

高分子材料智能制造:AI与3D打印的融合

张清田

(郑州工程技术学院,河南 郑州 450044)

摘要: 高分子材料的智能制造正通过人工智能(AI)与3D打印技术的深度融合突破传统工艺局限,推动从材料研发、制造工艺到产业化应用的全链条创新升级。文章系统探讨AI赋能的协同创新路径。在材料设计领域,机器学习模型显著缩短了高分子配方开发周期,多模态缺陷联合诊断技术提升了复合材料检测精度;在制造工艺优化中,基于深度学习的动态参数调控系统有效解决了3D打印中的翘曲变形与层间结合的难题,结合数字孪生技术构建的闭环反馈控制体系,实现生产全流程的实时监控与资源优化,在提升材料利用率的同时降低能耗;在产业化应用方面,AI与3D打印协同驱动了航空航天超轻部件、生物医用可降解支架及汽车轻量化部件的性能突破。未来,高分子材料智能制造需要着力攻克多材料界面机制解析、生物基材料工艺优化等挑战,并通过跨尺度建模与智能化闭环系统深化“智能+绿色”制造范式。研究结果为高分子材料智能制造从实验室研发到工业化落地的技术融合与创新方向提供支撑与实践参考。

关键词: 高分子材料;人工智能;3D打印;智能制造;数字孪生;协同优化

中图分类号: TQ320.6; TP391.73

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0221-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.039

Intelligent Manufacturing of Polymers: Convergence of AI and 3D Printing

ZHANG Qingtian

(Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: The intelligent manufacturing of polymer materials is undergoing transformative advancement through the deep integration of artificial intelligence (AI) and 3D printing technologies, which has broken through the limitations of traditional processes and promoted innovation across the entire chain from material research and development and manufacturing processes to industrial applications. The article systematically examined the collaborative innovation pathways empowered by AI. In the field of material design, machine learning models significantly shortened the development cycle for polymer formulations, and multi-modal defect co-diagnosis technology enhanced the detection accuracy of composites. In manufacturing process optimization, a dynamic parameter control system based on deep learning effectively addressed challenges in 3D printing such as warping deformation and interlayer bonding. By integrating digital twin technology to build a closed-loop feedback control system, real-time monitoring and resource optimization throughout the entire production process were achieved, which improved material utilization while reducing energy consumption. In terms of industrial applications, the synergy between AI and 3D printing drove performance breakthroughs in aerospace ultra-lightweight components, biodegradable biomedical scaffolds, and automotive lightweight parts. Looking ahead, the intelligent manufacturing of polymeric materials needs to focus on overcoming challenges such as the analysis of multi-material interface mechanisms and the process optimization of bio-based materials. By employing cross-scale modeling and intelligent closed-loop systems, the "smart and green" manufacturing paradigm should be further advanced. The research findings provided support and practical references for the technological integration and innovation direction guiding the intelligent manufacturing of polymeric materials from laboratory research and development to industrial implementation.

Keywords: Polymer materials; AI; 3D printing; Intelligent manufacturing; Digital twin; Collaborative optimization

收稿日期 Submitted date 2025-07-05; 修回日期 Revised date 2025-08-19; 录用日期 Accepted date 2025-09-16

基金项目: 河南省教学科学规划一般课题项目(2023YB0257)

联系人, zhangqingtian525@126.com

引用本文: 张清田. 高分子材料智能制造:AI与3D打印的融合[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 221-226.

Citation: ZHANG Q T. Intelligent manufacturing of polymers: Convergence of AI and 3D printing[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 221-226.

高分子材料因其轻质、绝缘、高比强度等优异特性，被广泛应用于日用品、工业装备、航空航天等领域^[1]。传统加工技术如注塑、挤出、压延等虽已成熟，却在制造复杂结构件方面存在局限^[2]。当前，智能制造正推动制造业向数字化、网络化与智能化深刻转型^[3]，为高分子材料制造带来了新的技术融合与范式创新契机。其中，3D打印技术凭借其逐层成型、设计自由的特点，为复杂构件制备提供了全新路径^[4]；AI则通过数据驱动和智能优化，赋能从材料设计到工艺控制的全链条创新。两者的深度融合，正在重塑高分子材料制造的技术体系，推动其向智能化、定制化和高性能化方向发展^[5]。

因此，本文聚焦于高分子材料智能制造，系统探讨AI与3D打印技术在材料设计、工艺优化与产业应用中的协同机制，分析当前面临的关键挑战，并对“智能+绿色”制造模式的未来趋势进行展望。

1 高分子材料智能制造的协同创新路径

3D打印技术与AI算法的深度融合推动了高分子材料制造的变革性发展^[6]。图1为AI赋能的高分子材料智能制造。首先，基于机器学习构建材料-结构协同创新体系，突破传统研发模式，形成了材料设计的智能迭代机制；然后，构建工艺参数动态优化系统，通过在线质量监测与深度学习实现实时反馈，精准调控核心参数，形成制造工艺的闭环优化网络；最后，基于数字孪生建立场景驱动的分布式制造网络，结合应用生态的生态重构，共同构成了新一代智能制造范式的技术基座。

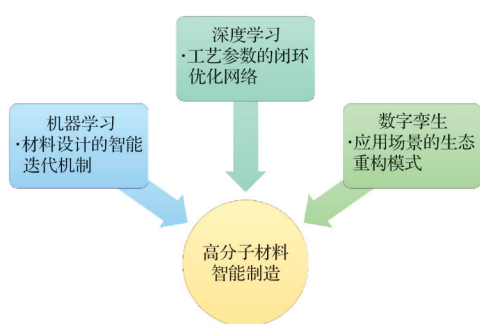


图1 AI赋能的高分子材料智能制造

Fig.1 AI-enabled intelligent manufacturing of polymer materials

1.1 高分子材料设计的智能化升级

借助机器学习建立的材料属性预测模型，可在塑料配方设计^[7]、缺陷识别分类^[8]、性能评估^[9]及表征分析^[10]等环节为科研人员提供关键指导，有效缩短新材料的开发周期^[11]。

针对复合材料组分优化，机器学习通过解析高分子共混体系的结构-功能关联，实现最优配比的自动筛选^[12]。CHEN等^[13]利用物理信息机器学习(PIML)进行模拟实验，对包含2-羟基-3-苯氧基丙基丙烯酸酯(HA)、异辛酸丙烯酸酯(IA)等6种单体的3D打印热塑性塑料进行虚拟性能预测，获得完整的力学性能曲线，突破传统方法仅能预测单一性能指标的局限，为定制化材料开发提供了高效途径。

在缺陷监控方面，任晓祥^[14]开发了基于卷积神经网络(CNN)的在线检测系统，通过三维激光成像获取材料表面形貌数据，并结合热成像捕捉温度异常，实现对磷酸三钙(β -TCP)与聚己内酯(PCL)共混物在3D打印过程中翘曲变形的多模态缺陷联合诊断与准确识别。

李容等^[15]采用迁移学习策略，将基于铝基材料缺陷数据库训练的YOLOv5s模型成功应用于碳纤维复合材料(CFRP)的分层检测，基于跨材料样本数据实现了多重缺陷同步识别，检测精度达93.7%，为复合材料损伤监测提供了新思路。同时，SHAH等^[16]采用不同机器学习模型预测聚乳酸(PLA)泡沫的密度与熔体压力，结果表明，随机森林(RF)模型在预测熔体压力方面表现更优，而决策树(DT)模型在预测密度方面更具优势。

上述实践表明，高分子材料研发正从经验驱动向“智能预测-实验验证-动态优化”的数据驱动范式转型。尤其在3D打印材料领域，AI通过构建材料基因组数据库，显著缩短了研发周期并降低实验成本。随着算法持续迭代，未来将推动高分子材料向更高性能和功能定制化方向加速发展。

1.2 3D打印制造工艺智能优化

当前主流的3D打印工艺技术主要有熔融沉积成型(FDM)、选择性激光烧结(SLS)、立体光刻(SLA)、材料喷射(PolyJet)等^[17]。图2为3D打印主要工艺技术原理。不同的工艺之间所需要的打印材料和应用场景也并不相同。表1为3D打印主要材料及应用场景^[18]。

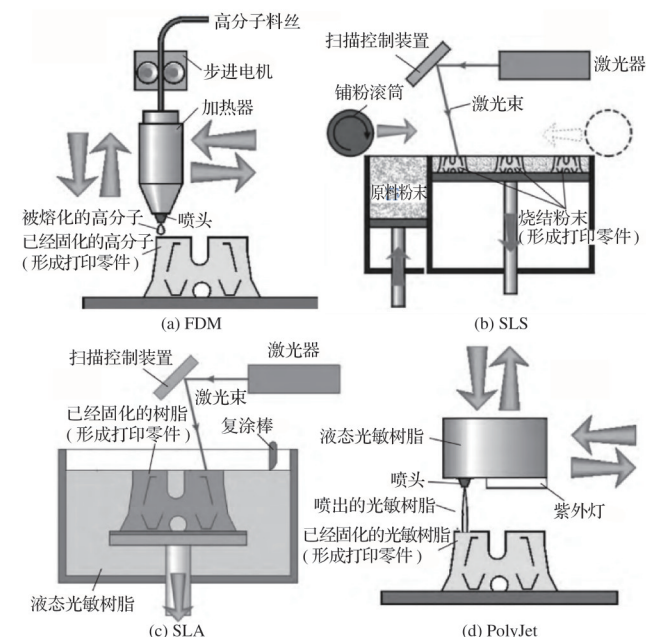


图2 3D打印主要工艺技术原理

Fig.2 Principles of main process technologies for 3D printing

从图2a可以看出，FDM工艺的核心原理在于使用热塑性高分子线材，通过精密送料系统将原料输送至加热装置，材料在高温作用下转变为熔融态后，由数控系统驱动喷头沿预设轨迹进行分层堆积。从图2b可以看出，相较

于FDM技术,SLS工艺主要采用聚合物粉末作为成型介质。其设备运行流程可概括为:供粉机构通过自动铺粉装置在成型基板上形成均匀粉层;高精度激光束根据截面数据选择性烧结粉末颗粒;完成单层加工后平台按设定参数下移,循环进行铺粉-烧结作业直至构件成型。从图2c可以看出,SLA工艺基于光聚合原理,选用液态光敏树脂作为基础材料。设备运行机制包含以下阶段:首先通过三维

表1 3D打印主要材料及应用场景

Tab.1 Main materials and application scenarios of 3D printing

工艺类型	材料	应用场景
FDM	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、PLA、聚碳酸酯(PC)、尼龙(PA)、聚醚醚酮(PEEK)等热塑性塑料	原型制作、功能测试等
SLS	尼龙 12(PA12)、热塑性聚氨酯(TPU)、复合材料粉末	无人机框架、柔性可穿戴设备组件
SLA	光固化树脂	精密齿科修复体等
PolyJet	多类树脂	手术预演仿真模型等
多射流熔融(MJF)	PA12粉末	工业齿轮箱外壳等 ^[19]
连续纤维增强(CFRPC)	碳纤维+PA等热塑性塑料	卫星天线支撑结构等 ^[20]

在制造工艺层面,3D打印的智能化体现在实时监控与动态优化。通过AI进行的深度学习算法能够对打印速度、打印速率等打印参数进行实时动态优化,有效攻克3D打印过程中翘曲变形、层间结合等技术难题^[21]。肖亮等^[22]采用FDM制备ABS制件,创新性地构建多物理场耦合的温度调控体系,通过数值模拟分析与实验验证相结合的方法系统考察了喷头温度、电机温度和散热片温度的影响。通过智能调控策略控制喷头温度、电机温度和散热片温度,使具有曲面特征或内部空腔结构的ABS制品成型精度提高15%~18%,为精密注塑工艺提供了新的技术范式。徐佳^[23]采用熔融沉积工艺制备薄壁构件,创新性地构建多参数协同优化模型。该研究采用数值模拟分析与多因素实验设计相结合的方法,系统探究层厚参数、供料速度、非挤出移动速度以及内部填充密度对成型件几何精度的影响机制。实验数据表明,当工艺参数设定为层厚0.1 mm、填充率25%、同步控制供料与非挤出移动速度为40 mm/s时,PLA薄板三维轴向尺寸偏差分别控制在0.02 mm(X、Y向)和0.04 mm(Z向),极大地提高了产品精密度。

林宇等^[24]在PLA螺钉的FDM成型研究中构建温度-速率双变量响应面模型,结合CAE仿真技术实现工艺参数智能匹配。当设定挤出速度为20 mm/s、熔融温度为190 °C时,制得螺钉的轴向长度误差小于0.5%,径向尺寸波动控制在0.09%以内。此外,AI驱动的以高分子材料为主体的多材料协同打印技术可实现导电、导热、结构支撑功能的集成化制造,突破传统工艺的功能单一性局限^[25]。

上述研究成果揭示了智能工艺优化的双重价值:一方面,构建“参数预测-实时调控”闭环系统可将打印过程中高分子材料的典型缺陷发生率降低;另一方面,能够制备

模型切片处理生成扫描路径数据;随后紫外激光束按预定轨迹对树脂液面进行逐点固化;每完成单层固化后,升降平台带动已成型部分下移特定层厚,待新鲜树脂覆盖表面后继续下一层固化作业。从图2d可以看出,PolyJet技术虽同样采用光敏树脂,但其工作机制有别于传统SLA工艺。该技术通过多喷嘴阵列将液态光敏高分子材料精确喷射至成型区域,随即采用紫外光源进行即时固化。

精度高、性能优异的3D打印制件。

1.3 高分子材料智能制造全流程

利用数字孪生技术,高分子材料制造过程中的每个环节都可以使用虚拟模型进行实时映射和反馈,使3D打印的整个过程在虚拟世界中得以同步展现。三维打印技术融合数字孪生体系的应用框架中,构建集成化系统的关键在于实现制造单元(3D打印设备)、实时动态数据交互、数字孪生模型、闭环反馈控制机制以及资源协调系统的有机整合。图3为基于数字孪生的高分子材料智能制造系统。

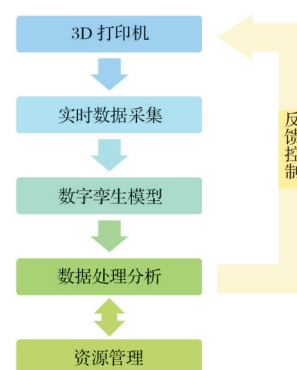


图3 基于数字孪生的高分子材料智能制造系统

Fig.3 Intelligent manufacturing system for polymer materials based on digital twins

基于AI数字孪生技术构建的闭环反馈控制系统实现了“设计-仿真-制造”全流程的智能决策。建立统一的系统框架,实现虚实环境间的实时交互,为智能生产提供技术支撑。生产过程综合运用实时反馈、流程建模仿真、自适应调整与资源优化调度,实现了对制造环节的动态管理

与精准调控。该技术整合不仅有效控制生产成本,降低物料损耗,也显著提升工艺适应性与加工精度。依托物联网技术,3D打印设备的运行状态参数被实时采集并同步映射至数字孪生平台。系统在虚拟环境中对制造流程进行多维度模拟与参数调优,进而生成工艺修正指令回传至打印设备,实现在线自适应调整。资源调度单元通过智能算法统筹分配材料与能源,构建覆盖全流程的资源优化配置体系,保障制造系统的高效稳定运行。

华盛橡胶在实际生产中应用了该技术,通过物联网与AI算法构建高分子材料智能制造系统,实现生产参数的实

表2 传统3D打印与数字孪生结合3D打印应用效果对比

Tab.2 Comparison of application effects of traditional 3D printing and digital twin combined with 3D printing

项目	平均打印时间/h	材料利用率/%	能耗/(kWh)	产品尺寸精度/mm
传统3D打印	11.27	85.12	5.94	±0.23
数字孪生结合3D打印	8.31	94.62	4.12	±0.16

利用AI数字孪生技术形成的闭环反馈控制系统,通过工艺参数智能寻优、生产资源动态配置、质量缺陷在线诊断的三维联动,可以构建起兼具柔性化生产能力和精准化控制特性的新一代制造范式,为高分子材料从实验室研发到工业化生产架设起数字化桥梁。

2 产业化应用与性能突破

面对医疗、航空航天、汽车等高端制造领域日益增长的个性化需求,传统生产模式在定制化响应速度、复杂结构成型能力等方面已显现明显局限。AI增强型3D打印技术同样为各行业的技术发展突破提供关键解决方案。

2.1 AI驱动的高性能航空材料创新

在航空航天领域,AI与3D打印的协同效应显著降低了复杂部件的制造成本^[27]。SERLES等^[28]将AI和先进的3D打印技术结合,成功开发出一种创新的纳米结构材料。这种材料不仅具有碳钢的高强度,还具备聚苯乙烯泡沫的轻盈性,为材料科学领域带来了新的突破。该团队利用AI算法预测了最佳形状,以提升材料的强度和减轻材料的质量,改进后的纳米晶格强度比以往的模型提高1倍以上,能够承受2.03 MPa/(m³·kg)的比强度,为航空航天应用(如飞机、直升机和航天器)制造超轻部件提供了全新材料。

CUI等^[29]开发一种基于颗粒水凝胶剪切诱导滑移策略的3D打印技术,成功制备填料质量分数高达99.2%的聚丙烯酸(PAA)基复合材料。该材料通过模拟生物矿化层结构,实现轻量化、高导热性和优异的热绝缘性能。研究显示,其热导率低至0.045 W/(m·K),能够有效控制高温环境下的局部温度,可用于航天器微电路的热防护罩,通过AI可以进一步优化填料分布或工艺参数,进而提升材料相关性能。

AI增强3D打印技术已从实验室创新逐步迈向航空航天工程化应用,其核心价值在于“以智能算法突破物理制

时监控与动态优化。该系统集成传感器数据,分析温度、压力、原料配比等关键参数,并借助数字孪生进行虚拟仿真,显著提高了橡胶产品的生产效率与质量。

杭行等^[26]从生产效率、材料利用率、能耗与产品尺寸精度4个维度对比评估传统3D打印与数字孪生结合的3D打印技术的应用效果。结果显示,基于数字孪生的智能化流程在提升效率、优化资源利用和保证产品质量方面展现出显著潜力,能够有效降低成本、减少浪费,并提高制造的灵活性与精度。表2为传统3D打印与数字孪生结合3D打印应用效果对比,数据来源文献^[26]。

造极限”。未来,随着多模态AI模型与高性能计算的发展,该技术有望在深空探测装备、可重复使用运载器等领域催生颠覆性解决方案,同时推动全球航空航天制造业向绿色化、智能化加速转型。

2.2 智能生物制造与功能化组织工程应用

高分子材料在生物医学医疗健康领域的应用得益于个性化与功能化制造^[30]。HAN等^[31]将PEEK和碳纤维增强PEEK(CFR-PEEK)复合材料进行FDM打印,用抛光和喷砂方法对样品表面进行改性,以分析表面粗糙度和形貌对一般生物相容性(细胞毒性)和细胞黏附的影响。研究发现,3D打印PEEK和CFR-PEEK样品表面的细胞密度明显高于相应的抛光和喷砂样品。拥有适当机械强度的FDM打印的CFR-PEEK复合材料具有作为骨移植和组织工程应用的生物材料的潜力。

可生物降解支架同样是医学领域关注的焦点。SHEN等^[32]采用3D打印制造由PCL组成的支架,然后通过共价接枝将支架与肝素功能化。将3D打印的支架植入兔的腹主动脉中评估植入和生物相容性的可行性。体外数据表明,支架具有优异的血液相容性和细胞相容性。GE等^[33]将利用AI优化的水凝胶-SMP复合材料用于多功能柔性结构与器件的快速一体化成型,使用3D打印出具有形状记忆功能的血管支架,其药物缓释效率较传统涂层技术提高60%。

智能生物制造技术深度融合AI与3D打印技术,正在重塑生物医学领域的创新格局。这一技术不仅将推动生物医学从“标准化”向“精准化”转型,更可能催生具有生物活性的智能植入体,为重大疾病治疗开辟全新路径。

2.3 生成式设计与汽车轻量化集成制造

在汽车制造领域,轻量化发展趋势正加速AI与增材制造技术的协同创新^[34]。以宝马集团为例,其运用CFRP结合AI辅助的Synucla系统,开发出新型机械夹具装置。

工程验证数据表明:应用于M系列车型的CFRP夹具系统成功实现质量降低1/5,通过仿生学算法改进使承载性能提升37%。智能运算系统通过动态调整材料密度分布有效平衡构件强度与质量控制的矛盾关系^[35]。

在赛车工程领域,德国斯图加特大学GreenTeam车队在新一代电动方程式赛车E0711-11 EVO中,采用INTAMSYS的FUNMAT HT设备打印99个高性能塑料部件,包括ULTEM™9085材料的高压电池母线、制动系统组件等。3D打印组件替代传统金属部件,质量减轻50%,同时满足耐高温、抗化学腐蚀和阻燃性要求。ULTEM™9085打印的电池母线在保持机械强度的前提下显著降低了整车质量^[36]。未来,随着多材料打印和实时仿真技术的进步^[37],这一技术组合将进一步拓展至电池组件、车身结构等关键领域,推动汽车工业向可持续化、智能化方向发展。

重庆金石智诚科技在快速成型领域取得突破性进展,其将增材制造与传统模具工艺结合,运用PA、PC等工程塑料批量制备汽车装饰部件。通过机器学习模型优化模具参数配置,使试制周期压缩至原有周期的50%,开发成本下降40%,有效解决了传统模具开发中的资源损耗难题。这种技术融合创新为汽车产业的智能化转型提供新技术路径^[38]。

上述实践验证了生成式设计在平衡高分子材料性能与汽车轻量化目标中的有效性^[39]。未来,应该在多材料打印适配性、实时仿真精度、规模化生产效率及智能算法与制造系统的深度融合等方面持续突破,以推动该技术向电池集成、车身结构等复杂场景拓展,加速汽车产业全链条智能化与可持续发展。

3 技术挑战与未来方向

未来,AI增强3D打印技术在高分子材料智能制造领域的发展将面临一系列复杂挑战,这些挑战既源于材料本身的非线性特性与工艺参数的动态耦合,也受到环保需求、产业化标准缺失以及多材料功能化需求的多重制约^[40]。高分子材料,如PLA、ABS、PEEK等,在打印过程中因温度、湿度、打印速度等参数的微小波动可能引发形变、收缩或结晶度变化,而现有AI模型虽能通过数据驱动预测部分行为,却仍受限于高质量实验数据的匮乏和跨尺度物理场建模的复杂性。尤其涉及多材料协同打印时,不同材料界面结合的微观机制与宏观力学性能的关联尚未被充分解析,导致功能梯度材料(如导电-柔性复合材料)的智能化制备难以突破^[41]。

与此同时,传统石油基高分子材料的不可持续性与生物基可降解材料工艺的成熟形成矛盾,AI必须在优化材料配方、降低能耗与废料率之间寻找平衡点。例如,传感器数据延迟与算法响应速度不足进一步阻碍了打印过程中缺陷(如孔隙、翘曲)的动态修复,使现有技术多依赖离线优化,难以构建完整的从设计、仿真到打印、检测的全流程智能闭环系统^[42]。

未来,技术创新应以“智能化-可持续性-定制化”为核心导向,深度融合数字孪生、边缘计算与跨尺度建模工具,实现材料基因组计划的高通量扩展。例如,利用生成对抗网络(GAN)加速生物基高分子材料配方的筛选,或结合分子动力学模拟与机器学习精准预测PEEK材料的结晶行为^[43],从而在减少实验试错成本的同时提升材料性能。

4 结论

AI与3D打印的协同进化正推动高分子材料制造从“经验驱动”转向“数据驱动”,其终极目标是通过智能闭环控制、绿色工艺优化与按需定制能力,在航空航天精密部件、可降解医疗器械、柔性电子器件等领域实现规模化落地,最终重塑“智能+绿色”的制造业新范式。这一转型的成功与否取决于材料科学、计算模型与工程实践的深度融合以及跨学科数据生态与产业化协作体系的构建速度。

参考文献

- [1] 印可桢. 高分子多层共挤技术的研究进展[J]. 橡胶工业, 2024, 71(3): 232-239.
- [2] SEVOSTYANOV V M, SHEIN T N, SEVOSTYANOV S V, et al. Development and study of equipment for comprehensive processing of technogenic polymer-containing materials[J]. Russian Engineering Research, 2025, 45(10): 1440-1444.
- [3] 樊丹. 数字化转型赋能塑料企业智能制造与高效管理[J]. 塑料助剂, 2025(4): 128-130, 136.
- [4] 万海鑫, 马思远, 尚连勇. 新型塑料材料在3D打印领域的应用研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(8): 105-108.
- [5] KAIHARA H F, PIZI G C E, STRAIOTO G F, et al. Influence of printing orientation on the mechanical properties of provisional polymeric materials produced by 3D printing[J]. Polymers, 2025, 17(3): 265-265.
- [6] 李佳玮, 韩共乐, 李传明, 等. 3D打印技术在橡胶绝热层材料成型中的应用进展分析[J]. 信息记录材料, 2025, 26(1): 9-11.
- [7] 张泽熙, 蔡展翔, 张文彬, 等. 机器学习辅助高分子合成研究进展[J]. 科学通报, 2025, 70(增刊1): 471-480.
- [8] 邓海云, 陈新辉. 基于Halcon深度学习的高分子薄膜表面缺陷检测[J]. 机电工程技术, 2024, 53(7): 153-157.
- [9] LI D, RU Y, CHEN Z, et al. Accelerating the design and development of polymeric materials via deep learning: Current status and future challenges[J]. APL Machine Learning, 2023, DOI: 10.1063/5.0131067.
- [10] 杨镇岳, 聂文建, 刘伦洋, 等. 机器学习方法在分子玻璃化研究中的应用[J]. 高分子学报, 2023, 54(4): 432-450.
- [11] 李雨嘉. YOLOv5算法在分子材料领域的应用[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 157-160.
- [12] PAI S M, SHAH K A, SUNDER S, et al. Machine learning applied to the design and optimization of polymeric materials: A review[J]. Next Materials, 2025, 7: 100449-100457.
- [13] CHEN Z, WU Y, XIE Y, et al. Physics-informed machine learning enabled virtual experimentation for 3D printed thermoplastic[J]. Materials Horizons, 2024, 11(23): 6028-6039.

- [14] 任晓祥. 基于机器学习的混合高分子材料打印缺陷的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [15] 李容, 冯侃, 闫静, 等. 基于YOLOv5s的复合材料层合板层裂损伤局部稳态波场识别研究[J]. 固体力学学报, 2023, 44(5): 672-678.
- [16] SHAH K A, BRÜTTING C, ALBUQUERQUE R Q, et al. Machine learning investigation of polylactic acid bead foam extrusion[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(30): e55693.
- [17] 陈硕平, 易和平, 罗志虹, 等. 高分子3D打印材料和打印工艺[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 54-59.
- [18] 陶永亮, 杨建京. 高分子材料3D打印应用与案例[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(2): 35-41.
- [19] 徐翔民, 仝蓓蓓, 苏昊龙. 选择性激光烧结尼龙12基复合材料性能研究[J]. 当代化工研究, 2024(24): 85-87.
- [20] 张明, 孙中刚, 郭艳华, 等. 3D打印连续纤维增强树脂基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(2): 50-70.
- [21] 刘卫兵, 钱素娟, 刘志东. 3D打印用高分子材料及打印成型工艺参数优化研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(2): 85-89.
- [22] 肖亮, 马训鸣, 要义勇, 等. 3D打印喷头的热力学分析与结构优化设计[J]. 机械制造, 2014, 52(7): 15-18.
- [23] 徐佳. 大型FDM双喷头3D打印机设计及工艺参数研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [24] 林宇, 王剑彬, 李林升, 等. FDM技术3D打印机打印头结构优化设计[J]. 机械工程师, 2017(2): 3-5.
- [25] 孟云聪, 周光明, 蔡登安, 等. 连续芳纶纤维增强PLA复合材料3D打印技术成型缺陷及工艺优化方法研究[J]. 复合材料科学与工程, 2024(1): 98-104.
- [26] 杭行, 党济宇, 张嗣为. 基于数字孪生技术的3D打印智能化机械制造流程优化研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(8): 103-106.
- [27] 江洪, 刘敬仪. 3D打印在航空航天领域中的应用初探[J]. 新材料产业, 2019(2): 21-24.
- [28] SERLES P, YEO J, HACHÉ M, et al. Ultrahigh specific strength by bayesian optimization of carbon nanolattices[J]. Advanced Materials, 2025, 37(14): e2410651.
- [29] CUI C, ZHUANG Z Y, GAO H L, et al. 3D printing of ultrahigh filler content composites enabled by granular hydrogels[J]. 2025, 37(30): 2500782.
- [30] 朱林, 陆娟, 包志军, 等. 医疗领域3D高分子材料打印技术的应用和发展趋势[J]. 塑料助剂, 2022(2): 62-65.
- [31] HAN X T, YANG D, YANG C C, et al. Carbon fiber reinforced peek composites based on 3d-printing technology for orthopedic and dental applications[J]. Journal of Clinical Medicine, 2019, 8(2): 240.
- [32] SHEN Y, TANG C, SUN B, et al. 3D printed personalized, heparinized and biodegradable coronary artery stents for rabbit abdominal aorta implantation[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138202.
- [33] GE Q, CHEN Z, CHENG J, et al. 3D printing of highly stretchable hydrogel with diverse UV curable polymers[J]. Science Advances, 2021, 7(2): 4261.
- [34] 黄奇, 吕猛, 史本鹏, 等. 3D打印技术在汽车主安全气囊盖板模具研发中的应用研究[J]. 专用汽车, 2024(11): 98-99.
- [35] 四川省增材制造技术协会. 3D打印工装夹具, 通过宝马案例透视其中价值与发展[EB/OL]. (2024-05-29)[2025-08-18]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzU3NTA5NDc1Nw==&mid=2247512014&idx=3&sn=b677a7ad8d9494b62927c17d7918da53&chksm=fd2a8544ca5d0c528cea7865b0ee7b01261a138bb1c83716cf11f53ae9ae4571cbb6b754c846&scene=27.
- [36] 3D打印网. 工业制造企业怎样实现塑料3D打印技术的小批量生产[EB/OL]. (2025-08-12)[2025-08-18]. <https://www.3djiagong.com/a/fuwu/1210.html>.
- [37] 朱靖虎. C公司汽车大型冲压模具开发项目和技术管理流程及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [38] 报告大厅. 3D打印+AI算力融合: 智能制造迎来战略转折点[EB/OL]. (2025-05-12)[2025-08-18]. <https://www.chinabgao.com/info/1266340.html>.
- [39] 文玉芳, 史楠. 3D打印技术在汽车发动机连杆轻量化设计中的应用[J]. 汽车测试报告, 2024(5): 10-12.
- [40] IVORRA-MARTINEZ J, PEYDRO M A, GÓMEZ-CATURLA J, et al. The effects of processing parameters on mechanical properties of 3D-printed polyhydroxyalkanoates parts[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18(1): e2164734.
- [41] QIU W L, XU X G, DONG K, et al. Recent advances in 4D printing of fiber-reinforced polymer composites: A review and outlook[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 283: 111645.
- [42] UHRICH B, PFEIFER N, SCHÄFER M, et al. Physics-informed deep learning to quantify anomalies for real-time fault mitigation in 3D printing[J]. Applied Intelligence, 2024, 54(6): 4736-4755.
- [43] 王妍, 汤赫男, 赵晶, 等. PEEK填充PTFE摩擦学性能分子动力学模拟分析[J]. 润滑与密封, 2024, 49(8): 44-49.