

3D 打印混凝土的材料性能、加工性能 与工程应用的研究综述

顾子涵, 周娟, 江飞飞

南通理工学院, 江苏 南通 226000

DOI:10.61369/ERA.2025090002

摘要 : 随着我国建筑行业的快速发展, 对高性能、环保型建筑材料的需求日益增加。3D 打印混凝土技术作为建筑工业化与数字化深度融合的代表性成果, 近年来在全球范围内引起了广泛关注与实验研究。从 3D 打印混凝土技术的基本原理与研究现状入手, 系统梳理材料研发、打印工艺、技术设备、工程应用等关键领域的最新进展, 深入分析当前面临的主要技术挑战, 并探讨了未来发展趋势。

关键词 : 3D 打印; 智能建造; 力学性能

A Review of the Material Properties, Processing Properties, and Engineering Applications of 3D Printed Concrete

Gu Zihan, Zhou Juan, Jiang Feifei

Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226000

Abstract : With the rapid development of China's construction industry, the demand for high-performance and environmentally friendly building materials is increasing. As a representative achievement of the deep integration of industrialization and digitalization in construction, 3D printed concrete technology has attracted widespread attention and experimental research worldwide in recent years. Starting from the basic principles and current research status of 3D printed concrete technology, this paper systematically reviews the latest developments in key areas such as material development, printing processes, technical equipment, and engineering applications. It also provides an in-depth analysis of the major technical challenges currently faced and explores future development trends.

Keywords : 3D printing; intelligent construction; mechanical property

引言

3D 打印混凝土技术作为建筑行业的一项前沿科技, 通过逐层堆积混凝土材料来构建三维实体结构, 实现了从设计到建造的一体化流程。该技术不仅缩短了建筑周期, 降低了人力成本, 还提高了建筑设计的灵活性与创新性, 满足了个性化与可持续发展的建筑需求。近年来, 随着材料科学、计算机科学及机械工程等多学科的交叉融合, 3D 打印混凝土技术取得了显著进展, 成为建筑领域的研究热点。

一、3D 打印混凝土技术

3D 打印混凝土技术, 又称“混凝土增材制造技术”, 是一种基于数字化模型直接建造混凝土结构的创新施工方法, 具有快速成型、个性化定制和高效生产等优点^[1]。其基本原理是将三维建筑模型通过计算机辅助设计 (CAD) 软件分解为无数个二维切片, 然后通过专用打印设备逐层堆积混凝土材料, 最终形成三维实体结构。这一技术彻底改变了传统混凝土施工中依赖模板和人工浇筑

的作业方式, 实现了建筑结构的“自由成形”和“一体化建造”。

从发展历程来看, 混凝土 3D 打印技术经历了从概念验证到工程应用的逐步演进过程。早期国内外研究主要集中在: 材料可打印性, 小型构件打印上。2001 年美国南加州大学 Behrokh 教授提出的“轮廓工艺”概念, 即通过可移动的大型三维挤出装置和带有抹刀的喷嘴在施工现场进行打印和组装, 实现混凝土的分层堆积的打印轮廓成为建筑物的一部分, 减少施工的污染、成本及时间 (图 1 和图 2)。2007 年意大利发明家 Enrico 设计的 D-Shape

工艺,其特点在于打印机的底部有数百喷嘴,可喷出氧化镁粘合剂,通过粘合剂和砂的组合,逐渐成型为石质固体,最终形成石质建筑。随着材料科学和打印设备的进步,2010年后该技术进入快速发展期,全球范围内涌现出一批标志性项目。近年来,技术应用范围不断扩大,从简单的墙体结构发展到复杂的建筑整体打印。

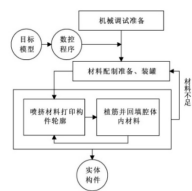


图1 轮廓工艺打印工艺流程



图2 轮廓工艺打印的工作原理

中国的研究团队如东南大学、华中科技大学、重庆大学等在该领域也取得了显著成果,如东南大学张亚梅教授团队开发的全国首个装配式3D打印智能公交站台,华中科技大学丁烈云教授团队将3D打印技术应用于古建筑修复的创新实践。

二、3D 打印混凝土材料

混凝土3D打印材料的研发是该技术能够成功应用的核心基础。针对3D打印硫氧镁水泥基材料早期强度低、耐水性差的问题,李奇岩系统研究了碳化改性工艺对材料微观结构与宏观性能的影响机制^[2]。通过调控碳化时间、CO₂浓度及养护制度,优化了材料配方。碳化改性显著提升了材料的抗压强度和抗渗性能,同时改善了打印构件的层间结合质量。研究成果为开发环保型3D打印建材提供了新思路,进而提升3D打印混凝土试件的可建造性。丁铸等介绍了四种常用的水泥基3D打印建筑材料,包括硅酸盐水泥基材料、硫铝酸盐水泥基材料、磷酸盐水泥基材料和地聚合物水泥基材料,并分析了这些材料的组成和性能特点^[3]。蔺喜强等选用特定配比的快硬硫铝酸盐水泥、机制尾矿砂、早强剂、缓凝剂及自制复合体积稳定剂作为打印材料,成功制备出满足早期强度、凝结时间等各方面性能要求的3D打印材料,促进了3D打印技术的推广应用^[4]。

现有研究已建立3D打印混凝土材料的基础研发框架,但在性能平衡机制、耐久性保障及智能特性开发方面仍需深化,以满足3D打印建筑技术日益增长的需求。未来应重点构建“材料-工艺-结构”协同设计方法论,发展基于机器学习的材料性能预测模型,同时加强建筑信息模型(BIM)与材料数据库的深度融合,推动3D打印混凝土技术从实验室走向工程应用。

三、3D 打印加工性能

(一) 3D 打印工艺

目前建筑3D打印的建造方式众多,当前主流的混凝土3D打印工艺可分为:挤出成型、选择沉积、模具打印及喷射成型(图3),不同工艺之间所用选材料、建造方式及应用领域均存在差异。

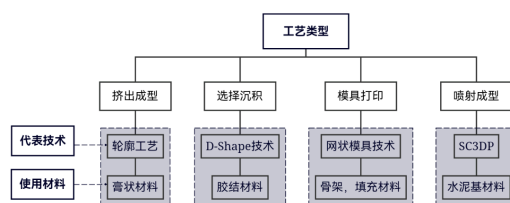


图3 3D 打印工艺类型

目前在建筑行业应用较为广泛的工艺为挤出成型技术,以水泥基材料为主要原材料,通过螺杆或活塞挤出连续的混凝土条带并进行逐层堆积成型,打印程序较为简单。但是挤出成型工艺还存在许多发展不够完善的地方,尤其是这种工艺对原材料的性能有较高的要求,挤出成型工艺需要原材料具有良好的泵送性、可挤出性和可建造性,由于层层堆叠的方式,对材料的早期强度和凝结时间都提出了更高的要求,并且层与层之间需要具备适宜的粘结强度,因此打印原材料配合比设计尤为重要,同时分层叠加工艺建造的构件强度与浇筑构件强度存在差异,这也成为一个亟待解决的关键问题。

(二) 3D 打印设备

目前用于建筑施工的3D打印机主要有三种类型可以选择,如龙门式、机械臂式和电缆驱动样式的3D打印机。龙门式3D打印机是最常见,也是最常用的类型,整体由刚性框架支成一个长方体形状,使喷头装置沿着X、Y和Z方向移动,其优点是具有拆装便利、利于运输,常用于大型建筑的建造。基于机械臂的3D打印机,又被称为机器人打印机,是在指定的轨道上浇筑混凝土,可通过履带安装多个机械臂并同时进行打印,其优点是能够生产复杂的几何形状和具有更高自由度,显著提高了生产效率。

四、力学性能

纤维增强是提高3D打印混凝土力学性能特别是抗拉性能的有效途径。研究表明,掺入钢纤维、聚丙烯纤维、纳米纤维等可以显著改善材料的抗裂性能和韧性。朱彬荣设计了一种适用于3D打印的高延性水泥基复合材料ECC,通过2%PVA纤维与3%纳米蒙脱土协同增韧,研究其从纳米到宏观的力学行为^[5]。周梦婷则针对3D打印钢纤维混凝土易堵泵的问题,通过采用CT扫描分析纤维取向分布,研究了钢纤维长径比以及0.5%-2.0%掺量对材料流变性能与力学性能的耦合影响并建立了纤维掺量-流变参数-力学性能的预测模型^[6]。

彭健将纳米纤维素晶体CNC引入超高性能混凝土UHPC中,并通过流变仪测试与SEM观察,解析CNC的增稠与成核效应,表明CNC的纳米桥接作用有效抑制了微裂缝扩展^[7]。东南大学侯泽宇选用硅酸盐水泥为主要材料,对3D打印纤维增强混凝土的基本性能进行了研究,同时研究了三种柔性纤维对混凝土性能和微

观结构的影响规律^[8]。杨烨凯研究了钢纤维与 PVA 纤维混合对增强超高性能混凝土 UHPC 的 3D 打印力学性能，建立了考虑应变率效应的本构模型。实验表明混杂纤维使断裂能提升 2.1 倍，动态增强因子 DIF 达 1.45，本构模型可准确描述材料从准静态到动态加载的力学响应^[9]。

五、结论

随着科技的飞速发展，3D 打印技术已逐渐渗透到建筑领域，为传统建筑业带来了前所未有的变革^[10]。3D 打印混凝土作为其

中的重要分支，其性能研究与应用正成为学术界和工程界关注的焦点。研究人员从多个角度对 3D 打印混凝土的材料性能、力学性能、耐久性等进行了深入探讨。通过引入纤维类改性材料、纳米材料、矿物掺合料以及化学外加剂等，显著改善了 3D 打印混凝土的工作性、强度和耐久性。在应用方面，其无模支撑、快速成型的优势使得它在复杂结构建造、个性化定制、快速抢修等领域具有独特优势。

然而，要实现 3D 打印混凝土的广泛应用，仍面临诸多挑战。尤其是打印工艺的不成熟、施工与设计标准的差异以及高昂的成本等问题也制约了 3D 打印混凝土技术的推广。

参考文献

[1] 李晗. 3D 打印碱激发复合混凝土的性能研究 [D]. 吉林建筑大学. .
[2] 李奇岩. 3D 打印硫氧镁水泥基材料的制备与碳化改性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2024.
[3] 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.
[4] 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(06): 141–144.
[5] 朱彬荣. 3D 打印高延性水泥基复合材料的设计及跨尺度力学行为研究 [D]. 东南大学, 2022.
[6] 周梦婷. 3D 打印钢纤维增强高强混凝土的制备与性能研究 [D]. 东南大学, 2023.
[7] 彭健. 可用于 3D 打印的纳米纤维素晶体增强超高性能混凝土的制备与性能 [D]. 福建农林大学, 2023.
[8] 赵雅萌. 基于 3D 打印的超高性能混凝土制备及性能研究 [D]. 山东建筑大学, 2022.
[9] 杨烨凯. 3D 打印超高性能纤维增强混凝土力学性能及本构模型研究 [D]. 天津大学, 2022.
[10] 岳健广, 王健, 吴瑶, 等. 3D 打印碳纤维混凝土断裂力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (05): 243–252.