DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0680

复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备研制及实例分析

江 权[1*]，刘 强[2]，张世殊[3]，杜时贵[4]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 华东交通大学 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室，江西 南昌 330013；3. 中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 611130；4. 宁波大学 岩石力学研究所，浙江 宁波 315211）

摘要：针对岩土工程相似物理模型试验中复杂地层形式、工程几何模型及结构面特征难以实现精细建模的问题，同时鉴于当前工业级 3D 打印技术在适配岩土工程领域特殊需求方面的局限性，研制一种复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备。该设备采用双喷头泵送挤出成型方式，从泵送系统、挤出系统和双喷头切换系统等多方面进行技术创新，解决了高黏稠打印材料难挤出、双喷头切换易溢料、长时间打印易堵塞等难题。功能测试表明，该设备可快速制作含多种材料的复杂岩体与工程结构物理模型，具有成型精度高、打印密实性好、打印速度快、拆卸简单、清洗方便等特点。随后利用该设备打印制作含软弱夹层的类岩体试样及含夹层的隧道物理模型，通过实例分析表明该设备能有效满足岩土工程物理模型试验需求，可为岩体力学理论创新及基础工程安全建设提供技术支撑。

关键词：岩石力学；物理模型；3D 打印；双喷头切换；挤出成型；地下隧洞

中图分类号：TU 45 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)03－0668－16

***通信作者**：江 权（1978－），现任研究员，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与灾害防控等方面的研究工作。E-mail：qjiang@whrsm.ac.cn

Development of 3D rapid prototyping system for large-scale physical modeling of complex rock masses and engineering structures with case study analysis

JIANG Quan[1*], LIU Qiang[2], ZHANG Shishu[3], DU Shigui[4]

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety*, *Institute of Rock and Soil Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan*, *Hubei* 430071, *China*; 2. S*tate Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area*, *East China Jiaotong University*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330013, *China*; 3. *PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited*, *Chengdu*, *Sichuan* 611130, *China*; 4. *Institute of Rock Mechanics*, *Ningbo University*, *Ningbo*, *Zhejiang* 315211, *China*)

Abstract: Similar physical model tests in geotechnical engineering encounter significant challenges, particularly in accurately representing complex stratigraphic structures, engineering geometries, and structural plane morphologies. Conventional industrial 3D printing techniques often fail to meet the specific requirements of geotechnical modeling. To address this gap, we have developed a three-dimensional rapid prototyping system designed for fabricating large-scale similitude physical models of complex rock masses and engineering structures. This system employs a dual-

收稿日期：2025－09－15；**修回日期**：2025－10－30

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52325905）；国家重点研发计划课题（2023YFC2907204）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52325905) and State Key Research Development Program of China (Grant No. 2023YFC2907204)

nozzle pumping extrusion molding method and incorporates technological innovations in several key areas, including the pumping system, extrusion system, and dual-nozzle switching system. These advancements effectively resolve critical issues such as the extrusion of high-viscosity printing materials, material overflow during dual-nozzle switching, and frequent clogs during extended printing sessions. Functional tests demonstrate that the equipment can rapidly fabricate physical models of complex rock masses and engineering structures using multiple materials, exhibiting high forming precision, excellent printing compactness, fast printing speeds, straightforward disassembly, and ease of cleaning. Subsequently, the device was utilized to produce rock-like specimens containing weak interlayers and tunnel physical models with interlayer structures. Case study analyses confirm that the system effectively meets the demands of physical model testing in geotechnical engineering, providing valuable technical support for innovations in rock mechanics theory and the safe construction of infrastructure engineering projects.

Key words: rock mechanics; physical models; 3D printing; dual-nozzle switching; extrusion molding; underground tunnels

***Corresponding author:** JIANG Quan (1978－), research fellow, is engaged in physical and numerical simulation of underground engineering, stability analysis and disaster prevention and control of large-scale cavern groups. E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

1 引 言

随着国家经济、科技与社会的快速融合发展，“上天、入地、下海、登极”已成为当前国际科学研究的前沿主题。我国日益增长的资源、能源和交通刚性需求必将进一步推动矿山开采、交通隧道建设、水电开发等行业发展。批量开展岩土三维相似物理模型试验是发展我国岩体力学理论、破解国家深部工程安全难题的关键途径之一。物理模型传统成型方法主要有夯实成型法、倾倒法和小块体堆砌法，然而这些传统物理模型制作方法均存在模型制作周期长、均质性差、成本高等缺点。随着岩土工程规模尺寸越来越大，结构越来越复杂，如何快速精确制作出复杂岩体与工程结构物理模型，是岩土工程领域面临的一个难点[1]。

三维快速成型技术(3D 打印)由于能快速、高效、精准地制作包含复杂结构的三维实体模型，为批量物理模拟研究提供了一条新途径。纽约《时代》周刊将当前新兴的“三维打印(3DP)”技术视为继第一、二、三次工业革命(分别以蒸汽机、电力、信息为代表)之后的第四次工业革命的标志(3DP technology as Industrial Revolution 4.0)。2018 年麻省理工学院将三维打印技术评为改变未来的十大技术之一[2-3]。随着 3D 打印技术快速发展，江 权等[4-6]将 3D 打印技术应用到岩石力学行为研究中，包括光固化成型技术、熔融沉积成型技术、选择性激光烧结成型技术、粉末黏结成型技术等。Y. Ju 等[7]采用 Object Connex 500 3D 打印机，利用光敏树脂作为打印材料，制作了透明的含裂隙的煤岩模型，研究表明其打印试样的抗压强度、弹性模量和泊松比等力学特性与原型煤岩均相似。熊祖强等[8]基于 3D 打印结构面模型开展了相似材料剪切试验。余 宸等[9]通过 KOCEL AJS 2515 工业级铸造砂型 3D 打印机，采用呋喃树脂自硬砂工艺制作了类岩石相似材料，通过力学试验研究表明 3D 打印类岩石试样的重度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角和单轴抗压强度均随固化剂与树脂添加量升高而增大。蒋力帅等[10-11]采用 VX1000 3D 商用砂型打印机，以硅砂粉为基质，以呋喃树脂为黏结材料制作砂型 3D 打印试样，通过力学试验揭示了砂型 3D 打印试样与煤样弹塑性力学特性的相似性，利用霍普金森压杆冲击试验揭示了砂型 3D 打印试样的动力学特性，还研究了复杂节理岩体变形破坏行为。然而，这些 3D 打印技术均存在打印材料强度难以定量调控的难题，而模型与原型材料相似是开展相似物理模型试验的基础。

水泥基 3D 挤出打印可通过调控材料的配比实现不同强度类岩石材料的制作[12-13]。目前研制的挤出固化 3D 打印设备主要面向建筑增材建造。覃亚伟等[14]针对建筑 3D 打印工艺中的挤出固化打印技术，集成数控技术、机械技术、计算机技术等设计研制了一套建筑 3D 打印装置。岩土工程物理模型挤出打印需要成型精度高，成型实体密实等特点。X. T. Feng 等[15]在 2019 年提出采用水泥基挤出成型的方式来实现岩土工程物理相似模型的制作，并研发了气压挤出式地质力学模型打印设备。G. W. Ma 等[16]采用水泥胶凝材料，通过增材机械臂和减材机

械臂来实现复杂结构模型的打印。Q. Jiang 等[17]也研发出了采用螺杆挤出式的桌面级类岩石试样打印设备和中型物理模型挤出成型设备。这些单喷头打印设备仅适用于简单岩体模型的成型，针对复杂岩体与工程结构的大型相似物理模型，亟需研发多喷头一体化成型设备。

复杂岩体与工程结构大型相似物理模型成型设备，需具备成型精度高，打印密实性好，打印速度快，打印时间长，易拆卸、易清洗等特点。为实现以上技术要求，从高泵压振动挤出装置、双喷头智能化切换系统、防溢料和防堵塞系统等多方面进行了技术创新，设计并研制出一套复杂岩体与工程结构物理模型三维快速成型设备。通过试验测试和工程应用表明，该设备可有效满足岩土物理模拟试验需求，为我国深部岩体力学理论创新和基础工程的安全建设提供关键试验技术支撑。

2　三维快速成型设备设计与研发

为满足复杂岩体与工程结构大型相似物理模拟试验的需求，需研制三维快速成型设备。水泥基 3D 打印材料通过调节配比可实现不同强度类岩体试样的制备。水泥基挤出固化 3D 打印技术的基本原理是采用分层定位堆积，将流态化水泥基材料通过数控喷头定点喷涂并固化后形成三维实体模型[18]。挤出 3D 打印技术常用于陶泥和胶凝材料等实体模型的打印。针对复杂岩体与工程结构物理模型可通过设计双喷头挤出成型装置来实现同时打印多种不同类岩石材料，从而实现复杂岩体与工程结构相似物理模型的快速成型。

水泥基相似材料具有黏稠度高、易变形、易固化等特性，大型相似物理模型成型需要满足成型质量高，打印速度快，长时间打印不堵管等要求。因此，研发大型相似物理模型成型设备存在的主要技术难点有：高黏稠打印材料难挤出、双喷头切换易溢料、长时间打印易堵塞等。为此，从打印材料、泵送系统、挤出系统和双喷头切换系统等多方面进行了技术创新。本设备主要组成部分如图 1 所示，设计出的设备主要由三大部分组成：数据处理系统、机械系统和控制系统。数据处理系统包括建模和切片 2 个部分。建模需要考虑两个喷头所打印的部分，需对模型进行切割设计，生成 2 个 STL 模型文件，然后将这 2 个 STL 文件一起进行切片分层处理和路径规划，最后转化为控制系统识别的打印文件。机械系统由泵送挤出部件、框架支撑部件、三维运动部件、双喷头切换部件、防溢料部件、打印平台等组成。控制系统用于实现各装置的自动控制和顺序空间运动，提高打印效率，由核心控制器控制，包括人机交互控制模块、挤出控制模块，运动控制模块和其他控制模块。

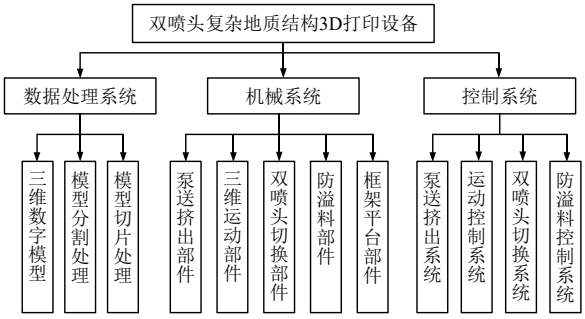


图 1　双喷头复杂地质结构 3D 打印设备组成部分

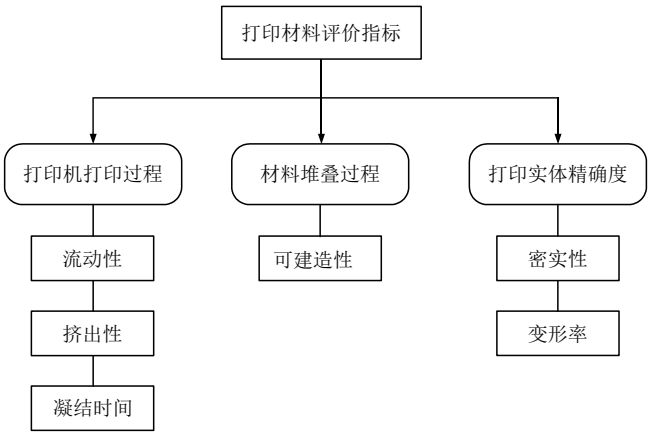
Fig.1　Components of dual-nozzle 3D printing equipment for complex geological structures

2.1　水泥基 3D 打印类岩相似材料研制

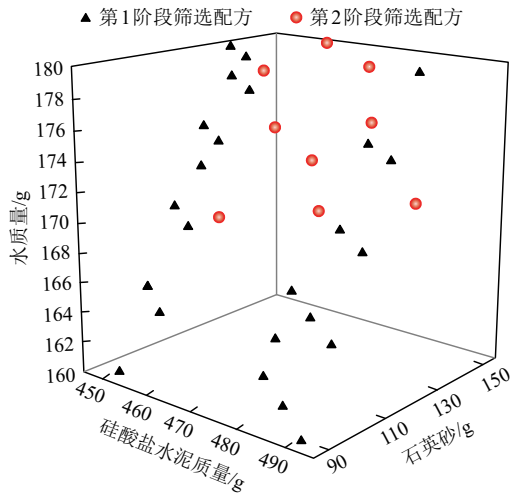
为保证水泥基 3D 打印类岩试样的相似性，笔者所在课题组对水泥基 3D 打印类岩相似材料进行了一系列探索研究。

首先，针对水泥基 3D 打印实体质量评价的问题，建立了一套考虑水泥基 3D 打印类岩石材料成型全过程的评估体系及其质量分级方法。该体系针对打印前材料的流变形态，打印过程中的堆积性能和打印后的变形性能等方面进行了全面评价，如图 2(a)所示。本文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，见图 2(b)。采用提出的评估体系及其质量分级方法，通过试验比选获得了一种打印性能较好的类岩石相似材料基础配比，为后续水泥基 3D 打印类岩相似材料精准配制奠定了基础[19]。

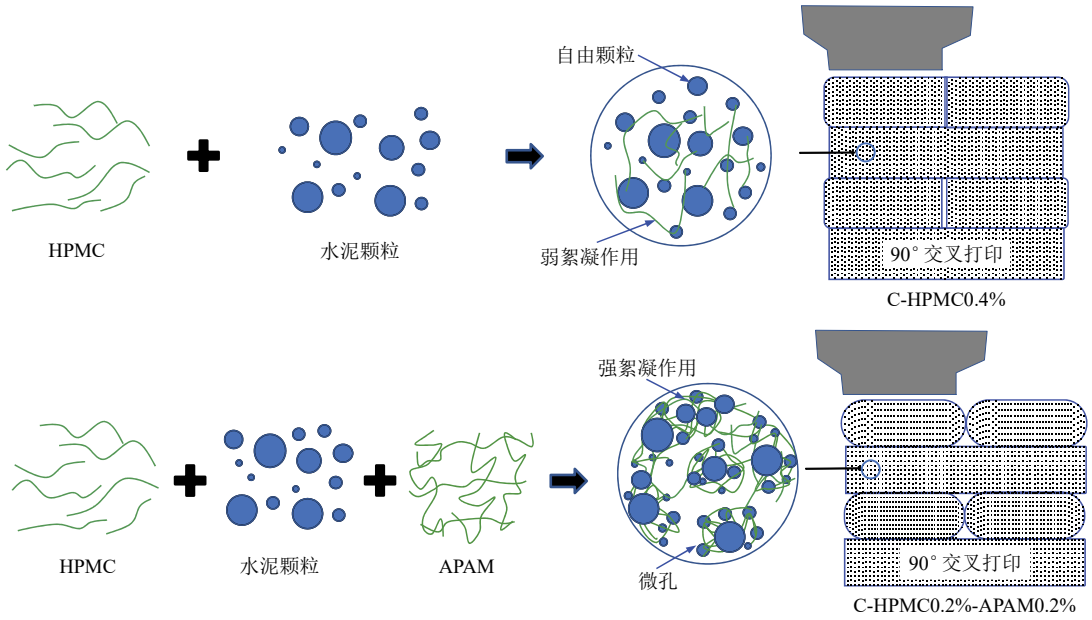
随后，从增稠剂角度入手提高水泥及 3D 打印材料的类岩特性[20]。通过将聚丙烯酰胺(APAM)替换为羟丙基甲基纤维素(HPMC)对打印材料进行改性，从新鲜性能、挤出性能和硬化性能等方面进行试验。试验结果表明：APAM 保水性明显强于 HPMC，能显著降低砂浆的流动性能。同时，APAM 能提高砂浆的挤出性能和建造性能，但也会增大变形性能。研究还发现，APAM 可以通过形成聚合物桥和聚合物膜的形式增强颗粒间的黏聚力，有利于提高试样强度；然而当 APAM 过量时，会产生大量毛细孔和微裂纹，导致试样强度降低，见图 2(c)。当 APAM 对 HPMC 的置换率达到 25%时，物理力学性能达到最佳[20]。



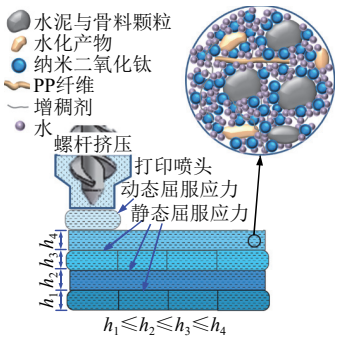
(a) 建立类岩石 3D 打印评价指标
(a) Establishment of evaluation indicators for rock-like 3D printing



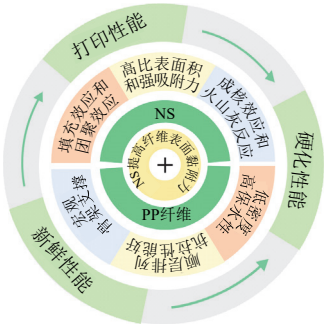
(b) 两阶段正交试验基础配比筛选
(b) Screening of basic mix ratio through two-stage orthogonal test



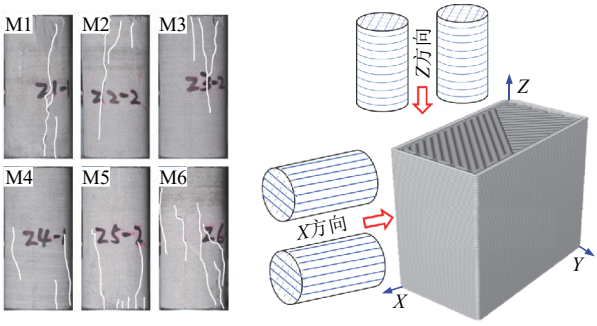
(c) 增稠剂提高 3D 打印类岩特性
(c) Thickener enhances 3D printing rock-like properties



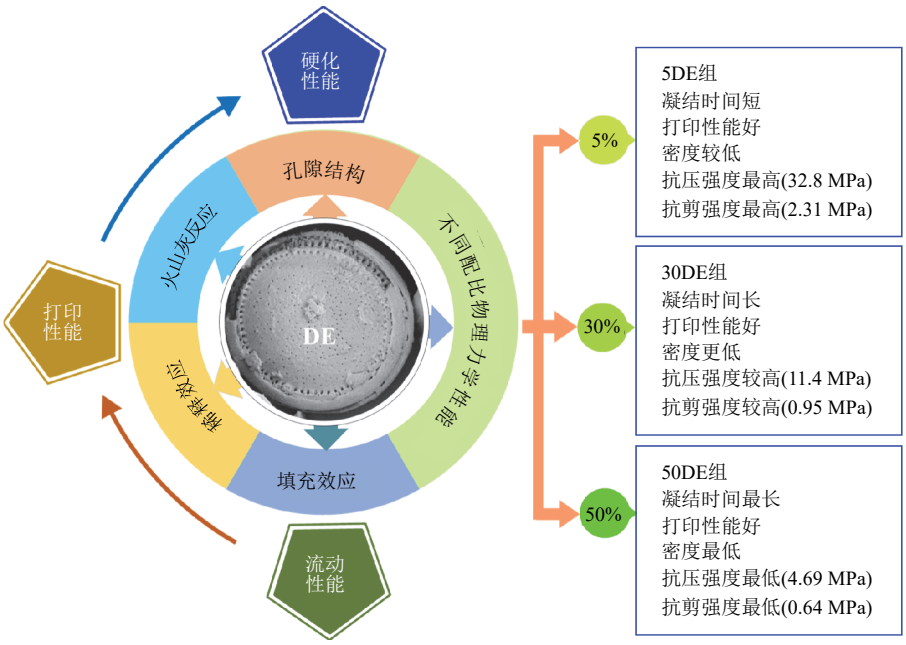
(d) 宏细观改性打印材料
(d) Macro-mesoscopic modified printing materials



(e) 微掺纳米和纤维改性效果比选
(e) Comparison of modification effects of micro-doped nanoparticles and fibers



(f) 3D 打印层状类岩材料配制[21-22]
(f) Preparation of 3D printed layered rock-like materials[21-22]



(g) 3D 打印软硬岩相似材料制配

(g) Preparation of 3D printed hard and soft rock similar materials

图 2　水泥基 3D 打印类岩体相似材料研制[19-23]

Fig.2　Development of cement-based 3D printing rock-like similar materials[19-23]

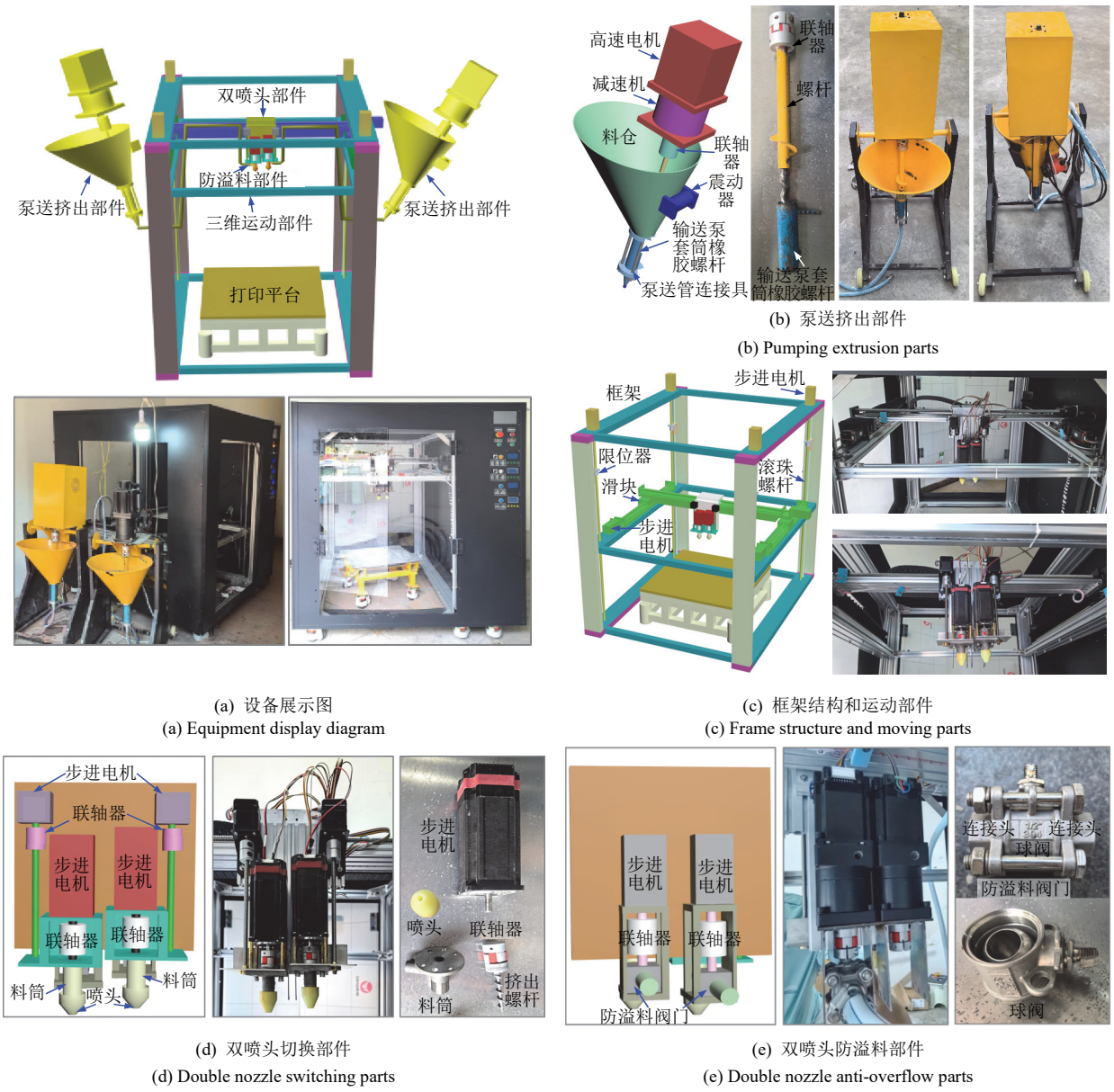
另外，从宏观(纤维材料)和微观(纳米材料)2 个方面对水泥基 3D 打印材料进行了一系列改性试验[21-22]。选用聚丙烯(PP)纤维和纳米氧化硅(NS)、纳米氧化钛(NT)等纳米材料，比较其对水泥基 3D 打印材料性能的影响，见图 2(d)。研究表明，适当的 NT 含量可以缩短砂浆的凝结时间，减小流动性和坍落度，提高静态屈服应力，降低动态屈服应力和塑性黏度，从而改善材料的打印性能；同时，NT 还能提高打印试样的密度和抗压强度。微观结构分析表明，NT 能促进水化反应，改善孔隙结构，降低孔隙率；适当的水灰比也可降低砂浆孔隙率，提高结构的密实度。双掺 NS 和 PP 纤维对砂浆的打印性能改性效果更佳，能使结构由脆性破坏变为延性破坏，有利于结构安全，但同时会降低抗压强度。微观结构表明：NS 能增加孔隙数量，改善孔隙结构，提高层间胶结性能；NS 对 PP 纤维表面具有改性作用，能提高 PP 纤维与水泥膏体的胶结性能，见图 2(e)。通过打印路径规划和选用不同掺量的纳米材料，能实现层状各向异性系数在 0.165～0.457 范围的类岩石 3D 打印试样的配制，见图 2(f)。

为实现低强度软岩打印材料的制备，在现有基础上通过改变骨料孔隙特征，采用硅藻土作为骨料，研究了硅藻土掺量对打印材料的新鲜性能、打印性能和硬化性能的影响[23]。研究发现，当硅藻土掺量为 5%时，打印砂浆的凝结时间最短，打印试样硬化后其抗压强度、弹性模量和抗拉强度均最佳；而当硅藻土掺量为 30%时，打印试样的变形率最小，打印效果最佳，但明显降低打印试样的力学强度，表现出明显的延性破坏特征(见图 2(g))。通过调节硅藻土的掺量，可实现抗压强度在 4.69～32.81 MPa 范围的类岩石 3D 打印试样配制。

目前水泥基 3D 打印类岩石相似材料还处于探索阶段。要实现物理模型容重、黏聚力、内摩擦角等多力学参数满足相似理论，主要可从 2 个方面进行研究：第一，进行相似畸变理论创新，建立物理模型和工程原型在不严格满足相似准则条件下的定量分析方法；第二，开展大量水泥基 3D 打印类岩石相似材料力学试验研究，建立数据集，结合大语言模型和机器学习算法，建立具有较好打印性能且力学参数可调的相似材料配比预测模型。

2.2　机械系统

本设备机械系统主要包括泵送挤出部件、框架支撑部件、三维运动部件、双喷头切换部件、防溢料部件、打印平台等。泵送挤出部件通过泵送料管与双喷头挤出组件相连。双喷头挤出组件包括双喷头切换部件和防溢料部件，双喷头挤出组件通过滑块与三维运动部件相连，三维运动部件通过螺丝固定在框架结构上。框架结构采用钣金一体式机箱进行半封闭化处理，如图 3(a)所示。本设备采用了模块化设计思想，具有操作简单，使用方便的特点：当打



(a) 设备展示图
(a) Equipment display diagram

(b) 泵送挤出部件
(b) Pumping extrusion parts

(c) 框架结构和运动部件
(c) Frame structure and moving parts

(d) 双喷头切换部件
(d) Double nozzle switching parts

(e) 双喷头防溢料部件
(e) Double nozzle anti-overflow parts

图 3　打印设备机械结构及示意图

Fig.3　Mechanical structure and schematic diagram of the printing equipment

印小模型时可不用泵送挤出部件，可改装使用小料仓实现人工加料；当打印简单模型时也可只使用单喷头进行打印，整个过程单人操作即可。

(1) 泵送挤出部件

为实现大尺寸物理模型的持续打印，设计了泵送挤出部件，如图 3(b)所示。通过使用大功率挤出机和高频软管供料，可实现水泥基 3D 打印材料长时间挤出打印。泵送挤出部件主要包括大功率电机、减速机、料斗、联轴器、螺杆、输送泵胶套螺杆、泵送管接头、泵送管、高频振动器等。为满足精细化打印需求，打印喷头可选用直径 4～10 mm 的规格，泵料管采用内径 13 mm 的 PVC 钢丝硬管。料斗容量按单次加料可持续打印 2 h 设计。大功率电机与减速机连接可提高打印搅拌螺杆的挤出力，螺杆下部连接输送泵胶套螺杆可实现打印材料的持续挤出。料仓采用喇叭口设计，并在料仓外部安装高频振动器，有利于打印材料入料。

(2) 框架结构和运动部件

框架结构用于整合 3D 打印装备的各个部件，需具备足够的强度和刚度，以避免或缓解步进电机加速或减速行进过程中引起的疲劳和振动，以及由于惯性引发的位移等问题。同时，为打印系统配备打印平台等部件，并提供打印辅助部件。本设备设计如图 3(c)所示。框架设计采用 4 根支柱支撑整体结构，横梁和支柱之间采用工字型加固结构以提高整体稳定性。运动部件通过滚珠丝杆和连接杆连接在框架结构上。运动部件主要包括驱动模块、传动模块、从动模块、步进电机、滑块、自动启停开关、

同步带和 Z 轴滚珠丝杆连接件等。双喷头挤出组件通过滑块固定在 X 轴运动模块上，X 轴运动模块两端与滑块连接并放置在 Y 轴运动模块上，X 轴运动模块和 Y 轴运动模块均通过步进电机实现移动。X，轴运动模块固定在水平运动平台上，整个水平运动平台通过 4 根连接杆与框架结构连接，并通过 4 根滚珠丝杆实现 Z 轴方向上的垂直运动。

(3) 双喷头切换和防溢料部件

按照复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备的设计目标，为实现多种不同材料同时成型要求，需研发双喷头打印设备。为满足高质量打印要求，该设备需要解决以下几个关键问题：① 2 个喷头同时打印一个模型时，要确保一个喷头在打印，另一个喷头固定在旁边且不能漏料；② 2 个喷头在切换过程中需动态调节喷头高度，避免不工作的喷头对既有结构产生影响；③ 各构件应设计合理，保证长时间挤出过程中不出现堵管、漏浆等问题，且各部件应易清洗、易更换。按照以上要求，设计出双喷头切换及防溢料部件。双喷头切换和防溢料部件通过托板固定在 X 轴运动平台滑块上。双喷头切换及挤出装置固定在托板前部，托板后部设计有防溢料部件。

双喷头切换部件主要包括切换装置和挤出装置两部分，如图 3(d)所示。切换装置由步进电机、联轴器、旋转螺杆构成，2 个切换步进电机通过旋转螺杆带动升降平台在垂直方向移动，实现双喷头来回切换，避免打印过程中产生相互干扰。挤出装置由挤出电机、联轴器、挤出螺杆、料筒和喷头等构成。2 套挤出装置分别独立安装在升降平台上，升降平台通过切换装置来实现 2 种不同材料打印的切换。

防溢料部件主要包括步进电机、联轴器、球阀、连接组件，如图 3(e)所示。连接组件一端连接进料 PVC 管，一端连接挤出料管。步进电机通过带动球阀开闭实现防溢料功能。整个工作程序为：打印前双喷头抬升，防溢料阀门关闭；开始打印，1 号喷头降低到打印高度，1 号防溢料阀门打开，喷头组件在运动系统驱动下工作；当需切换 2 号喷头打印时，1 号喷头抬升，2 号喷头下降到打印高度，同时 1 号防溢料阀门关闭，2 号防溢料阀门打开；打印结束时，1 号和 2 号喷头均抬升，1 号和 2 号防溢料阀门均关闭，整个挤出组件复位到初始位置。

2.3 控制系统

控制系统采用对机械装置进行集成控制的数控系统，其具有如下几个主要功能：数控系统要有一个性能较强的微处理器，需要具备人机交互界面；数控系统要能接收外部数据，具有对应数据接口，例如 SD 卡通信，串口通信；数控系统要能识别 G 代码，能将 G 代码编译为运动控制能识别的控制流；数控系统要能控制打印平台实现 X，Y，Z 轴联动，能控制泵送挤出联动，能实现双喷头切换和防溢料等多电机双模块联动控制；数控系统还要具备对限位信号、原点信号、报警信号、急停信号和停止信号等机械信号的处理功能[14]。

考虑上述模块与功能需求，设计采用的控制系统可以分成以下几个主要部分：集成主控板、交换式开关电源、步进电机驱动器、固态继电器及空气开关等。其中集成主控板是控制系统的核心，它集成了微处理器、液晶触摸操作屏和外部数据输入接口。本设备采用 Makerbase MKS Gen_L V2.1 3D 集成主控板，如图 4 所示，该集成主控板将 2560 和 Ramps1.4 集成到一块 PCB 上，布线简单，散热效果好，采用专用电源芯片，支持 12～24 V 电源输入，支持 MKS TFT 系列等触摸屏，支持多种大功率驱动电机；人性化的设计用不同颜色的端子来区分驱动方向，区分对应的电机和限位开关，方便接线，能有效防止因驱动插反而损坏主板。

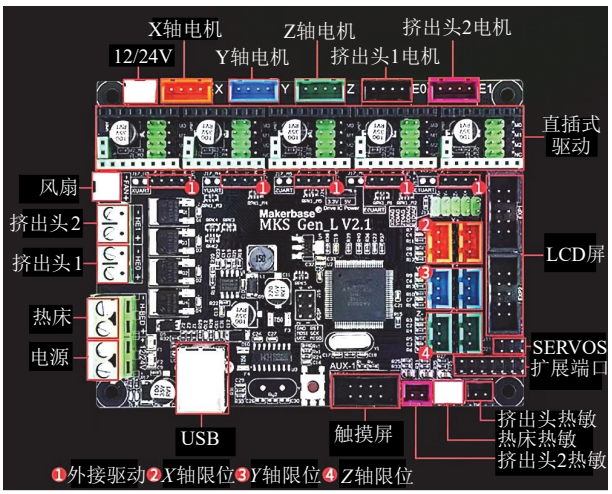


图 4　打印设备集成主控板

Fig.4　Integrated main control board of the printing equipment

另外，该设备主板使用了一款基于 Arduino 平台开发的 Marlin 开源固件。该固件是针对 3D 打印设备开发的，具有以下特点：高效的文件传输——Marlin 固件支持二进制文件传输协议(BFT)，允许用户通过串口以二进制形式高效传输文件到打印机的内部存储设备(如 SD 卡)，相比传统的 ASCII 传输方式具有更高的传输效率和更强的错误检测机制；多

平台支持——Marlin 支持多种硬件平台，包括 8 位 AVR 板和 32 位 ARM 板，并且不断更新以支持更快的硬件平台；丰富的 G 代码命令——Marlin 能够处理直线、圆弧等运动，支持多个挤出机和加热床，适用于各种复杂的打印任务。

本设备控制系统具有高精度，还归因于以下几个方面：(1) 可暂停记录坐标。打印中途点击暂停之后，可点击 *X*，*Y*，*Z* 移动，使喷头实现 *X*，*Y*，*Z* 方向的移动。喷头移动后的坐标被实时记录，当再次点击继续打印后，喷头会回到暂停打印时的喷头坐标，继续打印。(2) 设置了脉冲数，这个参数是打印机打印尺寸是否正确的最重要参数，参数含义为各轴运行 1 mm 所需要的脉冲数，分别对应 *X*，*Y*，*Z*，*E* 四轴，*E* 轴是挤出机，水泥挤出机的挤出率是通过操作界面的 PLC 控制器来控制大小(#define DEFAULT_ AXIS_STEPS_PER_UNIT{800，800，400，200}//*X*，*Y*，*Z*，*E*)。(3) 设置了加速度阈值，合适的加速度设置可以减少高速移动时的振动，从而提高打印精度 (#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION{9 000，9 000，100，10 000}//*X*，*Y*，*Z*，*E*)。(4) 设置了最大速度阈值，*X*，*Y*，*Z*，*E* 四轴可达到的最大速度，过高的速度可能会造成电机丢步从而导致模型打印错位(#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE{5 000，5 000，5，25} // (mm/sec))。

2.4　模型数字化处理及打印流程

双喷头 3D 打印模型数据处理过程主要分为 4 步：建模、分割、切片、导入。目前还没有集 4 种功能于一体的打印软件，因此本设备打印模型数据预处理过程可分为以下流程进行：首先，根据原型通过三维建模软件设计出 CAD 数字模型。目前市场上三维建模软件较多，使用较多的三维建模软件有 UG，SolidWorks 等，可以很方便地绘制出模型的三维形状。另外，通过激光扫描、CT 扫描等手段也可直接生成三维模型。然后，使用分割软件将数字模型分成 2 个打印喷头所需打印的部分，生成同一坐标下的 2 个 STL 格式文件。Magics 软件是一款专为 3D 打印设计的数据处理和优化工具，可使用 Magics 软件进行分割处理，按照相同坐标分别保存文件，最终处理成适合双喷头打印的 STL 模型。其次，将这 2 个 STL 格式文件导入切片软件中进行切片处理，设置打印参数，并输出对应的打印 G 代码文件。目前市场上常用的切片软件主要有 Simplify3D，XBuilder，Cura，Slic3r 等[24]。本文选用了开源的 Simplify3D 软件，该软件使用简单便捷，参数设置详细，切片速度快、稳定，方便修改模型尺寸，对打印模型结构的包容性强，具有很强的适用性。最后，控制软件将打印 G 代码传输给主板(可直接通过数据线连接或 SD 卡形式连接)，主板通过控制系统实现水泥基类岩模型的 3D 打印。

整个双喷头打印过程涉及 2 种材料切换过程，2 个喷头的打印路径在切片环节已定义。设备打印指令运行流程如图 5 所示。打印文件通过控制系统形成信号文件，开始打印时整个喷头系统在运动框架上按坐标进行定位，同时 1#工作喷头进行打印定位，

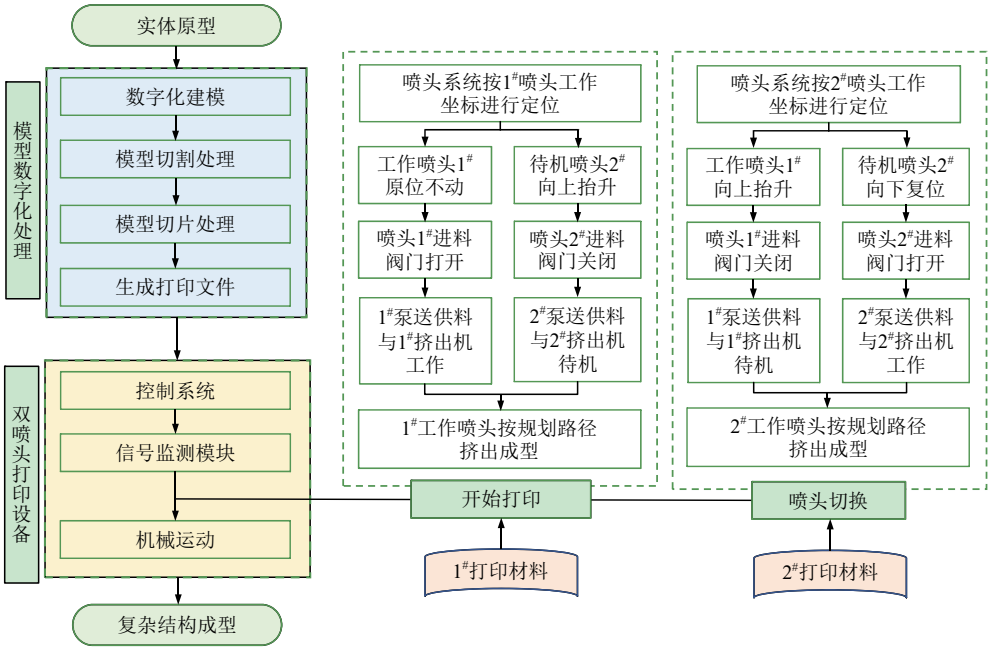


图 5　双喷头 3D 打印装置运行流程图

Fig.5　Operation flow chart of dual-nozzle 3D printing device

2#喷头向上抬升待机避免蹭料，对应的 1#防溢料阀门打开，2#防溢料阀门关闭，随后 1#打印材料就位，1#泵送进行供料，对应的 1#挤出机工作，1#按打印路径挤出成型。当信号发出喷头切换指令时，2#工作喷头打印定位，1#喷头向上抬升待机避免蹭料，对应的 2#防溢料阀门打开，1#防溢料阀门关闭，随后 2#打印材料就位，2#泵送进行供料，对应的 2#挤出机工作，2#按打印路径挤出成型。2 个喷头系统按打印路径交替切换打印成型，中途还可以暂停和继续打印，最终打印出复杂的实体模型。

3　设备技术创新与功能测试

3.1　设备技术创新

通过以上材料、结构和技术的创新，本设备在复杂岩体与工程结构模型制作方面具有以下 3 个方面的性能优势：

(1) 可实现不同强度类岩体试样的高精度打印。本设备运动系统采用滚珠丝杆、滑块和高速闭环步进电机等精密构件，可确保 X，Y，Z 轴移动无回程间隙，重复定位精度可达 0.03 mm。该高速闭环步进电机最高转速可达 3 000 r/min 以上，且高速力矩衰减远低于普通开环驱动器，能大幅提升步进电机的高速性能和力矩使用率，有效降低电机发热和振动，提升打印设备的工作效率和精度。另外，采用小喷头打印，合理规划打印路径，可实现打印模型密实度高，成型质量好、打印速度快、批量制作离散性小等优点。本设备打印喷头直径选择范围为 4～10 mm。喷头直径越大，相同体积打印速度越快，但成型精细化程度越低，因此，针对不同尺寸和复杂程度的模型选择合适尺寸的打印喷头。

(2) 可实现“复杂工程内部结构+多种强度岩层”物理模型的快速制造。本设备采用双喷头打印结构构造，泵送部件与挤出部件的控制系统可独立操作，同一模型中可实现 3 种以上地层的打印，三维成型速度最大达到 2 000～5 000 cm^3/h，且泵送部件和挤出部件易拆除、易清洗，能通过短暂的暂停更换打印材料，可实现 2 种以上打印材料一体化打印成型。可以通过 2 个喷头挤出不同打印材料，如一个打印喷头挤出的材料易溶于水、一个打印喷头挤出的为类岩体材料，从而实现内置裂隙模型和内置复杂结构模型的一体化成型。

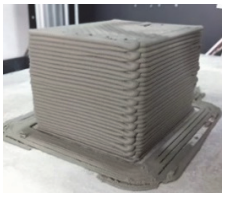
(3) 可实现大型复杂三维洞室/隧道结构的长时间持续打印成型。该设备可以满足物理模型尺寸为 600 mm(长)×600 mm(宽)×600 mm(高)的打印要求。采用小喷头打印大模型，需要长时间持续不间断打印，这对打印设备和打印材料提出了高质量要求。因为水泥基打印材料长时间不挤出，易凝固在设备内，导致打印不流畅，甚至产生爆管，报废相关打印部件。本设备所有结构采用流线型设计，防溢料结构和泵送部件也都进行了特殊处理，针对大模型可连续打印 12 h 以上而不堵塞。

3.2　成型质量测试

本设备成型质量测试使用文献中提出的成型质量评价方法[24]，对打印过程挤出性能和建造性能进行评价，对成型后的实体变形率进行评定。通过打印质量评定表明打印挤出流畅，条带断面直径均匀，按挤出性标准分级判为好；按建造性能评定发现打印 120 层还未坍塌，建造性能也很好；计算打印实体的变形率发现其小于 0.5%，说明其挤出抗变形性能较好。详细打印成型质量评定结果见表 1[19]，说明本打印设备成型质量好。

表 1　打印设备成型质量测试[19]

Table 1　Forming quality test of the printing equipment [19]

评价类型 (assessment type)	评级结果 (grading result)	图例(image)
挤出性能	好	
建造性能	120 层	
变形性能	＜0.5%	

使用 CT 扫描可再现 3D 打印试样内部的微观结构和密实性。以上研制的打印材料配比均具有较好的打印性能，选择一种基础配比在本设备上进行打印成型质量测试。打印采用 4 mm 喷头，打印路径上下两层采用 90°交叉打印。打印成型养护硬化

后，进行线切割取芯制作直径 25 mm、高为 50 mm 的 CT 扫描试样。使用工业 CT 设备对 3D 打印试样进行扫描，获取试样内部的三维图像数据。对扫描得到的图像进行处理，突出显示内部缺陷，如气孔、裂纹等；根据缺陷的数量、大小和分布，评估试样内部的密实性。测试结果如图 6 所示，孔隙率仅为 3%左右，可见打印试样内部十分密实。

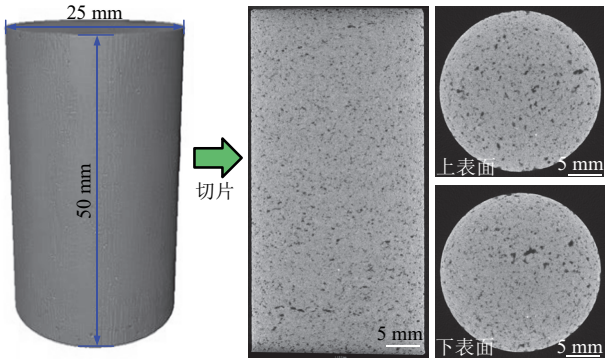


图 6　打印试样 CT 扫描测试

Fig.6　CT scan test of printed specimens

打印设备的成型精度直接影响打印质量。通过测试打印材料的变形率可以较好地评价打印材料和打印设备的性能。打印成型质量采用三维激光扫描对打印模型进行精确测量，三维激光扫描评价打印试样质量的方法主要包括以下步骤：首先，使用高精度三维激光扫描仪对打印试样进行扫描，获取其表面点云数据；然后，对点云数据进行去噪、滤波和配准，确保数据的准确性和完整性；最后，将处理后的点云数据重构成三维模型，将扫描得到的三维模型与设计模型进行比对，来评价打印成型的质量。通过打印单条混凝土模型来验证 3D 打印设备的精度。设置打印层高 2 mm，宽 2 mm，长 80 mm，累计打印 120 层。打印结束后，利用三维激光扫描仪生成点云数据(见图 7)，并计算打印试验尺寸及单层打印高度。试验结果表明，在打印过程中，打印层之间能够稳定累积。单条打印模型打印长度为 80.09 mm，打印误差为 0.09 mm，小于 0.3 mm。单层打印高度为 1.997～2.002 mm，累积打印高度误差为 0.19 mm，小于 0.3 mm。模型打印宽度为 2.2 mm，打印误差为 0.2 mm。综上，3D 打印模型误差均小于±3 mm，打印精度很高。

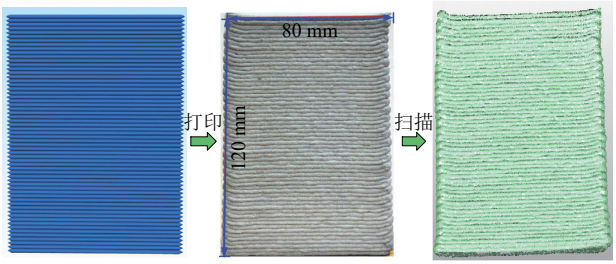
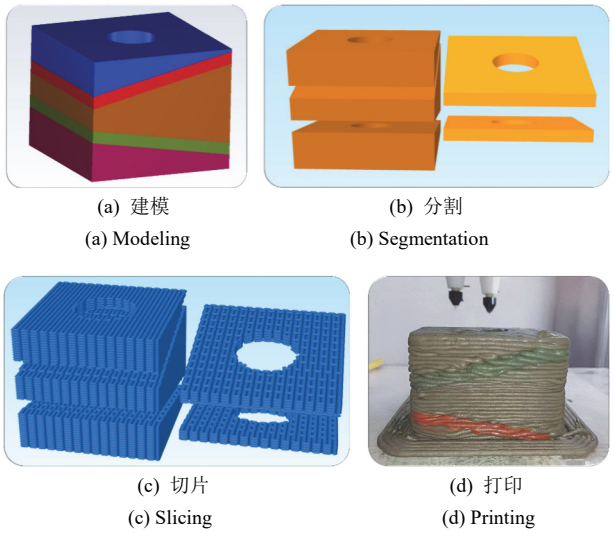


图 7　激光扫描打印质量评价

Fig.7　Laser scanning printing quality evaluation

3.3　多材料一体化成型测试

为测试设备可打印 3 种以上材料，建立一个中间含隧洞的物理模型，使用 Magics 软件将其分割成 5 个部分，见图 8(a)。中间 2 个模块为一体采用一种喷头打印，其他 3 个模块为一体采用另外一个喷头打印，见图 8(b)。然后采用 Simplify3D 切片软件进行打印路径设置，所有模块均设置同一切片参数，采用 6 mm 喷头进行打印，单层层高为 2 mm，模型采用 90° 交叉打印，见图 8(c)。最后将切片文件导入到双喷头岩土物理模型 3D 打印设备中，为区分 3 种不同的地层，分别在 2 个中间夹层的打印材料中添加红色和绿色水泥调色剂。打印开始前先根据打印顺序将 2 个料仓分别添加普通打印砂浆和红色打印砂浆。当模型下面红色夹层打印完成后，暂停打印，将该料仓、泵送管、喷头等进行更换，换成绿色打印砂浆继续打印，直至打印完成。最后成型效果均质性好、打印精度高，见图 8(d)。按这种方法可以实现多种不同地层结构一体化成型，满足复杂地质结构物理模型的打印需求。



(a) 建模　(b) 分割

(a) Modeling　(b) Segmentation

(c) 切片　(d) 打印

(c) Slicing　(d) Printing

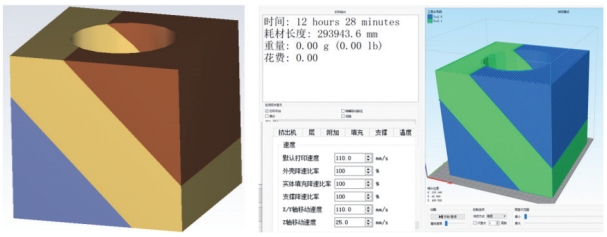
图 8　多材料结构模型一体化成型测试

Fig.8　Multi-material structural model integrated forming test

3.4　大型复杂地质结构成型测试

尺寸效应是影响岩土工程物理模拟精度的重要因素。目前很多打印设备难以满足大型物理模型的打印需求。对于水泥基大型物理模型打印，为保证打印精度，使用的打印喷头直径要足够小。本设备

打印喷头直径可选用 4～10 mm。为测试本设备可打印 500 mm^3 以上的立方体物理模型，建立外轮廓尺寸为 500 mm×500 mm×500 mm 的夹层隧道打印模型，中间隧道直径为 300 mm，总体积为 90 323 cm^3(见图 9(a))。对打印模型进行切片，使用 6 mm 直径的喷头，层厚设置 2.6 mm，100%填充(实心)，打印速度 110 mm/s，预计 12.5 h 可完成试样模型 3D 打印，见图 9(b)。开始打印，采用的打印材料为团队研制的类岩石打印配比，详细打印配比如表 2 所示，动态调节打印参数，从图 9(c)可以看出打印效果较流畅，打印变形小，成型质量高。在打印过程中，通过调节挤出机的速度，可以使打印速度提高 1 倍，本模型实际打印速度为 7 225 cm^3/h，实际上只用了 9 h 即完成打印，打印过程未出现堵塞和材料硬化现象，这主要是在泵送料仓外壁上加设了振动器，另外所有材料泵送挤出结构采用了流线型设计，使得材料能及时挤出，不易在内部沉积固化，最终成型如图 9(d)所示。



(a) 建模　(b) 切片
(a) Modeling　(b) Slicing

(c) 打印　(d) 成型
(c) Printing　(d) Forming

图 9　大型复杂地质结构成型测试

Fig.9　Forming test of large complex geological structure

表 2　本测试使用打印材料质量配比

Table 2　The quality ratios of printing materials

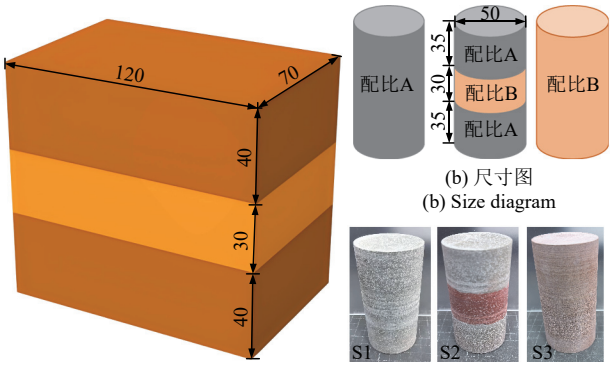
编号 (No.)	材料 (material)	质量配比(mass ratio)						
		黏合剂 (adhesive)	细砂 (fine sand)	增稠剂 (thickener)	水 (water)	PP 纤维 (PP fiber)	纳米 SiO_2 (nano-SiO_2)	调色剂 (toner)
A	普通砂浆打印材料	1 000	220	4	360	1	10	-
B	红色夹层打印材料	1 000	220	4	360	1	-	50

4　实例分析

水泥基 3D 打印试样因其力学响应与天然岩石具有相似性，已被逐渐应用到岩石力学与工程物理模拟研究中[25]。本设备可用于制备复杂岩体及地质物理模型，可结合声发射、DIC、热成像等先进监测设备，捕捉岩体和结构模型破坏行为的前兆、发展和失效的动态全过程，对研究复杂岩体及地下工程灾变及防护问题具有重要作用[26]。为此，本节列举了 2 个实例：一个是岩体试样尺度，通过本设备打印制作含夹层岩体试样，分析其超载破坏力学行为；另一个是物理模型试验尺度，通过本设备打印制作含断层结构的隧道物理模型，分析复杂地质结构下隧洞变形破坏机制。通过应用实例分析，结合已有研究成果，验证本设备在复杂岩体力学行为及工程破坏机制研究中的适用性和有效性。

4.1　复杂岩体力学行为模拟应用

利用 2 组不同强度的打印材料，通过双喷头 3D 打印设备制作复合长方体组合模型。打印模型总尺寸为 70 mm×120 mm×110 mm，含夹层模型底层厚度为 40 mm，中间层厚度为 30 mm，上层厚度为 40 mm，见图 10(a)。通过采用 2 种不同的打印材料进行打印制作，并设置这 2 种单一材料的打印试样作为对比。通过钻孔取芯然后打磨制作标准单轴压缩试样，取芯后模型如图 10(b)所示。打印材料采用表 2 所示配方，制作的试样如图 10(c)所示：S1 组试样为配比 A 制作而成；S2 中间夹层采用配比 B，上下部分采用配比 A 制作而成；S3 组试样为配比 B 制作而成。最后对试样进行单轴压缩试验，结合 DIC 测试，对比分析其应力－应变特性、裂缝演化和破坏模式。

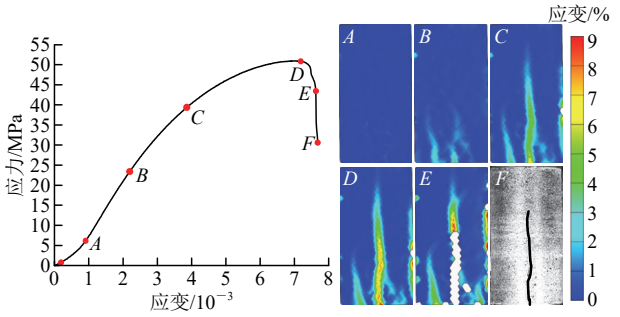


(a) 打印模型　(b) 尺寸图　(c) 成型图
(a) Printing model　(b) Size diagram　(c) Forming diagram

图 10　打印制作含夹层类岩体试样(单位：mm)

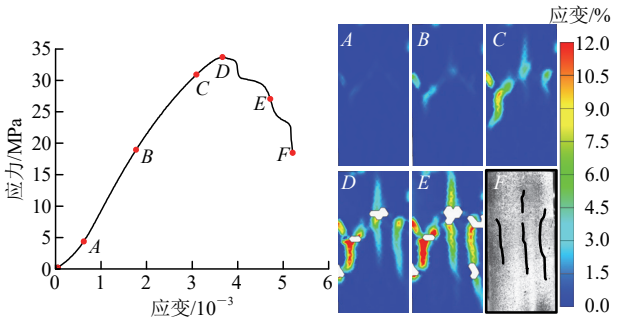
Fig.10　Fabrication of rock-like specimens containing interlayers(unit：mm)

3 组试样试验结果如图 11 所示。3 组试样均可分为压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、残余破坏阶段，具有明显的类岩石破坏特征。图 11(a)为 S1 组试样在单轴压缩作用下的应力－应变曲线和 DIC 监测的裂纹演化过程。可以发现，该试样破坏峰值强度为 52 MPa，当试样达到峰值后出现陡降，试样破裂加剧，表现为脆性破坏。试样裂纹起裂于底部，逐渐发展出多条裂纹并向上扩展，试样破坏主要因中部主裂缝贯通所致，试样表面出现剥落现象，对应破坏模式以压裂－张拉裂缝为主。图 11(c)为 S3 组试样单轴压缩试验结果和 DIC 监测的裂纹演化过程。从应力－应变曲线可以发现，B 材料打印试样破坏峰值强度为 39 MPa，其强度较 A 材料明显降低。试样破裂后存在一定的残余破坏阶段，表现为一定的延性破坏特征。裂纹扩展从试样底部开始发展，裂纹发展速度明显大于 S1 组。试样破坏主要由于底部多条裂缝同时发展，尤其是两侧裂缝发展迅速。试样破坏也表现出局部剥落现象，但较 S1 组试样剥落范围明显减小，对应破坏模式存在张拉破坏和斜向剪切破坏。图 11(b)为 S2 组试样在单轴压缩作用下的应力－应变曲线和 DIC 监测的裂纹演化过程，可以发现该试样破坏峰值强度为 33 MPa，其抗压强度最小，峰值点的围岩应变也最小，残余阶段表现为明显的延性破坏特征。加载过程中试样裂纹起裂于中部夹层，中部夹层多层裂纹同时扩展，达到峰值阶段裂缝贯通中部夹层，两侧出现拉裂鼓胀效应。试验表明剥落现象明显，局部存在拉裂缝，整个试样破坏由中间软弱夹层控制。由此可见，含夹层试样的破坏模式受夹层强度显著影响，试样中裂纹优先在夹层内部扩展，表现为夹层局部压剪破坏模式。



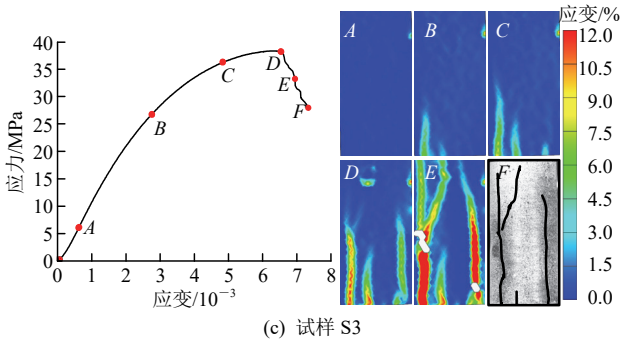
(a) 试样 S1

(a) Specimen S1



(b) 试样 S2

(b) Specimen S2



(c) 试样 S3

(c) Specimen S3

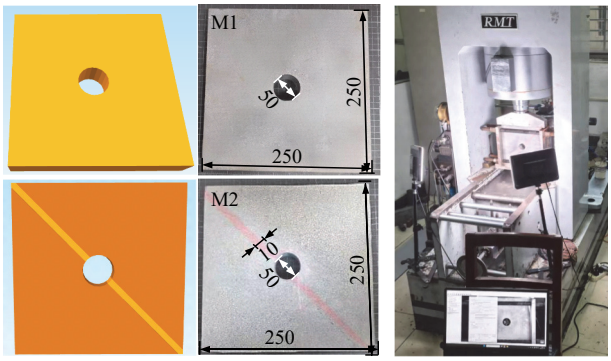
图 11　不同试样应力－应变曲线及裂纹演化过程

Fig.11　Stress-strain curves and crack evolution process of different specimens

通过对 3 组试样进行对比分析，可以直观反映软弱夹层岩体不同于均质岩体破坏过程，揭示了其从中部起裂扩展的渐进式破坏演化机制。来姝君等[27]开展了砂泥互层岩体的压缩试验，分析了砂泥互层复合岩体的力学特征与裂缝发育演化规律.研究表明，岩石压缩破坏过程的裂缝扩展方式主要为压剪裂缝；互层状复合岩体的强度低于单一岩性岩石，砂泥互层岩体的强度甚至可能低于纯泥岩；砂泥互层复合材料的破坏主要先出现在强度较低的泥岩中，强度较高的砂岩往往保持较好的完整性。以上结论与本试验结果较为一致，说明本设备打印制作的岩体试样能较好揭示复杂岩体力学行为。

4.2　含夹层隧道物理模拟应用

采用上述 2 种不同强度材料通过双喷头 3D 打印设备制作含夹层复杂隧洞模型，打印模型外轮廓总尺寸为 270 mm×270 mm×45 mm，中间隧道直径为 50 mm，中部设置倾角 45° 的夹层，夹层厚度为 10 mm，夹层采用表 2 中的材料 B，夹层厚度为 10 mm，其他部位采用材料 A 打印，打印成型养护硬化后，通过打磨和切割制作外部尺寸为 250 mm×250 mm×40 mm 的物理模型，并设置一组不含夹层的作为对照组，该模型全部由材料 A 打印制作而成，如图 12(a)所示。对 2 个物理模型试验进行超载破坏试验，物理模型采用夹具进行前、后、左、右固定，在垂直方向进行伺服加载[28]，通过 DIC 捕捉隧道超载作用下的应变演化过程，如图 12(b)所示。

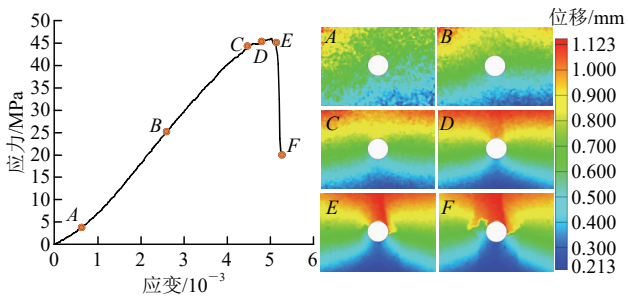


(a) 物理模型(单位：mm)　(b) 超载试验
(a) Physical model(unit：mm)　(b) Overload test

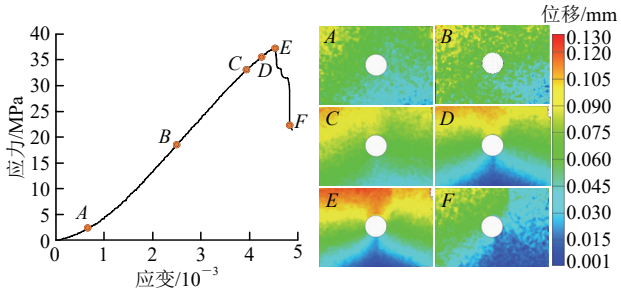
图 12　打印含夹层隧道模型及超载试验

Fig.12　Fabrication of tunnel models with interlayers and overload tests

隧道物理模型试验测试结果如图 13 所示。含夹层和不含夹层隧道物理模型超载破坏应力－应变曲线均可分为压密阶段(*OA*)、弹性阶段(*AB*)、塑性阶段(*BCD*)、残余破坏阶段(*DEF*)。图 13(a)为 M1 组不含夹层试样在超载作用下的应力－应变曲线和 DIC 监测的应变演化过程，可以发现该物理模型破坏峰值强度为 46 MPa，当模型达到峰值后出现陡降，隧道模型两侧剥落明显，表现为片帮脆性破坏特征。通过 DIC 应变演化特征可以发现，隧道应变呈对称演化，隧道进入塑性阶段，围岩破坏沿两侧边墙逐渐向边界发展，整体左右边墙位移呈对称变化。在破坏阶段，位移突变和垂直裂纹扩展贯通是整个隧道破坏的主因。图 13(b)为 M2 组含倾斜夹层试样在超载作用下的应力－应变曲线和 DIC 监测的应变演化过程。可以发现，该物理模型破坏峰值强度为 37 MPa，相对于 M1 组隧道模型强度降低了 19%；M2 组模型破坏时的应变值也明显小于不含夹层隧道的。M2 组具有明显的残余阶段特征；通过 DIC 应变演化特征可以发现，M2 组隧道模型变形破坏受夹层弱化影响。在弹性阶段，应变呈非对称变化，向右上侧斜向发展；在塑性阶段，应力继续增加，受隧道轮廓影响，左右边墙应变增加明显；进入残余破坏阶段，受夹层影响，夹层附近应变急剧增加，达到峰值强度时，沿夹层斜向应变值快速发展，最终隧道沿夹层斜向剪切破坏，导致整体失效。可见，夹层弱化效应是导致隧道破坏的主要因素。



(a) 隧洞模型 M1
(a) Tunnel model M1



(b) 隧洞模型 M2
(b) Tunnel model M2

图 13　不同隧道物理模型应力－应变曲线及 DIC 应变演化图

Fig.13　Stress-strain curves and DIC strain evolution diagram of different tunnel models

对比分析不含夹层和含夹层隧道超载破坏过程，可以明显发现夹层对隧道变形破坏的主导作用。刘学增等[29]通过室内物理模型试验模拟了 45°倾角断层对隧道结构受力变形破坏的影响，结果表明，围岩压力在剪切带附近发生显著变化，上盘和剪切带范围内拱顶压力显著增大，下盘底部压力显著增大，隧道与下部围岩可能局部脱空以适应断层的剪切位移，隧道处于偏心受压状态。黄　锋等[30]利用室内相似模型试验，研究了软弱夹层对隧道围岩稳定性影响，发现隧道开挖后围岩松动变形破坏由下盘的局部破坏带动上盘发展，直至最终在隧道拱顶上方形成稳定的塌落拱，上盘围岩内的应力调整明显大于下盘围岩。以上学者研究得出的结论与本试验结果较为一致，均揭示了含夹层不良地质对隧道变形破坏的弱化效应。另外，本设备还可以通过调节层间夹层打印材料的强度来进一步研究夹层与岩体的强度比对隧道破坏的内在机制，相比其他制作方法具有更广阔的应用前景。这也从侧面说明，采用本设备打印制作的复杂隧洞模型能较好地模拟地下工程围岩变形破坏行为，证明本设备可较好地助力复杂地下工程物理模拟试验研究。

5　讨论与展望

本设备采用双喷头挤出成型方式，通过改进打印设备尺寸、调整打印材料和规划打印路径等方式，可实现在岩体试样尺度、工程模拟尺度、工程应用尺度等多种不同场景的应用，如图 14 所示。

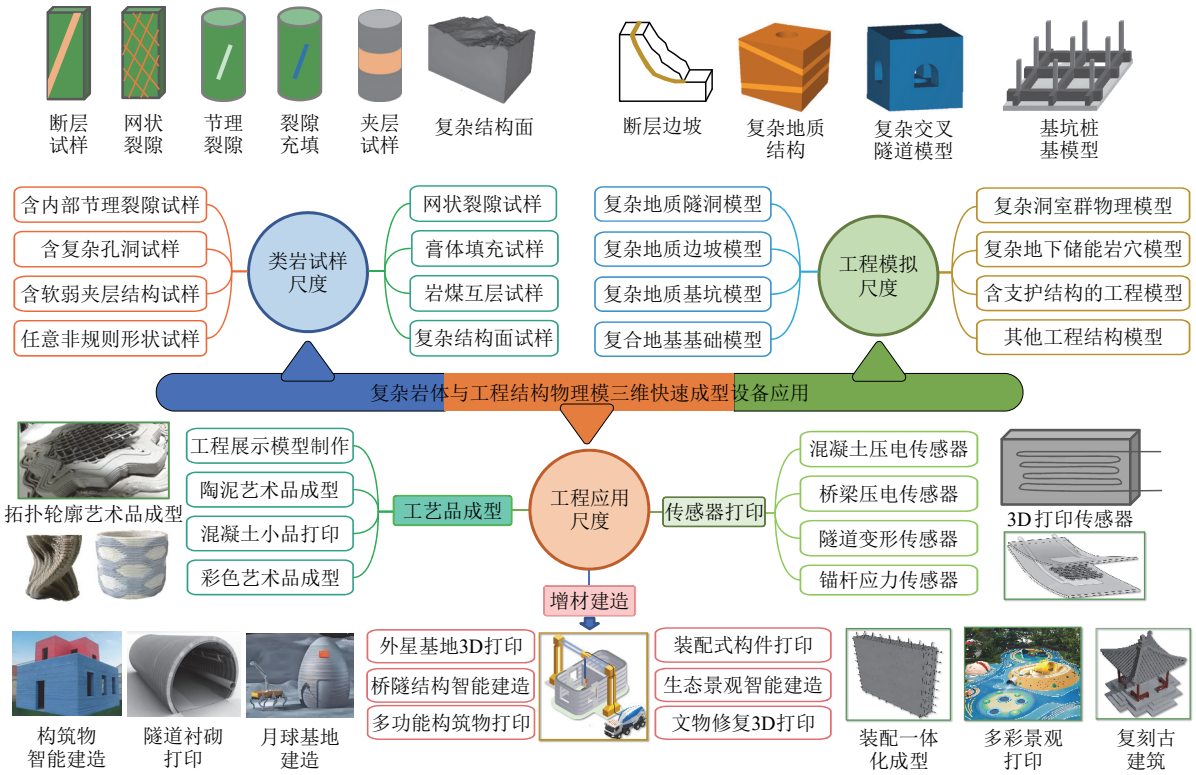


图 14　复杂岩体与工程结构三维快速成型设备应用展望[32]

Fig.14　Application prospect of 3D rapid prototyping equipment for complex rock masses and engineering structures[32]

(1) 在岩体试样尺度：可用于批量制备含天然裂缝网络的三维岩心试样、断层试样、节理裂隙试样、含复杂孔洞试样、含软弱夹层试样等，还可用于制作不规则形状试样、膏体填充试样、岩煤互层试样和复杂结构面试样等，可为研究复杂岩体结构力学行为提供试验技术支撑。

(2) 在工程模拟尺度：可用于制作隧洞、边坡、基坑、地基等工程结构及复杂地质模型，可用于岩石力学与工程领域相似物理模拟试验研究，如打印隧道物理模型可动态模拟高地应力环境下洞室围岩的渐进性破坏过程[31]，快速重构滑坡体内部结构，结合传感器实时监测系统，能够量化分析降雨渗透诱发裂隙扩展的动力学机制。

(3) 在工程应用尺度：可对该设备进行精细化改造用于大型建筑及地下结构增材建造、传感器制作和沙盘艺术品打印等。在大型建筑及地下结构增材建造方面：可基于本设备原理研发工业级大尺度双喷头挤出打印设备，用于工程结构及地下支护结构的增材建造，如打印制作盾构隧道的预制管片，生态建筑景观等；还可同步打印主体结构与预埋件或装饰层，实现复杂曲面墙体、镂空结构等构筑物一体化成型；可用于桥梁结构和隧道支护衬砌结构的一体化打印；可用于地外资源原位利用，如利用月球或火星土壤打印基地结构等[32]，还可通过对设备进行精细化改进用于文物修复等领域。双喷头其中一个喷头打印导电材料，一个喷头打印绝缘材料，则可用于混凝土传感器和压电陶瓷等方面的打印，这些 3D 打印传感器可应用在岩土力学与工程领域：如隧道围岩变形监测、桥梁变形监测和锚杆应力监测等方面，也可以将结构和传感器同时打印形成智能结构体。另外双喷头水泥基 3D 打印设备还可用于艺术品和展示模型的打印：可打印复杂工程展示沙盘模型，多彩艺术品，当使用陶泥等打印材料时还可制造出复杂且精美的陶瓷艺术品等。

6　结　论

为实现复杂岩体与工程结构大型相似物理模型快速成型，从高泵压振动挤出装置、双喷头智能化切换和防溢料防堵塞系统构建等多方面进行了技术创新，研制出一套复杂岩体与工程结构物理模型三维快速成型设备。通过相关性能测试和应用实例分析表明：

(1) 该设备打印的岩土地质模型具有成型精度高、离散性小、密实性好、复杂结构易成型等特点。

该设备通过高泵压振动挤出装置实现材料的逐层精密堆积，结合小喷头打印工艺，成型模型内部孔隙率仅为 3% 左右，几何精度达到亚毫米级，整体成型误差小于 ±3 mm；该设备采用双喷头可支持多种材料打印，研制了不同类型的相似打印材料，可精确控制材料的物理力学性能，可实现不规则空腔、多节理等复杂地质构造的相似物理模型制作。

(2) 该设备兼具制作效率高、成本低廉、打印速度快等优势。本设备打印材料为廉价的水泥基胶凝材料，制作成本低，打印喷头直径可选用 4～10 mm，打印速度高达 7 225 cm^3/h；该设备通过双喷头智能化切换技术，且泵送部件和挤出部件易拆除、易清洗，显著缩短复杂模型的建造周期；所有结构采用流线型设计，连续打印 12 h 以上不堵塞，且全程自动化操作能减少人为误差，能实现批量化制作。

(3) 该设备可用于复杂岩体力学行为及岩土工程破坏机制研究。通过该设备打印制作含软弱夹层岩体试样，通过试验再现了含软弱夹层岩体试样从中部起裂扩展的渐进式破坏演化机制；通过该设备打印制作含夹层复杂隧洞模型，通过超载破坏试验揭示了含夹层不良地质对隧道变形破坏的弱化效应。

复杂岩体与工程结构物理模型三维快速成型设备在复杂岩体模型制备、多尺度力学行为解析及工程灾害机制模拟研究中表现出显著优势，其高精度、可重复性特点为岩石力学物理模拟提供了高效试验手段。该技术在岩土领域将从基础岩土力学研究延伸至重大工程实践应用。随着智能化、绿色化技术的深度融合，复杂岩体工程结构 3D 打印设备有望发展成为连接地质勘探、工程设计、智能建造与灾害防控的核心工具之一，推动岩土工程学科向数字化、智能化、精细化方向发展。

参考文献(References)：

[1] 江　权，刘　强. 地下洞室变形破坏物理模拟的力学相似畸变映射原理与实例分析[J]. 岩土力学，2024，45(1)：20－37.(JIANG Quan，LIU Qiang. Mechanical similarity distortion mapping principle and case analysis for underground cavern physical simulation of deformation and failure[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(1)：20－37.(in Chinese))

[2] 张学军，唐思熠，肇恒跃，等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程，2016，44(2)：122－128.(ZHANG Xuejun，TANG Siyi，ZHAO Hengyue，et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering，2016，44(2)：122－128.(in Chinese))

[3] 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)：3 017－3 028.(LIU Xianghua，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 Mechanic，2021，42(6)：3 017－3 028.(in Chinese))

[4] 江　权，宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(1)：23－37.(JANG Quan，SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(1)：23－37.(in Chinese))

[5] SONG L B，JIANG Q，SHI Y E，et al. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models：Study of tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2018，51(8)：2 617－2 637.

[6] LIU Q，JIANG Q，LIU C，et al. Physical overloading test for 3D printed caverns：Failure performance and supporting effect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2023，124：103743.

[7] JU Y，XIE H P，ZHENG Z M，et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3d printing technology[J]. Chinese Science Bulletin，2014，59(36)：5 354－5 365.

[8] 熊祖强，江　权，龚彦华，等. 基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证[J]. 岩土力学，2015，36(6)：1 157－1 165.(XIONG Zuqiang，JIANG Quan，GONG Yanhua，et al. A method for preparing natural joints of rock mass based on 3D scanning and printing techniques and its experimental validation[J]. Rock and Soil Mechanics，2015，36(6)：1 157－1 165.(in Chinese))

[9] 余　宸，田　威，云　伟，等. 3D 打印类岩石试样材料相似度定量评价方法及其脆性特征[J]. 中南大学学报：自然科学版，2025，56(5)：1 969－1 980.(YU Chen，TIAN Wei，YUN Wei，et al. Quantitative evaluation methods for material similarity and brittleness characteristics of 3D printed rock-like specimens[J]. Journal of Central South University：Science and Technology，2025，56(5)：1 969－1 980.(in Chinese))

[10] 蒋力帅，吴星宇，王庆伟，等. 砂型 3D 打印类煤试样动静组合加载力学特性[J]. 煤炭学报，2022，47(3)：1 196－1 207.(JIANG Lishuai，WU Xingyu，WANG Qingwei，et al. Dynamic mechanical behaviors of sand powder 3D printing rock-like specimens under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(3)：1 196－1 207.(in Chinese))

[11] 王文海，蒋力帅，何　鑫，等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(3)：754－767.(WANG Wenhai，JIANG Lishuai，HE Xin，et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(3)：754－767.(in Chinese))

[12] ISHIBASHI T，FANG Y，ELSWORTH D，et al. Hydromechanical properties of 3D printed fractures with controlled surface roughness：Insights into shear-permeability coupling processes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2020，128：104271.

[13] 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)：1 796－1 807.(ZHANG Yi，ZHU Yanmei，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)：1 796－1 807.(in Chinese))

[14] 覃亚伟，骆汉宾，车海潮，等. 基于挤出固化的建筑 3D 打印装置设计及验证[J]. 土木工程与管理学报，2016，33(1)：54－60.(QIN Yawei，LUO Hanbin，CHE Haichao，et al. Design and verification of a building 3D printing device based on extrusion[J]. Journal of Civil Engineering and Management，2016，33(1)：54－60.(in Chinese))

[15] FENG X T，GONG Y H，ZHOU Y Y，et al. The 3D-printing technology of geological models using rock-like materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2019，52(7)：2 261－2 277.

[16] MA G W，HUANG C，ZHANG J. Inner damage identification and residual strength assessment of a 3D printed tunnel with marble-like cementitious materials using piezoelectric transducers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2023，15(4)：838－851.

[17] JIANG Q，LIU Q，WU S，et al. Modification effect of nanosilica and polypropylene fiber for extrusion-based 3D printing concrete：Printability and mechanical anisotropy[J]. Additive Manufacturing，2022，56：102944.

[18] 任　礼，白海清，鲍　骏，等. 螺杆挤出式 3D 打印机结构设计与仿真分析[J]. 中国塑料，2021，35(4)：98－105.(REN Li，BAI Haiqing，BAO Jun，et al. Structural design and simulation analysis of screw extrusion 3D printer[J]. China Plastics，2021，35(4)：98－105.(in Chinese))

[19] 江　权，吴　思，刘　强，等. 水泥基 3D 打印材料基础配合比试验与质量评价[J]. 岩土力学，2023，44(5)：1 245－1 259.(JANG Quan，WU Si，LIU Qiang，et al. Basic mix ratio test and corresponding quality evaluation for cement-based 3D printing materials[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(5)：1 245－1 259.(in Chinese))

[20] 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，2022，330：127156.

[21] LIU Q，JIANG Q，HUANG M，et.al. The fresh and hardened properties of 3D printing cement-base materials with self-cleaning nano-TiO_2：An exploratory study[J]. Journal of Cleaner Production，2022，379：134804.

[22] LIU Q，ZHANG X，JIANG Q，et al. Effects of nano-Al_2O_3，nano-MgO and nano-Fe_2O_3 on the properties of cement-based 3D printing：A comparative study[J]. Journal of Building Engineering，2025，111：113322.

[23] LIU Q，JIANG Q，ZHAO H，et al. Porous diatomite promotes lightweight and low-carbon concrete 3D printing：An exploratory study[J]. Journal of Building Engineering，2025，103：112071.

[24] 陈剑刚，陈　瑜，马云龙，等. 挤出固化式 3D 打印水泥类材料流变性能研究综述[J]. 新型建筑材料，2021，48(11)：5－11.(CHEN Jiangang，CHEN Yu，MA Yunlong，et al. Review of research on rheological properties of cementitious materials based on extrusion-curing 3D printing technology[J]. New Building Materials，2021，48(11)：5－11.(in Chinese))

[25] 张建智，吴文涛，张　婷. 岩石 I，II 型单裂纹破坏前兆过程与短临预报模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(10)：2 654－2 667.(ZHANG Jianzhi，WU Wentao，ZHANG Ting. Precursory processes and short-term forecasting model of mode I and mode II single-crack failure in rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(10)：2 654－2 667.(in Chinese))

[26] ZHANG J Z，ZHOU X P. Forecasting catastrophic rupture in brittle rocks using precursory AE time series[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2020，125(8)：e2019JB019276.

[27] 来姝君，徐　珂，张志镇，等. 砂泥互层复合岩体力学特征与裂缝发育演化规律[J/OL]. 地质通报，http：//link.cnki.net/urlid/11.4648.p.20240927.0858.002.(LAI Shujun，XU Ke，ZHANG Zhizhen，et al. The mechanical characteristics of sand and mud interbedded composite rocks and the laws of crack development and evolution[J/OL]. Geological Bulletin of China，https：//link.cnki.net/urlid/11.4648.p.20240927.0858.002.(in Chinese))

[28] LIU Q，JIANG Q，YU Y，et al. Extrusion 3D printing circular and horseshoe tunnel physical models：A comparative study of deformation and brittle failure[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2024，129：104229.

[29] 刘学增，王煦霖，林亮伦. 45°倾角正断层黏滑错动对隧道影响试验分析[J]. 同济大学学报：自然科学版，2014，42(1)：44－50.(LIU Xuezeng，WANG Xulin，LIN Lianglun. Modeling experiment on effect of normal fault with 45° dip angle stick slip dislocation on tunnel[J]. Journal of Tongji University：Natural Science，2014，42(1)：44－50.(in Chinese))

[30] 黄　锋，朱合华，徐前卫. 含软弱夹层隧道围岩松动破坏模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(增 1)：2 915－2 924.(HUANG Feng，ZHU Hehua，XU Qianwei. Model test and analysis about loose failure of tunnel surrounding rock mass containing weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(Supp.1)：2 915－2 924.(in Chinese))

[31] 江　权，冯夏庭，李邵军，等. 高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化－抑制法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(6)：1 081－1 101.(JIANG Quan，FENG Xiating，LI Shaojun，et al. Cracking-restraint design method for large underground caverns with hard rock under high geostress condition and its practical application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(6)：1 081－1 101.(in Chinese))

[32] 周　诚，高玉月，覃文波，等. 月球基地建造的发展趋势、目标体系与政策路径[J]. 科学通报，2025，70(21)：3 460－3 469.(ZHOU Cheng，GAO Yuyue，QIN Wenbo，et al. The development trend，objectives，and policy path of lunar base construction[J]. Chinese Science Bulletin，2025，70(21)：3 460－3 469.(in Chinese))