

## 3D 打印材料的研究进展综述

程 焯

南宁学院 广西南宁

**【摘要】**3D 打印作为增材制造技术的核心代表，正在深刻变革传统制造业的生产模式。3D 打印材料是决定打印产品质量和功能的核心要素，其种类和性能的不断拓展是推动 3D 打印技术产业化的关键因素。本文系统综述了 3D 打印材料的研究进展，涵盖金属材料、高分子材料、生物材料及功能型材料四大类别。在金属材料方面，重点介绍了钛合金、模具钢等材料的选区激光熔化、激光粉末床熔融等成型工艺及其在航空航天、生物植入体领域的应用；在高分子材料方面，详细阐述了光固化树脂、纤维增强复合材料、生物可吸收材料的性能调控策略与功能化改性方法；在生物材料方面，综述了水凝胶、丝素蛋白、类器官等生物墨水的设计原则及其在组织工程、伤口敷料、药物筛选等领域的应用；在功能型材料方面，介绍了柔性传感材料、微针给药系统、油水分离材料等前沿方向。研究表明，3D 打印材料正朝着高性能化、多功能化、生物活性化、智能化方向发展。当前面临的主要挑战包括材料种类有限、打印精度与速度的矛盾、力学性能与生物功能的平衡以及标准化与质量控制等问题。未来应加强多材料打印技术、4D 打印智能材料、人工智能辅助材料开发以及临床转化与产业化等方向的研究。

**【关键词】**3D 打印；增材制造；3D 打印材料；生物打印；水凝胶；金属材料

**【收稿日期】**2025 年 11 月 25 日      **【出刊日期】**2025 年 12 月 20 日      **【DOI】**10.12208/j.ijms.20250006

### A review of research progress in 3D printing materials

*Ye Cheng*

*Nanning University, Nanning, Guangxi*

**【Abstract】**As the core representative of additive manufacturing technology, 3D printing is profoundly transforming the production models of traditional manufacturing industries. 3D printing materials are the core elements determining the quality and functionality of printed products, and the continuous expansion of their types and properties is a key factor driving the industrialization of 3D printing technology. This paper systematically reviews the research progress of 3D printing materials, covering four major categories: metallic materials, polymer materials, biomaterials, and functional materials. In terms of metallic materials, the forming processes such as selective laser melting and laser powder bed fusion of titanium alloys, mold steels, and their applications in aerospace and biomedical implants are highlighted. In terms of polymer materials, the performance regulation strategies and functional modification methods of photopolymer resins, fiber-reinforced composites, and bioresorbable materials are elaborated. In terms of biomaterials, the design principles of bioinks such as hydrogels, silk fibroin, and organoids and their applications in tissue engineering, wound dressings, and drug screening are reviewed. In terms of functional materials, flexible sensing materials, microneedle drug delivery systems, and oil-water separation materials are introduced. Research shows that 3D printing materials are moving towards high performance, multifunctionality, bioactivity, and intelligence. Current challenges include limited material variety, the trade-off between printing resolution and speed, the balance between mechanical properties and biological functions, as well as standardization and quality control. Future research should strengthen multi-material printing technology, 4D printing of smart materials, artificial intelligence-assisted material development, and clinical translation and industrialization.

**【Keywords】** 3D printing; Additive manufacturing; 3D printing materials; Bioprinting; Hydrogel; Metallic materials

## 引言

3D 打印作为一种增材制造技术,通过逐层堆积材料的方式构建三维实体,与传统的减材制造和等材制造有着本质区别。该技术无需模具、材料利用率高、可制造复杂几何形状,正在深刻变革航空航天、生物医疗、电子器件等领域的生产模式。3D 打印材料是这一技术的核心要素,其性能直接决定了打印产品的质量、功能和适用场景<sup>[1]</sup>。

3D 打印材料按照物质类别可分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料;按照成型工艺可分为光固化材料、粉末床熔融材料、材料挤出材料、粘合剂喷射材料等;按照应用领域可分为结构材料、生物材料、功能材料和牺牲材料等。近年来,随着 3D 打印技术从“原型制造”向“功能制造”的跨越,3D 打印材料的研发成为学术界和产业界关注的热点<sup>[2]</sup>。

在生物医学领域,3D 生物打印与增材制造的融合正在推动组织工程领域的革命性变革。通过精确控制细胞、生物材料和生长因子的空间分布,3D 生物打印可以构建仿生组织工程支架,实现受损组织的再生修复。从精密支架设计到仿生组织再生,这一技术路径为器官缺损治疗提供了全新方案。

在医疗器械领域,功能化可生物降解胆道支架的研究取得了重要进展。传统胆道支架存在远期再狭窄和二次介入取出等问题,而 3D 打印可生物降解支架可以根据临床需要定制几何结构,在完成支撑功能后逐渐降解吸收,避免了二次手术。从材料设计到临床转化,这一领域的研究正在推动消化道支架技术的革新。

智能自适应水凝胶是下一代组织工程的重要材料体系。这类水凝胶能够响应温度、pH、酶、光、电等外界刺激,发生可逆的体积相变或溶胶-凝胶转变,实现对药物释放、细胞行为的时空精准调控。新兴智能自适应水凝胶的发展为构建动态仿生微环境和智能药物递送系统提供了新平台<sup>[3]</sup>。

纺织基柔性传感器在人体运动传感领域的应用是 3D 打印功能材料的代表性方向。通过将导电纳米材料与柔性高分子复合,3D 打印可以制备具有高灵敏度、宽响应范围和良好柔韧性的可穿戴传感器,

用于人体关节运动、肌肉活动和生理信号的实时监测<sup>[4]</sup>。

血管化是组织工程类器官构建的核心挑战。在口颌面组织工程领域,构建具有血管网络的功能化类器官是修复复杂组织缺损的关键。通过 3D 打印技术构建血管化稳态微环境,可以促进移植组织的存活和功能整合<sup>[5]</sup>。

本文旨在对 3D 打印材料的研究进展进行系统性综述。文章结构安排如下:第一章介绍金属 3D 打印材料;第二章阐述高分子 3D 打印材料;第三章系统综述生物 3D 打印材料;第四章介绍功能型 3D 打印材料;第五章分析典型应用;第六章讨论当前挑战与未来发展方向。

## 1 金属 3D 打印材料

### 1.1 钛及钛合金材料

钛及钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性和生物相容性,成为金属 3D 打印领域应用最广泛的材料之一。选区激光熔化、电子束熔化等粉末床熔融技术是实现钛合金高精度成形的核心工艺。

钛 3D 打印及其在生物医学植入物中的应用研究表明,3D 打印钛植入体具有传统制造方法无法实现的多孔结构和个性化外形。通过调控打印参数和后处理工艺,可以获得力学性能与人体骨组织相匹配的多孔钛支架。多孔结构不仅降低了植入体的弹性模量,减轻了应力遮挡效应,还为骨组织长入提供了空间,促进了植入体与宿主骨的生物固定。表面改性处理(如碱热处理、微弧氧化、生物活性涂层)可以进一步改善钛植入体的骨整合性能。3D 打印钛植入体已在颅颌面修复、脊柱融合、关节置换等临床领域得到应用<sup>[6]</sup>。

3D 打印椎间融合器的研究进展表明,钛合金椎间融合器通过多孔结构设计可以优化其力学性能和骨整合能力。传统 PEEK 椎间融合器虽然弹性模量与骨组织接近,但生物惰性限制了骨融合效果。3D 打印钛合金融合器兼具适当的力学支撑和优异的骨传导性,其三维贯通的多孔结构有利于骨组织长入和血管化。通过拓扑优化设计,可以在保证力学强度的前提下最大化孔隙率,促进融合效果。表面纳米化和生物因子负载进一步增强了融合器的成骨活

性<sup>[7]</sup>。

### 1.2 模具钢及其他金属材料

激光 3D 打印模具钢工艺和力学性能研究进展表明, 模具钢的 3D 打印主要面临高硬度、高热裂敏感性等挑战。通过优化激光功率、扫描速度、扫描间距等工艺参数, 控制熔池冶金行为和热应力分布, 可以获得致密度高、裂纹少的打印件。预热处理和缓冷措施可以有效降低温度梯度, 减少热应力。后处理热处理(去应力退火、固溶时效等)可以进一步优化微观组织, 提高力学性能。激光 3D 打印模具钢在随形冷却水道模具、注塑模具镶件等领域展现出独特优势, 可以显著缩短注塑周期, 提高产品质量。

粗晶 WC-Co 硬质合金原料制备研究进展表明, 硬质合金的 3D 打印是金属基复合材料增材制造的前沿方向。粗晶 WC-Co 具有更好的断裂韧性和抗热疲劳性能, 适用于冲击载荷和热循环工况。然而, WC 颗粒的高熔点和与粘结相 Co 的熔点差异给 3D 打印带来挑战。通过喷雾干燥制备球形复合粉末、优化激光扫描策略、采用高能束流(电子束)等措施, 可以改善打印质量和材料性能。3D 打印硬质合金在耐磨零件、切削工具、矿山机械等领域具有应用潜力<sup>[8]</sup>。

## 2 高分子 3D 打印材料

### 2.1 光固化 3D 打印材料

光固化 3D 打印技术利用紫外光或可见光选择性固化液态光敏树脂, 具有成型精度高、表面质量好、速度快等优点, 是高分子 3D 打印的主流技术之一。

光固化 3D 打印技术研究进展及其发展应用表明, 光敏树脂的组成包括低聚物、单体、光引发剂和添加剂。低聚物决定了固化物的基本力学性能, 环氧丙烯酸酯、聚氨酯丙烯酸酯、聚酯丙烯酸酯等各有点; 单体的类型和含量调节体系粘度和交联密度; 光引发剂吸收光能产生活性自由基或阳离子, 引发聚合反应。近年来, 光固化树脂的发展方向包括高韧性树脂、耐高温树脂、透明树脂、生物相容树脂等。光固化 3D 打印在牙科、珠宝、手板模型、微流控器件等领域应用广泛<sup>[9]</sup>。

3D 打印功能与智能型高分子水凝胶的研究进展显示, 水凝胶是一类具有三维亲水网络的高分子材料, 能够吸收大量水分而不溶解。通过 3D 打印技术可以构建具有复杂几何结构的水凝胶支架, 用于

组织工程支架、柔性传感器、药物递送载体等。智能水凝胶能够响应温度、pH、离子强度、酶、光、电、磁等刺激发生体积相变或溶胶-凝胶转变。例如, 聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm) 在温度高于低临界溶解温度时发生体积收缩; 壳聚糖在酸性条件下溶胀、中性条件下收缩。智能水凝胶与 3D 打印的结合, 为构建动态响应性器件和四维打印提供了材料基础<sup>[10]</sup>。

### 2.2 纤维增强复合材料

纤维增强树脂基复合材料具有比强度高、比模量高的特点, 3D 打印技术的发展为复合材料的自由成形提供了新途径。

3D 打印纤维增强树脂基复合材料研究进展表明, 短纤维增强复合材料可以通过熔融沉积成型或光固化成型制备, 纤维的加入提高了打印件的拉伸强度和模量。碳纤维、玻璃纤维、凯夫拉纤维等是常用的增强体。然而, 短纤维增强效果有限, 纤维在基体中的取向分布难以精确控制。表面改性处理(如氧化、上浆)可以改善纤维与基体的界面结合强度, 提高载荷传递效率。连续纤维增强是更高性能的复合材料 3D 打印方案, 通过双喷头或多喷头设计, 在打印基体的同时铺设连续纤维束, 实现高性能结构件的一体化制造。

连续纤维增强复合材料 3D 打印结构拓扑优化及路径规划研究进展显示, 连续纤维 3D 打印将材料-结构-性能一体化设计理念推向新高度。拓扑优化可以在给定的边界条件下获得最优的材料分布方案, 再通过路径规划算法将纤维束沿着主应力迹线铺设, 实现纤维的高效承载。与传统的纤维铺放技术相比, 3D 打印可以制造具有复杂内部结构和变刚度特性的复合材料构件。该技术在航空航天轻量化结构、高性能运动器材、机器人手臂等领域具有广阔应用前景<sup>[11]</sup>。

### 2.3 生物可吸收高分子材料

生物可吸收高分子材料是生物医学 3D 打印的重要材料体系, 聚乳酸、聚己内酯、聚乙醇酸及其共聚物是代表性品种。

功能化可生物降解胆道支架的研究进展表明, 胆道支架用于治疗胆道良恶性狭窄, 传统金属或塑料支架存在再狭窄和二次取出问题。3D 打印可生物降解支架可以根据患者胆道的解剖结构定制几何尺寸, 通过调控材料组成和打印参数, 实现降解速率

的匹配。功能化策略包括：负载抗增殖药物抑制再狭窄、包覆抗菌涂层预防胆道感染、复合影像增强材料便于术后随访。可生物降解胆道支架的临床转化是消化道支架领域的重要方向<sup>[12]</sup>。

冠状动脉生物可吸收支架的高分子材料、成型工艺及临床应用研究进展显示，冠脉支架是心血管介入治疗的核心器械。生物可吸收支架（BRS）在完成血管支撑后逐渐降解吸收，避免了金属支架长期留存导致的血管舒缩功能障碍和晚期支架内血栓风险。聚-L-乳酸（PLLA）是 BRS 的主流材料，通过 3D 打印或激光切割工艺成型。BRS 的挑战在于力学性能（径向支撑力）与降解行为的平衡、以及炎症反应的控制。新型 BRS 的设计理念包括复合材料增强、药物涂层优化和厚度减薄<sup>[13]</sup>。

### 3 生物 3D 打印材料

#### 3.1 组织工程支架材料

生物 3D 打印通过逐层沉积含有细胞的生物墨水，构建具有仿生结构和生物功能的活性组织工程支架，是再生医学的前沿方向。

3D 生物打印与增材制造在组织工程中的应用表明，生物墨水的设计是生物 3D 打印的核心。理想的生物墨水应具备良好的可打印性（适宜的粘度和流变行为）、生物相容性（支持细胞粘附、增殖和分化）、力学匹配性（与靶组织相近的模量）和可降解性（降解速率与组织再生匹配）。天然高分子（明胶、海藻酸盐、胶原、透明质酸、壳聚糖）和合成高分子（聚乙二醇、普朗尼克、明胶甲基丙烯酸酯）是常用的生物墨水组分。通过多材料打印和同轴打印技术，可以构建具有异质结构和血管网络的复杂组织支架<sup>[14]</sup>。

用于下一代组织工程的新兴智能自适应水凝胶的发展显示，智能水凝胶能够模拟天然细胞外基质的动态力学微环境。酶响应水凝胶可在细胞分泌的基质金属蛋白酶作用下降解，为细胞迁移和组织重塑提供空间；光响应水凝胶可通过光交联或光裂解实现细胞行为的时空调控；电响应水凝胶可用于心肌和神经组织的电刺激培养。智能水凝胶与 3D 打印的结合，为构建体外疾病模型和药物筛选平台提供了新工具。

血管化稳态是颌面组织工程类器官构建的关键。复杂组织缺损的修复需要充足的血液供应以保证移植物的存活，3D 打印技术可以构建仿生血管网络。通过牺牲材料打印（如 Pluronic F127、明胶）构

建血管通道模板，打印后通过温度或酶处理去除牺牲材料，形成贯通的微通道网络。内皮细胞在通道内壁接种形成内皮层，构成功能化血管。血管化策略的应用显著提高了大体积组织工程移植物在体内的存活率和功能整合<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 丝素蛋白生物材料

生物 3D 打印丝素蛋白的研究进展表明，丝素蛋白是从蚕丝中提取的天然高分子，具有优异的生物相容性、力学性能和可降解性。丝素蛋白水溶液在特定条件下可发生溶胶-凝胶转变（如超声诱导、pH 调节、离子交联），适合于挤出式 3D 打印。丝素蛋白打印支架的力学性能可以通过调控浓度、交联度和后处理（甲醇浸泡、水蒸气退火）来调节，从软组织修复到骨组织工程均可适应。丝素蛋白还可以复合羟基磷灰石、纳米粘土等无机成分，制备仿生复合材料。

#### 3.3 3D 皮肤模型与注射填充物

基于 3D 皮肤模型的整形用注射填充物体外评价研究显示，动物实验替代是化妆品和医疗器械评价的重要趋势。3D 生物打印可以构建具有表皮层和真皮层的人造皮肤模型，用于评估注射填充物的细胞毒性、致敏性和刺激性。与传统的二维细胞培养和动物实验相比，3D 皮肤模型更接近人体真实生理环境，同时符合 3R 原则（减少、优化、替代）。该技术在化妆品安全性评价、皮肤药物透皮吸收研究等领域具有广阔应用前景。

#### 3.4 3D 生物打印伤口敷料

3D 生物打印伤口敷料的研究进展显示，慢性难愈创面（如糖尿病足、压疮）的治疗是临床难题。3D 打印伤口敷料可以根据创面的形状和深度定制，实现精准覆盖。功能化设计包括：负载抗菌剂（银离子、抗菌肽、纳米酶）预防感染；负载生长因子（EGF、bFGF、VEGF）促进血管化和上皮化；设计具有单向导湿性的 Janus 结构，保持创面湿润而不浸渍。多材料 3D 打印可以制备具有梯度结构和复合功能的智能伤口敷料，实现按需释放和响应性治疗<sup>[16]</sup>。

#### 3.5 类器官与互作模型

类器官互作模型研究现状与趋势显示，类器官是在体外三维培养条件下，由干细胞自组织形成的微型器官，能够模拟体内器官的结构和功能。3D 打印技术可以构建多类器官共培养的互作模型，研究组织-组织界面和器官-器官通讯。例如，肝-肾互作

模型用于药物代谢和毒性联合评价；肠-血管交互模型用于研究营养吸收和炎症迁移。类器官交互模型是疾病机制研究和药物筛选的重要平台<sup>[17]</sup>。

## 4 功能型 3D 打印材料

### 4.1 传感器与柔性电子材料

3D 打印为柔性电子和可穿戴传感器的制造提供了高自由度、低成本的解决方案。

纺织基传感器用于人体运动传感的研究进展表明，将导电材料（碳纳米管、石墨烯、银纳米线、导电聚合物）与纺织纤维复合，可以制备具有压阻、电容或压电效应的柔性传感器。3D 打印可以在纺织品表面精确定位沉积导电图案，实现多通道传感阵列的集成。这类传感器可用于人体关节角度、肌肉活动、呼吸频率、脉搏波等生理信号的实时监测，在运动康复、人机交互、远程医疗等领域具有应用价值<sup>[18]</sup>。

基于微针阵列的固态食品质量安全检测技术研究显示，微针阵列可以穿透食品表面，提取组织液或直接检测表面分析物。3D 打印可以实现微针几何参数（高度、间距、锥角）的精确控制，优化穿刺效率和取样量。表面功能化（抗体固定、分子印迹）赋予微针对特定分析物（农药残留、毒素、病原体）的特异性识别能力。该技术为食品质量安全的快速、现场检测提供了新工具。

直书写 3D 打印传感器的设计、制造与应用探索研究表明，直书写（DIW）是一种基于挤出成型的 3D 打印技术，适用于多种功能油墨的沉积。导电油墨（银浆、碳浆、液态金属）、敏感油墨（压阻、电容、压电）和绝缘油墨的协同打印，可以实现传感-导线-封装的一体化制造。DIW 打印的传感器包括应变传感器、压力传感器、温度传感器、气体传感器等，在软体机器人、电子皮肤、结构健康监测等领域具有应用潜力<sup>[19]</sup>。

### 4.2 油水分离材料

3D 打印材料在油水分离领域的应用研究显示，含油废水的处理和海洋溢油回收是环境领域的重要课题。3D 打印可以构建具有超疏水/超亲油特性的多孔结构，用于油水的高效分离。超疏水表面通过微纳复合结构和低表面能化学物质的协同作用实现，而 3D 打印能够精确控制微结构的形貌和分布。打印的油水分离器具有高通量、高分离效率、可重复使用的特点。多孔结构的孔径和孔隙率可调，适应不同黏度油品的分离需求。

### 4.3 微针给药系统

多糖微针系统在角膜病治疗中的应用进展显示，微针是微创经皮给药技术的重要载体。传统给药方式存在生物利用度低、患者依从性差等问题。3D 打印微针可以实现针高、针形、阵列密度的个性化定制，优化给药效率和患者舒适度。多糖材料（透明质酸、壳聚糖、海藻酸盐）具有良好的生物相容性和可降解性，负载药物后通过微针穿透角膜屏障，实现眼部疾病的靶向治疗。3D 打印微针在糖尿病视网膜病变、角膜新生血管等疾病的治疗中展现出潜力<sup>[20]</sup>。

## 5 3D 打印材料的生物医学应用

### 5.1 骨科与口腔颌面应用

3D 打印椎间融合器的研究进展表明，脊柱融合术是治疗椎间盘退行性疾病的标准术式。3D 打印钛合金融合器通过多孔结构设计，实现了与骨组织匹配的弹性模量和优异的骨整合性能。表面纳米化和生物活性涂层进一步促进了骨融合。临床试验显示，3D 打印融合器的融合率和临床优良率与传统 PEEK 融合器相当或更优<sup>[21]</sup>。

人工复合材料在鼓室成形术中的应用进展显示，鼓膜穿孔是中耳炎的常见并发症。传统修复材料（颞肌筋膜、软骨膜）存在取材有限和供区损伤问题。3D 打印人工复合材料鼓膜补片可以根据穿孔形状定制，丝素蛋白/胶原复合支架具有良好的生物相容性和声学特性。组织工程鼓膜的研究为听力重建提供了新思路。

3D 打印技术在口腔颌面部肿瘤切除与重建中的研究进展表明，颌面部肿瘤切除后常导致复杂的骨和软组织缺损，传统修复方法难以恢复精细的面部轮廓。3D 打印技术可以制备个性化的钛合金修复体、生物陶瓷支架和 PEEK 植入物，实现功能与外形的双重重建。术前模拟和手术导板的应用提高了手术的精准度和安全性<sup>[22]</sup>。

### 5.2 胆道与心血管支架

功能化可生物降解胆道支架的研究显示，胆道支架植入是治疗胆道恶性梗阻的重要姑息手段。3D 打印可生物降解支架可以定制弯曲角度和分支结构，适应胆道系统的复杂解剖。药物负载（紫杉醇、雷帕霉素）抑制肿瘤生长和再狭窄，延长了支架通畅期<sup>[23]</sup>。

冠状动脉生物可吸收支架的研究表明，BRS 在完成血管支撑后逐渐降解，避免了晚期支架血栓和血管舒缩功能障碍。PLLA 基 BRS 的径向支撑力与

金属支架仍有差距,新型复合材料和高分子合金的研究正在改善这一问题。优化降解速率和炎症反应是 BRS 临床转化的关键<sup>[24]</sup>。

### 5.3 液体定向运输与微流控

3D 打印技术在液体定向运输方面的应用与挑战研究显示,仿生结构(如仙人掌刺、蜘蛛丝、猪笼草口缘)可以实现液体自发定向运输。3D 打印可以精确复现这些微观结构,用于微流控芯片、集水装置和液体传输器件。结构参数(锥角、沟槽深度、间距)对液体驱动力的影响规律是该领域的核心科学问题。高精度 3D 打印(双光子聚合、投影微立体光刻)为仿生液体操控器件的发展提供了制造基础<sup>[25]</sup>。

## 6 讨论与展望

### 6.1 当前发展成就与问题反思

经过多年发展,3D 打印材料的研究取得了显著成就。金属 3D 打印材料在航空航天复杂构件、个性化医疗植入体等领域实现产业化应用;高分子材料从结构模型拓展到生物可吸收支架、柔性传感器等高端功能领域;生物 3D 打印材料在组织工程支架、类器官构建、伤口敷料等方面取得重要突破;功能型材料在柔性电子、微纳器件等前沿方向展现出巨大潜力。

然而,3D 打印材料的发展仍面临诸多挑战。一是材料种类有限,相比于传统制造工艺的数千种材料,适用于 3D 打印的成熟材料仍然偏少;二是打印精度与速度的矛盾,高精度打印往往伴随着低成型效率,制约了大尺寸部件的制造;三是力学性能与生物功能的平衡,生物打印材料需要同时满足可打印性、细胞相容性和力学要求,技术难度高;四是标准化与质量控制问题,3D 打印材料的批次稳定性、打印过程的可重复性以及产品认证标准体系尚不完善;五是成本问题,高性能金属粉末、生物墨水的制备成本高,限制了 3D 打印在消费级市场的普及。

### 6.2 未来发展趋势

展望未来,3D 打印材料将呈现以下发展趋势:

多材料与多工艺融合。单一材料难以满足复杂器件的多功能需求,多材料 3D 打印技术(如多喷头切换、材料喷射阵列)可以实现异质材料的一体化打印,构建梯度结构、传感器-结构一体化器件。多工艺融合(如打印+减材、打印+表面处理)将进一步拓展 3D 打印的制造边界。

4D 打印与智能材料。4D 打印是 3D 打印与智

能材料的结合,打印的物体在外界刺激(温度、湿度、磁场、光等)下发生形状或功能的时空演变。形状记忆聚合物、水凝胶、液晶弹性体是 4D 打印的基础材料。4D 打印在软体机器人、自组装结构、智能医疗器件等领域具有颠覆性潜力。

人工智能辅助材料开发。机器学习算法可以加速 3D 打印新材料的研发。通过建立材料配方-打印参数-力学性能/生物性能的数据库和预测模型,可以高效筛选最优配方,减少试错实验。人工智能还可以用于打印过程的实时监控和参数自适应调整,提高打印成功率。

临床转化与产业化。3D 打印医疗器械的个性化优势与临床需求高度契合。随着审批政策的完善(如 FDA、NMPA 的 3D 打印医疗器械指导原则)和生物墨水技术的成熟,定制化植入体、组织工程产品将加速临床转化。同时,3D 打印材料的规模化生产和成本降低将推动其在汽车、消费电子等民用领域的普及。

## 7 结论

本文系统综述了 3D 打印材料的研究进展。在金属材料方面,钛合金、模具钢等材料的选区激光熔化技术趋于成熟,在航空航天和生物植入体领域实现产业化应用。在聚合物材料方面,光固化树脂、纤维增强复合材料、生物可吸收材料的性能调控策略不断优化,应用领域从原型展示拓展到功能器件。在生物材料方面,水凝胶、丝素蛋白等生物墨水的设计原则日益清晰,3D 生物打印在组织工程、伤口敷料、药物筛选等再生医学领域展现出巨大潜力。在功能型材料方面,柔性传感材料、微针给药系统、油水分离材料等前沿方向快速拓展。

当前,3D 打印材料正朝着高性能化、多功能化、生物活性化、智能化方向发展。多材料打印、4D 打印、人工智能辅助材料开发等前沿方向将为 3D 打印技术带来新的突破。尽管仍面临材料种类有限、精度与速度矛盾、标准化不完善等挑战,但随着材料科学、制造技术和生物医学工程的交叉融合,3D 打印材料必将在先进制造、精准医疗、柔性电子等领域发挥越来越重要的作用,推动制造业从“减材”向“增材”的根本性转变。

## 参考文献

- [1] Rama M, Suresh S A, John E A, et al. Revolutionizing tissue

- engineering: integrating 3D bioprinting and additive manufacturing for precision scaffold design and biomimetic tissue regeneration[J]. *Materials Technology*, 2025, 40(1).
- [2] Tang S, Ye R, Lai G, et al. Advances in functionalized biodegradable biliary stents: From material design to clinical translation[J]. *Biomaterials Advances*, 2025, 182: 214699.
- [3] Sojdel S, Panjipour A, Castillo M, et al. Emerging Smart and Adaptive Hydrogels for Next-Generation Tissue Engineering[J]. *Bioengineering*, 2025, 13(1): 50.
- [4] Yin L, Sun X. Textile-based sensors for human motion sensing: recent developments and future perspectives[J]. *Nanocomposites*, 2025, 11(1): 79-98.
- [5] Zhang X, Li Z, Mou Q, et al. Vascularized Homeostasis: The Key to Orofacial Tissue-Engineered Organoid Construction[J]. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 2025.
- [6] 沈浩斌, 郑子豪, 刘睿馨, 等. 生物3D打印丝素蛋白研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2025, 43(12): 1-12.
- [7] 乔可心, 李奕泽, 林运. 冠状动脉生物可吸收支架的高分子材料、成型工艺及临床应用研究进展[J]. *北京生物医学工程*, 2025, 44(06): 648-654.
- [8] 吴小平, 徐卫, 刘永胜. 钛 3D 打印及其在生物医学植入物中的应用[J]. *钢铁钒钛*, 2025, 46(06): 106-116+123.
- [9] 许文娜, 韩倩倩, 史建峰, 等. 基于3D皮肤模型的整形用注射填充物体外评价: 动物实验替代的机会与挑战[J]. *组织工程与重建外科*, 2025, 21(06): 593-598+606.
- [10] 张嘉, 张俊豪, 贾庆功, 等. 光固化3D打印技术研究进展及其发展应用[J]. *粉末冶金工业*, 2025, 35(06): 120-129+141.
- [11] 尹辰, 宋发成, 董文星, 等. 3D 打印椎间融合器研究进展[J]. *中国医疗器械杂志*, 2025, 49(06): 625-631.
- [12] 金银玲, 刘艳梅, 史吉鹏, 等. 3D 打印纤维增强树脂基复合材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2025, 53(11): 34-40+48.
- [13] 沈以勒, 侯文娜, 倪皓洁, 等. 基于微针阵列的固态食品安全检测技术[J]. *中国食品学报*, 2025, 25(11): 402-413.
- [14] 刘颜铭, 陈阳, 马雅丽, 等. 3D 打印技术在液体定向运输方面的应用与挑战[J]. *表面技术*, 2025, 54(21): 1-22.
- [15] 牛婉莹, 刘建康, 王志强. 连续纤维增强复合材料 3D 打印结构拓扑优化及路径规划研究进展[J]. *材料导报*, 2025, 39(21): 260-269.
- [16] 黎茂扬, 于培师, 朱指南, 等. 直书写3D打印传感器的设计、制造与应用探索[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(21): 88-103.
- [17] 江汰鹏, 高助威, 王迎迎, 等. 3D 打印材料在油水分离领域的应用研究[C]//2025 年海南省机械工程学会科技学术论坛论文集, 2025: 22-31.
- [18] 陈琪, 黄俊森, 彭立. 多糖微针系统在角膜病治疗中的应用进展[J]. *国际眼科杂志*, 2025, 25(11): 1785-1790.
- [19] 胡浩磊, 张素娜, 宫文晶, 等. 人工复合材料在鼓室成形术中的应用进展[J]. *中华耳科学杂志*, 2025, 23(07): 874-878.
- [20] 杨健, 陈宇航, 黄丽容, 等. 粗晶 WC-Co 硬质合金原料制备研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2025, 19(06): 1015-1022.
- [21] 马欣, 孙睿. 3D 打印技术在口腔颌面部肿瘤切除与重建中的研究进展[J]. *中国医疗器械杂志*, 2025, 49(05): 514-519.
- [22] 刘爽, 王苏东, 郭文强, 等. 激光3D打印模具钢工艺和力学性能研究进展[J]. *电焊机*, 2025, 55(09): 47-58.
- [23] 邱焕璐, 杜浩然, 胡慧丽. 类器官互作模型研究现状与趋势[J]. *中国细胞生物学学报*, 2025, 47(09): 2259-2270.
- [24] 李蓉, 俞润昊, 刘川, 等. 3D 打印功能与智能型高分子水凝胶的研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(09): 240-245.
- [25] 施成海, 雷常彬, 何凌霄, 等. 3D 生物打印伤口敷料的研究进展[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2025, 39(10): 1351-1355.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



**OPEN ACCESS**