

增材制造技术在不同材料和部件上的应用

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1002

王 皞 王百涛 高帅龙

上海理工大学

增材制造研究院

上海 200093

摘 要: 增材制造作为一种革命性的制造方法,已经在多个领域取得了显著成效。梳理增材制造技术在不同材料和部件上的应用现状,深入剖析其在多领域的前沿研究。在多材料应用方面,探讨了增材制造技术在金属、聚合物和陶瓷等不同材料上的应用。在金属材料方面,激光熔化和电子束熔化等技术为制造高强度、轻量化的金属零件提供了新途径。而在聚合物领域,生物相容性强的材料广泛应用于医疗植入物和生物打印等领域。陶瓷材料的增材制造则为高温、耐腐蚀零部件的制造提供了创新解决方案。增材制造技术应用于不同部件上,如航空航天领域的轻量化零部件制造和医疗器械领域的个性化植入物等。同时,汽车制造、电子设备、包装材料等领域也在增材制造的推动下迎来了更为高效和灵活的生产方式。随着材料科学和制造技术的不断进步,通过多材料、多工艺的融合,增材制造将更加广泛地应用于各个行业,进一步推动制造业的创新和发展。

关键词: 增材制造;轻量化;医疗植入物;生物打印

中图分类号: TP391.73; TB484.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0012-11

引文格式: 王 皞,王百涛,高帅龙. 增材制造技术在不同材料和部件上的应用[J]. 包装学报, 2025, 17(1): 12-22.

科技飞速发展,制造业正迎来一场前所未有的变革。增材制造技术,作为这场变革的中流砥柱,正在逐步改变传统制造模式的格局。增材制造(additive manufacturing, AM),又称为3D打印,是一种逐层堆积材料的制造技术。与传统的减材制造方法相比,增材制造具有更大的设计灵活性和制造自由度^[1]。它打破了传统制造过程中模具和工艺限制,为制造业提供了更为灵活、高效的解决方案。

在航空航天领域,增材制造技术用于制造轻量化零部件,提高了飞机的性能^[2]。医疗器械制造方面,通过增材制造技术可以实现个性化的植入物和外科

模型,为医疗定制化提供了全新的解决途径^[3]。汽车制造、电子设备等领域也在增材制造的推动下迎来了更为高效和灵活的生产方式。故本研究梳理增材制造技术在不同材料和部件上的应用进展,并展望未来研究方向和重点,以期后续研究提供有益指引。

1 增材制造技术概述

1.1 增材制造技术的基本原理

1.1.1 材料堆积原理

增材制造技术的核心原理是基于材料堆积原理。这一原理通过逐层堆积材料,以数字模型为基础,逐

收稿日期: 2024-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(U2241245); 沈阳市自然科学基金资助项目(23503605)

作者简介: 王 皞,男,教授,主要从事金属结构材料计算和工艺仿真, E-mail: haowang7@usst.edu.cn

步构建三维实体。在制造过程中, 计算机控制机器沿着预定路径精确堆积材料, 形成最终产品(逐层堆积示意图见图 1^[4])。这种逐层堆积的方法与传统的切削加工相比, 减少了材料的浪费, 同时允许制造更为复杂的几何形状。

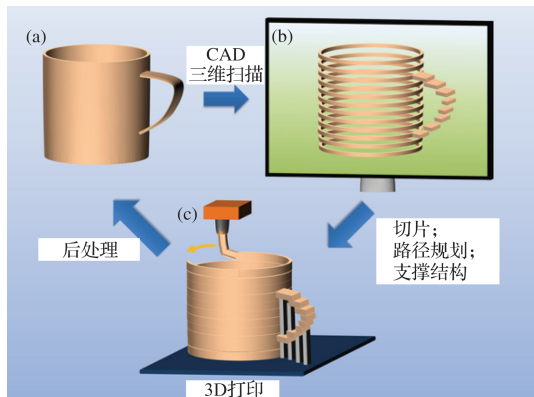


图 1 逐层堆积示意图

Fig. 1 Layer-by-layer stacking schematic

1.1.2 数字化设计与制造

增材制造技术和数字化设计与制造密切相关。在制造前, 产品的数字模型通过计算机辅助设计(CAD)软件进行创建; 然后, 通过计算机辅助制造(CAM)软件将设计转化为机器可识别的控制代码。这种数字化的设计与制造过程提高了产品的设计灵活性和精度。制造过程中, 数字化的控制允许高度自动化和可重复的生产, 有助于提高整体制造效率。图 2^[5]为利用拓扑优化技术与 3D 打印技术相结合, 实现空间桁架高性能节点的数字化设计与制造。利用 3D 打印技术完成了增材制造的优化, 验证了数字化设计的可行性。

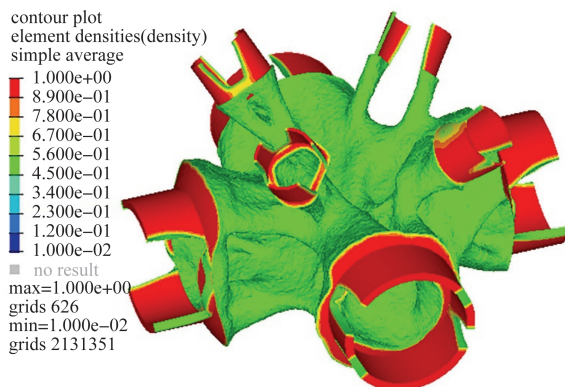


图 2 拓扑优化技术与 3D 打印技术相结合的数字化设计与制造

Fig. 2 Topology optimization technology combined with 3D printing technology to realize digital design and fabrication

1.2 增材制造技术的分类

1.2.1 基于材料的分类

增材制造技术根据使用的材料进行分类, 主要有金属、聚合物和陶瓷^[6]。金属增材制造技术为航空航天、汽车制造等领域提供了制造高强度、轻量化零部件的新途径。聚合物增材制造技术则广泛应用于医疗植入物、生物打印等领域, 其生物相容性和可塑性为医疗器械制造带来了巨大的创新空间。陶瓷增材制造技术为高温、耐腐蚀零部件的制造提供了新的思路, 在生物医学和电子器件中得到广泛应用。

1.2.2 基于工艺的分类

增材制造技术根据不同的工艺进行分类, 常见的增材制造工艺包括选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)、电子束熔化(electron beam melting, EBM)、喷墨打印等。SLS 使用高功率激光逐层熔化粉末材料, 形成三维物体^[7]; EBM 使用高能电子束将铜和钛等导电金属粉末逐层熔化在一起, 由此产生的部件具有高密度和高机械强度的特点, 可用于从涡轮叶片到髋关节植入物等领域^[8]; 喷墨打印可选择性地逐层沉积墨水材料, 以创建 3D 物体或 2D 图案, 并精确控制其结构和成分^[9]。每种工艺都有其独特的优势和适用范围。例如, SLS 适用于粉末材料, 而 EBM 更适用于金属制造。

1.3 增材制造材料

1.3.1 金属材料

金属增材制造技术广泛应用于航空航天、汽车制造等领域。常见的金属材料包括钛合金、镍合金、铝合金等, 其微观结构如图 3^[10]所示。这些金属材料具有良好的强度和导热性能, 适用于制造高强度和高耐用性的零部件。现有的金属组件 3D 打印技术主要用于制造单一材料组件。随着 AM 技术在商业上的日益普及, 在单个组件中对 3 种以上类型的异种材料进行 3D 打印的需求也在增加^[11]。

1.3.2 高性能聚合物

高性能聚合物增材制造技术在医疗、电子(见图 4^[12])、包装等领域得到广泛应用。聚酰亚胺、聚酰胺等高性能聚合物材料具有优异的力学性能和化学稳定性, 适用于生产轻量化、耐高温的零部件。工业规模的增材制造系统能够提供受控的高温打印环境, 可以打印高性能聚合物, 但是机器成本通常超过数万美元。现在, 虽然出现较低成本的高温打印机, 但是这些打印机中许多使用床加热而不是受控环境加热,

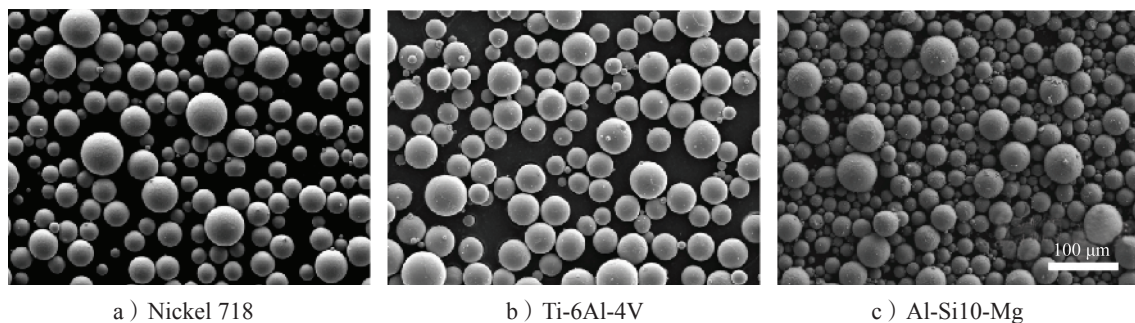


图 3 增材制造用的金属粉末

Fig. 3 Metal powders for additive manufacturing

这可能导致传热不均匀和性能不一致。

如何以低成本实现高质量、高性能聚合物的打印是目前的研究热点^[13]。Ge C. F. 等^[14]利用从压盘冲击和准静态压缩测试中得出的滞后环来估算 3D 打印光聚合物的特定阻尼能力，旨在开发 3D 打印材料的分析包装模型。在另一项工作中，Ge C. F. 等^[15]研究了 3D 打印泡沫的回弹力，发现 3D 打印泡沫具有比橡胶低得多的密度以及完全几何自由度的工程蜂窝结构，这为开发针对包装应用量身定制的高性能缓冲垫材料提供了方向。



图 4 增材制造的双反射天线

Fig. 4 Additively manufactured dual-reflector antenna

1.3.3 陶瓷材料

陶瓷增材制造技术在生物医学和电子器件制造方面展现出潜力。氧化锆、氧化铝等陶瓷材料具有优异的耐腐蚀性和生物相容性，适用于制造高性能的植入物和电子元件。陶瓷增材制造工艺与传统陶瓷制备工艺的区别主要是成型方式，它比传统的制备工艺更严格、更精细，但二者都要经历生胚烧结成瓷，温度大约在 1000~1650 °C。陶瓷增材制造技术主要可以分为三大步，即制备光敏性陶瓷浆料、数字光固化成型和热解后处理。先进陶瓷的 AM 已被证明比聚合物或金属的 AM 更具挑战性，这是由于这类材料的高熔点、脆性以及加工缺陷的低容忍度^[16]。

制备光敏性陶瓷浆料，主要包括筛选陶瓷粉末、

选择合适的光敏树脂系统（光敏树脂、分散剂、光引发剂、塑化剂等）、均匀混合陶瓷粉末与光敏树脂系统等，具体流程如图 5^[17]所示。对于相对低折射率的陶瓷粉末，像 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiO_2 等，现在的技术能够制备出很好的光固化陶瓷浆料，其单层固化深度能达到 50~200 μm 。对于相对高折射率和吸收率的陶瓷粉末，像 SiC 、 Si_3N_4 等，目前的技术还只是停留在 50 μm 以下的单层固化深度，不能够用于制备高质量的陶瓷。

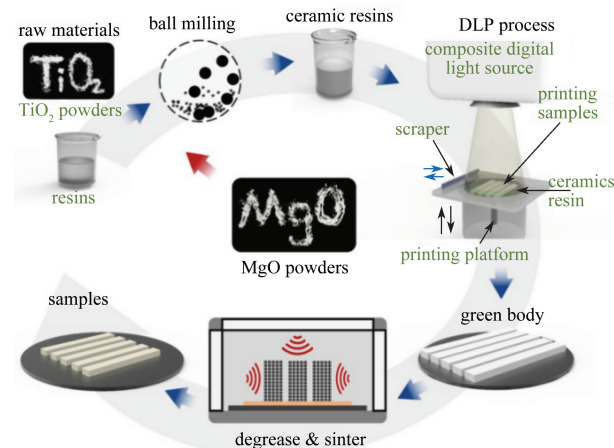


图 5 氧化钛-氧化镁复合陶瓷的数字光处理工艺制备流程

Fig. 5 Titanium oxide-magnesium oxide composite ceramics for digital light processing process preparation flow

2 增材制造技术的应用进展

2.1 金属材料

2.1.1 航空航天领域

金属增材制造技术作为一项革命性的制造方法，在航空航天领域取得了显著的应用和进展。主要体现在轻量化设计与性能提升、复杂结构制造与性能优

化、高温合金制造与耐热性改进以及定制化零部件与快速原型制作等方面。

轻量化设计一直是航空航天领域追求的目标。金属增材制造技术通过逐层堆积金属粉末,使得复杂的结构和内部通道成为可能。这种设计灵活性使得航空航天工程师能够设计更为轻量化且复杂的零部件,提高飞行器的整体性能。例如,增材制造的发动机零部件,如燃料喷嘴、高压涡轮喷嘴、高压涡轮叶片(见图6^[18]),可以减轻飞行器质量并提高热效率,从而降低燃油消耗。

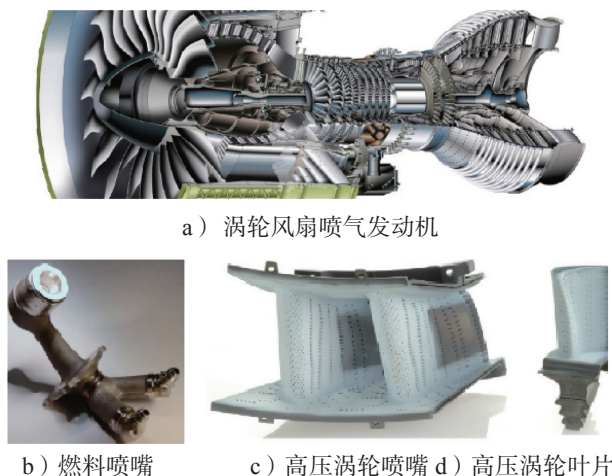


图6 增材制造的发动机零部件

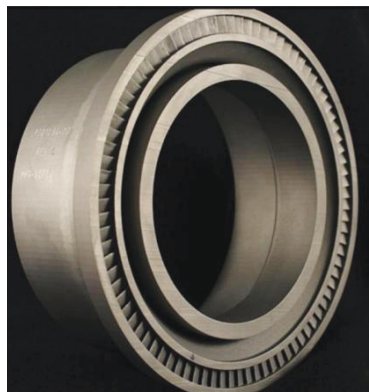
Fig. 6 Additively manufactured engine parts

在复杂结构的精确制造方面,传统制造方法可能受限于复杂结构的制造难度,而增材制造技术能够精确控制每一层材料分布,从而实现更加复杂的结构设计。在航空航天领域,这种优势在制造飞机的复杂结构部件方面表现尤为明显。例如,增材制造的结构件(如支撑结构和连接件),能够提供更高的强度和耐久性,同时降低了零部件的制造难度。

由于特殊的使用需求,航空航天领域对高温合金的需求较大。金属增材制造技术为高温合金的制造提供了新的途径。通过精确地控制温度梯度和冷却速率,增材制造技术可以实现高温合金零部件的精密制造,改进零部件的耐热性和高温性能。这对于制造涡轮引擎部件(发动机液氧涡轮泵定子^[19]和空中客车 Safran 发射器的喷油器^[20],见图7)等高温环境下工作的关键组件具有重要意义。

最后,金属增材制造技术还为航空航天领域提供了定制化零部件与快速原型制作的解决方案。在该领

域,定制化零部件的需求较为常见,工程师可以根据具体需求直接制造出符合要求的零部件,减少了制造周期,提高了生产效率。增材制造技术使得快速原型制作和小批量生产成为可能。



a) 发动机液氧涡轮泵定子



b) 空中客车 Safran 发射器的喷油器

图7 增材制造的涡轮引擎部件

Fig. 7 Additively manufactured turbine engine components

2.1.2 汽车制造领域

金属增材制造技术在汽车制造领域的应用正迅速演变,为整个汽车工业带来了前所未有的创新和发展。这项技术在汽车制造中的应用主要体现在轻量化设计、定制化零部件制造、快速原型制作和复杂结构实现等方面。

汽车制造商一直在追求更轻、更快、燃油效率更高的车辆。增材制造技术通过逐层堆积金属粉末,实现了复杂结构的制造,使得汽车零部件的设计更加灵活。例如,引擎组件、底盘部件等重要零部件的轻量化设计不仅提高了车辆的整体性能,同时减少了油耗,符合环保和能效的要求。一些复杂结构的零部件,如散热器、排气管等,传统制造方法可能难以满足其设计要求。而增材制造技术通过逐层堆积材料,

能够制造出更为复杂的结构,提高了零部件的性能和功能。同时,金属增材制造技术为汽车制造带来了定制化零部件的制造能力。随着消费者需求的多样化和个性化,汽车制造商需要灵活地调整产品设计以满足市场需求(见图8^[21])。增材制造技术使得生产定制化零部件变得更为容易,不再受限于传统制造工艺。这意味着制造商可以更好地满足不同市场和消费者的需求,提高了产品差异化竞争力。



图8 增材制造的 ICC 雷达安装支架的上下视图

Fig. 8 Top and bottom views of additively manufactured ICC radar mounting brackets

在汽车工业中的快速原型制作方面,金属增材制造技术也发挥着重要作用^[22]。传统的制造方法需要制作模具,而增材制造技术可以直接根据 CAD 模型制造零部件,避免了制作模具。如图9^[23]所示,工程师通过选区激光熔化(selective laser melting, SLM)工艺制造钢或铝质零件,这极大地加速了新车型的开发周期,使得汽车制造商能够更迅速地推出新车型以适应市场变化。金属增材制造技术在汽车制造中的应用为整个汽车工业注入了新的活力。通过轻量化设计、定制化零部件制造、快速原型制作和复杂结构实现等方面的突破,增材制造技术助力汽车行业实现更高效、更灵活和更创新的生产方式,为未来汽车的发展奠定了坚实的基础。

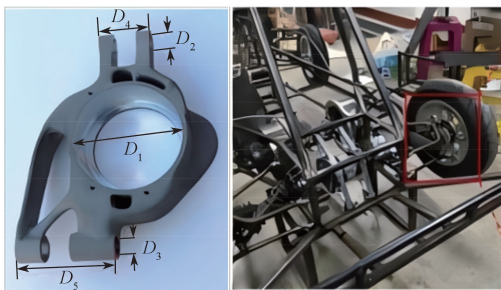


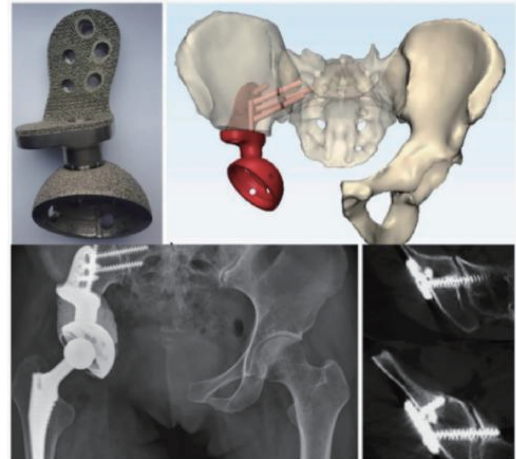
图9 增材制造的关节部件及其与车架的组装

Fig. 9 Additively manufactured articulated parts and their assembly to the frame

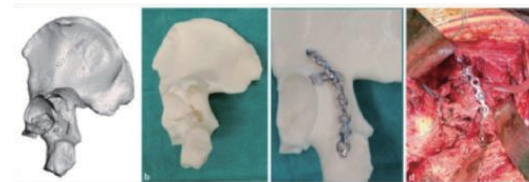
2.1.3 医疗植入金属件

金属增材制造技术在医疗植入金属件领域的应用正迅速推动医疗器械的革新和个性化治疗的实现。

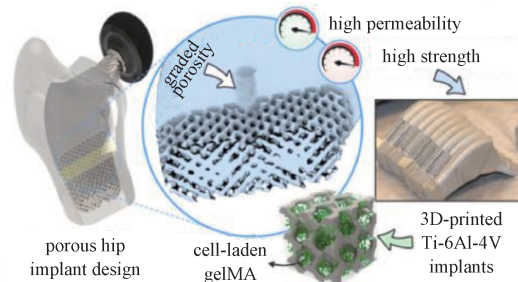
增材制造技术实现了植入金属件的轻量化设计,为医疗植入金属件提供了全新的制造方式。在医疗领域,特别是骨科植入件的制造中,轻量化设计对于患者的康复至关重要。此外,增材制造技术还可以满足医疗器械制造商复杂的几何设计要求,精确控制材料分布。这不仅有助于患者更快地适应植入物,还降低了术后并发症的风险。同时,金属多孔支架具有匹配的弹性模量、更好的强度和生物相容性,因此在骨组织置换中具有良好的前景^[24]。金属增材制造技术在骨骼植入物中的应用如图10^[25-28]所示,其中图10c为用于生物渗透性(外围设计的大孔率较高)和增强机械强度(中心大孔率较低)的功能分级多孔金属髋关节植入物,高外围渗透性使其可以与载有细胞的明胶甲基丙烯酸酯基结合^[25]。



a) 采用电子束粉末床融合技术制作金属骨盆假体



b) 通过额外制造的金属假体进行骨盆骨折固定



c) 多孔金属髋关节植入物

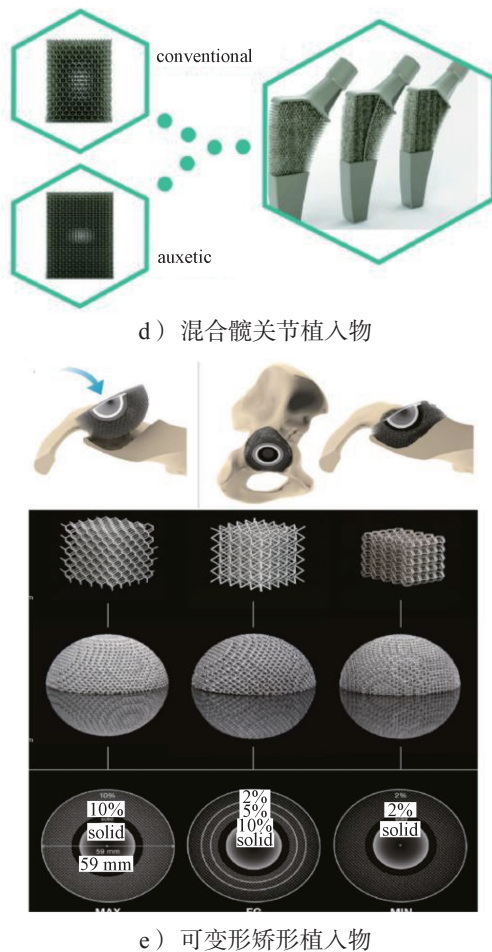


图 10 金属增材制造技术在骨骼植入物中的应用

Fig. 10 Application of metal additive manufacturing in skeletal bone implants

定制化零部件的制造是增材制造技术在医疗植入金属件中的一大亮点。每个患者的身体结构和需求都是独特的，而传统制造方法无法满足个性化植入件的要求。增材制造技术允许根据患者的具体解剖结构和医疗需求进行定制设计，为患者提供更贴合身体的、更符合个体差异的医疗解决方案。此外，增材制造支架的内部孔隙结构为进一步开发和设计功能性植入物提供了机会，以实现更好的组织整合和耐久性^[29]。

增材制造技术的灵活性和高效性缩短了生产周期，加速了植入件的制造过程。增材制造技术不需要制作复杂的模具，可以直接根据数字模型进行制造，减少了中间环节，提高了生产效率。这对于需要紧急植入件的患者而言，意味着更迅速的手术安排和更快的康复过程。

增材制造技术的应用为医疗植入金属件带来了优化的外形、材料和结构^[30]。通过优化设计，植入

件的生物相容性和力学性能得到提升，降低了患者术后的不适感和排斥风险。同时，新材料的应用也为植入件提供更多的选择，以适应不同的医疗需求。金属增材制造技术在医疗植入金属件领域的应用为医疗器械制造注入了新的活力，推动了医疗器械行业向更为个性化、精准和高效的方向发展，为患者提供了更优质的医疗服务。随着技术的不断进步，相信这一领域将迎来更多创新和突破，进一步提升医疗植入技术的水平。

2.2 高性能聚合物

2.2.1 医疗领域

在医疗领域，高性能聚合物增材制造技术广泛应用于生产定制的医疗器械和植入物。例如，通过患者的 CT 扫描数据，可以精确制造适应患者骨骼结构的人工关节和植入物，提高手术的成功率和患者的生活质量。通过增材制造技术，可以实现医疗器械的个性化设计和快速制造，如外科手术工具、支架等。这种个性化制造方式提高了医疗器械的适应性，同时减少了生产周期。

2.2.2 电子设备制造领域

高性能聚合物增材制造技术在电子设备制造中展现出卓越的应用前景^[31]。这种先进的制造方法不仅提供了更灵活的设计空间，还在电子设备领域引领着多方面的创新。

高性能聚合物增材制造技术为电子设备提供了轻量、高强度的零部件制造解决方案。通过逐层堆积高性能聚合物材料，可以实现更复杂、更轻盈的外壳设计，同时保持较高的力学强度和耐用性。这为电子设备的轻量化设计提供了技术支持，减轻了设备整体重量，提升了携带和使用的便捷性。其次，高性能聚合物增材制造技术在电子设备的散热系统和外壳设计方面发挥了关键作用。通过增材制造技术，可以直接制造具有复杂内部通道结构的散热器（见图 11^[32]），提高散热效率。同时，可以根据设备的独特形状和需求，灵活定制外壳，改善设备的整体散热性能，确保其在高负荷工作条件下的稳定运行。

高性能聚合物增材制造技术也为电子设备提供了个性化制造的机会。通过直接制造定制化的零部件，例如支架、连接器等，可以更好地适应不同设备的特殊要求，提高设备的性能和可靠性。这种个性化制造还使得电子设备制造更加灵活，适应市场快速变化的需求。



图 11 在 CPU 芯片上直接印刷散热片

Fig. 11 Direct printing of heat sinks on CPU chips

2.2.3 汽车内饰零部件

在汽车制造中, 聚合物增材制造技术被用于生产汽车内饰零部件, 如仪表板、门板、方向盘 (见图 12^[33]) 等。通过增材制造技术, 可以实现更轻量化、更个性化的设计, 同时减少零部件的制造工艺和原材料浪费, 符合汽车制造的环保理念。

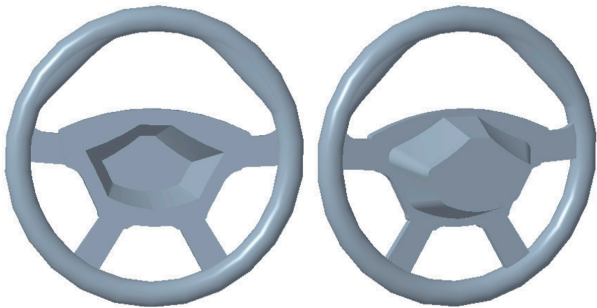


图 12 汽车方向盘的三维模型

Fig. 12 3D model of a car steering wheel

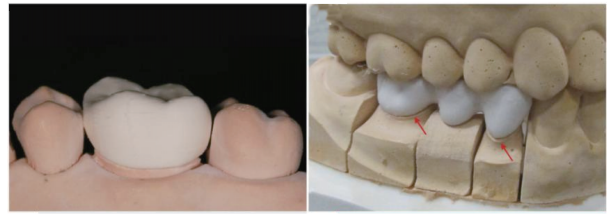
2.2.4 消费品制造

聚合物增材制造技术在消费品制造中也有着重要应用, 如运动鞋、眼镜框架、包装盒等。通过增材制造技术, 可以根据消费者个性化的需求进行定制, 提供更符合用户体验和审美需求的产品, 推动了消费品制造业的创新及其个性化包装定制。

2.3 陶瓷材料

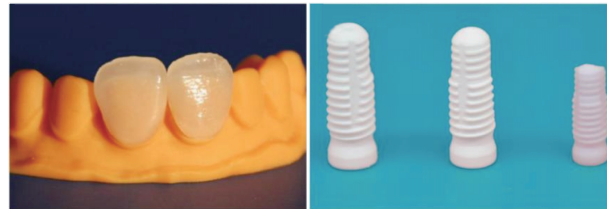
2.3.1 生物医学领域

陶瓷材料的高耐磨性和生物惰性使其成为理想的生物医学应用材料^[34]。通过陶瓷增材制造技术, 可以制造出具有优异生物相容性的陶瓷植入物, 用于骨骼修复、关节置换和牙科修复等领域 (见图 13^[35-38])。陶瓷材料具有良好的生物相容性和抗腐蚀性, 适用于制造高负荷的人工关节和牙科修复材料, 在生物医学领域展现出独特优势。



a) 牙冠

b) 牙桥



c) 贴面

d) 植入物

图 13 陶瓷增材制造技术在生物医学领域的应用

Fig. 13 Ceramic additive manufacturing technology for biomedical applications

2.3.2 电子器件

在电子器件制造中, 陶瓷材料常被用于制造高频电子元件, 如电容器和电感器。通过陶瓷增材制造技术, 可以精确控制这些元件的形状和尺寸, 提高其性能^[39], 同时陶瓷的绝缘性能使其在电子领域得到广泛应用。陶瓷增材制造技术在电子器件制造中也发挥着重要作用。例如, 通过增材制造技术可以制备微型陶瓷零部件 (如图 14^[40]), 用于电子器件的封装和隔离。这种应用拓展了陶瓷材料在电子领域的应用范围, 提高了电子器件的性能和可靠性。



图 14 陶瓷材料 3D 打印大尺寸氮化硅

Fig. 14 3D printing of large size silicon nitride from ceramic materials

2.4 多材料部件的增材制造应用

2.4.1 多功能结构材料

增材制造技术还被用于制造多功能结构材料, 如具有金属-聚合物复合特性的材料。这种混合材料通过合理设计材料组合, 实现了强度、导热性等方面的优异性能, 在航空航天、汽车制造等领域有广泛应用。2022 年 Cheng J. X. 等^[41]开发了一种基于数字光处理的离心式多材料 (centrifugal multimaterial, CM)

3D 打印技术, 该 CM 3D 打印机可以打印大面积异质 3D 结构 (尺寸高达 180 mm × 130 mm), 其组成、属性和功能在体素尺度上可编程, 材料范围包括水凝胶、功能性聚合物、陶瓷等。该 CM 3D 打印技术在制造数字材料、软体机器人和陶瓷设备方面表现出卓越的能力。

2.4.2 复合材料部件

在一些高性能领域, 如航空航天、运动器材制造中, 增材制造技术被用于制造复合材料部件 (见图 15^[42])。通过在材料中引入纤维增强剂, 可以提高零部件的机械强度和耐磨性, 同时减轻部件的整体质量, 满足轻量化和高性能的需求。

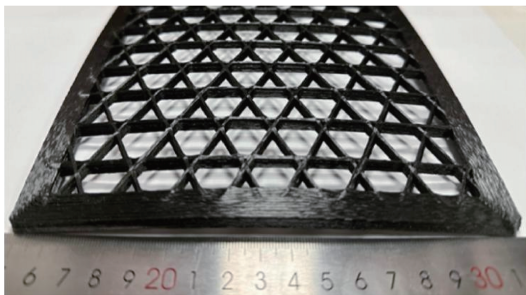


图 15 连续纤维增强复合材料的增材制造

Fig. 15 Additive manufacturing of continuous fiber-reinforced composites

3 挑战与解决方案

3.1 材料选择与性能改善

增材制造技术的成功应用关键在于选择适合的材料。不同材料具有不同的物理特性和力学性能, 对于特定的应用需求, 需要深入研究各种材料的优势和局限性。例如, 金属材料可能面临腐蚀问题, 而高性能聚合物则可能在高温环境下失效。因此, 需要根据具体应用场景选择合适的材料。

为了解决材料选择方面的问题, 研究人员致力于改进现有材料的性能, 同时开发新型增材制造材料。通过合金设计、表面处理等手段改进金属材料的耐腐蚀性能, 或者通过添加增强剂改善聚合物的强度和耐热性。这些改进措施将为不同领域的增材制造技术提供更广泛的材料选择。

3.2 制造过程中的质量控制

在增材制造过程中, 可能出现层间结合不良、残余应力以及各种缺陷等问题^[43], 直接影响到最终产品的性能和质量。这些问题的出现可能是由于工艺参数设置不当、材料性能差异、设备故障等因素引起的。

因此, 质量控制在整个制造过程中显得尤为重要。

为解决制造过程中的质量控制问题, 研究人员采用先进的传感技术、实时监测系统等手段进行质量控制。例如, 采用高精度传感器监测每一层的成型情况, 通过实时数据反馈进行调整^[44]。此外, 人工智能和大数据分析等技术也被引入, 以提高对制造过程中隐含缺陷的检测和预测能力。未来, 质量控制方面的研究将更加注重全生命周期的质量保障, 包括设计、制造、使用和维护阶段, 以确保最终产品的稳定性和可靠性。

4 总结与展望

本文综述了增材制造技术在不同材料和部件上的广泛应用, 深入剖析了其在金属、聚合物和陶瓷等多种材料以及航空航天、医疗、电子设备、包装等多个领域的前沿研究和创新应用。通过对各方面的综合分析, 得出以下结论。

1) 增材制造技术在金属材料方面取得了显著进展。激光熔化、电子束熔化等技术为制造高强度、轻量化的金属零件提供了有效途径, 尤其在航空航天领域的应用表现引人注目。金属增材制造技术的成功案例不仅证明了该技术的成熟, 也为未来金属制造领域的发展提供了有力支持。

2) 聚合物材料在医疗、消费品制造和包装等领域中的增材制造应用日益受到关注。在医疗领域, 高性能聚合物增材制造技术为植入物和医疗器械的制造提供了创新性解决方案, 提高了产品的生物相容性和个性化程度。在消费品制造中, 聚合物增材制造技术为产品的个性化设计和高效生产带来了新的机遇。在包装领域, 3D 打印泡沫等具有优异的性能, 可针对包装应用量身定制高性能缓冲垫材料。

3) 陶瓷材料的增材制造技术为高温、耐腐蚀零部件的制造提供了新的思路。这对航空航天、能源等领域的应用具有重要意义。陶瓷材料的增材制造技术突破了传统陶瓷加工的限制, 为制造更耐高温、耐腐蚀零部件的需求提供了可行性。

4) 增材制造技术在不同材料和部件上的应用推动了制造业的进步, 为产品的设计、生产和性能提升带来了新的可能性。然而, 随着技术的不断发展, 仍然存在一些挑战, 材料选择、工艺优化以及制造标准的建立等方面需要进一步解决。

未来, 期待增材制造技术能够继续在跨学科领域

产生深远影响。随着材料科学、计算机科学和工程技术的协同发展,增材制造技术将更加普及和成熟。在制造业数字化转型的浪潮下,增材制造技术将成为推动创新和可持续制造的关键引擎。

为了更好地发挥增材制造技术的优势,未来研究应重点关注材料性能的提升、工艺参数的优化、多材料协同制造以及智能制造技术的融合。通过不断深化理论研究,加强产学研合作,增材制造领域将会迎来更多的创新、更广泛的应用,助力制造业进入更加智能、高效和可持续的新时代。

参考文献:

- [1] BONNIN ROCA J, VAISHNAV P, FUCHS E R H, et al. Policy Needed for Additive Manufacturing[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(8): 815–818.
- [2] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.
- [3] YOUSSEF A, HOLLISTER S J, DALTON P D. Additive Manufacturing of Polymer Melts for Implantable Medical Devices and Scaffolds[J]. *Biofabrication*, 2017, 9(1): 012002.
- [4] CALIGNANO F, MANFREDI D, AMBROSIO E P, et al. Overview on Additive Manufacturing Technologies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(4): 593–612.
- [5] XIN Q C, YANG L, HUANG Y N. Digital Design and Manufacturing of Spherical Joint base on Multi-Objective Topology Optimization and 3D Printing[J]. *Structures*, 2023, 49: 479–491.
- [6] BOURELL D, KRUTH J P, LEU M, et al. Materials for Additive Manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(2): 659–681.
- [7] FLODBERG G, PETTERSSON H, YANG L. Pore Analysis and Mechanical Performance of Selective Laser Sintered Objects[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 307–315.
- [8] GALATI M, IULIANO L. A Literature Review of Powder-Based Electron Beam Melting Focusing on Numerical Simulations[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 1–20.
- [9] CAROU-SENRA P, RODRÍGUEZ-POMBO L, AWAD A, et al. Inkjet Printing of Pharmaceuticals[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(11): e2309164.
- [10] MOGHIMIAN P, POIRIE T, HABIBNEJAD-KORAYEM M, et al. Metal Powders in Additive Manufacturing: A Review on Reusability and Recyclability of Common Titanium, Nickel and Aluminum Alloys[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 43: 102017.
- [11] WEI C, ZHANG Z Z, CHENG D X, et al. An Overview of Laser-Based Multiple Metallic Material Additive Manufacturing: From Macro- to Micro-Scales[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(1): 012003.
- [12] DIMITRIADIS A I, DEBOGOVIĆ T, FAVRE M, et al. Polymer-Based Additive Manufacturing of High-Performance Waveguide and Antenna Components[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 105(4): 668–676.
- [13] ZAWASKI C, WILLIAMS C. Design of a Low-Cost, High-Temperature Inverted Build Environment to Enable Desktop-Scale Additive Manufacturing of Performance Polymers[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 33: 101111.
- [14] GE C F, CORMIER D, RICE B. Damping and Cushioning Characteristics of Polyjet 3D Printed Photopolymer with Kelvin Model[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2021, 57(4): 517–534.
- [15] GE C F, PRIYADARSHINI L, CORMIER D, et al. A Preliminary Study of Cushion Properties of a 3D Printed Thermoplastic Polyurethane Kelvin Foam[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(5): 361–368.
- [16] LAKHDAR Y, TUCK C, BINNER J, et al. Additive Manufacturing of Advanced Ceramic Materials[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 116: 100736.
- [17] HU B, ZOU W Y, WU W D, et al. Enhanced Mechanical and Sintering Properties of MgO-TiO₂ Ceramic Composite via Digital Light Processing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(4): 1694–1702.
- [18] HAN P. Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 648–652.
- [19] GRADL P R, MIRELES O R. Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems[C]//JANNAF 13th Liquid Propulsion (LPS) and 12th Spacecraft Propulsion (SPS) Joint Subcommittee Meeting. Huntsville: JANNAF, 2022: 132–141.
- [20] OZTAN C, COVERSTONE V. Utilization of Additive Manufacturing in Hybrid Rocket Technology: A review[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 180: 130–140.
- [21] ZHAO N Z, PARTHASARATHY M, PATIL S, et al. Direct Additive Manufacturing of Metal Parts for Automotive Applications[J]. *Journal of Manufacturing*

- Systems, 2023, 68: 368–375.
- [22] TUAZON B J, CUSTODIO N A V, BASUEL R B, et al. 3D Printing Technology and Materials for Automotive Application: A Mini-Review[J]. Key Engineering Materials, 2022, 913: 3–16.
- [23] KIM G W, PARK Y I, PARK K. Topology Optimization and Additive Manufacturing of Automotive Component by Coupling Kinetic and Structural Analyses[J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(6): 1455–1463.
- [24] LÜ Y T, WANG B H, LIU G H, et al. Metal Material, Properties and Design Methods of Porous Biomedical Scaffolds for Additive Manufacturing: A Review[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 641130.
- [25] DAVOODI E, MONTAZERIAN H, ESMAEILIZADEH R, et al. Additively Manufactured Gradient Porous Ti-6Al-4V Hip Replacement Implants Embedded with Cell-Laden Gelatin Methacryloyl Hydrogels[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(19): 22110–22123.
- [26] FANG C, CAI H, KUONG E, et al. Surgical Applications of Three-Dimensional Printing in the Pelvis and Acetabulum: From Models and Tools to Implants[J]. Der Unfallchirurg, 2019, 122(4): 278–285.
- [27] KOLKEN H M A, JANBAZ S, LEEFLANG S M A, et al. Rationally Designed Meta-Implants: A Combination of Auxetic and Conventional Meta-Biomaterials[J]. Materials Horizons, 2018, 5(1): 28–35.
- [28] KOLKEN H M A, DE JONGE C P, VAN DER SLOTEN T, et al. Additively Manufactured Space-Filling Meta-Implants[J]. Acta Biomaterialia, 2021, 125: 345–357.
- [29] DAVOODI E, MONTAZERIAN H, MIRHAKIMI A S, et al. Additively Manufactured Metallic Biomaterials[J]. Bioactive Materials, 2022, 15: 214–249.
- [30] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive Manufacturing of Metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371–392.
- [31] DIVAKARAN N, DAS J P, AJAY KUMAR P V, et al. Comprehensive Review on Various Additive Manufacturing Techniques and Its Implementation in Electronic Devices[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62: 477–502.
- [32] TRAN T Q, SARMAH A, HARKIN E M, et al. Radio Frequency-Assisted Curing of On-Chip Printed CNT/Silicone Heatsinks Produced by Material Extrusion 3D Printing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 78: 103842.
- [33] FANDÁKOVÁ M, PALČÁK M, KUDELA P. Methodology Proposal and 3D Model Creation of a Car Steering Wheel[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8054.
- [34] WANG G Q, WANG S R, DONG X S, et al. Recent Progress in Additive Manufacturing of Ceramic Dental Restorations[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 1028–1049.
- [35] WANG S, PENG L, SONG C N, et al. Digital Light Processing Additive Manufacturing of Thin Dental Porcelain Veneers[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(3): 1161–1167.
- [36] LIAN Q, WU X Q, LI D C, et al. Accurate Printing of a Zirconia Molar Crown Bridge Using Three-Part Auxiliary Supports and Ceramic Mask Projection Stereolithography[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 18814–18822.
- [37] LI H Z, SONG L, SUN J L, et al. Dental Ceramic Prostheses by Stereolithography-Based Additive Manufacturing: Potentials and Challenges[J]. Advances in Applied Ceramics, 2019, 118(1/2): 30–36.
- [38] ZHU L, XU Y D, LIU S W, et al. Microstructure, Mechanical Properties, Friction and Wear Performance, and Cytotoxicity of Additively Manufactured Zirconia-Toughened Alumina for Dental Applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 250: 110459.
- [39] LAKHDAR Y, TUCK C, BINNER J, et al. Additive Manufacturing of Advanced Ceramic Materials[J]. Progress in Materials Science, 2021, 116: 100736.
- [40] ZHANG P, HE R J. 3D-Printed Silicon Nitride Ceramic Implants for Clinical Applications: The State of the Art and Prospects[J]. RSC Advances, 2025, 15(1): 406–419.
- [41] CHENG J X, WANG R, SUN Z C, et al. Centrifugal Multimaterial 3D Printing of Multifunctional Heterogeneous Objects[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7931.
- [42] DING S L, ZOU B, LIU Q Y, et al. Non-Planar Additive Manufacturing of Pre-Impregnated Continuous Fiber Reinforced Composites Using a Three-Axis Printer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 4410–4419.
- [43] SANAEI N, FATEMI A. Defects in Additive Manufactured Metals and Their Effect on Fatigue Performance: A State-of-the-Art Review[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100724.

[44] SNOW Z, SCIME L, ZIABARI A, et al. Scalable in Situ Non-Destructive Evaluation of Additively Manufactured Components Using Process Monitoring, Sensor Fusion, and Machine Learning[J]. Additive

Manufacturing, 2023, 78: 103817.

(责任编辑: 李玉华)

Applications of Additive Manufacturing Technology on Different Materials and Components

WANG Hao, WANG Baitao, GAO Shuailong

(Interdisciplinary Centre for Additive Manufacturing, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

Abstract: The additive manufacturing, as a revolutionary manufacturing method, has achieved remarkable results. The research was to overview the wide applications of additive manufacturing technology on different materials and components, while deeply analyze its cutting-edge research in multiple fields, and provide useful references for the research and practice in related fields. In terms of multi-material applications, the applications of additive manufacturing technologies were discussed on different materials such as metals, polymers and ceramics. In the area of metal materials, technologies such as laser melting and electron beam melting provided new ways to manufacturing high-strength and lightweight metal parts. As for polymers, biocompatible materials were widely used in fields such as medical implants and bioprinting. The additive manufacturing of ceramic materials, on the other hand, provided innovative solutions for the manufacturing of high-temperature and corrosion-resistant parts. Then additive manufacturing technologies was applied to different components, such as the lightweight parts manufacturing in the aerospace field and personalized implants in the medical device field. Meanwhile, automobile manufacturing, electronic devices, packaging materials and other fields also ushered in more efficient and flexible production methods driven by additive manufacturing. With the continuous progress of material science and manufacturing technology, additive manufacturing will be more widely used in various industries , further promote the innovation and development of manufacturing industry.

Keywords: additive manufacturing; lightweighting; medical implant; bioprinting