

引用本文:肖建庄,柏美岩,唐宇翔,等. 中国 3D 打印混凝土技术应用历程与趋势[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(5):1-14.
XIAO Jian-zhuang, BAI Mei-yan, TANG Yu-xiang, et al. Application and Development of 3D Printed Concrete Technology in China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5): 1-14.

DOI:10.19815/j.jace.2021.02055

中国 3D 打印混凝土技术应用历程与趋势

肖建庄¹, 柏美岩¹, 唐宇翔¹, 马义和², 陈 寒², 刘浩然¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 盈创建筑科技(上海)有限公司, 上海 201799)

摘要:为了全面分析中国 3D 打印混凝土技术的研究现状,从“油墨”材料、施工工艺和应用场景等方面对 3D 打印混凝土技术的研究进展进行了回顾,从时间和逻辑 2 条线路分析了该技术的发展历程,介绍了主要的施工工艺及在建筑物和基础设施上的应用案例,并分析了 3D 打印混凝土技术在生态“油墨”材料、仿生设计、大型打印设备开发及施工工艺、3D 打印混凝土技术标准与验收规范等发展趋势。最后分析总结了目前中国 3D 打印混凝土技术所面临的问题,并结合实际应用场景给出了部分研究思路。结果表明:3D 打印材料是影响混凝土性能最根本的因素,混凝土须具有更好的流变性能,并能够在环境中快速凝固;现有 3D 打印混凝土设备还不能够完全满足不同应用环境的特殊性要求,需要在机械设计和施工流程方面进行协调开发,促进面向建筑领域新型 3D 打印设备的精细化与自动化发展;3D 打印混凝土结构和普通混凝土结构形式不同,现有的混凝土结构设计施工标准和国家规程并不适合 3D 打印混凝土技术,缺乏面向 3D 打印建筑的标准和验收规范;企业、高校和科研机构需加强合作,以工程应用为导向指引 3D 打印混凝土的研究和发展。

关键词:3D 打印混凝土;生态材料;基础设施;智能建造

中图分类号:TU741

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)05-0001-14

Application and Development of 3D Printed Concrete Technology in China

XIAO Jian-zhuang¹, BAI Mei-yan¹, TANG Yu-xiang¹, MA Yi-he², CHEN Han², LIU Hao-ran¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Yingchuang Building Technology (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201799, China)

Abstract: In order to comprehensively analyze the research status of 3D printed concrete technology in China, the research progress of 3D printed concrete technology from the aspects of ink materials, construction technology and application scenarios was reviewed, and the development process of the technology was analyzed from two aspects of time and logic. The main construction technology and application cases in buildings and infrastructures were introduced. The development trend of 3D printed concrete technology in ecological ink materials, bionic design, large-scale printing equipment development and construction technology, and 3D printed concrete technical standards and acceptance specifications were analyzed. Finally, the problems of 3D printed concrete technology in China were analyzed and summarized, and some research ideas were given combined with practical application scenarios. The results show that 3D printed

收稿日期:2021-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51325802,52078358)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

material is the most fundamental factor affecting the performance of concrete. Concrete must have better rheological properties and be able to set rapidly in the environment. The existing 3D printed concrete equipment can not fully meet the special requirements of different application environments. It is necessary to coordinate the development of mechanical design and construction process, so as to promote the refinement and automation development of new 3D printing equipment in the construction field. 3D printed concrete structure is different from ordinary concrete structure, so the existing concrete structure design and construction standards and national regulations are not suitable for 3D printed concrete technology, lacking standards and acceptance specifications for 3D printed buildings. Enterprises, universities and scientific research institutions need to strengthen cooperation to guide the research and development of 3D printed concrete oriented by the engineering application.

Key words: 3D printed concrete; ecological material; infrastructure; intelligent construction

0 引言

随着全球城市化进程加快和智能化产业的快速发展,3D 打印技术成为全球研究和应用热点^[1-4]。3D 打印又称增材制造,美国材料试验协会(ASTM)将增材技术定义为以逐层堆叠累积的方式将材料连接起来构造物体的过程^[5],即将数字化信息与实体建筑相结合,所见即所得的过程。3D 打印技术已广泛应用于机械制造、航空航天、工业设计、生物医学及建筑等领域^[4,6-9]。

3D 打印混凝土技术被认为能够改变传统建筑施工形式,可以助力建筑业转型升级^[10]。相比于传统的混凝土施工过程,3D 打印混凝土技术明显缩短施工周期,降低人工成本,减少建筑废物及对周边环境的影响,还能提升工程安全性^[11]。国内外针对 3D 打印混凝土技术的研究和综述多集中在配合比设计^[12-20],对工作性能^[21-33]和力学性能^[34-43]的要求以及测试方法^[44-47],而面向 3D 打印混凝土施工工艺及工程应用场景的研究则很少^[48-51]。近年来,中国大批科研院所及企业对 3D 打印混凝土设备、材料和工程应用进行了研究,结合国际文献的梳理,3D 打印混凝土技术的发展脉络可见图 1。中国有关 3D 打印混凝土技术的文献数量自 2016 年便居世界领先地位,逐渐成为研究热点,并成功应用于不同建筑形式。

为系统分析中国建筑行业 3D 打印混凝土技术,本文结合应用案例,对 3D 打印混凝土的油墨材料、施工工艺和应用效果等方面进行了剖析,以期对未来 3D 打印混凝土技术的发展提供参考。

1 油墨材料

建筑用 3D 打印“油墨”目前以水泥为主要胶凝

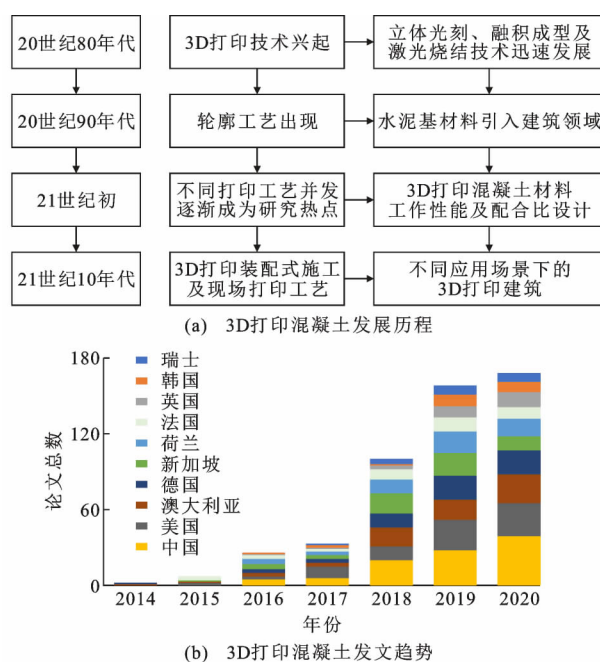


图 1 3D 打印混凝土发展历程及历年发文趋势

Fig. 1 Development History and Number of Papers About 3D Printed Concrete

材料,纤维为主要增强材料,通过添加粗、细骨料和外加剂制成,其中水泥除了应用最广的普通硅酸盐水泥外,还有硫铝酸盐水泥等^[52-53]。考虑到 3D 打印混凝土建筑是以无模板、逐层挤出并堆叠的方式建造的,所以 3D 打印建筑材料通常要满足流动性、挤出性、可建造性及开放时间等要求^[22,54-58],以保证在打印过程中不会发生屈曲和变形,且不应对人体、生物及环境造成有害的影响。

1.1 普通砂浆

用于 3D 打印的混凝土与传统混凝土不同,因其特殊的制备工艺,材料性能发生了显著变化,不能直接通过改变水灰比或胶砂比来实现,一般需要添

加可改变工作性能的化学外加剂等,通过测定不同外加剂掺量下3D打印混凝土的流变参数(静态屈服应力、动态屈服应力等),分析不同外加剂掺量对3D打印混凝土流变性能的影响,以确定3D打印混凝土的最佳配合比。众多学者针对3D打印混凝土的配合比进行了研究^[12,14,37],发现高效减水剂可以降低油墨材料的屈服应力和塑性黏度以改善其流动性,而过量的减水剂则会显著降低可建造性^[24,59]。另外,增稠剂的使用对3D打印混凝土材料性能也存在显著影响,图2为不同掺量(质量分数)增稠剂对3D打印砂浆相对屈服应力和硬化后相对抗压强度的影响,可以发现纤维素醚、纳米黏土、微晶纤维素及特种胶的掺入均可提升其初始屈服应力,但是纤维素醚的掺入会降低其硬化后抗压强度^[60-62]。Weng等^[12]对不同砂粒级配3D打印砂浆的流变性进行试验分析,结果表明 Fuller Thompson 砂粒级配理论和 Marson-Percy 模型可以作为3D打印混凝土材料流变学配合比设计的指导方法。

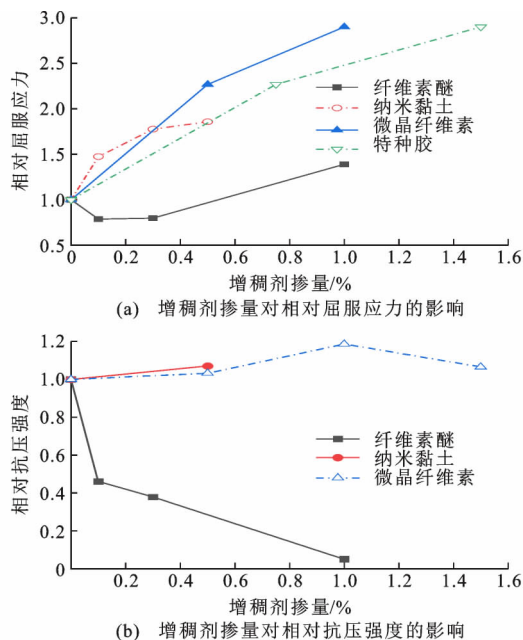


图2 不同掺量增稠剂对砂浆相对3D打印屈服应力和抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of Different Amounts of Thickener on Relative Yield Stress and Compressive Strength of 3D Printed Mortar

关于3D打印混凝土硬化后力学性能的各向异性行为, Ma等^[63]定义了一个各向异性系数 I_a 来评价,见式(1)。浇筑混凝土可近似看为各向同性材料, I_a 值为0,3D打印混凝土的 I_a 在0~1范围内,值越大说明其各向异性指标越大,不同加载方向力学性能的差别越明显。Zhang等^[25,64]制备了一种硅

酸盐水泥的3D打印材料,并对该打印材料的新拌和硬化性能进行了研究,结果表明初始黏度和初始屈服应力随着砂胶比的增大而增加,砂胶比和开放时间对3D打印混凝土的触变性有显著影响。此外,在3D打印混凝土配合比设计时,粉煤灰、硅灰、石灰石粉和高炉矿渣等均可用作辅助胶凝材料部分替代水泥^[45]。目前3D打印混凝土技术仍处于起步阶段,配合比设计方法还不统一,为了获得更好的打印性能,仍需进一步研究3D打印混凝土的配合比设计方法。

$$I_a = \sqrt{(f_x - f_c)^2 + (f_y - f_c)^2 + (f_z - f_c)^2} \quad (1)$$

式中: f_x, f_y, f_z 分别为不同加载方向下的力学强度值; f_c 为浇筑试样力学强度。

1.2 纤维砂浆

为了提高混凝土性能,众多研究者广泛采用了纤维增强混凝土的做法,如自密实纤维混凝土、超高性能纤维混凝土等,常采用掺入不同种类的纤维作为提高其韧性和强度的方法,如掺入有机纤维、钢纤维、玄武岩纤维、碳纤维、玻璃纤维和PE纤维等^[42,65-66]。在混凝土3D打印的过程中连续嵌入钢筋比较困难,许多学者通过试验发现,在3D打印混凝土中加入纤维可以减少其干燥收缩现象^[15,66-67]。Soltan等^[68]制备了纤维增强3D打印砂浆,拉伸强度接近6 MPa,6 d抗压强度可达30 MPa。Figueiredo等^[69]发现纤维增强材料会显著增加剪切屈服应力,增强打印形状稳定性。Panda等^[65]在3D打印砂浆中采用了不同长度(3, 6, 8 mm)和体积百分比(0.25%~1%)的玻璃纤维,结果表明不同长度的纤维在体积百分比增加至1%后,打印试件的力学性能均得到了改善。笔者团队利用不同掺量的12 mm PE纤维,显著提高了3D打印砂浆试件在3个方向上的抗弯强度^[42]。通过比较不同文献Z向加载路径上3D打印纤维砂浆的抗弯强度,可知随着纤维掺量的增加,其抗弯性能逐渐改善,且均优于浇筑试样,如图3所示^[42,65,70-71],但是加入大量纤维会导致3D打印挤出时出现喷嘴阻滞现象^[63]。

1.3 再生砂浆

中国建筑固废排放量逐年增长,已占城市垃圾总量的30%~40%^[72],而天然砂石和矿物掺合料等资源日渐匮乏,将建筑固废进行合理的再生利用成为绿色发展的必要途径^[73-75]。如今3D打印技术未能全面推广的原因之一便是建筑打印材料的成本仍然较高,针对结构形式规整的建筑物,传统的浇筑方法仍具有更大的成本和质量优势,而3D打印混凝土

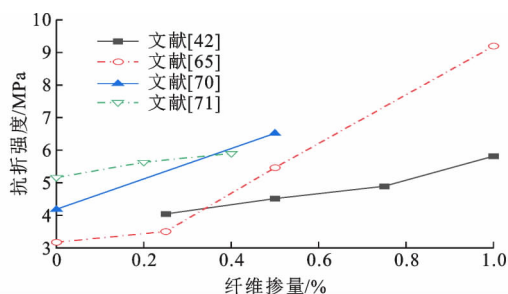


图3 纤维掺量对3D打印混凝土抗折强度的影响

Fig. 3 Effect of Fiber Contents on Flexural Strength of 3D Printed Concrete

土技术的优势则在面向形状复杂的不规整建筑构件时才更容易凸显。当利用建筑垃圾、工业垃圾和尾矿等作为主要原料来制备3D打印油墨材料时,3D打印建筑的成本可以降低^[76]。在3D打印砂浆中用再生骨料取代细骨料一般会降低其力学性能,在取代率不超过50%时,随着取代率的增加强度逐渐降低,见图4^[24,41,77-79],表1汇总了用作3D打印“油墨”的不同来源固体废弃物。笔者针对在3D打印混凝土中使用再生砂粉替代天然砂或水泥的可行性进行了研究^[40-42,80-81],结果表明再生砂粉对砂浆早期力学行为有显著影响,再生砂粉的高吸

表1 不同来源固体废弃物的物理性能

Table 1 Physical Properties of Solid Wastes from Different Sources

再生料	来源	取代材料	最大粒径/mm	吸水率/%	主要化学成分	数据来源
再生砂	废弃混凝土骨料	细骨料	0.90	15.00	SiO ₂ , CaO	文献[41]
再生粉	废弃混凝土骨料	胶凝材料	0.16	13.50	SiO ₂ , CaO	文献[77]
再生玻璃砂	废弃玻璃	细骨料	1.70	0.07	SiO ₂ , Na ₂ O	文献[78]
再生玻璃粉	废弃玻璃	胶凝材料	0.15	0.07	SiO ₂ , Na ₂ O	文献[79]
铜尾矿砂	矿山尾矿	细骨料	1.18	7.40	SiO ₂ , Fe ₂ O ₃	文献[24]

1.4 含粗骨料混凝土

当前3D打印混凝土材料研究中使用的骨料大多为粒径在5 mm以下的细骨料^[84-85],骨料粒径过大会造成喷嘴堵塞;粒径过小会使包裹骨料所需浆体的比表面积增大,单位时间内水化热偏高,导致后期干缩开裂现象明显^[45]。Mechtcherine等^[86]针对最大骨料粒径为8 mm的3D打印混凝土进行了试验研究,结果表明含粗骨料的3D打印混凝土在90 min内具有良好的可挤出性和可建造性,在最大荷载方向的力学性能与浇筑试样差距不大。图5为不同骨料粒径对砂浆相对抗压强度的影响,可以看出骨料粒径在0.1~4.75 mm范围内时,随着骨料粒径的增大,砂浆的抗压强度逐渐增大,当骨料粒径大于4.75 mm时,碎石混凝土的抗压强度反而降低;陶粒混凝土粒径越大,会使砂浆和粗骨料的界面黏

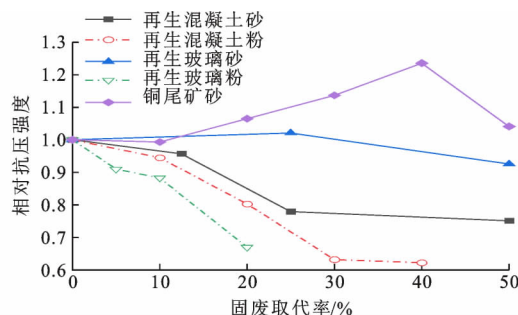


图4 不同固废取代率对3D打印砂浆相对抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of Different Solid Waste Replacement Rates on Relative Compressive Strength of 3D Printed Mortar

水率可提高其可建造性和早期强度,并减少了开放时间,但是会降低其硬化后力学性能。Ma等^[24,82]使用铜尾矿和河底污泥烧制的陶砂替代天然砂制备3D打印砂浆,研究发现随着铜尾矿砂取代率的增加,砂浆流动性增加,可建造性降低,抗压强度先上升后降低,这是因为铜矿尾砂微细颗粒为水化产物Ca(OH)₂晶体生长提供了大量新晶核,抑制其在浆体与集料界面过渡区的定向生长,改善了界面过渡区微结构,使抗折强度提高^[83],为保证砂浆的可建造性,建议铜尾矿取代率为40%。

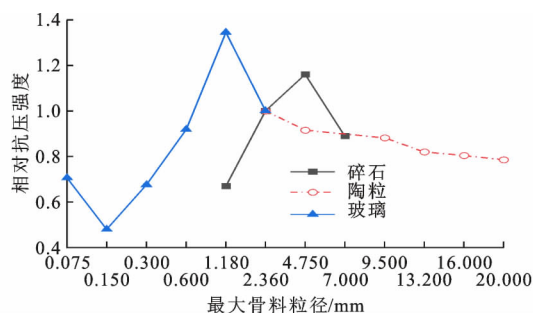


图5 不同骨料粒径对砂浆相对抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of Different Aggregate Sizes on Relative Compressive Strength of Mortar

结性能降低,形成更薄弱的界面过渡区^[87-89]。

粗骨料的加入可以降低水泥用量,加快3D打印建造速度,生产构件体积相同时所用的成本会更低,在3D打印混凝土中加入粗骨料是未来3D打印

建筑材料发展的可见趋势。

2 混凝土 3D 打印设备及施工工艺

随着智能建造技术在建筑领域的逐渐发展,目前 3D 打印建筑施工方式主要分为现场打印和装配式打印 2 种。

2.1 3D 打印设备

目前,3D 打印混凝土打印设备可分为龙门式、机械臂式和可移动式机器人三大类^[15]。龙门式打印系统是将打印喷嘴定位在 XYZ 直角坐标中,通过在建筑物所对应的不同坐标点之间来回移动进行打印,具有 3 或 4 个自由度,并且打印尺寸受到龙门式框架结构的限制。同样地,基于机械臂的混凝土打印系统也会受到机械臂长度所作用范围的限制,但是机械臂打印系统在打印过程中可保持连续的曲率变化率,在打印层之间可进行更平滑的过渡,外观也更加美观。可移动式机器人系统可分为独立机器人和多机位组合机器人系统,通过对机器人行走路径和打印路径的合理规划,以实现更为灵活和高效的打印,可具备 6 个完整的自由度。

2.2 施工工艺

2.2.1 现场打印

图 6 为建筑现场打印施工一般流程图,采用连续打印逐层叠加的方式在基础上直接将建筑主体打印成型,需提前预留设备孔洞和构造柱的位置,再进行节点连接和二次灌注混凝土,形成一体化的结构形式,未装饰的 3D 打印建筑墙体表面有着沿打印路径方向呈水平或垂直方向的纹路。现场打印钢筋配置方法可根据不同打印需求进行选择,见表 2。3D 打印混凝土技术可以根据建筑信息模型现场打印出方形、圆形以及各种不规则形状的建筑构件,还有整栋房屋^[90]。与传统施工方法相比,建筑几何结构越复杂,3D 打印技术的优势也越容易凸显^[91-92]。

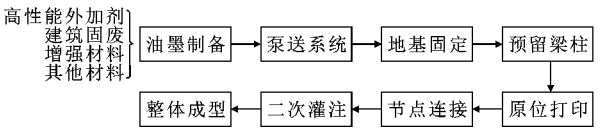


图 6 现场打印施工流程图

Fig. 6 On-site Printed Construction Flow Chart

现场打印工艺缺点是所用的打印设备尺寸一般较大,如青浦建筑群所用的打印机尺寸为 32 m×10 m×6.6 m,现场安装调试会占据较多时间;设备支撑架体尺寸加大,不仅会提高建筑制造成本,而且很难控制施工精度,影响建筑施工质量。

2.2.2 装配式打印

与传统的装配式建筑概念相似,3D 打印装配式建筑也是在工厂打印好构件和配件(如楼板、墙板、楼梯、阳台等),运输到建筑施工现场,通过绑扎、焊接等连接方式在现场进行装配安装。打印前需要在计算机信息模型中提前定义好管道和窗户等开放空间的位置和大小,同时预留拉结筋和预埋件的位置,待构件运输到现场后还需二次灌注混凝土以实现墙体连接。图 7 为 3D 打印装配式建筑施工一般流程图。为了增强打印构件的强度和抗拉性能,常在打印构件中加入钢筋形成钢混体系,墙柱和梁柱的节点连接可采用普通装配式灌浆套筒或螺栓连接等方法,打印装配式构件布置的腹杆钢筋与顶部、底部钢筋采用焊接方式进行连接,区域之间的直筋可用钢筋连接器进行连接,区域之间的弯折钢筋采用搭接方式。另外,3D 打印装配式墙体的内部结构还可以根据环境要求,按声学、机械等原理进行优化。例如,3D 打印墙体可以定制为自由形式的空腔结构,不仅可以减轻自身重量,还可以填充不同的保温或隔音等功能材料。

3 应用案例

经过多年的探索,中国 3D 打印混凝土技术在

表 2 现场打印钢筋配置方法

Table 2 Reinforcement Configuration Methods of On-site Printing

现场打印特点	控制项	配筋方式	施工方式	缺点
无人工快速打印	打印材料	掺入纤维增强法	制备不同类型短纤维砂浆	不能提供连续性增强,且仅在层沉积方向上增强,无法在层间垂直方向增强
中小型建筑打印	施工工艺	横向钢筋网法	间隔高度平铺钢筋网	人工铺设钢筋网耗时费工,且层间未铺设钢筋网处强度并未提升
建筑层间打印高度较高	施工工艺	预留空间灌注法	预留竖向钢筋孔洞,后期插入钢筋并二次灌注	非一次成型,后期灌注影响钢筋和混凝土黏结强度
建筑大规模打印	施工工艺	预装钢筋加固法	钢筋提前布置在打印空间内,待外部打印完成后进行二次灌注	钢筋位置固定限制了建筑打印过程的自由度,人工操作时间增多
无人工快速打印	打印设备	沉积层内加固法	在单层砂浆挤出时中间夹带 1 根或多根连续丝状钢筋	无法在层间垂直方向增强

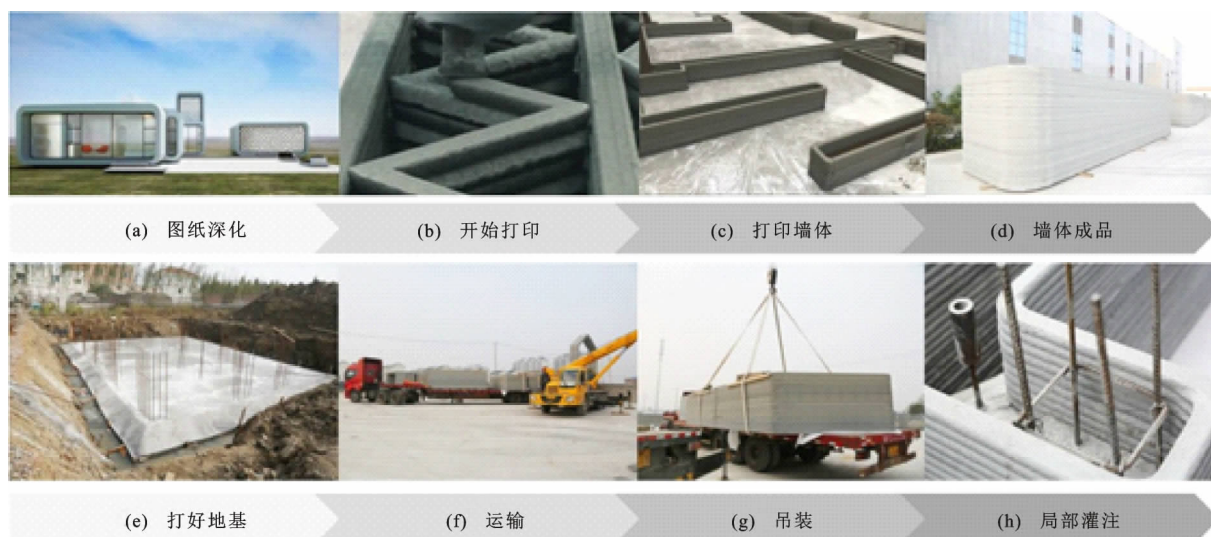


图 7 装配施工工艺流程图

Fig. 7 Assembly Construction Process Flow Chart

打印材料、设备和施工工艺方面已经实现了从 0 到 1 的突破,本文将具体讨论中国 3D 打印混凝土技术在不同应用场景下的成功案例,从油墨材料和 3D 打印施工技术、工程成本等角度的应用特点,具体介绍 3D 打印混凝土建筑的发展历程。

3.1 建筑物

3.1.1 居住建筑

2014 年,中国上海青浦园内外装一体化 3D 打印了 10 栋工程项目部用房,如图 8(a)所示。该 3D 打印建筑群采用现场打印施工方式,材料来自建筑垃圾、工业垃圾和矿山尾矿等建筑废弃物,实测抗压强度为 23.7 MPa,抗折强度为 5.3 MPa,与 C20 混凝土强度相当,且弹性模量比普通混凝土低。与传统施工方式相比,该项目利用 3D 打印混凝土技术在 24 h 内便建造了 10 间房屋,每间平均面积为 10 m²,节约建筑成本约 50%。同年在苏州,一栋建筑面积为 1 100 m² 的二层建筑在 1 d 内打印完成,如图 8(b)所示,采用装配式施工工艺,整个过程由 3 名工人在现场拼装 2 d 完成。该建筑墙体保持着原有的 3D 打印纹理,未做额外装饰和处理,节约装饰成本的同时保证了造型美观。

2015 年,基于配筋砌体标准打印完成六层住宅楼(地上 5 层,地下 1 层),如图 8(c)所示。该楼高 15 m,建筑面积约 865 m²,利用 3D 打印混凝土装配式工艺,发挥建筑模块化优势,1 d 即可打印 1 层,所用高性能材料和建筑轻量化构件打破了 3D 打印设备对建筑打印尺寸的限制,极大提升了打印质量和建造速度。缺点是现场的组装工作需花费较多的人

工和时间成本,5 d 才可安装 1 层。

图 8(d)为利用 3D 打印混凝土技术打印的防疫隔离房^[93],房屋尺寸为 3.8 m×2.4 m×2.84 m,墙体厚度为 310 mm,墙体内部空腔填充保温材料,其密封性和保温性可满足单独隔离的需要。



图 8 3D 打印居住建筑

Fig. 8 3D Printed Residential Buildings

3D 打印技术是“中国制造 2025”的重要推动力量,以上居住建筑案例均进一步验证了 3D 打印混凝土技术在建筑领域的商业价值和应用潜力^[94]。

3.1.2 公共建筑

2016 年,3D 打印混凝土办公楼在迪拜落成,为迪拜未来博物馆的办公指挥总部,如图 9(a)所示。此项目共计 17 组构件,每组分上下 2 部对称构件,有 2 种长度,其尺寸分别为 8.9 m×2.1 m×1.9 m

和 $7.74\text{ m} \times 2.1\text{ m} \times 1.9\text{ m}$, 经过远洋运输, 在现场安装完成。通过3D打印建筑技术实现复杂结构的设计, 打破建筑和结构之间的界限。该3D打印办公楼材料抗压强度达 38 MPa , 主体结构现场加载试验没有裂缝出现, 并且比传统建造形式的混凝土用量少三分之一。

2019年, 3D打印双层示范建筑 7.2 m 高的双层办公楼在中建二局广东建设基地完成现场打印, 如图9(b)所示。墙体为中空形式, 便于进一步填充和预埋以实现结构功能一体化。与传统施工工艺 60 d 工期相比, 该技术可缩短工期至 5 d , 节省约 20% 的建筑材料费和 80% 的人工, 降低 $30\% \sim 50\%$ 建造成本。

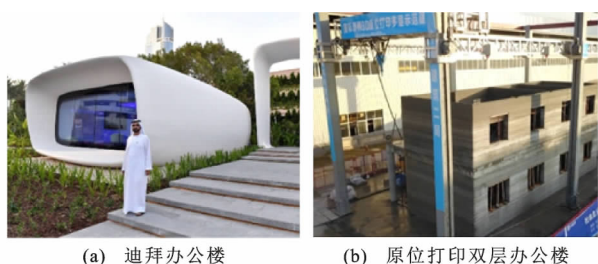


图9 3D打印公共建筑

Fig. 9 3D Printed Public Buildings

3.1.3 工业建筑

图10为利用3D打印混凝土工艺现场打印的一座配电站^[95], 房屋设计尺寸为 $12.1\text{ m} \times 4.6\text{ m} \times 4.6\text{ m}$, 采用龙门式打印系统, 该工程骨料最大粒径为 15 mm , 控制3D打印混凝土坍落度在 110 mm 左右, 加入早凝剂控制初凝时间为 $5 \sim 10\text{ min}$, 在竖直方向固定间隔处平铺钢筋网进行层间配筋。表3为实测龄期 28 d 的含粗骨料3D打印混凝土和浇筑混凝土抗压强度, 可以看出设计强度为 20 MPa 和 25 MPa 时, 浇筑试样强度为 23.8 MPa 和 28.8 MPa , 以打印方式制备的混凝土强度比浇筑试件分别低了 19.7% 和 16.3% 。

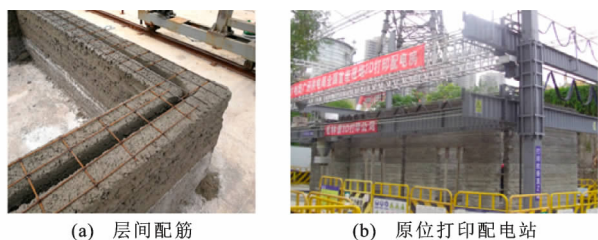


图10 3D打印配电站

Fig. 10 3D Printed Power Distribution Substation

3.2 基础设施

3.2.1 挡土墙

图11(a)为3D打印混凝土工艺制作的多功能

表3 含粗骨料3D打印混凝土抗压强度

Table 3 Compressive Strength of 3D Printed Concrete with Coarse Aggregate

设计强度/MPa	制备方式	试件尺寸	抗压强度 实测值/ MPa	抗压强度 标准偏差/ MPa
20	打印	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$	19.1	0.25
	浇筑	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$	23.8	0.16
25	打印	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$	24.1	0.30
	浇筑	$150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$	28.8	0.17

挡土墙, 经检测预留试样 28 d 抗压强度可达 40 MPa ; 抗冻性能经冻融循环 50 次后, 其强度损失小于 25% , 质量损失小于 5% 。3D打印挡土墙不仅能有效抵挡水体冲刷和土体砂石挤压, 还能在墙体上种植各种绿植或蔬菜, 起到美观装饰的效果。

3.2.2 检查井

图11(b)为3D打印检查井, 可根据实际埋深需要和井道内径进行精准打印, 墙体整体厚度为 310 mm , 经检测墙体单点吊挂力可达 $1\,200\text{ N}$, 纤维增强3D打印混凝土材料层间界面结合强度为 0.9 MPa , 不同加载方向 28 d 抗压强度至少为 30 MPa , 且整体结构为双层打印、一次成型, 杜绝污水泄漏对土体二次污染。检查井仅需在工厂打印, 运输到现场安装即可, 基于计算机信息模型的打印过程可实现井盖和检查井口精准吻合, 排除人工砌筑误差和人工放坡过程存在的潜在危险。

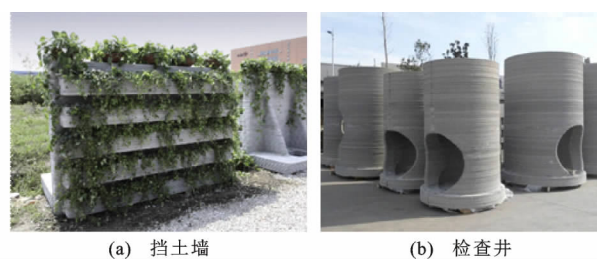


图11 3D打印构件

Fig. 11 3D Printed Constructs

3.2.3 海、河岸线

2019年, 苏州市完成3D打印河道二级护岸, 护岸结构每段长 4 m , 质量约 5 t , 如图12所示。该护岸利用装配式打印工艺完成现场吊装, 既满足了安全稳定要求, 又满足景观需求, 较同等尺寸的混凝土挡墙相比可减少三分之二以上的混凝土用量, 节约原材料的投入, 节省大量人工和材料成本。表4为3D打印河岸线与传统河岸线对比结果, 可以看出, 3D打印河岸线在工期和功能扩展等方面均有较大的优势, 可缩短传统工期的 60% 左右。

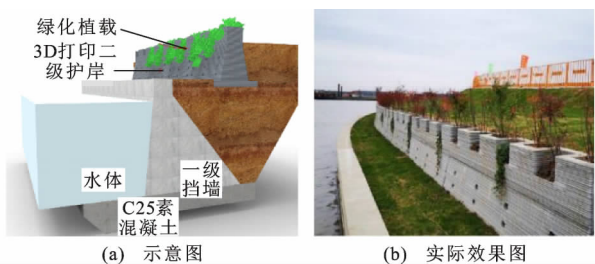


图 12 3D 打印河岸线

Fig. 12 3D Printed Riparian Lines

表 4 3D 打印河岸线与传统河岸线对比

Table 4 Comparison Between 3D Printed Riparian Line and Traditional Riparian Lines

对比项	3D 打印河岸线	传统河岸线
施工方式	3D 打印装配式建筑	混凝土现浇岸线、砌石岸线
取材	钢电厂固废、矿产尾矿、渣土、建筑固废等	传统材料,取材有限
再生性	可再生重复利用,循环打印新产品	不可再生
功能扩展性	自带绿化,可做生物洞、鱼巢等	无
日工期进度	80~100 m	18~50 m

2019 年,3D 打印步行桥在上海建成,如图 13(b)所示。该步行桥全长 26.3 m,宽 3.6 m,采用单拱结构承受荷载,拱脚间距 14.4 m,耗时 450 h 完成全部混凝土构件的打印,造价仅为普通混凝土桥梁的三分之二。该步行桥桥体由桥拱结构、桥栏板、桥面板三部分组成,桥拱主体结构由 44 块 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ 的混凝土 3D 打印构件组成。通过在打印材料中添加聚乙烯纤维和多种外加剂以调节流变性和力学性能,经检测材料抗压和抗折强度分别可达 65 MPa 和 15 MPa。

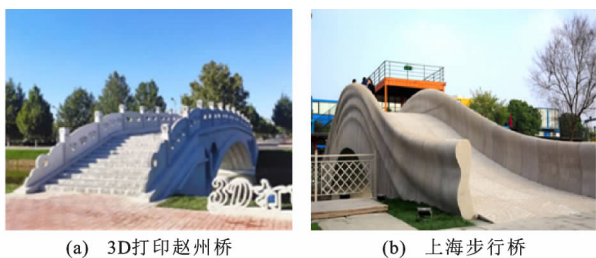


图 13 3D 打印桥梁

Fig. 13 3D Printed Bridges

3.2.5 声屏障

表 5 为 3D 打印声屏障与传统声屏障的对比情况。3D 打印声屏障采用煤化工固废等可再生资源,降噪和隔音效果出众,每天可打印 40~50 m,大幅缩短了施工周期。图 14 为 3D 打印混凝土技术在声屏障中的应用案例,分为平面型和曲面型,其尺寸分别为 $4.5\text{ m} \times 24\text{ cm}$ 和 $4.5\text{ m} \times 18\text{ cm}$,长度可根据里程数自由打印。图 14(b)为苏州绕城高速公路安装的 3D 打印曲面声屏障,采用波浪形设计,凹面

3.2.4 桥梁

图 13(a)为装配式混凝土 3D 打印的赵州桥,整个桥长 28.10 m,单拱跨度 18.04 m,桥宽 4.20 m,按照赵州桥原型 1:2 缩尺打印后在现场装配而成,为目前世界规模最大的混凝土 3D 打印步行桥。打印材料选用特种水泥基复合材料,拥有速凝快硬、水化放热低、早期强度高特性,保证桥体具有低收缩、微膨胀、高抗裂、自修复的长期工作性能,桥梁主体打印及施工未用模板和钢筋,大幅节省工程成本。

表 5 3D 打印声屏障与传统声屏障对比

Table 5 Comparison Between 3D Printed and Traditional Noise Barriers

对比项	3D 打印声屏障	木丝声屏障	亚克力声屏障
降噪参数	8.3~9.5 dB	3.6~4.9 dB	2.9~4.5 dB
隔音参数	28~32 dB	12~18 dB	10~15 dB
耐久性	50 年	5~10 年	8~12 年
防火等级	A1	B1	B1
安装工期	$40 \sim 50\text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$	$18 \sim 30\text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$	$25 \sim 35\text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$

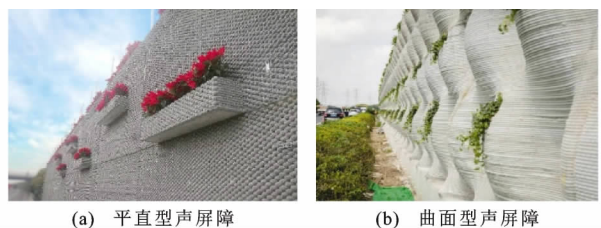


图 14 3D 打印声屏障

Fig. 14 3D Printing of Noise Barriers

的波谷会将声音聚集在一个特定的区域并产生延时反射,而突起的波峰可将声波向多个不同方向传播,波峰与波谷相融合,便可将噪声沿不同方向消散,隔音效果是传统降噪结构的 2 倍~3 倍。

4 发展趋势分析

4.1 生态材料制备打印油墨

中国科学技术协会 2019 年 6 月发布的重大科学问题和工程技术难题当中,第 8 项为废弃物资源生态安全利用技术集成^[96],通过引导工农业废弃物资源循环利用产业链和价值链提升,以实现生产清

洁化、利用安全化等。建筑3D打印技术具有节能环保、节省材料等优势,是一种理想的绿色施工方法。二者的结合有利于推进传统建筑行业绿色转型,构建高效、清洁、低碳、生态、环保、循环的绿色建造体系。

4.2 仿生设计

在数字化技术的支撑下,3D打印混凝土技术可按需、现场或场外、定制和自动化制造进行复杂结构设计,将其应用在建筑领域当中,应当充分利用其能帮助完成各种复杂设计的可能性。仿生学作为产品尺寸仿生设计的基础,以模仿生物系统的功能原理和行为特征来构造技术系统,将自然、社会中优越的系统性能应用到人造系统中去,提高产品设计中的外形、功能、结构等设计要素^[97]。仿生学和生物灵感的原理可能是这方面的关键所在,因为它们提供了设计新型结构的背景,包括优化的材料、定制的机械和其他性能、实现多功能的可能性和更高的可持续性^[98-99]。

4.3 设备与工艺

关于3D打印建筑施工工艺,工厂预制构件打印工艺已相对较为成熟。由于现有打印设备和打印程序的限制,导致原位打印仍然面临许多技术难题,3D打印建筑楼层高度多为1或2层^[100]。此外,受3D打印喷嘴直径影响,目前3D打印材料以砂浆为主,粗骨料混凝土的应用则较为有限。因此,大型3D打印设备和配套输送装置仍需进一步优化以匹配不同的工程特点。

4.4 标准与验收

因3D打印结构构件普遍存在结构强度较低、施工冷缝等问题,其不仅要满足外观要求,更需要对材料的选用、构件设计、承载力、防火性、保温性能、耐久性、工程验收安全评定方法等进行综合考量。在3D打印建筑技术方面,中国已有企业根据打印性能要求和施工技术制定了企业标准,如《建筑用3D打印油墨》、《建筑用3D打印墙板》和《3D打印检查井》等上海市企业标准;也有在编的国家级规程,如《3D打印混凝土材料性能试验方法》及《3D打印混凝土基本力学性能试验方法》等。验收规范仍沿用现有结构验收规范,如3D打印66 m以下建筑验收采用《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[101]、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[102]和《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2015)^[103]。以上新编规程主要针对材料特性及力学性能试验方法,而3D打印混凝土技

术的应用最终是以可打印不同结构形式的可靠建筑为目的,还需通过大量的应用积累和结构性能试验来制订相关的质量、技术、验收标准体系。

5 结 语

(1)3D打印材料是影响混凝土性能最根本的因素,从原材料的角度出发,研究和开发新的3D打印高性能材料仍是推动其建筑应用较为重要的研究课题之一。为满足3D打印的要求,混凝土须具有更好的流变性能,并能够在环境中快速凝固,也需考虑到不同骨料的粒径要求,以保证所有材料有效地黏结在一起,为此需要研发不同的化学外加剂。同时,在3D打印混凝土配合比设计中建议多利用建筑固废材料,不仅可以降低3D打印建筑成本,还有巨大的环境效益,有利于推动建筑领域可持续绿色发展。

(2)目前3D打印建筑施工工艺主要有整体现场打印和装配式施工两大类,用于建筑的3D打印机必须保证精度和高度集成,现有3D打印混凝土设备还不能够完全满足不同应用环境的特殊性要求。同时,如何解决钢筋在建造过程中的一体化打印问题,仍然需要在机械设计和施工流程方面进行协调开发,以促进面向建筑领域新型3D打印设备的精细化与自动化发展。

(3)3D打印混凝土结构和普通混凝土结构形式不同,现有的混凝土结构设计施工标准和国家规程并不适合3D打印混凝土技术,还缺乏面向3D打印建筑的标准和验收规范,仍需要学者和机构加快推进规程定制工作,从而加快中国建筑产业现代化发展步伐。

(4)中国3D打印混凝土技术在建筑领域的发展仍处于前期,部分高新技术企业在工程应用中走在行业前列。为进一步发挥3D打印混凝土技术优势,提升应用水平,实现建筑业高效、绿色、产业化发展,企业、高校和科研机构需加强业内合作,以研究成果为基础共同促进3D打印工程应用规模化,以工程应用为导向指引3D打印混凝土研究和发展。

参考文献:

References:

- [1] LABONNOTE N, RONNQUIST A, MANUM B, et al. Additive Construction: State-of-the-art, Challenges and Opportunities[J]. Automation in Construction, 2016, 72: 347-366.
- [2] DAMME V H. Concrete Material Science: Past, Pres-

- ent, and Future Innovations[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 5-24.
- [3] WANGLER T, LLORET E, REITER L, et al. Digital Concrete: Opportunities and Challenges[J]. *RILEM Technical Letters*, 2016, 1: 67-75.
- [4] WANGLER T, ROUSSEL N, BOS F P, et al. Digital Concrete: A Review[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105780.
- [5] ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies[S].
- [6] WU P, WANG J, WANG X Y. A Critical Review of the Use of 3-D Printing in the Construction Industry[J]. *Automation in Construction*, 2016, 68: 21-31.
- [7] MELCHELS F P W, DOMINGOS M A N, KLEIN T J, et al. Additive Manufacturing of Tissues and Organs[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(8): 1079-1104.
- [8] SCHUTTER G D, LESAGE K, MECHTCHERINE V, et al. Vision of 3D Printing with Concrete — Technical, Economic and Environmental Potentials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 25-36.
- [9] Anon. A Third Industrial Revolution[J]. *The Economist*, 2012, 403(8781): 1-5.
- [10] SANJAYAN J G, NAZARI A, NEMATOLLAHI B. 3D Concrete Printing Technology[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [11] MELIA J L, MEARNS K, SILVA S A, et al. Safety Climate Responses and the Perceived Risk of Accidents in the Construction Industry[J]. *Safety Science*, 2008, 46(6): 949-958.
- [12] WENG Y W, LI M Y, TAN M J, et al. Design 3D Printing Cementitious Materials via Fuller Thompson Theory and Marston-Percy Model[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 600-610.
- [13] YAHIA A. Shear-thickening Behavior of High-performance Cement Grouts — Influencing Mix-design Parameters[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3): 230-235.
- [14] BENTZ D P, FERRARIS C F, GALLER M A, et al. Influence of Particle Size Distributions on Yield Stress and Viscosity of Cement-fly Ash Pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 404-409.
- [15] 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.
- [16] LEDIGA R, KRUGER D. Optimizing Concrete Mix Design for Application in 3D Printing Technology for the Construction Industry[J]. *Solid State Phenomena*, 2017, 263: 24-29.
- [17] RAHUL A V, SANTHANAM M, MEENA H, et al. 3D Printable Concrete: Mixture Design and Test Methods[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 97: 13-23.
- [18] MALAEB Z, HACHEM H, TOURBAH A, et al. 3D Concrete Printing Machine and Mix Design[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2015, 6(6): 14-22.
- [19] LIU Z X, LI M Y, WENG Y W, et al. Mixture Design Approach to Optimize the Rheological Properties of the Material Used in 3D Cementitious Material Printing[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 198: 245-255.
- [20] KHELIFI H, PERROT A, LECOMPTE T, et al. Design of Clay/Cement Mixtures for Extruded Building Products[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(6): 999-1010.
- [21] PERROT A, RANGEARD D, PIERRE A. Structural Built-up of Cement-based Materials Used for 3D-printing Extrusion Techniques[J]. *Materials and Structures*, 2015, 49(4): 1-8.
- [22] PANDA B, UNLUER C, TAN M J. Extrusion and Rheology Characterization of Geopolymer Nanocomposites Used in 3D Printing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107290.
- [23] NERELLA V N, NATHER M, IQBAL A, et al. In-line Quantification of Extrudability of Cementitious Materials for Digital Construction[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 95: 260-270.
- [24] 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.
- [25] ZHANG Y, ZHANG Y S, SHE W, et al. Rheological and Harden Properties of the High-thixotropy 3D Printing Concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 278-285.
- [26] MOSTAFA A M, YAHIA A. New Approach to Assess Build-up of Cement-based Suspensions[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 85: 174-182.
- [27] REITER L, WANGLER T, ROUSSEL N, et al. The Role of Early Age Structural Build-up in Digital Fabrication with Concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 86-95.

- [28] ZHANG C, HOU Z Y, CHEN C, et al. Design of 3D Printable Concrete Based on the Relationship Between Flowability of Cement Paste and Optimum Aggregate Content[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103406.
- [29] NGUYEN V H, REMOND S, GALLIAS J L. Influence of Cement Grouts Composition on the Rheological Behaviour[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 292-300.
- [30] ROUSSEL N. Rheological Requirements for Printable Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 112: 76-85.
- [31] KRUGER J, ZERANKA S, ZIJL G V. An ab Initio Approach for Thixotropy Characterisation of (Nanoparticle-infused) 3D Printable Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 372-386.
- [32] ROUSSEL N, OVARLEZ G, GARRAULT S, et al. The Origins of Thixotropy of Fresh Cement Pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(1): 148-157.
- [33] ZHANG D W, WANG D M, LIN X Q, et al. The Study of the Structure Rebuilding and Yield Stress of 3D Printing Geopolymer Pastes[J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 575-580.
- [34] ALCHAAR A S, AL-TAMIMI A K. Mechanical Properties of 3D Printed Concrete in Hot Temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 120991.
- [35] AL-QUTAIFI S, NAZARI A, BAGHERI A. Mechanical Properties of Layered Geopolymer Structures Applicable in Concrete 3D-printing[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 690-699.
- [36] FENG P, MENG X, CHEN J F, et al. Mechanical Properties of Structures 3D Printed with Cementitious Powders[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 486-497.
- [37] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Hardened Properties of High-performance Printing Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(3): 558-566.
- [38] WOLFS R J M, BOS F P, SALET T A M. Early Age Mechanical Behaviour of 3D Printed Concrete: Numerical Modelling and Experimental Testing[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 106: 103-116.
- [39] PANDA B, LIM J H, TAN M J. Mechanical Properties and Deformation Behaviour of Early Age Concrete in the Context of Digital Construction[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 165(15): 563-571.
- [40] XIAO J Z, ZOU S, YU Y, et al. 3D Recycled Mortar Printing: System Development, Process Design, Material Properties and On-site Printing[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101779.
- [41] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Hardened Properties of Layered 3D Printed Concrete with Recycled Sand[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 113: 103724.
- [42] XIAO J Z, LIU H R, DING T. Finite Element Analysis on the Anisotropic Behavior of 3D Printed Concrete Under Compression and Flexure[J]. Additive Manufacturing, 2021, 39: 101712.
- [43] 孙晓燕, 乐凯笛, 王海龙, 等. 挤出形状/尺寸对3D打印混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1313-1320.
- SUN Xiao-yan, LE Kai-di, WANG Hai-long, et al. Influence of Extruded Strip Shape and Dimension on the Mechanical Properties of 3D Printed Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1313-1320.
- [44] RAHUL A V, M. SANTHANAM, MEENA H, et al. Mechanical Characterization of 3D Printable Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116710.
- [45] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. A Review of 3D Printed Concrete: Performance Requirements, Testing Measurements and Mix Design[J]. Construction and Building Materials, 2020, 273: 121745.
- [46] 侯泽宇, 张宇, 张超, 等. 3D打印混凝土力学性能试验方法[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 1-5.
- HOU Ze-yu, ZHANG Yu, ZHANG Chao, et al. Test Method for Mechanical Properties of 3D Printed Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(11): 1-5.
- [47] MA G W, WANG L. A Critical Review of Preparation Design and Workability Measurement of Concrete Material for Largescale 3D Printing[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12(3): 382-400.
- [48] LU B, WENG Y, LI M, et al. A Systematical Review of 3D Printable Cementitious Materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 477-490.
- [49] KHOSHNEVIS B. Automated Construction by Contour Crafting — Related Robotics and Information Technologies[J]. Automation in Construction, 2004, 13(1): 5-19.
- [50] ZHANG J C, WANG J, DONG S, et al. A Review of the Current Progress and Application of 3D Printed Concrete[J]. Composites Part A: Applied Science and

- Manufacturing, 2019, 125: 105533.
- [51] SOUZA M T, FERREIRA I M, DE MORAES E G, et al. 3D Printed Concrete for Large-scale Buildings: An Overview of Rheology, Printing Parameters, Chemical Admixtures, Reinforcements, and Economic and Environmental Prospects[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101833.
- [52] KHALIL N, AOUAD G, CHEIKH K E, et al. Use of Calcium Sulfoaluminate Cements for Setting Control of 3D-printing Mortars[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 382-391.
- [53] PERROT A, RANGEARD D, PIERRE A. Structural Built-up of Cement-based Materials Used for 3D-printing Extrusion Techniques [J]. Materials and Structures, 2015, 49(4): 1-8.
- [54] PANDA B, TAN M J. Rheological Behavior of High Volume Fly Ash Mixtures Containing Micro Silica for Digital Construction Application [J]. Materials Letters, 2018, 237: 348-351.
- [55] CHEN M, LI L, ZHENG Y, et al. Rheological and Mechanical Properties of Admixtures Modified 3D Printing Sulphoaluminate Cementitious Materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 601-611.
- [56] PERROT A, MELINGE Y, RANGEARD D, et al. Extrusion Criterion for Firm Cement-based Materials [J]. Applied Rheology, 2009, 19(5): 53042-53048.
- [57] 霍亮, 蔺喜强, 李小龙, 等. 基于沙漠砂的 3D 打印砂浆性能研究及应用[J]. 混凝土, 2020(12): 108-110, 117.
HUO Liang, LIN Xi-qiang, LI Xiao-long, et al. Research and Application of Performance Based on Desert Sand 3D Printed Mortar [J]. Concrete, 2020(12): 108-110, 117.
- [58] 王海龙, 汪群, 孙晓燕, 等. 基于工作性能的 3D 打印 PVA 纤维混凝土配合比优化设计[J]. 混凝土, 2020(11): 93-95.
WANG Hai-long, WANG Qun, SUN Xiao-yan, et al. Optimization Design of 3D Printing PVA Fiber Concrete Mix Ratio Based on Work Performance [J]. Concrete, 2020(11): 93-95.
- [59] MALAEB Z, HACHEM H, TOURBAH A, et al. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design[J]. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2015, 6(6): 14-22.
- [60] FIGUEIREDO S C, COPUROGLU O, SCHLANGEN E. Effect of Viscosity Modifier Admixture on Portland Cement Paste Hydration and Microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 818-840.
- [61] MA S, QIAN Y, KAWASHIMA S. Experimental and Modeling Study on the Non-linear Structural Build-up of Fresh Cement Pastes Incorporating Viscosity Modifying Admixtures[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108: 1-9.
- [62] LONG W J, TAO J L, LIN C, et al. Rheology and Buildability of Sustainable Cement-based Composites Containing Micro-crystalline Cellulose for 3D-printing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118054.
- [63] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Mechanical Anisotropy of Aligned Fiber Reinforced Composite for Extrusion-based 3D Printing [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 770-783.
- [64] ZHANG Y, ZHANG Y, LIU G, et al. Fresh Properties of a Novel 3D Printing Concrete Ink[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 263-271.
- [65] PANDA B, PAUL S C, MING J T. Anisotropic Mechanical Performance of 3D Printed Fiber Reinforced Sustainable Construction Material[J]. Materials Letters, 2017, 209: 146-149.
- [66] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed Fiber-reinforced Portland Cement Paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 79: 62-70.
- [67] KAZEMIAN A, XIAO Y, COCHRAN E, et al. Cementitious Materials for Construction-scale 3D Printing: Laboratory Testing of Fresh Printing Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 639-647.
- [68] SOLTAN D G, LI V C. A Self-reinforced Cementitious Composite for Building-scale 3D Printing[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 90: 1-13.
- [69] FIGUEIREDO S C, RODRIGUEZ C R, AHMED Z Y, et al. An Approach to Develop Printable Strain Hardening Cementitious Composites [J]. Materials and Design, 2019, 169: 107651.
- [70] 王里, 王伯林, 白刚, 等. 3D 打印混凝土各向异性力学性能研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2): 243-250.
WANG Li, WANG Bo-lin, BAI Gang, et al. Experimental Study on the Mechanical Anisotropy of 3D Printed Concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(2): 243-250.
- [71] CHRIST S, SCHNABEL M, VORNDRAN E, et al. Fiber Reinforcement During 3D Printing[J]. Materials Letters, 2015, 139: 165-168.

- [72] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008.
- [73] 孙坚,耿春雷,张作泰,等.工业固体废弃物资源综合利用技术现状[J].材料导报,2012,26(6):105-109.
SUN Jian, GENG Chun-lei, ZHANG Zuo-tai, et al. Present Situation of Comprehensive Utilization Technology of Industrial Solid Waste[J]. Materials Reports,2012,26(6):105-109.
- [74] 肖建庄,陈立浩,叶建军,等.混凝土结构拆除技术与绿色化发展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(5):1-10.
XIAO Jian-zhuang, CHEN Li-hao, YE Jian-jun, et al. Technology and Green Development of Demolition for Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2019,36(5):1-10.
- [75] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003(10):17-20,57.
XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, LAN Yang. Research on Recycled Aggregate Concrete — A Review[J]. Concrete,2003(10):17-20,57.
- [76] HAN Y L, YANG Z H, DING T, et al. Environmental and Economic Assessment on 3D Printed Buildings with Recycled Concrete[J]. Journal of Cleaner Production,2020,278:123884.
- [77] 赵世颖,李滢,康晓明,等.再生微粉混凝土抗冻性能试验研究[J].工业建筑,2020,50(11):112-118,96.
ZHAO Shi-ying, LI Ying, KANG Xiao-ming, et al. Experimental Study on Frost Resistance of Recycled Fine Powder Concrete[J]. Industrial Construction,2020,50(11):112-118,96.
- [78] TAN K H, DU H. Use of Waste Glass as Sand in Mortar: Part I — Fresh, Mechanical and Durability Properties[J]. Cement and Concrete Composites,2013,35(1):109-117.
- [79] 杨震樱,周长顺.玻璃粉对再生混凝土力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(12):3874-3880.
YANG Zhen-ying, ZHOU Chang-shun. Effect of Glass Powder on Mechanical Properties of Recycled Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(12):3874-3880.
- [80] DUAN Z H, HOU S D, XIAO J Z, et al. Rheological Properties of Mortar Containing Recycled Powders from Construction and Demolition Wastes[J]. Construction and Building Materials,2020,237:117622.
- [81] XIAO J Z, ZOU S, YU Y, et al. 3D Recycled Mortar Printed; System Development, Process Design, Material Properties and On-site Printing[J]. Journal of Building Engineering,2020,32:101779.
- [82] 马国伟,柴艳龙,王里,等.3D打印陶砂轻质混凝土的制备与力学性能测试[J].实验力学,2020,35(1):58-66.
MA Guo-wei, CHAI Yan-long, WANG Li, et al. Preparation and Mechanical Properties Testing of 3D Printed Ceramic Sand Lightweight Concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics,2020,35(1):58-66.
- [83] 肖斐,崔洪涛,陈剑雄,等.超磨细石灰石粉高强混凝土的研究[J].硅酸盐通报,2010,29(6):1303-1307.
XIAO Fei, CUI Hong-tao, CHEN Jian-xiong, et al. Study on High Strength Concrete Containing Ultra-fine Limestone Powder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2010,29(6):1303-1307.
- [84] LIN J C, WU X, YANG W, et al. The Influence of Fine Aggregates on the 3D Printed Performance [C]//XIN S X. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing,2018:012079.
- [85] EI CHEIKH K, REMOND S, KHALIL N, et al. Numerical and Experimental Studies of Aggregate Blocking in Mortar Extrusion [J]. Construction and Building Materials,2017,145:452-463.
- [86] MECHTCHERINE V, NERELLA V N, WILL F, et al. Large-scale Digital Concrete Construction — CONPrint3D Concept for On-site, Monolithic 3D-printing[J]. Automation in Construction,2019,107:102933.
- [87] 杨凤玲,嵇银行,李玉寿,等.玻璃骨料粒径对玻璃混凝土性能影响的研究[J].混凝土,2012(8):78-80.
YANG Feng-ling, JI Yin-hang, LI Yu-shou, et al. Study on the Influence of Particle Size of the Glass Aggregate on the Performance of Glass Concrete[J]. Concrete,2012(8):78-80.
- [88] 穆龙飞,冯竟竟,杨进波,等.页岩陶粒粒径对混凝土强度及热工性能影响研究[J].混凝土,2020(11):52-56.
MU Long-fei, FENG Jing-jing, YANG Jin-bo, et al. Experimental Study on the Influence of Shale Ceramic Site Size on Strength and Thermal Properties of Concrete[J]. Concrete,2020(11):52-56.
- [89] 杨悦增,邓红卫,彭剑平,等.骨料粒径对砂浆试件微观孔隙结构和单轴强度影响分析[J].采矿技术,

- 2020,20(6):27-33.
- YANG Yue-zeng, DENG Hong-wei, PENG Jian-ping, et al. Influence of Aggregate Size on Micro Pore Structure and Uniaxial Strength of Mortar Specimens [J]. Mining Technology, 2020, 20(6): 27-33.
- [90] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology [J]. Acta Astronautica, 2014, 93: 430-450.
- [91] GAO W, ZHANG Y B, RAMANUJAN D, et al. The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering [J]. Computer-aided Design, 2015, 69: 65-89.
- [92] GIBSON I, ROSEN D W, STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies[M]. New York: Springer, 2015.
- [93] 王香港, 王 申, 贾鲁涛, 等. 3D 打印混凝土技术在新冠肺炎防疫方舱中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4): 1-4, 13.
- WANG Xiang-gang, WANG Shen, JIA Lu-tao, et al. Application of 3D Printing Technology in Epidemic Prevention Cabins During the Outbreak of COVID-19[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4): 1-4, 13.
- [94] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology [J]. Acta Astronautica, 2014, 93: 430-450.
- [95] JI G C, DING T, XIAO J Z, et al. A 3D Printed Ready-mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology[J]. Materials, 2019, 12(9): 1540.
- [96] 王栋民. 固废与生态材料的未来发展(代序)[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2357-2358.
- WANG Dong-min. Future Development of Solid Waste and Ecological Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2357-2358.
- [97] HARMAN J. The Shark's Paintbrush: Biomimicry and How Nature is Inspiring Innovation[M]. Ashland: White Cloud Press, 2013.
- [98] PLESSIS A D, BABAFEMI A J, PAUL S C, et al. Biomimicry for 3D Concrete Printing: A Review and Perspective[J]. Additive Manufacturing, 2020, 38: 101823.
- [99] YANG Y, SONG X, LI X J, et al. Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials to Functional Structures [J]. Advanced Materials, 2018, 30(36): 1706539.
- [100] 文 俊, 蒋友宝, 胡佳鑫, 等. 3D 打印建筑用材料研究、典型应用及趋势展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(6): 26-29.
- WEN Jun, JIANG You-bao, HU Jia-xin, et al. Research on Materials, Typical Applications and Development Trends of 3D Printing Buildings[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(6): 26-29.
- [101] GB 50003—2011, 砌体结构设计规范[S].
- GB 50003—2011, Code for Design of Masonry Structures[S].
- [102] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [103] GB 50204—2015, 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- GB 50204—2015, Code for Acceptance of Construction Quality of Concrete Structures[S].