

混凝土3D打印应用研究

林 明

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月17日; 发布日期: 2025年8月28日

摘 要

随着全球城市化进程的加速和建筑行业对可持续发展的需求增加, 混凝土3D打印技术作为一种革命性的建筑方法逐渐受到广泛关注和研究。传统混凝土施工方法存在诸多挑战, 如施工效率低、浪费材料多以及难以实现复杂设计等, 这些问题促使了对新兴建筑技术的探索与创新。混凝土3D打印技术通过将传统的混凝土浇筑过程数字化和自动化, 克服了传统施工方法的种种限制, 为建筑设计提供了更大的自由度和灵活性。在这一背景下, 本文旨在探讨混凝土3D打印技术的原理及其在建筑行业中的潜力和应用前景。首先, 文章将回顾混凝土3D打印技术的发展历程和关键技术原理, 随后探讨其在不同应用场景下的优势和挑战。最后, 本文将分析当前研究中的主要问题和未来发展的可能方向, 旨在为推动混凝土3D打印技术的进一步应用和商业化提供理论和实践上的支持。

关键词

3D打印, 混凝土, 数字化, 自动化, 应用前景

Review of Research on 3D Printing Applications of Concrete

Ming Lin

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

With the acceleration of global urbanization and the increasing demand for sustainable development in the construction industry, concrete 3D printing technology, as a revolutionary construction method, has gradually gained widespread attention and research. Traditional concrete construction methods face numerous challenges, such as low construction efficiency, excessive material

waste, and difficulties in realizing complex designs. These issues have prompted exploration and innovation in emerging construction technologies. Concrete 3D printing technology, by digitizing and automating the conventional concrete pouring process, overcomes many of the limitations of traditional construction methods, offering greater freedom and flexibility in architectural design. In this context, this paper aims to explore the principles of concrete 3D printing technology and its potential and application prospects in the construction industry. Firstly, the paper will review the development history and key technical principles of concrete 3D printing technology, followed by a discussion of its advantages and challenges in various application scenarios. Finally, the paper will analyze the main issues in current research and possible directions for future development, aiming to provide theoretical and practical support for promoting the further application and commercialization of concrete 3D printing technology.

Keywords

3D Printing, Concrete, Digitization, Automation, Application Prospects

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 混凝土 3D 打印的研究背景

全球城市化进程的加速催生了建筑行业对高效、可持续施工技术的迫切需求。据联合国统计,到 2050 年全球城市人口将新增 25 亿,其中 90% 的增长集中在亚洲和非洲地区[1]。传统混凝土施工方法依赖人工浇筑与模具成型,存在施工周期长、材料浪费严重(约 15%~30% 的混凝土损耗) [2]碳排放高(占全球碳排放量的 8%) [3]等缺陷。尤其对于复杂几何结构或灾后应急场景,传统工艺难以满足快速建造与设计创新的双重需求。在此背景下,混凝土 3D 打印技术应运而生,其通过数字化建模、自动化分层堆积的技术路径,为建筑行业提供了突破性解决方案。

近年来,全球范围内政策支持与技术研发投入显著增加。例如,中国《“十四五”智能制造发展规划》明确将建筑 3D 打印列为重点发展领域[4];欧盟“地平线 2020”计划资助了多项混凝土 3D 打印技术研发项目[5]。与此同时,市场应用逐步扩展,2023 年全球混凝土 3D 打印市场规模突破 5.3 亿美元,预计 2028 年将增长至 21.6 亿美元,年复合增长率达 26.8% [6]。技术、政策与市场的三重驱动,标志着混凝土 3D 打印正从实验室研究迈向产业化应用。

1.2. 混凝土 3D 打印技术的发展历程

混凝土 3D 打印技术的演进可划分为三个阶段:

1) 技术萌芽期(1990s~2000s): 1997 年,意大利学者 Pegna 首次提出“水泥基材料逐层堆积”概念,通过砂浆蒸养固化实现了简单构件的打印[7]。2001 年,美国南加州大学 Behrokh Khoshnevis 教授提出“轮廓工艺”(Contour Crafting),利用挤出式打印头与抹平装置实现建筑墙体自动化建造,奠定了现代混凝土 3D 打印的技术框架[8]。

2) 实验室验证期(2010s~2020s): 2014 年,中国盈创科技建成全球首栋 3D 打印别墅,墙体打印仅耗时 3 天[9];2018 年,荷兰埃因霍温理工大学完成首个 3D 打印混凝土自行车桥,验证了结构耐久性与负

载能力[10]。这一阶段以示范项目为主，核心目标为技术可行性验证。

3) 产业化探索期(2020s 至今): 技术重心转向规模化应用与成本优化。例如, 美国 ICON 公司利用车载式打印机为低收入社区快速建造住房, 单套成本降至 1 万美元以下[11]; 德国海德堡水泥公司开发低碳混凝土配方, 将碳排放量降低 40% [12]。标准化与商业化成为当前发展的核心议题。

1.3. 混凝土 3D 打印技术的发展优势

混凝土 3D 打印的竞争力源于其多维度优势:

1) 效率提升: 美国橡树岭国家实验室研究表明, 3D 打印可将施工周期缩短 50%~70%, 且无需模板支撑[13]。

2) 材料节约: 通过精准控制挤出量, 材料利用率高达 95%, 显著优于传统工艺的 70%~85% [14]。

3) 设计自由度: 拓扑优化算法与参数化设计结合, 可打印出传统工艺难以实现的蜂窝结构、双曲面墙体等复杂形态[15]。

4) 可持续性: 荷兰代尔夫特理工大学实验表明, 3D 打印建筑的全生命周期碳排放较传统建筑减少 30%~50% [16]。

1.4. 混凝土 3D 打印机分类

根据设备形态与应用场景, 混凝土 3D 打印机主要分为三类:

1) 龙门式打印机: 如图 1 所示, 适用于大型结构, 如中国华商陆海公司开发的“龙门架 + 机械臂”复合式设备, 打印尺寸达 $12\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4\text{ m}$, 可完成多层建筑整体打印[17]。

2) 机械臂式打印机: 如图 2 所示, 以六轴工业机器人为核心, 灵活性高, 适合异形构件。意大利 WASP 公司开发的 Delta 式打印机, 通过动态路径规划实现复杂雕塑的毫米级精度打印[18]。

3) 移动式打印机: 集成于卡车或轨道平台, 适用于野外作业。美国 Construction 3D 公司的车载系统可在 24 小时内打印出 40 m^2 的单层住宅[19]。

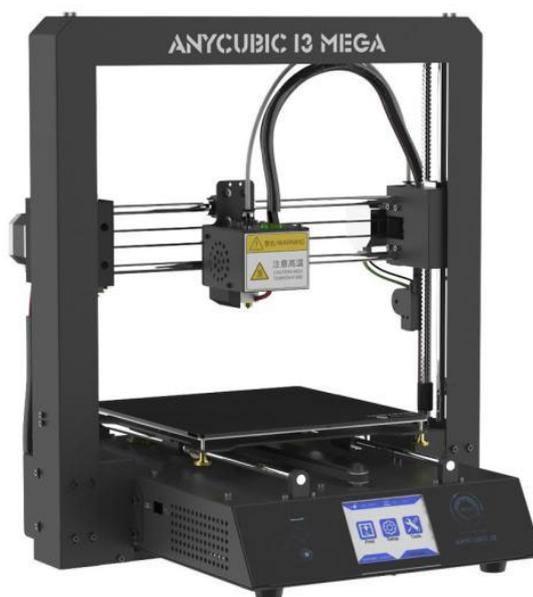


Figure 1. Gantry system 3D printer
图 1. 龙门式 3D 打印机

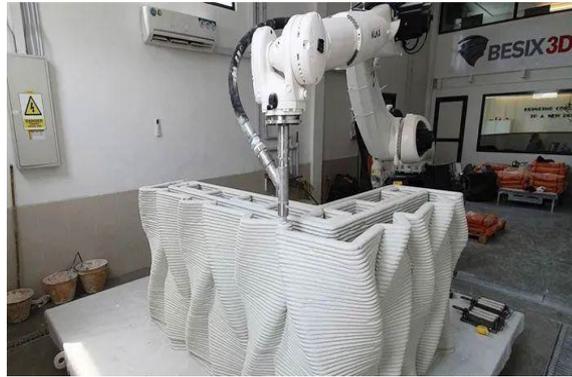


Figure 2. Robotic arm 3D printer
图 2. 机械臂式 3D 打印机

2. 混凝土 3D 打印技术的基本原理

与传统的混凝土施工方式相比，混凝土 3D 打印技术拥有许多优势，其工作原理如图 3 所示。

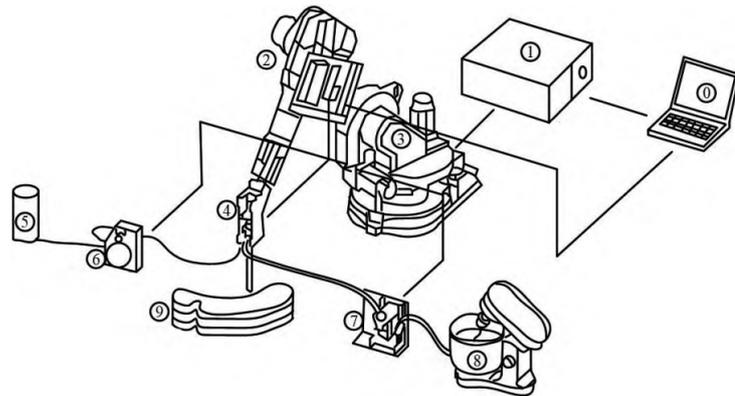


Figure 3. Concrete 3D printing schematic diagram
图 3. 混凝土 3D 打印原理图

2.1. 混凝土 3D 打印材料的流变学特性

混凝土 3D 打印材料的性能直接影响打印过程的稳定性和成品的结构强度。其核心要求包括：

1) 可挤出性(Extrudability): 材料需具备适宜的流变特性(屈服应力与塑性黏度)，保证通过喷嘴时均匀挤出且不堵塞。研究表明，添加纳米黏土或超塑化剂可显著改善流变性，屈服应力需控制在 200~500 Pa 范围内[20]。

2) 堆积稳定性(Buildability): 打印层在堆积后需快速形成初始强度以支撑后续荷载。通过调整凝结时间(初凝 20~40 分钟，终凝 2~4 小时)和添加速凝剂(如硫酸铝)可实现即时结构稳定性[21]。

3) 层间粘结强度(Interlayer Bond Strength): 层间粘结不足易导致结构开裂。实验表明，层间间隔时间小于 10 分钟时，粘结强度可达本体混凝土的 85%以上；超过 20 分钟则降至 50%以下[22]。

2.2. 打印路径规划与智能控制

路径规划是混凝土 3D 打印的核心算法，直接影响结构完整性与材料利用率。

1) 拓扑优化算法: 基于有限元分析(FEA)的拓扑优化可减少材料用量 20%~40%。例如，意大利都灵理工大学采用仿生学算法，打印出蜂窝状混凝土梁，承载力提升 15%且重量减轻 25% [23]。

2) 实时闭环控制: 瑞士 ETH Zurich 团队开发基于激光扫描的实时监测系统, 通过点云数据对比设计模型与打印层偏差, 动态调整挤出速率与打印头路径(修正响应时间 < 0.5 秒)。

2.3. 打印工艺参数的影响机制

关键工艺参数包括层厚、打印速度、挤出压力等, 需通过正交实验优化组合。中国同济大学研究表明, 层厚 10 mm、速度 100 mm/s、压力 0.5 MPa 时, 抗压强度达 45 MPa, 综合性能最优[24]。

3. 混凝土 3D 打印技术的应用

混凝土 3D 打印技术正以革命性的方式重塑建筑行业, 其应用范围从基础住宅到复杂基础设施, 从艺术装置到前沿太空探索, 展现出多样化的技术潜力与创新价值。通过数字化建模与自动化施工的结合, 该技术不仅突破了传统建筑工艺的局限, 更在效率、成本及可持续性方面实现了显著提升。

在住宅与公共建筑领域, 混凝土 3D 打印已从实验性尝试迈向规模化应用。美国 ICON 公司开发的“Vulcan”项目是典型代表[25], 其车载式机械臂打印机以 70 cm/s 的打印速度, 可在 24 小时内完成 60 m² 单层住宅的建造, 如图 4 所示。该项目采用生态混凝土配方, 通过粉煤灰和矿渣替代 40% 的传统水泥, 使碳排放降低 45%, 单套建筑成本降至 1.2 万美元, 为得克萨斯州低收入社区提供了高效且经济的住房解决方案。中国盈创科技则通过龙门式打印机实现了全球首栋 3D 打印别墅的一体化建造, 墙体厚度可动态调整(10~30 cm), 内部预埋管线空腔, 抗压强度达 40 MPa 且抗震等级达到 8 级, 如图 5 所示。该项目于 2023 年启动“百村千屋”计划[26], 旨在偏远地区批量建造保障性住房, 工期缩短至传统工艺的 1/3, 材料利用率高达 95%, 成为工业化住宅建造的标杆。



Figure 4. ICON's latest 3D printing project "Zero House"
图 4. ICON 最新的 3D 打印项目“零号住宅”



Figure 5. Winsun 3D printed luxury villa
图 5. 盈创科技 3D 打印的精装别墅

道路与桥梁工程中, 3D 打印技术凭借高精度与低浪费特性, 成为复杂地形修复与模块化建设的优选方案。荷兰埃因霍温的 3D 打印自行车桥[27]全长 8 米, 由工厂预制的分段模块现场拼装而成, 模块内部嵌入光纤传感器实时监测应变与温度变化, 如图 6 所示。该桥采用钢纤维增强混凝土(钢纤维掺量 1.2%), 抗弯强度提升至 7 MPa, 使用寿命预计达 50 年, 施工周期较传统工艺缩短 60%, 混凝土用量减少 30%。瑞士圣加仑的山体滑坡修复工程[28]则展示了技术的地形适应性。面对 70° 陡坡, 项目团队通过无人机测绘生成高精度地形模型, 机械臂式打印机沿坡面自适应路径打印抗滑桩结构, 抗压强度达 50 MPa, 修复成本降低 40%, 为地质灾害应急工程提供了创新范例。



Figure 6. 3D printed bicycle bridge in Eindhoven, Netherlands
图 6. 荷兰埃因霍温的 3D 打印自行车桥



Figure 7. "Wave House" in Italy
图 7. 意大利的“波浪之屋”

在艺术与特殊结构领域, 混凝土 3D 打印技术释放了建筑设计的自由度。迪拜未来博物馆的双曲面镂空外墙[29]由 132 块独立打印单元构成, 最小曲率半径仅 0.5 米, 六轴机械臂配合高流态混凝土(坍落度 180 mm)实现 5 mm 层厚打印, 表面精度误差控制在 ± 0.3 mm。外墙嵌入的光伏薄膜年发电量占建筑总能耗的 20%, 体现了功能与美学的深度融合。意大利“波浪之屋”艺术装置[30]则通过拓扑优化算法生成仿生波浪形态, 结构孔隙率达 30%, 兼具透光性与力学性能, 如图 7 所示。其采用的树脂基透光混凝土光线透过率 40%, 抗压强度 25 MPa, 作品荣获 2023 年威尼斯建筑双年展金奖, 彰显了 3D 打印在艺术与工程跨界融合中的潜力。

新兴应用场景的探索进一步拓展了技术的边界。新加坡科研团队开发的抗盐蚀 3D 打印混凝土[31], 通过掺入纳米硅酸盐与有机缓蚀剂, 将氯离子扩散系数降低 80%, 成功用于人工礁石与防波堤建造, 显著提升海洋结构的耐久性。欧洲航天局(ESA)与麻省理工学院合作的月球基地建设[32], 利用微波烧

结技术处理月壤模拟物，实现原位资源 3D 打印，抗压强度达 15 MPa，为未来地外建筑提供了可行性验证。

技术的广泛应用离不开材料科学与控制算法的持续创新。例如，荷兰 MX3D 公司开发的钢纤维-混凝土复合材料[33]，通过动态路径规划与层间间隔时间优化，将层间粘结强度提升至本体混凝土的 85%；MIT 团队研发的“可编程混凝土”[34]则通过微胶囊技术实现材料强度梯度化，外硬内柔的抗震墙体抗压强度梯度范围达 30~80 MPa。这些突破不仅解决了打印过程中的结构缺陷问题，更推动了建筑功能的高度集成化。

这些应用展示了混凝土 3D 打印技术在多个建筑领域的多样化潜力，为建筑行业带来了前所未有的设计和施工灵活性，同时也推动了可持续建筑和创新设计的发展。

4. 目前存在的技术问题和不足

混凝土 3D 打印技术作为一项新兴的建筑施工技术，尽管具有许多优势，但在其发展过程中仍面临一些技术问题和不足。

1) 打印材料要求高。混凝土 3D 打印材料的选择限制较多，不仅要求打印的混凝土具有良好的流动性、挤出性等性能，而且在打印过程中还需要考虑材料的自身强度以及层间的间隙和粘合强度。

2) 建造尺寸限制。在水平方向上，混凝土 3D 打印建造尺寸受到打印机打印范围和可移动范围的限制；在垂直方向上，受到材料的影响，混凝土 3D 打印目前无法一次成型打印出高层及超高层建筑。

3) 打印设备限制。尽管 3D 打印混凝土技术在建设过程中可以减少成本，但是前期研究高精度打印设备时需要投入大量资金。在打印机原位建造时，混凝土 3D 打印还可能受到天气、场地等因素，无法进行生产活动，若混凝土 3D 打印机造成破坏，还需耗费资金进行维修。

4) 缺乏技术人才[35]。目前对于混凝土 3D 打印技术的研究主要集中于打印设备与新材料的研发，很少注重技术人才的培养，这不利于混凝土 3D 打印技术在实际工程中的应用。

5) 结构强度和耐久性：打印出的混凝土结构的强度和耐久性是关键问题。目前的技术还未完全解决如何确保打印结构的强度达到或超过传统浇筑混凝土的标准，特别是在长期使用和各种环境条件下的表现需要进一步验证和改进。

6) 环境影响和可持续性：尽管混凝土 3D 打印技术在一些方面可以减少建筑过程中的废料和能源消耗，但其整体环境影响的能耗和碳足迹仍需全面评估和管理。

这些技术问题和挑战表明，尽管混凝土 3D 打印技术具有巨大的潜力，但在实际应用中仍需进一步的研究和改进，以实现其在建筑行业中的广泛应用和持续发展。

5. 混凝土 3D 打印技术的未来展望

混凝土 3D 打印技术的未来展望可以归纳为以下几个方面：

1) 提高打印精度和速度：未来的混凝土 3D 打印技术将致力于提高打印的精度和速度，以满足更广泛的应用需求。通过优化打印算法、改进打印设备性能以及开发新型打印材料，可以实现更高分辨率的打印，从而在更精细的层面上构建复杂的建筑结构。

2) 自动化和智能化提升[36]：未来混凝土 3D 打印技术将更加自动化和智能化。这包括使用先进的传感器和实时反馈系统来监测打印过程，确保打印质量和一致性。机器学习和人工智能也可能用于优化打印路径、预测材料行为以及调整打印参数。

3) 材料的创新：新型打印材料不仅需满足基本的可挤出性、可建造性等打印工艺要求，更应追求高强度甚至超越传统混凝土的性能。为此，应积极探索在材料中掺入固废、合金等多种组分，以丰富材料体系并优化性能。

4) 打印设备的研发[37]: 该技术的应用高度依赖于打印设备。当前, 建筑构件的可打印尺寸受限于设备规格。因此, 必须加速研发大型化打印设备, 并着重提升其核心机械性能(如防水性、可移动性等), 以适应复杂多变的施工现场环境。

5) 成本效益和可持续性: 未来的研究将致力于降低混凝土 3D 打印的成本, 并提高其在建筑行业中的竞争力。这可能通过优化材料使用、减少能源消耗、简化施工流程等方式实现。同时, 技术对于的环境影响也将成为关注焦点, 推动技术朝向更可持续的方向发展。

6) 尽管该技术有助于减少人力需求, 但打印质量仍显著依赖于操作人员的技术水平。从设备安装、调试、操作到维护的每个环节, 都需要专业人员的精准控制。因此, 建立规范化的技术人员培训体系并加大培训力度至关重要。

混凝土 3D 打印技术在未来的发展将不仅仅是技术层面的进步, 还将涉及市场接受度、材料创新等多方面的综合发展, 为建筑行业带来更多创新和持续发展的机会。

6. 结语

混凝土 3D 打印技术作为现代建筑领域的一项创新技术, 经历了持续的发展和改进。其发展历程始于对传统混凝土施工方式的改进需求, 逐步演变成为一种可以直接在建筑现场打印复杂结构的先进技术。这项技术的基本原理是利用计算机控制的机器人或打印设备, 按照预先设计的 3D 模型, 将混凝土层层堆积、逐层固化成型, 从而实现建筑物件的快速构建。

混凝土 3D 打印技术的发展优势包括可以减少建筑物件的施工时间和人力成本, 提高施工的精度和一致性, 同时可以实现复杂结构和定制化设计, 为建筑设计师提供了更大的创作空间和自由度。

目前, 混凝土 3D 打印技术已经被应用于多个领域, 包括住宅建筑、基础设施建设、文化遗产保护等。然而, 这项技术仍然面临一些挑战, 如打印速度、打印材料的优化、结构强度的保证以及标准化和认证的问题。此外, 对于大规模应用而言, 成本控制和环境影响也是需要解决的关键问题。

未来, 混凝土 3D 打印技术有望继续发展, 预计会进一步提升打印速度和精度, 优化材料性能和耐久性, 并且可能会拓展到更多复杂和大规模的建筑项目中。随着技术的成熟和应用范围的扩大, 混凝土 3D 打印有潜力成为未来建筑施工的重要方法之一, 推动建筑行业向数字化、智能化转型的重要推动力量。

参考文献

- [1] United Nations (2019) World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. UN Department of Economic and Social Affairs.
- [2] World Economic Forum (2021) The Future of Construction: Pathways to Sustainability. WEF.
- [3] Global Alliance for Buildings and Construction (2020) 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. UNEP.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. “十四五”智能制造发展规划[Z]. 北京: 国务院, 2021.
- [5] European Commission (2018) Horizon 2020 Work Programme 2018-2020: Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials.
- [6] Grand View Research (2024) 3D Printing Construction Market Size, Share & Trends Analysis Report.
- [7] Pegna, J. (1997) Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction. *Automation in Construction*, **5**, 427-437. [https://doi.org/10.1016/s0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/s0926-5805(96)00166-5)
- [8] Khoshnevis, B. (2004) Automated Construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*, **13**, 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- [9] Ma, G., Wang, L. and Ju, Y. (2018) State-of-the-Art of 3D Printing Technology of Cementitious Material—An Emerging Technique for Construction. *Science China Technological Sciences*, **61**, 475-495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
- [10] Salet, T.A.M., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P. and Laagland, H.L.M. (2018) Design of a 3D Printed Concrete Bridge by Testing.

Virtual and Physical Prototyping, **13**, 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

- [11] ICON (2024) Affordable 3D-Printed Housing for Communities.
- [12] Heidelberg Cement (2024) Carbon-Neutral Concrete Innovation.
- [13] Oak Ridge National Laboratory (2021) Additive Manufacturing for Construction: A Technology Assessment. ORNL.
- [14] Buswell, R.A. (2020) Economic and Environmental Analysis of 3D Concrete Printing. *Cement and Concrete Research*, **128**, Article 105931.
- [15] Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J. and Morel, P. (2016) Large-Scale 3D Printing of Ultra-High Performance Concrete—A New Processing Route for Architects and Builders. *Materials & Design*, **100**, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- [16] Bos, F.P. (2020) Environmental Impact of 3D Concrete Printing. *Journal of Cleaner Production*, **261**, Article 121465.
- [17] Puzatova, A. (2024) Large-Scale 3D Printing System for Building Construction.
- [18] WASP (2024) Delta 3D Printer Technical Specifications.
- [19] Construction 3D (2024) Mobile 3D Printing Solutions for On-Site Construction.
- [20] Andrew Ting, G.H., Noel Quah, T.K., Lim, J.H., Daniel Tay, Y.W. and Tan, M.J. (2022) Extrudable Region Parametrical Study of 3D Printable Concrete Using Recycled Glass Concrete. *Journal of Building Engineering*, **50**, Article 104091. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104091>
- [21] 孙晓燕, 陈龙, 王海龙, 等. 面向水下智能建造的 3D 打印混凝土配合比优化研究[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 84-92.
- [22] 冯攀, 刘钊龙, 邵丽静, 等. 原位聚合对 3D 打印砂浆力学性能的影响及机理[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1093-1103.
- [23] Ferraris, C.F., Obla, K.H. and Hill, R. (2001) The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 245-255. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00454-3)
- [24] 柏美岩, 肖建庄, 高琦, 等. 3D 打印工程弃土挤出过程力学性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 389-398.
- [25] ICON (2024) Vulcan Construction System: Technical Specifications.
- [26] Yingchuang (2024) Global First 3D-Printed Villa Project Report.
- [27] Salet, T.A.M., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P., *et al.* (2019) Structural Performance of 3D Printed Concrete Bridges. *Engineering Structures*, **191**, 435-447.
- [28] ETH Zurich (2022) Landslide Repair Using Robotic 3D Concrete Printing: A Case Study in St. Gallen. ETH Press.
- [29] Dubai Future Foundation (2024) The Museum of the Future: Design and Construction.
- [30] Breseghello, L. and Naboni, R. (2023) Bio-Inspired 3D Printed Concrete Structures: The Wave House Project. *Architectural Design*, **93**, 58-65.
- [31] Singapore Agency for Science (2023) Technology and Research. Salt-Resistant 3D Printed Concrete for Marine Structures. A*STAR Publications.
- [32] ESA and MIT (2024) Lunar Regolith 3D Printing for Extraterrestrial Habitats. *Acta Astronautica*, **215**, 112-125.
- [33] MX3D (2024) Steel Fiber-Reinforced Concrete Composites for High-Strength 3D Printing.
- [34] MIT Concrete Sustainability Hub (2023) Programmable Gradient Concrete via Microencapsulation. *Advanced Materials*, **35**, Article 2208745.
- [35] 姚杰, 黄明洋, 赵宝军, 等. 混凝土 3D 打印技术的研究与应用现状[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 1-9.
- [36] 张启云. 3D 打印混凝土关键问题及应用展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(6): 8-12+18.
- [37] 陈纲, 刘月雷, 刘耕园, 等. 3D 打印混凝土研究现状与展望[J]. 四川建材, 2023, 49(5): 8-11.