

# 增材制造的现状与应用综述

张衡, 杨可

(河海大学, 常州 213022)

**摘要:** **目的** 为推动增材制造技术与新材料、新工艺和产业应用的加速融合提供技术信息参考。**方法** 首先通过文献计量分析法,以“增材制造”为关键词,分别对 2016—2021 年的 WOS 和 CNKI 核心文献数据库的进行分析,得出近 5 年国内外增材制造的研究方向和研究热点;然后从增材制造技术的发展阶段、技术标准体系、材料类型、成形工艺类型等方面介绍增材制造技术的研究现状,着重梳理了不同材料与工艺类型增材制造技术的对应关系,归纳了各类增材制造技术的成形原理、材料、工艺特点和技术优势;接着探讨了增材制造技术在航空、航天、船舶、汽车、模具、铸造、建筑、医疗、文化创意等产业领域的应用场景和应用案例,以及产业化应用的问题;最后分析了国内增材制造面临的挑战和发展前景。**结论** 综述了增材制造技术的现状与应用情况,为增材制造技术成果推广和产业应用提供技术资讯,具有一定的参考意义。

**关键词:** 增材制造; 技术现状; 应用领域; 综述

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)16-0009-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.16.002

## Overview of the Present Situation and Application of Additive Manufacturing

ZHANG Heng, YANG Ke

(Hohai University, Changzhou 213022, China)

**ABSTRACT:** In order to promote the accelerated integration of additive manufacturing technology with new materials, new processes and industrial applications, this article is written to provide technical information reference. Firstly, the WOS and CNKI core databases from 2016 to 2021 are analyzed by using the bibliometric analysis method with “additive manufacturing” as the key word, and the research directions and research hotspots of the additive manufacturing at home and abroad in the past five years are obtained; and then the research status of additive manufacturing technology is introduced from the development stage of additive manufacturing technology, technical standard system, material type, forming process type, etc., and the correspondence between different materials and process types of additive manufacturing technology is sorted out emphatically, the forming principles, materials, process characteristics and technical advantages of various additive manufacturing technologies are summarized; and then the application scenarios and application cases of additive manufacturing technologies in the industrial fields such as aviation, aerospace, shipbuilding, automobiles, molds, casting, construction, medical care, cultural creativity, etc. as well as the problems of industrial application are discussed; finally, the challenges and development prospects of domestic additive manufacturing are analyzed. This article reviews the current situation and application of additive manufacturing technology, and provides technical information for the promotion of additive manufacturing technology achievements and industrial applications, which has certain reference significance.

**KEY WORDS:** additive manufacturing; technology status; application field; overview

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 常州市重点研发计划项目“基于冶金设备轧辊再生复合制造关键技术开发与应用”(CE20205046)

作者简介: 张衡(1979—),男,河南人,博士,河海大学讲师,主要研究方向为工业设计、增材制造及产业化。

通信作者: 杨可(1983—),男,四川人,博士,河海大学教授,主要研究方向为增材制造与再制造、新型焊接材料开发。

增材制造 (Additive Manufacturing, 简称 AM) 亦被称为 3D 打印, 是以数字化模型为基础, 将材料以逐层堆积的方式制造出实体物品的新兴制造技术<sup>[1]</sup>。因为增材制造不需要进行减材制造的流程规划, 所以很大程度上简化了生产复杂零件的流程, 颠覆了传统制造的理念和模式, 对传统制造业向现代制造业的转变产生了深刻影响。

当下, 增材制造作为先进制造技术的重要组成部分, 已经被各发达国家作为现代产业发展的新增长点。为将我国建设成为具有国际竞争力的制造强国, 政府高度重视并规划和制定了系列政策, 相继规划且颁布了《增材制造产业发展行动计划 (2017-2020 年)》<sup>[1]</sup>和《中国制造 2025》<sup>[2]</sup>等系列政策。在政策层面对增材制造产业提供了导向、支持和保证, 为推动增材制造技术与新材料、新工艺和产业化应用的加速融合指明了方向。

本文对增材制造技术现状与应用情况进行综述, 为促进增材制造技术推广和产业应用提供技术资讯。

## 1 增材制造的研究热点

通过文献计量分析法<sup>[3]</sup>, 以“增材制造”为关键词, 以 2016—2021 年为年限范围, 对被 Web of Science (WOS) 和中国知网 (CNKI) 收录的学术论文进行检索分析, 得出近 5 年国内外增材制造的研究方向和研究热点。

在 WOS 核心数据库中检索“增材制造”, 2016—

2021 年的文献有 24 386 条, 见表 1。分析表明, 近 5 年国际上对增材制造的研究主要集中在复合材料、工程制造、冶金工程、工程机械、应用物理等领域。研究方向更趋向于探索新型材料的微观结构和力学特性、加工工艺的数值模拟与参数、结构的拓扑优化等方面。研究热点有金属基复合材料、激光选区熔化成形、超声波固化等。

在中国知网中文数据库中检索“增材制造”, 2016—2021 年的中文文献有 3 561 条, 见表 2。结果表明, 近 5 年国内对“增材制造”的研究方向集中在金属增材制造、激光增材制造、增材制造技术、打印材料、材料组织与结构性能, 以及与技术开发和应用相关的标准体系建设、技术应用与产业化政策等方面。

由此可知, 近年来国内研究的趋势和主要方向:

(1) 以激光、电弧、等离子弧、电子束为热源, 以钛合金、铝合金等金属为加工材料的金属增材制造; (2) 对加工前模型的数值模拟、拓扑优化、工艺参数调整; (3) 对加工成品的力学性能、微观组织、残余应力等方面的性能分析; (4) 与增材制造技术相关的标准化和产业应用。因此增材制造的新工艺、新材料和产业化应用是该领域非常重要的研究主题和方向。

例如“功能梯度材料”, 虽然未被列入本次统计的研究热点中, 但是作为一种新型的材料与加工工艺, 正越来越被受到重视。制造功能梯度材料是一种将零件分层加工, 并且将不同材料打印在不同层的复杂技术<sup>[4]</sup>。利用该技术可以得到表面耐磨、耐腐蚀,

表 1 增材制造在 WOS 中的研究方向

Tab.1 Research field of additive manufacturing in WOS

研究方向	文献数量/篇	占比/%
多学科材料学 (Materials Science Multidisciplinary)	9 950	40.802
工程制 (Engineering Manufacturing)	4 906	20.118
冶金工程 (Metallurgy Metallurgical Engineering)	3 188	13.073
工程机械 (Engineering Mechanical)	2 864	11.744
应用物理 (Applied Physics)	2 579	10.576
其他	899	3.687

表 2 增材制造在国内的研究热点

Tab.2 Research hotspot of additive manufacturing in China

研究方向	研究热点	文献数量/篇	占比/%
增材制造	—	1 222	34.316
金属增材制造	电弧增材制造、等离子弧、粉床电子束增材制造	612	17.186
激光增材制造	激光选区熔化 SLM	414	11.626
增材制造技术	冷金属过渡焊接 CMT、熔融沉积成型技术、增材再制造	406	11.401
打印材料	钛合金、铝合金、复合材料、光敏树脂、块状非晶合金	263	7.386
组织性能	力学性能、微观组织、残余应力	257	7.217
打印技术	数值模拟、工艺参数、拓扑优化	252	7.077
社科研究	技术开发标准、标准体系建设、产业化、政策	68	1.910
其他	—	67	1.881

中间层高强度、韧性好且中间就像骨头一样有疏松的蜂窝状结构的零件，增强刚性的同时减轻重量，该技术在航空航天领域有很重要的用途。2021 年，杨圣钊团队研究了与金属—金属、金属—陶瓷梯度材料相关的增材制造技术，通过比较分析 SLM 与 DED 技术的原理、加工过程和工艺参数，得出了通过增材制造技术加工功能梯度材料的可行方案<sup>[4]</sup>。

再如“复合材料”，因其在减轻重量的同时，还能够保持高强度或高刚度，所以在航空航天和汽车领域有着十分广泛的应用前景。2021 年，陈秋云比较分析了制造纤维增强树脂基复合材料的 3 种工艺，得出了增材制造技术较之于模压成型、拉挤成型有着显著的稳定性和高效性的制造优势的结论<sup>[5]</sup>。

## 2 增材制造技术的现状

### 2.1 增材制造技术的发展阶段

增材制造技术的发展大致分为“快速原型制造”和“金属直接增材制造”两个阶段<sup>[6]</sup>，见表 3。快速原型制造包括 SLA、LOM、FDM、SLS，由于受工艺和材料的限制，加工的成品无法达到产品级别性能要求，只能作为原型，或用于模具制造的样件，所以被称为“快速原型制造”。然而 SLM、LENS、EBSM、EBF、IFF、WAAM 以激光束、电子束、等离子束或电弧为热源，能对制备好的金属粉材或丝材进行逐层熔化或堆积，可直接制造出金属零件成品或半成品，因此被称为“金属直接增材制造”。

增材制造技术随着技术、材料、工艺的发展，打印的成品在结构和性能上有很大改善，正在由“原型”向“产品”逐步升级。

### 2.2 增材制造技术的标准体系

国际标准化组织（ISO/TC261）和美国材料与实验协会（ASTM F42）是国外最早开展增材制造标准

化工作的机构，并且联合发布了增材制造标准结构图<sup>[7-8]</sup>，以促进增材制造标准体系的建设。目前，ISO/TC261 共发布了 10 项国际标准，ASTM 共发布了 16 项<sup>[7]</sup>。我国于 2016 年成立了增材制造标准化技术委员会（SAC/TC562），同时制定和发布了 4 项国家标准。

这些标准的发布有助于构建规范有序的增材制造标准体系，促进了国家与地区之间的技术研发合作，具有以下作用：（1）能够有效地规范增材制造领域的技术术语，避免概念的混乱；（2）促进了增材制造材料、工艺、装备的研发和应用；（3）促进了产业发展。例如 ISO/ASTM 52915:2016 规范了增材制造数字化文件的标准格式（AMF），为不同设备之间进行增材制造带来了可能。

国内也有专家开展了关于增材制造标准体系的研究：2019 年，王耿等人详细探讨了国内增材制造标准体系的构建思路、原则、目标与困难<sup>[9]</sup>；同年，张进朋比较分析了国内外增材制造标准化体系的建设和发展现状，介绍了增材制造标准结构图和标准路线图，为国内增材制造标准体系建设提供了参考<sup>[7]</sup>。

### 2.3 增材制造技术的材料类型

根据国际标准 ISO 17296-2-2015《增材制造总则 第 2 部分：工艺分类和原料》<sup>[10-11]</sup>，将增材制造的原料分为金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料 and 生物材料。梳理材料及细分种类与成形工艺的对应关系，见表 4。通过此表可以快速查询某材料适用的成形工艺，提高了信息检索效率。

### 2.4 增材制造技术的工艺类型

国际标准 ISO/ASTM 52900-2015 将增材制造的成形工艺划分为 7 个类型：立体光固化、薄片叠层、材料挤出、黏结剂喷射、材料喷射、粉末床熔融、定向能量沉积<sup>[5]</sup>。现将典型的成形工艺及其特性整理如下，见表 5。

表 3 增材制造技术的发展阶段  
Tab.3 Development stages of additive manufacturing

阶段	年份/年	发明人	增材制造成形技术	材料
快速原型制造技术	1983	Hull C	光固化成形技术（Stereo Lithography Appearance, 简称 SLA）	光敏树脂
	1986	Feygin M	分层实体制造（Laminated Object Manufacturing, 简称 LOM）	纸基片材
	1988	Stratasys 公司	熔融沉积成型技术（Fused Deposition Modeling, 简称 FDM）	多种丝材
	1989	Deckard	激光选区烧结（Selective Laser Sintering, 简称 SLS）	多种粉材
	1993	麻省理工学院	立体喷墨打印（Binder Jetting/Three-Dimension Printing, 简称 3DP）	粉末胶合
金属构件的直接增材制造技术	1990	NASA 兰利研究中心	电子束自由成形制造技术（Electron Beam Free-form Fabrication, 简称 EBF）	合金粉材
	1995	Meiners W	激光选区熔化成形技术（Selective Laser Melting, 简称 SLM）	金属粉材
	1998	Sandia 国立实验室	激光工程化净成型（Laser Engineered Net Shaping, 简称 LENS）	钴基粉材
	1999	Cranfield 大学	电弧增材制造（Wire Arc Additive Manufacture, 简称 WAAM）	金属丝材
	2001	Arcam 公司	电子束选区熔化（EBSM）	金属丝材
	2004	Fronius 公司	电弧冷金属过渡焊接技术（CMT）	合金铝丝
	2013	麻省理工学院	记忆合金的四维打印技术（Four Dimensional Printing, 简称 4DP）	记忆合金

表4 增材制造的原材料  
Tab.4 Materials for additive manufacturing

材料类型	材料形态、材料细分种类	增材制造成形工艺
金属材料	涉及形态：粉末、丝材、液态 有色金属（钛合金、铝合金、金属间化合物等）、黑色金属（高温合金、不锈钢等）	金属丝：（激光/等离子/电子束/电弧）定向能量沉积 DED 金属粉末：黏结剂喷射 BJ、粉末床熔融 PBF、DED 液态金属：材料喷射 MJ、按需滴落 DOD
有机高分子材料	涉及形态：粉末、丝材 工程塑料、热固性塑料、可降解塑料、高分子凝胶、光敏树脂等	光敏树脂：立体光固化 SLA、DLP、材料喷射 MJ 粉材：粉末床熔融 PBF、激光烧结 SLS、黏结剂喷射 BJ 丝材：材料挤出 FDM、薄材叠层 LOM 高分子凝胶：数字光处理投影打印 DLP
无机非金属材料	涉及形态：粉末、片材 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、ZrO <sub>2</sub> 、SiC、AlN、Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 等陶瓷材料	粉材：黏结剂喷射 BJ、激光烧结 SLS、激光熔化 SLM 片材：激光烧结 SLS、激光熔化 SLM
生物材料	仿生组织修复支架、细胞活性材料、器官微结构、可植入材料等	立体光固化 SLA、材料挤出 FDM 等

表5 增材制造技术的成形工艺  
Tab.5 Forming process of additive manufacturing

成型工艺	成形技术传统名称	能源/热源	加工材料	优点	缺点
立体光固化 SLA	光固化成形（SLA）、紫外数字投影打印（DLP）、LCD 打印技术	激光 紫外光 LCD 光	光敏树脂	精度高	需设计支撑结构、易翘曲变形、后处理复杂
薄材叠层 LOM	分层实体制造（LOM）	激光切割 + 热熔胶黏合	纸基片材、塑料薄膜、金属箔、碳纤维等	材料便宜、快速、成本低、精度高、无支撑结构	粗糙、弹性差、强度低、易变形、不能制造空心结构
材料挤出 FDM	熔融沉积成型技术（FDM）	电加热	热塑性材料、高分子材料、石蜡等	成本低、加工材料多样	精度低、强度低、加工时间长、需支撑结构
黏结剂喷射 BJ	立体喷墨打印法（3DP）	打印时无需加热	粉材、高分子材料、金属、陶瓷粉	全彩色、精度高、材料种类多、无支撑结构、尺寸大、成本低	加工金属/陶瓷材料密度低，打印后再烧制耗时、烦琐
材料喷射 MJ/NPJ/DOD	连续材料喷射（CMJ）、纳米颗粒喷射（NPJ）、按需滴落（DOD）	紫外光	液体光聚合物、纳米颗粒、液态金属	快速、精度高、强度高	材料成本造价昂贵
粉末床熔融 PBF	激光粉末床熔融（LPBF）	激光	镍基合金、铝合金、钛合金	精度比 DED 略高	有残余应力，需要拓扑优化，精度差
定向能量沉积 DED	激光定向能量沉积（DED）、激光金属粉末沉积（LMD）、电弧增材制造（WAAM）	激光/其他热源	金属粉/丝	尺寸较大、速度比 PBF 快	表面粗糙，需要后处理

通过上表可以快速检索到不同的增材制造技术的对应关系，同时可以快速检索出该工艺的优缺点和适用的材料等。

### 3 增材制造技术的应用

#### 3.1 应用领域与应用案例

##### 3.1.1 航空航天领域

在航空领域，航空发动机和轻量化功能结构是重点也是难点。对于飞机发动机和其他大型复杂结构部件而言，如发动机涡轮叶片，若将增材制造引入涡轮

叶片铸造领域可以大大降低结构复杂性，实现型芯/型壳的无模制备，为空心涡轮叶片的快速制造提供新途径<sup>[12]</sup>。激光和电子束选区熔化技术可被应用于飞机的防护栅、燃料喷嘴、涡轮叶片等部件的制造过程中；增材制造技术可用于修复和验证钛合金框架和整体叶盘的关键结构<sup>[13]</sup>。西安交通大学的李涤尘团队在型芯/型壳一体化涡轮叶片快速成型技术、陶瓷铸型制备、铸型中高温力学性能调控、全流程叶片精度控制等方面取得了突破，建立了基于光固化 3D 打印的空心涡轮叶片型芯/型壳一体化铸型快速制备技术体系<sup>[14]</sup>。

在航天领域,使用增材制造实现火箭、卫星和深空探测器等复杂零件的快速设计和原型制造,可以实现易受损零件的直接制造和维护。增材制造技术将给航空航天带来的变革性发展。

### 3.1.2 船舶领域

增材制造在船舶及配套设备领域的应用研究,如产品开发、结构优化、工艺开发、在线维护等,实现了船舶复杂零部件的快速设计和优化,使动力系统、甲板、舱室机器等关键零部件和备件得以直接制造<sup>[15]</sup>。例如 2014 年 7 月,海南思海创新机电工程设计有限公司研制的 FDM 型 3D 打印机采用了尼龙高分子材料,成功制造出了一艘可搭乘两名成年人的小船<sup>[16]</sup>。

### 3.1.3 汽车行业

增材制造已在汽车制造等高端制造领域取得了长足的进步。在汽车设计和原型阶段,采用增材制造技术,可以实现无模具设计和制造,大大缩短开发周期。增材制造可用于制造形状复杂的零件,增材制造一体化成型技术允许将多个零件整合为一个零件,大大减轻了复杂关键部件的重量。例如安徽恒力增材制造科技有限公司,采用选择性激光烧结技术结合石膏型真空压力铸造技术,造出了一体化制造的双金属复合材料发动机缸体,革新了传统开模具结合组砂型铸造的工艺模式,目前已被成功应用在国内品牌汽车中<sup>[17]</sup>。

### 3.1.4 模具领域

使用增材制造技术进行模具优化设计和原型制造,可以促进复杂结构精密模具的一体化成型,同时应用金属增材制造技术直接制造复杂型腔模具,能够大大缩短模具的研发周期。此外,可以使用增材再制造技术修复损伤失效的模具<sup>[18]</sup>,通过再利用,在很大程度上可以节约生产成本,实现更多效益。

### 3.1.5 铸造领域

增材制造主要被应用在模型开发、复杂铸件制造、铸件修复等环节,可以开发专用大型砂型增材制造设备及铸造相关的材料,促进增材制造与传统的铸造工艺一体化发展。

### 3.1.6 建筑领域

增材制造应用于建筑领域,目前已经有许多探索。如今,低层建筑打印技术已经越来越成熟,其应用也越来越广泛。然而制造高层建筑仍然存在一些困难,还需要等待适合高层建筑的打印材料及打印技术的出现。

### 3.1.7 医疗领域

在医疗领域,“生物 3D 打印技术”可以满足康复器械与个性化医疗器械、植入物、软组织修复等需求<sup>[19-20]</sup>。同时“生物 3D 打印技术”被应用于再生医

学,广泛用于多层皮肤、骨骼、血管、气管夹板、心脏组织和软骨结构等的“再生”,已经取得了较大成就<sup>[21]</sup>。

### 3.1.8 文化创意领域

在文化创意领域,增材制造技术可以满足创新创意设计<sup>[22]</sup>、文创产品开发、个性化产品的消费需求。例如珠宝设计,通过 3D 打印技术先打印成蜡模,再浇铸成金属首饰,可实现快捷多变的设计,并且不怕烦琐复杂的结构变化<sup>[23-24]</sup>。推动增材制造技术在文创领域的应用,可以开拓消费新热点,构建消费生产新模式,带动消费升级<sup>[25]</sup>。

从民用的消费品到文化创意产品,从建筑的制造到航空航天的结构,增材制造应用的领域将会越来越宽广。

## 3.2 产业化应用的问题

近几年,逐渐有学者开始关注增材制造的产业化应用的问题,如 2015 年,史玉升等人指出我国增材制造产业化应用的问题:装备及关键元器件、原材料与国外相比有性能差距<sup>[26]</sup>;产业链上游数字化数据的采集、设计和产业链下游技术应用推广存在不足。2017 年,李方正研究分析了国内增材制造的产业现状及应用案例,指出产业发展面临的问题:产业规模化程度低、关键核心技术有待突破、缺乏有效协调推进机制、应用推广有待加强<sup>[27]</sup>。2018 年和 2021 年,左世全及高燕等人对比了国内外增材制造产业发展现状,剖析了我国增材制造产业基础的问题及成因,指出我国增材制造产业化问题:创新能力不足、产业竞争力不强、关键技术滞后、高端装备及专用材料性能不佳、标准体系缺失等,并给出了发展路径和施政建议<sup>[28-29]</sup>。

由此可知,虽然我国增材制造产业市场大、规模也不小,但是产业化发展程度、发展态势并不乐观,若想赶上其他国家,需要以政府的政策为指导、以科研人员的核心技术为主导、以产业及市场的需求为导向,切实做好审时度势、把握时机,使增材制造技术埋入各行业领域,尽快开花结果。

## 4 增材制造的发展前景

### 4.1 我国增材制造面临的挑战

正如卢秉恒院士在 2018 中国增材制造产业发展高峰论坛上讲到的,目前增材制造面临的挑战包括:怎么样从控形到控形控性,从制造到创造,以及如何利用多学科交叉推动技术创新<sup>[30]</sup>。

1) 从控形到控形控性,即增材制造技术研究的重点应该放在减少加工零件的残余应力,加强材料的力学性能等方面。例如在金属增材制造技术中,研究如何使热交换效率得到较大的提升,如何可以使用很

少的材料达到非常强的刚度和硬度。

2) 从制造到创造, 即应该将增材制造技术应用并融合到各行业领域, 尤其是国内的制造业, 发挥增材制造技术的敏捷制造优势。同时应该提升企业的设计研发能力, 发挥增材制造技术能够加工复杂结构的优势, 对产品结构进行改良, 设计出一个零件就能够替代之前多个零件的方案。

3) 目前国内的增材制造创新能力与发达国家相比有较大差距, 还存在着原创的核心技术相对落后, 原创的高端装备零部件性能不佳等情况。同时, 增材制造标准技术体系的制定和推广与发达国家相比, 也相对落后。

4) 目前国内增材制造技术应用的深度和广度需要提高, 增材制造需要通过材料领域、信息领域、生物医药领域的交叉, 共同推动技术的创新。

## 4.2 增材制造的发展前景

随着增材制造与材料科学、信息科学、冶金学、工程学等领域的深度融合, 将呈现以下发展趋势。

1) 随着增材制造技术的进步和普及, 增材制造的成本会降低, 制造速度会提高, 成品的结构性能也将显著提升, 增材制造逐渐会走进各行各业, 成为产品开发的利器, 而产品的生产方式也将由批量生产转变为顾客的个性化定制。

2) 随着增材制造与材料科学的融合发展, 增材制造的原材料将呈现多元化趋势, 复合材料、功能梯度材料、记忆合金等材料将不再陌生, 同时, 更多性能优异的新材料也将涌现。

3) 随着由政府主导的《中国制造 2025》等政策的深入, 以及我国增材制造标准技术体系的完善和实施, 增材制造行业将会被规范引导, 实现有序发展, 推动我国向现代化工业强国迈进。

## 5 结语

随着材料科学、机械工程、制造工程、冶金工程等领域与增材制造技术的深度融合, 增材制造也将拓展到更广阔的产业领域, 从尖端的航空航天、核工业等重点制造领域, 到汽车、船舶、轨道交通、机械等工业领域, 再到民用生活消费领域, 都将产生影响深刻的变革。随着《中国制造 2025》的强力推进, 希望能够见证中国成为具有国际竞争力的制造强国。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国工业和信息化部. 十二部门关于印发《增材制造产业发展行动计划(2017-2020年)》的通知[EB/OL]. (2017-12-13) [2021-06-18]. [https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbes/gzdt/art/2020/art\\_d9166c377eaf4fed9ef00e58e5f521c9.html](https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbes/gzdt/art/2020/art_d9166c377eaf4fed9ef00e58e5f521c9.html). Ministry of Industry and Information Technology, PRC.

Circular of the Twelfth Ministry on issuing the Action Plan for the Development of Additive Manufacturing Industry (2017-2020) [EB/OL]. (2017-12-13) [2021-06-18]. [https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbes/gzdt/art/2020/art\\_d9166c377eaf4fed9ef00e58e5f521c9.html](https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbes/gzdt/art/2020/art_d9166c377eaf4fed9ef00e58e5f521c9.html).

[2] 国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. (2015-05-08) [2021-06-18]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm). The State Council. Circular of The State Council on the issuance of made in China 2025[EB/OL]. (2015-05-08) [2021-06-18]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).

[3] 金帅, 罗震, 李洋, 等. 基于文献计量分析的全球增材制造(3D 打印)研究进展(2013-2017年)[J]. 焊接技术, 2021, 50(6): 1-4. JIN Shuai, LUO Zhen, LI Yang, et al. Research Progress of Global Additive Manufacturing (3D Printing) Based on Bibliometric Analysis (2013-2017)[J]. Welding Technology, 2021, 50(6): 1-4.

[4] 杨圣钊, 尹瀛月, 高建, 等. 功能梯度增材制造技术的研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2021, 58(21): 1-6. YANG Sheng-zhao, YIN Ying-yue, GAO Jian, et al. Research Status and Prospect of Functional Gradient Additive Manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2021, 58(21): 1-6.

[5] 陈秋云. 探讨纤维增强树脂基复合材料制造技术的研究进展[J]. 科技风, 2021(19): 183-184. CHEN Qiu-yun. Discussion on the Research Progress of Fiber-reinforced Resin Matrix Composite Manufacturing Technology[J]. Technology of Wind, 2021(19): 183-184.

[6] 胡美娟, 吉玲康, 马秋荣, 等. 激光增材制造技术及现状研究[J]. 石油管理与仪器, 2019, 5(5): 1-6. HU Mei-juan, JI Ling-kang, MA Qiu-rong, et al. Laser Additive Manufacturing Technology and Current Status[J]. Petroleum Management and Instruments, 2019, 5(5): 1-6.

[7] 张进朋, 秦训鹏. 国内外增材制造标准化工作发展现状综述[J]. 表面工程与再制造, 2019, 19(1): 23-29. ZHANG Jin-peng, QIN Xun-peng. Summary of the Status Quo of the Development of Material Manufacturing Standardization at Home and Abroad[J]. Surface Engineering and Remanufacturing, 2019, 19(1): 23-29.

[8] 王顺权, 华若绮, 胡娟. 江苏省增材制造标准体系研究[J]. 江苏科技信息, 2019, 24(8): 17-21. WANG Shun-quan, HUA Ruo-qi, HU Juan. Standard System of Additive Manufacturing in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2019, 24(8): 17-21.

[9] 王耿, 明宪良, 汪小明, 等. 增材制造标准体系建设探讨[J]. 航天标准化, 2019(2): 11-13. WANG Geng, MING Xian-liang, WANG Xiao-ming, et al. Discussion on the Construction of Additive Manufacturing Standard System[J]. Aerospace Standardization, 2019(2): 11-13.

[10] 国际标准化组织. ISO17296-2-2015, 增材制造总则第2部分: 工艺分类和原料[S]. 日内瓦: 国际标准化组织, 2015. International Organization for Standardization. ISO17296-2-2015, General Principles of Additive Manufacturing Technology Part 2: Process Classification and Raw Materials[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

- [11] 刘琼馨, 王顺权. 我国增材制造产业综合标准化技术体系的建议[J]. 理化检验-物理分册, 2017, 53(9): 651-689.  
LIU Qiong-xin, WANG Shun-quan. Suggestions on the Comprehensive Standardization Technology System of My Country's Additive Manufacturing Industry[J]. Physical Testing and Chemical Testing-Physics, 2017, 53(9): 651-689.
- [12] 李中权, 肖旅, 李宝辉, 等. 航天先进轻合金材料及成形技术研究综述[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 9-21.  
LI Zhong-quan, XIAO Lv, LI Bao-hui, et al. Research Review of Advanced Light Alloy Materials and Forming Technology in Aerospace[J]. Shanghai Aerospace, 2019, 36(2): 9-21.
- [13] 陈怡, 祁俊峰, 赖小明, 等. 增材制造技术在空间飞行器领域的研究与应用[C]. 西安: 面向增材制造与新一代信息技术的高端装备工程管理国际论坛, 2020.  
CHEN Yi, QI Jun-feng, LAI Xiao-ming, et al. Research and Application of Additive Manufacturing Technology in the Field of Spacecraft[C]. Xi'an: International Forum on High-end Equipment Engineering Management Facing Additive Manufacturing and New Generation Information Technology, 2020.
- [14] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术 [EB/OL]. (2021-04-29) [2021-06-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HKXB2021042900D&v=kUQM6IKGdRQm564gMvjX7%25mmd2BkZlWuoAm5AMo97pjM8fNdK7sz1qoBC5LTR46RQs3g7>.  
LI Di-chen, LU Zhong-laing, TIAN Xiao-yong, et al. Additive Manufacturing—Revolutionary Technology for Leading the Aerospace Manufacturing [EB/OL]. (2021-04-29) [2021-06-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HKXB2021042900D&v=kUQM6IKGdRQm564gMvjX7%25mmd2BkZlWuoAm5AMo97pjM8fNdK7sz1qoBC5LTR46RQs3g7>.
- [15] 刘凯. 增材制造技术在船用零部件制造中的应用[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(16): 205-207.  
LIU Kai. The Application of Additive Manufacturing Technology in the Manufacture of Marine Parts[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(16): 205-207.
- [16] 唐从敬. 金属增材制造技术在船舶制造领域的应用[J]. 中国水运, 2021, 21(5): 1-2.  
TANG Cong-jing. The Application of Metal Additive Manufacturing Technology in the Field of Shipbuilding [J]. China Sea Transportation, 2021, 21(5): 1-2.
- [17] 王强, 姜明伟, 郭书贵. 中国增材制造产业发展现状及趋势分析[J]. 中国科技产业, 2018(2): 52-56.  
WANG Qiang, JIANG Ming-wei, GUO Shu-gui. Analysis of the Development Status and Trend of China's Additive Manufacturing Industry[J]. China Science and Technology Industry, 2018(2): 52-56.
- [18] 周伟民, 夏张文, 马剑雄, 等. 增材再制造产业的现状与发展[J]. 自动化仪表, 2021, 42(2): 1-5.  
ZHOU Wei-min, XIA Zhang-wen, MA Jian-xiong, et al. Status Quo and Development of Additive Remanufacturing Industry[J]. Automation Instrumentation, 2021, 42(2): 1-5.
- [19] LI C, PISIGNANO D, ZHAO Y, et al. Advances in Medical Applications of Additive Manufacturing[J]. Engineering, 2020, 6(11): 1222-1231.
- [20] 张文芳, 牟洪利, 邝晓盈, 等. 3D 打印在医疗器械领域应用的指导原则[J]. 广东药科大学学报, 2021, 37(2): 157-166.  
ZHANG Wen-fang, MOU Hong-li, KUANG Xiao-ying, et al. Guiding Principles of 3D Printing Application in the Field of Medical Devices[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2021, 37(2): 157-166.
- [21] YAN W, QTA B, FANG P C, et al. A Review of the Application of Additive Manufacturing in Prosthetic and Orthotic Clinics from a Biomechanical Perspective[J]. Engineering, 2020(6): 1258-1266.
- [22] 贾艳红. 基于增材制造的陶瓷器型创新设计研究综述[J]. 工业工程设计, 2021, 3(3): 13-19.  
JIA Yan-hong. Summarization of the Research on Ceramic Type Innovative Design Based on Additive Manufacturing[J]. Industrial Engineering Design, 2021, 3(3): 13-19.
- [23] 施健, 张慧, 范育帅. 光固化 3D 打印技术在首饰蜡模制作中的应用[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(1): 158-168.  
SHI Jian, ZHANG Hui, FAN Yu-shuai. The Application of Light-curing 3D Printing Technology in the Production of Jewelry Wax Models[J]. Machinery Design and Research, 2020, 36(1): 158-168.
- [24] 徐禹, 周烨林. 基于陶瓷 3D 打印技术支持下的陶瓷首饰设计探索与实践[J]. 中国陶瓷, 2021, 57(2): 77-81.  
XU Yu, ZHOU Ye-lin. Exploration and Practice of Ceramic Jewelry Design Based on Ceramic 3D Printing Technology[J]. China Ceramics, 2021, 57(2): 77-81.
- [25] 祁娜, 张珣. 3D 打印技术在产品设计领域应用综述[J]. 工业设计研究(第五辑), 2017(5): 101-107.  
QI Na, ZHANG Xun. Overview of the Application of 3D Printing Technology in the Field of Product Design[J]. Industrial Design Research (Fifth Series), 2017(5): 101-107.
- [26] 史玉升, 郑友德, 周钢. 我国增材制造产业化实现路径[J]. 中国工业评论, 2015(5): 54-60.  
SHI Yu-sheng, ZHENG You-de, ZHOU Gang. The Realization Path of My Country's Additive Manufacturing Industrialization[J]. China Industry Review, 2015(5): 54-60.
- [27] 李方正. 中国增材制造产业发展及应用情况综述[J]. 工业技术创新, 2017, 4(4): 1-5.  
LI Fang-zheng. Summary of the Development and Application of China's Additive Manufacturing Industry[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(4): 1-5.
- [28] 左世全, 李方正. 我国增材制造产业发展趋势及对策建议[J]. 经济纵横, 2018(1): 74-80.  
ZUO Shi-quan, LI Fang-zheng. Development Trend and Countermeasures of My Country's Additive Manufacturing Industry[J]. Economics, 2018(1): 74-80.
- [29] 高燕, 叶敏, 吴强, 等. 我国增材制造产业基础能力提升方法建议[J]. 电加工与模具, 2021(3): 49-55.  
GAO Yan, YE Min, WU Qiang, et al. Suggestions on Improving the Basic Capability of my Country's Additive Manufacturing Industry[J]. Electrical Processing and Mould, 2021(3): 49-55.
- [30] 卢秉恒. 我国增材制造技术的应用方向及未来发展趋势[C]. 北京: 2018 中国增材制造产业高峰论坛, 2018.  
LU Bing-heng. The Application Direction and Future Development Trend of My Country's Additive Manufacturing Technology[C]. Beijing: 2018 China Additive Manufacturing Industry Summit Forum, 2018.