

3D打印在建筑领域中的应用发展

贾 杭*, 顾九毓, 庞扬扬

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: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月14日; 发布日期: 2023年5月29日

摘 要

随着3D打印技术的发展, 传统的建筑行业也迎来了新一轮的变革, 许多的建筑开始采用3D打印技术。一方面3D打印技术可以缩短施工工期, 提升施工效率, 另一方面3D打印技术还处于发展阶段, 有着许多的不足。本文首先介绍3D打印技术的概念, 简单阐述了3D打印技术在建造领域的优势和其现阶段发展现状研究, 分析了3D打印建造技术的问题与不足, 对3D打印建造技术的研究方向进行了展望。

关键词

3D打印技术, 建筑领域, 应用发展

Application and Development of 3D Printing in the Field of Architecture

Hang Jia*, Jiuyu Gu, Yangyang Pang

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

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: May 14th, 2023; published: May 29th, 2023

Abstract

With the development of 3D printing technology, the traditional construction industry has also ushered in a new round of change, and many buildings have begun to use 3D printing technology. On the one hand, 3D printing technology can shorten the construction period and improve the construction efficiency; on the other hand, 3D printing technology is still in the development stage, and there are many shortcomings. This paper first introduces the concept of 3D printing technology, briefly expounds the advantages of 3D printing technology in the field of construction and the research on its current development status at the present stage, analyzes the problems and defi-

*通讯作者。

ciencies of 3D printing construction technology, and prospects the research direction of 3D printing construction technology.

Keywords

3D Printing Technology, Construction Field, Application Development

Copyright © 2023 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

3D 打印技术是指通过数字建模, 将材料进行叠加并且利用相关的 3D 打印设备将其构造还原出来。在建造领域中与传统的建造方式最大的不同是它采用增材建造, 可以极大地减少材料的浪费。3D 打印技术是一种快速建造技术, 3D 打印技术最早起源于 19 世纪末的美国, 但是直到 20 世纪 90 年代才开始被人们所了解[1], 经过 30 多年发展, 3D 打印技术在机械制造, 航天以及医疗领域有了已经有了大量的应用, 但是在建筑领域还处于起步阶段, 2014 年世界上第一座由 3D 打印技术建造而成的“莫比乌斯环屋”在荷兰建成, 标志着 3D 打印技术在建筑领域进入了新的发展阶段。在 3D 打印技术的影响下, 未来的建筑领域未来有望由传统重工业逐步向更智能化、轻量化和定制化的工业类型转型[2]。

2. 3D 打印技术概述

3D 打印技术是以计算机模型为基础, 用金属粉末或其他胶凝材料, 通过逐层打印的方式进行物体构造的技术。作为一种新兴的技术, 其独特的增材建造模式可以使物体构造快速成形, 因此经常被用在快速建造的领域。与航天、医疗领域不同的是, 在建筑领域需要更加大型的打印设备, 通过计算机控制, 将混凝土等胶凝材料用大型打印设备打印出建筑物。3D 打印技术将设计、施工等程序集成一体化, 使其同时具有绿色建筑的环保性和装配式建筑的便捷性。

3. 3D 打印建造技术的优势

3.1. 提高施工的环保性

目前 3D 打印建造所需要的材料是建筑垃圾, 工业尾矿等废旧材料, 通过加工处理等手段与高强度混凝土进行一定比例的配合形成 3D 打印的材料[3]。其本身的材料构成就决定了 3D 打印建造技术的环保性。3D 打印施工的过程非常的简洁干净, 在进行打印时只进行混凝土的搅拌即可, 不需要电焊和熔融等重工业的参与, 相应的也不会产生有毒物质, 符合绿色施工规范。同时 3D 打印建造技术对操作空间的范围要求不大, 对场地的破坏也会减少。

3.2. 提高施工效率

传统的建筑物在施工时是从地基开始一步一步进行设计建造, 这样的建造方式一方面会消耗大量的人力等资源, 另一方面会浪费许多的时间, 施工时效率很低[4]。3D 打印建造技术很好地解决了这一问题, 3D 打印在进行施工建造时可以直接将建筑模型转化为打印的文件, 然后进行施工打印和交付使用, 大大地缩短了建筑的施工周期, 同时也减少了 50%~90% 的施工成本[4]。

3.3. 设计个性化

随着科学技术的发展,如今人们对建筑的要求也越来越高,对建筑物的美观性和舒适性的要求上升了一个水平,尤其是建筑物的设计要求,越来越多的建筑物采用流线性的设计方案。然而,流线性的建筑在进行施工时不仅耗费建筑成本,而且施工工序复杂繁琐,大大地增加了施工的难度。3D 打印技术在建造过程中由计算机控制打印设备进行打印,不需要现场的图纸定位即可实现人工无法实现的造型。由于 3D 打印建造技术的设计——打印一体化的流程,可以根据用户自己需求所设计的个性化方案进行短期的快速打印,这是传统的建造方式所不能及的。

4. 3D 打印建造技术的发展研究

4.1. 材料方面

目前 3D 打印建造技术所需的材料以无机材料为主,例如硫铝酸盐水泥,硅酸盐水泥,黏土等[5]。楚宇扬等[6]通过将硫铝酸盐水泥掺杂到普通硅酸盐水泥中发现混合的混凝土材料具有初凝时间短,早期强度高的特点,同时当掺杂量为 14%~20%时混合水泥的初凝时间,流变性和早期强度均满足 3D 打印材料的要求,研究还发现掺杂硫铝酸盐水泥虽然可以提高混凝土的早期强度,但是会使其后期强度降低。石从黎[7]等通过对 3D 打印建造技术的研究发现通过将普通水泥与快硬水泥配合使用可以使快硬水泥快速硬化从而支撑起未硬化的部分,解决普通水泥早期强度不够的问题。

3D 打印建造技术的材料性能不仅与水泥有关,还与其他的外加剂和配合比都有密切的关系。在含砂率方面,LIUZ [8]等通过实验得到当含砂率小于 0.235 时混凝土的静屈服应力会随着水泥的增加而增加,但是当含砂率大于 0.24 时结果则会相反。在外加剂方面,罗素蓉[9]等通过在水泥基材料中掺杂氧化石墨烯增强了水泥基材料的性能,实验表明添加 0.03 wt%~0.05 wt% GO 后,加速了水泥水化进程,有利于 3D 打印水泥基材料各个方向力学性能的增强,和未掺入的 GO 组别相比掺入氧化石墨烯的水泥基材料在 X, Y 和 Z 方向的抗折强度和抗压强度都有增强。吴伟鸿[10]等研究了矿物掺合料对 3D 打印水泥基材料的力学性能影响,结果表明,只掺杂一种材料时,粉煤灰和矿粉会降低材料的抗压强度和抗折强度,硅粉则会提高材料的抗压和抗折强度。同时掺杂两种材料时,硅粉和矿粉对应的材料强度优于基准组,粉煤灰和硅粉组合以及粉煤灰和矿粉组合材料强度低于基准组。李维红[11]等研究在 3D 打印水泥基材料中加入纤维对材料力学性能的影响,结果发现,在材料中加入 PVA 和玄武岩纤维可以有效地提高 3D 打印水泥基材料的抗折强度,对于 PVA 纤维来说,掺杂 6 mm 和 12 mm 符合最优,对于玄武岩纤维来说,6 mm 单独加入最优。在材料的配合比方面,乔星宇[12]等通过以硅酸盐水泥为主,辅以减水剂,速凝剂和纤维的混合打印材料研究得到了 3D 打印材料的最佳配合比。如表 1 所示:

Table 1. 3D Basic mix ratio of printed concrete

表 1. 3D 打印混凝土基本配合比

42.5 硅酸盐水泥	中砂	碎石	水	速凝剂	减水剂	碳纤维
255	550	570	110	8	5	1

Rubio 等[13]通过研究不同的配合比对 3D 打印砂浆的流变特性的影响发现添加 24%的粉煤灰和 8%的硅粉对于砂浆的强度,粘结性能和可挤出性都有一定程度的提高,同时还降低了砂浆流动性和泌水性。Ma 等[14]通过通过用铜尾砂与天然砂的质量替换实验,确定了以水胶比为 0.26,砂尾比为 3:2,用 70%的水泥、20%的粉煤灰、10%的硅灰和 1.2 kg/m³的短切聚丙烯纤维组成的配比能够得到最佳的性能。Khalil

等[15]通过对普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥复掺的实验,最终研制出了由 93%的普通硅酸盐水泥和 7%的硫铝酸钙水泥相配合,砂灰比为 2,水灰比为 0.35,减水剂为 0.26%的砂浆配比,得到的打印材料性能其打印层数可以叠加到超过 25 层。

通过上述研究说明,无论是水泥的种类还是矿物掺杂物选择,或是减水剂,速凝剂和纤维的掺入,都会显著提高 3D 打印材料的性能和强度,具有一定的正面效果。但是过量的掺入硫铝酸盐水泥降低材料的强度。同时研究也表明硅粉的掺入可以让 3D 打印所需的材料达到要求的强度,所以硅粉将会成为提高 3D 打印材料性能较好的外加剂。在材料的配合比方面,目前的研究大部分都是基于外加剂的经验配比,没有形成统一的标准和规范,缺乏通用性的理论研究。

4.2. 打印设备方面

对于 3D 打印建造技术来说,除了材料本身的质量之外,与打印设备的发展也有密切的关系。2004 年南加州大学的 Khoshnevis Behrokh 发明轮廓工艺[16]将传统工艺中的抹刀与打印机相结合,保证了逐层打印的平整性,可以进行大型的建筑物的打印。随着科学技术的发展,基于轮廓工艺,2008 年,英国拉夫堡大学的 Sungwoo Lim 提出“混凝土打印”技术[17]不同于轮廓工艺只打印建筑构件,3D 打印混凝土技术利用大型三维打印设备,用更小的喷嘴结构实现更高精度的打印,并且在打印的同时预留钢筋位置,打印完成后完成相对应的配筋。Gosselin 等[18]依据现有混凝土工程的局限性提出了新的工艺,研制了一种六轴机械臂,解决了 3D 打印中出现的复杂的几何问题。在国内 3D 混凝土打印的设备也取得了初步研究进展,2015 年,我国华中科技大学丁烈云[19]团队自主研发出了适用于混凝土打印的三维打印装置实现了 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的建筑构件打印。2017 年我国的清华大学徐卫国[20]研究团队提出将机械臂改装为 3D 打印机器人,利用机械臂的高精度与自由度的特性,成功的将设备运用于 3D 打印建筑物与建筑构件之中。对于 3D 打印中的钢筋问题,Mechtcherine 等[21]通过对钢筋混凝土结构的研究,提出了气-金属电弧焊 3D 打印钢筋的新工艺,并对新型钢筋的力学性能进行了研究,结果表明,与传统钢筋相比,3D 打印钢筋的屈服应力和抗拉强度降低了约 20%,但是具有更高的屈服和应变能力,同时,打印钢筋与可打印细粒混凝土的结合性能良好,其性能可与普通钢筋混凝土相媲美;所开发的基于气电弧焊的 3D 打印工艺在实际钢筋生产中也具有足够的几何精度和几何自由度,生产速度也十分合理。

目前 3D 打印在建筑领域还处于起步阶段,3D 打印设备的发展在今后的发展中起到了关键的作用,研究表明,多轴的打印设备在处理打印建造过程中出现的问题时有着更好的优势。但复杂的 3D 打印建筑对混凝土在初凝时间和快速硬化以及可操作性上有更高的要求。而对于 3D 打印中的配筋问题则是提出了新的打印钢筋工艺。所以对于打印设备的研究还需要进行深入、系统的研究,否则会出现数据与实际工程不匹配的问题。

4.3. 打印路径方面

3D 打印的路径也是决定 3D 打印建造技术的重要因素,不同的路径选择决定了最终打印建造的建筑形态。在打印的路径方面黄舒奕[22]通过对 3D 打印建筑打印路径的探索对打印路径进行了三种总结:水平逐层打印是目前最为常用的打印建造方式,适用于微弱的曲面或斜面。变平面打印是六轴机械臂特有的打印建造方式,适用于不同构件之间复杂的组合情况。曲面打印则具有更加丰富的形态。李荣帅[23]基于 DE 对于 3D 打印路径的研究中通过引入 DE 算法对打印路径问题进行了求解,对于各项指标下的选择最优打印规划路径有了新的解决方式。马宗方[24]等采用欧拉回路模型对 3D 打印路径进行了算法优化,实验证明了打印喷头抬起次数与打印路径的空行程对 3D 打印的质量和打印时间有着重要的影响,利用欧拉回路优化算法使喷头抬起次数减少了 57.14%,空行程减少了 23.21%,对 3D 打印技术中存在的问题

进行明显的改进。

从研究进展来看,采用 DE 算法进行求解具有简单方便且不易陷入局部最优解的特点,采用欧拉回路进行算法则是从打印喷头和打印行程方面进行优化。研究人员大多是从算法层面进行打印路径的优化,都是基于实际问题所提出的针对化打印路径的优化,当工程问题发生改变时,优化的打印路径算法就会失效。所以对于打印路径的研究不能局限于算法层面,尤其需要从打印工艺和技术方面进行更加细致地研究。

5. 3D 打印建造技术的应用

1) 应急建筑。3D 打印具有降低成本,建造效率高的特点。Sakin 等[25]通过对 BIM 技术和 3D 打印技术进行研究发现 BIM 可以提高建筑物的设计精度和细节,3D 打印建造技术具有。降低施工成本,改善施工流程,减少危险作业等优势。在 2020 年初,新冠肺炎疫情以迅雷不及掩耳之势袭击了全球,在危急来临时,武汉市仿照北京小汤神医院开工建设,仅仅 10 天就完成了建筑面积 34,000 m²,床位 1000 多张的任务[26]。这其中充分体现了在疫情来临时 3D 打印技术在建造应急建筑方面的优势,在这次的建造中采用 BIM + 3D 打印技术的相结合的施工建造方案,不仅提高了施工的效率,而且对于建筑的强度也有一定的保障。

2) 公共建筑。3D 打印建筑目前采用的施工方式是装配式建筑[27],可以在工厂预先将构件打印出来,然后进行现场施工组装。所以在公共建筑的建设方面具有特别的优势,对于公交车站台,公园长椅等公共建筑,在满足要求的同时可以随时进行拆卸组装二次利用,有效地减少了资源的浪费。

3) 建筑构件。3D 打印在建筑物的构件中也有着广泛的应用,例如在复杂的钢结构的节点处施工,采用 3D 打印可以很好地解决施工困难的问题。在古建筑的修复方面也有巨大的优势,传统的古建筑修复不仅效率低,且修复的细节也难以把控。Xu 等[28]通过将 3D 打印技术与古建筑相结合,利用 3D 打印和计算机扫描技术对古建筑的损毁部分进行修复,效果良好,证明了采用 3D 打印的方式可以很好地把控古建筑的修复细节。所以 3D 打印在古建筑修复中有广阔的前景。

4) 其他方面。在军事方面,美国海军陆战队利用 3D 打印建造了世界上最大的 3D 建筑军营[29]。未来 3D 打印也可以运用在边防工程和海岸线工程。科学家还提出在月球进行“轮廓成型工艺”[30]的 3D 打印建造技术。在交通方面,荷兰埃因霍芬理工大学于 2017 年 10 月完成 3D 打印桥[31],该桥纵向分成了 8 个节段,桥梁本身采用 3D 打印机在工厂打印好,先采用预应力张拉形成一个整体,然后运输到现场进行整体组装。国内河北工业大学的马国伟[32]团队按照 1:2 的比例,使用装配式建筑的方式对赵州桥进行了打印建造,该 3D 打印赵州桥成为了世界上单跨最长的 3D 混凝土打印桥梁。

6. 3D 打印建造技术的问题与展望

1) 材料方面。目前传统的建筑材料在经济性和多样性等方面有着许多的不足,虽然在改善打印混凝土材料的性能方面较大的突破,但是还是缺乏系统性,随着 3D 打印技术的发展,建筑材料的种类也会更加的丰富,例如陶瓷和黏土等。同时 3D 打印技术的发展对于建筑材料的外加剂和纤维等也会起到推动作用,未来的 3D 建筑材料不仅种类会越来越多,在力学性能和经济环保方面更能满足建筑的需求。

2) 设备方面。目前对于 3D 打印建造技术的设备研究不足,距离大规模工业化还有较大差距。同时在我国的一些高校,已经开展基于智能机器人的 3D 打印混凝土技术的研究。随着 3D 打印技术的发展,精度和移动性方面的问题会被解决,同时 3D 打印设备也会随着计算机技术的发展向智能化和集成化方向发展,最终实现大规模的工业化生产。

3) 规范方面。3D 打印建造技术对于材料的配合比和相关的试验方法方面虽然进行了大量的研究,

但是还是没有建立同一的衡量规范和设计标准。3D 打印建造技术作为新兴技术,未来会对试验和评价标准进行系统的研究,设计出一套完善的衡量标准与规范体系,用以 3D 打印建造技术的后续发展。

7. 总结

3D 打印建造技术的出现对传统的建筑行业带来了前所未有的冲击,但是目前 3D 打印建造技术还处于起步阶段,3D 打印建造技术在实现工业化的过程中,与打印材料,打印设备和技术规范之间息息相关。3D 打印建筑的设计验收规范迟迟没有统一标准,从而导致许多的研究成果没有办法大规模应用,与此同时,由于无法市场化,3D 打印的各项研究缺少实践过程,反过来又阻碍了相关规范和标准的建立。针对 3D 打印建造技术所面临的困难,点对点地提出优化解决方案才是正确的方式,未来需要在国家的政策扶持下,提升整个行业的规范建设,同时也需要具有学科优势的高校和经验丰富的企业起带头作用,加大 3D 打印技术在建筑领域的应用,从实际工程的角度出发解决 3D 打印生产的技术问题,推动 3D 打印建造技术的发展。

参考文献

- [1] 徐晗,徐金花,张馨瑜,张欢,郭宇轩. 3D 打印技术在建筑领域的应用[J]. 建筑设计管理, 2020, 37(6): 85-89.
- [2] Carneau, P., Mesnil, R., Roussel, N. and Baverel, O. (2020) Additive Manufacturing of Cantilever—From Masonry to Concrete 3D Printing. *Automation in Construction*, **29**, Article ID: 103184. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103184>
- [3] 李小龙,王栋民. 建筑 3D 打印技术及材料的研究进展[J]. 中国建材科技, 2021, 30(3): 29-35.
- [4] 徐卫国. 数字建筑设计与建造的发展前景[J]. 当代建筑, 2020(2): 20-22.
- [5] 罗毅. 3D 打印建筑的应用与发展前景[J]. 深圳职业技术学院学报, 2020, 19(1): 34-39.
- [6] 楚宇扬,徐金涛,刘焯,张普,汤意. 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.
- [7] 石从黎,林宗浩,陈敬,向川. 3D 打印混凝土技术的初探[J]. 重庆建筑, 2017, 16(3): 24-27.
- [8] Liu, Z., Li, M., Weng, Y., Wong, T.N. and Tan, M.J. (2019) Mixture Design Approach to Optimize the Rheological Properties of the Material Used in 3D Cementitious Material Printing. *Construction and Building Materials*, **198**, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.252>
- [9] 罗素蓉,林欣,孙金集,王德辉. 氧化石墨烯对 3D 打印水泥基材料性能的影响[J/OL]. 复合材料学报: 1-10. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221129.001>, 2023-05-18.
- [10] 吴伟鸿,罗素蓉,欧翔,王德辉,黄欢. 矿物掺合料对 3D 打印水泥基材料力学各向异性的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 286-292.
- [11] 李维红,王乾,陈旭浩,常西栋,陈宇红,裴强. 纤维对 3D 打印水泥基材料力学性能的影响[J]. 实验力学, 2021, 36(4): 499-506.
- [12] 乔星宇,李韵通,潘宁. 3D 打印建筑混凝土配合比设计研究[J]. 现代装饰(理论), 2016(6): 240-241.
- [13] Rubio, M., Sonebi, M. and Amziane, S. (2017) 3D Printing of Fibre Cement-Based Materials: Fresh and Rheological Performances. *RILEM 2nd International Conference on Biobased Building Materials*, Clermont-Ferrand, 21-23 June 2017.
- [14] Ma, G., Li, Z. and Wang, L. (2018) Printable Properties of Cementitious Material Containing Copper Tailings for Extrusion Based 3D Printing. *Construction and Building Materials*, **162**, 613-627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- [15] Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K. and Rémond, S. (2017) Use of Calcium Sulfoaluminate Cements for Setting Control of 3D-Printing Mortars. *Construction and Building Materials*, **157**, 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>
- [16] Khoshnevis, B. (2004) Automated Construction by Contour Crafting—Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction*, **13**, 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- [17] Lim, S., et al. (2009) Fabricating Construction Components Using Layered Manufacturing Technology. *Global Innovation in Construction Conference 2009 (GICC'09)*, Loughborough, 13-16 September 2009.
- [18] Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., et al. (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>
- [19] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1-10.
- [20] 赵夏瑀, 徐卫国. 3D 打印建造技术的研究进展及其应用现状[J]. 中外建筑, 2021(10): 7-13. <https://doi.org/10.19940/j.cnki.1008-0422.2021.10.002>
- [21] Mechtcherine, V., Grafe, J., Nerella, V.N., *et al.* (2018) 3D-Printed Steel Reinforcement for Digital Concrete Construction—Manufacture, Mechanical Properties and Bond Behaviour. *Construction and Building Materials*, **179**, 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202>
- [22] 黄舒弈, 张宇, 徐卫国. 机器人 3D 打印建筑的打印路径规划方法探索[J]. 建筑技艺, 2022, 28(7): 79-81.
- [23] 李荣帅. 基于 DE 算法的建筑 3D 打印完全遍历路径规划研究[J]. 江西科学, 2016, 34(3): 370-373+392. <https://doi.org/10.13990/j.issn1001-3679.2016.03.022>
- [24] 马宗方, 万伟鹏, 宋琳, 刘超, 刘化威, 武怡文. 采用欧拉回路的混凝土 3D 打印路径优化算法[J/OL]. 机械科学与技术: 1-7. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230082>, 2023-04-09.
- [25] Sakin, M. and Kiroglu, Y.C. (2017) 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, **134**, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- [26] 陈蕾. 突发疫情下 BIM+3D 打印的装配式建筑技术组合应用的优势[J]. 武汉交通职业学院学报, 2020, 22(1): 81-84.
- [27] 赵海平. 融合 BIM 与 3D 打印技术的装配式建筑应用[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(4): 99-102.
- [28] Xu, J., Ding, L. and Love, P.E.D. (2017) Digital Reproduction of Historical Building Ornamental Components: From 3D Scanning to 3D Printing. *Automation in Construction*, **76**, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.010>
- [29] 战场黑科技: 美军使用混凝土 3D 打印技术造营房[EB/OL]. http://military.china.com.cn/2018-09/28/content_64194167.htm?f=pad&a=true, 2018-09-28.
- [30] Neil Leach, 朱蔚然. 太空 3D 打印[J]. 建筑技艺, 2020, 26(8): 27-31.
- [31] 何凡, 李丙涛, 付佰勇. 3D 打印技术及其在公路桥梁中的应用探讨[J]. 公路, 2018, 64(2): 105-109.
- [32] 段珍华, 刘一村, 肖建庄, 丁陶. 混凝土建筑 3D 打印技术工程应用分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(18): 15-20.