z 方向的强度分别提升 16.8%、11.0% 和 37.7%, 提升幅度与打印方向有关。其中, z 方向强度提升最明显, 表明纤维掺量增加对 z 方向受压性能的改善效果最为突出。

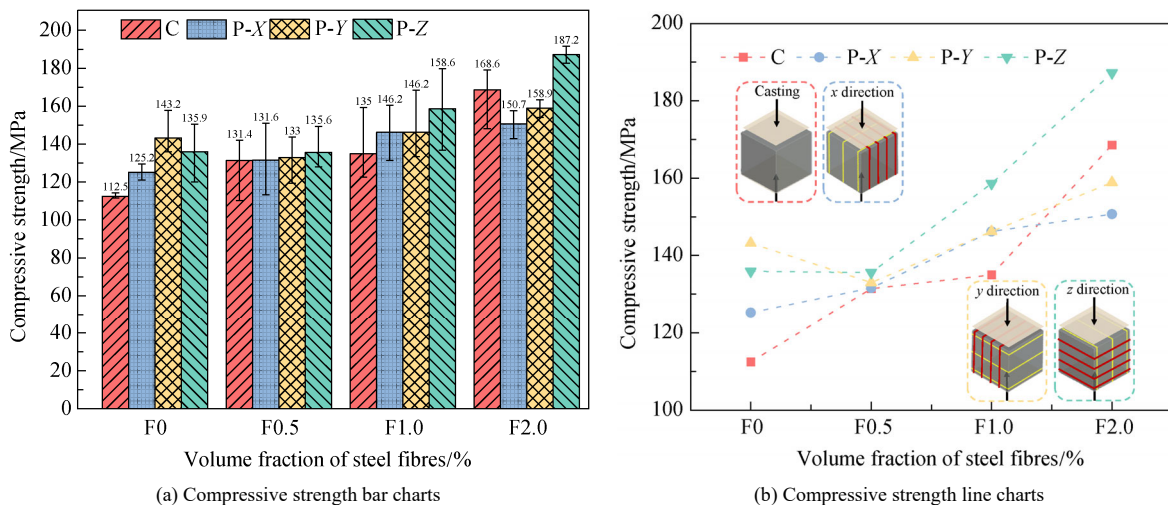


图 19 不同钢纤维体积分数下浇筑与 3D 打印 UHPC 的抗压强度对比

Fig. 19 Compressive strength of cast and 3D-printed UHPC with varying steel fibre volume fractions

在 3D 打印试件抗压强度的各向异性方面, 图 19 显示, 当纤维掺量为 0.5%、1.0% 和 2.0% 时, 试件抗的抗压强度均按 $x < y < z$ 顺序递增, 这主要与纤维沿打印方向 x 的定向排列有关。如图 18b 所示, 在 z 向受压时, 纤维朝向与主拉应力方向平行, 可有效抑制竖向裂缝扩展, 从而提升承载能力。而 x 向受压时(图 18c), 纤维朝向与主拉应力方向垂直, 此时纤维对横向裂缝的抑制作用有限^[39], 导致该方向强度最低。 y 向抗压强度介于二者之间。需要指出的是, 当纤维掺量为 0% 时, 由于缺乏纤维桥联作用, 整体较脆, 实验数据离散性较大(图 18a)。而当纤维掺量为 0.5% 时, 3 个方向强度均稳定于 133 MPa, 表明少量纤维可以发挥强度稳定作用, 但对强度值的提升有限。

对比浇筑和打印试件, 由图 19 可见, 纤维掺量在 0%、0.5%、1.0% 时, 浇筑试件强度均低于打印试件在任意方向的强度。这一现象与前述钢纤维分布不均及颗粒、气泡迁移的耦合作用密切相关, 具体机制详见第 2.2 节。以上原因使浇筑试件的均匀性和整体力学性能降低, 其峰值应力仅为 110 MPa 左右。相比之下, 3D 打印试件无需振捣且挤出过程有密实效果^[40]: 一方面孔隙平均等效直径相对更小 ($264 \mu\text{m} < 700 \mu\text{m}$), 另一方面, 最大等效直径孔约 $3200 \mu\text{m}$, 小于浇筑 UHPC 试件中最大孔的等效直径($4500 \mu\text{m}$)^[34]。因此 3D-UHPC 试件内部初始缺陷更少。

值得注意的是, 浇筑试件在纤维掺量增至 2.0% 时, 其抗压强度略高于打印试件在 P - X 和 P - Y 方向的强度(幅度分别是 10.6% 和 5.8%)。主要原因在于浇筑试件中, 随着钢纤维掺量的增加, 钢纤维之间机械互锁作用增强, 减少了沉降现象, 促进了纤维的各向均匀分布^[35](图 18d)。同时, 3D 打印试件中,

纤维定向分布以及层条间界面的存在降低了 P - X 和 P - Y 方向的抗压强度(图 18c)。但是, 打印试件在 P - Z 方向上的强度高却比浇筑试件高出 10.0%。

综上所述, 3DP-UHPC 在受压状态下呈现各向异性的力学性能, 且其各向异性程度随钢纤维掺量增大而增强。钢纤维掺量为 0.5%、1.0%、2.0% 时, 最弱压缩方向较最强方向强度分别低 2.95%、7.82%、19.50%, 均低于 20%。与文献数据对比: Yang 等^[21]发现钢纤维长度为 10 mm, 掺量分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1.0% 的情况下, x 方向与 z 方向的强度差异分别高达 55.3%、57.2%、61.6%、65.4%。Jia 等^[41]测得在钢纤维长度为 12~14 mm、掺量为 2.0% 时, 强度差异为 23.8%。

由上可知, 本研究中打印试件力学性能的各向异性相对更低。这一现象与打印工艺密切相关, 如图 20 所示: 基于打印条带的理论模型(图 20a)预测的堆叠中间区存在大孔隙, 然而在实际打印中由于流动及重力作用会减小该理论孔隙, 但仍会存在明显的孔隙(图 20b)。而本研究通过调整打印速度和打印路径, 使得 30 mm 喷嘴挤出的条带可扩展至 36 mm 宽度, 并结合设计的打印路径, 实现了条带间约 6 mm 的相互接壤和搭接(图 20c), 进而充分填充了条带间孔隙, 减少了打印结构缺陷的影响。

需要说明的是, 本研究采用高屈服应力、低流动度的 3DP-UHPC 材料, 并通过调整打印头尺寸、打印路径与打印速度, 使 30 mm 喷嘴挤出的条带在受打印头拖拽与自重作用下由圆形趋于椭圆形, 展宽至约 36 mm。条带之间形成约 6 mm 宽的有效搭接区域, 不是简单的“接触”, 而是形成“挤压-嵌合”界面, 提升了层条之间的密实度和粘结稳定性(图 20c), 有效避免了传统打印中易出现的松散搭接问题。

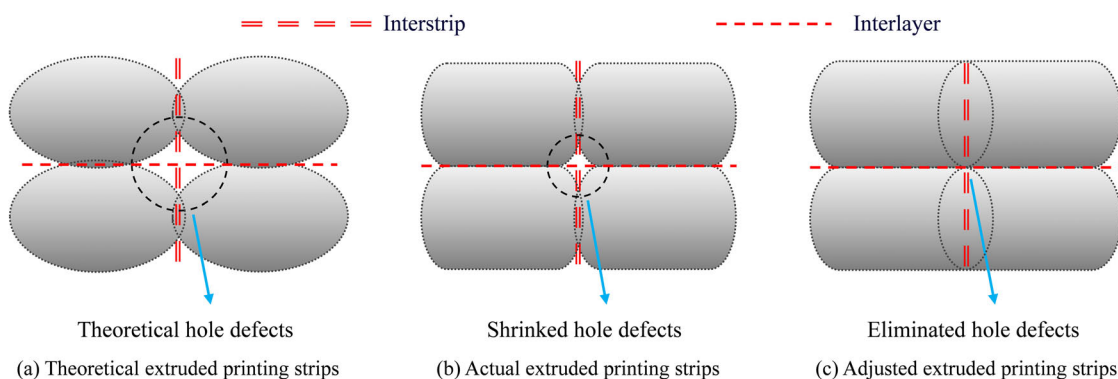


图 20 3D 打印条堆叠工艺优化以减少打印缺陷

Fig. 20 Stacking optimisation of printed strips to reduce print defects

同时,材料具备较强早期结构力学性能。打印过程中,已成型条带在逐步水化硬化后能承受后续条带的加载,避免坍塌和形变,保障结构稳定成型。这一成型体系依赖于关键工艺参数(喷嘴尺寸、路径规划、速度控制)之间的协调匹配,具备了良好的建造可控性与可靠性。

3 结论

1) 挤出效应提升 3DP-UHPC 致密性: 尽管 3D 打印过程中会形成一定的层条间孔隙,但挤出过程中的“排气”效应有助于降低整体孔隙率,使 3DP-UHPC 的致密性优于传统浇筑 UHPC。

2) 钢纤维在打印方向上呈定向排列: 在喷嘴挤压与路径引导下,钢纤维趋于沿打印方向定向排列,区别于传统浇筑工艺中的随机分布,可有效发挥其桥联作用。

3) 压缩破坏行为由界面与纤维朝向协同主导: 3DP-UHPC 试件在 x 向加载时,裂缝易沿层条间界面开裂; z 向加载时,定向纤维呈现更强的桥联能力,可有效延缓裂缝扩展。

4) 界面密实度提升可缓解力学各向异性: 纤维与界面的耦合作用,导致 3DP-UHPC 抗压性能各向异性显著。通过增强条带“挤压-嵌合”作用,有望提升界面密实度,从而降低各向异性程度。

5) 纤维掺量显著影响强度表现与稳定性: 提高钢纤维掺量可显著增强 3DP-UHPC 的抗压性能,尤其在 z 向加载时效果更优;低掺量虽增强有限,但有利于性能稳定性。

6) 揭示了 13 mm 钢纤维掺量对 3DP-UHPC 抗压各向异性的多尺度影响机制,识别了孔隙与纤维取向等微观结构特征,并初步建立其与宏观力学性能的关联。

当前工作主要聚焦于受压状态下的损伤机制,尚需深入探讨层条间界面的力学行为及其主导的裂缝演化过程。未来研究将关注纤维长度与掺量等对界面性能的影响,进一步揭示其对 3DP-UHPC 损伤演化路径的多尺度调控作用。

参考文献:

- [1] WU Z Y, PAN H, HUANG P, et al. Biomimetic mechanical robust cement-resin composites with machine learning-assisted gradient hierarchical structures[J]. *Adv Mater*, 2024, 36(35): 2405183.
- [2] SHE W, WU Z Y, YANG J X, et al. Cement-based biomimetic metamaterials[J]. *J Build Eng*, 2024, 94: 110050.
- [3] 段珍华, 刘一村, 肖建庄, 等. 混凝土建筑 3D 打印技术工程应用分析[J]. *施工技术(中英文)*, 2021, 50(18): 15–20.

- DUAN Zhenhua, LIU Yicun, XIAO Jianzhuang, et al. *Constr Technol*, 2021, 50(18): 15–20.
- [4] 张涛, 藺喜强, 陈文洁, 等. 普通硅酸盐水泥基 3D 打印砂浆的性能及应用[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(11): 1629–1634.
- ZHANG Tao, LIN Xiqiang, CHEN Wenjie, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(11): 1629–1634.
- [5] 周马技, 彭博远, 李古. 建筑 3D 打印技术的研究与发展[C]//第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 兰州, 2023: 348–353.
- ZHOU M J, PENG B Y, LI G. Research and development of 3D printing technology in construction[C]// *Proceedings of the 23rd National Symposium on Modern Structural Engineering*. Lanzhou, 2023: 348–353.
- [6] 於家勉, 孙元峰, 姚一鸣, 等. 3D 打印混凝土层间性能影响因素与测试方法研究综述[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(8): 7–11.
- YU Jiamian, SUN Yuanfeng, YAO Yiming, et al. *China Concr Cem Prod*, 2020(8): 7–11.
- [7] 汤寄子, 张亚可, 高丹盈, 等. 3D 打印混凝土研究现状及前景展望[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(6): 734–744.
- TANG Jiyu, ZHANG Yake, GAO Danying, et al. *J Henan Univ Nat Sci*, 2022, 52(6): 734–744.
- [8] 成鑫磊, 穆锐, 刘晓英. 超高性能混凝土的制备及力学性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(12): 4295–4312.
- CHENG Xinlei, MU Rui, LIU Xiaoying. *Bull Chin Ceram Soc*, 2024, 43(12): 4295–4312.
- [9] WU Z Y, SHE W, ZHANG J H, et al. 3D mesoscale modelling of steel fiber-reinforced aggregate concrete[J]. *Int J Mech Sci*, 2023, 257: 108550.
- [10] 陈建康. 超高性能混凝土(UHPC)力学性能研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2024, 54(5): 148–167.
- CHEN Jiankang. *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2024, 54(5): 148–167.
- [11] 陈亚豪, 贺雄飞, 陆伟宁, 等. 超高性能混凝土性能试验研究进展综述[J]. *山西建筑*, 2024, 50(8): 122–128.
- CHEN Yahao, HE Xiongfei, LU Weining, et al. *Shanxi Archit*, 2024, 50(8): 122–128.
- [12] 国内首座混凝土 3D 打印 UHPC 曲线梁桥落地应用[J]. *江西建材*, 2024, (06): 77. DOI:CNKI:SUN:JXJC.0.2024-06-144.
- [13] 姚一鸣, 张珈玮, 孙元峰, 等. 3D 打印钢纤维增强 UHPC 力学性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(9): 29–40.
- YAO Yiming, ZHANG Jiawei, SUN Yuanfeng, et al. *J Build Struct*, 2024, 45(9): 29–40.
- [14] YAO Y M, ZHANG J W, SUN Y F, et al. Mechanical properties and failure mechanism of 3D printing ultra-high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 447: 138108.
- [15] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, KHAYAT K H, et al. Rheological characterization of ultra-high performance concrete for 3D printing[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 136: 104854.
- [16] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, RANADE R, et al. Digital fabrication of eco-friendly ultra-high performance fiber-reinforced concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 125: 104281.
- [17] YANG Y K, WU C Q, LIU Z X. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile[J]. *Compos Struct*, 2023, 309: 116727.
- [18] 孟江锋, 李娜春, 安继康, 等. 超高性能混凝土强度尺寸效应研究综述[J]. *河南科技*, 2025, 44(1): 60–63.
- MENG Jiangfeng, LI Yuanchun, AN Jikang, et al. *Henan Sci Technol*, 2025, 44(1): 60–63.
- [19] 白刚, 王里, 王芳, 等. 3D 打印 UHPC 的制备和力学性能试验研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(12): 12063–12069.
- BAI Gang, WANG Li, WANG Fang, et al. *Mater Rep*, 2021, 35(12): 12063–12069.

- [20] 朱春红, 周凯, 何磊. 3D 打印金尾矿砂超高性能混凝土的力学性能研究[J]. 金属矿山, 2023(10): 259–264.
ZHU Chunhong, ZHOU Kai, HE Lei. Met Mine, 2023(10): 259–264.
- [21] YANG Y K, WU C Q, LIU Z X, et al. Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing[J]. Cem Concr Compos, 2022, 125: 104310.
- [22] 黄宇劫, 张慧, 高超, 等. 考虑纤维取向特征的超高性能混凝土三维细观断裂[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 555–568.
HUANG Yujie, ZHANG Hui, GAO Chao, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(2): 555–568.
- [23] 叶俊宏, 郑怡, 余江滔, 等. 3D 打印纤维增强混凝土材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2538–2548.
YE Junhong, ZHENG Yi, YU Jiangtao, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2538–2548.
- [24] 陈正源, 杨树桐, 兰天. 不同加载方向下 3D 打印 UHPC 断裂韧度的确定[C]//第 32 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 赣州, 2023: 228–236.
CHEN Z Y, YANG S T, LAN T. Determination of fracture toughness of 3D printed UHPC loaded in different directions[C]//Proceedings of the 32nd National Conference on Structural Engineering (Volume I). Ganzhou, 2023: 228–236.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 175—2023 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [26] Funk J E, Dinger D R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [27] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC)[J]. Cem Concr Res, 2014, 56: 29–39.
- [28] Standardization Administration of China. GB/T 2419-2005: Test method for fluidity of cement mortar [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [29] HUANG Y J, YANG Z J, REN W Y, et al. 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on *in situ* X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model[J]. Int J Solids Struct, 2015, 67: 340–352.
- [30] HUANG Y J, NATARAJAN S, ZHANG H, et al. A CT image-driven computational framework for investigating complex 3D fracture in mesoscale concrete[J]. Cem Concr Compos, 2023, 143: 105270.
- [31] ZHAO J H, PAN B. Smart DIC: User-independent, accurate and precise DIC measurement with self-adaptively selected optimal calculation parameters[J]. Mech Syst Signal Process, 2025, 222: 111792.
- [32] 中国混凝土与水泥制品协会. 3D 打印混凝土基本力学性能试验方法: T/CCPA 33-2022/T/CBMF 183-2022[S]. 北京: 中国建筑材料联合会, 2022.
- [33] JOSEPH P M, SPITAL R D. The effects of scatter in X-ray computed tomography[J]. Med Phys, 1982, 9(4): 464–472.
- [34] ZHANG X, YANG Z J, PANG M, et al. Ex-situ micro X-ray computed tomography tests and image-based simulation of UHPRFC beams under bending[J]. Cem Concr Compos, 2021, 123: 104216.
- [35] 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.
- [36] HIEW S Y, BIN TEOH K, RAMAN S N, et al. 3D micro-CT driven fibre orientation–confinement correlation model for ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Cem Concr Compos, 2025, 161: 106081.
- [37] JEN G, TRONO W, OSTERTAG C P. Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior[J]. Constr Build Mater, 2016, 104: 63–71.
- [38] ZHANG H, HUANG Y J, XU S L, et al. 3D cohesive fracture of heterogeneous CA-UHPC: A mesoscale investigation[J]. Int J Mech Sci, 2023, 249: 108270.
- [39] ZHANG H, HUANG Y J, XU S L, et al. An explicit methodology of random fibre modelling for FRC fracture using non-conforming meshes and cohesive interface elements[J]. Compos Struct, 2023, 310: 116762.
- [40] 黎宝山, 姚一鸣, 鲁聪. 挤出型 3D 打印混凝土力学性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(3): 1–6.
LI Baoshan, YAO Yiming, LU Cong. China Concr Cem Prod, 2021(3): 1–6.
- [41] JIA Z J, KONG L Y, JIA L T, et al. Printability and mechanical properties of 3D printing ultra-high performance concrete incorporating limestone powder[J]. Constr Build Mater, 2024, 426: 136195.

Multiscale Investigation on Damage and Fracture Mechanisms of 3D Printing Ultra-High Performance Concrete under Compression

ZHANG Hui¹, WU Jie¹, HUANG Yujie¹, DONG Yanli¹, PENG Chengmin², WU Shengkai¹, XU Shilang³

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Extended Abstract

Introduction In recent years, the combination of construction 3D printing technology and ultra-high-performance concrete (3DP-UHPC) leverages the rapid construction and controllable shaping advantages of 3D printing along with the ultra-high strength and high toughness advantages of UHPC. Existing research on 3DP-UHPC, constrained by current printing technologies, has primarily focused on shorter steel fibres (6 mm and 10 mm), whereas the steel fibre length commonly used in engineering UHPC is 13 mm. Additionally, research on the micro- and meso-structural characteristics of 3DP-UHPC and the resulting anisotropic mechanical properties and damage-fracture mechanisms is relatively scarce. Therefore, revealing the multiscale effects of anisotropic compressive mechanical behaviour in 3DP-UHPC is of vital importance. This study employs 13 mm steel fibres to investigate the influence of different fibre volume fractions (0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%) on the compressive performance of 3DP-UHPC. By combining digital image correlation technology (DIC) and X-ray computed tomography (CT) methods, we aim to clarify the coupling mechanism between fibre orientation and interlayer/interstrip interfacial defects, providing critical insights for material optimisation and engineering deployment of 3DP-UHPC.

Methods In the experiment, 3DP-UHPC specimens with steel fibre volume fractions of 0%, 0.5%, 1.0%, and 2.0% were prepared. First, a particle packing-based mix design was carried out. By testing the particle size distribution of the raw materials and applying the modified Andreasen-Andersen model, the optimal packing proportions of the mortar matrix components were determined. Subsequently, in accordance with the GB/T 2419—2005 standard, a flow table test was conducted using an electric jolting apparatus to evaluate the printability of mixtures with varying fibre volume fractions. Furthermore, high-resolution X-CT was employed to acquire the internal structure of the specimens, from which microstructural parameters such as pore morphology and steel fibre orientation were extracted. Finally, uniaxial compression tests were performed using DIC to measure the compressive strength and to capture, in real time, the processes of crack initiation, propagation, and coalescence, thereby revealing the evolution characteristics of the failure modes. In this process, the synergistic effects between interlayer interfacial defects and fibre orientation were further analysed, and their coupling mechanisms during damage evolution were investigated, thereby providing deeper insights into the microstructural mechanisms governing the anisotropic mechanical behaviour of 3DP-UHPC.

Results and discussion The test results indicate that in the 3DP-UHPC specimens, a total of 37 irregularly shaped large pores were observed at interlayer and interstrip interfaces, with equivalent diameters ranging from 2000 μm to 3200 μm . These accounted for only 0.174% of the total pore volume, while the remaining 92.195% consisted of nearly spherical or ellipsoidal pores, resembling the typical pore morphology of cast UHPC. Notably, the maximum (3200 μm) and average (264 μm) equivalent pore diameters in the printed specimens were both smaller than those reported for cast UHPC (4500 μm and 700 μm), suggesting that the extrusion process during printing effectively compacts the material and facilitates air removal. Therefore, the total porosity of 3DP-UHPC (2.24%) was lower than that of cast UHPC (3.45%–5.90%).

Steel fibres within 3DP-UHPC exhibit a clear tendency to align along the printing direction (x -axis), with more pronounced orientation in the x - z plane than in the x - y plane. Specifically, 65.2% of fibres were aligned at $\theta = 75^\circ$ – 90° in the x - z plane, compared to 32.8% at $\varphi = 75^\circ$ – 90° in the x - y plane. This anisotropic distribution stems from the filament geometry, where the height (17 mm) is smaller than the width (36 mm), creating spatial constraints that favour alignment in the vertical cross-section. In total, 3,324 fibres (52%) were oriented within the 60° – 90° range, reflecting a strong directional preference induced by the layer-by-layer deposition process.

The compressive strength of 3DP-UHPC exhibits directional anisotropy, influenced by layer interfaces, fibre volume fractions, and fibre orientation. At fibre volume fractions of 0.5%, 1.0%, and 2.0%, compressive strength consistently followed the order $x < y < z$, with the weakest-to-strongest directional differences being 2.95%, 7.82%, and 19.50%, respectively. These values are all below 20% and notably lower than those reported in earlier studies. The achieved reduction in anisotropy is attributed to the optimisation of printing parameters in this study, particularly adjustments to printing speed and path, which improved inter-filament contact, enhanced pore filling, and mitigated the adverse effects of interfacial defects.

3DP-UHPC outperforms cast UHPC in compressive strength across all principal directions (x , y , and z) at fibre volume fractions of 0%, 0.5%, and 1.0%. This advantage is due in part to the absence of fibre sedimentation, water bleeding, and entrapped air defects that may occur during vibration-based casting. The extrusion-based fabrication in 3D printing mitigates these issues, resulting in improved uniformity and mechanical properties. At a fibre volume fraction of 2.0%, the printed specimens exceeded cast specimens in compressive strength along the z -axis by 10%, while showing slightly lower values in the x - and y -directions.

Increasing the steel fibre volume fraction enhances the compressive strength of both 3DP and cast UHPC. For the cast specimens, an increase in fibre content from 0% to 2.0% led to a 49.9% improvement in compressive strength. In the 3DP-UHPC specimens, the same increase led to strength enhancements of 16.8%, 11.0%, and 37.7% in the x -, y -, and z -directions, respectively, indicating that the reinforcing effect of fibres is directionally dependent. Even at a modest fibre volume fraction of 0.5%, compressive strength stabilised around 133 MPa across all directions, indicating a beneficial role in mechanical consistency. In contrast, fibre-free specimens showed brittle failure dominated by interfacial defects, resulting in greater variability in strength measurements.

Conclusion The 3D printing process significantly influences the microstructural characteristics and mechanical performance of 3DP-UHPC. Although certain interlayer and interstrip voids are inevitably introduced during the 3D printing process, the extrusion-induced “degassing” effect helps lower the overall porosity, resulting in a denser microstructure in 3DP-UHPC compared to conventionally cast UHPC. Under the combined effects of nozzle extrusion and printing path guidance, steel fibres tend to align along the printing direction, in contrast to the random distribution observed in cast specimens. This directional alignment improves the crack-bridging efficiency of fibres. The compressive failure behaviour exhibits pronounced anisotropy: under loading in the x -direction, cracks preferentially propagate along interlayer interfaces, while in the z -direction, fibre alignment enhances bridging capacity and delays crack growth. The coupled effects of fibre orientation and interfacial quality are primary contributors to this anisotropy. Enhancing the extrusion-interlocking mechanism between adjacent filaments can improve interfacial densification, thereby mitigating mechanical anisotropy. The steel fibre volume fraction also plays a critical role in both strength and stability: increasing the fibre content significantly enhances compressive strength, particularly under loading in the z -direction; in contrast, lower fibre volume fractions, although less effective in improving strength, contribute to greater performance uniformity and structural consistency. This study further elucidates the multiscale mechanisms through which 13 mm steel fibres influence compressive anisotropy in 3DP-UHPC. It identifies key microstructural features, such as pore distribution and fibre orientation, and preliminarily establishes their correlation with macroscopic mechanical behaviour, providing valuable insights for optimising the structural performance of 3DP-UHPC.

Keywords 3D printing concrete; ultra-high-performance concrete; damage and fracture; X-ray computed tomography; anisotropy