

含煤矸石粗骨料 3D 打印混凝土各向异性力学性能的微细观实验

张 慧¹, 张 琛¹, 黄宇劼¹, 程 志¹, 武 杰¹, 郭欣荣¹, 徐世烺²

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 太原 030051; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 山西省作为中国煤矸石积存量最大的地区之一, 其大宗固废的高效资源化利用已成为区域可持续发展的迫切需求。当前快速发展的 3D 打印建造技术, 因其精确控制材料分布特性和复杂构件的免模板成型优势, 为大宗固废的规模化消耗提供了创新路径。本工作采用煤矸石作为粗骨料, 结合建筑 3D 打印技术, 制备一种新型的打印煤矸石混凝土(3DP-CC)。针对煤矸石掺量为 0%、10%、20%和 40%的混凝土, 测试其早期性能以及打印试件的抗压、三点弯曲强度, 并利用 X 射线计算断层扫描技术观察试件内部孔隙结构。结果表明: 3DP-CC 抗压、三点弯曲强度和破坏模式呈现明显的各向异性特性。同时, 随着煤矸石掺量增加, 3DP-CC 的抗压强度和三点弯曲强度亦呈现出先增高后降低的趋势。各向异性力学性能和裂纹演化的微观机制是由骨料的骨架支撑和嵌锁作用, 以及孔隙微结构和层条间界面特性共同决定的。

关键词: 3D 打印混凝土; 煤矸石; 粗骨料; 微细观结构; 各向异性

中图分类号: TU501 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3295-18

网络出版时间: 2025-10-17



3D 打印是一种快速成型的增材制造技术, 该技术以计算机三维设计模型为蓝本, 通过软件分层离散和数控成型系统, 利用逐层堆积粘结方式叠加成型^[1], 可实现用户自定义几何形状、材料组成、物理力学性能和功能的实体打印, 正在迅速改变传统制造业^[2]。将 3D 打印技术应用于建筑行业, 可以降低劳动强度、提高施工效率、大幅节约成本^[3], 有助于提升土木工程建造过程的工业化、机械化、现代化、信息化和智能化水平。根据国家“十四五”发展规划, 以 3D 打印为代表的先进制造技术是构建智能绿色、安全高效现代化建筑工业体系的焦点领域之一。目前 3D 打印已成功应用于多层建筑、桥梁、车站等预制装配结构形式^[4]。然而, 要实现 3D 打印技术大规模产业化应用甚至完全取代传统建筑技术仍面临大型施工设备缺乏、操作系统不友好、打印材料不完善等诸多问题, 其中打印材料的研发被视为核心问题: 不仅需要结构和构件具备一定的刚度、强度和延性等力学特性, 还必须具备一定的

可打印性, 如可泵送、可挤出和可建造性等^[5]。

目前, 3D 打印建筑材料以不含粗骨料的砂浆为主, 大部分研究集中于打印配合比。朱艳梅等^[6]发现加入羟丙基甲基纤维素(HPMC)可提高砂浆的可打印性能: HPMC 掺量在 0.05%~0.3%范围内, 砂浆具有良好的可挤出性, 且随 HPMC 掺量增加, 可建造性提高、可打印时间相应延长。Panda 等^[7]采用粉煤灰、粒状高炉矿渣以及未增密的微硅粉等制备的地聚合物砂浆, 实验证明粒状高炉矿渣含量超过 15%会导致地聚合物砂浆迅速进入硬化阶段, 不利于长时间打印。刘超等^[8]使用再生砂替换打印砂浆中的天然砂, 发现再生砂浆的静态屈服应力高于天然砂浆, 表现出更好的可建造性。

在 3D 打印砂浆的力学性能研究方面, 侯少丹等^[9]发现打印砂浆与浇筑试件相比, 其 28 d 抗压强度降低了 20%~40%, 抗弯强度提高了 17%~20%。王里等^[10]、马国伟等^[11]、侯泽宇等^[12]指出, 打印砂浆试件通常存在各向异性特征。周林等^[13]发现沿着

收稿日期: 2025-02-21。 修订日期: 2025-03-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208296; 52578336); 山西省研究生教育创新计划研究生实践创新项目(2024SJ286)。

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。

Received date: 2025-02-21. Revised date: 2025-03-17.

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

E-mail: mpcyujie@nuc.edu.cn

打印方向(x向)加载立方体试件抗压强度最高,最接近普通C30混凝土的标准立方体抗压强度;沿平面内垂直于打印方向(y向)加载抗压强度最低。原因可能如王海龙等^[14]、孙晓燕等^[15]、Nerella等^[16]指出打印试件存在层间薄弱界面,会导致各向异性力学性能,且界面的粘结性能与每层打印时间、条带宽度、流变性能、界面微观结构等多种因素有关,十分复杂。

目前含有粗骨料的混凝土打印实验较为少见,主要原因是粗骨料会降低混凝土流动度、增大其打印难度。张超^[17]发现石灰石粗骨料掺量越高,混凝土的可挤出性越差,当质量掺量大于30%时,混凝土无法挤出。邓智聪^[18]指出陶粒轻骨料的吸水性影响混凝土的流变性,材料可打印水胶比需大于0.35。Rahul等^[19]观察到当轻质粗骨料体积掺量超过30%时,挤出过程中会发生显著堵塞现象。张云升等^[20]研究发现,水泥浆与骨料的质量比(P/A值)对含粗骨料3D打印混凝土的打印高度有着显著的影响。随着P/A值提高,水泥浆体含量升高,能够提供更好的润滑和粘结作用,使得混凝土材料更易于被挤出并保持形状,混凝土多层结构最大可建造高度及平均层厚均逐渐提高。但过高的P/A值可能导致粗骨料的骨架效应难以得到发挥,使得混凝土材料的初始强度降低、流动性增大而不易产生较好的可建造性。

另一方面,打印粗骨料混凝土也存在各向异性,其程度与粗骨料类型、掺量、层间微细观结构和粘结性能等因素有关。汲广超等^[21]测试了5~10 mm粒径的天然砾石粗骨料打印混凝土与浇筑混凝土的三点弯曲力学性能,发现打印试件三点弯曲强度呈现显著的各向异性特征,不同方向三点弯曲强度差值可高达25%,原因是打印混凝土层间含有更多大孔隙(>10 mm³),造成层间薄弱界面。且如Liu等^[22]指出各向异性程度随粗骨料质量掺量(0%~45%)提高而降低,原因是天然粗骨料可增强打印界面处的嵌套啮合作用,提升层间粘结强度^[23]。

从固废资源化利用探索角度出发,有部分学者比较了再生粗骨料与天然粗骨料对打印混凝土力学性能的影响,如段珍华^[24]等发现再生粗骨料混凝土打印试件各向异性程度比天然粗骨料突出,原因可能是旧的砂浆-骨料界面由于疏松多孔特性成为应力传递间的薄弱区域,降低了层间界面粘结强度,增大各向异性程度。Liu等^[25]发现再生粗骨料会降

低打印层间粘结强度,从而增大了试件的抗压性能的各向异性程度。由上可知,层间微细观结构和粘结性能是导致打印混凝土各向异性的重要原因,也是影响构件设计和计算方法的关键因素。

值得一提的是,煤矸石是煤炭开采和洗煤过程中产生的一种固体废弃物。中国由于煤矿开采,煤矸石的积存量已达到数十亿吨,山西省是煤矸石积存量最大的地区之一。大量的煤矸石不仅造成了环境污染,还导致了资源的严重浪费。采用煤矸石作为粗骨料制备混凝土可实现其资源化利用。在浇筑成型煤矸石混凝土方面,Yu等^[26]发现混凝土抗压强度和劈拉强度均随煤矸石掺量增大而降低。董作超^[27]对比了煅烧和未煅烧2种煤矸石粗骨料对混凝土力学性能的影响规律,均发现煤矸石掺量越高,抗压和抗弯强度随之降低。但煅烧过后的煤矸石具有火山灰效应,比掺入未煅烧煤矸石的混凝土强度更高。刘瀚卿等^[28]发现煤矸石含碳量会影响煤矸石混凝土的抗弯强度:煤矸石含碳量从0.91%增加至2.09%时,抗弯强度降低了21.1%~32.6%。在3D打印混凝土方面,目前已有将煤矸石作为细骨料替代打印砂浆天然砂的研究^[29-30],而尚无将煤矸石作为粗骨料进行混凝土3D打印的报道。

本工作聚焦以煤矸石为粗骨料的混凝土3D打印(3DP-CC)研究,开展基于X射线计算断层扫描技术(CT)的微细观力学实验,测试3DP-CC的压缩、弯曲等宏观力学性能参数,揭示打印方向和煤矸石粗骨料掺量对3DP-CC抗压和抗弯强度各向异性的影响机理,为煤矸石的资源化、智能化应用提供数据基础和实验参考。

1 实验

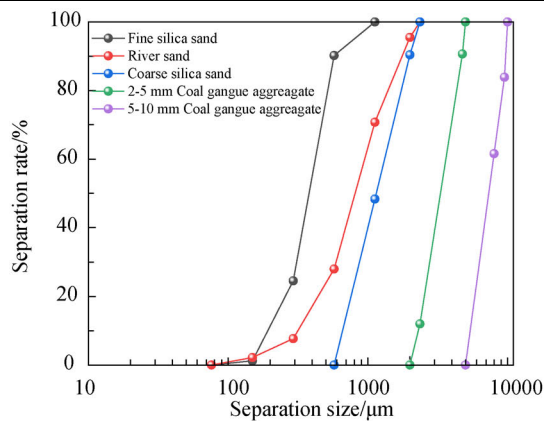
1.1 原材料配合比

为研究煤矸石掺量对3D打印混凝土力学性能的影响,制备了质量掺量为0、10%、20%、40%的3D打印煤矸石混凝土试件。如表1所示,3DPM表示3D打印砂浆,3DP-CC-10、3DP-CC-20、3DP-CC-40分别表示煤矸石掺量为10%、20%、40%的3D打印煤矸石混凝土。煤矸石选取未经煅烧的颗粒,粒径包含2~5 mm和5~10 mm 2种,质量比为3:7,吸水率为8%(未进行预吸水处理),2~5 mm骨料堆积密度为1280 kg/m³,5~10 mm骨料堆积密度为1166 kg/m³,压碎指标为25.9%,莫氏硬度为3~5,煤矸石骨料的粒径分布如图1所示。

表 1 3D 打印煤矸石混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of 3D printing coal gangue concrete

Specimen	Mix proportion/(kg·m ⁻³)										W/B ratio
	OPC	SAC	SF	HPMC	SP	PVA fibres	Silica sand	River sand	Coal gangue	Water	
3DPM	837.9	145.7	56.4	0.5	0.5	5.5	483.9	483.9	0	436.1	0.42
3DP-CC-10	837.9	145.7	56.4	0.5	0.5	5.5	362.9	362.9	241.9	436.1	0.42
3DP-CC-20	837.9	145.7	56.4	0.5	0.5	5.5	241.9	241.9	483.9	436.1	0.42
3DP-CC-40	837.9	145.7	56.4	0.5	0.5	5.5	0	0	967.8	436.1	0.42



(a) Particle size distribution curve



(b) Particle size morphology Photograph

图 1 骨料粒径分布

Fig. 1 Aggregate size distribution

本实验混凝土配合比如表 1 所示, P.O 42.5 普通硅酸盐水泥(OPC)为主要胶凝材料。其他辅助胶凝材料包括硫铝酸盐水泥 42.5R(SAC)和硅灰(SF)。细骨料是石英砂和河砂, 石英砂为粗、细 2 种石英砂, 各占 50%。两种石英砂与河砂的粒径分布如图 1 所示, 最大粒径不超过 2.36 mm。其他材料包括聚羧酸减水剂(SP)、羟丙基甲基纤维素(HPMC)和聚乙烯醇(PVA)纤维。

1.2 打印工艺参数

本研究采用的混凝土 3D 打印机型号为杭州冠力智能科技有限公司生产的 HC-3DPRT/L, 可打印最大试件尺寸为 1700 mm×1800 mm×1500 mm。打印头移动最大速度是 100 mm/s。单层打印高度设置为 15 mm。打印头的形状为圆形, 直径 30 mm。为研究打印混凝土的各向异性特征, 需要先定义打印方向。由图 2 可见, 打印喷头连续移动的方向定义为 x 方向, 同一水平面垂直于 x 方向定义为 y 方向, 垂直于 x - y 平面的方向为 z 方向, 其中, 竖直相接的打印条间定义为层间界面, 水平前后相接的打印条间定义为条间界面^[31]。

1.3 流动性、可建造性、可挤出性和可打印时间性能测试

在 3D 打印混凝土中, 常采用流动度作为衡量材料在打印系统中流动和挤出的难易程度指标^[32]。使用 JG/T248 混凝土坍落度仪测定不同煤矸石掺量

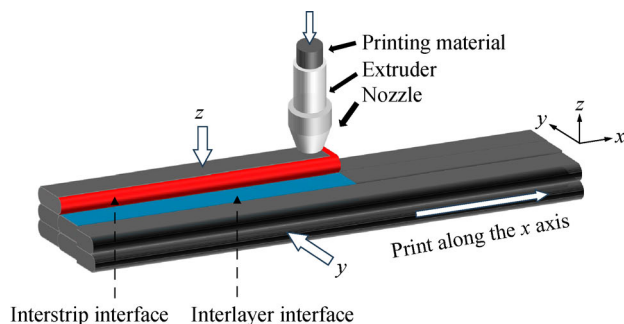


图 2 打印方向与层间、条间界面的定义

Fig. 2 Definition of printing direction and interfaces between layers and strips

混凝土的流动度演化规律^[33]。

3D 打印混凝土的可建造性是指打印条带在逐层堆叠过程中, 在堆叠方向上不发生或仅发生允许的竖向压缩变形和横向扩展变形, 堆叠形成的 3D 打印构件不发生屈曲、倒塌和整体尺寸不随时间推移发生改变的性能^[34]。通常利用圆柱筒坍落度实验和打印堆叠实验对材料的可建造性能进行测试。圆柱筒内径为 (100 ± 0.5) mm, 高度为 (100 ± 0.5) mm。在打印堆叠高度测试中, 设置单层打印高度为 30 mm, 反复叠加 500 mm 长度的打印条进行最大堆叠高度实验, 直到打印的多层结构破坏为止。记录打印过程中不同煤矸石掺量混凝土的打印总高度 H 与打印层数 a 。同时, 利用有效堆叠速率 ϕ 评估打印形状的稳定性^[35]:

$$\varphi = \frac{H}{a \times 30} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $a \times 30$ 为无坍塌和侧向变形时打印条带的理论堆叠高度。

可挤出性指混凝土拌合物能够通过打印头均匀且连续挤出的性能^[33]。连续打印 1 m 的混凝土条带，并对其进行肉眼观察，观察是否存在中断或不连续现象。随后均匀选取 5 个测量点，测量打印条带最外缘宽度与厚度，并计算其平均值。

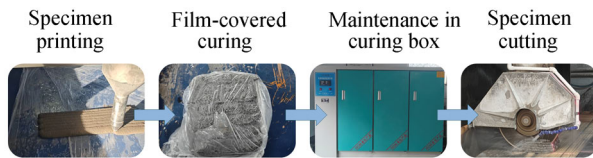
在可挤出性实验的基础上，进行可打印时间测试。可打印时间是指 3D 打印混凝土拌合物可以保持顺利挤出并稳定建造的时间^[33]。从加水时刻开始计时，初次打印时间记为 15 min。每隔 5 min 打印 1 m 长的混凝土条带，记录打印条带出现中断或不连续时所对应的时间即为可打印时间。

1.4 基于 CT 技术的打印煤矸石混凝土微观结构观测

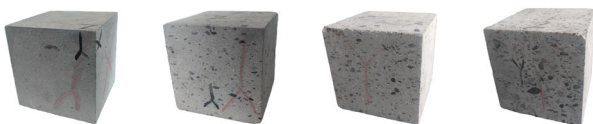
为揭示 3D 打印煤矸石粗骨料混凝土的微细观结构特征及其对力学性能的影响规律，采用 CT 技术分析了不同煤矸石掺量的 3D 打印的微细观孔隙结构^[36–37]。所扫描试件大小为 40 mm×40 mm×40 mm。扫描设备是 nanoVoxel-4000 系列开管反射式高穿透 CT 系统，扫描电压为 200 kV，电流为 300 μ A，精度为 25.69 μ m。

1.5 轴心压缩和三点弯曲力学性能测试

力学性能测试包含轴心压缩和三点弯曲实验。试件均通过红外线桥切机切割打印的大块体获得。大块体在原位覆膜养护 24 h 之后，放入标准养护箱[温度(20±2) °C，相对湿度 95%]继续养护至 28 d 龄期，养护完成后进行块体切割。力学性能实验试件制备流程如图 3 所示。压缩实验试件和切割的大块体尺寸分别为 100 mm×100 mm×100 mm 和 400 mm×300 mm×120 mm；三点弯曲实验试件和切割的大块



(a) Flow chart of specimen printing, curing and cutting



(b) Cube specimens with different coal gangue contents

图 3 试件打印、养护及切割制备流程及不同煤矸石掺量的立方体试件

Fig. 3 Flow chart of specimen printing, curing and cutting, cube specimens with different coal gangue content

体尺寸分别为 40 mm×40 mm×160 mm 和 240 mm×200 mm×100 mm。

轴心压缩实验在拉压一体测试机开展，采用荷载控制方式，加载速度为 500 N/s。记录试件变形至破坏时的极限荷载。三点弯曲实验采用全自动水泥抗弯抗压实验机进行，加载速率为 50 N/s。压缩和三点弯曲的加载方式如图 4 所示，加载直至试件破坏，随后记录极限荷载。三点弯曲强度 f_b 根据式(2)计算。

$$f_b = \frac{3F_b L}{2bd^2} \quad (2)$$

式中： F_b 为三点弯曲载荷峰值； L 为跨长； b 和 d 分别为试件的宽度和高度。

打印试件的强度各向异性程度由评估指标 λ 来衡量^[10]。

$$\lambda = \frac{\sqrt{(f_x - f_{Ave})^2 + (f_y - f_{Ave})^2 + (f_z - f_{Ave})^2}}{f_{Ave}} \quad (3)$$

式中： f_{Ave} 为 3D 打印混凝土试件的平均强度， f_x ， f_y ， f_z 为 3D 打印混凝土试件在 x 、 y 、 z 方向的压缩/三点弯曲强度。加载方向用 L_x ， L_y ， L_z 表示(图 4)。每种掺量、方向分别测试 3 个试件，通过计算 3 个试件峰值应力的平均值来确定每个加载方向的平均强度 f_{Ave} 。

2 结果与讨论

2.1 流动性

不同煤矸石掺量混凝土的流动性实验结果如图 5 所示。可看出，随着煤矸石掺量增加，3DP-CC 的坍落度先增大(0~20%)后减小(20%~40%)，但总体比打印砂浆的坍落度大。由表 1 可知，这是由于煤矸石骨料在 0~20% 范围内增加时，3DP-CC 使用的细砂逐渐减少，从而增大了打印材料的流动性。但在煤矸石掺量为 40% 时，粗骨料占比大幅增加导致颗粒间摩擦阻力增大，骨料骨架结构对浆体流动产生抑制作用，降低了坍落度。此外，煤矸石在破碎过程中受到冲撞和挤压，表观形貌粗糙，也是导致 3DP-CC-40 流动度下降的原因之一。

2.2 可建造性

不同煤矸石掺量打印混凝土的圆柱筒坍落度测试结果如图 6 所示，随着煤矸石掺量增加，3DP-CC 的圆柱筒坍落度呈现出先增大后减小的趋势。这同样是由于煤矸石骨料逐渐增加、细骨料相应减少，导致材料的流动性逐渐增大(见图 5)，而在煤矸石骨料掺量为 40% 时，骨料的骨架结构加强了可建造性。

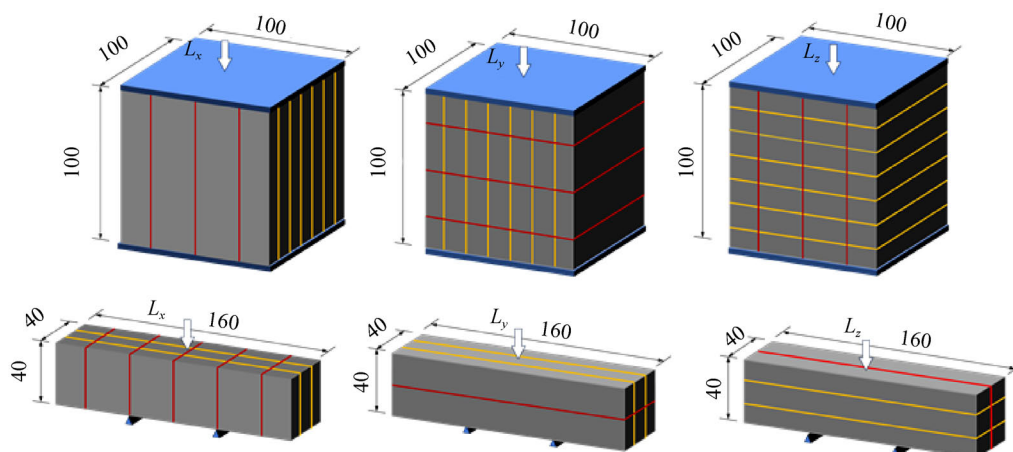


图 4 轴心压缩、三点弯曲实验沿不同方向加载的示意图(黄色/红色线条分别表示层间/条间; 单位: 毫米)

Fig. 4 Schematic diagram of axial compression and three-point bending tests under different loading directions (yellow/red lines denote interlayer/interstrip interfaces, respectively; units: mm)

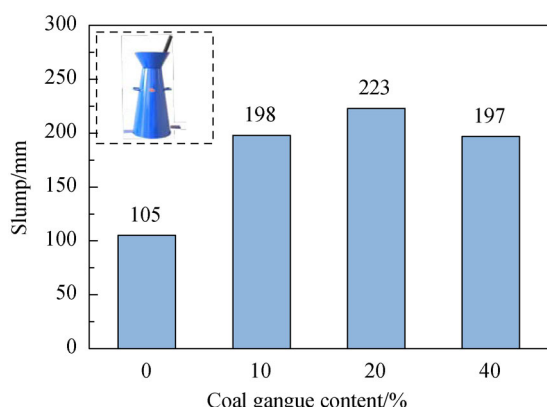


图 5 煤矸石掺量对 3DP-CC 坍落度的影响

Fig. 5 Influence of coal gangue content on slump of 3DP-CC

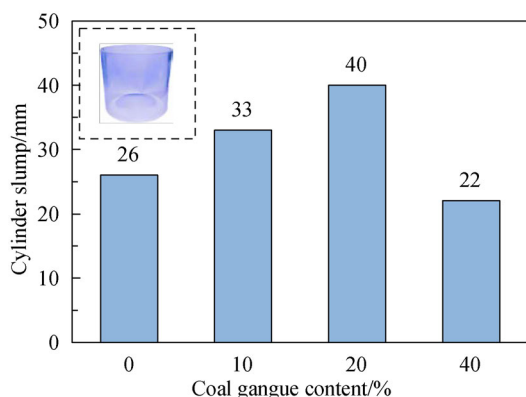
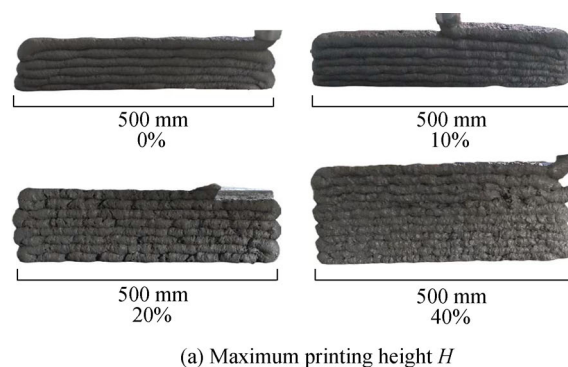


图 6 煤矸石掺量对 3DP-CC 圆柱筒坍落度的影响

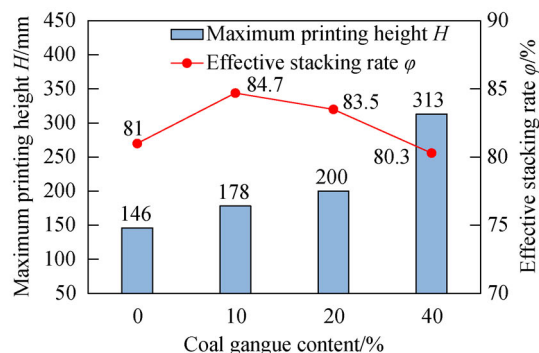
Fig. 6 Influence of coal gangue content on cylinder slump of 3DP-CC

图 7 展示了打印堆叠实验结果, 发现 3DP-CC 的最大打印高度 H 随着煤矸石掺量增加而增大, 且在 40% 时发生了较大幅度的增加。这是因为煤矸石骨料提供了骨架支撑, 可增强混凝土的结构稳定性。需要指出的是图 7a 所示 4 组打印试件的最终破坏模

式均为顶部条带的局部倒塌, 与 Chen 等^[35]实验结论一致。原因是较小的骨料粒径(2~10 mm)所提供的骨架支撑和约束锁闭作用不足, 导致下部受压条带出现不规则的横向扩展。如图 7b 所示, 有效堆叠速率 φ 值均低于 85%。另外, φ 值随煤矸石掺量增加呈现先增大后减小的趋势, 于 10% 掺量时到达峰值, 40% 掺量时最低。



(a) Maximum printing height H



(b) Maximum printing height H and effective stacking rate φ

图 7 煤矸石掺量对最大打印高度 H 和有效堆叠速率 φ 的影响
Fig. 7 Influences of coal gangue contents on maximum printing height H and effective stacking rate φ

2.3 可挤出性

图 8 展示了不同混凝土配合比的挤出打印条带形态。未使用煤矸石骨料时, 打印条带光滑、均匀; 而添加煤矸石骨料后, 打印条带表面粗糙度显著增加。同时如图 9 所示, 随着煤矸石掺量增加, 条带宽度先增大后减小, 在 20% 掺量时条带最宽, 变化趋势与流动性变化趋势一致。高度变化规律则相反, 呈现先减小后增大的趋势, 在 20% 掺量时条带高度最低。同时, 图 9 括号内所示数据为打印条带宽度、高度的标准差, 数据显示 3DPM 的标准差最小, 表明其挤出性能最稳定。随着煤矸石掺量增大, 数据标准差逐渐上升, 说明掺入煤矸石粗骨料会增大 3DP-CC 挤出性能的波动性。



图 8 不同煤矸石掺量的挤出条带外观

Fig. 8 Appearances of printed strips with different coal gangue contents

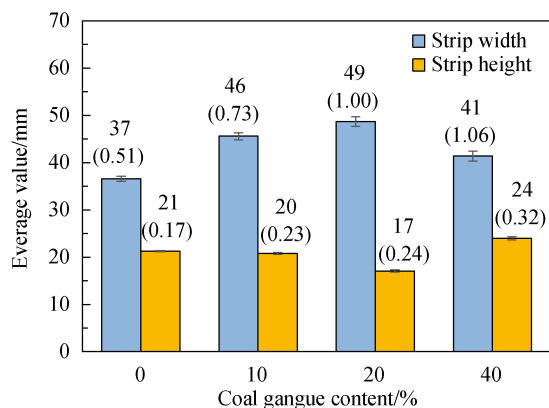


图 9 煤矸石掺量对打印条带宽度和高度的影响

Fig. 9 Influence of coal gangue content on widths and heights of printed strips

2.4 可打印时间

图 10 为不同煤矸石掺量混凝土的可打印时间。随着煤矸石掺量增加, 混凝土的可打印时间逐渐缩短。这是由于煤矸石具有吸水性(吸水率为 8%), 随

着时间推移, 煤矸石会吸收自由水, 导致浆体的流动性下降。随着掺量增加, 这种吸水效应被放大, 可打印时间也逐渐缩短, 但均大于 1.5 h。

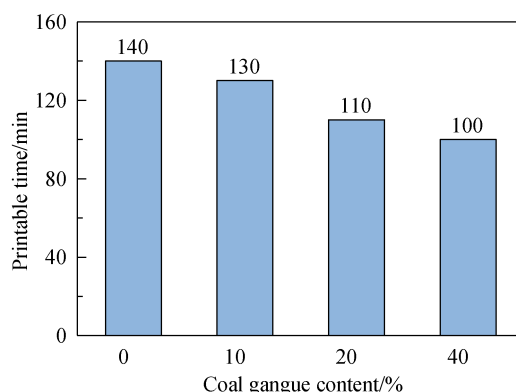


图 10 不同煤矸石掺量的可打印时间对比

Fig. 10 Influence of coal gangue content on printable time of 3DP-CC

2.5 孔隙微结构特征

图 11 展示了不同煤矸石掺量打印试件 x、y、z 方向的 CT 扫描图像, 像素是 2500×2500, 精度是 25.69 μm。为分析打印煤矸石混凝土的微细观结构, 需先进行各相材料的阈值划分。阈值划分包含两步: 第一步确定阈值大致范围; 第二步确定具体数值。以 20% 煤矸石掺量试件为例, 图 12a 利用 AVIZO 软件中的 Line-probe 方法确定阈值大致范围^[38]。该试件 CT 图像的灰度值范围为 0~65 535 (16bit 数据), AB 线段从左往右依次通过砂浆、孔洞、煤矸石、砂浆等各相材料。AB 线段上灰度值的变化反映各相材料密度的变化, 孔隙阈值大致范围是 0~9 000, 煤矸石是 28 800~55 600, 砂浆是 9000~28 800。

利用孔隙体积分(PVF)确认具体的阈值参数。如文献^[39]所讨论, PVF 对阈值非常敏感, 较高的阈值可能会人为地将部分砂浆视为孔隙, 导致较高的 PVF 值。如图 12b 所示, 对不同孔隙阈值(0~14 000)所得 PVF 进行测定, 8 000~10 000 为中心阈值范围, 每隔 200 测定 1 次, 其余范围每隔 1000 测定 1 次。通过四阶多项式进行拟合, 以 PVF-阈值曲线的最小斜率(即二阶导数为零)处的阈值为所选的最优阈值^[38], 最终选取 0~40% 掺量煤矸石试件的孔隙阈值为 7770、7361、8608 和 8519。20% 煤矸石掺量试件二维切片的孔隙随阈值分割变化如图 13 所示。

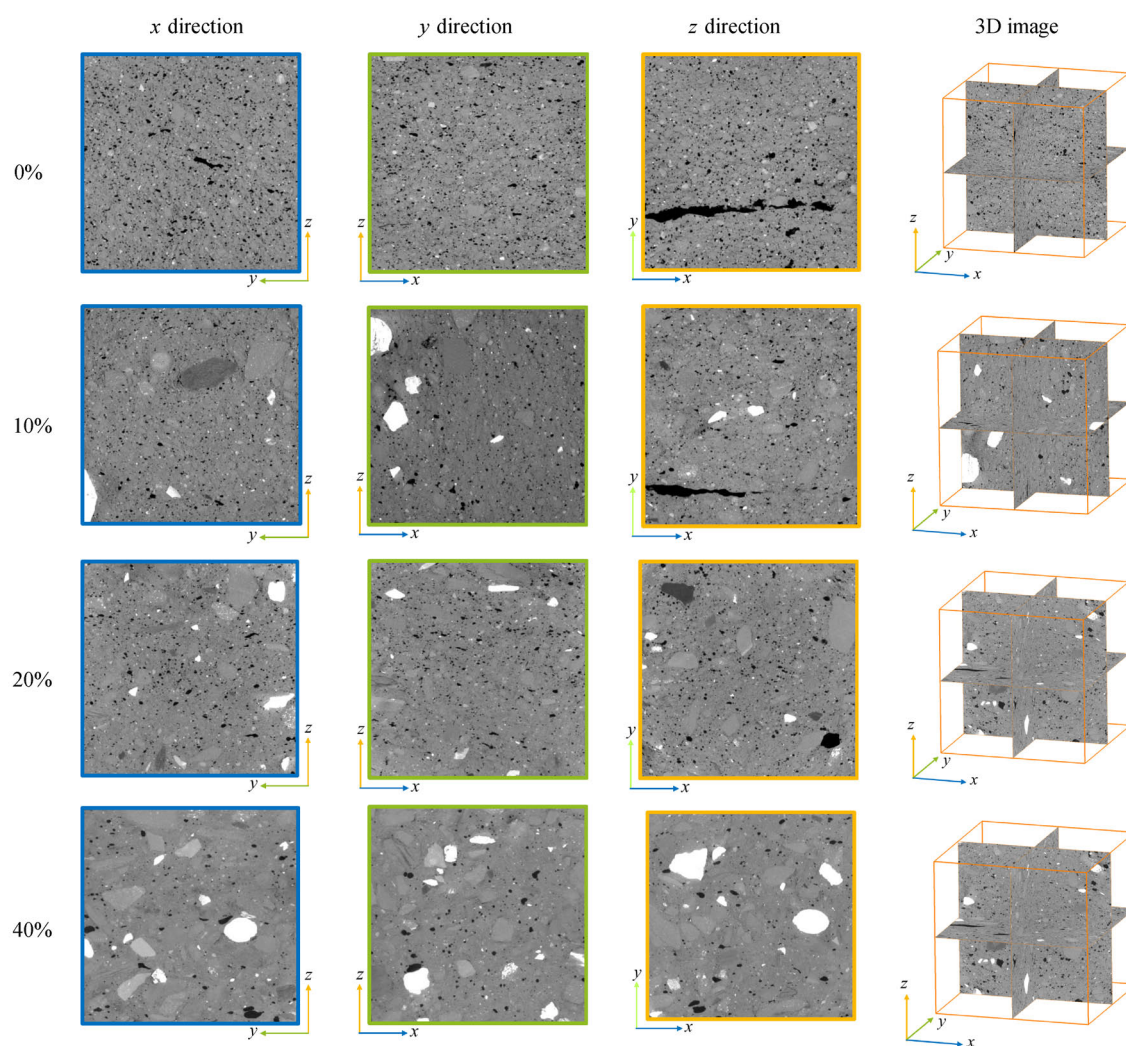


图 11 不同煤矸石掺量(0~40%)打印试件 x、y、z 方向 CT 扫描二维及三维图像

Fig. 11 CT images of printed specimens with different coal gangue contents (0~40%) along x, y and z directions

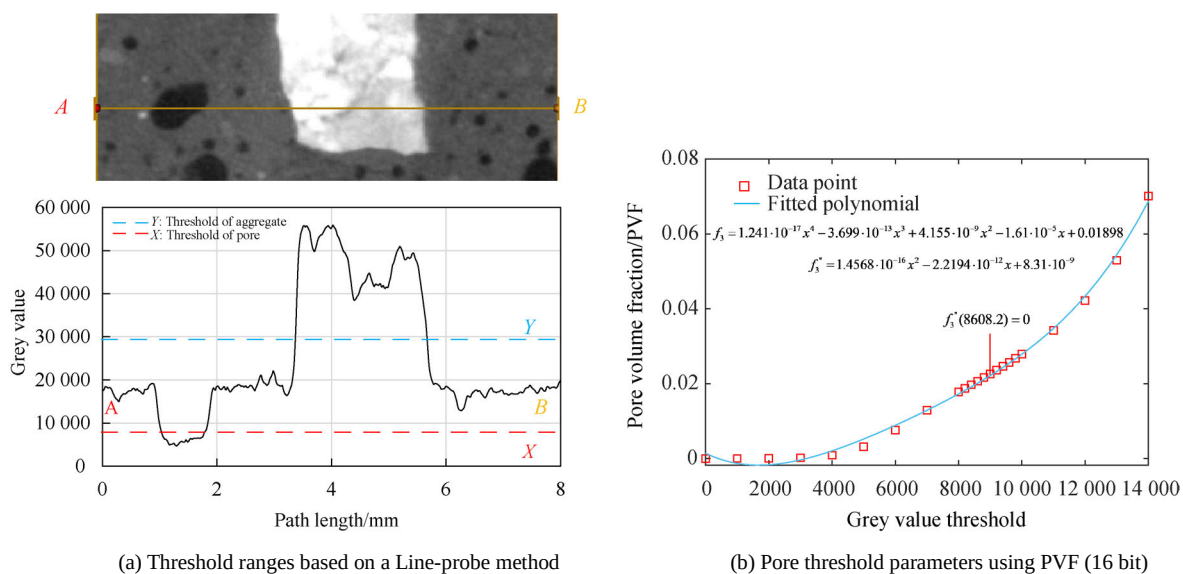


图 12 CT 图像阈值划分

Fig. 12 Threshold segmentation of CT images

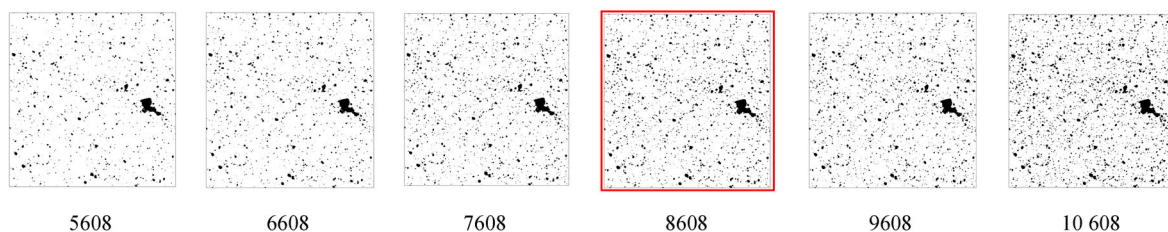


图 13 同一图像切片中使用不同阈值识别孔隙(煤矸石掺量为 20%)

Fig. 13 Pores identified using different thresholds in the same image slice (coal gangue content 20%)

图 14 划分了同一图像切片中不同煤矸石骨料, 可发现, 煤矸石作为一种固废材料, 其密度范围较大, 表观密度通常为 $2020 \sim 2610 \text{ kg/m}^3$ 、堆积密度为 $976 \sim 1550 \text{ kg/m}^3$ ^[40], 对应 CT 扫描图像明暗不同: 密度较高的煤矸石, 扫描图像明亮, 如骨料 A; 密度较低的煤矸石, 扫描图像灰暗, 如骨料 B。同时, 在颜色较亮的骨料 C 和骨料 D 内部存在颜色较暗的局部区域, 原因可能是部分煤矸石颗粒结构松散、孔隙较多或碳含量较高^[41–42], 同一颗煤矸石骨料内部存在内部密度不完全一致的情况。

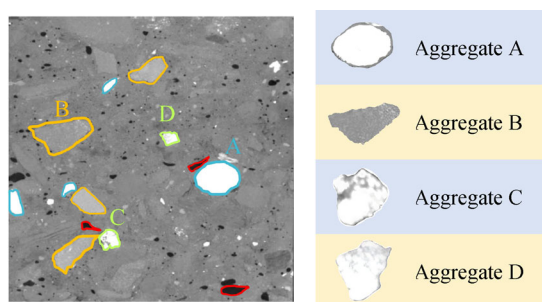


图 14 同一图像切片中不同煤矸石骨料划分

Fig. 14 Different coal gangue aggregates in the same image slice

阈值分割后, 试件的孔隙个数和孔隙率如图 15 和表 2 所示。可以看出, 含有煤矸石试件的总孔隙率低于砂浆试件(3DPM), 且随煤矸石掺量增加呈现先降低后上升的趋势。为了进一步分析不同试件中的孔隙结构, 将孔隙按照等效直径 d_{eq} 划分为小孔($d_{eq} < 1 \text{ mm}$)、中孔($1 \text{ mm} \leq d_{eq} \leq 2 \text{ mm}$)以及大孔($d_{eq} > 2 \text{ mm}$), 结果显示所有试件的孔隙主要以小孔为主, 占比均在 75%以上。值得注意的是, 3DP-CC-40 试件的中、大孔隙个数均最多、对应孔隙率较高, 原因可能是 40%煤矸石掺量的混凝土未添加河砂和石英砂细骨料, 仅使用了 2~5 mm 和 5~10 mm 的煤矸石骨料。煤矸石骨料无法填充 1~2 mm 直径的中孔, 且其表面粗糙、棱角分明, 骨料间堆积不密实, 也无法有效填充 2 mm 以上的大孔。

因此, 3DP-CC-40 试件中产生了较多等效直径在 1 mm 以上的中孔和大孔。同时, 有学者提出, 煤矸石的吸水性和吸湿性也会影响混凝土的孔隙结构, 煤矸石在吸水后会减少基体中的水分进而增大基体中的孔隙率^[43]。而在 3DPM 中, 由于缺少粗骨料的骨架约束作用, 其收缩应力完全由砂浆承担, 因此在砂浆收缩时, 浆体内部产生的拉应力无法被分散, 导致 3DPM 出现了较大的孔隙率^[44]。另外, 按照 z 方向坐标轴, 将试件分为上半部分($20 < z \leq 40 \text{ mm}$)和下半部分($0 \leq z < 20 \text{ mm}$), 表 2 列出了试件上下两部分的孔隙率, 可以发现, 打印试件上半部分孔隙率均略高于下半部分, 这是由于 3D 打印逐层堆叠的特性, 使试件下半部分受到上半部分材料重量压缩等作用, 压缩了孔隙体积。

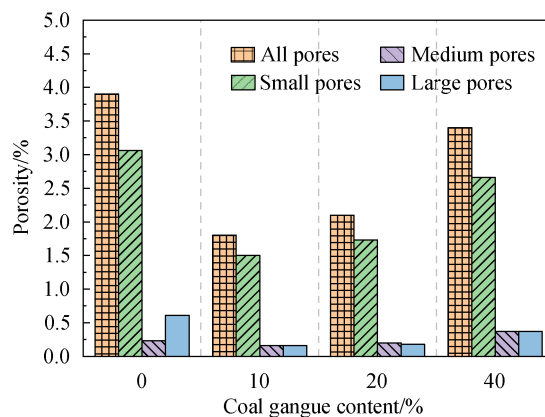
图 15 不同煤矸石掺量打印试件大、中、小孔隙的孔隙率对比
Fig. 15 Porosity comparison of large, medium and small pores in printed specimens

图 16 展示了不同尺寸孔隙的三维图像, 发现 3DPM 试件受到打印层间的影响, 含有 2 条明显的层条间孔隙, 这也是其大孔隙率最高的原因之一(见表 2)。3DP-CC-10 试件含有 1 条层条间孔隙, 且该孔隙受到煤矸石骨料的影响, 曲折度高于 3DPM 试件。与条带状孔隙不同, 3DP-CC-20 和 3DP-CC-40 试件中的大孔隙主要是不连通、独立的大孔。

表 2 不同大小孔隙的总数量和孔隙率
Table 2 Total number and porosity of pores with different sizes

Specimen Number	3DPM	3DP-CC-10	3DP-CC-20	3DP-CC-40
Total number of pores	2 648 316	1 595 313	1 456 770	2 736 371
Total porosity	3.90%	1.80%	2.10%	3.40%
Number of small pores	2 641 122	1 591 449	1 450 992	2 721 725
Small Pore Porosity	3.06%	1.50%	1.73%	2.66%
Number of medium pores	6 728	3 290	5 175	13 162
Medium Pore Porosity	0.23%	0.16%	0.20%	0.37%
Number of large pores	466	574	603	1 484
Large Pore Porosity	0.61%	0.16%	0.18%	0.37%
Porosity in the upper half	4.00%	2.10%	2.00%	3.20%
Porosity in the lower half	3.20%	1.60%	1.60%	2.90%

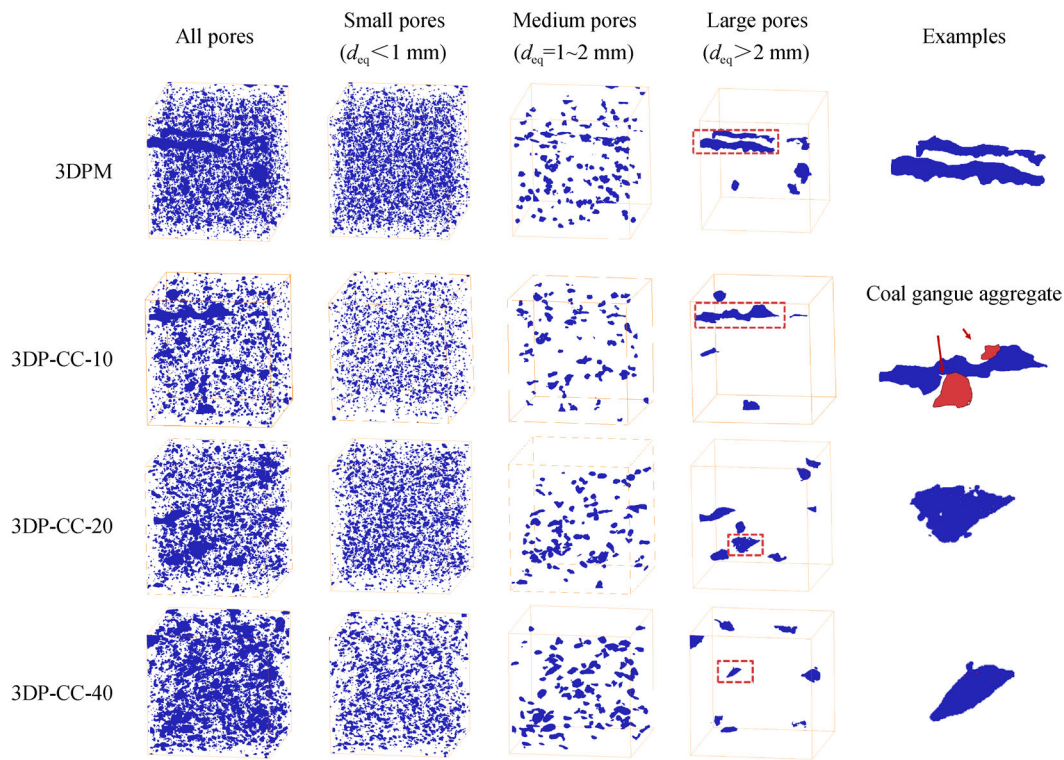


图 16 不同煤矸石掺量打印试件中不同大小孔隙的空间分布
Fig. 16 Spatial distribution of pores with different sizes in 3DP-CC specimens

图 17 对 3DP-CC-40 试件的煤矸石骨料进行形态划分。根据球度指标 SI (Sphericity Index)把骨料颗粒分为 I 类($0.3 < SI < 0.6$)、II 类($0.6 < SI < 0.8$)、III 类($0.8 < SI < 0.95$) 3 个形态类别^[45]。以 3DP-CC-40 试件为例, I 类、II 类、III 类 3 种形态骨料数量比为 23:37:9。可发现其中 I 类与 II 类骨料较多,这是由于煤矸石在破碎过程中受到冲撞和挤压,使其表观形貌更加粗糙且棱角分明。而含有较多 I 类与 II 类骨料也是导致 3DP-CC-40 流动度下降的原因之一。

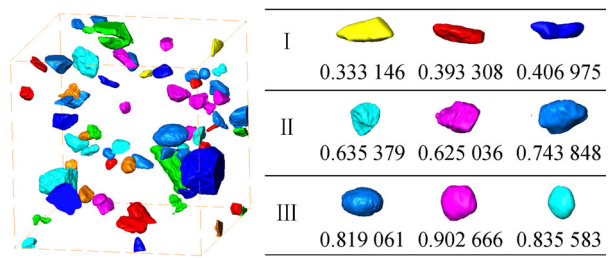


图 17 3DP-CC-40 试件中煤矸石骨料的形态划分
Fig. 17 Morphological division of coal gangue aggregates in 3DP-CC-40

2.6 轴心压缩和三点弯曲试件的破坏模式

图 18 展示了压缩试件的裂缝分布情况，黄色高亮线条表示裂缝，蓝色不规则多边形为裂缝绕过的煤矸石骨料，红色多边形为裂缝穿过的煤矸石骨料。通过对受压破坏图像的分析，可以观察到试件受压破坏模式与加载方向相关。图 19 对压缩试件的主要破坏模式进行了归纳分类，当试件以 x 面作为受压面(L_x)时(图 19a)，其 y 侧面的破坏图

像呈现出一种从两侧边缘向内延伸、再向下竖直扩展的破坏模式。此破坏路径与打印过程中层间延伸的方向基本一致，裂缝穿过层间界面，形成相对较脆的破坏模式，变形较小，这表明层间粘结性能在此类破坏中起主导作用。如图 19b 和图 19c 所示，当以 y 面(L_y)或 z 面(L_z)作为受压面时，侧面(x 面)的破坏形态呈现出一种独特的“π”字形裂缝特征，并伴有两侧剥落破坏的现象。该破坏

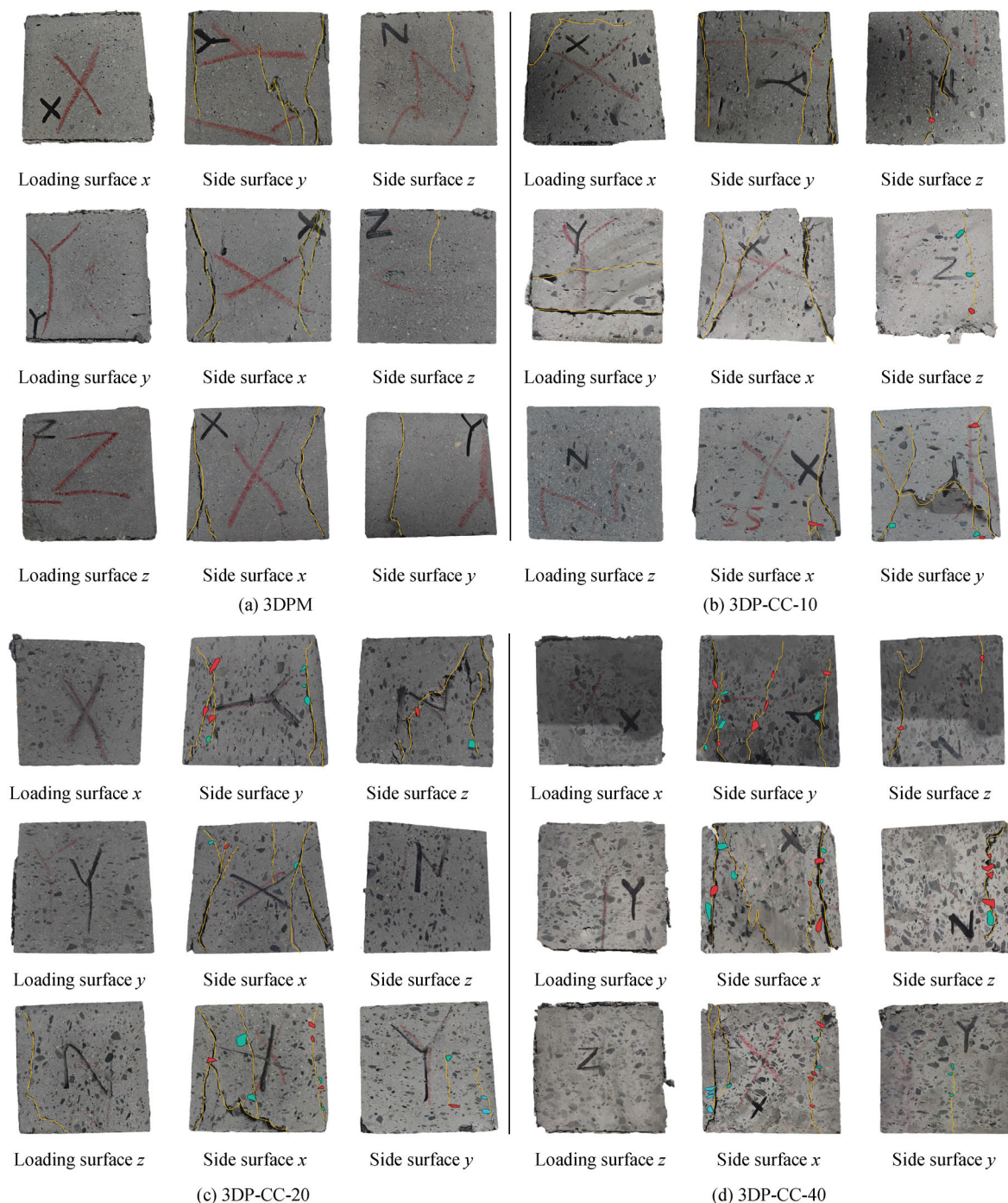


图 18 不同加载方向的压缩试件的裂缝分布情况

Fig. 18 Fracture patterns from compression tests under different loading directions

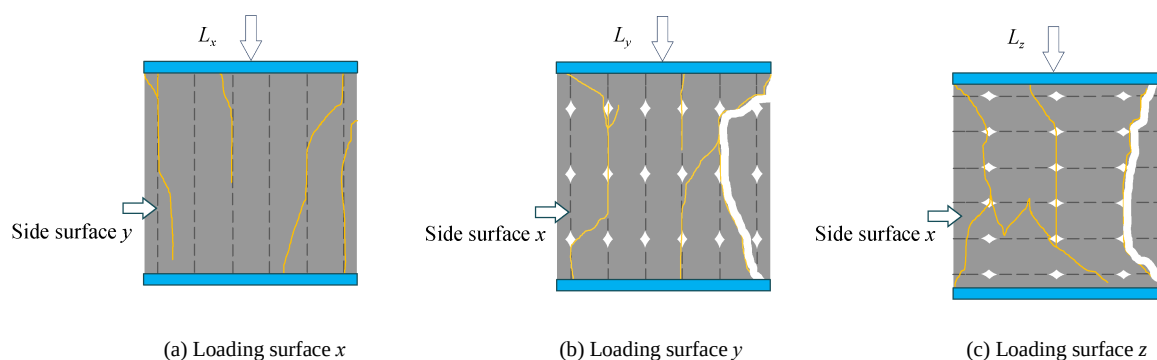


图 19 不同加载方向的压缩试件的破坏模式分类示意图

Fig. 19 Schematic diagram of fracture mode classification from compression tests under different loading directions

模式反映了 x 面同时受到层间与条间薄弱界面的双重作用, 进一步凸显了层间与条间薄弱界面在裂缝演化过程中的重要影响, 也解释了图 19b 和图 19c 中侧面破坏情况比图 19a 更为严重的机理。因此, 层条间粘结性能决定了 3D 打印试件沿不同加载方向的破坏模式, 是影响打印试件整体力学性能的关键因素^[46]。这也提示增强层间粘结性能可有效提升打印试件的宏观力学性能, 如 Xu 等^[47]通过刷环氧树脂粘结剂提升打印试件的抗压、抗弯强度。图 18 中红色与蓝色不规则多边形分别代表了被裂缝直接穿过与绕过的煤矸石骨料, 可看出随煤矸石掺量增加, 被裂缝穿过和绕过的煤矸石骨料量均有增加, 其他定量规律需开展更多研究才可发现。

对于三点弯曲试件, 从图 20~图 23 可以发现, 加载面为 x 面时, 所有掺量试件的加载面均出现贯穿型直裂缝, 试件均脆断为两段。加载面为 y 面时, 0%掺量试件的加载面(y 面)未出现贯穿型裂缝, 其余出现贯穿型直裂缝。加载面为 z 面时, 只有煤矸石掺量为 40% 时会出现贯穿型裂缝, 其余掺量的试件加载面未出现裂缝。以上情况说明, 加载面为 x 面时, 试件的脆性更明显, 原因见图 4, 加载面 x 的条间界面与断裂面平行, 因此裂缝更容易沿着加载面 x 的条间界面扩展; 而加载面为 y 面、 z 面时, 断裂面与层间、条间界面垂直, 裂纹较少受到层条间界面影响, 路径更加曲折, 主要与煤矸石和孔隙分布有关^[48]。上述影响也反映在试件的抗弯强度随煤矸石掺量增加的变化规律中。

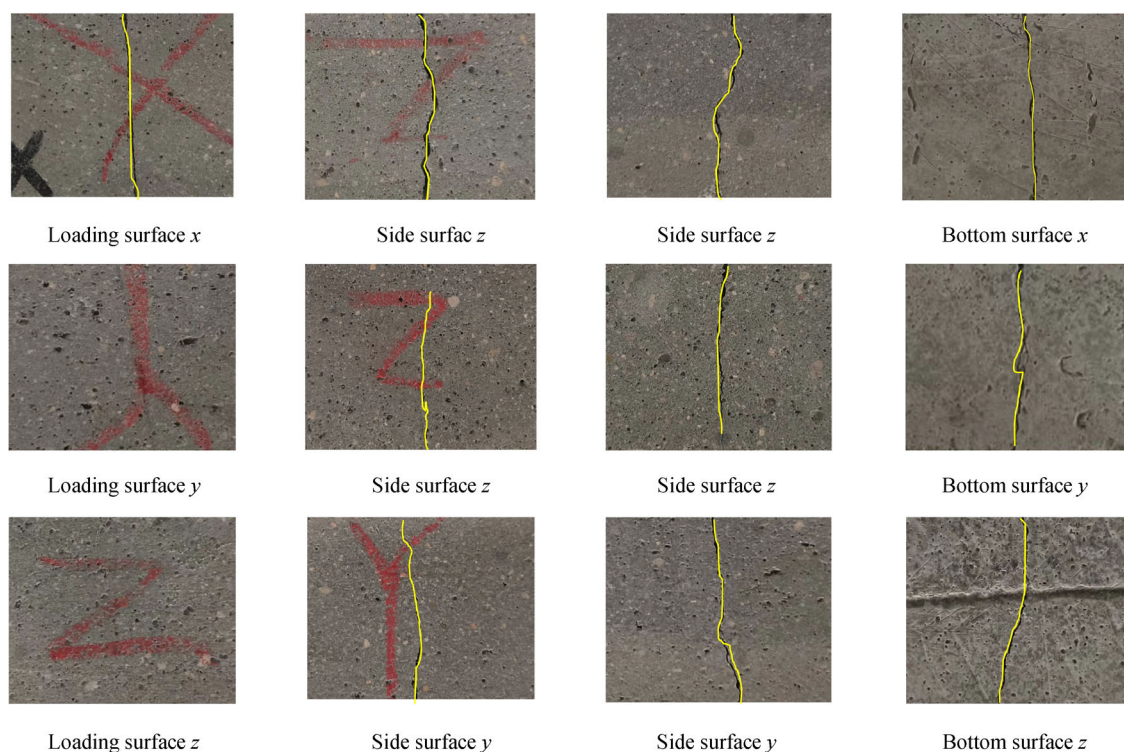


图 20 不同加载方向的三点弯曲试件的裂缝分布情况(3DPM)

Fig. 20 Fracture patterns from three-point bending tests under different loading directions (3DPM)

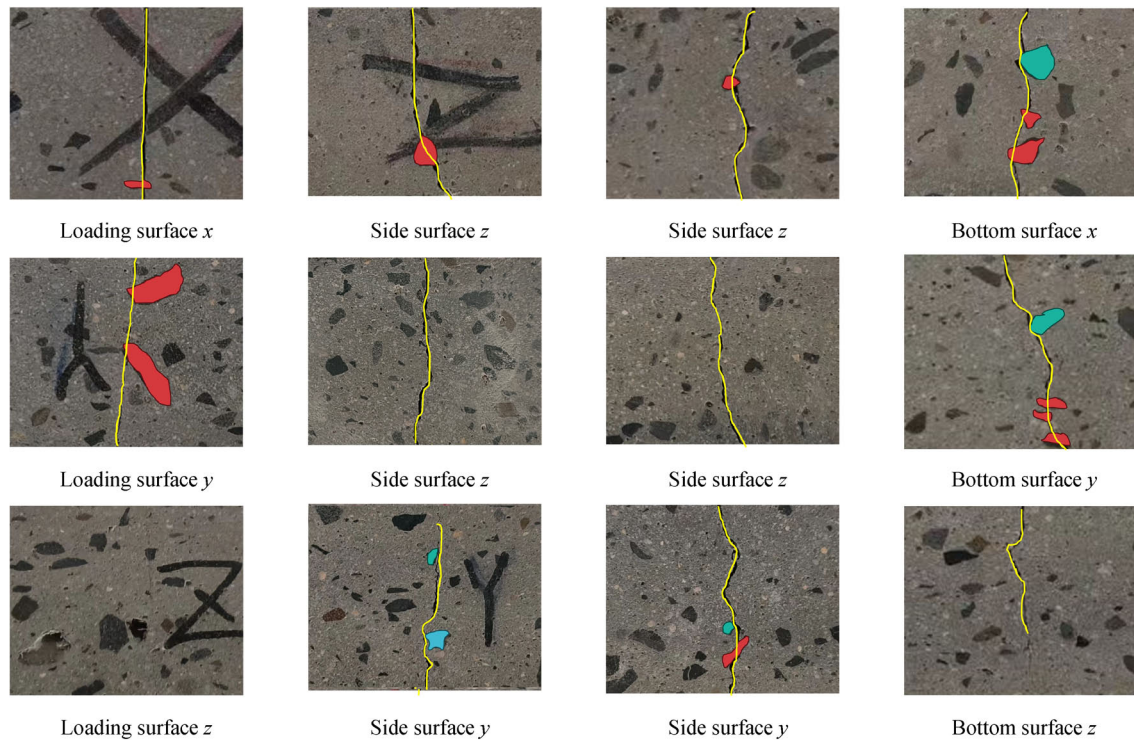


图 21 不同加载方向的三点弯曲试件的裂缝分布情况(3DP-CC-10)

Fig. 21 Fracture patterns from three-point bending tests under different loading directions (3DP-CC-10)

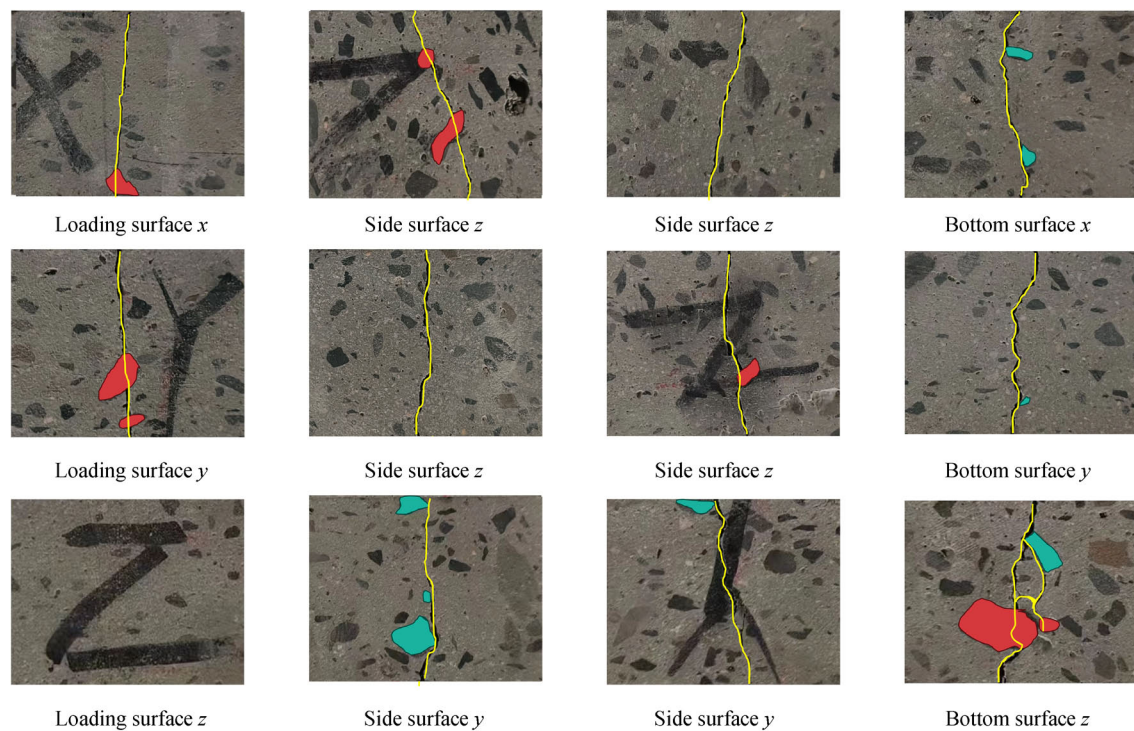


图 22 不同加载方向的三点弯曲试件的裂缝分布情况(3DP-CC-20)

Fig. 22 Fracture patterns from three-point bending tests under different loading directions (3DP-CC-20)

2.7 打印方向对力学性能的影响

图 24 展示了打印方向对不同煤矸石掺量试件抗压和抗弯力学性能的影响。如图 24a 所示, 相较于

于没有煤矸石的打印砂浆试件, 掺入煤矸石试件抗压强度的各向异性程度均有所降低, 指标 λ 降低约 50%。这是由于煤矸石骨料为打印试件提供了嵌套

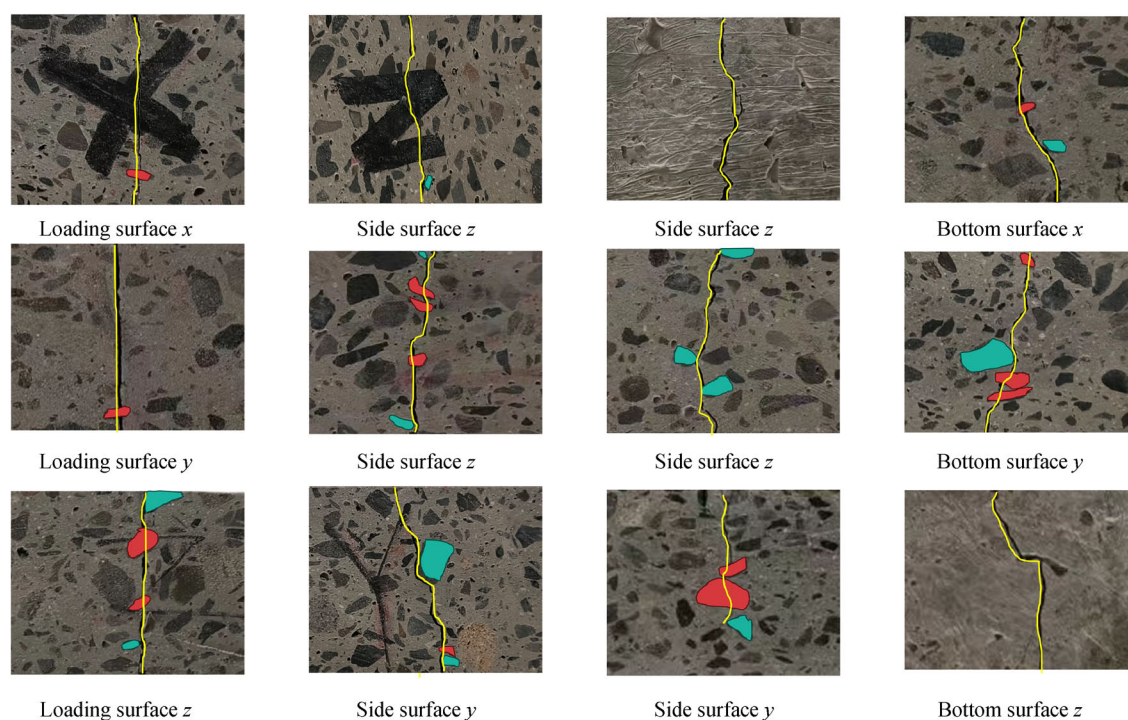


图 23 不同加载方向的三点弯曲试件的裂缝分布情况(3DP-CC-40)

Fig. 23 Fracture patterns from three-point bending tests under different loading directions (3DP-CC-40)

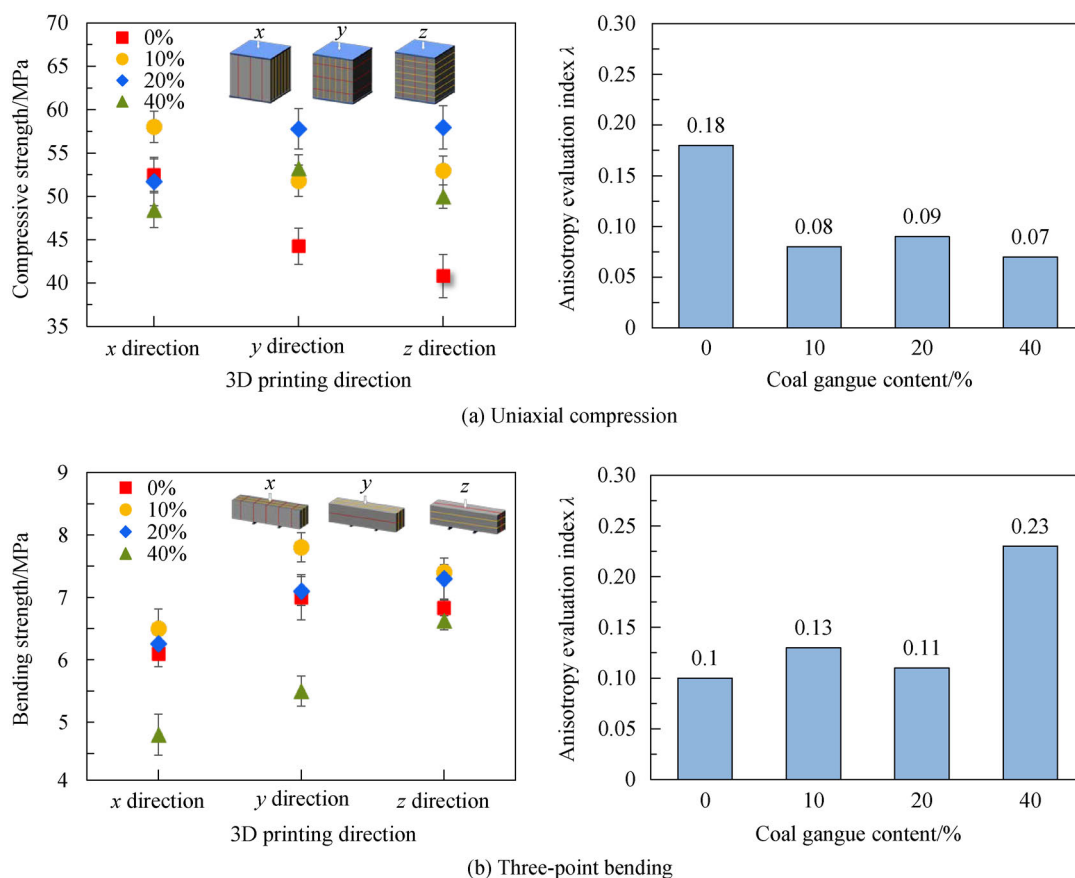


图 24 不同加载方向各煤矸石掺量试件压缩和三点弯曲力学性能测试结果

Fig. 24 Mechanical properties of specimens with different coal gangue contents under different loading directions from uniaxial compression and three-point bending tests

啮合和骨架支撑作用^[49–50],有效减少了打印试件层条间孔隙的产生,这证明煤矸石骨料的加入对改善试件抗压性能的各向异性具有积极的作用。

在图 24b 中,煤矸石掺量对抗弯强度各向异性的影响规律与抗压完全不同。相较于没有煤矸石的打印砂浆试件,当煤矸石掺量为 10%和 20%时,三点弯曲测试中的各向异性指标 λ 的变化幅度较小;然而,当煤矸石掺量达到 40%时,该指标增加了 130%,原因如下: 1) 掺量为 40%时,试件内部大、中孔隙数量显著多于其他掺量(表 2),这直接导致了试件在所有方向上的力学性能降低; 2) 由于层间薄弱界面的作用(图 4),使得 x 方向上的抗弯性能的降低幅度明显大于 y 方向与 z 方向; 3) 据报道,打印过程中由于挤压与拖拽的影响,骨料可能出现定向排列的情况^[51],因此在沿打印条排列方向(y 方向)

和重力方向(z 方向)加载时,骨料能够发挥骨架支撑与连接作用,使得 y 方向和 z 方向的三点弯曲强度大于 x 方向的三点弯曲强度。以上原因导致了 3DP-CC-40 三点弯曲试件的各向异性力学性能。

2.8 煤矸石粗骨料掺量对力学性能的影响

如图 25 所示,随着煤矸石粗骨料掺量的增加,3DP-CC 3 个方向的抗压、三点弯曲强度均呈现先增大后减小的趋势。掺量为 10%或 20%时强度增加较为明显。原因有 2 方面: 第一,如前文所述,粗骨料提供骨架支撑作用能够有效增强混凝土的力学强度; 第二,煤矸石掺量为 10%以及 20%时,3DPC 中孔隙率较低,试件中缺陷较少。但当煤矸石掺量达到 40%时,由于煤矸石自身强度低容易开裂,且 40%掺量试件的中、大孔隙率较高(见图 16),因此整体强度降低。

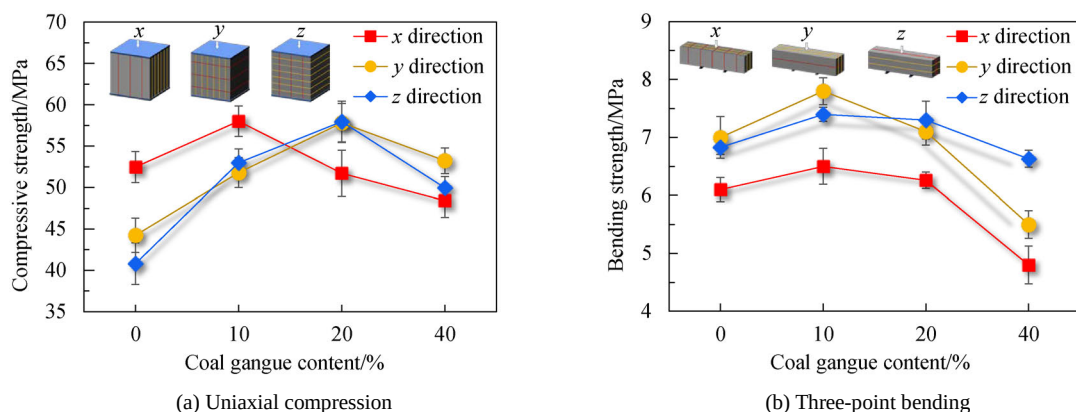


图 25 不同煤矸石掺量试件压缩和三点弯曲力学性能测试结果

Fig. 25 Mechanical properties of specimens with different coal gangue contents (0, 10%, 20% and 40%) under uniaxial compression and three-point bending tests

3 结论

1) 3DP-CC 的孔隙结构复杂且受煤矸石掺量影响: 采用 CT 技术,发现随着煤矸石掺量的增加,试件的总孔隙率呈现先降低后升高的趋势。3D 打印砂浆试件受到打印层间的影响,含有 2 条明显的层条间孔隙,这也是其大孔孔隙率最高的原因之一;而在掺量为 40%时,由于缺乏河砂和 2 种石英砂(最大粒径不超过 2.36 mm)等粒径较小的骨料填充,导致试件内部的大、中孔隙($d_{eq} \geq 1$ mm)数量明显增加。此外,由于 3D 打印的逐层堆叠特性,试件上半部分的孔隙率通常略高于下半部分,这是上半部分材料受到自身重量及后续材料堆叠压缩作用较小所致。

2) 煤矸石掺量是影响 3DP-CC 抗压、抗弯强度

的重要因素: 3DP-CC 的抗压强度与三点弯曲强度随煤矸石掺量增加均呈现先升后降的非线性变化趋势。抗压、抗弯强度测试结果的最高值均在 10%或 20%煤矸石掺量的试件中产生。这是由于粗骨料的适量加入能够提供骨架支撑作用,有效增强了混凝土的力学强度;并且煤矸石掺量为 10%以及 20%时,3DPC 中孔隙率较低,试件缺陷较少。但当煤矸石掺量达到 40%时,由于煤矸石自身强度低,容易开裂,且 40%掺量试件的中、大孔孔隙率较高,导致其整体强度降低,且在三点弯曲测试中较为明显。

3) 3DP-CC 存在抗压、抗弯强度的各向异性特征,且层间粘结性能是影响 3DP-CC 各向异性的关键因素: 通过抗压、抗弯性能测试发现,3DP-CC 在 x 、 y 、 z 3 个方向上的力学性能存在显著差异,即呈现出明显的各向异性特征。随着煤矸石掺量的增

加, 3DP-CC 抗压强度的各向异性程度减弱, 这主要是因为煤矸石骨料为打印试件提供了嵌套啮合和骨架支撑作用, 有效减少了打印试件层条间孔隙的产生; 而抗弯性能的各向异性程度随煤矸石掺量增加先降低后增加, 在 40%掺量时各向异性程度最大, 原因是加载面是 x 面时, 试件开裂方向平行于层间界面方向, 因此裂缝更容易沿着 x 面的层间界面扩展。

4) 受压破坏模式受到层间与条间薄弱界面的显著影响: 非受压面中 y 侧面的破坏图像为从两侧边缘向内延伸、再向下竖直扩展的破坏模式, x 面的破坏形态为“ π ”字形裂缝特征: x 面同时受到层间与条间薄弱界面的共同作用, 破坏情况相较于 y 面与 z 面更为严重。同时, 由于煤矸石骨料强度存在波动, 在受压或弯曲破坏时, 试件表面会出现裂缝绕过骨料或直接穿过骨料的现象。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张超, 邓智聪, 侯泽宇, 等. 混凝土 3D 打印研究进展[J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 16–21.
ZHANG Chao, DENG Zhicong, HOU Zeyu, et al. Ind Constr, 2020, 50(8): 16–21.
- [3] HOSSAIN M A, ZHUMABEKOVA A, PAUL S C, et al. A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market[J]. Sustainability, 2020, 12(20): 8492.
- [4] 肖建庄, 柏美岩, 唐宇翔, 等. 中国 3D 打印混凝土技术应用历程与趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(5): 1–14.
XIAO Jianzhuang, BAI Meiyan, TANG Yuxiang, et al. J Archit Civ Eng, 2021, 38(5): 1–14.
- [5] 常西栋, 李维红, 王乾. 3D 打印混凝土材料及性能测试研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2435–2441.
CHANG Xidong, LI Weihong, WANG Qian. Bull Chin Ceram Soc, 2019, 38(8): 2435–2441.
- [6] 朱艳梅, 张翼, 蒋正武. 羟丙基甲基纤维素对 3D 打印砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1123–1130.
ZHU Yanmei, ZHANG Yi, JIANG Zhengwu. J Build Mater, 2021, 24(6): 1123–1130.
- [7] PANDA B, TAN M J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing[J]. Ceram Int, 2018, 44(9): 10258–10265.
- [8] 刘超, 蒙毅升, 武怡文, 等. 3D 打印再生砂浆早期流变性能及结构经时演化研究[J]. 材料导报, 2024, 38(9): 122–129.
LIU Chao, MENG Yisheng, WU Yiwen, et al. Mater Rep, 2024, 38(9): 122–129.
- [9] 侯少丹, 肖建庄, 段珍华. 3D 打印细石混凝土调配及其可打印性和力学性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7): 730–736.
HOU Shaodan, XIAO Jianzhuang, DUAN Zhenhua. J Build Mater, 2022, 25(7): 730–736.
- [10] 王里, 王伯林, 白刚, 等. 3D 打印混凝土各向异性力学性能研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2): 243–250.
WANG Li, WANG Bolin, BAI Gang, et al. J Exp Mech, 2020, 35(2): 243–250.
- [11] 马国伟, 柴艳龙, 王里, 等. 3D 打印陶砂轻质混凝土的制备与力学性能测试[J]. 实验力学, 2020, 35(1): 58–66.
MA Guowei, CHAI Yanlong, WANG Li, et al. J Exp Mech, 2020, 35(1): 58–66.
- [12] 侯泽宇, 张宇, 张超, 等. 3D 打印混凝土力学性能试验方法[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 1–5.
HOU Zeyu, ZHANG Yu, ZHANG Chao, et al. China Concr Cem Prod, 2019(11): 1–5.
- [13] 周林, 杜彩霞, 张鹏, 等. 3D 打印混凝土的各向抗压性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 85–89.
ZHOU Lin, DU Caixia, ZHANG Peng, et al. Build Struct, 2022, 52(6): 85–89.
- [14] 王海龙, 陶傲, 孙晓燕. 应变率对 3D 打印混凝土抗压性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(5): 1499–1507.
WANG Hailong, TAO Ao, SUN Xiaoyan. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(5): 1499–1507.
- [15] 孙晓燕, 乐凯笛, 王海龙, 等. 挤出形状/尺寸对 3D 打印混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1313–1320.
SUN Xiaoyan, LE Kaidi, WANG Hailong, et al. J Build Mater, 2020, 23(6): 1313–1320.
- [16] NERELLA V N, HEMPEL S, MECHTCHERINE V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing[J]. Constr Build Mater, 2019, 205: 586–601.
- [17] 张超. 基于流变学的 3D 打印混凝土设计及其基本性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
ZHANG Chao. Research on design of 3D printable concrete based on rheology and its basic properties[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [18] 邓智聪. 3D 打印轻骨料混凝土的制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
DENG Zhicong. Research on preparation and performance of 3d printing lightweight aggregate concrete[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [19] RAHUL A V, SANTHANAM M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2020, 109: 103570.
- [20] 张云升, 陈逸东, 刘诚. 含粗骨料 3D 打印混凝土可打印、力学、收缩性能与碳排放分析[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2153–2165.
ZHANG Yunsheng, CHEN Yidong, LIU Cheng. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(9): 2153–2165.
- [21] 汲广超, 肖建庄. 3D 打印粗骨料混凝土力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 1711–1718.
JI Guangchao, XIAO Jianzhuang. J Tongji Univ Nat Sci, 2023, 51(11): 1711–1718.
- [22] LIU Y, WANG L, YUAN Q, et al. Effect of coarse aggregate on printability and mechanical properties of 3D printed concrete[J]. Constr Build Mater, 2023, 405: 133338.

- [23] 刘化威. 孔隙结构缺陷对 3D 打印粗骨料混凝土力学性能影响机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
LIU Huawei. Study on mechanism of pore structure defects on mechanical properties of 3D printed coarse aggregate concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [24] 段珍华, 吕振源, 肖建庄, 等. 3D 打印全再生粗骨料混凝土各向异性力学性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 370–377.
DUAN Zhenhua, LÜ Zhenyuan, XIAO Jianzhuang, et al. J Tongji Univ Nat Sci, 2024, 52(3): 370–377.
- [25] LIU H W, LIU C, WU Y W, et al. Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate[J]. Cem Concr Res, 2022, 159: 106868.
- [26] YU L L, XIA J W, XIA Z, et al. Study on the mechanical behavior and micro-mechanism of concrete with coal gangue fine and coarse aggregate[J]. Constr Build Mater, 2022, 338: 127626.
- [27] 董作超. 煤矸石集料混凝土的力学性能与抗碳化试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
DONG Zuochao. Experimental study on mechanical properties and carbonation resistance of coal gangue aggregate concrete[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [28] 刘瀚卿, 白国良, 朱可凡, 等. 煤矸石混凝土抗折强度试验研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4): 346–352.
LIU Hanqing, BAI Guoliang, ZHU Kefan, et al. J Build Mater, 2023, 26(4): 346–352.
- [29] 彭少斌, 管学茂. 3D 打印煤矸石砂浆流变性能、打印性能与力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1623–1632.
PENG Shaobin, GUAN Xuemao. Bull Chin Ceram Soc, 2024, 43(5): 1623–1632.
- [30] SUN J B, LIU S K, MA Z G, et al. 3D printed lightweight concrete containing surface pretreated coal gangue[J]. Case Stud Constr Mater, 2024, 20: e02906.
- [31] 刘化威, 刘超, 白国良, 等. 基于孔结构缺陷的 3D 打印粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 54–64.
LIU Huawei, LIU Chao, BAI Guoliang, et al. China Civ Eng J, 2022, 55(12): 54–64.
- [32] WOLFS R J M, BOS F P, SALET T A M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing[J]. Cem Concr Res, 2018, 106: 103–116.
- [33] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022 3D 打印混凝土拌合物性能试验方法[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2022.
- [34] RAHUL A V, MOHAN M K, DE SCHUTTER G, et al. 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour[J]. Cem Concr Compos, 2022, 125: 104311.
- [35] CHEN Y D, ZHANG Y S, ZHANG Y, et al. Influence of gradation on extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate[J]. Constr Build Mater, 2023, 403: 133135.
- [36] 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, 67–68: 340–352.
- [37] HUANG Y J, GUO F Q, ZHANG H, et al. An efficient computational framework for generating realistic 3D mesoscale concrete models using micro X-ray computed tomography images and dynamic physics engine[J]. Cem Concr Compos, 2022, 126: 104347.
- [38] ZHANG X, YANG Z J, PANG M, et al. Ex-situ micro X-ray computed tomography tests and image-based simulation of UHPFRC beams under bending[J]. Cem Concr Compos, 2021, 123: 104216.
- [39] QSYMAH A, SHARMA R, YANG Z, et al. Micro X-ray computed tomography image-based two-scale homogenisation of ultra high performance fibre reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 130: 230–240.
- [40] 于乐乐, 王爱国, 仲小凡, 等. 煤矸石骨料混凝土力学和耐久性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 186–194.
YU Lele, WANG Aiguo, ZHONG Xiaofan, et al. Mater Rep, 2024, 38(20): 186–194.
- [41] LUO S Q, GAO S, YANG L, et al. Enhancing coal gangue aggregates with fly ash-cement slurry: Synergistic effects of CO₂ mineralization on physical and mechanical properties[J]. Constr Build Mater, 2024, 440: 137389.
- [42] GUAN X, LIU Y J, ZHANG X D, et al. Enhancement mechanism of microbial mineralization modified coal gangue aggregate properties[J]. Constr Build Mater, 2024, 440: 137477.
- [43] 白国良, 刘瀚卿, 刘辉, 等. 煤矸石理化特性与煤矸石混凝土力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(10): 243–254.
BAI Guoliang, LIU Hanqing, LIU Hui, et al. J Build Struct, 2023, 44(10): 243–254.
- [44] MAGHFOURI M, ALIMOHAMMADI V, GUPTA R, et al. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review[J]. Case Stud Constr Mater, 2022, 16: e00919.
- [45] 单景松, 代光伟, 王芳, 等. 骨料粒形粒径对骨架特性及透水混凝土性能影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 90–99.
SHAN Jingsong, DAI Guangwei, WANG Fang, et al. J Shandong Univ Sci Technol Nat Sci, 2025, 44(1): 90–99.
- [46] YU K Q, MCGEE W, NG T Y, et al. 3D-printable engineered cementitious composites (3DP-ECC): Fresh and hardened properties[J]. Cem Concr Res, 2021, 143: 106388.
- [47] XU Y D, WAN Z, ŠAVIJA B. Elevating mechanical performance of cementitious composites with surface-modified 3D-Printed polymeric reinforcements[J]. Dev Built Environ, 2024, 19: 100522.
- [48] LIU B, CHEN Y W, LI D D, et al. Study on the fracture behavior and anisotropy of 3D-printing PVA fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2024, 447: 138051.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 王海龙, 陈亚飞, 邹道勤, 等. 不同打印与加载方向下 3D 打印地质聚合物混凝土力学性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(4): 55–63.
WANG Hailong, CHEN Yafei, ZOU Daoqin, et al. J Changsha Univ Sci Technol Nat Sci, 2022, 19(4): 55–63.

Micro/Meso-Scale Experimental Study on Anisotropic Mechanical Properties of 3D Printing Concrete Containing Coal Gangue Coarse Aggregates

ZHANG Hui¹, ZHANG Chen¹, HUANG Yujie¹, CHENG Zhi¹, WU Jie¹, GUO Xinrong¹, XU Shilang²

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

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

Extended Abstract

Introduction Shanxi Province, as one of the regions with the largest accumulation of coal gangue in China, faces an urgent demand for efficient resource utilisation of bulk solid waste to promote regional sustainable development. The rapidly developing 3D printing construction technology, with its precise control over material distribution and the advantage of forming complex components without molds, provides an innovative path for the large-scale consumption of solid waste. Existing research focuses on the application of coal gangue as fine aggregate substitute in printing mortar, while studies regarding its utilisation as coarse aggregate in 3D printed concrete remain unreported. It is vital to reveal the micro/mesoscale mechanisms governing the printability and fracture mechanics behaviour of such concrete material, in order to develop low-carbon coal gangue-based concrete materials and advance their engineering applications. This study innovatively uses coal gangue as a coarse aggregate and combines it with 3D printing technology to produce a novel 3D printed coal gangue concrete (3DP-CC), offering a data foundation and experimental reference for the resourceful and intelligent application of coal gangue.

Methods In the experiment, 3DP-CC specimens were prepared with coal gangue contents of 0%, 10%, 20%, and 40% by mass. Firstly, the printing properties were evaluated, including flowability, buildability, extrudability, and printable time. Flowability was measured using a concrete slump cone in accordance with the JG/T 248 standard. Buildability was assessed through cylindrical slump and layer stacking tests. Extrudability was determined by evaluating the continuity and uniformity of the extruded filaments, with measurements of their width and thickness. Printable time was recorded as the duration over which the mixture could be extruded smoothly and consistently. Secondly, the internal microstructures of the 3DP-CC were examined using high-resolution X-ray CT scanning technology, allowing for the analysis of pore and aggregate characteristics. Finally, uniaxial compression and three-point bending tests were performed to determine the compressive and flexural strengths. The anisotropy index λ was introduced to quantify the directional variation in mechanical strength, followed by an analysis of the underlying mechanisms by which printing direction and coal gangue content influence mechanical properties. Failure modes were examined to highlight the critical roles of weak interlayer and interstrip interfaces, thereby providing further insight into the microscopic mechanisms governing the mechanical anisotropy of 3DP-CC.

Results and discussion The test results indicate that both the compressive and flexural strengths of 3DP-CC exhibit a trend of first increasing and then decreasing with rising coal gangue content, accompanied by notable mechanical anisotropy. At coal gangue contents of 10% and 20%, strength improved significantly while anisotropy was reduced. In contrast, a content of 40% led to a decrease in strength and an increase in anisotropy. These findings suggest that an appropriate amount of coal gangue coarse aggregate can provide skeletal support, thereby enhancing the mechanical performance of concrete and mitigating anisotropic effects. However, when the coal gangue content is too high, the low strength and high brittleness of the gangue itself, combined with an increase in medium and large pores, result in diminished overall strength and greater anisotropy.

Coal gangue content also has a pronounced effect on the pore structure of 3DP-CC, with total porosity initially decreasing and then increasing as the gangue content rises. At coal gangue contents of 10% and 20%, the total porosity of the specimens is 1.8% and 2.1%, respectively—both lower than the 3.9% observed in the control 3DPM. However, the total porosity increases to 3.4% in the 3DP-CC-40 specimens. From a microstructural perspective, the morphology of coal gangue aggregates plays a significant role in this change. The aggregates exhibit rough surfaces and angular shapes, which lead to loose packing and reduced efficiency in filling medium and large pores. Consequently, the number of pores with equivalent diameters greater than 1 mm increases in 3DP-CC-40 specimens. Furthermore, the water absorption capacity of coal gangue affects the internal pore structure of the concrete. As the aggregates absorb water, the moisture content in the surrounding matrix decreases, resulting in increased matrix porosity.

In terms of failure modes, the compressive behaviour of 3DP-CC is strongly influenced by the loading direction. When loading is applied on the x-face, the failure pattern on the y-side face shows cracks initiating at both edges, propagating inward, and then extending vertically downward. These cracks often penetrate the interlayer interfaces, leading to a relatively brittle failure mode. In contrast, loading on the y-face or z-face produces a distinctive "π"-shaped crack pattern on the x-face, accompanied by spalling damage on both sides, indicating that the weak interlayer and interstrip interfaces play a critical role in crack development. The failure mode under three-point bending is also dependent on the loading direction. When the x-face serves as the loading surface, all specimens—regardless of coal gangue content—exhibit through-thickness, straight cracks and undergo brittle fracture into two parts. When the y-face is loaded, through-thickness cracks are absent in specimens with 0% coal gangue but present in those with higher contents. For loading on the z-face, only specimens with 40% coal gangue exhibit through-thickness cracks, while others show no visible cracking on the loading surface. These observations suggest that specimens loaded on the x-face exhibit greater brittleness,

with cracks more readily propagating along interstrip interfaces.

Conclusion The coal gangue content significantly influences the performance of 3D printed concrete (3DP-CC). Optimal mechanical properties—both compressive and flexural strength—are achieved at a coal gangue content of 10~20%, attributed to the skeletal support provided by the gangue particles and the associated reduction in porosity. However, at a content of 40%, both strengths significantly decrease due to the inherent weakness and brittleness of coal gangue, its tendency to induce cracking, and the increase in macroporosity. The pore structure exhibits a non-linear response to coal gangue content: total porosity decreases when the content is below 20%, but rises sharply at 40% as a result of insufficient fine aggregate filling, leading to the formation of numerous large pores. 3D printing introduces directional porosity, with the upper layers exhibiting slightly higher porosity. In addition, pronounced mechanical anisotropy is observed, as quantified by the anisotropy index. Increasing the coal gangue content tends to reduce the anisotropy of compressive strength. In contrast, the anisotropy of flexural strength exhibits a non-monotonic trend: it initially decreases and then increases, reaching a maximum at 40% gangue content. Failure is predominantly governed by weak interlayer and interstrip interfaces, along which cracks consistently propagate under both compressive and flexural loading. Coal gangue aggregates influence crack trajectories—cracks either bypass or penetrate the aggregates depending on local strength fluctuations. These findings offer valuable insights for the design of sustainable 3D printed concrete, emphasizing the importance of optimizing coal gangue content and microstructures to balance strength, anisotropy, and resource utilisation.

Keywords 3D printed concrete; coal gangue; coarse aggregate; micro/meso-structure; mechanical anisotropy