

文章编号:1001-4888(2020)01-0058-09

## 3D 打印陶砂轻质混凝土的制备与力学性能测试<sup>\*</sup>

马国伟<sup>1,2</sup>, 柴艳龙<sup>1,2</sup>, 王里<sup>1,2</sup>, 刘森<sup>2,3</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 智慧基础设施研究院, 天津 300401;

3. 西澳大学 土木环境与采矿工程学院, 澳大利亚 珀斯 6009)

**摘要:** 混凝土 3D 打印在土木建筑等领域取得了迅速的发展和應用, 利用陶砂制备 3D 打印混凝土材料有利于提升打印结构的轻量化。本文首先研究了陶砂的物理性质, 配制了 5 种不同陶砂掺量的混凝土, 结合流动性与早期刚度测试结果, 确定了满足挤出型 3D 打印的配合比。其次借助自行研发的 3D 打印机制备了 4 种不同路径的立方体试件和棱柱体试件, 评估了打印路径对 3D 打印结构抗压、抗弯和劈裂力学性能的影响。试验结果为拓展陶砂材料的资源化利用, 3D 打印材料的设计与工程应用提供了试验数据和参考。

**关键词:** 3D 打印; 陶砂混凝土; 打印路径; 力学性能

**中图分类号:** TU528      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-180

### 0 引言

20 世纪 90 年代, 3D 打印技术逐步被引入土木建筑领域, 并获得了迅速的发展和應用。建筑级 3D 打印具有打印复杂结构、节约建造时间、工艺绿色环保等优点<sup>[1-6]</sup>。建筑 3D 打印的关键在于满足打印工艺的混凝土材料的制备。混凝土材料要求具有流动性、挤出性、建造性与凝结性等性质, 以保证打印过程连续不间断、不坍塌, 且具有一定的粘聚力, 最终达到结构要求的强度与耐久性。目前, 在适用于挤出型 3D 打印系统的材料制备和性能研究方面, 国内外的研究者已经取得了一定的成果和进展<sup>[7-10]</sup>。Hambach 等<sup>[11]</sup>研究了在混凝土中有序排列玻璃、玄武岩和碳纤维的 3D 打印混凝土材料, 有效地提高了其抗弯曲强度。Shakor 等<sup>[12]</sup>研究了 3D 打印铝酸钙水泥水性粘剂, 有效地增强了设计结构的强度。

将工业、矿业、建筑固体废料用于 3D 打印混凝土的制备, 可有效地促进 3D 打印材料的环保化和低碳化<sup>[13, 14]</sup>。目前大量煤矸石、淤泥、粉煤灰等固体废弃物被用于制作陶砂, 不仅为生产陶砂混凝土提供了大量的原料, 而且大大降低了环境负担, 消除了环境污染, 对实现可持续发展具有重大意义。凌天清等<sup>[15]</sup>使用粉煤灰掺量 40% 的陶砂砂浆, 制备了隧道降噪陶砂混凝土, 研究表明提高了拱壁对声波的散射能力与吸收能力。杨毅<sup>[16]</sup>使用预湿饱和的陶砂砂浆, 制备了抗冻性良好的陶砂混凝土。王彦<sup>[17]</sup>的研究表明, 陶砂的孔结构和“微泵”作用对陶砂混凝土的抗冻性具有有利影响, 其抗冻性能随着陶砂预湿时间的增加而增加, 随着水灰比的减小而增加; 王长宝等<sup>[18]</sup>使用粉煤灰陶砂, 制备了陶砂混凝土自保温砌块, 研究表明粉煤灰陶砂混凝土具有质轻、保温等性能。

尽管国内外学者在陶砂混凝土材料的制备方面取得了一定的研究成果, 然而 3D 打印混凝土材料

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项(No. 51627812), 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808183)

通讯作者: 王里(1988-), 男, 博士, 硕士生导师。主要从事 3D 打印水泥基复合材料高性能化和智能化的研究。Email: wangli@126.com

需要满足更严格的流动性、建造性、早期刚度等要求。陶砂混凝土的流动性、均质性与可泵性会直接影响到 3D 打印的工作效率。陶砂的轻质多孔隙结构会使其在混凝土中产生上浮现象,严重影响材料的均质性,进而对 3D 打印结构产生较大影响。3D 打印是持续挤出建造的过程,灵活度高,然而,材料从喷头挤出时形成的“带状”细观结构导致了 3D 打印宏观模型的力学非均质性。打印过程中的路径规划对力学性能具有重要的影响。目前,尚无 3D 打印陶砂混凝土材料制备的研究报道。鉴于此,本文探究了将陶砂制备 3D 打印混凝土的可行性以及可应用性,并试验测试了不同打印路径对材料力学行为的影响。

## 1 3D 打印陶砂混凝土材料的制备

### 1.1 陶砂物理特性分析

#### 1.1.1 陶砂的级配分析

对实验室的粗、中、细三种不同粒径尺寸的陶砂通过干筛法进行筛分试验,分析陶砂颗粒的级配特征,为配制混凝土做准备。对每种陶砂进行三次筛分试验,得出平均结果,绘制其级配曲线如图 1 所示。从级配曲线图可得出,粗陶砂级配曲线形状陡峭,表示其粒径分布单一,近 70% 的颗粒粒径在 5~10mm 范围内,难以适应高流动性的要求;细陶砂与中陶砂级配曲线相近,但细陶砂中细小粉末状颗粒较多,增加了材料制备过程中对用水量的控制难度。相比而言,中陶砂颗粒级配良好。

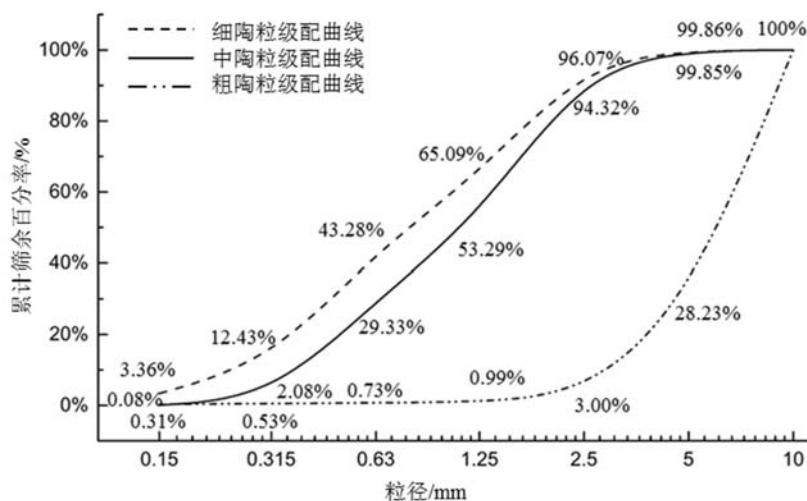


图 1 陶砂颗粒级配曲线图

Fig. 1 Gradation curves of different ceramsite particles

#### 1.1.2 陶砂的吸水性分析

除分析颗粒的级配特征外,对陶砂进行吸水特性测试。由于细陶砂中粉末状颗粒较多,吸水性试验测试结果误差较大,故只对中、粗两种陶砂进行测试,测试结果如图 2 所示。结果表明,中砂的吸水率在 60%~70%,粗砂的吸水率在 35%~40%,颗粒越小,比表面积越大,吸水率越高,则吸水性越强。两者均在 30min 时陶砂吸水基本达到饱和。吸水率以及达到饱和时间的确定为混凝土材料制备时用水量的确定和搅拌时间的确定提供了有效的试验数据。综合陶砂的物理性质分析,粗、中、细三种陶砂无论是在颗粒级配还是吸水性能上,中陶砂最适合用于陶砂混凝土配制。

### 1.2 陶砂混凝土配比分析

配制 3D 打印陶砂轻质混凝土材料需准备的原材料为:普通硅酸盐水泥 P. O 42.5;河砂,粒径 0.10~0.45mm;粉煤灰,其密度为  $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ 、堆积密度为  $0.78\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面积为  $3400\text{cm}^2/\text{g}$ ;硅灰,表观密度为  $2200\text{kg}/\text{m}^3$ ;堆积密度为  $400\text{kg}/\text{m}^3$ ;短切玄武岩纤维,长度 6mm 的玄武岩纤维,其拉伸强度为  $3980\text{MPa}$ 、断裂伸长率为 2.7%;所用的添加剂包括:增稠剂为羟乙基纤维素(HEC)、缓凝剂为葡萄糖酸钠、减水剂为聚羧酸减水剂。

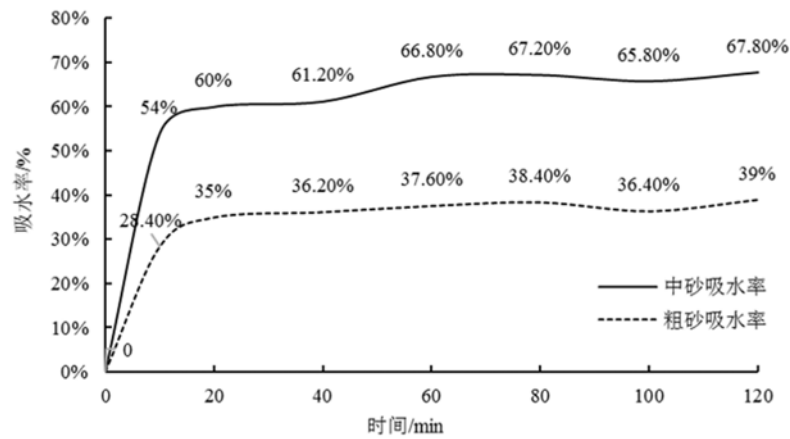


图2 陶砂吸水率曲线图

Fig. 2 Water absorption curves of ceramsite sand

本文首先制备了五种陶砂混凝土材料,通过设置不同的陶砂替代河砂的质量分数来确定最优的掺量,分别编号为#1~#5,详细配比如表1所示。分别通过坍落度和贯入阻力测试评价五种配比的流动性与早期强度,探究可3D打印的陶砂混凝土的最优配比。

表1 3D打印陶砂混凝土配比

Tab. 1 Mix proportions of 3D printed concrete with ceramic sand

编号	陶砂/kg	河砂/kg	水泥/kg	硅灰/kg	粉煤灰/kg	水/kg	增稠剂/g	减水剂/g	缓凝剂/g	短切玄武岩纤维/g
#1	4	41	40	2	3	20	10	100	12	100
#2	6	39	40	2	3	20	10	100	12	100
#3	8	37	40	2	3	20	10	100	12	100
#4	10	35	40	2	3	20	10	100	12	100
#5	12	33	40	2	3	20	10	100	12	100

### 1.3 陶砂混凝土坍落度试验

配置出五组不同配比的陶砂混凝土,在配置过程中需要提前将陶砂预湿至饱和吸水状态,浸泡时间30min,基本达到饱和状态。由于3D打印需要考虑混凝土的流动性,故要对五组配比分别进行坍落度试验。考虑到3D打印是一个系统的工程,新拌混凝土材料的泵送、输送、挤出等均需要一定的时间来完成,因此材料的流动性评估在搅拌完成的20~25min内进行测试。五组陶砂混凝土配比的坍落度测试结果如表2所示。

表2 陶砂混凝土坍落度测试结果

Tab. 2 Slump test results for ceramsite concrete

	#1	#2	#3	#4	#5
坍落度/mm	89	80	54	35	22

根据本课题组前期的研究结果<sup>[3]</sup>,混凝土材料的坍落度在32~87mm的区间范围内可满足3D打印所需要的流动性。由坍落度试验结果可知,#2、#3与#4陶砂混凝土的坍落度在可打印混凝土材料坍落度区间范围内,可作为3D打印的混凝土材料。当大粒径的陶砂掺入量较小时(#1),混凝土材料的流动性较大,用于3D打印时不易成型。相反地,当大粒径的陶砂掺入量较大时(#5),易造成颗粒级配不良,流动性变差,不利于3D打印的泵送和挤出过程。

### 1.4 陶砂混凝土早期强度分析

根据试验规范<sup>[19]</sup>,采用贯入阻力法确定混凝土拌合物早期刚度。通过贯入阻力值可以评估陶砂混

混凝土的早期刚度,进而评价混凝土材料的可建造性。本文测试不同时间下陶砂混凝土的早期刚度,一方面确定最优的可打印时间,同时也测试陶砂的掺入量对早期刚度的影响。

贯入阻力按式(1)计算:

$$f_{PR} = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中,  $f_{PR}$  为贯入阻力(MPa);  $P$  为贯入压力(N);  $A$  为测针面积( $\text{mm}^2$ )。

测得每组配比贯入强度试验结果如表 3 所示。

表 3 陶砂混凝土贯入阻力测试结果  
Tab. 3 Penetration resistance test results of ceramsite concrete

平均时间/min	10	20	30	40	50	60	70	80
# 1 贯入阻力 $f_{PR}$ /kPa	16	17.5	24	26	30	33	37	37.5
# 2 贯入阻力 $f_{PR}$ /kPa	15	20	23	28	28	30	35	40
# 3 贯入阻力 $f_{PR}$ /kPa	9.8	14.5	19.5	24	28.5	31	34.5	42.6
# 4 贯入阻力 $f_{PR}$ /kPa	12.8	15	18.4	24.8	27.6	30	37.5	40.3
# 5 贯入阻力 $f_{PR}$ /kPa	13	17.6	23.8	26.7	32.5	39	42.5	45.5

根据本课题组之前的测试结果<sup>[3]</sup>,混凝土材料贯入强度在 12.5~40kPa 的区间范围内适用于 3D 打印所需要的建造性与凝结性。从贯入阻力试验结果来看,当龄期较小时(10min),胶凝材料的水化过程进行尚不充分,早期刚度尚不足以满足垂直堆叠的打印建造过程。随着龄期的不断增长,各种材料的贯入阻力值也在不断升高。当静置时间为 70min 时,#5 混凝土材料已不满足打印对早期刚度的要求,当静置时间为 80min 时,大多数配合比均不满足要求。为与流动性的测试结构一致,选取龄期为 20min 时的材料的早期刚度,五种配合比均满足 3D 打印对建造性的要求;基于材料上覆所有打印层的材料的总重量对该打印层产生的压力不大于贯入阻力的原则,即  $f_{PR} \geq \rho gh$ ,其理论可打印高度范围为 0.74~1.03m。

综合上述的试验结果和讨论,满足作为 3D 打印陶砂混凝土材料的配比为 #2、#3 和 #4 组;为了提高固废陶砂的资源化利用,最终选择 #4 作为 3D 打印材料,并进行打印路径的测试。

## 2 3D 打印陶砂混凝土路径选择

### 2.1 四种优选打印路径

挤出型 3D 打印为一个将胶凝材料持续挤出、垂直堆叠的建造过程,对于相同的几何模型,有多种打印路径,因此本节设置了不同的打印路径来测试和评价路径规划对试件宏观力学行为的影响。

在本文模型打印设计时,按如图 3 所示的 A、B、C、D 四种打印路径制作力学试验试件。此四种路径为基于几何设计的四种常用路径<sup>[20-23]</sup>。

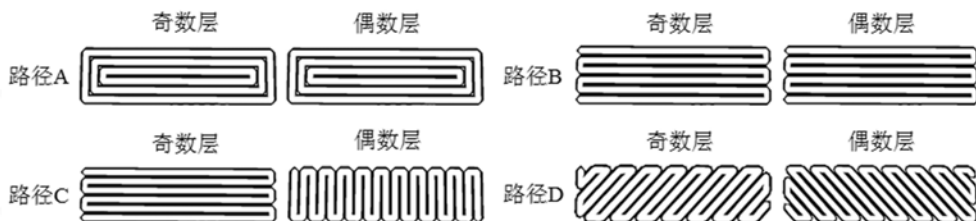


图 3 四种打印路径示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of four print paths

如图 3 所示,路径 A 由下至上全部为回字形打印堆叠;路径 B 由下至上全部为长条形打印堆叠;路径 C 为长条形奇偶层 90°交叉打印堆叠;路径 D 为长条形奇偶层 45°交叉打印堆叠。实验室打印采用 20mm 直径的打印喷头和 5cm/s 的打印速率。图 4 为四种不同打印路径的长方体,试件的设计尺寸为

110mm×110mm×400mm;图5为四种不同打印路径的立方体,试件的设计尺寸为110mm×110mm×100mm。试验测试时为了消除打印边界的影响,对试件进行了切割后处理,由于材料的流动性,打印成型的试件比设计的尺寸略大,因此切割后的试件外表面光滑,可忽略对承载面积的影响。试件切割后尺寸分别为100mm×100mm×400mm和100mm×100mm×100mm。

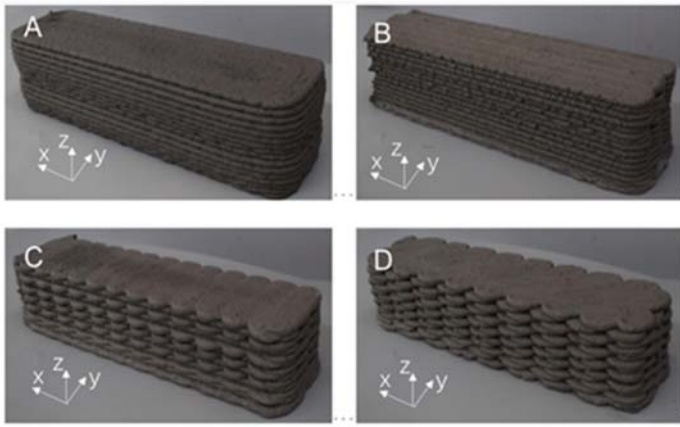


图4 四种路径打印长方体

Fig. 4 Printed prisms with four different paths

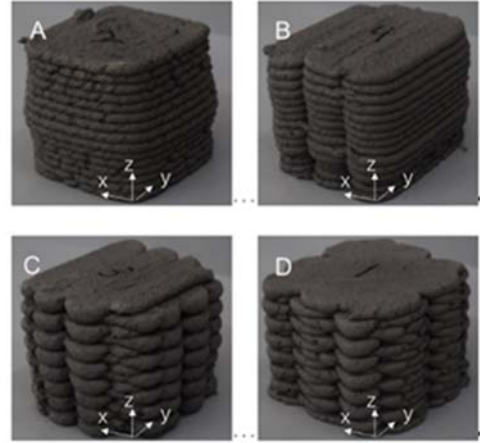


图5 四种路径打印立方体

Fig. 5 Printed cubes with four different paths

## 2.2 力学试验

### 2.2.1 抗压强度试验

根据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[24]</sup> 的规定,本试验采用 100mm×100mm×100mm 的试件,应力加载速率为 0.5MPa/s。混凝土立方体抗压强度计算按式(2),抗压强度计算精确至 0.01MPa。

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中,  $f_c$  为混凝土抗压强度(MPa);  $F$  为试件破坏荷载(N);  $A$  为试件承压面积( $\text{mm}^2$ )。

按照规范的规定,将三个试件测值的算数平均值作为该组试件的强度值。比较四种路径立方体抗压强度平均值,结果如图6所示(图中 C-Z-A、C-Z-B、C-Z-C、C-Z-D 分别表示 A、B、C、D 四种路径的试块在 Z 方向上的立方体抗压试验)。

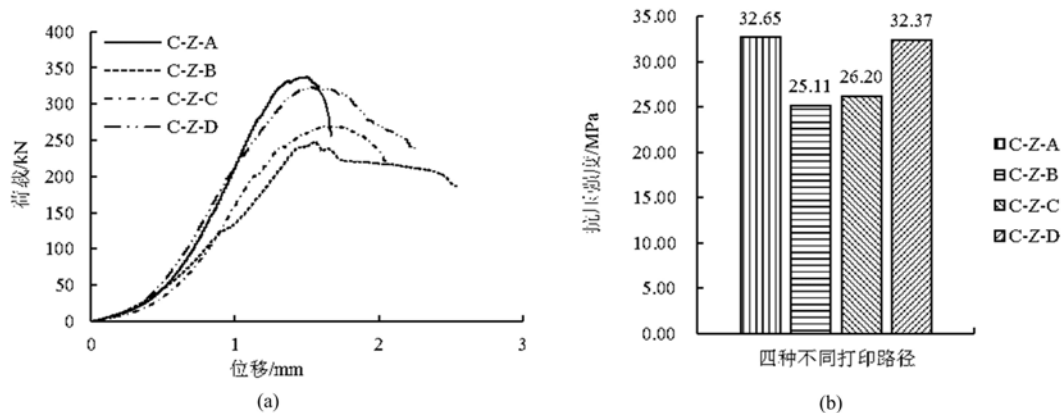


图6 (a)四种路径立方体抗压荷载—位移图;(b)四种路径立方体抗压强度柱状图

Fig. 6 (a)Compressive load-displacement curves of cubes with four different paths;

(b)Compressive strength of cubes with four different paths

立方体抗压强度测试结果表明:路径 A、B、C、D 的抗压强度值分别为 32.65MPa、25.11MPa、

26.20MPa、32.37MPa。其中路径 A 的抗压强度值最高,相比路径 B、C、D 分别高出 30.0%、24.6% 和 0.9%;这可能是因为垂直受力方向上,路径 A 的环形打印路径能更好地限制侧向的变形,提高了试件的刚度和强度。其中,路径 B 试件的强度最弱,这可能是因为该类型试件在打印过程中形成了纵向的通缝造成的。

### 2.2.2 抗折强度试验

根据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[24]</sup> 规定,应力加载速率为 0.05 MPa/s。混凝土抗折强度计算按式(3),混凝土抗折强度计算应精确至 0.01MPa。

$$f_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3)$$

式中,  $f_f$  为混凝土抗折强度(MPa);  $F$  为试件破坏荷载(N);  $l$  为支座间跨度(mm);  $h$  为试件截面高度(mm);  $b$  为试件截面宽度( $\text{mm}^2$ )。

按照规范规定计算四种路径抗折强度值,结果如图 7 所示(图中 F-Z-A、F-Z-B、F-Z-C、F-Z-D 分别表示 A、B、C、D 四种路径的试块在 Z 方向上的抗折试验)。

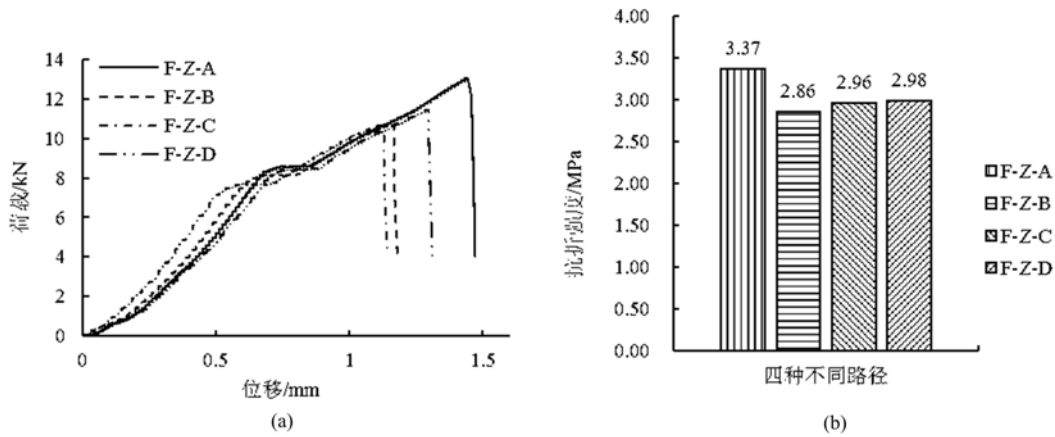


图 7 (a) 四种路径抗折试验荷载—位移图; (b) 四种路径抗折强度柱状图

Fig. 7 (a) Flexural load-displacement curves of samples with four different paths;

(b) Flexural strength histogram of printed prisms with four different paths

由于打印过程中不可避免地会在试件内部引入弱面、空隙等,图 7(a)所示的位移—荷载曲线中平台段的产生可能是由于空隙的压密造成的,也可能是由于弱面两侧的打印层发生了剪切滑移。抗折强度测试结果表明:路径 A、B、C、D 的抗折强度值分别为 3.37MPa、2.86MPa、2.96MPa、2.98MPa。其中路径 A 的抗折强度值最高,相比路径 B、C、D 分别高出 17.83%、13.85% 和 13.09%;受弯过程中,基于路径 B 打印的试件在垂直方向存在通缝,不利于结构的整体性,削弱了承载能力;而对于 C、D 路径的试件在承受沿 X 方向的拉伸应力时,部分打印结构弱面垂直于拉伸应力,易导致从弱结合面处的开裂,不利于承载性能。而基于路径 A 的回型路径试件,结构的整体性能好,大部分的弱面平行于拉伸应力,降低了裂缝出现的概率。

### 2.2.3 劈裂抗拉强度试验

根据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[24]</sup> 规定,应力加载速率为 0.05 MPa/s。劈裂抗拉强度计算按式(4);混凝土劈裂抗拉强度计算应精确至 0.01MPa。

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (4)$$

式中,  $f_{ts}$  为混凝土劈裂抗拉强度(MPa);  $F$  为试件破坏荷载(N);  $A$  为试件承压面积( $\text{mm}^2$ )。

四种路径劈裂抗拉强度值结果如图 8 所示(图中 T-YZ-A、T-YZ-B、T-YZ-C、T-YZ-D 分别表示 A、B、C、D 四种路径的试块在平行于 YOZ 平面方向上的劈裂抗拉试验)。

劈裂抗拉强度测试结果表明:路径 A、B、C、D 的劈裂抗拉强度值分别为 1.83MPa、2.27MPa、1.31

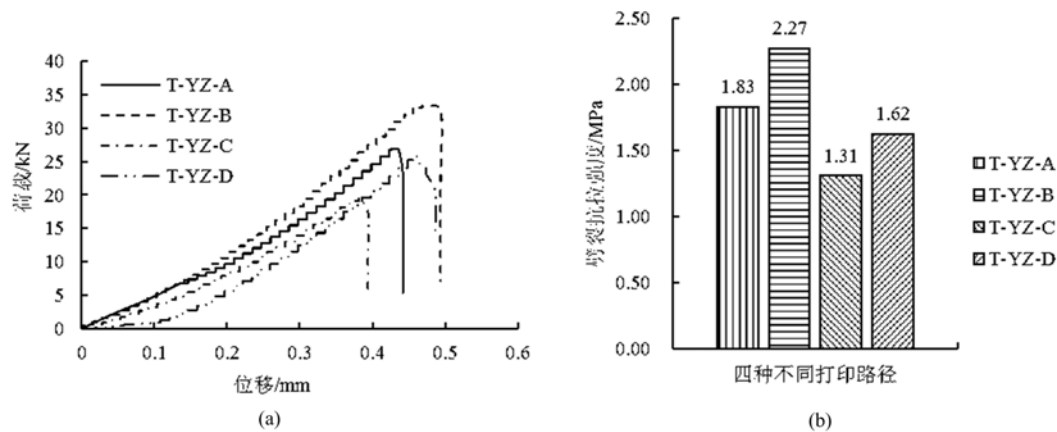


图8 (a)四种路径劈裂抗拉试验荷载—位移图;(b)四种路径劈裂抗拉强度

Fig. 8 (a)Splitting tensile load-displacement diagrams of samples with four paths;

(b)Splitting tensile strength of samples with four paths

MPa、1.62MPa;与抗压和抗弯承载力的测试结果不同,其中路径B的劈裂抗拉值最高,分别比路径A、C、D的强度提高了24.04%、73.28%和40.12%;试验加载过程中的劈裂为垂直于X方向,即沿YZ平面。其中C、D路径的试件的强度相对较弱,这主要是基于C、D路径打印成型的试件的部分细观弱面平行或者近似于平行劈拉平面,劈拉应力已造成弱面结构处的开裂,从而使得力学承载力降低。而对于路径A的试件,全部的弱面结构均垂直于劈拉平面,弱面的存在对劈拉强度的影响不显著。

### 3 结论

为促进固废陶砂的资源化利用,本文讨论了3D打印陶砂混凝土的制备思路与配制过程;测试了3D打印陶砂混凝土的抗压、抗弯、劈拉等力学性质;分析了陶砂混凝土的工作性能对3D打印的影响;并对3D打印工作要求做出总结,得出以下结论:

(1) 本文分析了陶砂原材料的物理性质,得出中陶砂更加适合作为3D打印陶砂混凝土材料。

(2) 通过对五种陶砂混凝土配比的坍落度、早期强度试验分析,得出当陶砂在材料中比例为13.3%~22.2%时,可满足3D打印对混凝土材料流动性和早期刚度的要求。

(3) 基于测试结果,建议针对不同受力特点与受力要求,选择相应较强的打印路径。若打印的结构对于抗压性能要求较高,则优选路径A与D,立方体抗压强度可达32.65MPa;若打印的结构对于抗折性能要求较高,则优选路径A,抗折强度可达3.37MPa;若打印的结构对于劈裂抗拉性能要求较高,则优选路径B,劈裂抗拉强度可达2.27MPa。

本文研究为3D打印材料的制备和研发,对3D打印混凝土结构的低碳化、生态化,以及推动3D打印的实际工程应用提供了试验数据和参考。

#### 参考文献:

- [1] Xu J, Ding L, Love P E D. Digital reproduction of historical building ornamental components: from 3D scanning to 3D printing[J]. Automation in Construction, 2017, 76:85-96.
- [2] 蔺喜强, 张涛, 霍亮, 等. 水泥基建筑3D打印材料的制备及应用研究[J]. 混凝土, 2016(6):141-144 (LIN Xiqiang, ZHANG Tao, HUO Liang, et al. Preparation and application of 3D printing materials in construction [J]. Concrete, 2016(6):141-144 (in Chinese))
- [3] Ma G, Li Z, Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. Construction & Building Materials, 2018, 162:613-627.
- [4] Ma G, Li Z, Wang L, et al. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing[J]. Materials Letters, 2019, 235:144-147.
- [5] Ma G, Sun J, Wang L, et al. Electromagnetic and microwave absorbing properties of cementitious composite for

- 3D printing containing waste copper solids[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 94:215–225.
- [6] 夏明杰, 范立峰, 马国伟. 3D 打印结构加强混凝土短柱抗压力学性能研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(4):551–556 (XIA Mingjie, FAN Lifeng, MA Guowei. An experimental study of compressive mechanical properties of concrete short column strengthened by 3D-printing structure[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(4):551–556 (in Chinese))
- [7] Gosselin C, Duballet R, Roux P, et al. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders[J]. *Materials & Design*, 2016, 100:102–109.
- [8] Khoshnevis B, Bukkapatnam S, Kwon H, et al. Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2001, 7(7):32–42.
- [9] Lim S, Buswell R A, Valentine P J, et al. Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12:216–230.
- [10] Maier A K, Dezmirean L, Will J, et al. Three-dimensional printing of flash-setting calcium aluminate cement[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(9):2947–2954.
- [11] Hambach M, Volkmer D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2017, 79:62–70.
- [12] Shakor P, Sanjayan J, Nazari A, et al. Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 138:398–409.
- [13] 檀春丽. 非粘土陶粒及混凝土性能研究(硕士学位论文)[D]. 哈尔滨工业大学, 2010 (TAN Chunli. Research on non-clay ceramsite and its concrete performance(Master's thesis)[D]. Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese))
- [14] 许开成, 方苇, 陈梦成, 等. 陶瓷再生粗骨料混凝土力学性能研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(4):474–480 (XU Kaicheng, FANG Wei, CHEN Mengcheng, et al. On the mechanical properties of ceramic recycled coarse aggregate concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(4):474–480 (in Chinese))
- [15] 凌天清, 王瑞燕, 张剑, 等. 陶砂砂浆与陶粒混凝土对降低隧道内行车噪声的影响[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(1):20–24 (LING Tianqing, WANG Ruiyan, ZHANG Jian, et al. Influence of ceramsite mortar and ceramic concrete on reducing traffic noise in tunnel[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(1):20–24 (in Chinese))
- [16] 杨毅. 陶粒混凝土的若干基本性能与构件承载力可靠性研究(硕士学位论文)[D]. 长沙理工大学, 2009 (YANG Yi. Research on the certain behavior of ceramsite concrete and the member's degree of carrying capacity reliability (Master's thesis)[D]. Changsha University of Science and Technology, 2009 (in Chinese))
- [17] 王彦. 陶粒混凝土的施工性能研究(硕士学位论文)[D]. 长沙理工大学, 2009 (WANG Yan. The research on the workability of ceramsite aggregate concrete (Master's thesis) [D]. Changsha University of Science and Technology, 2009 (in Chinese))
- [18] 王长宝, 张茂亮, 陈闯, 等. 陶粒混凝土自保温砌块及其热工性能的研究[J]. *混凝土*, 2013(10):145–147 (WANG Changbao, ZHANG Maoliang, CHEN Wei, et al. Research on thermal insulating performance of ceramsite concrete self-insulation blocks[J]. *Concrete*, 2013(10):145–147 (in Chinese))
- [19] GB/T50080—2002, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T50080—2002, Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete[S]. China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese))
- [20] 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 选择性激光烧结新型扫描方式的研究及实现[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(2):35–39 (SHI Yusheng, ZHONG Qing, CHEN Xuebin, et al. Research and implement of a new kind of scanning mode for selective laser sintering[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(2): 35–39 (in Chinese))
- [21] 翟晓雅, 陈发来. 分形模型的 3D 打印路径规划[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018(6):1123–1135 (ZHAI Xiaoya, CHEN Falai. 3D printing path planning of fractal models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018(6):1123–1135 (in Chinese))
- [22] 侯章浩, 乌日开西·艾依提. 3D 打印的路径规划研究综述[J]. *机床与液压*, 2016, 44(5):179–182 (HOU Zhanghao, AIYITI Wurikaixi. Review of studies on path planning of 3D printing [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2016, 44(5):179–182 (in Chinese))



- [23] 王天明, 习俊通, 金焯. 熔融堆积成型中的原型翘曲变形[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3):233—238 (WANG Tianming, XI Juntong, JIN Ye. Prototype wape deformation in the FDM process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3):233—238 (in Chinese))
- [24] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T 50081—2002, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese))

## Preparation and mechanical properties testing of 3D printed ceramic sand lightweight concrete

MA Guo-wei<sup>1,2</sup>, CHAI Yan-long<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, LIU Miao<sup>2,3</sup>

(1. Hebei University of Technology, School of Civil and Transportation Engineering, Tianjin 300401, China;

2. Hebei University of Technology, Smart Infrastructure Research Institute, Tianjin 300401, China;

3. The University of Western Australia, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, Perth 6009, Australia)

**Abstract:** 3D printed concrete has achieved rapid development and application in the field of civil engineering. Adopting ceramic sand to prepare concrete materials by 3D printing greatly contributes to the lightweight of 3D printed structures. This work firstly studies the physical properties of ceramic sand. Then five kinds of concretes with different ceramic/silica sand ratios are prepared. The optimal mixing proportion comparative to the 3D printing is determined according to the fluidity and early stiffness tests. Thereafter, three kinds of cubic and prism specimens with different printing paths are manufactured by self-developed 3D printer, and the influences of the printing paths on the compressive, flexural and splitting mechanical properties of the 3D printed structure are evaluated. The experimental results provide the data and reference for the resource utilization of ceramic sand materials, design of 3D printed structures and the practical engineering applications of 3D printing.

**Keywords:** 3D printing; ceramic concrete; printing path; mechanical properties