

金属3D打印——未来制造业的数字化变革

徐海彬

富联精密电子（郑州）有限公司 河南郑州 450016

摘要：金属3D打印作为一项创新性制造技术，在未来制造业中将扮演重要角色，其能够实现复杂结构和个性化设计，提高制造灵活性，满足定制需求。随着技术进步和规模效应，其成本效益逐步提高，各领域应用不断拓展。数字化制造的发展将进一步推动智能化生产，而金属3D打印技术的应用将促使全球制定统一标准，以确保质量和可持续性。制造企业需加大投资和研发力度，建设数字化制造平台，培养专业人才，与合作伙伴共同创新，以应对数字化变革，提升竞争力和可持续发展。

关键词：金属3D打印；数字化制造；定制需求；技术进步；成本效益

Metal 3D printing—the next digital revolution in manufacturing

XU Haibin

Fulian Precision Electronics (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China

Abstract: Metal 3D printing, as an innovative manufacturing technology, will play an important role in the future manufacturing industry. It can achieve complex structures and personalized design, improve manufacturing flexibility, and meet customization needs. With technological progress and economies of scale, its cost-effectiveness gradually improves, and its applications in various fields continue to expand. The development of digital manufacturing will further promote intelligent production, and the application of metal 3D printing technology will prompt the global development of unified standards to ensure quality and sustainability. Manufacturing enterprises need to increase investment and research and development efforts, build digital manufacturing platforms, cultivate professional talents, and innovate together with partners to cope with digital changes, enhance competitiveness and sustainable development.

Keywords: metal 3D printing; digital manufacturing; custom demand; technology progress; cost-effectiveness

1 序言

随着科技的不断发展，制造业正经历着一场数字化的变革，而金属3D打印技术的崛起正是这场变革中的一颗璀璨明星^[1]。传统的制造模式正在被数字化技术所颠覆，而金属3D打印技术作为一项前沿而强大的制造工艺，正迅速改变着制造业的面貌。金属3D打印技术的本质是通过逐层堆积金属材料，

利用计算机控制系统将设计模型转化为实体产品。相比传统的加工方式，这种先进的制造工艺为制造业带来了诸多优势，如更高的生产效率、更灵活的生产设计、更少的原材料浪费等^[2]。同时，金属3D打印技术也为制造业的定制化和个性化需求提供了更好的解决方案，使生产过程更加灵活多变。

然而，随着金属3D打印技术的广泛应用，相

作者简介：徐海彬，项目经理，硕士研究生，主要研究方向为先进材料加工，E-mail: 1527300170@qq.com。

关的挑战和机遇也愈发显现。本文将深入探讨金属3D打印技术的崛起对制造业数字化趋势的影响,分析其在提升制造效率、推动创新、改变供应链模式等方面的作用,同时也将关注其在材料科学、质量控制等方面的挑战,并提出未来发展的方向和建议^[3]。

通过对这一前沿技术的全面剖析,我们将更好地理解金属3D打印技术如何推动制造业朝着数字化未来迈进。

2 金属3D打印技术的主要特征

2.1 金属3D打印技术概述

金属3D打印技术是一种先进的制造方法,它通过逐层堆叠金属粉末或线材,利用计算机控制的方式将设计好的物体逐层构建而成。这种技术具有很多独特的优势,如可制造复杂形状的零件、减少材料浪费、提高生产效率等。

(1) 选择性热熔加工 (Selective Thermal Processing) 选择性热熔加工是一种金属3D打印的技术路径,包括选择性激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM)、选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 和电子束熔化 (Electron Beam Melting, EBM)、粉末床熔化 (Powder Bed Melting) 等。这些技术利用激光束或电子束将金属粉末局部加热熔化,逐层堆叠形成零件。

(2) 直接能量沉积 (Directed Energy Deposition, DED) 直接能量沉积是另一种金属3D打印的技术路径,通过喷射金属粉末或线材,并利用激光或电弧进行熔化,逐层堆积在工件表面,形成所需零件。这种技术虽然适用于快速修复大型零件和增材制造,但表面质量通常较其他技术稍差。

(3) 金属喷涂技术 (Metal Spray) 这种技术使用高速喷涂设备将金属粉末喷射到基底表面,并通过加热源 (例如等离子弧) 使其熔化,形成均匀的金属涂层或部件。金属喷涂技术适用于快速原型制作和表面修复等领域。

(4) 金属搅拌摩擦增材制造技术 (Metal Stirring Friction Additive Manufacturing) 这种技术通过在金属粉末表面施加机械搅拌和高速摩擦加热,将金属粉末逐层堆积并形成金属部件。与传统的3D打印技术相比,搅拌摩擦增材制造技术具有更

快的成形速度和更高的材料利用率。

(5) 超声波增材制造技术 (Ultrasonic Additive Manufacturing) 这种技术利用超声波振动来粘合金属粉末,将其逐层堆积成所需形状。超声波增材制造技术具有成形速度快、材料利用率高、成品密度高等优点,适用于制造高强度、高密度的金属部件。

上述这些技术共同构成了金属3D打印的主要特征,各自具有特定的工作原理和技术特点,为制造业带来了革命性的变革。

2.2 主要金属3D打印技术的比较

在金属3D打印技术中,选择性热熔加工 (包括SLM、SLS和EBM)、粉末床熔化以及直接能源沉积是3种主要的技术路径。虽然它们都以逐层堆叠金属粉末或线材为基础,但在工作原理、适用材料、生产速度和成品质量等方面存在一些显著差异。

选择性热熔加工技术采用激光束或电子束将金属粉末局部加热至熔点,通过逐层堆叠的方式形成零件。这种技术能够生产具有高密度和精确度的金属零件,适用于制造复杂形状的零件和精密组件。相比之下,粉末床熔化技术则更为灵活,可适用于多种金属材料,并且具有较高的制造速度。然而,直接能源沉积技术在快速修复和增材制造方面具有独特优势,但通常表面质量稍逊于其他技术。

另外,这些技术在材料选择、成本效益和应用范围等方面也有所不同。选择性热熔加工技术通常适用于高温合金和复杂结构的零件制造;粉末床熔化技术更适合于大型零件和批量生产;直接能源沉积技术则更适用于修复和定制制造领域。

虽然这些金属3D打印技术都有各自的优势和适用场景,但在选择合适的技术时,需要综合考虑材料要求、生产效率以及成本等因素,并根据具体应用需求进行选择。这些技术的不断发展和改进将进一步推动金属3D打印技术在制造业中的广泛应用,为产业升级和创新发展注入新的动力。

3 金属3D打印在相关领域中的应用

3.1 航空航天领域中的金属3D打印应用

金属3D打印在航空航天领域中的应用是一个备受关注且日益重要的领域,为制造业带来了许多创新。例如:GE航空发动机燃烧器:GE航空引擎公

司采用金属3D打印技术制造了先进的燃气涡轮引擎零部件^[4]。Airbus A350 XWB飞机结构件：Airbus A350 XWB飞机采用金属3D打印技术制造结构件，例如支架和连接件。NASA的火箭零部件：NASA使用金属3D打印技术制造一些火箭引擎零部件，例如燃烧室和喷嘴。SpaceX超级重型火箭部件：SpaceX使用金属3D打印技术制造超级重型火箭的一些关键零部件，包括推进器部件和发动机零部件。采用这种先进技术能够快速制造高度定制化的零部件，提高了火箭的性能和可靠性。

这些案例突显了金属3D打印技术在航空航天领域中的应用，为航空器的制造提供了更高效、灵活和创新的解决方案。这些创新对于提高航空器的性能、降低燃料消耗，以及推动航空航天行业朝着更加可持续和先进的方向发展起到了关键作用。

3.2 医疗器械制造中的创新实践

金属3D打印在医疗器械制造领域中的创新实践为医疗行业带来了许多突破性的进展，主要体现在以下几个方面：一是金属3D打印医疗器械制造商能够根据患者的具体解剖结构和需求制造个性化植入物；二是金属3D打印可用于制造复杂的手术导向工具，如手术夹具和定位器；三是通过金属3D打印，可以制造更轻量、坚固且符合患者个体需求的义肢和假体^[5]；四是医用工具，如手术刀、镊子等，以及器械，如椎弓根螺钉，通过金属3D打印进行制造；五是金属3D打印技术在制造支架、搭接口和其他内部固定装置方面发挥了关键作用；六是在牙科领域，金属3D打印可用于制造植入体，例如牙植体和牙桥。

这些实践案例突显了金属3D打印技术在医疗器械制造中的广泛应用，为医疗行业提供了更为创新和个性化的解决方案。

3.3 金属3D打印在汽车制造、能源领域的前沿应用

金属3D打印技术被广泛应用于汽车制造，以制造轻量化零部件，如发动机零件、制动系统组件和底盘结构。在能源领域，金属3D打印技术被用于制造高温、高压和腐蚀性环境下使用的天然气和石油开采设备。金属3D打印可用于制造风能行业的关键零部件，如风力涡轮机叶片、发电机部件和轴承。在太阳能领域，金属3D打印技术可用于制造太阳能电池组件、支架结构和散热器，提高太阳能设备的

性能并降低生产成本。

这些创新有助于推动汽车工业向更智能、环保的方向发展，并支持能源产业迈向更清洁、可再生的未来。

4 金属3D打印的挑战与突破

4.1 材料性能与质量控制的关键问题

金属3D打印在力学性能上会略有降低，但对于许多应用而言，其性能仍在可接受的范围内。关键在于特定应用，设计和优化3D打印工艺和参数可以进一步提高金属3D打印制品的性能。此外，不同行业和应用对材料性能有不同的要求，因此选择适当的材料和制造方法是关键挑战之一。

4.2 现有技术对质量控制的挑战与未来发展方向

(1) 工艺不稳定性 通过深入研究工艺参数，包括温度、速度、激光功率等，进行细致的优化，以确保打印过程中的一致性和稳定性。引入实时监测系统，通过传感器监测关键参数，及时检测并纠正任何变化，确保打印过程中参数的精确控制。实施自动反馈机制，将实时监测的数据与设定的标准进行比较，并在必要时调整工艺参数，保持制品质量的一致性^[6]。

结合人工智能技术，建立模型来预测潜在的不稳定性，并在打印过程中动态调整参数，最大程度地减少不良影响。

(2) 残余应力和变形 利用先进的数值模拟工具，对3D打印过程中的温度、应力分布进行精确建模，以预测可能的残余应力和变形。优化支撑结构的设计，确保足够的支撑同时最小化对成品的干扰，减少因支撑结构而引起的变形。实施定制化的热处理工艺，以缓解残余应力，并通过后处理工艺，如热处理、表面处理等来进一步优化制品的力学性能。研发具有较低热收缩率的新型金属材料，减小残余应力的产生，并提高制品的稳定性。

4.3 成本效益分析

(1) 数据展示 金属3D打印与传统制造成本对比见表1。

由表1可知，金属3D打印相比传统制造在原材料成本上有一定的增加，但在人工成本上却有较大的降低。在设备投资及维护费用上，金属3D打印的成本相对较高，主要由于设备的购置和维护费用较

表1 金属3D打印与传统制造成本对比

成本项目	金属3D打印/元	传统制造/元	成本差 (%)
原材料成本	8000	6000	+33
人工成本	5000	7000	-20
设备投资及维护费用	12000	8000	+50
制造周期	10天	20天	-50
总成本	25000	21000	+10

传统制造昂贵。制造周期方面，金属3D打印大幅度缩短了制造时间，降低了制造周期。

综合来看，金属3D打印相对于传统制造在总成本上有一定的增加，但在制造周期和人工成本上取得了显著的降低。

(2) 制约成本下降的关键因素 随着金属3D打印技术的不断发展，设备效率提高，制造速度加快，生产效益得到提升^[7]。制造商与原材料供应商的合作，优化原材料的采购和使用，寻求更具成本效益的金属粉末。制造商不断改进金属3D打印设备，提高设备的耐用性和生产效率，降低设备投资和维护成本。制定行业标准，实现生产的规模化，降低单位产品的制造成本。引入人工智能和自动化技术，减少人工干预，提高生产效率，降低人工成本。

5 金属3D打印数字化变革的未来趋势

(1) 金属3D打印在复杂结构设计中的优势 金属3D打印允许设计更为复杂、轻量化的航空发动机零部件，如内部冷却通道和涡轮叶片，提高零部件性能和燃烧效率。定制设计植入物，如人工关节和骨植入物，以适应个体患者的解剖结构，提高植入物的适配性和耐久性。可以制造具有复杂结构的支架，如桥梁、建筑支撑结构等，以提高结构的强度和稳定性。

(2) 智能化制造与工业互联网的融合 金属3D打印的优势见表2。

由表2可知，高生产效率提升表示数字化制造对生产效率的提升超过了50%。这可能表明，数字化

表2 金属3D打印的优势

生产效率提升程度	描述
高	生产效率提升超过50%
中	生产效率提升在20%~50%
低	生产效率提升不足20%

制造在生产过程中引入了高度自动化、智能化和数据驱动的方法，生产线的优化、实时监控和数据分析等技术可能被广泛应用，从而显著提高了生产效率。中生产效率提升表示数字化制造对生产效率的提升在20%~50%。虽然提升程度没有达到高水平，但仍然是显著的。低生产效率提升表示数字化制造对生产效率的提升不足20%，这可能是由于数字化制造的实施不够全面或者不够深入，也可能是因为生产环境中存在一些难以解决的问题，例如设备老化、技术水平不足或者人力资源不足等^[8]。

数字化制造可以显著提升生产效率，但提升程度会受到各种因素的影响，包括数字化技术的应用程度、生产环境的复杂性以及组织内部的因素等。

(3) 工业互联网在金属3D打印中的应用案例 利用工业互联网实时监测金属3D打印过程中的关键参数，通过数据分析优化工艺，提高打印质量^[9]。通过工业互联网技术，实现远程协作，专家团队能够远程监测和调整全球各地的金属3D打印设备，减少停机时间和维护成本。将金属3D打印与供应链数字化相结合，实现更智能、灵活的供应链管理，提高生产效率并减少库存成本。

6 发展金属3D打印的应对策略

发展金属3D打印技术需要综合考虑以下几个方面的策略。

(1) 持续技术创新 加大对金属3D打印技术的研发投入，不断提升打印设备的性能和稳定性，优化工艺参数，提高产品的力学性能和表面质量^[10]。同时，积极探索新的金属材料，以满足不同行业和应用的需求。

(2) 加强质量控制 加强对打印过程中关键参数的监测和控制，引入实时监测系统和自动反馈机制，及时发现和纠正工艺不稳定性，减少残余应力和变形的产生，提高产品的质量稳定性和一致性。

(3) 降低成本 通过提高设备的生产效率和降低维护成本，优化原材料的采购和使用，寻求更具成本效益的金属粉末，实现制造成本的降低。同时，通过制定行业标准和实现生产的规模化，降低单位产品的制造成本。

(4) 加强人才培养 加大对金属3D打印技术人才的培养和引进力度，培养具有相关专业知识和技

能的高素质人才，提升企业的技术创新能力和竞争力。同时，加强技术普及和知识传播，提高从业人员的技术水平和专业素养。

(5) 促进产学研合作 加强产学研合作，搭建行业平台，推动科研成果向市场转化，加速技术的推广应用^[11]。同时，积极参与国际合作，学习借鉴国际先进经验，提升我国在金属3D打印领域的技术水平和国际竞争力。

7 结束语

通过分析，可以清晰地了解金属3D打印技术的不同工作原理和技术分类。这些技术分类包括粉末床熔化、金属丝材料熔化及电子束熔化等。每种技术都有其独特的优势和适用场景。

同时，本文还介绍了金属3D打印技术在制造领域的应用。这些应用涵盖了航空航天、汽车制造及医疗器械等多个领域。通过对这些应用案例的分析，可以更深入地了解金属3D打印技术在实际生产中的价值和潜力。

这些客观的评述和结论有助于全面了解该领域的技术现状和发展趋势。通过深入了解不同的工作原理和技术分类，可以更好地选择适合特定应用场景的金属3D打印技术，并探索其在制造领域的应用潜力。

数字化制造的进一步深入发展，通过工业互联网、人工智能等技术的融合，实现了智能化、自动化和高度可视化的制造过程。随着金属3D打印技术的应用范围扩大，全球将更加重视制定统一的标准和认证体系，以确保产品质量和制造的可持续性。制造企业应加大对金属3D打印技术的投资和研发力度，保持技术领先地位，掌握先进制造技术。建设数字化制造平台，整合生产过程的各个环节，实现更高效、智能的制造。培养数字化制造领域的专业人才，构建高效的团队，以适应未来数字化制造的需求。与行业内外的合作伙伴共同创新，共享资源和技术，推动整个产业链的发展。通过数字化技术优化供应链，提高供应链的透明度和灵活性，降低整体生产成本。

通过积极应对数字化变革，制造企业能够抓住机遇，实现更高水平的竞争力和可持续发展。随着技术的不断推陈出新，金属3D打印将为制造业带来

更多创新和可能性。

参考文献：

- [1] 杨扬，张澳，李瑶，等. 金属增材制造工艺、材料及成形机理的研究与应用[J]. 金属加工(热加工)，2024 (3)：33-45.
- [2] 王焜. 金属3D打印技术及其应用研究[J]. 锻压装备与制造技术，2024，59 (1)：117-119.
- [3] 张旭升，杜小军，郭健，等. 基于金属粉末的3D打印锚杆与混凝土粘结性能研究[J]. 金属矿山，2023 (12)：69-75.
- [4] 欧阳元文，王中兴，刘小蔚，等. 3D打印铝合金结构的进展与展望：第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集[C]. 天津：天津市钢结构学会，2023：6.
- [5] SmarTech Analysis. 金属3D打印市场预计到2031年达161亿美元[J]. 丝网印刷，2023 (13)：127.
- [6] 王玉健，李方正. 3D打印材料的研究进展[J]. 工业技术创新，2023，10 (3)：55-63.
- [7] 玉河. 金属3D打印技术工艺探索研究[J]. 现代制造技术与装备，2023，59 (6)：162-164.
- [8] 张佳欣. 3D打印无金属柔性胶状电极问世[N]. 科技日报，2023-06-20.
- [9] 张嘉诚. 金属3D打印与产品设计虚拟仿真教学系统研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2023.
- [10] 赵亮，刘鹏，郑敬超，等. 金属3D打印技术工艺探索及应用[J]. 汽车工艺与材料，2023 (2)：1-8，15.
- [11] 蔡兴博，董艳，王斌，等. 金属基3D打印支架的构建与功能化研究进展[J]. 生物骨科材料与临床研究，2022，19 (6)：82-87.

MW 20240505