

·综述·

3D 打印技术及其多领域应用研究进展

余生泉¹ 刘晨露¹ 徐翔民² 宗胡曾³ 刘保英¹ 丁涛¹ 徐元清¹ 房晓敏¹ 鲁哲宏^{1*}

(¹河南大学化学与分子科学学院 开封 475004)

(²黄河水利职业技术大学机械工程学院 开封 475004)

(³山东非金属材料研究所 济南 250031)

摘要: 3D 打印作为一种新兴的增材制造技术,通过计算机辅助设计(CAD)将虚拟模型逐层转化为实体,具有高精度加工、复杂结构构建和高度个性化定制的优势,已在多个领域展现出广泛应用。文章介绍了包括光固化成型(VPP)、熔融沉积成型(FDM)、粉末床熔融(PBF)、黏结剂喷射(BJ)、材料喷射(MJ)和分层实体制造(LOM)等主要 3D 打印技术,并分析了其在新能源环保、医疗健康、航空航天、建筑基础设施等领域的应用。文章还提出了 4D 打印作为 3D 打印的延伸技术,具备可编程形状和功能变化的特性,在柔性电子和智能驱动器等领域具有潜力。尽管当前 3D 打印面临材料性能、标准化及技术普及的挑战,未来随着技术的不断进步和跨学科融合,3D 打印将在智能制造、精准化生产等方面发挥更大作用,推动制造业的转型升级。

关键词: 3D 打印; 多领域应用; 智能制造; 成型机制; 4D 打印

Research Progress on 3D Printing Technology and Its Applications in Multiple Fields

YU Sheng-quan¹, LIU Chen-lu¹, XU Xiang-min², ZONG Hu-zeng³, LIU Bao-ying¹, DING Tao¹,
XU Yuan-qing¹, FANG Xiao-min¹, LU Zhe-hong^{1*}

(¹College of Chemistry and Molecular Sciences, Henan University, Kaifeng 475004)

(²College of Mechanical Engineering, Yellow River Conservancy Technical University, Kaifeng 475004)

(³Institute of Shandong Non-metallic Material, Jinan 250031)

Abstract: 3D printing, as an emerging additive manufacturing technology, converts virtual models into physical objects layer by layer through computer-aided design (CAD). Owing to its advantages in high-precision fabrication, complex structural construction, and highly personalized customization, it has demonstrated broad application prospects across multiple fields. This review introduces the major 3D printing technologies, including vat photopolymerization (VPP), fused deposition modeling (FDM), powder bed fusion (PBF), binder jetting (BJ), material jetting (MJ), and laminated object manufacturing (LOM), and analyzes their applications in new energy and environmental protection, healthcare, aerospace, and building infrastructure. This review also discusses 4D printing as an extension of 3D printing, highlighting its programmable shape transformation and functional adaptability, with promising potential in fields such as flexible electronics and intelligent actuators. Although 3D printing still faces challenges related to material performance, standardization, and technology dissemination, continued technological advancement and deeper interdisciplinary integration are expected to enable it to play an even greater role

河南大学高分子研究专辑;2026-02-13 收稿,2026-03-30 录用

基金项目:开封市科技发展计划项目(项目号 2501031),2026 年河南省科技攻关项目(项目号 262102230005)

* 通信联系人:鲁哲宏,E-mail: luzhehong@henu.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.075

in intelligent manufacturing and precision production, thereby driving the transformation and upgrading of the manufacturing industry.

Keywords: 3D printing; Multiple applications; Smart manufacturing; Forming mechanism; 4D printing

引用: 余生泉, 刘晨露, 徐翔民, 宗胡曾, 刘保英, 丁涛, 徐元清, 房晓敏, 鲁哲宏. 3D打印技术及其多领域应用研究进展. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.075

Citation: Yu, S. Q.; Liu, C. L.; Xu, X. M.; Zong, H. Z.; Liu, B. Y.; Ding, T.; Xu, Y. Q.; Fang, X. M.; Lu, Z. H. Research progress on 3D printing technology and its applications in multiple fields. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.075

3D打印(增材制造, Additive Manufacturing, AM)以“分层制造、逐层叠加”为核心原理, 依托CAD建模、精密控制与材料工程实现数字模型的快速实体转化, 已由原型加工拓展至功能化制造^[1-4]。随着激光成型、智能制造和数字设计的融合, 其技术体系正由“快速成型”迈向“跨场景定制与结构功能一体化”。目前, 3D打印已在新能源环保^[5-7]、医疗生物制造^[8-11]、航空航天^[12,13]、建筑与基础设施^[14,15]等领域形成多元化应用格局, 不同应用场景对材料体系、工艺路线和结构设计提出了差异化需求。同时, 4D打印等衍生方向进一步赋予构件环境响应和可编程特性, 拓展了其在智能制造领域的潜在边界。然而, 现有研究多以材料类别、打印工艺或单一行业为主线, 缺乏对多应用场景下技术体系的系统梳理。因此, 本文从技术体系角度出发, 对典型3D打印工艺及其在不同领域中的应用进行综述, 并分析当前面临的关键问题与未来发展趋势。

1 3D打印技术分类

3D打印技术日益丰富, 根据成型原理、材料状态及能量源的不同, 可以分为光固化成型(VPP)、熔融沉积(FDM)、粉末床熔融(PBF)、黏结剂喷射(BJ)、材料喷射(MJ)和分层实体制造(LOM)等方式。

1.1 光固化成型

光固化成型(VPP)是高分子3D打印中发展较早、技术成熟度较高且应用较为广泛的一类重要增材制造方法, 其基本原理是在特定波长光源照射下诱导液态光敏树脂发生聚合与交联反应, 从而实现三维结构的逐层构建。该技术起步较早, 是最早实现工业化应用的3D打印技术之一, 经过长期发展, 已形成较为完整的技术体系。根据图案成型方式和控制系统的不同, 光固化成型技术

可进一步分为立体光刻成型(SLA)、数字光处理(DLP)、液晶显示(LCD)、连续液面生产(CLIP)、多射流打印(MJP)、双光子打印(TPP)及全息3D打印等类型, 其中, SLA通过激光逐点扫描实现成型, DLP和LCD采用面曝光方式提高成型效率, CLIP通过连续液面控制进一步提升打印速度, 而TPP与全息3D打印则在微纳尺度精密制造方面表现出独特优势。

与其他高分子3D打印技术相比, VPP具有成型精度高、打印速度快、表面质量好以及复杂精细结构构筑能力强等突出优势, 因此在精密制造和个性化制造领域具有显著竞争力^[16,17]。尤其是DLP、CLIP和MJP等技术, 在分辨率、成型效率或多材料加工方面表现出明显优势; 而SLA则因工艺稳定、设备成熟, 在工业应用中仍占有重要地位。与此同时, VPP的进一步推广也受到材料体系和工艺条件的双重制约, 当前可用光敏树脂普遍存在脆性大、韧性不足、固化收缩明显、耐候性较差及生物相容性有限等问题, 限制了其在高性能结构件和长期服役场景中的应用, 树脂黏度与打印适性的矛盾、高黏度树脂难加工、支撑结构后处理复杂以及可降解、可生物相容材料不足等问题, 仍是该领域亟待突破的关键瓶颈^[16,18]。

由于VPP的技术特点和所用打印材料的局限性, 目前VPP打印技术的实际应用主要集中于对力学耐久性和使用时间要求相对较低、但对成型精度和个性化程度要求较高的领域, 尤其在牙科医学、模具制造及原型设计等方面已实现较广泛应用^[19]。未来, VPP的发展应围绕高性能光敏树脂设计、低收缩与高韧性材料开发、高黏度树脂打印工艺优化、可降解/生物相容树脂构建以及高精度、高效率、大尺寸一体化成型等方向展开, 通过材料创新与装备技术协同推进, 不断拓展其在高端制造、生物医用及功能器件制备等领域的应

用深度与广度。

1.2 熔融沉积成型

熔融沉积成型(FDM, 亦称材料挤出成型)是高分子增材制造领域中应用最广泛的代表性技术之一。该技术以热塑性聚合物为原料,通过加热喷头将其熔融后,按照预设路径逐层挤出沉积,并经层层堆叠实现三维结构的构筑^[20,21]。与光固化聚合、粉末床熔融等增材制造技术相比,FDM具有设备成本低、工艺简单、操作便捷、材料利用率高及成型过程易于控制等优点^[22],同时能够通过调节打印路径、层厚及填充密度实现复杂结构与多尺度内部构型的可控制备,因此在快速原型制造、个性化定制和结构功能一体化制件加工等方面展现出显著优势^[23~25]。

然而,FDM技术仍存在一定局限。由于其成型过程本质上属于熔体逐道沉积和层间搭接,制件内部容易形成孔隙、空隙及层间熔合不充分等缺陷,从而导致其力学性能通常低于注射成型、压缩成型等传统加工方法制备的制件^[26]。此外,FDM制件还普遍存在层间界面结合较弱、力学性能各向异性明显以及表面质量受限等问题,这在一定程度上制约了其在高性能承载结构中的应用。虽然烧结、退火等后处理手段可在一定程度上减小缺陷尺寸、改善内部结构,但孔隙缺陷通常难以完全消除,为提升成型质量与综合性能,通常可通过优化挤出速率、喷嘴温度、打印速度、平台温度及铺丝路径等工艺参数,减少内部空隙并增强层间结合,从而改善打印制件的力学性能和尺寸稳定性^[27]。

近年来,FDM技术正朝着高性能化、复合化和功能化方向不断发展。其材料体系已由早期主要局限于ABS、PLA等通用热塑性聚合物,逐步拓展至聚合物共混物、颗粒增强复合材料、短纤维增强复合材料以及连续纤维增强高分子复合体系。尤其是高性能工程塑料和连续纤维材料的引入,为显著提升FDM制件的强度、刚度及耐热性能提供了新的途径,也进一步拓宽了其在轻量化结构件、功能复合材料及高附加值部件制造中的应用范围^[28]。FDM凭借成本低、适用面广和设计自由度高等特点,已成为高分子3D打印的重要技术路线。未来,随着打印材料性能、界面调控水平及成型精度的持续提升,FDM有望在航空航天、生物医疗、智能制造及高性能复合材料制备等领

域获得更加广泛的应用。

1.3 粉末床熔融

粉末床熔融(PBF)作为增材制造领域的核心技术展现出突破传统制造的独特优势,具有极强的复杂结构制造能力,但是也受到材料、设备及工艺的固有约束。根据能量源的不同,PBF主要包括选择性激光烧结(SLS)、选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)3种工艺。

SLS是用激光选择性烧结聚合物粉末材料,通过使用激光束加热粉末颗粒,将它们表面融合在一起制造固体物体,通过粉末自身熔融黏结成型无需支撑,表现出打印高精度和高能力的优点^[29],目前已经用于聚酰胺(PA)、ABS和聚碳酸酯(PC)等多种热塑性塑料工业制造^[30,31]。在注塑模具制造领域,主要采用金属粉末结合SLM技术实现注塑模具型芯随形冷却通道的结构优化与高质量模具部件成型。该技术在冷却效率提升、模具温度均匀性改善、复杂通道结构制造能力、成型部件高密度与优异力学性能方面具有优势。

PBF对材料性能要求较高。聚合物粉末需具备合适的粒径分布、良好的球形度和流动性,以保证铺粉均匀性和成型稳定性,材料应具有较窄且适宜的烧结窗口,即结晶起始温度与熔融温度之间具有足够温度区间,以避免成型过程中出现翘曲、塌陷或层间结合不足等问题。因此,目前适用于该技术的聚合物种类相对有限,主要集中于PA12、PA11、热塑性聚氨酯(TPU)、聚醚醚酮(PEEK)、聚丙烯(PP)及部分复合粉末体系。其中,PA12因其熔融行为稳定、加工窗口宽和力学性能均衡,成为最常用的粉末床熔融成型材料;PA11来源广泛且韧性较好,在生物基和可持续制造方面具有一定优势;PEEK等高性能聚合物则因耐热性、耐腐蚀性和生物相容性优异,在高端制造领域受到关注,但其成型温度高、设备要求严格,推广应用受到一定限制。

1.4 黏结剂喷射

黏结剂喷射(BJ)是一种典型的粉末床增材制造技术,其基本原理是利用喷墨打印头按预设路径选择性喷射液态黏结剂,使粉末颗粒逐层黏结并构筑三维结构,随后经清粉、固化及后处理获得目标制件^[32]。与依赖热熔或VPP的增材制造方法不同,BJ技术通常无需外加热源,主要通过黏结剂对粉末颗粒的润湿、渗透与固结实现成型,

未黏结粉末还可兼作支撑材料,因此在复杂结构尤其是内腔、悬垂及多孔构件制造方面具有明显优势^[33]。由于其对粉末原料具有较强适应性, BJ 已成为高分子复杂构件成型中较具潜力的一类增材制造方法。

与 FDM 和 VPP 等技术相比, BJ 技术在高分子加工中具有材料适用范围广、成型效率较高和制造成本较低等优点。该技术无需对材料整体加热,可在一定程度上避免高分子材料热降解、翘曲变形及结晶异常等问题,因而尤其适用于热敏性和生物可降解高分子体系。此外,通过调控黏结剂组成及喷射参数, BJ 技术还有望实现制件局部组成与性能的可设计化。然而, BJ 技术在高分子领域的应用仍面临诸多限制,主要表现为高分子粉末流动性和铺粉均匀性不足、黏结剂与粉末间界面润湿和渗透行为复杂、通用型黏结剂适配性有限,以及后处理强化手段不足等^[34]。这些问题易导致成型精度、生坯强度和最终力学性能受限,制约了其进一步工程化应用。

总体来看, BJ 技术在高分子材料领域仍处于由工艺探索向精准成型转变的关键阶段,未来发展将主要集中于高质量专用粉末制备、匹配型黏结剂体系构建及温和后处理工艺开发等方面。通过提高粉末球形度和流动性、优化黏结剂对粉末表面的润湿与固结行为,并发展低温致密化、溶剂蒸汽调控及激光辅助熔合等后处理方法,有望进一步提升 BJ 制件的成型精度、力学性能和结构稳定性。随着原料设计、界面调控与后处理技术的持续进步, BJ 技术有望在多孔支架、轻质结构件、过滤分离材料以及功能梯度器件等领域展现更广阔的应用前景。

1.5 材料喷射

材料喷射成型(MJ)是一种通过喷头直接喷射可固化材料液滴,逐层累积形成三维结构的增材制造技术^[35]。其直接使用喷射功能性材料而不是黏结剂,又结合高精度喷头与实时固化技术,在精细结构制造领域优势比较明显,然而却受到材料性能与成本限制。压电式或热气泡式喷头将液态材料以微米级液滴精准喷射到成型平台^[36],喷射液滴接触平台后,通过紫外光、红外或热辐射即时固化,光固化树脂经紫外灯照射,完成交联固化^[37],蜡基材料则通过平台低温快速凝固^[38]。每层固化后,平台将下降一定的距离,重复喷射一

固化过程,层间通过分子间作用力或二次固化形成高强度结合。商业化 MJ 设备通常可同步喷射成型材料与水溶性支撑材料,从而满足复杂悬垂结构、内腔结构及精细特征的一体化制造需求。凭借较高的成型精度和多材料制造能力,材料喷射成型已成为精密增材制造的重要技术之一。

与 FDM、PBF 及 VPP 等增材制造技术相比, MJ 在成型精度、表面质量和多材料制造方面具有明显优势。该技术依靠微小液滴的精确沉积,可实现高分辨率成型,所得制件通常具有较高尺寸精度和较低表面粗糙度^[39]。同时,依托多喷头协同控制,可实现多种材料的同步打印,在功能梯度结构、多相复合材料及集成器件制造中具有一定优势。此外,紫外固化过程快、热输入低,因而具有较好的工艺兼容性。

然而, MJ 技术仍存在一定局限。为满足稳定喷射要求,油墨体系通常需具备较低黏度,这在一定程度上限制了材料体系的拓展,并使固化产物在力学性能和耐热性能方面往往低于光固化树脂及部分工程塑料。与此同时,自由基光固化体系普遍存在氧阻聚、固化收缩及小分子迁移等问题,限制了其在高性能结构件及生物医用等领域的应用。此外,液滴形成、铺展与固化过程较为复杂,易出现层厚不均及喷嘴堵塞等缺陷^[40];多材料打印过程中,不同材料之间的固化匹配和界面结合问题亦有待进一步解决。总体来看,材料喷射成型是一种兼具高精度和多材料制造优势的增材制造技术,已在印刷电子、生物医用和精密器件制造等领域显示出良好的应用前景。

1.6 分层实体制造

分层实体制造(LOM)是一种以片材逐层叠加与轮廓切割为基本原理的增材制造技术。其成型过程中,纸张、聚合物薄膜、金属箔或复合片材等层状材料依次铺放,并通过热压、胶接或其他方式实现层间结合,再借助激光或刀具对每层截面轮廓进行选择加工,最终获得三维实体结构。与熔融沉积成型、VPP 及 PBF 等技术相比, LOM 以片材为原料,工艺流程相对简单,尤其适用于大尺寸构件的快速制造。在高分子材料领域,该技术可用于热塑性薄膜、高分子复合片材及功能层状材料的成型,因而在高分子及其复合材料增材制造中具有一定应用基础。

LOM 技术具有成型效率高、设备成本相对较

低、材料来源广及大尺寸制件制造能力较强等优点^[2]。由于其无需对材料整体进行高温熔融,因而在一定程度上可避免部分高分子材料因热历史过强而产生降解或变形问题。此外,片材铺放方式有利于提高成型过程的稳定性,并具备一定的工程化应用潜力^[41]。然而,该技术也存在明显局限,层间结合主要依赖界面黏结或热压复合,制件厚度方向强度相对较低,易表现出显著的各向异性^[42]。另外,受片材厚度及切割精度限制,复杂细节成型能力和表面质量通常不及VPP等高精度技术,而且成型后常涉及废料剥离、边缘修整及进一步致密化处理,后处理工作量较大,从而限制了其在高精度和高性能制件中的推广应用^[43]。

未来,LOM技术的发展将主要集中于高性能片材体系开发、层间界面增强及多材料复合制造等方面。一方面,可通过引入高分子复合薄膜、连续纤维增强层材及可降解聚合物片材,拓展其在轻量化结构件、生物医用支架和功能复合材料中的应用;另一方面,结合精密切割、智能铺层及数字化结构设计,有望进一步提升成型精度与结构功能一体化水平。总体来看,尽管LOM在界面结合强度和成型精细度方面仍存在不足,但其在尺寸大、低成本和层状复合材料制造方面具有独特优势,未来在高性能复合材料快速制造领域仍具有较大的发展潜力。

为更直观地比较不同3D打印技术的成型机理与工艺特征,表1对典型打印方式的基本原理、技术特点及主要优缺点进行了归纳。总体来看,各类3D打印技术在材料适用性、成型精度、制造效率及复杂结构构筑能力等方面各具特点,因而

在不同应用场景中表现出不同的适用边界。对其进行系统比较,不仅有助于厘清各类技术的优势与局限,也可为后文不同领域应用分析提供支撑。

2 3D打印技术的应用

3D打印突破了传统建材制造在复杂结构加工和模具依赖方面的限制,能够实现复杂构件的整体成型。与传统制造方法相比,其材料利用率较高,可有效减少加工过程中的资源浪费,因而在贵金属、高性能复合材料等高价材料加工中展现出明显优势。同时,3D打印简化了制造流程,缩短了产品从设计到成型的开发周期,适用于树脂、生物墨水、混凝土等多种材料体系,已广泛应用于能源、医疗、航空航天、建筑、工业制造、消费品及食品等领域。总体来看,3D打印正推动传统制造模式向高效化、柔性化和绿色化方向发展,并在促进资源高效利用和技术创新方面发挥着重要作用。

2.1 在新能源与环保领域方面的应用

在新能源与环境治理领域,3D打印技术通过材料创新、结构与制造方式优化,为提升能源利用效率、降低资源消耗及推动绿色可持续发展提供了新的技术路径。相较于传统制造方法,3D打印能够突破复杂构型加工受限的问题,实现多孔结构、仿生界面及功能器件的精准构筑,从而在传质传热调控、界面反应强化及器件集成制造等方面展现出独特优势。同时,其按需制造的特点有助于减少模具损耗与材料浪费,在新能源器件开发和环保功能材料制备中具有重要应用潜力^[53]。

表1 典型3D打印工艺的成型原理、技术特点及优缺点比较

Table 1 Comparison of forming principles, technical characteristics, advantages and disadvantages of typical 3D printing processes

工艺类别	成型原理	技术特点	主要优点	主要缺点	参考文献
光固化成型(VPP)	光固化逐层成型	精度高,表面好,适于精细结构	成型精细,表面光滑,适合复杂结构制造	材料受限,后处理繁琐	[44, 45]
熔融沉积(FDM)	熔体挤出逐层堆积	工艺成熟,操作简便,适用面广	成本低,设备简单,材料利用率高	层间结合较弱,孔隙较多,精度一般	[27, 46]
粉末床熔融(PBF)	粉末选择性熔融/烧结	结构自由度高,复杂件成型能力强	无需支撑,适合复杂内腔结构	粉末要求高,设备昂贵,材料种类有限	[47, 48]
黏结剂喷射(BJ)	黏结剂喷射黏结粉末	适于多孔复杂结构制造	效率较高,成本较低,热损伤小	生坯强度低,后处理要求高,性能受限	[32, 49]
材料喷射(MJ)	液滴喷射固化成型	分辨率高,可实现多材料打印	精度高,表面质量好,多材料集成能力强	材料黏度受限,喷嘴易堵,成本较高	[39, 50]
分层实体制造(LOM)	片材叠层切割成型	适于大尺寸快速制造	效率较高,成本较低,材料来源广	层间强度不足,精细度较低,后处理较多	[51, 52]

在新能源领域, 3D打印已逐步应用于燃料电池、电解水制氢等体系, 并显示出良好的结构调控与功能集成优势。以FDM为代表的挤出式打印技术, 可用于构建复杂流场、多孔电极及功能支撑骨架, 从而改善反应物传输、水气管理及活性位点分布, 提高器件整体性能。例如, Trogadas等^[54]采用FDM打印肺启发式流场的聚合物电解质燃料电池(PEFC), 与传统蛇形流场相比, 其气体分布更加均匀、压降更低, 功率密度提升约30%, 表明3D打印在优化燃料电池内部传质过程方面具有明显优势。进一步地, Mert等^[55]将绿色合成纳米催化剂、3D打印蜂窝结构电极与光伏供电系统相结合, 构建了光伏辅助碱性电解制氢平台(如图1(a)所示)。结果表明, 3D打印结构不仅有助于提高催化活性位点暴露程度和传质效率, 而且显著增强了电极的析氢反应性能, 体现了3D打印

在可再生能源-氢能耦合系统中的应用前景。总体来看, 3D打印能够为新能源器件提供更高的结构设计自由度和材料集成能力, 但在高功能填料含量体系的可打印性、多材料协同成型以及规模化制备等方面仍有待进一步突破。

在环境治理领域, 3D打印则为高效太阳能界面蒸发和废水净化器件的设计制备提供了新的解决思路。通过引入仿生微结构、分级孔道和复杂界面形貌, 3D打印可有效增强光吸收、液体输运及界面蒸发过程, 从而提升器件的整体净化性能。Hu等^[56]针对现有水凝胶基太阳能蒸发器复杂功能微结构制备受限、废弃器件易造成二次环境污染的核心问题, 采用投影微立体光刻(PμSL)3D打印技术, 制备了结构可定制的可降解聚乙烯醇-聚丙烯酰胺(PVA-PAM)复合水凝胶蒸发器(如图1(b)所示), 结果表明, 水凝胶蒸发器对高盐废

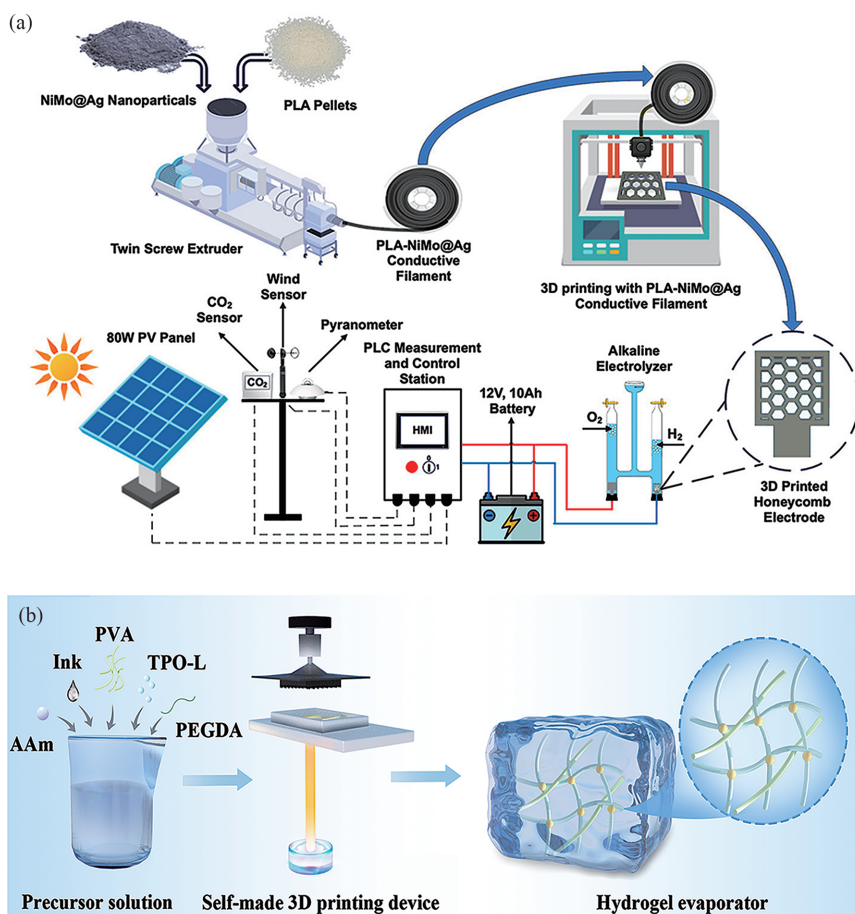


图1 (a) 3D打印结合光伏系统示意图^[55] (2025年 Elsevier Ltd. 版权许可); (b)复合水凝胶蒸发器的制作流程^[56] (2024年 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 1 (a) Schematic diagram of photovoltaic system integrated with 3D printing technology (Reprinted with permission from Ref. [55]; Copyright (2025) Elsevier Ltd.); (b) Fabrication procedure of composite hydrogel evaporators (Reprinted with permission from Ref. [56]; Copyright (2025) Elsevier Ltd.)

水、重金属离子及有机染料废水均表现出优异的净化性能。同时,该水凝胶可在碱性环境中通过酯基与酰胺基的水解反应完全降解,解决了传统蒸发器废弃后的环境负担问题,为环保型太阳能水处理高分子器件的设计制备提供了新策略,也拓展了3D打印技术在功能高分子材料与环境治理领域的应用。

3D打印在新能源与环境治理领域的应用,已由单纯的成型制造逐步发展为材料-结构-功能协同设计。其核心价值在于依托复杂结构的精准构筑与功能材料的一体化集成,实现能源转化效率提升、资源利用优化及环境负荷降低。未来,随着高性能打印材料、多材料协同制造及规模化加工技术的不断发展,3D打印有望在燃料电池、绿氢制备、太阳能水处理等可持续发展领域发挥更加重要的作用。

2.2 在医疗健康与生物制造方面的应用

面向医疗健康应用的3D打印高分子材料对生物安全性要求极高,通常需具备良好的生物相容性、无毒无刺激性,并根据具体应用场景兼具高精度、耐磨性或耐高温高压灭菌等特性。与传统医疗器械及植入物制造方法相比,3D打印技术

能够依托数字化设计实现复杂结构的精准构筑和个性化定制,为医疗器件、组织工程支架及再生医学植入物的制备提供了新的技术途径。

骨组织工程与再生医学领域,PLA、聚己内酯(PCL)、聚羟基丁酸酯(PHB)以及多糖类、蛋白质类生物材料因具有良好的生物相容性和可降解性,已成为3D打印医疗支架的重要材料体系,并常结合FDM、DLP及3D生物打印等技术实现复杂结构构建。Hedayati等^[57]采用PCL结合FDM技术,制备了连续聚乙醇酸(PGA)缝合线增强的骨组织工程支架(如图2(a)所示),结果表明,该支架在保持较高孔隙率和良好结构稳定性的同时,其降解速率较纯PCL支架显著提高,在10周内的降解性能得到明显优化,研究人员认为通过3D打印实现支架宏微观结构与降解行为的协同调控,可能是提升组织工程支架适配性的关键途径之一。除传统可降解热塑性高分子外,具有刺激响应特征的光敏树脂体系也为医疗植入物的智能化设计提供了新方向。Dos Santos等^[58]针对现有生物材料降解速率与组织再生过程不匹配的问题,开发了一类可被活性氧(ROS)触发降解的硫缩酮(TK)光敏树脂,并利用DLP 3D打印技术制备出

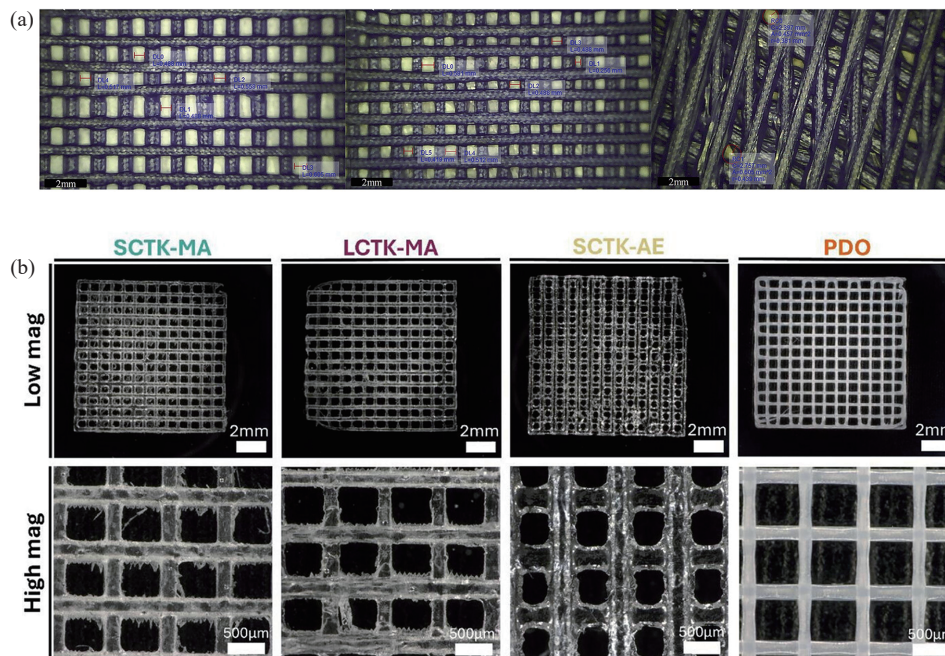


图2 (a)采用PCL结合FDM技术,制备含连续PGA缝合线增强的骨组织工程支架^[57](2020年Elsevier Ltd. 版权许可); (b)3种TK光固化树脂通过DLP技术所打印的支架^[58](2025年Wiley-VCH GmbH. 版权许可)

Figure 2 (a) Bone tissue engineering scaffolds reinforced with continuous PGA sutures, fabricated by FDM using PCL (Reprinted with permission from Ref. [57]; Copyright (2020) Elsevier Ltd); (b) Scaffolds printed by DLP using three TK photocurable resins (Reprinted with permission from Ref. [58]; Copyright (2025) Wiley-VCH GmbH.)

具有可调机械性能和氧化敏感性的精细支架(如图2b所示)。研究表明,该类支架不仅具有良好的生物相容性和细胞介导降解能力,而且在植入早期能够促进更快的组织浸润,表现出较好的再生医学应用潜力。与传统聚酯类材料相比,此类智能响应性树脂能够更好地适应复杂生理微环境,为构建兼具结构精度与生物功能的再生医学植入物提供了新的解决方案。

在复合生物材料支架方面,多组分协同设计有助于兼顾机械性能、打印适性与生物活性。Amini等^[59]针对传统骨移植存在的供体不足、疾病传播及免疫排斥等问题,采用羧甲基壳聚糖(CMC)与PCL共混制备复合材料,并通过FDM技术构建不同CMC含量的骨组织工程支架。其中CMC含量为5%和15%时支架综合性能较优,而30%时则因材料脆性增大导致打印性能下降。研究结果显示,借助3D打印技术可实现复合支架组成与结构的精准调控,从而为骨缺损修复提供兼具生物相容性、力学支撑及成骨活性的个性化支架方案。

3D打印技术在医疗健康领域的应用,已由单纯满足个体化成型需求逐步转向生物材料、结构设计及功能调控协同优化的发展阶段。可降解热塑性高分子、刺激响应性光敏树脂及多组分复合材料的不断发展,使得医疗支架和植入物在结构精度、降解行为、力学性能及生物活性等方面均获得了显著提升。未来,随着高性能生物材料开发、打印精度提高及临床转化研究的深入,3D打印将在骨修复、软骨再生、组织工程及个性化医疗器械等领域展现更广阔的应用前景。

2.3 在航空航天工程方面的应用

在航空航天领域,相比于传统技术的部件制造过程,3D打印技术能够减少多工序加工、转运定位及装配连接所带来的误差累积问题,并有助于提升复杂构件的一体化成型能力和制造灵活性。因此,该技术在轻量化结构、高性能复合构件及复杂功能部件制备等方面展现出重要应用潜力,为航空航天器向更轻量、更可靠和更高适应性方向发展提供了新的技术支撑。

在多材料轻量化结构制造方面,3D打印为异质材料直接连接与夹层复合结构一体化制备提供了新的解决方案。传统金属-高分子复合结构通常依赖中间黏结层或复杂键合工艺,不仅工艺流

程繁琐,而且界面结合性能易受限制。针对这一问题,Shirasu等^[60]基于熔融挤出成型3D打印技术,开发了短碳纤维增强PA6热塑性复合材料与Ti6Al4V钛合金的无中间层直接黏结工艺。研究表明,通过基板表面粗化及热板加热处理,可实现热塑性复合材料与金属基体之间的有效熔融结合,且界面剪切强度随融合时间延长而显著提高,说明该方法在多材料异质结构高结合力制造方面具有明显优势。同时,3D打印在夹层吸能结构设计中同样表现出良好的结构优化潜力,Acanfora等^[61]采用PP芯层、内部面板及碳纤维增强聚合物(CFRP)外层面板,结合熔融丝材制造技术构建轻量化夹层结构,并通过调控填充率和铺设方式实现构型优化。结果表明,与全填充基准结构相比,交替低填充构型在实现显著减重的同时,仍保持较高吸能能力和比吸能水平,表明3D打印能够通过内部拓扑设计有效协调结构轻量化与力学性能之间的关系。此外,一体化打印策略还在一定程度上缓解了传统夹层结构中易发生的层间脱黏问题。

除轻量化复合结构外,3D打印在航空航天复杂功能构件制造中也展现出独特优势。航空航天领域对材料和构件性能要求极为苛刻,不仅要求材料具备轻质高强特征,还需兼具耐高温、抗腐蚀及高可靠性等性能。然而,许多高性能聚合物及复合材料由于存在脆性较高、加工困难等问题,在传统制造条件下应用受到限制。借助3D打印技术,可实现复杂几何构件和定制化部件的快速制造,在火箭发动机相关部件、燃油箱、环境控制系统管路、飞机内饰部件及无人机构件等方面均展现出应用前景。目前,在航空航天原型件及部分功能部件制备中,常用材料包括ABS、PA12及碳纤维增强热塑性复合材料,所采用的技术主要涉及FDM和SLM等^[62]。通过数字化设计与快速迭代制造,3D打印不仅可缩短研发周期,还可提高复杂部件制造的可控性与适配性,从而为航空航天结构件的高效开发提供支持。

3D打印技术在航空航天领域的应用已由早期的原型验证逐步拓展至轻量化承载结构、多材料连接构件及复杂功能部件制造等多个方向。其核心优势在于能够通过数字化建模与结构设计自由度提升,实现材料、构型与性能之间的协同优化。未来,随着高性能高分子材料、连续纤维增强

复合材料及多材料协同制造技术的持续发展,3D 打印有望在航空航天领域进一步推动复杂构件一体化成型、轻量化设计及高可靠服役结构的工程化应用。

2.4 在建筑与基建制造方面的应用

在建筑与基础设施制造领域,相较于依赖模板、工序繁复且形态受限的传统施工模式,3D 打印能够基于数字化建模与路径规划实现复杂曲面、镂空结构及参数化构件的直接制造,从而显著提升建筑设计自由度与施工灵活性,并促进建筑美学、结构性能与功能需求的协同统一。同时,该技术还可减少模板消耗、降低材料浪费及施工延误,在提升资源利用效率和推动绿色建造方面展现出重要应用潜力^[63]。

在建筑结构一体化制造方面,挤出式3D 打印技术为复杂混凝土构件的高效成型提供了新的实现路径。Gosselin 等^[64]采用超高性能混凝土,结合基于熔融沉积思想的挤出成型策略,通过几何优化构建了兼具隔热、隔声及管线嵌入能力的建筑构件。研究结果显示,该类结构的隔热性能较传统设计提升56%,并可通过孔洞几何调控进一步改善声学性能。这说明3D 打印不仅突破了传统混凝土浇筑工艺在复杂形状制造方面的限制,而且有助于实现建筑构件结构与功能的一体化设计,为自动化建造和大规模建筑构件定制化生产提供了新思路。不过,针对多材料协同打印、复杂几何参数与服役性能之间定量关系的研究仍需进一步深入。同时在建筑节能设计方面,3D 打印为围护结构热工性能优化提供了更大的设计自由度,Alkhalidi 等^[65]基于绿色可持续建筑理念,结合结构设计、建筑信息建模和能耗模拟,系统考察了不同打印工艺、打印材料、墙体空腔构型如图3(a)所示及填充材料对建筑热传导性能的影响。该研究表明,3D 打印不仅可实现建筑单元的快速建造,还能够通过几何构型与材料体系协同优化,提高建筑围护结构的热管理能力,为低成本、节能型住宅单元设计提供了新的技术路径。

除承载结构与节能墙体外,3D 打印在建筑模型和表面工程方面同样展现出拓展应用价值。针对3D 打印超疏水表面在机械摩擦作用下功能易衰减的问题,Manabe 等^[66]提出了一种受蜂巢结构启发的仿生设计方法,采用FDM 技术制备PLA 宏观六边形保护结构,并结合纳米疏水颗

粒构建“宏观保护层-黏结层-纳米功能层”复合界面如图3(b)所示。实验显示适宜尺寸的六边形保护结构可显著提高超疏水表面的耐磨性能,在多次摩擦后仍保持较高接触角和较低滑动角,明显优于无保护结构。因此,3D 打印不仅能够赋予建筑模型和构件复杂形貌,还可通过宏微观结构协同设计提升表面功能稳定性,为建筑、光学及交通等领域功能部件的表面工程提供了新的思路。在打印材料体系创新方面,Román-Manso 等^[67]围绕陶瓷增材制造中高分子墨水体系的流变调控与固化适配问题,设计了以聚乙二醇二丙烯酸酯为交联单体、聚丙烯酸为分散剂的水系高分子预聚体体系,实现了高固含陶瓷颗粒的稳定分散以及适用于嵌入式打印的剪切变稀特性和结构保持能力。进一步地,该研究首次将微波活化自由基聚合引入相关打印体系,通过脉冲式微波固化实现了复杂嵌入式结构的快速均匀交联,有效抑制了开裂与气泡等缺陷。该研究为建筑及功能构件制造中高性能打印墨水的分子设计、固化工艺调控及多材料复合成型提供了新的研究思路,也体现出高分子材料设计在3D 打印建筑相关应用中的基础支撑作用。与此同时,3D 打印技术在建筑领域逐渐从理论走向实际应用,Khan 等^[68]针对新西兰住宅建造需求,采用BIM 结合能耗分析与生命周期评价方法,对3D 打印混凝土住宅、木结构住宅和轻钢结构住宅进行了对比研究。结果表明,3D 打印住宅在全生命周期碳排放和运行能耗方面均表现出一定优势,其碳排放较木结构和轻钢结构住宅分别降低约20%和25%,年用电量较木结构住宅降低约19%;同时,3D 打印外墙施工时间显著缩短,显示出其在住宅快速建造、节能降碳及建筑自动化方面的应用潜力。但该技术在工程推广中仍受制于材料与设备本地化不足、标准规范不完善及审批体系适配性有限等因素。

3D 打印在建筑与基础设施领域的应用,已由早期的形貌快速成型逐步发展为结构设计、功能集成与材料体系协同优化的新阶段。其核心优势在于依托数字化建模和增材制造,实现复杂建筑构件的高自由度设计、节能功能结构的精准构筑以及功能表面与复合材料的一体化开发。未来,随着高性能打印材料、多材料协同制造及建筑尺度自动化设备的不断发展,3D 打印有望在绿色建筑、智能建造和智能化基础设施领域发挥更为重

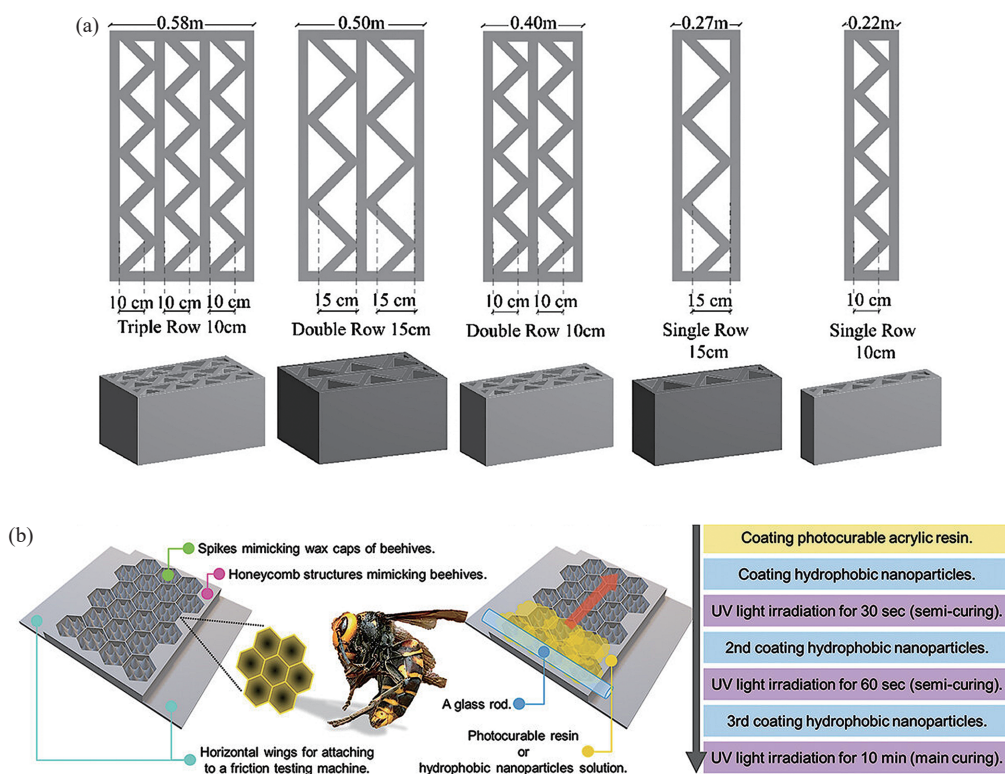


图3 (a)墙体空腔构型的尺寸与厚度^[65] (2020年 Elsevier Ltd. 版权许可); (b) 3D打印结构和超疏水处理方法的刮水器涂层工艺及流程图^[66] (2025年 Taylor & Francis. 版权许可)

Figure 3 (a) Geometric dimensions and thickness of the wall cavity configuration (Reprinted with permission from Ref. [65]; Copyright (2020) Elsevier Ltd); (b) Schematic diagram of the wiper coating process and flow chart for 3D-printed structures and superhydrophobic treatment method (Reprinted with permission from Ref. [66]; Copyright (2025) Taylor & Francis)

要的作用。

2.5 在消费电子与个性化产品方面的应用

在消费电子与个性化产品领域, 3D打印技术正推动产品制造由标准化向定制化、集成化和轻量化转变。依托数字化设计与增材制造优势, 3D打印可实现复杂结构成型、多材料一体化构筑及功能模块集成, 在缩短开发周期、降低制造成本和满足个性化需求等方面展现出明显优势, 为可穿戴电子、柔性器件及智能终端的发展提供了新的技术路径。

通过3D打印技术, 电子设备的内部结构实现了拓扑优化设计, 在保持强度的同时大幅降低重量。Chen等^[69]首次设计和制造了使用3D打印技术的可穿戴锂硫(Li-S)手镯电池(如图4所示), 设计制造的手镯电池可以轻松佩戴, 为可穿戴设备供电。3D打印技术的制造特性为电极厚度提供了出色的可控制性, 大大简化了工艺, 通过3D打印技术制造的手镯电池也可以满足可穿戴电源的需求。此外, 多材料打印技术的突破, 使单一

部件可集成多种功能特性, 如同时具备导电、绝缘和导热性能传感器模块, 这种高度集成化设计显著缩短了产品开发周期。

定制化终端使用电子产品的直接制造正成为3D打印技术应用的新兴方向。Li等^[70]提出一种融合SLA 3D打印与激光激活化学镀的新型混合增材制造技术, 核心创新在于开发了含近红外激光激活催化剂($\text{Cu}_2(\text{OH})\text{PO}_4$)的可选择性金属化SLA树脂, 实现了3D结构上高分辨率、高导电性电路的自由成型图案化, 为全功能三维电子产品的大规模定制提供了独特机遇, 并且在消费电子、通信工程以及汽车和航空航天工业中展现出巨大潜力。随着高性能工程塑料、生物相容性材料及金属功能材料的发展, 3D打印的应用边界不断拓展。

3D打印在消费电子与个性化产品领域的应用, 已由外观成型逐步拓展至功能器件制造。随着高性能工程塑料、功能树脂及多材料协同打印技术的发展, 可以进一步推动消费电子产品向高

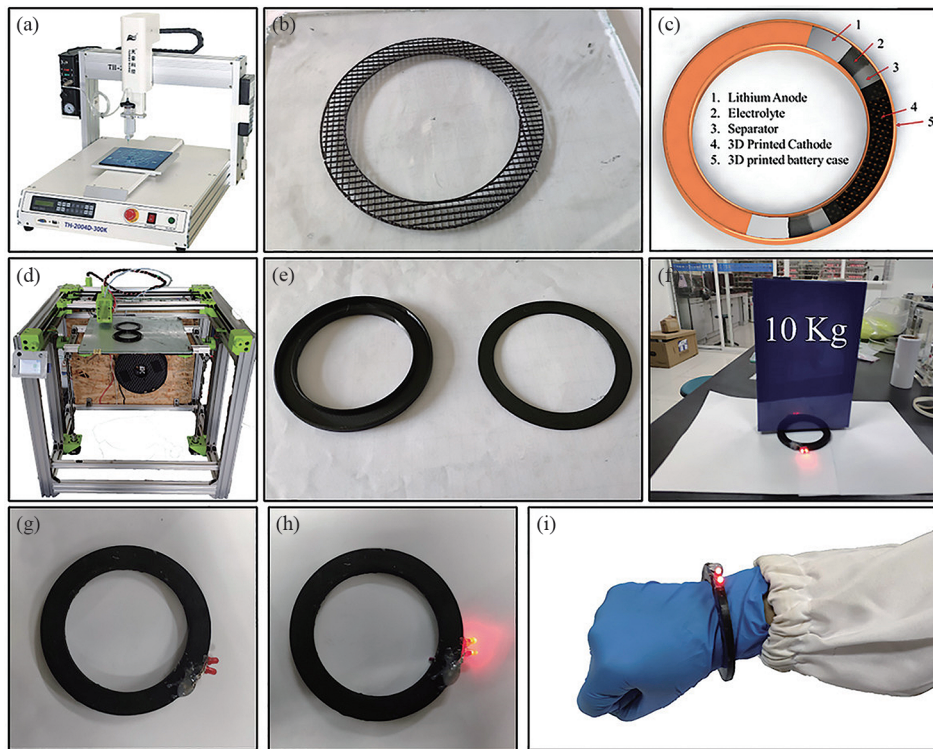


图4 3D打印可穿戴锂硫手镯电池制造过程:(a)直接喷墨3D打印机;(b)3D打印阴极;(c)手环电池组装图;(d)熔融沉积3D打印机;(e)3D打印电池盒;(f)压力约为10 kg的手镯电池;(g-i)带灯开关的手链电池,手腕上的手链电池^[69](2020年Wiley-VCH GmbH. 版权许可)

Figure 4 Fabrication of 3D printed Li-S bracelet battery: (a) Direct ink writing 3D printer; (b) 3D printed cathode; (c) Assembly diagram of bracelet battery; (d) Fused deposition 3D printer; (e) 3D printed battery case; (f) Bracelet battery at a pressure of about 10 kg; (g-i) Bracelet batteries with lights on and off, and bracelet battery on wrist (Reprinted with permission from Ref. [69]; Copyright (2020) Wiley-VCH GmbH.)

集成化、个性化和智能化方向发展,并在可穿戴设备、柔性电子及新型电子制造中展现更广阔的应用前景。

2.6 在食品与餐饮创新方面的应用

3D打印技术以数字化制造模式重塑生产工艺,为产业的可持续发展提供了全新的解决方案,推动制造业从传统化生产向个性化智能制造转型^[71,72],打破了传统食品加工的模具依赖,实现了从原料到成品的直接成型。3D打印技术赋予食品形态设计以许多可能,通过多材料喷头的协同作业,食品的视觉呈现突破了传统工艺的物理限制,可实现渐变色阶、动态纹理甚至可食用的光学元件^[73]。

在功能设计上,3D打印技术可精确控制食品的内部孔隙率与营养分布,例如将益生菌封装于缓释结构中^[74],或针对吞咽困难患者设计易咀嚼的食品^[75]。Pant等^[76]研究聚焦3D食品打印在吞咽困难患者饮食中的应用,针对现有研究多依赖

冻干蔬菜粉导致营养流失、成本高昂的问题,提出以新鲜/冷冻蔬菜为原料制备食品油墨的创新方案,研究发现优化后的油墨均表现出理想的剪切变稀特性和黏度可逆性,打印结构稳定性强、渗水少,微观结构致密,视觉呈现丰富(如图5(a)所示),能提升患者进食意愿。Wang等^[77]提出将莲藕全粉(WL)与乳清蛋白(WP)复合,构建适用于3D打印的凝胶体系(如图5(b)所示),以同时满足吞咽安全性、营养均衡性和打印精准性需求。

3D打印技术通过智能材料的应用,可实现食品形态的动态变化^[78]。随着AI算法的个性化推荐系统,3D打印技术可以与其无缝连接。消费者可以通过手机应用生成符合自身健康数据的定制食谱,并同步到家用打印机,提高消费者健康水平。

3 4D打印

4D打印是在3D打印基础上发展起来的一类

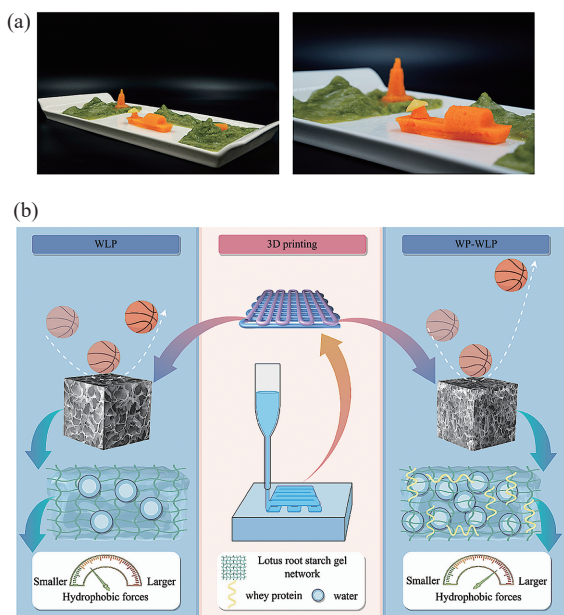


图5 (a)由豌豆、胡萝卜和玉米油墨的3D打印图案组装而成的图片^[76] (2021年 Elsevier Ltd 版权许可); (b)莲藕全粉与乳清蛋白-莲藕全粉的3D打印机制^[77] (2025年 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 5 (a) Images assembled from 3D-printed patterns of pea, carrot, and corn inks (Reprinted with permission from Ref. [76]; Copyright (2021) Elsevier Ltd.); (b) 3D printing mechanisms of whole lotus root powder and whey protein-whole lotus root powder (Reprinted with permission from Ref. [77]; Copyright (2025) Elsevier Ltd.)

智能增材制造技术,其核心是在空间三维成型的基础上引入“时间维度”。与传统3D打印制品成型后形态和性能基本固定不同,4D打印通过采用刺激响应性材料,并结合结构预编程设计,使构筑体在温度、光、湿度、电场、磁场、pH及酶等外界刺激作用下,能够随时间发生可控的形状变化、性能调节或功能演化^[79],图6汇总了4D打印技术中涉及的主要元素和类别。

4D打印依赖于智能材料的刺激响应行为以及多材料、多结构体系的协同设计。打印材料需具备良好的响应性和可加工性,能够在外界刺激下发生可逆或不可逆的物理化学变化;同时,还需借助计算机建模和结构设计对其变形路径、响应模式及功能输出进行预设,以保证构筑体在特定条件下按照预期方式演变。当前常用于4D打印的材料主要包括形状记忆高分子、液晶弹性体、水凝胶及其复合体系,也可通过引入功能填料赋予传统材料刺激响应特性,在打印工艺方面,SLA、SLS、BJ、MJ以及FDM等技术均已用于4D打印,

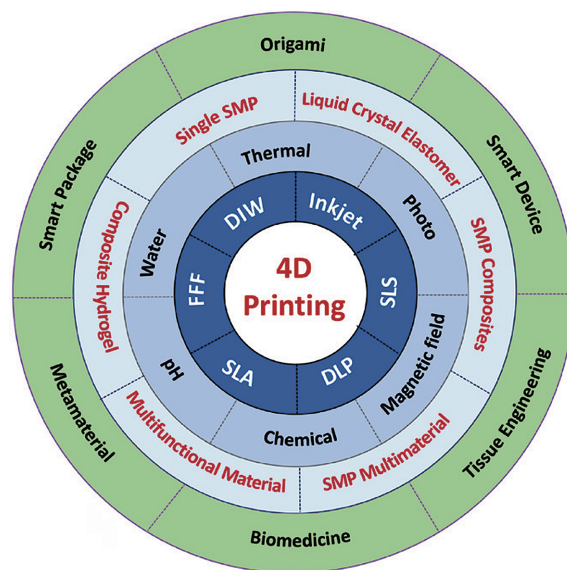


图6 4D打印技术涉及的要素及类别^[79] (2019年 Wiley-VCH GmbH 版权许可)

Figure 6 Elements and Categories Involved in 4D Printing Technology (Reprinted with permission from Ref. [79]; Copyright (2019) Wiley-VCH GmbH)

其中FDM和SLA由于成本相对较低、材料适配性较好且便于多材料成型,应用最为广泛^[80-82]。

近年来,4D打印因为能够将结构成型与刺激响应行为调控相结合,已成为增材制造领域的重要发展方向,并在生物医学、柔性电子、软体机器人、航空航天和智能纺织等方面显示出应用潜力。在生物医学方面,活体材料与3D/4D打印的交叉融合为生物制造提供了新的研究思路。Gantenbein等^[83]以灵芝菌丝体为功能组分,构建了可打印的菌丝体负载水凝胶体系,并通过三维打印将其加工成具有规则晶格结构的活体复杂材料。研究表明,该类结构能够在保持工程构件形貌稳定性的同时,利用菌丝生长实现对水凝胶内部的持续定殖及对空气间隙的跨越连接,从而赋予材料自修复、再生及环境适应等类生命特征。进一步地,作者制备了具有一定机械稳健性、自清洁能力及损伤后自主再生能力的“机器人皮肤”,表明3D打印已不再局限于静态结构成型,而是可进一步拓展至兼具结构功能与生命响应特征的活体材料构筑。相较于3D打印,4D打印在生物医学领域更强调材料-结构-功能的动态耦合,可通过自折叠、自组装及形状记忆等方式构建更接近天然组织演化过程的支架体系。近期研究进一步提出了具有“再生型活体/可逆生长”特征的4D

打印策略,即先通过数字光处理构筑交联网络,再结合活性聚合实现构件的宏观生长、性能重构与形状记忆响应,并借助可控“去生长-再生长”过程实现结构与性能的循环调节,表明4D打印正由单一形变响应向可再生、可重构制造方向拓展^[84]。在血管化骨修复中,4D打印还有望构筑与天然毛细血管尺度相匹配的微米级中空结构,并实现成骨与促血管生成活性因子的时空程序化释放,从而更有效地协调骨再生过程中血管化与成骨之间的协同关系^[85]。除生物医学外,4D打印在功能器件制造方面同样表现出独特优势,Kumar等^[86]采用热致变色PLA复合材料,结合多材料连续纤维共挤出打印技术和定制化代码控制策略,构建了电激活4D打印热致变色系统,其颜色变化与通电时间及电流强度具有良好相关性,从而为低功耗显示器件、智能传感器、交互式纺织品及防伪材料等提供了新的技术方案。在生物医用方面,4D打印同样大放异彩,Rivera-Tarazona等^[87]研究提出了一种基于直写墨水书写技术的工程活体材料(ELMs)4D打印策略,通过将基因工程改造酵母菌引入可光固化水凝胶生物墨水中,使打印结构具备对特定生物分子的可编程形状响应能力。研究以纳米晶纤维素(CNC)调控墨水流变行为,实现了生物墨水良好的打印适性以及多菌株体系的空间可控构筑。此外,作者进一步构建了储库型药物递送体系,验证了其在特定生物分子刺激下的按需释药能力。该工作突破了传统4D打印主要依赖热、光和溶剂等非特异性刺激的局限,为生物响应型智能医疗器件的设计提供了新思路。总体来看,4D打印已由概念验证逐步拓展至结构设计、材料响应与功能输出协同调控的新阶段,显示出由静态制造向动态智能制造演进的发展趋势。

虽然4D打印展现出广阔的应用前景,但其工程化和规模化应用仍面临诸多挑战。首先,材料体系仍然较为有限。现有刺激响应材料在响应速度、形状恢复精度、循环稳定性、生物相容性及打印适性之间往往难以兼顾,例如形状记忆水凝胶通常依赖水环境,磁响应材料易发生团聚,限制了其在复杂服役环境中的应用。其次,结构与响应行为之间的定量关系尚不明确。4D打印涉及材料非线性响应、多场耦合效应和复杂形变过程,现有理论模型和设计方法在预测精度和通用性方面仍有不足,难以实现复杂形变行为与生

物功能、力学性能之间的协同优化。

总体而言,4D打印作为3D打印向智能化、动态化方向延伸的重要发展分支,正在由单纯的结构制造逐步转向“材料-结构-功能-时间”协同设计。未来,随着高性能刺激响应高分子材料、多材料协同打印技术、数字化建模与多场耦合设计方法的不断发展,4D打印有望在组织工程、智能器件、软体机器人及航空航天等领域实现更广泛应用,并成为智能高分子材料制造的重要发展方向。

4 总结和展望

3D打印发展将重点聚焦于下面3个关键方向:

(1)材料体系创新突破。材料性能、工艺适配性以及环境友好性仍然制约着它高端应用的进一步拓展,推动高强轻质复合材料、自适应响应智能材料以及可降解、生物相容绿色原料的研制,将是解决“材料-结构-功能”耦合瓶颈的重要途径;(2)技术体系汇聚。随着人工智能、物联网、数字孪生等技术的持续发展,3D打印将逐步转变为智能化制造平台,凭借感知-分析-反馈的闭环控制手段,达成建模设计、工艺参数优化到在线质量监测全流程的智能化与自动化,有望大幅度提升产品一致性及规模化定制实力;(3)应用深度延伸拓展。就生物制造领域而言,实现组织架构的血管化及器官功能化仍是棘手挑战;就4D打印方向而言,迫切需求开发可控响应速度快、循环稳定性好的功能材料,推动其在柔性电子、智能驱动器、可穿戴设备等前沿领域达成工程化应用目标。

尽管3D打印技术在复杂结构构筑、个性化制造及多材料集成等方面已展现出显著优势,但其进一步走向高性能化、规模化和工程化应用,仍需在材料、工艺、标准及产业协同等方面实现系统突破。未来的发展一方面应聚焦于高性能高分子材料体系的构建,重点推进低收缩、高韧性、耐热耐候及可生物相容光敏树脂的开发,同时加强高流动性专用粉体、匹配型黏结剂及连续纤维增强复合材料的设计,以满足不同打印工艺对材料可加工性与服役性能的双重要求;另一方面,应进一步强化多材料协同制造、界面调控及结构-性能一体化设计,提升复杂构件在精度、强度、功能集成和长期稳定性等方面的综合表现。此外,还需结合数字建模、智能控制与计算模拟等手段,

推动复杂结构在大尺寸制造条件下的高精度成型与全过程优化,并加快完善材料性能评价方法、行业认证标准及法规体系,建立面向实际应用的质量控制与工程推广路径。随着材料科学、制造技术与智能化手段的持续交叉融合,3D打印有望在高性能结构件、生物医疗工程、绿色低碳制造及可持续材料体系构建等领域实现由实验室研究向产业化应用的深入拓展。

参考文献

- 1 Ricles, L. M.; Coburn, J. C.; Di Prima, M.; Oh, S. S. Regulating 3D-printed medical products. *Sci. Transl. Med.*, **2018**, 10(461), eaan6521.
- 2 Bose, S.; Ke, D.; Sahasrabudhe, H.; Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of biomaterials. *Prog. Mater. Sci.*, **2018**, 93: 45–111.
- 3 梁晓静, 于晓燕. 3D打印用高分子材料及其复合材料的研究进展. *高分子通报*, **2018**, (4), 27–35.
- 4 Wang, L. T.; Yi, C.; Luo, J. X.; Zhang, Z. W.; Li, H.; Chen, L. Q.; Wu, F. 3D printing for all-solid-state batteries. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **2025**, 166, 101053.
- 5 Liu, G. S.; Ma, Z. L.; Li, G. X.; Yu, W.; Wang, P.; Meng, C. Z.; Guo, S. J. All-printed 3D solid-state rechargeable zinc-air microbatteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(10), 13073–13085.
- 6 Kee, S.; Haque, M. A.; Corzo, D.; Alshareef, H. N.; Baran, D. Self-healing and stretchable 3D-printed organic thermoelectrics. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(51), 1905426.
- 7 Browne, M. P.; Redondo, E.; Pumera, M. 3D printing for electrochemical energy applications. *Chem. Rev.*, **2020**, 120(5), 2783–2810.
- 8 Nadagouda, M. N.; Rastogi, V.; Ginn, M. A review on 3D printing techniques for medical applications. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, **2020**, 28, 152–157.
- 9 Yan, Q.; Dong, H. H.; Su, J.; Han, J. H.; Song, B.; Wei, Q. S.; Shi, Y. S. A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, **2018**, 4(5), 729–742.
- 10 卜昊霖, 柴牧原, 施雪涛. 3D打印水凝胶支架构建血管化组织/器官研究进展. *高分子通报*, **2025**, 38(12), 1776–1788.
- 11 冯琦, 黄跃, 曹晓东. 水凝胶3D生物打印: 打印技术与水凝胶适配性设计. *高分子通报*, **2025**, 38(12), 1721–1753.
- 12 Zhang, L. Z.; Dong, H. S.; Yu, Y. B.; Liu, L. Y.; Zang, P. Application and challenges of 3D food printing technology in manned spaceflight: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **2022**, 57(8), 4906–4917.
- 13 Martinez, D. W.; Espino, M. T.; Cascolan, H. M.; Crisostomo, J. L.; Dizon, J. R. C. A comprehensive review on the application of 3D printing in the aerospace industry. *Key Eng. Mater.*, **2022**, 913, 27–34.
- 14 Ahmed, S.; Romdhane, L.; El-Sayegh, S. M.; Manjikian, S. Risk assessment for 3D printing in construction projects. *J. Financ. Manag. Prop. Constr.*, **2025**, 30(1), 67–87.
- 15 Parmigiani, S.; Falliano, D.; Moro, S.; Ferro, G. A.; Restuccia, L. 3D-printed multi-functional foamed concrete building components: material properties, component design, and 3D printing application. *Dev. Built Environ.*, **2024**, 20, 100483.
- 16 Sun, J. Y.; Fang, T. Q.; Zhang, Y. Z.; Wang, J.; Han, H.; Chou, T.; Liang, J. F.; Kalyon, D. M.; Wang, H. J.; Wang, S. Imaging-guided microscale photothermal stereolithography bioprinting. *Adv. Sci.*, **2025**, 12(18), 2500640.
- 17 Trunin, P.; Cafiso, D.; Beccai, L. Design and 3D printing of soft optical waveguides towards monolithic perceptive systems. *Addit. Manuf.*, **2025**, 100, 104687.
- 18 Gao, W. Z.; Guo, Y. L.; Cui, J. J.; Liang, C.; Lu, Z.; Feng, S. W.; Sun, Y. D.; Xia, Q. X.; Zhang, B. Dual-curing polymer systems for photo-curing 3D printing. *Addit. Manuf.*, **2024**, 85, 104142.
- 19 Liu, Z. W.; Jia, T. F.; Yang, Y. Z.; Yue, X.; Liu, Y.; Zhang, X.; Chen, Y. H.; Ma, S. S.; Valenzuela, C.; Wang, L.; Shen, J.; Feng, W. Near-infrared light-cured dental restoration materials with upconversion nanoparticles. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 488, 150710.
- 20 Grgić, I.; Karakašić, M.; Glavaš, H.; Konjatić, P. Accuracy of FDM PLA polymer 3D printing technology based on tolerance fields. *Processes*, **2023**, 11(10), 2810.
- 21 YU, Z.; GAO, Y.; JIANG, J.; GU, H.; LV, S.; NI, H.; WANG, X.; JIA, C. Study on effects of FDM 3D printing parameters on mechanical properties of polylactic acid. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, **2019**. 033026.
- 22 Dumpa, N.; Butreddy, A.; Wang, H. H.; Komanduri, N.; Bandari, S.; Repka, M. A. 3D printing in personalized drug delivery: an overview of hot-melt extrusion-based fused deposition modeling. *Int. J. Pharm.*, **2021**, 600, 120501.
- 23 Romanov, V.; Samuel, R.; Chaharlang, M.; Jafek, A. R.; Frost, A.; Gale, B. K. FDM 3D printing of high-pressure, heat-resistant, transparent microfluidic devices. *Anal. Chem.*, **2018**, 90(17), 10450–10456.
- 24 王成硕, 颜邓伊, 任浩浩, 何彦钊, 孙初锋, 赵红梅, 李婷婷, 赵向飞, 郭蕊. 熔融沉积成型3D打印聚醚

- 醚酮工艺优化研究进展. 高分子通报, **2024**, 37(3), 316–327.
- 25 Han, J. H.; Li, Z. M.; Kong, S. S.; Li, B.; Chen, T.; Zhao, H. L.; Xie, D. L.; Feng, D. Enhanced sensitivity and broadband response in porous triple periodic minimal surface piezoresistive sensors for telemedicine applications. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 500, 156989.
- 26 Jahangir, M. N.; Billah, K. M. M.; Lin, Y.; Roberson, D. A.; Wicker, R. B.; Espalin, D. Reinforcement of material extrusion 3D printed polycarbonate using continuous carbon fiber. *Addit. Manuf.*, **2019**, 28, 354–364.
- 27 Cano-Vicent, A.; Tambuwala, M. M.; Hassan, S. S.; Barh, D.; Aljabali, A. A. A.; Birkett, M.; Arjunan, A.; Serrano-Aroca, Á. Fused deposition modelling: current status, methodology, applications and future prospects. *Addit. Manuf.*, **2021**, 47, 102378.
- 28 Rahim, T. N. A. T.; Abdullah, A. M.; Md Akil, H. Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polym. Rev.*, **2019**, 59(4), 589–624.
- 29 Awad, A.; Fina, F.; Goyanes, A.; Gaisford, S.; Basit, A. W. 3D printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *Int. J. Pharm.*, **2020**, 586, 119594.
- 30 Fina, F.; Goyanes, A.; Gaisford, S.; Basit, A. W. Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *Int. J. Pharm.*, **2017**, 529(1-2), 285–293.
- 31 Yehia, H. M.; Hamada, A.; Sebaey, T. A.; Abd-Elaziem, W. Selective laser sintering of polymers: Process parameters, machine learning approaches, and future directions. *J. Manuf. Mater. Process.*, **2024**, 8(5), 197.
- 32 Ziaee, M.; Crane, N. B. Binder jetting: a review of process, materials, and methods. *Addit. Manuf.*, **2019**, 28, 781–801.
- 33 Kwon, M.; Choi, J. H.; Kim, J. H.; Choi, J. H.; Kim, U. S.; Hwang, K. T.; Kang, Y. M.; Han, K. S. Optimization of inorganic powder properties for manufacturing ceramic filter using binder jetting process. *Addit. Manuf.*, **2023**, 70, 103564.
- 34 Liravi, F.; Vlasea, M. Powder bed binder jetting additive manufacturing of silicone structures. *Addit. Manuf.*, **2018**, 21, 112–124.
- 35 Mora, S.; Pugno, N. M.; Misseroni, D. 3D printed architected lattice structures by material jetting. *Mater. Today*, **2022**, 59, 107–132.
- 36 Cheng, Y. L.; Tseng, T. W. Study on driving waveform design process for multi-nozzle piezoelectric printhead in material-jetting 3D printing. *Rapid Prototyp. J.*, **2021**, 27(6), 1172–1180.
- 37 Chokshi, S.; Gangatirkar, R.; Kandi, A.; DeLeonibus, M.; Kamel, M.; Chadalavada, S.; Gupta, R.; Munigala, H.; Tappa, K.; Kondor, S.; Burch, M. B.; Ravi, P. Medical 3D printing using material jetting: technology overview, medical applications, and challenges. *Bioengineering*, **2025**, 12(3), 249.
- 38 Yang, H. Y.; Lim, J. C.; Liu, Y. C.; Qi, X. Y.; Yap, Y. L.; Dikshit, V.; Yeong, W. Y.; Wei, J. Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer. *Virtual Phys. Prototyp.*, **2017**, 12(1), 95–103.
- 39 Giorleo, L.; Stampone, B.; Trotta, G. Micro injection moulding process with high-temperature resistance resin insert produced with material jetting technology: effect of part orientation. *Addit. Manuf.*, **2022**, 56, 102947.
- 40 Shen, X. C.; Naguib, H. E. A robust ink deposition system for binder jetting and material jetting. *Addit. Manuf.*, **2019**, 29, 100820.
- 41 Wang, M. R.; Jin, G. R.; He, W. D.; Nan, F. Q. 3D printing of Gun propellants based on laminated object manufacturing. *Mater. Manuf. Process.*, **2022**, 37(11), 1246–1256.
- 42 Li, Y. X.; Ren, X. Y.; Zhu, L.; Li, C. M. Biomass 3D printing: principles, materials, post-processing and applications. *Polymers*, **2023**, 15(12), 2692.
- 43 Park, J.; Tari, M. J.; Hahn, H. T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyp. J.*, **2000**, 6(1), 36–50.
- 44 Quan, H. Y.; Zhang, T.; Xu, H.; Luo, S.; Nie, J.; Zhu, X. Q. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact. Mater.*, **2020**, 5(1), 110–115.
- 45 Cao, L. X.; Lu, L.; Liu, X. K.; Zhang, J.; Jiang, T. F.; Tu, C. H.; Chen, B. Q. Waiting time prediction for bottom-up vat photopolymerization. *Addit. Manuf.*, **2023**, 74, 103693.
- 46 Caltanisetta, F.; Dreifus, G.; Hart, A. J.; Colosimo, B. M. *In-situ* monitoring of material extrusion processes via thermal videoimaging with application to big area additive manufacturing (BAAM). *Addit. Manuf.*, **2022**, 58, 102995.
- 47 Chatham, C. A.; Long, T. E.; Williams, C. B. A review of the process physics and material screening methods for polymer powder bed fusion additive manufacturing. *Prog. Polym. Sci.*, **2019**, 93, 68–95.
- 48 Snow, Z.; Martukanitz, R.; Joshi, S. On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, **2019**, 28, 78–86.
- 49 Sivarupan, T.; Balasubramani, N.; Saxena, P.; Nagarajan, D.; El Mansori, M.; Salonitis, K.; Jolly, M.; Dargusch, M. S. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting. *Addit. Manuf.*, **2021**, 40, 101889.

- 50 Elkaseer, A.; Chen, K. J.; Janhsen, J. C.; Refle, O.; Hagenmeyer, V.; Scholz, S. G. Material jetting for advanced applications: a state-of-the-art review, gaps and future directions. *Addit. Manuf.*, **2022**, 60, 103270.
- 51 Ligon, S. C.; Liska, R.; Stampfl, J.; Gurr, M.; Mülhaupt, R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chem. Rev.*, **2017**, 117(15), 10212–10290.
- 52 Chen, J. Y.; Liu, X. J.; Tian, Y. J.; Zhu, W.; Yan, C. Z.; Shi, Y. S.; Kong, L. B.; Qi, H. J.; Zhou, K. 3D-printed anisotropic polymer materials for functional applications. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(5), 2102877.
- 53 Oladapo, B. I.; Bowoto, O. K.; Adebisi, V. A.; Ikumapayi, O. M. Net zero on 3D printing filament recycling: a sustainable analysis. *Sci. Total Environ.*, **2023**, 894, 165046.
- 54 Trogadas, P.; Cho, J. I. S.; Neville, T. P.; Marquis, J.; Wu, B.; Brett, D. J. L.; Coppens, M. O. A lung-inspired approach to scalable and robust fuel cell design. *Energy Environ. Sci.*, **2018**, 11(1), 136–143.
- 55 Doğru Mert, B.; Nazligül, H.; Aksaray, G.; Mert, M. E.; Seyedzavvar, M.; Kardeş, G. Sustainable energy solutions: 3D printed PLA-NiMo@Ag for green hydrogen production. *Int. J. Hydrog. Energy*, **2025**, 172, 151324.
- 56 Hu, M. Y.; Wu, C. W.; Xie, Q. H.; Yu, J. Y.; Guo, Y. M.; Shuai, Y.; Wang, X. W.; Wang, Z. L. 3D printed degradable hydrogel evaporator for high-efficiency, environmental-friendly solar alkaline-water evaporation. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 499, 156132.
- 57 Hedayati, S. K.; Behraves, A. H.; Hasannia, S.; Bagheri Saed, A.; Akhouni, B. 3D printed PCL scaffold reinforced with continuous biodegradable fiber yarn: a study on mechanical and cell viability properties. *Polym. Test.*, **2020**, 83, 106347.
- 58 Dos Santos, R. L.; Wynn, W.; Marquez, L.; Hoque, E.; Bruce, K. A.; Yavitt, B. M.; Harris, G. M.; Martin, J. R. Oxidation-degradable resins for 3D-printing of cell-responsive biomaterials. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(25), e22208.
- 59 Amini, M.; Bittner, A. M. Novel 3D-printed PCL/CMC scaffolds for enhanced bone regeneration. *J. Polym. Sci.*, **2025**, 63(19), 3944–3956.
- 60 Shirasu, K.; Mizuno, T.; Tohmyoh, H. Multimaterial bonding of additively manufactured carbon fiber-reinforced thermoplastics/64 titanium. *Adv. Eng. Mater.*, **2025**, 27(5), 2402221.
- 61 Acanfora, V.; Sellitto, A.; Russo, A.; Zarrelli, M.; Riccio, A. Experimental investigation on 3D printed lightweight sandwich structures for energy absorption aerospace applications. *Aerosp. Sci. Technol.*, **2023**, 137, 108276.
- 62 Wawryniuk, Z.; Brancewicz-Steinmetz, E.; Sawicki, J. Revolutionizing transportation: an overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **2024**, 134(7), 3083–3105.
- 63 Sovetova, M.; Kaiser Calautit, J. Thermal and energy efficiency in 3D-printed buildings: review of geometric design, materials and printing processes. *Energy Build.*, **2024**, 323, 114731.
- 64 Gosselin, C.; Duballet, R.; Roux, P.; Gaudillière, N.; Dirrenberger, J.; Morel, P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders. *Mater. Des.*, **2016**, 100, 102–109.
- 65 Alkhalidi, A.; Hatuqay, D. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. *J. Build. Eng.*, **2020**, 30, 101286.
- 66 Manabe, K.; Saikawa, M.; Iwai, T.; Norikane, Y. Durable superhydrophobic surfaces on 3D-printed structures inspired by beehive architecture. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **2025**, 26(1), 2481824.
- 67 Román-Manso, B.; Weeks, R. D.; Truby, R. L.; Lewis, J. A. Embedded 3D printing of architected ceramics via microwave-activated polymerization. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(15), 2209270.
- 68 Khan, M.; Dani, A. A.; Lim, J. B. P.; Roy, K. Appraising the feasibility of 3D printing construction in New Zealand housing. *Buildings*, **2024**, 14(4), 1084.
- 69 Chen, C. L.; Jiang, J. M.; He, W. J.; Lei, W.; Hao, Q. L.; Zhang, X. G. 3D printed high-loading lithium-sulfur battery toward wearable energy storage. *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, 30(10), 1909469.
- 70 Li, J.; Zhang, Y.; Wang, P. R.; Wang, G. Q.; Liu, Y. F.; Liu, Y. N.; Li, Q. S. Selectively metalizable stereolithography resin for three-dimensional DC and high-frequency electronics via hybrid additive manufacturing. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(19), 22891–22901.
- 71 Mantihal, S.; Kobun, R.; Lee, B. B. 3D food printing of as the new way of preparing food: a review. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, **2020**, 22, 100260.
- 72 Bedoya, M. G.; Montoya, D. R.; Tabilo-Munizaga, G.; Pérez-Won, M.; Lemus-Mondaca, R. Promising perspectives on novel protein food sources combining artificial intelligence and 3D food printing for food industry. *Trends Food Sci. Technol.*, **2022**, 128, 38–52.
- 73 Lee, C. P.; Karyappa, R.; Hashimoto, M. 3D printing of milk-based product. *RSC Adv.*, **2020**, 10(50), 29821–29828.
- 74 de Oliveira Filho, J. G.; Duarte, L. G. R.; Bonfim, D. O.;

- Salgaço, M. K.; Mattoso, L. H. C.; Egea, M. B. Shaping the future of functional foods: using 3D printing for the encapsulation and development of new probiotic foods. *Probiotics & Antimicro. Prot.*, **2025**, 17(3), 1295–1307.
- 75 Molimi, M. B.; Egan, P.; Adebo, O. A. Progress in three-dimensional (3D) printed foods for dysphagia patients: food sources, processing techniques, printability, nutrition, acceptability, and safety aspects. *Food Res. Int.*, **2025**, 202, 115629.
- 76 Pant, A.; Lee, A. Y.; Karyappa, R.; Lee, C. P.; An, J.; Hashimoto, M.; Tan, U. X.; Wong, G.; Chua, C. K.; Zhang, Y. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients. *Food Hydrocoll.*, **2021**, 114, 106546.
- 77 Wang, J. F.; Jiang, X. Y.; Gan, H. Z.; Li, S. Y.; Peng, K. D.; Sun, Y.; Ma, M.; Yi, Y. Complexation-driven 3D printable whey protein-lotus root composite gels for dysphagia foods. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 366, 123864.
- 78 Chauhan, P.; Kaushal, M.; Vaidya, D.; Gupta, A.; Kashyap, S.; Suthar, P. Personalized nutrition to intelligent foods with 3D and 4D printing. *Appl. Food Res.*, **2025**, 5(1), 100863.
- 79 Kuang, X.; Roach, D. J.; Wu, J. T.; Hamel, C. M.; Ding, Z.; Wang, T. J.; Dunn, M. L.; Qi, H. J. Advances in 4D printing: materials and applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(2), 1805290.
- 80 Joharji, L.; Mishra, R. B.; Alam, F.; Tytov, S.; Al-Modaf, F.; El-Atab, N. 4D printing: a detailed review of materials, techniques, and applications. *Microelectron. Eng.*, **2022**, 265, 111874.
- 81 Khalid, M. Y.; Arif, Z. U.; Ahmed, W. 4D printing: technological and manufacturing renaissance. *Macromol. Mater. Eng.*, **2022**, 307(8), 2200003.
- 82 Wan, X.; Xiao, Z. M.; Tian, Y. J.; Chen, M.; Liu, F.; Wang, D.; Liu, Y.; Da Silva Bartolo, P. J.; Yan, C. Z.; Shi, Y. S.; Zhao, R. R.; Qi, H. J.; Zhou, K. Recent advances in 4D printing of advanced materials and structures for functional applications. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(34), 2312263.
- 83 Gantenbein, S.; Colucci, E.; Käch, J.; Trachsel, E.; Coulter, F. B.; Rühs, P. A.; Masania, K.; Studart, A. R. Three-dimensional printing of mycelium hydrogels into living complex materials. *Nat. Mater.*, **2023**, 22(1), 128–134.
- 84 Xu, X. N.; Fang, Z. Z.; Jin, B. J.; Mu, H. F.; Shi, Y. P.; Xu, Y.; Chen, G. C.; Zhao, Q.; Zheng, N.; Xie, T. Regenerative living 4D printing via reversible growth of polymer networks. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(16), 2209824.
- 85 Han, X. Y.; Saiding, Q.; Cai, X. L.; Xiao, Y.; Wang, P.; Cai, Z. W.; Gong, X.; Gong, W. M.; Zhang, X. C.; Cui, W. G. Intelligent vascularized 3D/4D/5D/6D-printed tissue scaffolds. *Nano Micro Lett.*, **2023**, 15(1), 239.
- 86 Kumar, S. S.; Niyagama, W. W.; Akmal, J. S.; Salmi, M. 4D printing of electro-activated thermochromic composites for dynamic 3D displays. *Mater. Des.*, **2025**, 251, 113674.
- 87 Rivera-Tarazona, L. K.; Shukla, T.; Singh, K. A.; Gaharwar, A. K.; Campbell, Z. T.; Ware, T. H. 4D printing of engineered living materials. *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(4), 2106843.