

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0824

水泥基 3D 打印材料基础配合比试验与质量评价

江 权¹, 吴 思^{1,2}, 刘 强³, 辛 杰^{1,2}, 郑 虹¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南昌大学 工程建筑学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 水泥 3D 打印技术在土木建筑工程和类岩石力学行为模拟中日益推广, 其水泥基 3D 打印材料方面却一直面临流动性、收缩性、可加工性等质量与成型控制方面的挑战和基础性配方缺乏的不足。首先针对水泥基 3D 打印实体质量评价的问题, 建立了一套考虑成型全过程的 6 指标评估体系及其质量分级方法, 包括流动性、挤出性、凝结时间、可建造性、密实性以及变形率, 从打印过程、堆积成型、实体精度三方面实现对 3D 打印实体模型的质量评价; 进而采用不同阈值范围的两阶段正交设计与打印测试进行了水泥基 3D 打印材料的基础性配合比试验优选, 获得了一种综合打印性能较好的基础性配合比; 最后对其打印成型水泥基 3D 实体模型进行单轴压缩试验, 并评估了其类岩石力学特性, 从而得到一种新型的类岩石水泥基 3D 打印基础性配合比, 可为采用水泥基 3D 打印材料的工程建造和岩石工程物理模拟试验奠定基础。

关 键 词: 水泥材料; 三维打印; 物理模拟; 质量评价; 相似材料

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 05-1245-15

Basic mix ratio test and corresponding quality evaluation for cement-based 3D printing materials

JIANG Quan¹, WU Si^{1,2}, LIU Qiang³, XIN Jie^{1,2}, ZHENG Hong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Civil Construction, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract: Cement-based 3D printing technology is increasingly popularized in civil construction and rock-like physical simulation, yet its cement-based 3D printing materials not only is limited by the challenges in quality control such as liquidity, shrinkage, and processability, but also is lack in basic formula in concrete material. This paper firstly establishes a set of assessing system based on six indexes and corresponding quality classification method considering the whole process of solid model forming for cement-based 3D printing, including fluidity, extrusion, setting time, buildability, compactness and deformation rate. The quality evaluation of the 3D printing solid model is realized in three aspects: printing process, stacking process, and solid accuracy. Then, through the two-stage orthogonal design and printing test with different threshold ranges, the basic mix ratio of cement-based 3D printing materials, which is ideal in comprehensive printing performance, is obtained. Finally, the uniaxial compression test is carried out for the printed cement-based 3D solid model and its rock-like mechanical properties are evaluated, which can provide a new type of rock-like cement-based 3D printing material. The specific mix ratios lay the foundation for the civil construction and physical simulation test of rock engineering based on cement-based materials.

Keywords: cement materials; three dimensional print; physical simulation; quality evaluation; similar materials

1 引 言

3D 打印 (3D Printing, 简称 3DP) 是利用自动控制技术, 将数字模型按照逐层打印方式堆叠出三

维实体的一种快速成型技术, 被认为是引领第 4 次工业革命的代表性技术^[1-5], 近年水泥基 3D 打印技术也在土木建筑工程中日益推广。在传统建筑施工工艺中, 约 35%~60% 的建造成本用于使用以后就

收稿日期: 2022-05-31

录用日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No. U1965205, No. 51879261)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1965205, 51879261)。

第一作者简介: 江权, 男, 1978 年生, 博士, 研究员, 主要从事地下工程物理与数值模拟、大型洞室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

废弃的模板上^[6],但 3D 打印建筑工艺则不需要建筑模板,因而更经济和环保^[7];同时,由于 3D 打印施工速度是传统建筑方法的数倍^[8],从而能够显著提高效率并降低人工成本。

目前,国内外已有不少专业的 3D 打印建筑公司进行了商业化建造,如美国利用 3D 打印技术在迪拜打印了一栋两层的行政楼^[9],英国开发一种空中机器人建造系统^[10],基本实现了 3D 打印建造和无人机技术的融合。同时,国内 3D 打印科技公司也建造了具有实用价值的别墅、办公室以及护岸、污水井等建筑设施^[11-13],显示出水泥基 3D 打印在土木工程领域具有广阔的应用前景。在科学研究方面,张涛等^[14]利用 3D 打印技术模拟白鹤滩水电站岩体的几何形态,用水泥砂浆制备柱状节理岩体试样;刘享华等^[15]用 3D 打印技术制作双裂隙类岩石试件,采用水泥基材料进行类岩石力学行为的物理模拟试验同步得到了发展。

然而,伴随水泥 3D 打印技术的日趋成熟,水泥基 3D 打印材料方面却一直面临流变性、收缩性、可加工性等质量控制方面的挑战^[16]。当前 3D 打印建筑技术使用的水泥基材料大致有硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、磷酸盐水泥、地聚合物^[17]。其中硅酸盐水泥因为产量大、单价低而成为建筑领域 3D 打印水泥基材料中最常用的组分^[18],但其早期强度低和初凝时间长的不足制约了其在建筑 3D 打印的应用^[19]。硫铝酸盐水泥单独使用时凝结时间过短^[20],但少量掺入到硅酸盐水泥中却能够显著缩短 3D 打印混凝土的凝结时间并提高强度和流动性^[21-23]。磷酸盐水泥则快硬、早强^[24],有较好的生物相容性^[25],缺点是耐久性不足、成本过高^[26]。地聚合物材料则具有良好层间黏结性能,耐久性和机械性强且绿色环保^[27-29],不过目前地聚合物材料价格偏高且早期凝结性能研究不足^[30]。综合来看,建立以硅酸盐水泥为基础配方的水泥基 3D 打印材料是实现水泥 3D 打印大范围工业化与经济化应用和开展类岩石工程变形破坏物理模拟的基础,也可为参杂其他材料改善水泥 3DP 建筑性能提供基础性配方^[31]。

在水泥基 3D 打印过程中,水泥材料性能与打印设备操作参数之间的相互影响,导致了目前 3D 打印建筑与实体质量评价还未建立统一的评价标准^[32]。Le 等^[33]通过挤出性、工作性、可打印时间和建造性对水泥基材料的打印性能进行评价;杨钱荣等^[34]将打印性能(挤出性和堆积性)、流变性能和凝结时间作为评价指标;Lim 等^[35]则以泵送性、可打印性、可建造性及可打印时间来评价水泥基材

料。总的来看,现有水泥基 3D 打印质量的评价指标系统性还不强,体系化还不明显^[36]。

为此,以快硬硫铝酸盐水泥和硅酸盐水泥为基质,开展了水泥基 3D 打印材料的建模质量评价与基础性配合比试验。首先建立水泥基 3D 打印材料成型性能评价指标体系,进而通过两层次正交试验分析获得水泥基 3D 打印材料的基础性配方,最后评估水泥基 3D 打印试样的类岩石材料力学特性。

2 水泥基 3D 打印成型性能评价指标

2.1 水泥基础材料性能

为了实现配方的普适性,本试验采用的基础材料为 425 普通硅酸盐水泥、快硬硫铝酸盐水泥、石英砂、羟丙基甲基纤维素和水。其中快硬硫铝酸盐水泥可以适当缩短水泥凝结时间;石英砂可提高水泥基材料的流动性,同时可提高 3D 打印水泥基材料的强度,如筛孔尺寸为 212~425 μm 能够顺畅通过 3D 打印机喷头;羟丙基甲基纤维素(增稠剂)粒径为 196 μm ,可以提高黏稠度;水为自来水,其组分、凝结时间及各龄期强度见表 1~3。

表 1 水泥成分及比例

Table 1 Cement composition and proportions

水泥类别	成分占比/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂
硅酸盐水泥	17.28	5.26	2.66	65.16	2.12	3.12	0.25
硫铝酸盐水泥	7.23	18.56	4.34	45.10	1.35	12.50	0.87

表 2 水泥凝结时间

Table 2 Cement setting time

类别	凝结时间/min	
	硅酸盐水泥	硫铝酸盐水泥
初凝时间	150	25
终凝时间	240	180

表 3 水泥力学性能

Table 3 Mechanical properties of cement

时间/d	普通硅酸盐水泥		快硬硫铝酸盐水泥	
	抗折强度 /MPa	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	抗压强度 /MPa
1	—	—	6.0	30.0
3	3.5	17.0	6.5	42.5
28	6.5	42.5	7.0	45.0

2.2 水泥基 3D 打印试验方法

2.2.1 水泥基 3D 打印原理及设备

本试验采用混凝土工艺原理,即基于挤出混凝土砂浆来实现打印过程。打印机的 3D 打印喷头沿 X、Y 方向水平移动,打印平台沿 Z 方向竖直移动。

打印过程中打印喷头和平台按照模型中的路径移动,同时电机为送料螺杆提供动力,水泥基材料通过螺杆从喷头挤出,实现分层打印。

在 3D 打印前要对打印的三维数字模型进行切片处理,设置合理的打印层厚、打印喷头直径、打印路径、填充率、打印速度等参数,切片完成后生成打印文件“*.gcode”。本试验中圆柱样模型的打印高度为 110 mm,直径为 50 mm,设置的打印喷头直径为 4 mm,挤出线宽度为 4 mm,打印层厚度为 1.3 mm,按一层 -45° 、另一层 45° 方向的打印路径交叉打印,且模型外圈打印了一层保护层。填充率为 100%,打印速度选择默认值为 20.0 mm/s。图 1 为试验中模拟打印的数字模型,可见打印喷头下的交叉打印路径。

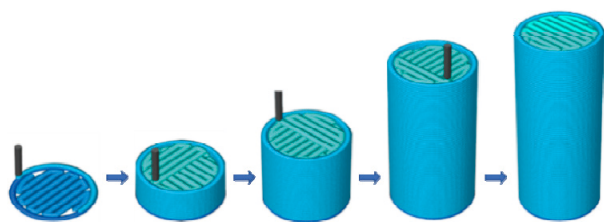


图 1 模型切片后数字模型虚拟打印预览过程

Fig.1 Preview process of visual printing process of digital model after model slicing

2.2.2 水泥 3DP 模型的打印流程

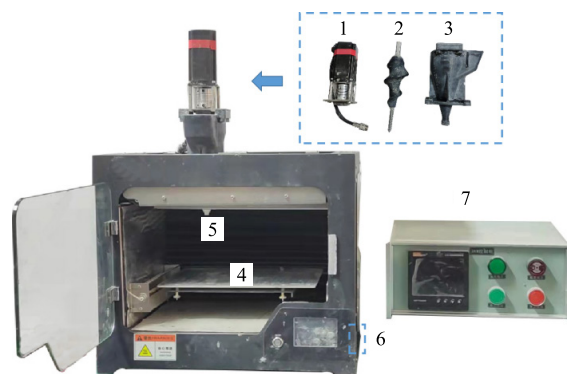
采用基于挤出原理的水泥基 3D 模型打印,主要步骤包括:

(1) 建立模型。使用 3D 建模软件建立打印实体的三维数字模型,保存为 STL 格式文件,然后用 3DP 软件对其进行切片处理,得到切分为 92 层的圆柱体打印文件,并将其导入内存卡。

(2) 打印准备。一方面,配制打印材料前用筛孔尺寸为 425 μm 土壤筛,对 425 硅酸盐水泥和快硬硫铝酸盐水泥进行筛选,这样可以减少水泥质量变化差异产生的影响;另一方面,提前打开温度控制器(图 2 中 7)将温度保持在 36°C ,并将打印机的电机、螺杆、料仓和打印喷头(分别为图 2 中 1—3, 5)进行组装,连接打印机数据线,插入含有打印模型的 SD 卡(图 2 中 6)。

(3) 打印过程。将水泥基材料按比例配制搅拌均匀后注入打印机的料仓,启动打印机。由于材料到达喷头处需要一定的时间,前面一段时间是空打的,待看到打印喷头处有打印材料连续均匀挤出,再重启打印机;打印过程中需根据料仓中余料情况持续填料,并关注喷头出料情况,直至打印结束。

(4) 打印后处理。试样打印成型以后,应尽快将打印机的料仓、螺杆和喷头拆卸并清洗,防止水泥堵塞,影响下次使用;打印成型试样宜先在空气中放置 6 h 后再进一步移仓养护。



(注: 1—电机, 2—螺杆, 3—料仓, 4—打印平台, 5—打印喷头, 6—存储卡入口, 7—外接温度控制器)

图 2 水泥基 3D 打印设备基本结构

Fig.2 3D printer structure

2.3 3DP 混凝土成型评价指标

3D 打印水泥基材料从打印到成型总体可以分为 3 个阶段,即水泥基材料通过打印机的输出过程、离开打印喷头以后的堆叠过程以及堆积完成以后的凝结硬化成型过程。

为使材料能够顺利通过打印机完成第一步作业,从打印喷头顺利挤出,3D 打印水泥基材料必须满足一定的要求:一方面,新拌水泥基材料需要有良好的流动性和挤出性;另一方面,其流动性和挤出性需要在本阶段的打印过程中保持稳定,这就对材料的凝结时间有所限制。

而要完成材料堆叠过程,水泥基材料应该有良好的可建造性,即 3D 打印混凝土材料被打印出之后,可以保持凝固成型的能力,能够在后续材料堆积过程中持续稳定不发生明显变形,从而支撑后续打印的质量。

此外,从按照模型打印成功,到最终硬化成型,实体模型应该保证尽可能高的精度,故采用了密实性和形变率两个指标来对此进行评价,其中实体密实性体现了试样内部结构致密特性,形变率则表征其作为一个整体与预设模型之间的尺寸差异。

因此,水泥基 3D 打印质量评价宜包括打印过程、堆积成型、硬化成型 3 方面的 6 个指标(见图 3)。

当然,尽管将几个评价指标分配在不同的阶段进行考量,但各项指标也并不是独立存在的,其相互之间存在一定的影响,这一点从后面进行质量指标定量评价时各项指标均能与水灰比建立关系也可

以看出。

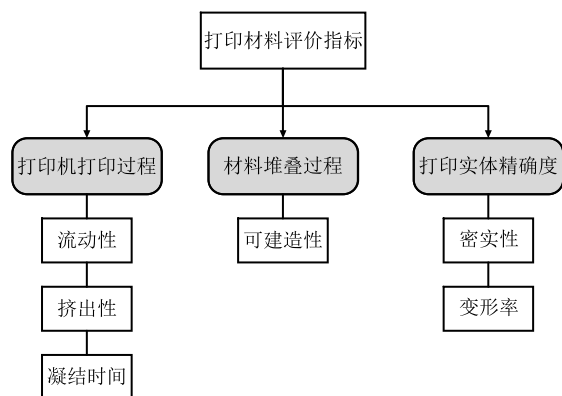


图3 打印材料评价指标体系

Fig.3 Evaluation index system of printing materials

良好的凝结性不仅能保证材料在打印运输过程中保持流动性和挤出性，而且材料凝结速度越快，其保持形状的能力就越强、收缩变形也会越小，打印材料的流动性能够影响挤出性和可建造性，流动性越强的材料自然更容易通过喷头挤出，同时流动性越强材料堆积时更容易溢出，或者因为过软而倒塌，同时流动性也会影响材料上下层之间的填充效果，因此同等条件下流动性越强，打印实体的内部孔隙越少，密实性越好，但是变形率可能越大。可建造性越好的材料，其保持形状的能力强，则变形率小。

流动性和凝结性是两个针对材料本身的最原始指标，在整个 3D 打印过程中影响最为广泛。其中鉴于凝结性不达标会导致机器堵塞，后果更为严重，我们认为材料的凝结性是整个质量指标体系中的基本指标，试验过程中需要首先满足，但凝结性本身只有初凝、终凝两个阶段，评价标准较为粗糙，相比之下流动性更能做到定量评价，因此流动性指标为指标评价体系中更受关注的核心指标。

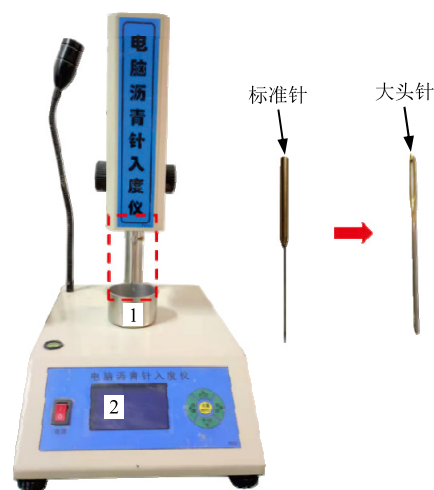
挤出性和可建造性则分别是评价打印材料在通过打印机的运输过程和堆积成型过程能否达到预期或效果优劣的最直观指标，是针对打印结果的指标。密实性和形变率也是打印结果的指标，对应的是打印后实体模型阶段。

综上所述，质量评价指标体系中虽然按照试验流程及测试顺序将各项评价指标分成了不同的阶段，但其相互之间有影响，同时各指标的重要性也有层次之分。

2.3.1 流动性评价方法

通常使用坍落度试验^[37]或者跳桌试验^[38]来测试水泥基材料的流动性，多次尝试后发现：由于本

试验中机器及模型尺寸都较小，对精度要求自然更高，材料流动性相对大尺寸模型的也更弱，进行坍落度试验或跳桌试验时几乎无法测出坍落度或流动度数据，且各组配方流动性无明显区别。因此，为了得到有效的流动性数据，本试验以沥青针入度测试仪为基础进行测试，使用针入度测试仪可以得到明显的针入度数据，但标准针对试验材料的贯穿能力太强，导致各组配合比材料之间的数据结果区别依然不大，因此我们将仪器原本的标准针改为 4 mm 的大头针代替以提高流动性数据的有效性，如图 4 所示。试验中，流动度即为大头针 5 s 内在 3D 打印水泥基材料中下沉的距离。改进后针入度测试仪能得到材料流动性相关数据，各组配合比的结果也可明显区分。



（注：1—试验皿，2—显示屏）

图4 改进针入度测试仪

Fig.4 Improved penetration tester

在具体的试验过程中，首先将新拌 3D 打印水泥基材料填满试验皿（图 4 中的试验皿），将试验针下移至刚好接触材料表面，然后再按下启动键可得到第 1 个针入度测试结果，对同一组材料测试 3 次（试验针插入位置相互间隔 1 cm 以上），显示屏上会显示 3 组针入度结果并计算平均值，即为该组材料的最终针入度结果。

2.3.2 挤出性评价方法

目前相关学者还是通过观察法来定性评价材料的可挤出性^[39-41]。本试验中也是采取肉眼观察法。为了检测水泥基材料的挤出性，在打印过程中观察喷头处出料的顺畅程度，看是否有断料情况发生。

2.3.3 可建造性评价方法

在试验中，利用水泥基材料的单行打印层数来表征其建造性，单行模型连续打印的层数越高，则

表明材料保持形状稳定的能力越强,即建造性越好。试验过程如图 5 所示,先建立一个多层(如 K 层)的单行模型,然后在 3D 打印过程中计数打印到第 n 层模型出现倒塌,两者的比值可作为可建造性的评价指标。

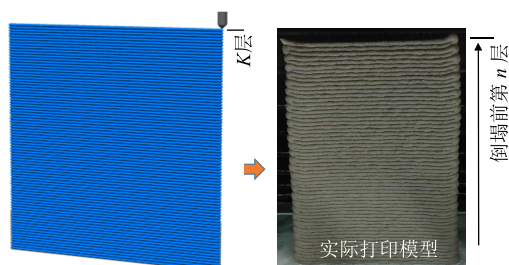


图 5 建造性测试模型
Fig.5 Constructive test model

2.3.4 凝结时间评价方法

凝结时间的控制对 3D 打印混凝土材料至关重要。根据《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法 (GB/T 1346—2011)》^[42]中的测试方法,使用维卡仪测试水泥基材料的凝结时间。

2.3.5 密实性评价方法

试验中使用波速这一指标来表征 3D 打印材料的密实性。试样的波速由非金属声波检测仪(图 6)检测得到,可根据声波通过试验的距离和时间即可自动计算出试样的波速。测试时将金属探头放在涂抹凡士林的试样的两端,启动仪器开始测试,测试 3 组取平均值即可得到该试样的波速结果。试样的波速越大,试样的密实性越好。



图 6 非金属声波测试仪
Fig.6 Non-metallic sonic tester

2.3.6 变形性能评价方法

因为收缩情况的存在,3D 打印试样和模型之间存在形状差异,这种差异可以评价 3D 打印试验的精度,实际打印出模型的高度 H_0 与所建实体模型的差异体现了试样的畸变特性。试验后用游标卡尺

对试样的实际高度 H 进行测量,并与模型设定的高度进行比对,即高度变化率 δ :

$$\delta = \frac{|H_0 - H|}{H} \times 100\% \quad (1)$$

高度变化率越小,说明材料在打印前后的形状差异越小,越稳定,这表明配方的打印效果好。

3 水泥基打印材料基础配合比寻优

为了找到一组打印性能较好的水泥基 3D 打印材料的基础配合比,本节提出了两阶段正交试验搜寻最佳配合比(即第 1 阶段大范围内的配合比正交试验,以及基于第 1 阶段正交试验中较优配合比的第 2 阶段小范围配合比正交试验寻优试验),并采用第 2 节提出的 3D 打印质量评价指标体系,评估不同配合比下 3DP 水泥基模型的质量。图 7 为两个层次的配合比范围。

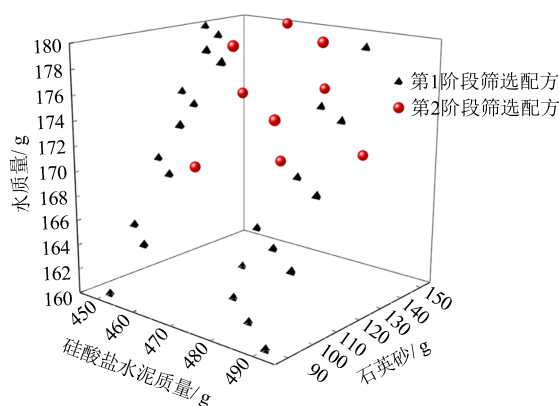


图 7 配合比范围筛选
Fig.7 Mix ratio range filter

3.1 第 1 阶段筛选试验

3.1.1 基础配合比正交试验设计

考虑到试验方案的可行性,先以 5 种材料(硅酸盐水泥、石英砂、水、增稠剂、快硬水泥)的质量为正交设计变量,每个变量 5 个水平进行正交试验设计,得到表 4 所示的 25 组配合比,以此作为基础配合比的第 1 阶段初步筛选。

3.1.2 第 1 阶段配方筛选试验评价结果

通过第 1 阶段正交试验,发现编号为 1、6、7、8、11、18、19、22 的配合比无法打印成型。第 1 阶段筛选试验的目的在于初步找到能够打印成型的配合比范围,排除完全不能打印的情况。因此评价的性质是定性评价,评价的重点是打印机打印过程的材料性能,即流动性、挤出性和凝结时间。

表 4 第 1 阶段初步筛选配方

Table 4 Preliminary screening formula in the first stage

编号	质量/ g				
	硅酸盐水泥	石英砂	水	增稠剂	快硬水泥
1	450	90	160	2.6	20
2	450	100	165	2.7	30
3	450	110	170	2.8	40
4	450	120	175	2.9	50
5	450	130	180	3.0	60
6	460	100	170	2.9	20
7	460	110	175	3.0	30
8	460	120	180	2.6	40
9	460	130	160	2.7	50
10	460	90	165	2.8	60
11	470	100	180	2.7	20
12	470	110	160	2.8	30
13	470	120	165	2.9	40
14	470	130	170	3.0	50
15	470	90	175	2.6	60
16	480	110	165	3.0	20
17	480	120	170	2.6	30
18	480	130	175	2.7	40
19	480	90	180	2.8	50
20	480	100	160	2.9	60
21	490	120	175	2.8	20
22	490	130	180	2.9	30
23	490	90	160	3.0	40
24	490	100	165	2.6	50
25	490	110	170	2.7	60

3.1.2.1 流动性

表 5 所示为试验中 3D 打印水泥基材料在流动性方面的几种典型特征及其相关评价。其中，1 号配方材料过稀，打印过程中材料难以维持形状，变形过大，模型无法完整成型；2 号配方材料可以正常打印；3 号配方材料较硬，材料干燥易断，以至于打印困难，在手动加压的情况下勉强能完成打印过程，但成型效果很差；4 号配方材料则因流动性过差，在转机正常运作的情况下材料自重不足以令其自然通过螺杆运输至打印喷头，导致完全无法进行打印。

经验表明，针入度小于 15 cm 的水泥基材料不宜作为打印材料，因其流动性过低，试验时难以搅拌，并且会影响挤出性，材料无法通过螺杆和喷头。

在第 1 阶段的流动性质量评价中，通过比对无法成型组别的针入度指标，可以得到表 6 的定性评价，即水泥基材料的针入度在小于 15 cm 和大于 35 cm 时均无法满足成型要求，因流动度过小材料难以流畅运输，流动度过大材料难以堆积。

3.1.2.2 挤出性

挤出性的评价结果主要通过观察得到。如表 7 所示，材料的挤出性可以分为差、尚可、好共 3 级。

表 5 典型材料配方的流动性特征

Table 5 Flow characteristics of typical material formula

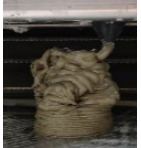
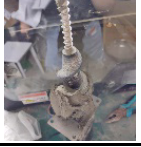
分级评价	打印前	打印中
1 号配方过稀，打印过程中材料难以维持形状，变形过大		
2 号配方正常打印		
3 号配方较硬，材料干燥易断，以至于打印困难		
4 号配方，流动性过差，在转机正常运作的情况下无法通过螺杆运输至打印喷头，完全无法进行打印		

表 6 流动性指标

Table 6 Liquidity indexes

分级评价	针入度 / cm
过硬	<15
可打印	15~35
过软	>35

表 7 挤出性标准

Table 7 Extrusion standard

挤出性分级	分级评价	挤出形态
差	挤出不流畅，条带断面尺寸变化大或不成型	
尚可	挤出基本流畅，条带断面直径均匀性一般	
好	挤出流畅，条带断面直径均匀	

3.1.2.3 凝结时间

试验中每次配料分量较少，一份配方得到的水

泥基材料完全打印挤出需要大约 30 min。实际打印时发现 60 min 初凝即可满足打印要求, 因可打印时间没有统一标准, 目前也没有有效的测试手段, 因此保证满足打印需求时没有再进行更细致的试验评价。图 8 为因堵塞而报废的打印喷头。



图 8 因堵塞导致报废的喷头
Fig.8 Printheads scrapped due to clogging

3.2 第 2 阶段筛选试验

3.2.1 第 2 阶段配合比正交试验设计及结果

第 2 阶段中将水泥基础材料的正交配比 (表 8) 范围进一步缩小, 能够保证水泥基材料的基本打印和成型要求。在凝结时间大于 60 min 的范围内直接将快硬硫铝酸盐水泥质量固定为 20 g, 羟丙甲基纤维素 (增稠剂) 比例固定为 4‰, 进而将 425 普通硅酸盐水泥的质量范围缩小至 460、470、480 g, 石英砂质量范围缩小至 110、130、150 g, 水的质量范围取 170、175、180 g。通过 3 因素 (硅酸盐水泥、石英砂、水)、3 水平正交试验设计得出表 10, 并进行试验, 每组配合比均进行 3 次重复试验。

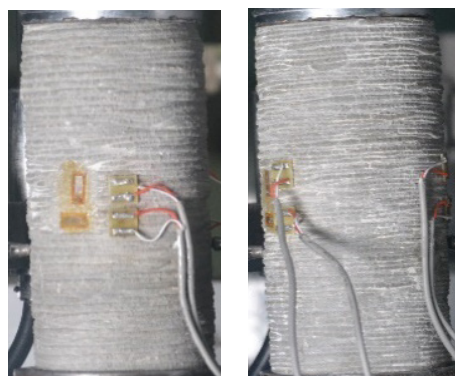
表 8 第 2 阶段试验配合比
Table 8 Experimental mix ratio in the second stage

编号	质量/g				
	硅酸盐水泥	石英砂	水	增稠剂	快硬水泥
X1	460	110	170	2	20
X2	460	130	175	2	20
X3	460	150	180	2	20
X4	470	110	180	2	20
X5	470	130	170	2	20
X6	470	150	175	2	20
X7	480	110	175	2	20
X8	480	130	180	2	20
X9	480	150	170	2	20

第 2 阶段的水泥基 3DP 实体都可以打印成型, 试验得到的打印模型共 27 个, 部分成型试样如图 9 所示。为进行后续力学性能测试, 从每组配合比中选择一个试样, 在其两侧分别对称贴上水平方向和纵向的应变片。



(a) 水泥基材料的 3D 打印试样



(b) 粘贴了应变片的水泥基 3D 打印试样

图 9 典型水泥基材料 3D 打印试样
Fig.9 Typical 3D printed samples

表 9 为全部 9 组水泥基材料流动性、可建造性、密实性和形变率几项质量评价指标的测试结果。

表 9 质量评价指标试验结果
Table 9 Experiment results of quality evaluation indexes

编号	针入度 / mm	打印层数	波速 / (m · s ⁻¹)	高度变化率 / %
X1	28.06	44	3 552.10	1.78
X2	29.45	26	3 575.21	1.05
X3	33.95	22	3 478.61	0.22
X4	32.94	18	3 427.25	1.00
X5	26.93	44	3 598.42	0.32
X6	29.03	16	3 516.47	0.04
X7	31.73	48	3 632.83	0.73
X8	30.36	14	3 510.39	0.54
X9	19.67	42	3 693.34	1.32

对各项指标的结果进行数据分析。表 10 为在各项质量评价指标与水灰比、砂率之间进行曲线拟合的结果。显著性水平值 P 可以说明两个变量之间是的关系是否具有统计学意义。按照假设假设检验显著性水平高于 95% 的要求, P 值需小于 0.05。若 $P < 0.05$, 说明水灰比对评价指标的变化存在显著性影响, 二者关系存在一定规律。

表 10 各质量评价指标与水灰比和砂率在各函数类型下显著性水平 P 值

Table 10 Significance level P value of each quality evaluation index and water-cement ratio, sand rate under each function type

类别 函数	水灰比 P 值				砂率 P 值			
	针入度	打印层数	波速	高度变化率	针入度	打印层数	波速	高度变化率
线性	0.001	0.031	<0.001	0.039	0.638	0.385	0.774	0.823
二次	0.002	0.102	<0.001	0.130	0.776	0.702	0.958	0.607
逆	0.001	0.029	<0.001	0.038	0.612	0.380	0.772	0.771
幂	0.002	0.051	<0.001	0.265	0.559	0.454	0.775	0.615
指数	0.002	0.053	<0.001	0.268	0.569	0.458	0.777	0.631
对数	0.001	0.030	<0.001	0.038	0.624	0.383	0.773	0.796

从表 10 中可以看出,各质量评价指标与水灰比在多种函数类型下的拟合具有统计学意义,需要进一步分析对比各种函数类型的优劣,从而得到具体的拟合公式。表 10 中砂率 P 均大于 0.05, 这表明试验不能说明各项质量评价指标和砂率 P 值之间的关系,或者二者之间不存在显著相关关系。

3.2.2 流动性

从针入度指标来看,第 3 组的流动性最强,第 9 组的最差。并且,针入度指标与水灰比之间明显相关,3D 打印水泥基材料的针入度指标随着水灰比的增大而逐渐增大。

表 11 为试验中 9 组配合比材料各项评价指标的试验结果及其与材料水灰比数据之间在线性函数、二次函数、逆函数、幂函数、指数函数和对数函数拟合时的显著性水平 P 值和决定系数 R^2 (R^2 值越大,回归模型的可靠性越好)。从结果可以看出,各种函数类型下的 P 值均小于 0.05,即模型均有统计学意义,且从 R^2 看可信度 (可信度为 $R^2 \times 100\%$): 二次函数 > 逆函数 > 对数函数 > 线性函数 > 幂函数 > 指数函数。

表 11 针入度与水灰比各函数类型拟合结果
Table 11 Fitting results of each function type of penetration and water-cement ratio

函数类别	P 值	R^2	函数类别	P 值	R^2
线性	0.001	0.819	幂	0.002	0.773
二次	0.002	0.878	指数	0.002	0.764
逆	0.001	0.832	对数	0.001	0.825

但是经过数据分析,发现具体拟合公式中二次函数的各项系数均不显著,幂函数和对数函数的常量系数不显著,因此去掉二次函数类型,在剩余的函数类型中选择决定系数最高的函数,即逆函数,其系数相关数据如表 12 所示,拟合曲线见图 10。

表 12 针入度逆函数类型拟合系数结果

Table 12 Penetration inverse function type fitting coefficient results

类别	系数	P 值
1/水灰比	151.50	<0.001
常量	-43.81	<0.001

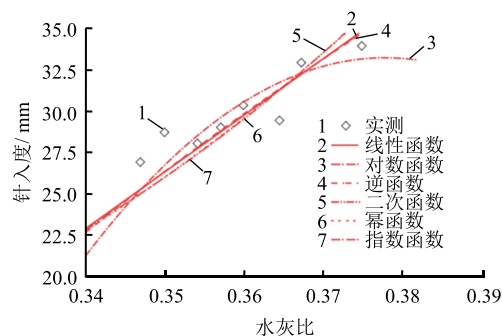


图 10 3DP 水泥基材料针入度和水灰比关系拟合图
Fig.10 Fitting diagram of the relationship between penetration and water-cement ratio of 3DP cement-based materials

则针入度 y_1 与水灰比 x 之间的拟合函数为

$$y_1 = 151.5 - 43.81/x \quad (2)$$

水灰比增大,针入度也增大,这个现象本身也符合经验认知,即水的比例越高,材料的流动性自然也越高。因此,从这个角度上看,以针入度作为 3D 打印水泥基材料的流动性指标具有合理性。

3.2.3 挤出性

每次进行打印试验时,等到材料挤出稳定后打印一条混凝土条,通过肉眼观察打印单层单条试样可知,上述 9 组配合比的水泥基材料在打印过程中均连续不中断,满足挤出性要求。各组配合比材料之间存在一定宽度上的差异,与水泥基材料的流动性有关,流动性较强的水泥基材料,打印出的单层单条试样的宽度略大。但由于试验中各组配合比材料的流动性偏小,且设置了材料挤出带宽为 4 mm,因此,9 组配合比材料之间的挤出性差异很小。

3.2.4 可建造性

9 组配合比中,第 7 组水泥基材料的单行打印层数最高,即可建造性最好,第 6 组材料仅仅只打印了 16 层就无法维持形状而倒塌,可建造性最差。水泥基 3DP 试样的打印层数测试过程如图 11 所示。

表 13 为 3D 打印水泥基材料与水灰比之间在各种类型函数下的拟合情况,可见线性模型、逆函数模型以及对数模型下二者具有统计学意义。拟合结果的可信度分别为 51.0%、51.6%和 51.4%。

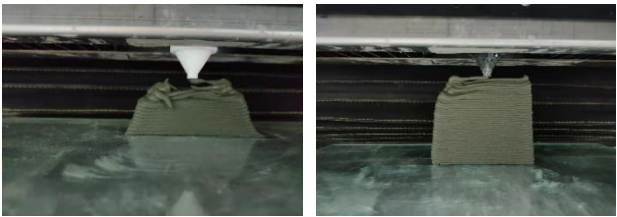


图 11 部分配比下 3DP 水泥材料的打印层数
Fig.11 Number of print layers for some set of materials

表 13 打印层数与水灰比各函数类型拟合结果
Table 13 Fitting results of function types between the number of printing layers and the water-cement ratio

函数类别	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²	函数类别	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²
线性	0.031	0.510	幂	0.051	0.441
二次	0.102	0.533	指数	0.053	0.437
逆	0.029	0.516	对数	0.030	0.514

通过图 12 中的散点可以看到,随着水灰比 x 的增大,材料的打印层数 y_2 逐渐增加。相关拟合分析表明,最佳拟合公式为逆函数类型(表 14),其公式为

$$y_2 = -296.65 + 116.75 / x \quad (3)$$

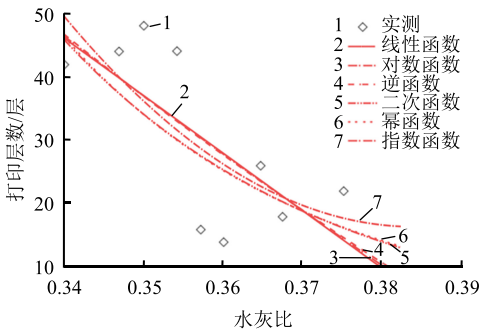


图 12 打印层数和 3DP 水泥基材料水灰比关系拟合图
Fig.12 Fitting relationship between the number of printed layers and the water-cement ratio of 3DP cement-based materials

表 14 打印层数逆函数类型拟合系数结果
Table 14 Print layer number inverse function type fitting coefficient results

类别	系数	<i>P</i> 值
1/水灰比	116.75	0.029
常量	-296.65	0.042

根据可建造性的 9 组试验结果人为进行了可建造性质量划分(见表 15),将其按照打印层数在 20 层以下、20~40 层以及 40 层以上分为可建造性 差、较好和好 3 个质量等级。将来进行其他试验时对可建造性的要求标准至少是“较好”等级,便于将来试验可以进一步进行质量提升。

表 15 建造性标准
Table 15 Construction standard

分级评价	差	较好	好
打印层数/层	<20	20~40	>40

3.2.5 密实性

根据声波测试的结果可知,9 组试样中第 9 组的波速最大,意味着根据该组配合比打印的试样最密实;第 4 组波速最小,说明其密实性最差。表 16 为波速与水灰比的拟合结果, P 值均非常小,据 R^2 可知,各函数类型中可信度最高的为幂函数类型。

表 16 波速与水灰比各函数类型拟合结果
Table 16 Fitting results of each function type of wave speed and water-cement ratio

函数类别	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²	函数类别	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²
线性	<0.001	0.848	幂函数	<0.001	0.942
二次	<0.001	0.857	指数	<0.001	0.849
逆函数	<0.001	0.865	对数	<0.001	0.857

逆函数类型的系数结果如表 17 所示。因此,试样波速 y_3 和材料水灰比 x 之间的拟合函数为

$$y_3 = 1\,726.38x^{-0.7} \quad (4)$$

表 17 波速逆函数类型拟合系数结果
Table 17 Results of fitting coefficient of wave velocity inverse function type

类别	系数	<i>P</i> 值
1/水灰比	-0.70	<0.001
常量	1 726.48	<0.001

图 13 为水灰比和试样波速的拟合关系,材料的水灰比越小,成型后的试样越密实,其波速越大。通过分析,逆函数拟合结果的可信度达到 94.2%。

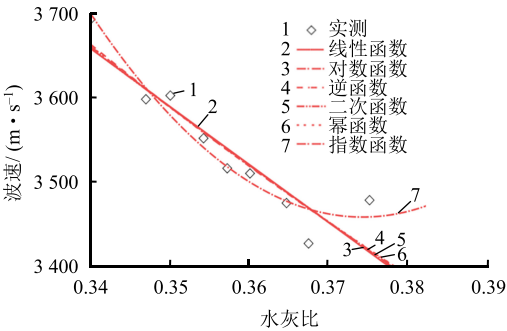


图 13 波速和 3DP 水泥基材料水灰比关系拟合图
Fig.13 Fitting diagram of wave velocity and water-cement ratio of 3DP cement-based materials

与可建造性类似,根据 9 组试样数据也将波速划分为 3 个等级,如表 18 所示。

表 18 密实性指标
Table 18 Compactness indexes

分级评价	好	尚可	差
波速/(m·s ⁻¹)	>3 550	3 500~3 550	<3 500

试验还表明,各试样的波速范围虽有规律,但是跨度较小,均在 3 400~3 700 m/s 之间,查阅文献[43]表明,这些 3D 打印试样的波速与中粒砂岩的较为接近。

3.2.6 高度变化率

从高度变化率的结果来看,第 6 组试样的高度变化率最小,收缩最少,第 1 组试样的高度变化率最大,收缩情况最严重。整体而言,试样的高度变化率呈现随着水灰比的增大减小的趋势。表 19 为高度变化率 y_4 与水灰比 x 之间各函数模型的相关分析数据,可见在一次函数、逆函数、对数函数类型下进行拟合时,二者之间的关系具有统计学意义。图 14 为高度变化率和水灰比的各类型曲线拟合图。

表 19 高度变化率与水灰比各函数类型拟合结果
Table 19 Fitting results of various function types between height change rate and water-cement ratio

函数类别	P 值	R^2	函数类别	P 值	R^2
线性	0.039	0.479	幂函数	0.265	0.173
二次	0.130	0.493	指数	0.268	0.171
逆函数	0.038	0.483	对数	0.038	0.481

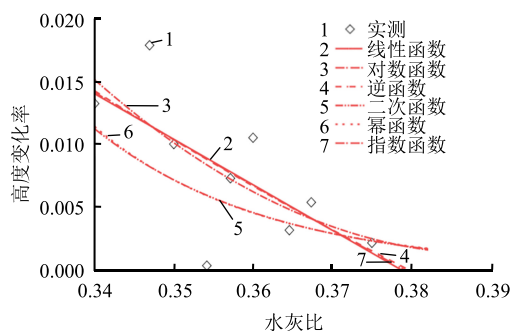


图 14 高度变化率和 3DP 水泥基材料水灰比关系图
Fig.14 Relationships between height change rate and water-cement ratio

排除二次函数的 $P > 0.05$ 条件下,按照一次函数的决定系数大小优选高度变化率和水灰比 x 之间的关系,因逆函数类型的 R^2 最大,为 0.483,即以逆函数类型拟合可信度为 48.3%,则其拟合函数相关数据见表 20,计算公式为

$$y_4 = 0.046 / x - 0.121 \quad (5)$$

变形率评价指标的等级划分如表 21 所示。

表 20 波速逆函数类型拟合系数结果
Table 20 Results of fitting coefficient of wave velocity inverse function type

类别	系数	P 值
1/水灰比	0.046	0.038
常量	-0.121	0.047

表 21 变形率指标
Table 21 Deformation rate indexes

成型效果	差	尚可	好
高度变化率	>1.0%	0.7%~1.0%	<0.7%

3.3 质量评价指标对水灰比的综合性要求

以打印效果为较好及以上为标准,结合拟合曲线反推各项指标对应的水灰比,如表 22 所示。

表 22 质量指标反推的水灰比要求
Table 22 Water-cement ratio requirements for the inversion of quality indicators

指标项目	质量要求	水灰比	指标项目	质量要求	水灰比
流动性	较好以上	0.321~0.376	密实性	较好以上	≤ 0.364
可建造性	较好以上	≤ 0.369	形变率	较好以上	≥ 0.351

综合各项指标的标准可知,当 3D 打印水泥基材料的水灰比在 0.351~0.364 之间时打印效果可以达到较高标准。在此基础上,若试验更关注打印材料的成型效率,应向水灰比为 0.351 靠近;若更关注打印过程流畅程度或打印实体的变形程度,则水灰比可更靠近 0.364。

4 水泥基 3DP 试样类岩石特性评估

4.1 水泥基 3DP 试样破坏模式

单轴试验前对试样进行处理,将其高度切割为 100 mm,制成直径为 50 mm、高为 100 mm 的标准圆柱样,并将上下表面磨平。进行单轴压缩试验的仪器为中科院武汉岩土力学研究所自行研发的试验机 RMT-150C 岩石力学试验设备(图 15),加载速率为 0.002 mm/s。



图 15 RMT-150C 岩石力学试验设备
Fig.15 RMT-150C rock mechanics test equipment

图 16 为水泥基 3DP 试样在 RMT 上进行单轴压缩获得的应力-应变曲线。从图 16 可看出，其破坏过程与岩石材料类似，大致可分为 4 个阶段：孔隙压密阶段、弹性变形至微破裂稳定发展阶段、非稳定破裂发展阶段、破裂后应力跌落阶段^[44]。

但也有些试样的峰后应力-应变曲线存在台阶状下降，这可能是因为试样直接通过 3D 打印获得，故其端部表面不平滑，导致试样端面磨平时上下表面未能完全平行，易产生偏压效应。

表 23 为试样在破坏前后的照片。从试样的破坏形态上看，X1、X3、X4、X8、X9 既有剪切破坏也有劈裂拉伸破坏，X2、X5 既有劈裂拉伸破坏，

同时也由端部效应导致的试样中间部分破坏，X6 为锥形破坏，X7 为局部劈裂拉伸破坏。

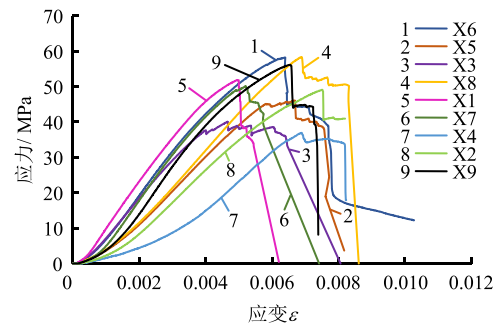


图 16 3DP 水泥基材料试样应力-应变曲线
Fig.16 Stress-strain curves of 3DP cement-based materials

表 23 3DP 水泥基材料试样的典型破坏照片
Table 23 Specimen destruction photos of 3DP cement-based materials

编号	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
试验前									
试验后 破坏									

我们发现试样在破坏过程中基本上都是外层先剥落，然后发生剪切或劈裂破坏。例如，在图 16 中 X2、X5 号试样中这个现象就能很明显地看出来。这一现象与打印过程有关，是因为在对模型进行切片时设置了一圈外层，这样可以在一定程度上保持打印过程中材料的形状，外面这一层与试样内部地材料黏结情况相对较差，层间作用力弱，因此更容易破坏而剥落。

4.2 水泥基 3DP 材料的力学性能优选

为了评估该水泥基 3DP 试样的基本力学特性及其类岩石力学行为，进一步开展了典型水泥基 3DP 试样的单轴压缩试验。表 24 为试样单轴试验得到的有关结果，包括各配合比的抗压强度、弹性模量和泊松比。

表 25 为各项力学评价指标和水灰比、砂率之间在几种不同函数类型下进行曲线拟合的显著性水平 P 值。可以看出仅抗压强度和砂率之间存在显著性关系。

表 24 力学性能试验结果
Table 24 Experimental results of mechanical properties

编号	抗压强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比
X1	48.14	7.49	0.28
X2	44.01	10.33	0.24
X3	36.84	9.90	0.23
X4	44.25	11.06	0.26
X5	38.68	11.08	0.21
X6	36.08	11.83	0.26
X7	58.18	10.99	0.27
X8	48.00	10.42	0.24
X9	48.43	12.21	0.24

表 25 各力学评价指标与水灰比和砂率在各函数类型下显著性水平 P 值

Table 25 Significance level of P value for each mechanical evaluation index and water-cement ratio, sand rate under each function type						
函数类别	各指标与水灰比的 P 值			各指标与砂率的 P 值		
	抗压强度	弹性模量	泊松比	抗压强度	弹性模量	泊松比
线性	0.272	0.472	0.991	0.049	0.198	0.133
二次	0.506	0.630	0.483	0.162	0.465	0.087
逆	0.280	0.081	0.980	0.046	0.196	0.103
幂	0.280	0.543	0.961	0.044	0.184	0.133
指数	0.276	0.550	0.975	0.045	0.184	0.150
对数	0.276	0.465	0.995	0.047	0.197	0.117

表 26 为 3D 打印模型的单轴抗压强度 B 与砂率 A 在各种函数类型下进行拟合得到的显著性水平 P 值以及决定系数 R^2 。

首先，以 $P < 0.05$ 为标准，表明一次函数、逆函数、幂函数、指数函数和对数函数中相对最显著的是幂函数，如图 17 为所示，随着砂率减小，试样单轴抗压强度降低。

表 26 单轴抗压强度与砂率各函数类型拟合结果
Table 26 Fitting results of uniaxial compressive strength and sand rate of various function types

指数类别	P 值	R^2	指数类别	P 值	R^2
线性	0.049	0.447	幂	0.044	0.461
二次	0.162	0.455	指数	0.045	0.459
逆	0.046	0.455	对数	0.047	0.452

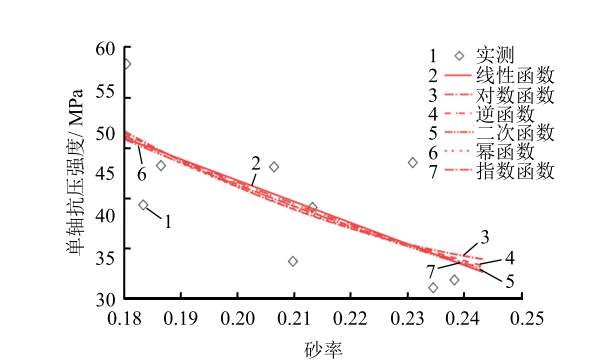


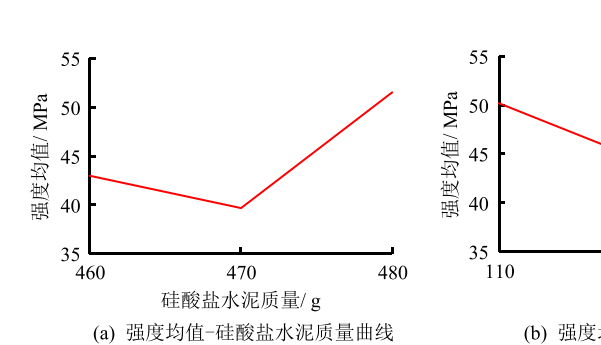
图 17 试样单轴抗压强度和砂率关系图
Fig.17 Relationships between uniaxial compressive strength and sand rate of specimen

表 27 为幂函数类型下拟合公式各项系数的值及其显著性水平。可见常量的 $P > 0.05$ ，因此拟合函数为

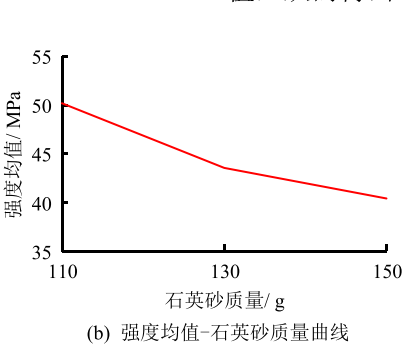
$$B = -0.974 \ln A \tag{6}$$

表 27 单轴抗压强度幂函数关系拟合系数结果
Table 27 Fitting coefficient results of power function relation of uniaxial compressive strength

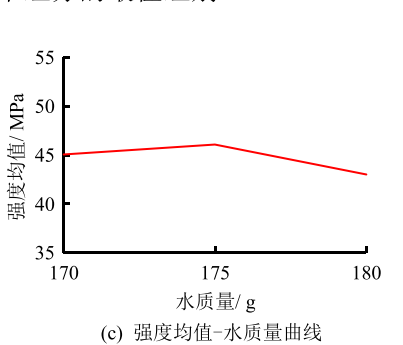
类别	系数	P 值
$\ln A$	-0.974	0.044
常量	9.593	0.155



(a) 强度均值-硅酸盐水泥质量曲线



(b) 强度均值-石英砂质量曲线



(c) 强度均值-水质量曲线

图 18 均值主效应图
Fig.18 Main effect plots of mean

4.3 水泥基 3DP 材料的力学性能优选

在对试验数据进行处理的过程中，通过相应的应力-应变曲线可以得到各组试样的单轴抗压强度，这样得到 9 组 27 个试样的单轴抗压强度，加权后再使用统计软件对着 27 组数据进行正交试验数据的分析。

首先，对各组分和单轴抗压强度值之间进行单因素方差分析， $P < 0.05$ 时即认为该因子对结果有显著性影响，各组分的 P 值如表 28 所示，这表明 425 普通硅酸盐水泥、石英砂和水三者的掺量均对试样的单轴抗压强度存在显著性影响。

表 28 水泥基 3DP 试样强度的单因素方差分析结果
Table 28 One-way ANOVA results of cement-based 3DP specimens as a function of strength

组分	硅酸盐水泥	快硬水泥	水
P 值	0.014	0.017	0.022

在假设 3 个因变量相互之间不存在交互效应的前提下，对这些数据进行进一步的正交试验分析可以得到各因素对强度均值的秩（表 29），可以表示各因素的影响程度大小，秩为 1 表明该组对抗压强度的相对影响程度最大，秩为 3 则表明其影响相对最小。因此可知：水的影响最大，425 普通硅酸盐水泥次之，石英砂的影响最小。

表 29 各因素的对试样单轴抗压强度的影响顺序
Table 29 Order of influence of each factor on uniaxial compressive strength of specimen

组分	硅酸盐水泥	石英砂	水
排序	2	3	1

通过正交分析，还可以得到各个材料变量的均值主效应（图 18）。均值主效应图中的点为每组因子各个水平的因变量的均值，即质量为 460、470、480 g 普通硅酸盐水泥分别对应的强度的均值，质量为 110、130、150 g 石英砂分别对应的强度的均值，以及质量为 170、175、180 g 水分别对应强度的均值，从而得出每个组分的最佳组别。

从图 18 中看出, 以单轴抗压强度高为标准, 425 普通硅酸盐水泥质量应取 480 g, 石英砂质量应取 110 g, 水质量为 175 g, 即最佳配合比见表 30。上述测试结果表明, 该配合比的水泥基 3D 打印材料强度范围一般在 30~50 MPa。因此, 该水泥基 3D 打印材料可直接用于打印三维足尺物理模型, 用于类中硬岩(如砂岩、板岩)的物理模拟试验; 也可用于考虑一定相似比的高强度硬岩(如新鲜花岗岩)的缩尺相似物理模拟(如几何相似系数为 3~5)。

表 30 3DP 水泥基材料最佳配合比

Table 30 Best mix ratio of 3DP cement-based materials

组分	硅酸盐水泥	石英砂	水	快硬水泥	增稠剂
质量/g	480	110	175	20	2

5 结 论

本文开展了水泥基 3D 打印材料基础配合比试验测试分析与 3D 打印实体的质量评价, 可以得到以下结论和认识:

(1) 构建了一套考虑水泥基 3DP 实体模型成型全过程的质量评价 6 指标体系及其质量分级方法, 包括流动性、挤出性、凝结时间、可建造性、密实性以及变形率, 从打印过程、堆积过程、实体精度三方面实现对 3D 打印实体的质量评价。

(2) 提出了先进行一次大域值范围的正交试验设计, 定性寻优满足基本打印要求的水泥基材料配合比范围, 进而在此基础上进行第 2 阶段小范围的正交试验, 分析水泥基 3D 打印基础性的配方寻优方法。

(3) 利用两阶段正交试验及其实体模型测试分析, 得到了 1 组 3D 打印成型性能较好的水泥材料基础配方, 即配合比为: 425 普通硅酸盐水泥质量为 480 g, 石英砂质量为 110 g, 水质量为 175 g, 快硬硫铝酸盐水泥质量为 20 g, 增稠剂质量为 2 g。

(4) 通过对水泥基 3DP 试样单轴试验结果表明, 基于水泥基 3D 打印材料的物理试样的变形破坏特征与中硬岩的基本力学特性类似, 具有类岩石的力学表现, 可用于水泥基材料的岩石工程力学行为足尺或缩尺物理模拟试验。

参 考 文 献

[1] 王子名, 刘伟. 3D 打印技术及其在建筑领域的应用[J]. 混凝土世界, 2015, 67(1): 50-57.
WANG Zi-ming, LIU Wei. 3D printing technology and its

application in the field of construction[J]. **China Concrete**, 2015, 67(1): 50-57.

- [2] 曹沐曦, 詹倩怡, 沈晓琦, 等. 3D 打印技术在食品工业中的应用概述[J]. 农产品加工, 2021, 519(1): 78-82.
CAO Mu-xi, ZHAN Qian-yi, SHEN Xiao-qi, et al. Review on the application of 3D printing technology in the food industry[J]. **Farm Products Processing**, 2021, 519(1): 78-82.
- [3] 安妮, 王佳. 3D 打印技术对服装定制业的影响初探[J]. 上海纺织科技, 2015, 43(5): 1-4.
AN Ni, WANG Jia. Initial exploration of influence of 3D printing technology on clothes customization industry[J]. **Shanghai Textile Science & Technology**, 2015, 43(5): 1-4.
- [4] 黄文华. 生物 3D 打印在器官再造中的前沿热点和研究进展[J]. 器官移植, 2022, 13(2): 161-168.
HUANG Wen-hua. Frontier hotspots and research progress on 3D bioprinting in organ reconstruction[J]. **Organ Transplantation**, 2022, 13(2): 161-168.
- [5] 杨恩泉. 3D 打印技术对航空制造业发展的影响[J]. 航空科学技术, 2013 (1): 13-17.
YANG En-quan. The influence of 3D printing to the development of aviation manufacturing[J]. **Aeronautical Science & Technology**, 2013 (1): 13-17.
- [6] LIORET E, SHAHAB A R, LINUS M, et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication[J]. **Computer-Aided Design**, 2015(60): 40-49.
- [7] 张大旺, 王栋民. 3D 打印混凝土材料及混凝土建筑技术进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6): 1583-1588.
ZHANG Da-wang, WANG Dong-min. Progress in 3D print concrete materials and concrete construction technology[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2015, 34(6): 1583-1588.
- [8] 苏有文, 李超飞, 杨婷惠, 等. 3D 打印混凝土技术的建筑应用研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(1): 98-100.
SU You-wen, LI Chao-fei, YANG Ting-hui, et al. Study on application of 3D printing concrete technology in architectural engineering[J]. **Architecture Technology**, 2017, 48(1): 98-100.
- [9] 李瑜. 迪拜建成世界最大 3D 打印建筑[J]. 砖瓦, 2020 (2): 17.
LI Yu. World's largest 3D-printed building built in Dubai[J]. **Brick-Tile**, 2020 (2): 17.
- [10] DAMS B, SAREH S, ZHANG K, et al. Aerial additive building manufacturing: three-dimensional printing of

- polymer structures using drones[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Construction Materials**, 2020, 173(1): 3-14.
- [11] 李留宇. 盈创建筑: 智能化 3D 打印建筑领域的开拓者[J]. 国际融资, 2018(7): 20-21.
LI Liu-yu. Winsun high-tech: 3D printing architecture's future[J]. **International Financing**, 2018(7): 20-21.
- [12] 盈创建筑科技(上海)有限公司. 盈创全球首座 3D 打印 1 100 m² 精装别墅[EB/OL]. (2020-07-24). http://www.winsun3d.com/News/news_inner/id/466.
Yingchuang Construction Technology (Shanghai) Co., Ltd. The world's first 3D printed 1 100 m² hardcover villa [EB/OL]. (2020-07-24). http://www.winsun3d.com/News/news_inner/id/466.
- [13] 盈创建筑科技(上海)有限公司. 聚焦汛情: 盈创 3D 打印水利设施[EB/OL]. (2020-07-24). http://www.winsun3d.com/News/news_inner/id/568.
Yingchuang Construction Technology (Shanghai) Co., Ltd. Flood situation in focus: Yingchuang 3D prints water conservancy facilities[EB/OL]. (2020-07-24). http://www.winsun3d.com/News/news_inner/id/568.
- [14] 张涛, 徐卫亚, 孟庆祥, 等. 基于 3D 打印技术的柱状节理岩体试样力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 245-254.
ZHANG Tao, XU Wei-ya, MENG Qing-xiang, et al. Experimental investigation on the mechanical characteristics of columnar jointed rock mass samples based on 3D printing technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 245-254.
- [15] 刘享华, 张科, 李娜, 等. 含孔双裂隙 3D 打印类岩石试件破裂行为定量识别[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 3017-3028.
LIU Xiang-hua, ZHANG Ke, LI Na, et al. Quantitative identification of the failure behavior of the 3D printed rock-like specimen with one hole and two flaws[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(6): 3017-3028.
- [16] 张翼, 朱艳梅, 任强, 等. 3D 打印建筑技术及其水泥基材料研究进展评述[J]. 硅酸盐学报, 2021, 40(6): 1796-1807.
ZHANG Yi, ZHU Yan-mei, REN Qiang, et al. Progress on the research progress of 3D printing construction technology and its cement-based materials[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2021, 40(6): 1796-1807.
- [17] 丁铸, 李定发, 朱继翔. 3D 打印建筑材料现状及其发展[J]. 墙材革新与建筑节能, 2017(10): 61-65.
DING Zhu, LI Ding-fa, ZHU Ji-qiang. Current situation and development of 3D printing building materials[J]. **Construction Wall Innovation & Building Energy**, 2017(10): 61-65.
- [18] MUKHAMETRAKHIMOV R, LUKMANOVA L. Investigation of Portland cement in 3D concrete printing[C]//Proceedings of STCCEQ, Lecture Notes in Civil Engineering. [S. l.]: Springer, 2021: 1-13.
- [19] LIU G J, BAI E L, XU J Y, et al. Research status and development prospect of 3D printing concrete materials[J]. **Earth and Environmental Science**, 2019, 267: 1-5.
- [20] 张彩文, 郭永辉, 刘志刚. 延缓硫铝酸盐水泥凝结的研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(2): 155-160.
ZHANG Cai-wen, GUO Yong-hui, LIU Zhi-gang. Study on delaying the set of sulfoaluminate cement[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2002, 30(2): 155-160.
- [21] KHALIL N, AOUAD G, EL CHEIKH K, et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 157: 382-391.
- [22] 楚宇扬, 徐金涛, 刘烨, 等. 快硬硫铝酸盐水泥在 3D 打印材料中的应用[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 930-936.
CHU Yu-yang, XU Jin-tao, LIU Ye, et al. Application of rapid hardening sulfoaluminate cement in 3D printing material[J]. **Journal of Building Materials**, 2021, 24(5): 930-936.
- [23] 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, 320(6): 141-144.
LIN Xi-qiang, ZHANG Tao, HUO Liang, et al. Preparation and application of 3D printing materials in construction[J]. **Concrete**, 2016, 320(6): 141-144.
- [24] 吴凯, 叶钰燕, 施惠生, 等. 钢渣对磷酸盐水泥基材料性能的影响机制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 87-93.
WU Kai, YE Yu-yan, SHI Hui-sheng, et al. Effect and mechanism of steel slag on performance of magnesium phosphate cement[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2018, 46(1): 87-93.
- [25] PERROT A, RANGEARD D, COURTEILLE E, et al. 3D plotting of growth factor loaded calcium phosphate cement scaffolds[J]. **Acta Biomaterialia**, 2015(27): 264-274.
- [26] 范诗建, 杜晓, 陈兵. 磷酸盐水泥在 3D 打印技术中的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(1): 1-4.
FAN Shi-jian, DU Xiao, CHEN Bing. Research on

- application of magnesium phosphate cement in 3D printing[J]. **New Building Materials**, 2015, 42(1): 1-4.
- [27] 张大旺, 王栋民, 朴爱春, 等. 钢渣掺量对 3D 打印地质聚合物材料新拌浆体流变性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 596-604.
- ZHANG Da-wang, WANG Dong-min, PIAO Ai-chun, et al. Effect of steel slag content on the rheology of 3D printing geopolymers pastes[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2018, 26(3): 596-604.
- [28] PERROT A, RANGEARD D, COURTEILLE E. 3D printing of earth-based materials: processing aspects[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 172: 670-676.
- [29] ZHONG J, ZHOU G X, HE P G, et al. 3D printing strong and conductive geo-polymer nanocomposite structures modified by graphene oxide[J]. **Carbon**, 2017, 117: 421-426.
- [30] 马世龙, 江汪正, 肖伟, 等. 3D 打印地质聚合物材料研究进展[J]. 混凝土世界, 2022, 151(1): 45-50.
- MA Shi-long, JIANG Wang-zheng, XIAO Wei, et al. Research progress of 3D printing geopolymer materials[J]. **China Concrete**, 2022, 151(1): 45-50.
- [31] 张敏霞, 范开均, 徐平, 等. 3D 打印混凝土性能的影响因素及研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(11): 18-22.
- ZHANG Min-xia, FAN Kai-jun, XU Ping, et al. Influencing factors and research progress on the properties of 3D printing concrete[J]. **China Concrete and Cement Products**, 2021, 11: 18-22.
- [32] BUSWELL R A, DE SILVA W R L, JONES S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research[J]. **Cement and Concrete Research**, 2018, 112: 37-49.
- [33] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. **Materials and Structures**, 2012, 45(8): 1221-1232.
- [34] 杨钱荣, 赵宗志, 肖建庄, 等. 矿物掺合料与化学外加剂对 3D 打印砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 412-418.
- YANG Qian-rong, ZHAO Zong-zhi, XIAO Jian-zhuang, et al. Effect of mineral admixtures and chemical admixtures on performance of 3D printing mortar[J]. **Journal of Building Materials**, 2021, 24(2): 412-418.
- [35] LIM S, BUSWELL R A, LE T T, et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes[J]. **Automation in Construction**, 2012, 21: 262-268.
- [36] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D 打印技术应用于大尺度建筑的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4150-4159.
- ZHU Bin-rong, PAN Jin-long, ZHOU Zhen-xin, et al. Advances in large-scale three dimensional printing technology applied in construction industry[J]. **Materials Reports**, 2018, 32(23): 4150-4159.
- [37] 赵颖, 刘维胜, 王欢, 等. 石灰石粉对 3D 打印水泥基材料性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊 2): 1217-1220.
- ZHAO Ying, LIU Wei-sheng, WANG Huan, et al. The effect of limestone powder on the properties of 3D printing cement-based materials[J]. **Materials Reports**, 2020, 34(Suppl.2): 1217-1220.
- [38] AL-QUTAIFI S, NAZARI A, BAGHERI A, et al. Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 176: 690-699.
- [39] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. **Materials and structures**, 2012, 45: 1221-1232.
- [40] MA G W, LI Z J, WANG L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 162: 613-627.
- [41] LIU Q, JIANG Q, HUANG M J, et al. Modifying effect of anionic polyacrylamide dose for cement-based 3DP materials: printability and mechanical performance tests[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 330: 127-156.
- [42] 中国建筑材料联合会. GB/T 1346—2011 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- China Building Materials Association. GB/T 1346—2011 Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the Portland cement[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [43] 任猛, 王如江, 陈翠刚, 等. 岩石与岩体性质的相关性研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 100-103.
- REN Meng, WANG Ru-jiang, CHEN Cui-gang, et al. Study on the correlation between rock properties and rock mass properties[J]. **Mining Research and Development**, 2021, 41(2): 100-103.
- [44] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock mass mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.