



第3章

3D打印技术在智能建造领域的应用

3.1 建筑工程 3D 打印定义

3.1.1 建筑工程 3D 打印技术简介

增材制造技术又称 3D 打印(3-dimensional printing)技术,与传统制造技术通过减材加工实现构件成型不同,增材制造技术以 3D 数字化模型为基础,通过计算机控制机械装置逐层堆叠打印材料构造目标结构,它可以快速制造复杂的、非标准的几何构件,大大提高了工程适用性,图 3.1 所示为传统制造与增材制造的区别。目前 3D 打印技术已广泛应用于汽车制造、航空航天、医疗应用、工业模具等领域(图 3.2)。

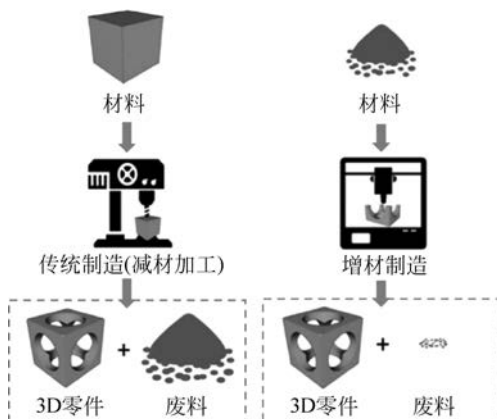


图 3.1 传统制造与增材制造的区别

传统建筑施工形式主要为混凝土结构施工,存在人工成本高、施工周期长、资源消耗高以及对周边环境影响大等问题,尤其在进行个性化、复杂造型的结构工程施工时,复杂造型模板制作和混凝土浇筑都存在困难,同时模板无法二次利用,既增加了成本又存在资源浪费,不利于建筑产业的绿色、可持续发展。增材制造作为一项新兴的高度自动化制造技术,能够很好地克服目前传统混凝土结构施工面临的这些问题。

工业 4.0 是以智能制造为主导的第四次工业革命,通过智能工厂、智能生产、智能物流等技术,将当下社会的运作效率提高到一个新高度。随着工业 4.0 建筑工业化的推广和发



图 3.2 3D 打印技术应用领域

展,建筑工程 3D 打印技术作为一种数字化、智能化、自动化的新兴制造技术,是传统建筑行业转型升级的重要途径(图 3.3)。其集成了计算机控制、数字化模型、材料成型等技术,通过数控系统对建筑材料与结构进行合理优化,规避传统建筑工业建造模式的弊端,实现经济与资源最大化的建造目标,满足建筑行业可持续发展的需求。

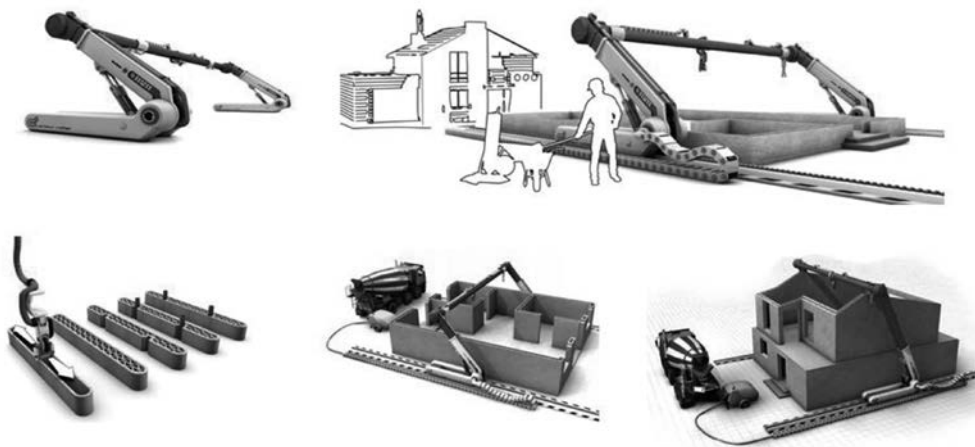


图 3.3 建筑工程 3D 打印

已有的研究表明,建筑工程 3D 打印施工可以减少 30%~60% 的建筑垃圾,降低 50%~80% 的人工成本,缩短 50%~70% 的生产时间。因此,研究和应用 3D 打印技术在土木工程领域具有重要意义。图 3.4 展示了建筑工程 3D 打印技术的发展历史,当前建筑工程 3D 打印技术已经步入高速发展时期,相关技术的研究及应用呈指数形式发展。建筑工程 3D 打

印技术在建筑行业中规模不断壮大,随着新材料、新技术、新型工程应用的不断出现,建筑工程 3D 打印技术的潜力与价值不断被发掘,为建筑行业的智能建造开创出一片广阔的新天地。

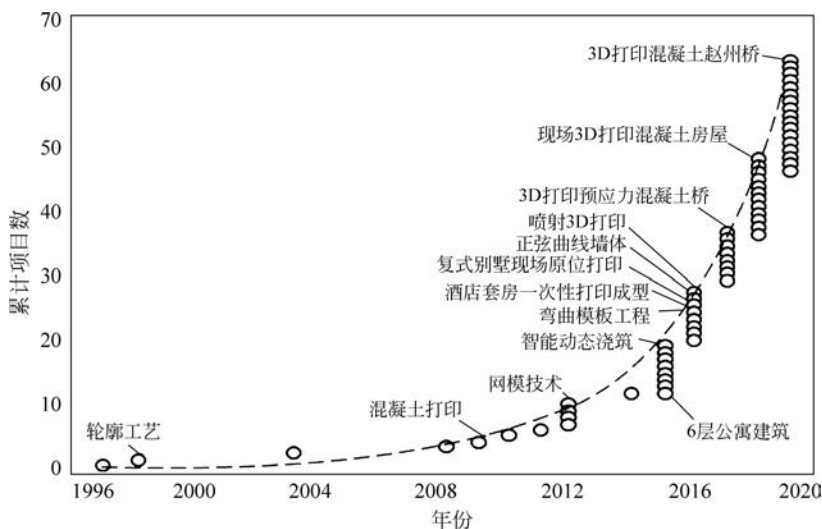


图 3.4 建筑工程 3D 打印技术的发展历史

3D 打印混凝土(3D printing concrete, 3DPC)技术是建筑 3D 打印技术的重要组成部分,20 世纪 90 年代,美国纽约伦斯勒理工学院 Pegna 首次将水泥基材料用于 3D 打印,通过选择性地交替沉积砂与波特兰水泥薄层,逐层累积砂浆并利用快速蒸汽养护的方式,打印出混凝土(砂浆)结构,该工艺充分利用了材料的性能特点,并且材料可以循环使用。虽然这项工作证明了 3D 打印技术应用于建筑领域的可行性及前景并引起强烈反响,但受限于当时的水泥混凝土技术及自动化控制技术水平等,并未能在实际工程应用中得以应用。经过近 30 年的发展,3DPC 技术已能够实现混凝土构件和结构的打印,包括低层房屋、办公室、桥梁、避难所等。

3.1.2 建筑工程 3D 打印技术分类

建筑工程 3D 打印技术作为目前建筑工程智能建造的研究热点,世界各地相当数量的科研机构及企业均积极参与其研究与应用。现阶段,建筑工程 3D 打印技术种类较多,按照成型材料可分为水泥基材料的 3D 打印和固体颗粒材料的 3D 打印,其中,3D 打印水泥基材料又可分为普通硅酸盐水泥基材料、硫铝酸盐等特种水泥基材料、碱激发类地聚物材料等;按照打印成品用途可分为房屋建筑 3D 打印、公共设施 3D 打印、景观雕塑 3D 打印等。除上述分类方式外,建筑工程 3D 打印技术还可依据成型工艺大致分为以下五类。

1. 挤出成型技术

挤出成型技术(图 3.5)是一种基于挤压的逐层建造技术,代表技术有轮廓工艺和混凝土打印技术。在建造过程中,新拌材料通过机械泵送至喷嘴随后对材料进行挤压,在材料挤出的同时,打印机根据打印模型移动打印头的位置,建造成所设计的结构构件。挤出成型技术的优点是控制和操作的系统较为简单,操作简便,相对的制造成本较低。该技术的不足之

处在于在打印悬挑结构时需要提供支撑,防止打印材料的塌陷。此外,使用该技术进行连续打印能实现的最终打印高度受打印设备的限制,无法实现较高楼层建筑结构的打印成型。

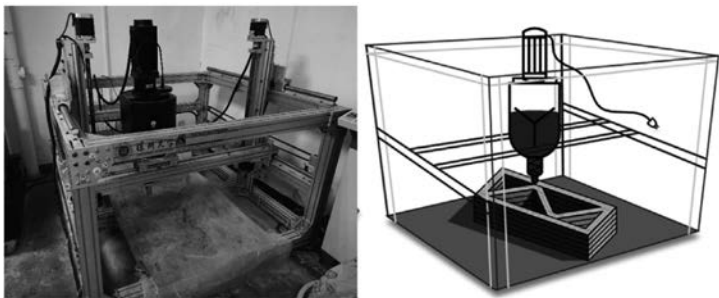


图 3.5 挤出成型技术

2. 选择沉积技术

选择沉积技术(图 3.6)是一种基于砂石粉末分层黏合叠加增材建造技术。在建造过程中,首先喷洒砂粉末并压实,通过喷挤黏结剂来选择性逐层黏结硬化砂砾粉末,清除多余的粉末,最终实现目标构件的堆积成型。选择沉积技术的优点是打印构件强度高、整体性好,可以实现中空孔洞结构和悬挑结构的打印,同时,该技术对打印材料的要求较低。该技术的不足之处在于使用打印材料的用量较大,打印过程缓慢,打印构件的尺寸受到打印设备的限制,且成本较高;此外,该技术的打印过程相对复杂,难以实现结构布筋,不适于现场施工。

3. 模具打印技术

模具打印技术(图 3.7)的代表技术为网状模具技术。模具打印技术的优点是能够植入钢筋骨架作为一种新型增强方式,同时,该技术能实现复杂异形结构的打印成型。该技术的不足之处在于打印的程序较为复杂,在打印过程中,填充材料密实度较难保证。



图 3.6 选择沉积技术

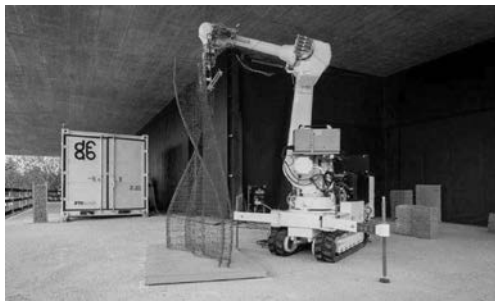


图 3.7 模具打印技术

4. 滑模成型技术

滑模成型技术(图 3.8)的代表技术为智能动态浇筑(smart dynamic casting, SDC)技术。滑模成型技术的优点是布筋方便,打印成型后的结构构件表面质量好、无分层结构。该

技术的不足之处是打印系统较为复杂、控制难度较高,无法实现悬挑结构的打印成型;同时,打印结构的尺寸也受到打印设备的限制。

5. 喷射成型技术

喷射成型技术(图 3.9)是一种基于材料喷涂混凝土构件层层堆叠的增材建造技术,代表技术为喷射 3D 打印(shotcrete 3D-printing, SC3DP)技术。在建造过程中,材料在喷嘴处通过加入受控的压缩空气来加速获得高动能,使得混凝土层能够适当压实,同时在两个连续层之间产生良好的力学黏结,最终实现喷射构件打印成型。喷射成型技术的优点是对布筋结构进行喷射打印,布筋方便;同时,通过喷射堆叠能够实现悬挑结构的打印成型,施工速度快,适用于隧道施工。该技术的不足之处是喷射成型后的结构构件精度不足、表面质量差。



图 3.8 滑模成型技术

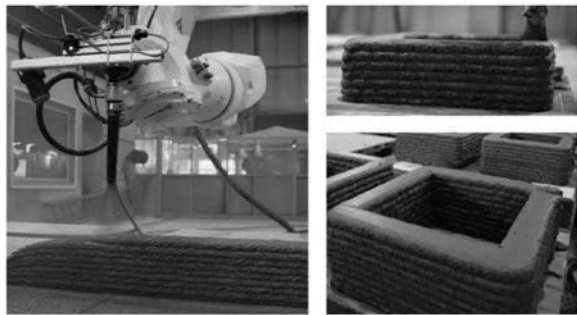


图 3.9 喷射成型技术

3.1.3 建筑工程 3D 打印设备及施工工艺

目前,混凝土 3D 打印技术在建筑工程 3D 打印的实际工程应用中占主导地位。同时,由于混凝土的打印设备与打印的最终产品质量密切相关,因此,主要介绍混凝土 3D 打印设备及施工工艺。

目前,混凝土 3D 打印设备主要分为四大类(图 3.10):第一类塔式起重机式打印系统也叫旋转臂式打印系统,以塔式起重机式打印系统为中心,通过转动同时配合机械臂的伸缩实现圆弧形结构的打印。第二类龙门架式打印系统也叫框架式打印系统,将打印喷嘴定位在空间直角坐标中,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,一般具有 3 个自由度,打印尺寸受到龙门架式框架结构的限制。第三类机械臂式打印系统也会受到机械臂长度作用范围的限制,但是该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,外观更加美观。第四类可移动式机器人打印系统可分为独立机器人和多机位组合机器人打印系统,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,具备 6 个完整的自由度。

混凝土 3D 打印的施工工艺主要分为现场打印和装配式打印。现场打印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浇筑混凝土,最终形成一体化的结构。3D 打印装配式则是在工

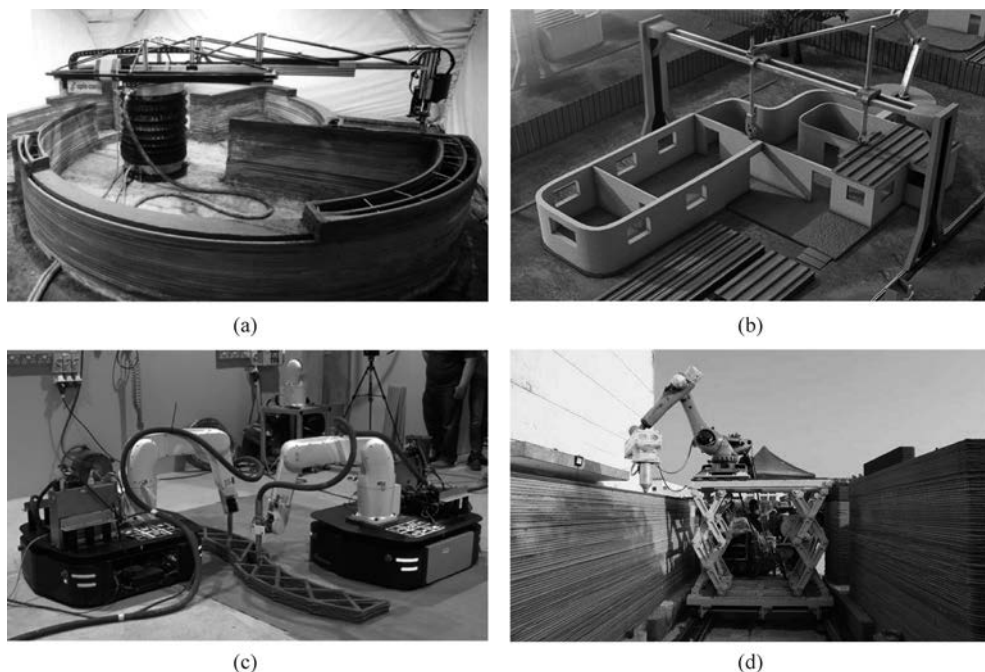


图 3.10 混凝土 3D 打印系统

(a) 塔式起重机式打印系统；(b) 龙门架式打印系统；(c) 机械臂式打印系统；(d) 可移动式机器人打印系统

厂预先打印好构件和配件,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。

3.2 建筑工程 3D 打印基本理论

3.2.1 建筑工程 3D 打印技术基本原理

建筑工程 3D 打印技术的基本原理是打印材料的逐层叠加,通过 3D 绘图软件绘制 3D 建筑模型,利用计算机获取 3D 建筑模型的形状、尺寸及其他相关信息,并对其进行切片处理,按某一方向将模型分解成具有一定厚度的层片文件,然后对层片文件进行检验或修正并进行正确的路径规划,最后由数控系统控制机械装置按照指定路径运动完成层片的加工与叠加,最终实现建筑物或构筑物的自动建造(图 3.11)。下面针对建筑工程 3D 打印技术的基本原理展开描述,主要拆分为以下三个过程。

1. 三维模型建立与近似处理

目前基本采用两种三维建模方法,第一种是根据设计需求,通过建筑参数化 3D 建模软件(如 CAD、Revit、3D Max、C4D 等)直接建模;第二种是利用逆向工程(如三维扫描等),根据现有模型进行扫描复制,通过点云数据构造出三维模型。通过三维设计软件或逆向工程得到的三维模型不能直接在快速成型系统中使用,需要用软件将三维模型导出为特定的近似模拟文件(如 STL 格式文件等),完成模型的建立与近似处理。

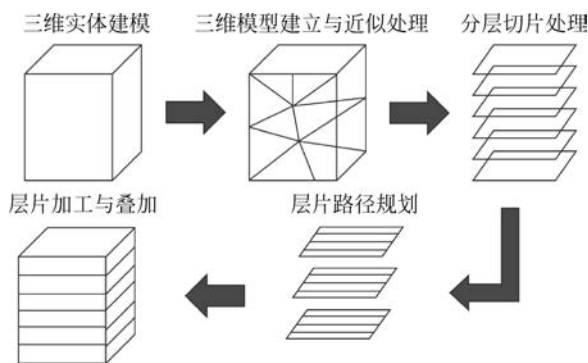


图 3.11 建筑工程 3D 打印技术基本原理

2. 模型切片处理与层片路径规划

首先将三维模型模拟文件导入建筑 3D 打印加工处理系统,输入打印层厚、打印速率、喷嘴直径等打印参数,结合加工模型特征,选择合理切片方向,用一系列等间距的平行二维模型近似拟合,完成分层切片处理;打印机械将分层得到的切片信息进行存储,并将其转化为打印喷嘴的运行填充路径,完成层片的路径规划。

3. 模型层片加工与叠加

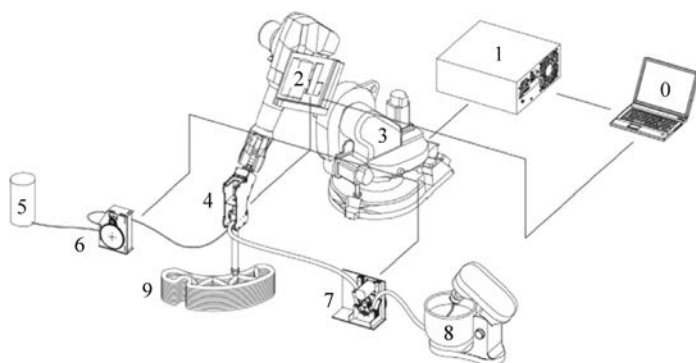
在建筑 3D 打印数控系统的控制下,打印喷头按照层片规划路径进行材料打印,材料逐层堆叠得到最终建筑产品。需要注意的是,3D 打印建筑产品的精度与切片过程中的切片层数有关,切片层数越多,建筑产品精度越高,相应的打印时间越长,效率越低。

3.2.2 混凝土 3D 打印技术原理

3D 打印混凝土的打印过程主要涉及混凝土的挤出与逐层堆叠,打印混凝土的质量控制与打印参数的选择是实现 3D 打印结构的关键环节。3D 打印技术对混凝土的质量要求较高,在打印头挤出处,混凝土就像 3D 打印机的墨水,要求混凝土能够匀质流畅地通过管道泵喷嘴系统挤出,且表面质量良好无缺陷,即确保混凝土具备一定的工作性能;混凝土挤出后,在层层堆叠的过程中,打印头产生的挤出压力与上层混凝土的重力不会导致下层混凝土产生较大变形,打印结构不出现屈曲失稳倒塌等问题,即确保混凝土具备一定的可建造性。同时,打印层厚、打印速率、喷嘴直径等打印参数是影响打印过程质量的关键因素。混凝土的新拌性能与打印参数均会影响 3D 打印混凝土结构的打印质量,打印过程中混凝土层是否会出现断料、实际打印宽度与设计宽度是否出现较大差异、挤出后是否存在较大变形等问题均需要同步协调关注,明确 3D 打印混凝土新拌性能与打印参数之间的协调关系,是实现混凝土高质量打印的前提与保证。3D 打印混凝土系统如图 3.12 所示。

3.2.3 3D 打印技术优势

当前,传统建筑行业普遍存在的技术劳动力匮乏、资源短缺、施工效率低、施工人员安全



0—系统命令；1—机器人控制器；2—打印控制器；3—机械臂；4—打印头；5—促凝剂；6—促凝剂泵；7—预混料泵；8—预混料搅拌机；9—3D打印对象

图 3.12 3D 打印混凝土系统

等问题,严重制约了行业的可持续发展。

混凝土现场浇筑技术不仅给环境带来了较为严重的破坏,还极大地浪费了人力和社会资源。此外,传统的建造模式、制造工具和建筑材料等因素限制了建筑工程生产技术,无法实现建筑工程的个性化定制、复杂建筑建造及外形独特建筑建造。目前,应用于各建筑领域的3DPC主要分为三种类型:3D打印构件、3D打印模板,以及现场整体3DPC,如图3.13所示。

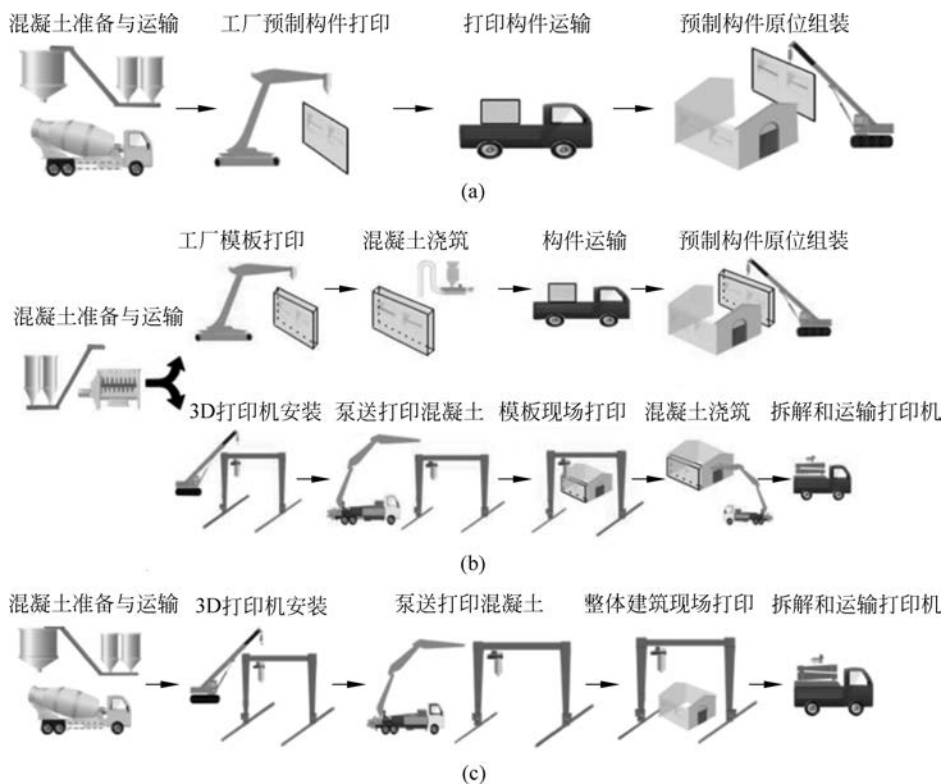


图 3.13 三种类型 3DPC 生产过程

3D 打印建筑不需要模板支护,在设计过程中免除了模板工程的设计工作,加快了设计流程;在生产过程中,不需要单独进行模板的制造,尤其是异形模板等,更不必考虑后续的模板安装、拆卸和周转问题,大大简化了生产工序。3D 打印技术机械化程度高,人工消耗量少,可以减少人力投入,节省建造原材料,降低建筑结构的建造成本,同时施工周期短、施工效率高且安全性好,能够在一定程度上缓解我国人口老龄化导致的劳动力匮乏以及施工人员雇佣成本增加对建筑行业造成的冲击。混凝土占目前世界建筑材料用量较大比重,由于其具有原材料经济易得、性能可调控及耐久性等特点,因此成为目前研究及应用最多的 3D 打印建筑材料。3D 打印混凝土不仅能像自密实混凝土那样无须振捣,还能像喷射混凝土那样便于制造复杂构件。混凝土 3D 打印技术摆脱了模具的限制,可以打印出各种曲线异形结构,满足客户的个性化定制需求,见图 3.14。同时 3D 打印混凝土建筑结构的拓扑优化使其能在满足安全、适用、耐久性能的前提下最优化材料用量,实现经济功能一体化建造。



图 3.14 3D 打印模拟莫比乌斯环房屋

3.2.4 3D 打印技术发展前景

随着城市建设的快速发展,人们对生活环境的品质和审美追求不断提升,同时随着数字技术的发展,参数化设计、非线性设计等体现时代精神的个性化设计也备受青睐。目前,3D 打印技术在航空、医疗、机械制造等领域已得到较为广泛的应用,3D 打印技术的研究和应用也已逐渐拓展至建筑领域。3D 打印技术能够有效解决传统混凝土建筑施工过程中存在的诸多问题,未来与人工智能结合后可以更加方便、智能地为设计师服务,为更多人提供舒适、自由和人性化的环境空间。其节能环保、质优高效、节省成本、施工安全、坚固耐用以及设计自由与快速呈现等方面的优势也会得到充分的体现,实现节能减排的良好发展理念。

3D 打印被认为是“具有第四次工业革命意义的制造技术”,由于 3D 打印材料的技术门槛较高,直至近年,我国 3D 打印行业才开始真正发展起来。国外的建筑 3D 打印技术起步较早,已取得较大进展,世界各地出现了诸多 3D 打印建筑项目。关于打印技术在建筑工程中的应用也出现了不少设想,由于 3D 打印技术的高度机械化,它可以应用于极端环境下的建筑建造,其中较为知名的项目是美国提出的奥林匹斯计划(图 3.15),旨在开发一种利用月球土壤作为打印材料,使用 3D 打印机和机器人打印月球栖息地的方法。

近十年来,国内对 3D 打印技术的重视程度大幅提高,3D 打印材料技术和工业化水平不断提高,不断涌现出世界领先水平的 3D 打印材料,基本形成了较为成熟的产业链,除了能打印建筑外壳,还可以打印后端的家具等物件,在上下游产业均有建树。基于建筑工程 3D 打印技术的出色优势与良好前景,国内众多科研院所和企事业单位积极投入建筑 3D 打印技术及材料的研究,推动了建筑 3D 打印技术在我国快速发展。



图 3.15 奥林匹斯月球基地渲染图

2014 年 4 月,中国盈创(上海)建筑科技有限公司首次在上海张江高新青浦园区内通过建筑 3D 打印技术打印了 10 幢建筑,截至 2020 年该公司已经利用建筑 3D 打印技术完成了别墅、公寓楼、简易房屋以及其他一些用途的结构体的打印,取得了具有影响力的成绩;2019 年 11 月,中建技术中心完成了国内首例原位两层办公楼的打印,取得了开创性的成绩;北京某建筑公司利用改进滑模工艺,墙体中设置了竖向钢筋网片,使用含粗骨料的打印混凝土,打印了别墅项目,打印成果也具有良好的示范意义。另外,辽宁某 3D 打印公司利用大型 3D 打印机,使用 C30 混凝土打印了配电房等建筑;南京某增材制造企业在 3D 打印公共设施、景观构件等方面进行了探索,取得良好进展。除此之外还有不少企业都对建筑 3D 打印设备、材料进行研究,在应用探索方面投入大量精力。

南京绿色增材智造研究院开发的南京市江北新区防疫测控方舱投入使用,防疫测控方舱高 2.9m,其平面见图 3.16。研究团队在方舱墙体的设计上,采用了 BIM 技术和模块化设计思想:将防疫测控方舱按功能划分舱室、以单元模块进行舱室构件打印,单元模块可快速安装,并可根据需求改变方舱舱室数量,由此实现快速建造并适配不同企业的具体需求。同时,在构件打印过程中,仅需工人在打印至预定高度时布设钢筋网片,混凝土打印过程无须人员干预。

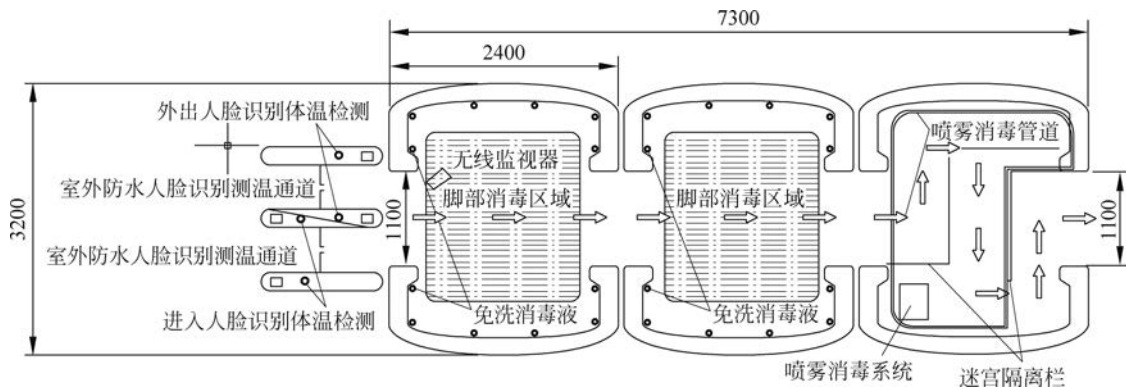


图 3.16 防疫测控方舱平面

同时,国家出台多项政策鼓励 3D 打印技术的发展。2013 年 4 月,3D 打印技术入选国家高技术研究规划。2017 年 3 月,中国工程院开展了咨询研究项目“建筑 3D 打印研发现状与发展战略研究”。2015 年 5 月,国务院正式印发《中国制造 2025》,以 3D 打印为代表的新兴技术占据重要地位。2016 年 8 月,住房和城乡建设部印发的《2016—2020 年建筑业信息化发展纲要》中提出“积极开展建筑业 3D 打印设备及材料的研究。结合 BIM 技术应用,探