

【专题：增材制造·材料·设计感知】

增材制造及其在设计中的应用研究综述

何灿群，叶丹澜，张雯，薛彦辉

(河海大学，南京 210098)

摘要：目的 工业 4.0 如今在国际上的发展方兴未艾，定制化、个性化、智能化、敏捷性等特征已成为工业设计领域的发展趋势。基于未来智造时代的卓越技术——增材制造，并结合材料、工艺、用户感官认知等多维度方向，共同指导产品设计实践，以提供能够快速、高效地开发可用、易用的产品设计方法。**方法** 通过文献搜集和整理，分析了增材制造的发展趋势及研究现状，探讨了增材制造在材料学和工业设计的前沿交叉领域的融合机制与应用，进而拓展到新工艺、新材料对用户感知的设计研究，并对相关探讨及研究成果进行了阐述。**结论** 总结了国内外增材制造、工业设计的研究现状及发展趋势，从增材制造、新材料、工业设计、认知心理学及其相关方法与技术的融合等方面，分析了影响未来智造时代的敏捷设计、用户感知等因素，以“增材制造、材料、设计感知”为主题，从工艺、材料、感知、认知等多维度探讨了增材制造在产品设计实施中的应用趋势。

关键词：增材制造；设计感知；敏捷设计；工业设计；认知心理

中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2021)16-0001-08

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.16.001

Summary of Research on Additive Manufacturing and Its Application in Design

HE Can-qun, YE Dan-lan, ZHANG Wen, XUE Yan-hui

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

ABSTRACT: The work aims to provide practical and easy-to-use methods of quickly and efficiently developing product design through guiding product design practices based on additive manufacturing, an outstanding technology in the future era of intelligent manufacturing, while considering materials, processes, user perception, etc. After literature collection and collation, the trend and research status of additive manufacturing were analyzed and the integration mechanism and application of additive manufacturing in the cutting-edge interaction of material science and industry design were discussed. The influence that new processes and new materials have on user perception were involved and the related discussions and research results were elaborated. The research status and the trend of additive manufacturing and industry design at home and abroad were concluded. The agile design and user perception factors influencing future era of intelligent manufacturing were analyzed in terms of additive manufacturing, new materials, industry design, cognitive psychology and the integration of related methods and technologies. Under the theme of “additive manufacturing, materials, and design perception”, the application trend of manufacturing of additive manufacturing in product design were analyzed in multiple dimensions such as materials, processes and perception.

KEY WORDS: additive manufacturing; design perception; agile design; industry design; cognitive psychology

随着科学技术的发展和物质资源的极大丰富，人们对于工业产品有了更高的需求，这也推动了工业产业向自动化、智能化方向发展。在此发展趋势下，增材制造技术应运而生，为产品设计提供了更加高效和

自由的设计手段，并以此更好地满足用户需求，提升用户感知^[1]。产品设计相关企业作为将设计转化为实物的重要渠道，将增材制造、新材料、工业设计、认知心理学及其相关方法与技术进行融合，将会为未来

收稿日期：2021-07-18

作者简介：何灿群（1972—），女，湖南人，博士，河海大学教授，主要研究方向为人机交互、产品设计、设计材料。

智造时代的敏捷设计开拓新的途径。

德国政府提出的“工业 4.0”强调了工业化和智能化融合发展道路,引领了目前全球制造业的发展方向^[2]。2015年,《中国制造 2025》的提出,明确了提升产品设计能力、完善制造业技术创新体系、提升产品质量等 8 大战略对策,同时,工业和信息化部、发展改革委、财政部联合发布的《国家增材制造产业发展推进计划(2015—2016年)》明确了增材制造技术的发展目标和推进计划^[3-4]。坚实的制造业基础能为国家强大提供有力支持,增材制造技术极大地改变了传统制造业的固有模式,从原先的减材、等材制造转变为增材制造,在制造业的发展历史上具有重要意义^[5]。

1 增材制造技术分析

1.1 增材制造技术概述

增材制造(Additive Manufacturing,简称AM),又称3D打印、材料累加制造、快速原型、分层制造或实体自由制造,发展于20世纪80年代后期^[6]。有别于传统生产加工技术所运用到的去除原料、切削、组装等步骤,该项技术是融合了计算机辅助设计、材料加工成型技术,在数字化设计的基础上,利用软件与数控系统,将专为该技术设计的新材料,按照烧结、挤压、光固化、熔融、喷射等加工方式,“自下而上”逐层打印,制造出实体物品的高效制造技术^[7-8]。

1.2 增材制造技术优势

增材制造技术作为一种新型工艺,具有效率高、数字控制、加工成本相对较低的特点。在传统制造方式中,加工生产依托于已有模具,个性化的产品定制则需要投入更多的人力。然而得益于增材制造技术的发展,传统制造技术无法实现的复杂结构件变为可能,缩小了概念化想法与新产品开发之间的差距。增材制造技术具有以下几点优势。

1) 加工成本小:计算机辅助设计模型可以很容易地适应不同用户的人体测量尺寸和不同的增材制造技术/材料,而无需额外的成本。此外,在个人解剖模型和个性化设备中存档和重用的可能性可以降低定制设备开发的成本和时间^[9]。

2) 成品速度快:增材制造技术简化了生产过程,能够更加快速且方便地生产出某个物品,对于设计师而言,及时获得产品质量的反馈将进一步提升产品效果。

3) 个性化强:传统生产技术无法制造出的产品可以通过增材制造技术实现,不再受到产品的生产、组装等制约,设计师或者用户可以更加安心、大胆地创作^[10]。

4) 提升用户体验:在传统工艺中,设计与生产

相互分离但又互相牵制,最后用户只能接收既有的且大规模生产的产品,得益于增材制造技术,一些具有创新思维的用户能够参与到设计中来,获得自主创新体验。

1.3 增材制造技术应用

目前,增材制造被应用于军事、医疗产业、航空航天、救援、建筑、珠宝装饰、食品、汽车零件、交通工具等生产制造领域^[11-17]。增材制造的流程已从用于视觉检查的简单原型制作发展到具有灵活性、定制性、可扩展性、可靠性、耐用性和相对高速的功能性产品制造^[18]。鉴于目前增材制造技术和材料的进步,增材制造已在生物材料、再生医学和组织工程,以及实验室设备原型设计中被广泛使用^[19-21]。

在医疗领域,增材制造技术可设计具有复杂几何形状的高度组织功能性生物结构,可实现器官的定制组件^[22]。通过和计算机指导方法的结合使用,使可靠的工具得以被开发并用于植入物放置的术前评估,引导式植入物的定位,通过缩短治疗时间和减少患者的不适,使手术的创伤最小化,极大地帮助了移植、治疗性调查、药物开发、生物分析和疾病建模的研究^[23-25]。

同时,由于该项技术可以直接将计算机中的三维图形输出为三维物体,所以非常适合研究和制作曲面造型,在工业设计学科涉及的工业造型、产品创意、工艺美术等领域也有着广泛的应用前景。

2 增材制造的行业发展现状及趋势

2.1 增材制造技术应用

增材制造技术是当下最热门的高科技之一,在工业生产中的运用十分广泛。在世界上,部分发达国家利用该项技术,已经制作出了和人体不发生免疫排斥的器官,极大地推动了医疗事业的发展^[26]。20世纪90年代初,基于粉末黏合的固体自由成型技术的发明,使增材制造技术改变了传统的药物制造模式^[27],实现了由概念设计向个性化药物打印的转变,使个别患者的治疗需求有效地转化为了符合预设质量要求的小批量药物产品^[28-30]。可见,增材制造技术可以突破很多传统加工技术的局限,赋予产品个性化定制的特点,更好地为用户的需求服务,提升用户在产品使用过程中的情感体验^[31]。

我国增材制造技术主要以高校为研发中心,例如清华大学、西安电子科技大学、合肥工业大学、华中科技大学等,结合专业机构开发的相应技术,推动我国形成了具有一定规模的增材制造市场。其中,清华大学研究人员在2020年运用低温沉积技术(LDM)打印出了一种多孔的个性化的锥形聚氨酯植入物,并在其中加入了一种抗HPV蛋白,从而抑制了HPV感染^[32-33]。

有关调查研究显示,2015 年增材制造技术为我国社会创造的经济总价值为 243 亿元,到 2019 年,该项数值上升至 1 726 亿元,同比增长率达到了 710%^[34]。这足以体现我国的增材制造技术运用范围逐步扩大,有更多的企业参与到该项技术的生产路线中来,因此也更好地满足了用户的各项需求,为人们的艺术创作提供了新思路。

2.2 现有问题分析

增材制造技术在满足个性化生产方面发挥着重要的作用,克服了许多传统工艺长期以来存在的局限性,但该项技术仍然存在一定缺陷。

2.2.1 材料使用。

目前增材制造所运用的材料种类较少。使用 ABS 热塑性工程塑料或 PET 聚对苯二甲酸乙二醇酯打印出的模型细节粗糙,精细度较差,需要多种材质替换组合才可以呈现较精细的打印细节;使用 PLA 材料打印的模型在硬度、表面粗糙度等方面表现欠佳,使得用户体验受影响;使用 SLS 粉末烧结工艺需要额外固化打印对象,否则易造成多孔表面的液体吸收和染色^[35];此外,使用 SLS 打印的模型表面粗糙度难以达到标准要求,表面容易脱落粉末^[36]。由于受到材料性能的限制,增材制造仍然无法精确替代真实产品,而是更多停留在模拟产品阶段^[37]。

2.2.2 打印精度

考虑到不同材料的性能,由增材制造技术获得的模型表面的粗糙度和材料厚度会对原产品尺寸产生影响。不同打印材料对打印设备的精度要求也不同,例如分层 FFF 熔丝只能与能够提供高打印精度的 3D 打印机一起使用,而连续流 FFF 熔丝可以配合低成本 3D 打印机。使用 SLS 粉末烧结打印时,由于 SLS 粉末构建方向的各向异性效应,难以确保模型质量和配合精度。由于是一体打印,所以用于支撑的结构也可能在打印过程中嵌入模型内部无法移除,可能影响模型打印结果的精度。同时,人为操作还会导致翘曲变形等情况,即使该项技术在理论上可以做到高精度,但实际制造仍有很大的难度。

2.2.3 能源损耗

相比于传统加工工艺,增材制造技术无需模具、一体成型、自动化高的特点有效减小了能源损耗,但由于该项技术采用逐层打印累加的方式,对于市场上普遍使用的 3D 打印机而言,一个皮球大的立体塑料模型需要机器连续工作 28 h 才能完成,同时,在打印工作前后都会有材料的损耗,无法进行回收^[38]。

2.3 发展趋势

2.3.1 材料革新

材料的使用是增材制造的基础,为满足更加智能

化、个性化、可持续的生产需求,多材质打印可以更好地体现该项技术在设计领域应用的自由性和高效性^[39-41]。

2.3.2 便携化

现有的增材制造设备几乎都服役于专业机构,用户往往只能获得某项设计的产出,其加工流程的技术操作、过程乐趣难以感知,并且存在知识产权的保护问题。若增材制造设备在未来能够更加便携化、智能化,将有利于更多个性化产品的产出^[42]。

2.3.3 4D 打印技术

增材制造技术实现了由数字化向立体化的转变,由理论可得,在增材制造技术的基础上再增加一个变量,使产品结构能够在第四维度——时间上改变形状^[43]。4D 打印技术采用智能材料的输入,具有极好的变形能力。自组装和可编程材料技术旨在重新构想制造、生产、组装产品和性能。未来 4D 打印将被广泛应用于工程、医药等各个领域,并且 4D 打印蛋白将成为一个伟大的应用。有了这个新的维度,通过增材制造技术获得的物体可以自行改变其形状,不受外部刺激的影响,如光、热、电、磁场等^[44]。例如 2015 年,在美国 CES 消费电子展上,Tibbit 打印出了一件能根据用户体型自行改变大小的镂空的连衣裙,证实了 4D 打印技术的可行性,这将为增强工业产品的交互性能提供强大的技术支持。

作为高新科技,增材制造技术的发展任重道远。增材制造被越来越多地运用到各行各业乃至生活中,不同的使用场合意味着不同的需求,而材料的性能对该项技术的发展起着关键作用,因此,增材制造技术的发展需要对现有材料进一步研究,开发更多优质的合金材料、复合材料、纳米材料等^[45]。

此项技术通过向用户提供个性化的产品和增值服务来实现产品的价值增值、服务增效与可持续发展,在传统制造业模式的基础上,融入新技术、新理念及新研发模式,大力推动制造业研发理念重心从注重生产向注重设计转变,构建制造业转型升级,形成新的核心竞争优势,推动中国制造业向网络化、智能化、个性化、服务化进一步发展,成功实现转型升级^[46]。

3 增材制造在敏捷设计中的应用

自人类进入工业化时代后,得益于产品大规模生产的低成本、高利润,批量化生产占据着生产制造的主要地位,人们也随之忽略了传统手工业带来的个性化体验。随着消费模式的转变、时代的发展和多元文化的繁荣,统一化的产品已不能被消费者所接受^[47]。用户不仅满足于“功能的实用”需求,而且提出了“参与认知体验”的需求。产品不仅会带给用户物质层面的实体使用感,同时也会让用户产生心理层面的个性化价值,包括产品使用体验及服务感受。用户也会更

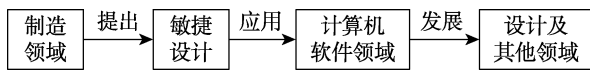


图1 敏捷设计的发展

Fig.1 The development of agile design

加关注产品使用过程中在感知、行为、情感等诸多方面因素的综合体验。基于此，用户需求的个性化也日益明显，产品制造也呈现出从大规模向小批量、个性化方向发展的趋势，相关学者对工业 5.0 的预测中不约而同地提到个性化概念^[48]。企业也从传统的生产销售产品，转向为用户提供个性化定制产品及“产品设计系统”的解决方案^[49]。增材制造的存在，为用户和生产商搭建了一座桥梁，为满足个性化定制设计与生产提供了可实现条件。

3.1 敏捷设计概述

随着工业化生产的普及，产品大批量的生产及快速设计日益被人们所重视。为了满足社会的需求，渐渐形成了敏捷设计的概念^[50]。“敏捷”一词可以被理解为“快与准”的意思，其概念最早于 1991 年在制造领域中被提出，后多应用于计算机软件领域，随着各学科的交叉发展，敏捷设计的概念才被更广泛地应用于各个行业中。敏捷设计强调人们的需求、开发人员与利益相关者之间的沟通和适应变化的能力，并且敏捷、迭代的方法在当下的产品开发设计环境中得到了较好的应用和流行^[51]。

不同于传统设计方式及流程设计项目周期长、用户参与性低、设计与生产效率不高、时间投入高的特点，当敏捷设计被应用在产品设计中时，最突出的特征为用户参与产品设计的流程。在提高用户参与度的基础上，能更加快速、准确地获取用户感知与需求，极大地缩短了产品设计生产周期，节约了时间成本，提高了生产效率，同时，既达到了“快与准”的要求，又更好地满足了消费者个性化、多样化的需求^[52]。敏捷设计也被视为先进技术与企业能力的结合，先进制造技术直接影响敏捷设计开发，同时企业对快速变化的市场环境的适应能力能促进敏捷设计的开发，在此基础上，敏捷设计也对制造型企业研发提出了更高的要求^[53]。总的来说，敏捷设计的核心是在短时间内以低成本和高效率的设计生产满足用户的个性化需求。敏捷设计的发展见图 1。

3.2 增材制造在敏捷设计中的应用

融合了增材制造、新材料、新工艺、感知心理等的敏捷设计，已经成为工业设计研究的热点话题之一。反过来，工业设计、认知心理学、新材料、增材制造的交叉研究方法与专有技术的融合，又为未来智造时代的敏捷设计开拓了新的途径，并从材料、工艺、用户感官认知等多维度指导了产品设计的实施，为开发产品设计提供了快速、高效的方式。

基于设计感知和认知心理下的敏捷设计，是从关注“人”出发，该关注涉及感官知觉、情感体验、行为特征等各方面的综合体验。产品在具有使用功能价值的基础上，还应具有丰富的信息传递价值和体验意义。在从创新设计到生产研发的流程中，以满足用户认知心理为目标，将用户感知贯穿于设计流程之中。感知是由人通过五感等多种因素，对能认知的所存在的物品、环境等内容，共同整合得出的信息^[54]。用户感知则是由用户在与产品进行交互的过程中产生的特有体验，该过程中能提取出对产品设计改良具有重要指导意义的信息^[55]；而设计感知主要是指基于用户对产品的感知和心理认知过程，把握用户的喜爱偏好和情绪，快速、准确地获取用户的感知信息，并将这些信息转化为合适的设计元素，应用于产品的用途、功能和操作中^[56]。用户可以从原先被动接收产品，到主动创造产品，角色的转变将进一步提升用户对产品设计、产品生产、产品使用的认知深度和广度，在此基础上逐渐满足对用户个性化价值意义需求和情感上的诉求。

相比较于传统设计生产方式，敏捷设计避免了产品设计过程中的功能盲目性，降低了高投入低成效的时间成本，减少了劣质设计产品出现的可能性^[57]。

4 增材制造在产品实施中的应用趋势

为迎合未来制造时代，《中国制造 2025》制定了我国制造业的发展战略，为打造我国制造业的国际竞争力，提升我国综合国力指明了方向^[58]。在工业设计发展趋势中，定制化、智能化等特征明显，而增材制造技术作为一种新兴模型制作技术和工艺，其特有属性能很好地满足工业设计发展趋势的需求，因此得到了广泛的应用^[59]。

4.1 生产制造工艺革新

增材制造技术具有精度高、生产周期短、修改方便、浪费小等特点，它的数字化特征颠覆了传统模型制作的方式。增材制造的生产加工不需要依赖标准模板，不受设备、地域制约，让模型制作、产品制造变得简单、快速、便捷、可负担^[60]。

在制造生产复杂产品时，增材制造的优越性更加凸显。一方面，增材制造技术能精准地根据计算机指示复制模型，所需成本更小；另一方面，制造相同体积相同质量的简单体与复杂零件消耗的时间与材质几乎相同，无需增加生产制造的时间和损失。并且增材制造采用一体成型技术，减免了组装成本，为特殊制造需求提供了新方向，在打印具有特殊功能的可穿戴应用方面有突出贡献^[61]。同时，增材制造技术推动了逆向工程设计发展，通过 3D 扫描仪快速构建物体的三维信息模型后，可复制生产或在原有基础上改良优化再生产^[62]。

4.2 摆脱创意设计束缚

借助计算机辅助虚拟展示完整性、真实性的概念创意是信息化时代最便捷、效果最佳的方式，而增材制造技术具备将计算机等辅助设备中精美复杂的设计概念精准呈现的突出优势^[63]。与传统减材制造的生产方式相比，增材制造工艺能帮助设计师摆脱在产品设计中创造思维的制约，帮助他们拓展创新思维，促进更多设计创意的产生。同时，该项工艺为个性化顾客定制提供了条件，扩大了产品设计自由度，提高了产品对特定用户的贴合度，为用户享受最舒适的产品和服务体验提供了条件。

4.3 优化设计合理度

相较于传统加工方式，增材制造技术突破了很多技术上的局限性，一方面可以更好地实现创意，带来更多个性化的产品输出；另一方面也增加了产品创造的合理性。相比于工业设计所需经历的调研阶段、概念设计阶段、样机阶段和评价反馈阶段，增材制造可以把更多的重心落在优化设计上，发挥其无模具、少加工的特点，大幅度缩短产品研发周期，帮助设计师及时获得概念设计制造的有效反馈，优化产品形态，最终达到提升设计品质的效果^[64]。

4.4 提升产品设计可持续性

可持续设计的范围很广，但核心的主要价值在于实施环境保护设计。这就要求减少材料使用，加强材料回收力度，以及使用可再生的材料^[65]。

传统的材料叠加和焊接方法高度依赖熟练的体力劳动或专业的工业机器人。随着全球再制造行业的发展，必须部署高效和可持续的方法，实现维修和修复的自动化。近期再制造维修和修复的趋势表明，人们对金属添加剂制造技术的兴趣日益浓厚。通过增材制造代替原有的修复方式，完成部分难以加工和修复的部分，也是增材制造在未来可持续发展领域的应用^[66-67]。

4.5 推动各领域发展

增材制造技术将数字制造技术、信息网络技术、先进材料技术密切结合，目前世界各国学者都在着力探索^[68]。

国际上偏向于从技术层面进行研究，而在中国，增材制造技术是制造业战略中的主要支撑技术，宏观上对工业和制造业有着较大影响，而这也是我国的研究偏向^[69]。增材制造在我国正在实现从研发向产业化应用的转型，将对推进我国制造业转型升级具有深刻意义^[70]。

随着增材制造技术的发展，相比较其“制造”“设备”“工艺”等关键词方面的创新带来的领域发展，打印材料创新迭代更快，对各交叉领域的发展也具有更大影响^[71-73]。

当下，增材制造材料研究集中于金属材料（金属粉末），并以钛合金为主，被广泛应用于生物医疗、军事、航空航天领域^[74-75]。同时，遵循未来设计提出的绿色设计理念，相关领域也在探索将废旧材料回收后应用于增材制造。作为材料创新研发的产物，环保理念将会贯彻到增材制造材料的选择与使用过程中，这将大力推动工业设计产品的可持续发展^[76]。

5 结语

从相关领域的发展和研究现状上可以看出，“应用发展为先导，技术创新为驱动，产业发展为目标”是增材制造发展必须遵循的基本原则。在产品设计中，产品的功能与其形态和构造有着至关重要的联系。增材制造将设计与工程生产通过新技术、新材料、新工艺连接了起来，并将制造业从模具材料制造推向了智能化数字打印的新方式，超越了传统工业设计与生产制造。同时，为材料赋予了新的生命力，为实现设计表达提供了新思路，并将设计范畴进一步扩大，既优化了产品设计和生产流程，又促进了创新型应用的开发，继而推动了产品开发。

参考文献：

- [1] 徐泳发. 3D 打印对工业设计发展的影响[J]. 科技创新与应用, 2020(32): 73-74.
XU Yong-fa. The Influence of 3D Printing on the Development of Industrial Design[J]. Technology Innovation and Application, 2020(32): 73-74.
- [2] 马岩, 夏子钧, 李博. 德国工业 4.0 的启示与中国木工机械制造 2025[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(8): 4-9.
MA Yan, XIA Zi-jun, LI Bo. Enlightenments of German Industry 4.0 and 2025 of Chinese Woodworking Machinery Manufacturing 2025[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2015, 43(8): 4-9.
- [3] 张莹婷. 《中国制造 2025》解读之：中国制造 2025，我国制造强国建设的宏伟蓝图[J]. 工业炉, 2021, 43(3): 30.
ZHANG Ying-ting. Interpretation of “Made in China 2025”: Made in China 2025, the Grand Blueprint for the Construction of My Country’s Manufacturing Power[J]. Industrial Furnace, 2021, 43(3): 30.
- [4] 工信部发布《国家增材制造产业发展推进计划(2015-2016 年)》助 3D 打印发展[J]. 中国包装, 2015, 35(4): 11.
The Ministry of Industry and Information Technology Issued the “National Additive Manufacturing Industry Development Promotion Plan(2015-2016)” to Help the Development of 3D Printing[J]. China Packaging, 2015, 35(4): 11.
- [5] 祁娜, 张珣. 3D 打印技术在产品设计领域应用综述[C]. 成都: 工业设计产业研究中心, 2017.
QI Na, ZHANG Xun. Overview of 3D Printing Technology in Product Design[C]. Chengdu: Industrial De-

- sign Industry Research Center, 2017.
- [6] 吴卫明. 分析增材制造标准 突破产业发展瓶颈[J]. 中国标准化, 2021(11): 72-78.
WU Wei-min. Analysis of Additive Manufacturing Standards, Break Industry Development Bottlenecks[J]. China Standardization, 2021(11): 72-78.
- [7] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
LU Bing-heng. Additive Manufacturing Technology: Current Situation and Future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- [8] 邓威, 隋荣婷. 数字雕塑实体化造型初探[J]. 西部学刊, 2019(7): 134-137.
DENG Wei, SUI Rong-ting. A Preliminary Study on the Solid Modeling of Digital Sculpture[J]. Journal of Western, 2019(7): 134-137.
- [9] PONCE S, HERNANDEZ M, VIZUETE K, et al. Fast Synthesis of Silver Colloids with a Low-cost 3D Printed Photo-Reactor[J]. Colloid and Interface Science Communications, 2021, 43: 57.
- [10] 邓朝广. 工业设计中的 3D 打印技术初探[J]. 科学技术创新, 2020(21): 77-78.
DENG Chao-guang. Preliminary Study on 3D Printing Technology in Industrial Design[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(21): 77-78.
- [11] 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): 157-159.
ZHANG Wen-fang, MOU Hong-li, KUANG Xiao-ying, et al. Guidelines for the Application of 3D Printing in the Field of Medical Devices[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2021, 37(2): 157-159.
- [12] 3D Printing Industry. U. S. Researchers Create 3D Printed Jellyfish Robots to Monitor Fragile Coral Reefs[EB/OL]. (2018-10-2)[2020-10-18]. <https://3dprintingindustry.com/news/u-s-researchers-create-3d-printed-jellyfish-robots-to-monitor-fragile-coral-reefs-140973/>(Accessed on 2 October 2018).
- [13] 3D Printing Industry. GE Transportation to Introduce 250 3D Printed Locomotive Parts by 2025[EB/OL]. (2019-09-28)[2020-10-18]. <https://3dprintingindustry.com/news/ge-transportation-to-introduce-250-3d-printed-locomotive-parts-by-2025-140725/>(Accessed on 28 September 2018).
- [14] 3D Printing Industry. Worlds First 3D Printed Steel Bridge Unveiled at Dutch Design Week[EB/OL]. (2018-10-22)[2020-10-18]. <https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/>(Accessed on 22 October 2018).
- [15] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R. 3D Printing Technologies Applied for Food Design: Status and Prospects[J]. Journal of food engineering, 2016, 179: 44-54.
- [16] SATHISH T, VIJAYAKUMAR M D, AYYANGAR A K. Design and Fabrication of Industrial Components Using 3D Printing[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(6): 14489-14498.
- [17] WU J J, HUANG L M, ZHAO Q, et al. 4D Printing: History and Recent Progress[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2018, 36(5): 563-575.
- [18] YILMAZ B, RASHID A A, MOU Y A, et al. Bioprinting: a Review of Processes, Materials and Applications [J]. Bioprinting, 2021, 23(121): e00148.
- [19] VUKICEVIC M, MOSADEGH B, MIN J K, et al. Cardiac 3D Printing and its Future Directions[J]. Jacc Cardiovascular Imaging, 2017, 10(2): 171-184.
- [20] KRUIJATZ F, LODE A, SEIDEL J, et al. Additive Biotech: Chances, Challenges, and Recent Applications of Additive Manufacturing Technologies in Biotechnology[J]. New Biotechnology, 2017, 39: 222-231.
- [21] MAREW T, BIRHANU G. Three Dimensional Printed Nanostructure Biomaterials for Bone Tissue Engineering[J]. Regen Ther, 2021, 18: 102-111.
- [22] MIR T A, NAKAMURA M. Three-Dimensional Bioprinting: toward the Era of Manufacturing Human Organs as Spare Parts for Healthcare and Medicine[J]. Tissue Engineering Part B: Reviews, 2017, 23(3): 245-256.
- [23] BARONE S, CASINELLI M, FRASCARIA M, et al. Interactive Design of Dental Implant Placements Through CAD-CAM Technologies: from 3D Imaging to Additive Manufacturing[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing(IJIDeM), 2016, 10(2): 105-117.
- [24] OLIVEIRA T T, REIS A C. Fabrication of Dental Implants by the Additive Manufacturing Method: a Systematic Review[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2019, 122(3): 270-274.
- [25] BOM S, MARTINS A M, RIBEIRO H M, et al. Diving into 3D(Bio)Printing: a Revolutionary Tool to Customize the Production of Drug and Cell-Based Systems for Skin Delivery[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 605: 120794.
- [26] 张双杰. 3D 打印技术的应用现状及其展望[J]. 花炮科技与市场, 2019, 25(4): 233.
ZHANG Shuang-jie. Application Status and Prospect of 3D Printing Technology[J]. Fireworks Technology and Market, 2019, 25(4): 233.
- [27] 肖云芳, 王博, 林蓉. 3D 打印的个性化药物研究进展[J]. 中国药学杂志, 2017, 52(2):89-95.
XIAO Yun-fang, WANG Bo, LIN Rong. Research Progress on the Application of 3D Printing in Biomedicine [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2017, 52(2): 89-95.
- [28] ZEMA L, MELOCCHI A, MARONI A, et al. Three-Dimensional Printing of Medicinal Products and the Challenge of Personalized Therapy[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 106(7): 1697-1705.
- [29] TRENFIELD S J, GOYANES A, GAISFORD S, et al. Editorial: Innovations in 2D and 3D Printed Pharmaceuticals[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 605: 120839.
- [30] ELBADAWI M, MCCOUBREY L E, GAVINS F K H, et al. Harnessing Artificial Intelligence for the Next Generation of 3D Printed Medicines[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2021, 175: 113805.
- [31] 张才勋, 付敬国, 阮长利, 等. 3D 打印技术在放疗中

- 的应用与研究进展[J]. 广西医学, 2020, 42(8): 1025-1027.
- ZHANG Cai-xun, FU Jing-guo, RUAN Chang-li, et al. Application and Research Progress of 3D Printing Technology in Radiotherapy[J]. Guangxi Medical Journal, 2020, 42(8): 1025-1027.
- [32] KUMAR P, RAJAK D K, ABUBAKAR M, et al. 3D Printing Technology for Biomedical Practice: a Review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(7): 5342-5355.
- [33] FLAXMAN T E, COOKE C M, MIGUEL O X, et al. A Review and Guide to Creating Patient Specific 3D Printed Anatomical Models from MRI for Benign Gynecologic Surgery[J]. 3D Printing in Medicine, 2021, 7(1): 17.
- [34] 许靳凯. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 石河子科技, 2020(5): 14-15.
- XU Jin-kai. Research Status and Key Technologies of 3D Printing Technology[J]. Shihezi Science and Technology, 2020(5): 14-15.
- [35] FU Yan-zhou, DOWNEY A, YUAN Lang, et al. In Situ Monitoring for Fused Filament Fabrication Process: a Review[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101749.
- [36] KERMAVNAR T, SHANNON A, O'SULLIVAN L W. The Application of Additive Manufacturing / 3D Printing in Ergonomic Aspects of Product Design: a Systematic Review[J]. Applied Ergonomics, 2021, 97: 103528.
- [37] 王志远, 陈银平. 金属增材制造技术的研究概况[J]. 模具技术, 2020(1): 59-63.
- WAN Zhi-yuan, CHEN Yin-ping. Research Overview of Metal Additive Manufacturing Technology[J]. Die and Mould Technology, 2020(1): 59-63.
- [38] XU Wen-peng, LIU Yi, YU Meng-lin, et al. A Support-Free Infill Structure Based on Layer Construction for 3D Printing[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1509(99): 1.
- [39] RAJESHKUMAR G, ARVINDH S S, DEVNANI G L, et al. Environment Friendly, Renewable and Sustainable Poly Lactic Acid (PLA) Based Natural Fiber Reinforced Composites: a Comprehensive Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127483.
- [40] ZHAO Ji-hui, TONG Liang-yu, LI Bo-en, et al. Eco-friendly Geopolymer Materials: a Review of Performance Improvement, Potential Application and Sustainability Assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127085.
- [41] MUSTAPHA K B, METWALLI K M. A Review of Fused Deposition Modelling for 3D Printing of Smart Polymeric Materials and Composites[J]. European Polymer Journal, 2021(10): 110591.
- [42] 徐荣健, 李宗安, 朱莉娅, 等. 3D 打印产业及技术发展趋势概述[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(3): 11-16.
- XU Rong-jian, LI Zong-an, ZHU Li-ya, et al. Overview of 3D Printing Industry and Technology Development Trend[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(3): 11-16.
- [43] ZHANG Biao, LI Hong-geng, CHENG Jian-xiang, et al. Emory Polymers: Mechanically Robust and UV-Curable Shape-Memory Polymers for Digital Light Processing Based 4D Printing(Adv. Mater. 27/2021)[J]. Advanced Materials, 2021, 33(27): 2170210.
- [44] HALEEM A, JAVAID M, SINGH R P, et al. Significant Roles of 4D Printing Using Smart Materials in the Field of Manufacturing[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2021(10): 1016.
- [45] 李文竹, 张勇, 李策. 3D 打印技术的研究现状与发展趋势综述[J]. 数码世界, 2020(5): 6.
- LI Wen-zhu, ZHANG Yong, LI Ce. Research Status and Development Trend of 3D Printing Technology[J]. Digital Space, 2020(5): 6.
- [46] 陈沫. 基于制造模式变革的产品个性化设计演进[J]. 科技与创新, 2021(2): 86-88.
- CHEN Mo. Evolution of Product Personalized Design Based on Manufacturing Mode Change[J]. Science and Technology and Innovation, 2021(2): 86-88.
- [47] 张雅正. 面向个性化定制市场的产品 CMF 配置器设计研究[J]. 工业设计, 2021(4): 118-119.
- ZHANG Ya-zheng. Design and Research of Product CMF Configurator for Personalized Customized Market[J]. Industrial Design, 2021(4): 118-119.
- [48] JAVAID M, HALEEM A. Critical Components of Industry 5.0 towards a Successful Adoption in the Field of Manufacturing[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2020, 5(3): 327-348.
- [49] 李浩, 陶飞, 文笑雨, 等. 面向大规模个性化的产品服务系统模块化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2204-2214.
- LI Hao, TAO Fei, WEN Xiao-yu, et al. Modular Design of Product Service Systems Oriented to Mass Personalization[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2204-2214.
- [50] 尤明辉, 殷亚凤, 谢磊, 等. 基于行为感知的用户画像技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(4): 608-614.
- YOU Ming-hui, YIN Ya-feng, XIE Lei, et al. User Profiling Based on Activity Sensing[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Edition), 2021, 55(4): 608-614.
- [51] CABALLERO L, MORENO A M, SEFFAH A. How Agile Developers Integrate User-Centered Design into Their Processes: a Literature Review[J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2016, 26(8): 1175-1201.
- [52] 陈立影. 基于敏捷设计的女性电子烟形态研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- CHEN Li-ying. Female E-Cigarette Shape Based on Agile Design[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [53] PUIK E, CEGLAREK D. Application of Axiomatic Design for Agile Product Development[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 223: 01004.
- [54] 刘消晓. 产品设计中的用户感知研究[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(10): 232-233.
- LIU Xiao-xiao. User Perception in Product Design[J].

- Industrial & Science Tribune, 2018, 17(10): 232-233.
- [55] 颜波, 张磊, 褚学宁. 基于卷积神经网络的用户感知评估建模[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 844-851.
YAN Bo, ZHANG Lei, CHU Xue-ning. User Experience Evaluation Modeling Based on Convolutional Neural Network[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(7): 844-851.
- [56] 高丹, 陈满儒. 用户感知支持下的敏捷设计[J]. 包装工程, 2014, 35(10): 65-68.
GAO Dan, CHEN Man-ru. Agile Design under the Support of User's Perception[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(10): 65-68.
- [57] 肖人彬, 赖荣桑, 李仁旺. 从大规模定制化设计到大规模个性化设计[J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(1): 1-12.
XIAO Ren-bin, LAI Rong-shen, LI Ren-Wang. From Design for Mass Customization to Design for Mass Personalization[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2021, 40(1): 1-12.
- [58] 余森林, 毛一鸣. 工业4.0时代3D打印技术对工业设计的系统性影响[J]. 设计, 2016(19): 64-65.
YU Sen-lin, MAO Yi-ming. The Systematic Implications of 3D Printing for Industrial Design in Industry 4.0[J]. Design, 2016(19): 64-65.
- [59] KALOSSAKA L M, SENA G, BARTER L M C, et al. Review: 3D Printing Hydrogels for the Fabrication of Soilless Cultivation Substrates[J]. Applied Materials Today, 2021, 24: 101088.
- [60] 刘秀平, 王伟明, 刘彬. 计算机图形学中3D打印研究进展[J]. 大学数学, 2017, 33(3): 1-8.
LIU Xiu-ping, WANG Wei-ming, LIU Bin. Research Advance of 3D Printing in Computer Graphics[J]. College Mathematics, 2017, 33(3): 1-8.
- [61] KALKAL A, KUMAR S, KUMAR P, et al. Recent Advances in 3D Printing Technologies for Wearable(Bio) Sensors[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102088.
- [62] 杨延华. 增材制造(3D打印)分类及研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 309-318.
YANG Yan-hua. Analysis of Classifications and Characteristic of Additive Manufacturing (3D Print)[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 309-318.
- [63] 闵牡丹. 计算机辅助概念设计研究现状和发展趋势[J]. 数码世界, 2018(12): 229.
MIN Mu-dan. Research Status and Development Trend of Computer-Aided Conceptual Design[J]. Digital Space, 2018(12): 229.
- [64] 潘虹. 3D打印技术对产品设计创新开发的研究[J]. 计算机产品与流通, 2019(7): 116.
PAN Hong. 3D Printing Technology for Product Design Innovation and Development[J]. Computer Products and Circuitry, 2019(7): 116.
- [65] LI S, CHEN Y, MU A. Discussion on Sustainable Design in the Field of Industrial[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(5): 318-321.
- [66] AZIZ N A, ADNAN N A A, WAHAB D A, et al. Component Design Optimisation Based on Artificial Intelligence in Support of Additive Manufacturing Repair and Restoration: Current Status and Future Outlook for Remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126401.
- [67] 李文佳. 基于可持续设计理念的废旧织物材料再设计探索[D]. 重庆: 四川美术学院, 2020.
LI Wen-jia. Exploration of the Redesign of Waste Fabric Materials Based on the Concept of Sustainable Design[D]. Chongqing: Sichuan Fine Arts Institute, 2020.
- [68] 王炜尔, 魏芳强, 宫海波, 等. 5G技术在3D打印技术外科领域的应用前景[J]. 中华实验外科杂志, 2020, 37(4): 597-599.
WANG Wei-er, WEI Fang-qiang, GONG Hai-bo, et al. The Application Prospects of 5G Technology in the Field of 3D Printing Surgery[J]. Chinese Journal of Experimental Surgery, 2020, 37(4): 597-599.
- [69] 张晓冬, 刘金平, 吴闯, 等. 3D金属打印技术在制造业中的研究及发展[J]. 金属加工(热加工), 2021(7): 1-8.
ZHANG Xiao-dong, LIU Jin-ping, WU Chuang, et al. Research and Development of 3D Metal Printing Technology in Manufacturing Industry[J]. MW Metal Forming, 2021(7): 1-8.
- [70] 秦歌. 基于4D打印技术的制造业变革与展望[J]. 机电技术, 2019, 42(4): 117-120.
QIN Ge. Manufacturing Industry Reform and Outlook Based on 4D Printing Technology[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2019, 42(4): 117-120.
- [71] 李德智, 陈铮一, 钟健雄. 多元参与视角下我国建筑3D打印研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(6): 1-7.
LI De-zhi, CHEN Zheng-yi, ZHONG Jian-xiong. Review on the Research and Practice of Construction 3D Printing in China from the Perspective of Multiple Participation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(6): 1-7.
- [72] EDUARDO D T, ANA S E, JOSÉ B F. A Micro-Extrusion 3D Printing Platform for Fabrication of Orodispersible Printlets for Pediatric Use[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 605: 120854.
- [73] GUÉNARD L V, MASSON M, LEICHTNAM O, et al. Impact of 3D Printing and Post-Processing Parameters on Shape, Texture and Microstructure of Carrot Appetizer Cake[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 72: 102738.
- [74] 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 Process of Global Additive Manufacturing(3D Printing) Based on Bibliometric Analysis[J]. Welding Technology, 2021, 50(6): 1-4.
- [75] BIRD D T, RAVINDRA N M. Additive Manufacturing of Sensors for Military Monitoring Applications[J]. Polymers, 2021, 13(9): 1455.
- [76] ZHU Cai-han, LI Tian-ya, MOHIDEEN M M, et al. Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: a Review[J]. Polymers, 2021, 13(5): 744.