



## 连续纤维增强热塑性复合材料构件增材制造工艺力学及机制的多尺度模拟研究进展

燕鑫 王莘儒 刘思琴 常保宁 刘斐 祝颖丹 张武翔 丁希仑

### Research progress in multi-scale modeling of processing mechanics and mechanism in additive manufacturing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites

YAN Xin, WANG Shenru, LIU Siqin, CHANG Baoning, LIU Fei, ZHU Yingdan, ZHANG Wuxiang, DING Xilun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.005>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 连续纤维增强聚合物复合材料增材制造工艺研究进展

Additive manufacturing for continuous fiber-reinforced polymer composites: A review on processing technique

复合材料学报. 2023, 40(7): 3703–3721 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230224.001>

#### 增材制造钛基复合材料体系与组织结构设计

Composition and architecture design in additive manufacturing of titanium matrix composites

复合材料学报. 2024, 41(4): 1633–1652 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231027.003>

#### 纤维增强聚合物基复合材料熔融堆积成型技术的研究进展及产品的力学性能

3D printed fibre-reinforced polymer composites—Review of the fused deposition modeling process and mechanical performance of products

复合材料学报. 2021, 38(4): 979–996 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210118.003>

#### 熔融沉积打印微纳米生物质填料增强聚乳酸基复合材料的研究进展

Research progress of biomass-based micro-nano filler reinforcing polylactic acid matrix composites printed by fused deposition modeling

复合材料学报. 2023, 40(12): 6471–6487 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230724.001>

#### 平纹编织SiC/SiC复合材料多尺度建模及强度预测

Multi-scale modeling and strength prediction of plain woven SiC/SiC composites

复合材料学报. 2019, 36(10): 2380–2388 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181112.001>

#### 连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展

Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites

复合材料学报. 2022, 39(9): 4274–4285 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.008>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.005

# 连续纤维增强热塑性复合材料构件增材制造工艺力学及机制的多尺度模拟研究进展



分享本文

燕鑫<sup>1,2</sup>, 王莘儒<sup>1</sup>, 刘思琴<sup>1</sup>, 常保宁<sup>2</sup>, 刘斐<sup>\*1</sup>, 祝颖丹<sup>\*3</sup>, 张武翔<sup>\*1,2</sup>, 丁希仑<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315800; 3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** 连续纤维增强热塑性复合材料由于优异的力学和化学性能, 具有广阔的应用前景。针对高性能复杂结构零件自动化制造需求, 以自动铺放及连续纤维 3D 打印成型技术为代表的连续纤维增强热塑性复合材料的增材制造技术引起广泛关注。增材制造过程是一个包含多尺度、多物理场的复杂过程, 工艺机制尚不明确, 且热塑性聚合物具有熔点高、黏度大等特性, 增大了加工难度, 成型工艺控制极具挑战。由于成型过程包含一系列力学问题, 采用多尺度工艺力学仿真, 结合理论与实验研究可以构建成型工艺参数及成型工艺质量之间的关联, 为优化工艺参数设计和装备模块设计提供理论支持。多尺度模拟工艺力学及机制研究涉及到对各类复杂物理现象的理解和捕捉, 算法种类繁多, 模型构建难度大, 使得多尺度工艺力学建模颇具挑战性。本文总结了近年来不同尺度模拟方法在自动铺放及连续纤维 3D 打印等连续纤维增强热塑性复合材料工艺机制研究方面的进展, 并对未来的发展方向及应用前景进行了分析和展望。

**关键词:** 连续纤维增强热塑性复合材料; 增材制造; 工艺力学; 工艺机制; 多尺度仿真

中图分类号: V258; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)09-4502-16

## Research progress in multi-scale modeling of processing mechanics and mechanism in additive manufacturing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites

YAN Xin<sup>1,2</sup>, WANG Shenru<sup>1</sup>, LIU Siqin<sup>1</sup>, CHANG Baoning<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>\*1</sup>, ZHU Yingdan<sup>\*3</sup>, ZHANG Wuxiang<sup>\*1,2</sup>, DING Xilun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automatic, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315832, China; 3. Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** Continuous fiber-reinforced thermoplastic composites offer exceptional mechanical and chemical properties, attracting widespread attention in both academia and industry. To meet the automation requirements for high-performance complex structural components, additive manufacturing technologies for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites have garnered significant interest. These manufacturing methods include Fused Deposition Modeling and automated fiber placement. The additive manufacturing process involves multi-scale

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-06-27; 录用日期: 2024-07-05; 网络首发时间: 2024-07-23 11:57:04

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.005>

基金项目: 国家自然科学基金 (12372106; 52205003); 浙江省自然科学基金 (LD22E050011); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2022Z070; 2023Z054) National Natural Science Foundation of China (12372106; 52205003); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LD22E050011); Ningbo Key Projects of Science and Technology Innovation 2025 Plan (2022Z070; 2023Z054)

通信作者: 刘斐, 博士, 博士后, 研究方向为复合材料成型工艺优化 E-mail: [feiliulf@buaa.edu.cn](mailto:feiliulf@buaa.edu.cn);祝颖丹, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为复合材料制造及装备 E-mail: [y.zhu@nimte.ac.cn](mailto:y.zhu@nimte.ac.cn);张武翔, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料成型装备研制 E-mail: [zhangwuxiang@buaa.edu.cn](mailto:zhangwuxiang@buaa.edu.cn)

引用格式: 燕鑫, 王莘儒, 刘思琴, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料构件增材制造工艺力学及机制的多尺度模拟研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4502-4517.

YAN Xin, WANG Shenru, LIU Siqin, et al. Research progress in multi-scale modeling of processing mechanics and mechanism in additive manufacturing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4502-4517(in Chinese).

physical phenomena, presenting a complex interplay that is not yet fully understood. The inherent properties of thermoplastic polymers, such as their high melting points and viscosities, further complicate processing, posing substantial challenges in the control of manufacturing processes. Addressing the intricate mechanical challenges within the manufacturing process can be facilitated through the application of multi-scale process mechanics simulations. The integration of these simulations with theoretical and empirical research aids in forging a clear correlation between manufacturing process parameters and the quality of the final product. This provides theoretical support for optimizing process parameters and equipment module design. However, the implementation of multi-scale process simulation requires in-depth comprehension and precise description of physical phenomena. It also involves the design of sophisticated algorithms and the construction of intricate models, thereby increasing the difficulty and challenge of the simulation. This paper reviews recent studies employing various numerical modeling approaches to investigate the processing mechanisms of continuous fiber reinforced thermoplastic composites during the AFP and FDM processes. It also outlines potential promising directions in the field.

**Keywords:** continuous fiber-reinforced thermoplastic composites; additive manufacturing; process mechanics; process mechanism; multi-scale modeling

纤维增强树脂基复合材料具有强度高、质量小、耐高温、耐腐蚀等优点, 被广泛运用于汽车、航空航天等领域, 其中连续纤维增强复合材料可以显著提升材料的力学性能, 而且通过巧妙的铺层设计及轨迹规划, 可以实现材料局部力学性能的调控, 具有极大的设计及应用空间<sup>[1-2]</sup>。

热塑性树脂具有受热软化、冷却硬化的物理特性, 易于再熔融和再成型<sup>[3-4]</sup>。因此使用热塑性复合材料作为基体的连续纤维增强复合材料, 相对于传统的热固性树脂基复合材料, 具有耐高温、防腐蚀、循环利用、运储储存等特点<sup>[5]</sup>。由于热塑性树脂基复合材料成型温度高, 而拉挤和模压只适用于结构简单的零件, 对于结构复杂的零件, 以自动铺放和3D打印为代表的自动化增材制造方案成为趋势<sup>[3]</sup>。

基于增材制造工艺的热塑性树脂基复合材料, 成型质量与成型过程密切相关。热塑性树脂物理状态及性能对温度变化十分敏感, 在热塑性树脂基复合材料成型过程中会经历熔化、流动、凝固等多个物理过程, 伴随着温度场的剧烈波动和反复变化, 且容易产生缺陷, 进而影响复合材料最终性能<sup>[6]</sup>。连续纤维增强复合材料微观结构复杂, 呈现为多尺度多层次特性, 如图1所示。在微观层面, 树脂基与纤维形成界面, 制造过程中, 层间、丝束间也会形成界面。这些界面作用对复合材料构件的力学性能具有深远影响<sup>[7-8]</sup>。此外, 热塑性复合材料成型过程中涉及的多个物理机制也跨越了多个尺度, 且考虑其物理机制的差别, 通常需要不同的模型进行描述和分析(图1虚线框内列出不同尺度典型模拟方法<sup>[9-16]</sup>)。连续纤维增强

热塑性复合材料微观结构在增材制造的成型过程中形成, 也与工艺参数密切相关<sup>[1]</sup>。因此从不同尺度理解成型工艺机制, 对于理解连续纤维增强热塑性复合材料微观结构形成机制, 构建工艺参数与成型构件力学性能间的关系至关重要。与此同时, 工艺机制的研究需依托成型装备, 不同的成型装备对应的成型原理和工艺机制也截然不同, 同类型的成型装备精度不同、工艺参数变化区间不同, 为工艺机制研究提供的约束条件和控制条件也具有很大差异。而成型装备的研发也需要理解成型工艺机制, 因此工艺机制的研究需要与装备的研发相配合, 基于装备的限制设计工艺参数, 同时基于工艺的需求, 有针对性地进行装备模块优化<sup>[8]</sup>。

本文将围绕连续纤维热塑性树脂基复合材料增材制造方法, 以自动铺放(Automated fiber placement, AFP)和3D打印熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)为代表, 介绍相关工艺力学及工艺机制的研究进展。第一部分主要介绍自动铺放及3D打印的工艺原理及装备发展情况。第二部分主要介绍多尺度工艺力学模拟的研究进展。第三部分对数据驱动工艺机制研究, 以及多尺度模拟与数字孪生技术的结合进行讨论与展望。

## 1 连续纤维热塑性复合材料增材制造典型装备及成型过程

高效率、低成本和卓越力学性能是连续纤维热塑性树脂基复合材料结构件制造的核心需求, 为满足这些需求, 以自动铺放技术和3D打印技术为代表的连续纤维增材制造技术正在迅速发展

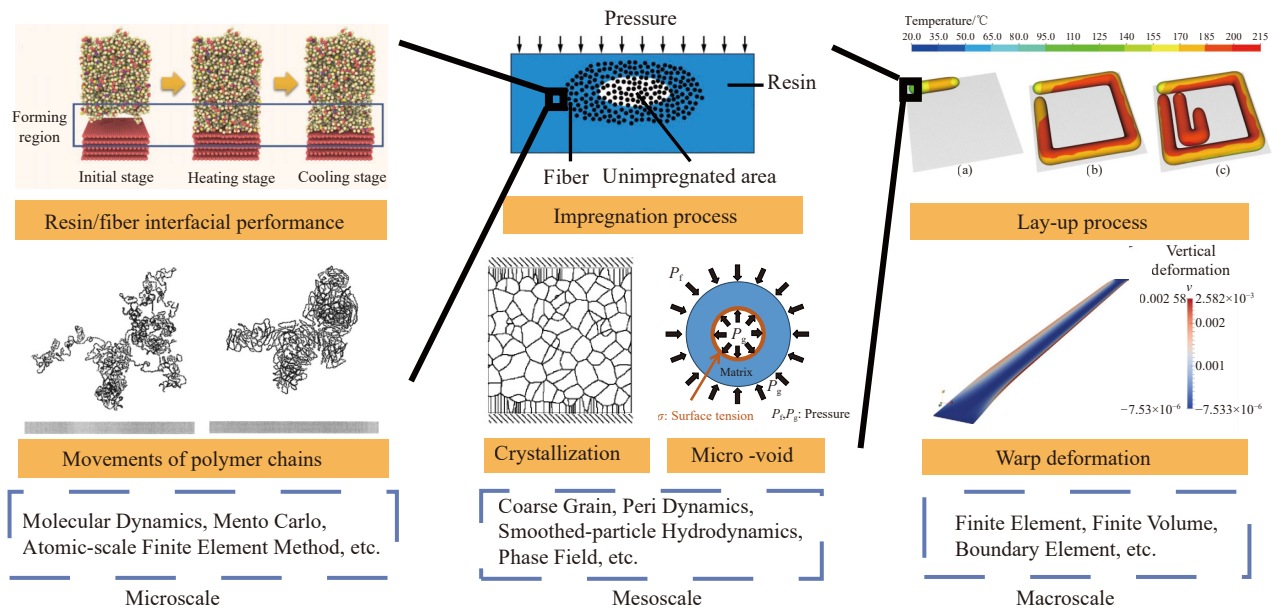


图 1 热塑性复合材料增材制造多尺度物理机制和工艺力学仿真方法<sup>[9-16]</sup>

Fig. 1 Multi-scale physical mechanisms and process mechanics simulation methods for additive manufacturing of thermoplastic composites<sup>[9-16]</sup>

并得到广泛应用。

纤维增强热塑性复合材料自动铺放成型工艺的基本原理是，在铺放过程中以热风枪、远红外光辐射、激光等热源对热塑性预浸带层间加热，同时通过压实辊加压以实现“原位固结”。其中，激光能量密度高、加热效率高、响应快，且可以通过加工参数的自适应技术，实现高性能碳纤维增强热塑性(CFRTP)预浸带的高速铺放和表面温度控制<sup>[6, 17-18]</sup>。自动铺丝技术出现于20世纪70年代末期，兼备了纤维缠绕工艺和铺带工艺制造技术的优点<sup>[18]</sup>，能快速、高效地完成大型复杂曲面复合材料结构件的制造<sup>[19]</sup>，如航空发动机叶片、S型进气道、翼身融合体等。一般来说，自动铺丝系统(图2(a))通常由铺丝头机构、移动平台(龙门式/立式机床<sup>[20]</sup>或个性化定制平台<sup>[21-22]</sup>)以及数控系统组成。自动铺丝设备的核心功能部件是铺丝头机构，集成了纤维束送料、传送、夹紧、重送、剪切、滚压、加热等功能，将多束连续纤维设定恒定的张力，再经过夹紧/剪切/重送功能模块，按照设计要求所确定的铺层方向和厚度铺放在芯模表面，最终完成固化成型(图2(b))。

美国 Electro Impact 公司研制了模块化铺丝机器人，将纱架内置，根据加工成型需求，通过快换接口实现不同功能的末端装置更换，实现复材构件的一体化成型加工<sup>[23]</sup>；法国 Coriolis 公司研制的铺丝机器人设备将纱架外置，纱架外置使得其

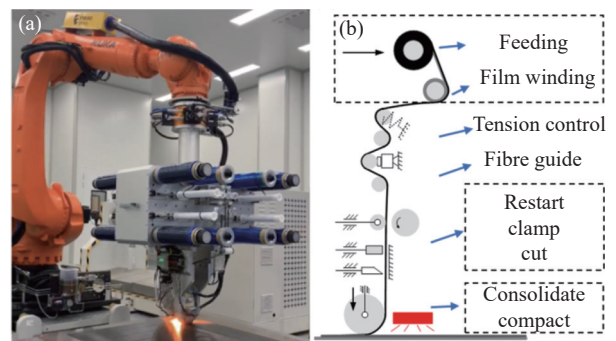


图 2 (a) 模块化铺丝 (AFP) 机器人; (b) 铺丝系统原理

Fig. 2 (a) Modular automated fiber placement (AFP) robot; (b) Principle of AFP system

铺放运动更为灵活，最快铺放速度可达 1.2 m/s，同时也提升了铺放精度，适合于曲率变化较大的复杂型面复合材料构件的制造<sup>[24]</sup>。国内主要有南京航空航天大学、浙江大学、西安交通大学、北京航空航天大学和哈尔滨工业大学等高校的研究团队先后以六自由度工业机械臂和龙门式机床作为平台，完成了针对铺丝成型工艺流程各功能实现的机构设计并进行集成，开发了系列铺丝成型装备<sup>[25-26]</sup>；如北京航空航天大学研究团队采用刚柔耦合变胞机构设计思想对铺丝头机构的各功能机构设计以实现工艺参数的精准调控，并基于模块化可重构设计方法研制了一系列铺丝机器人系统(图2(a))，可根据不同材料、规格、产品成型工艺需求，实现成型装备的柔性配置。可以看出，

针对铺丝成型装备设计的相关研究主要围绕其成型工艺过程中各功能实现机构的设计及系统集成方法<sup>[26-27]</sup>。然而，铺丝机器人系统各功能机构高度集成，其机构设计不仅需要考虑放卷、夹紧、剪切、重送以及固化压实等功能实现，还需考虑机构系统与纤维束之间的耦合作用，因此，当前仍缺乏用于指导铺丝头机构设计的指导原则和设计方法，难以满足自动铺丝系统的高效研制以及成型工艺过程的精准调控要求<sup>[26]</sup>。

另外一种典型的连续纤维增强热塑性复合材料自动化成型方法为3D打印，利用热塑性树脂受热熔化、冷却固结的特性，基于熔融堆积成型(FDM)发展而成<sup>[28]</sup>。图3(a)和3(b)所示为连续纤维热塑性复合材料FDM成型过程示意图，该成型过程是将连续纤维热塑性复合材料在喷嘴中快速加热到其熔融温度以上，随后从喷嘴中挤出，在冷却过程中熔化相邻的材料表面，实现层层堆叠沉积，其中，打印速度、层厚、温度等工艺参数会对打印质量有直接影响<sup>[29-31]</sup>。根据浸渍方式的不同具体又可分为两种，图3(a)所示是共挤出3D打印，通过两个独立的喷嘴分别输送热塑性树脂和纤维材料，在加热腔中完成浸渍过程。图3(b)所示打印方式采用单一喷嘴输入预浸料，通过加热处理后进行挤出。连续纤维3D打印技术提供了一种有效生产具有增强性能的复杂和定制结构的途径，但产品性能对成型工艺参数敏感，尺寸精度较低。美国Markforged公司开发了一种用于连续纤维增强热塑性复合材料的3D打印机，如图3(c)所示，该设备有两个独立的喷嘴和供料进给系统，一个喷嘴用于打印热塑性基体材料，另

一个喷嘴用于沉积连续纤维热塑性复合材料，该设计使得它能够在层层打印过程中精确地将连续纤维嵌入到基体材料中，实现复材结构件性能的定向增强<sup>[32]</sup>。Yang等<sup>[31]</sup>使用碳纤维和热塑性树脂作为原材料，设计了一种连续纤维打印设备，如图3(d)和3(e)所示，发现使用其制造的构件层间粘合性能较弱(层间剪切强度2.81 MPa)，限制了成型结构件的应用范围。为使打印过程中碳纤维可以在喷嘴中实现均匀充分的浸渍效果，Prüß和Vietor<sup>[33]</sup>创新地采用了一种打印方法，即在将干粗纱送入喷嘴时，通过设置左右两个端口完成树脂材料的进给，如图3(f)和3(g)所示。此外，Zhang和Shang等<sup>[34-35]</sup>采用多轴运动方法实现复杂几何结构件的增材制造，并对其结构内部的连续纤维增强体进行重构，改善了连续纤维复合材料层间性能，该技术的原理和装备如图3(h)和3(i)所示。连续纤维3D打印需针对连续纤维的连续性和各向异性的特点，进行满足力学性能要求的3D打印路径规划、工艺参数设置和断点处理，目前连续热塑性复合材料3D打印技术的研究中，多聚焦于新材料及对应工艺方法的装备实现上，而尚缺乏一套范式可高效掌握工艺参数及性能相互作用规律，以实现高性能低成本制造。

综上，这些前沿技术的应用推广和提升不仅要从工艺材料体系、结构设计及装备研发等多方向共同推进，更需要从制造过程多个尺度系统地分析与探究成型机制与工艺流程，以提出可用于指导自动铺放装备或3D打印设备设计的指导方法，从工艺支撑、缺陷检测和智能决策等方面不断完善，有效提高装备精度及智能化控制程度。

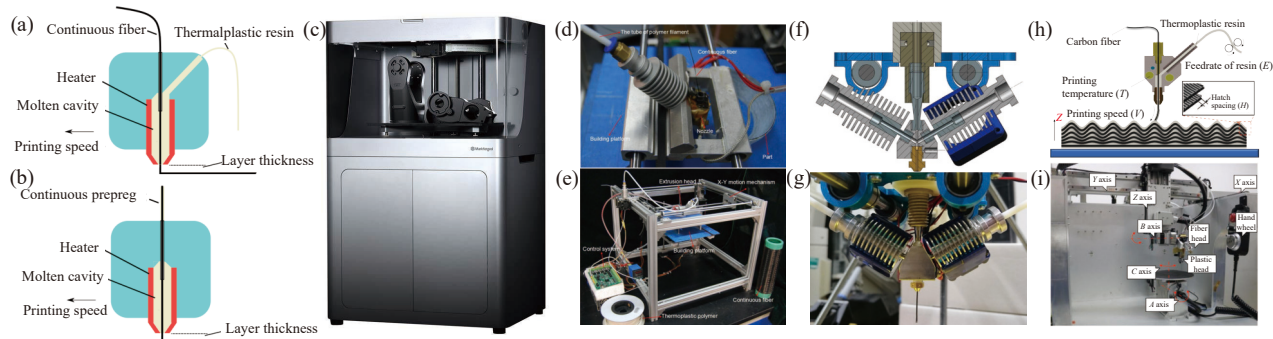


图3 (a) 熔融沉积成型(FDM)共挤出式打印原理；(b) FDM预浸料挤出式打印原理；(c) Markforged X7 3D打印机<sup>[32]</sup>；((d), (e)) 西交研制FDM打印机<sup>[31]</sup>；((f), (g)) 三端进料式FDM打印机<sup>[33]</sup>；(h) 多轴FDM打印机原理；(i) 多轴FDM打印机装置<sup>[34-35]</sup>

Fig. 3 (a) Principle of co-extrusion fused deposition modeling (FDM) printing; (b) Principle of prepreg extrusion FDM printing; (c) Markforged X3 3D printer machine<sup>[32]</sup>; ((d), (e)) XJTU-developed FDM printer machine<sup>[31]</sup>; ((f), (g)) Triple-extruder FDM printer machine<sup>[33]</sup>; (h) Principle of multi-axis FDM printer; (i) Multi-axis FDM printer machine<sup>[34-35]</sup>

## 2 多尺度工艺力学仿真研究进展

热塑性复合材料增材制造成型过程包含加热熔融、树脂流动、分子链缠结、浸渍渗透、界面结合和凝固结晶等多个物理过程<sup>[3, 6, 29, 36-38]</sup>, 这些物理过程受到热力<sup>[36, 38]</sup>耦合作用及流场<sup>[39]</sup>影响。如图 1 所示, 这些物理过程跨越多个尺度, 包括微观、介观和宏观尺度, 其中宏观尺度<sup>[10, 14]</sup>反映了压力、温度等工艺参数对材料送给、熔融沉积及凝固过程中铺层整体结构、性能和变形的影响, 介观尺度<sup>[11-13]</sup>考虑丝束或铺层内部各向异性结构特征, 反映了纤维分布对材料微结构演化等方面的影响, 微观尺度<sup>[15-16]</sup>则重点分析树脂、纤维的界面性能以及加工过程的分子运动机制。成型过程各尺度下的物理现象均受成型工艺条件的影响, 最终共同决定复合材料构件的力学性能。因此, 热塑性复合材料成型过程的工艺力学研究是一个多场多尺度问题, 需要从不同尺度分析材料响应特征、阐明关键工艺机制。本文从三个典型尺度总结了相关研究、方法及最新发现: 即微观尺度( $\sim 10^{-9}\sim 10^{-6}$  m)、介观尺度( $\sim 10^{-6}\sim 10^{-3}$  m)和宏观尺度( $\sim 10^{-3}$  m)。

### 2.1 微观工艺力学模拟方法

复合材料由诸多分子组成, 从本质上讲, 成型过程是通过外部能量迫使分子移动变形, 进而影响到介观以及宏观尺度下复合材料的结构和性能。因此, 从微观尺度分析成型工艺机制, 有助于从物理本质理解复合材料微结构和微缺陷的形成机制, 从而为其他尺度下的工艺分析提供先验知识和理论基础。

对于微观尺度的力学模拟, 已经开发了许多应用广泛的计算方法, 例如蒙特卡洛方法 (Mento Carlo, MC)<sup>[40-41]</sup>、分子动力学方法 (Molecular dynamics, MD)<sup>[40]</sup>以及原子尺度有限元方法 (Atomic-scale finite element method, AFEM)<sup>[42]</sup>等。这些方法可以在原子或分子尺度上研究材料物理行为, 有助于详细了解高温、潮湿等环境因素以及表面改性等材料处理手段对复合材料性能和缺陷的影响。原子尺度蒙特卡洛方法是基于平衡统计力学的模拟方法<sup>[40]</sup>, Lee 等<sup>[41]</sup>使用该方法研究了碳纳米管复合材料的电导率。蒙特卡洛方法简单, 但效率低下, 且只能计算平衡态性质。对于考虑时间演化信息的动力学性质, 就需要使用分子动力学方法。分子动力学方法是通过原子的牛顿运动方程进行数

值求解, 来描述给定原子结构的坐标和动量的时间演化<sup>[40]</sup>, 可用来描述系统在不同条件及载荷下的结构演化过程, 如高温条件下的拉伸变形<sup>[43]</sup>, 湿热等环境下复合材料界面性能变化<sup>[44]</sup>以及官能团对界面性能的影响<sup>[45]</sup>。原子尺度有限元方法是原子模拟和有限元模拟的结合, 它从原子势能出发推导能量表达式, 并使用有限元方法求解控制方程描述力学行为<sup>[9]</sup>。原子尺度有限元提供了一种适用于大规模静态问题的可与宏观模拟无缝衔接的多尺度计算方法<sup>[42]</sup>, 可以用于研究如碳纳米管等微观原子结构对宏观力学行为的影响<sup>[46]</sup>。

然而, 大多数微观尺度的研究重点关注结构与复合材料力学性能之间的关系, 而与成型工艺相关的微观缺陷形成过程的研究较少<sup>[16]</sup>。事实上, 在成型过程中, 成型工艺条件会影响成型结构的微观形态, 其内部存在因工艺导致的各种微观缺陷。这些微观缺陷在载荷作用下会生长延伸到宏观水平。因此, 从微观角度分析成型过程中微缺陷的形成机制, 对理解缺陷形成、生长过程, 构建微观缺陷与材料性能之间的关系, 进一步提出缺陷控制策略至关重要。

对于原子尺度的模型, 通过周期性边界条件的使用, 可以以点代面, 映射宏观体系中局部微观区域特征, 以反映其均匀性质, 并将加工温度、加工压力等工艺参数与原子模型相结合, 以分析工艺条件对微缺陷形成的影响。例如, Jiang 等<sup>[47]</sup>将成型压力和温度作为原子模型输入, 分析了成型时混合聚合物之间的界面结合行为, 结果表明界面处聚合物链的互相渗透缠结有利于界面结合, 且该缠结行为与加工温度和加工压力正相关。Wang 等<sup>[16]</sup>则建立了连续纤维 3D 打印的微观原子尺度界面模型 (图 4), 分析了打印温度对界面形成过程的影响并指出高温会加剧分子热运动, 使聚合物链更易脱离本体与纤维原子形成界面。此外, 模拟结果表明高温对界面性能的积极作用会随温度升高而逐渐减弱, 这是由界面处原子堆积趋于饱和导致的。

然而, 由于微观模拟在计算时间和空间尺度上的局限性, 微观模型无法捕捉完整的加工过程, 从而限制了微观模型对实际生产过程的量化分析<sup>[48]</sup>。因此, 原子尺度模拟多用于从定性的角度揭示成型工艺对黏度、热导率和界面结合等性能的影响机制, 或建立耦合微观分子模拟方法和宏

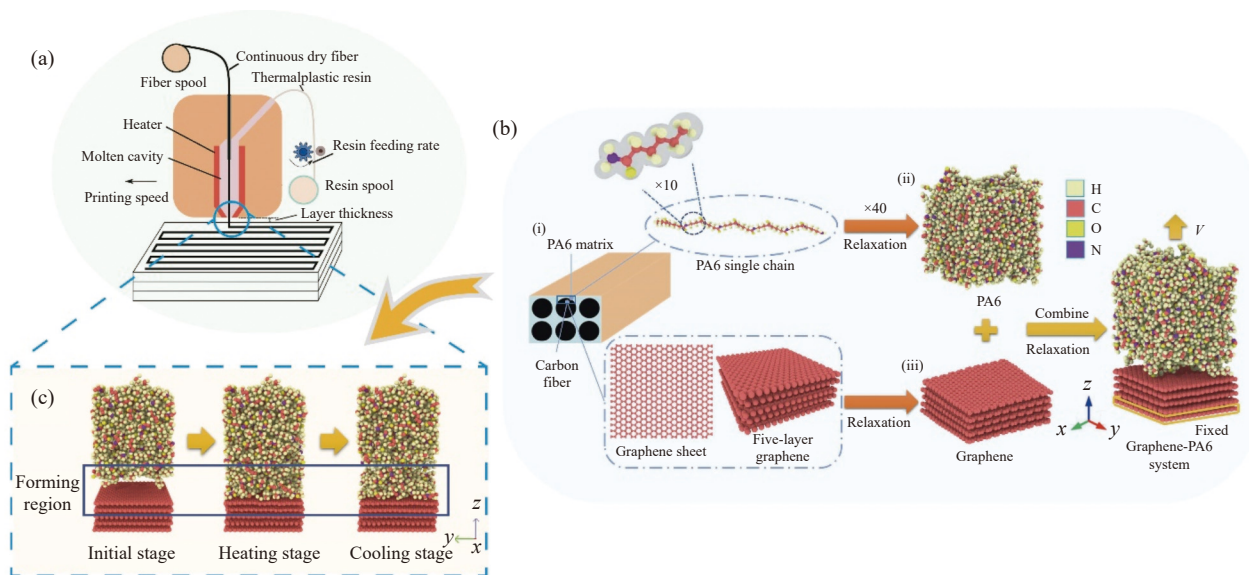


图4 连续纤维3D打印界面原子模型<sup>[16]</sup>: (a)打印原理示意图; (b)原子模型构件思路及流程; (c)界面成型过程

Fig. 4 Microscopic modeling of the interface in continuous fiber 3D printing<sup>[16]</sup>: (a) Schematic diagram of the printing principle; (b) All-atom model of the interface; (c) Snapshots of the interface formation process

介观模拟方法的多尺度计算模型，从而实现跨尺度的工艺缺陷形成机制分析。

## 2.2 介观尺度工艺力学模拟方法

在热塑性复合材料增材制造过程中，涉及到一系列复杂的物理现象，并跨越多个尺度，其中在介观尺度包含浸渍、结晶和缺陷演化等。此类现象大大超越微观模型的空间和时间尺寸，难以采用微观模拟进行捕捉，而在宏观模型中又缺乏足够的细节描述，因此需要在介观尺度开展模型分析。通过介观尺度工艺机制研究，能够实现更为准确的复合材料等效性能预测，同时构建温度、压力等参数与微结构演化及等效性能之间的关联，可以结合宏观模拟为参数调控提供理论参考。

在热塑性复合材料增材制造加工过程中，熔融树脂-纤维浸渍程度与增材制造构件力学性能密切相关。由于热塑性树脂熔点高、黏度大，可能导致纤维浸渍不充分<sup>[3, 49]</sup>。其中纤维干丝的直径在几微米级别，因此浸渍过程是一个典型的介观多孔介质流动问题<sup>[50]</sup>。最常用的建模方法是基于树脂复杂流变特性<sup>[39, 51-52]</sup>和多孔介质流动方程构建相应的树脂浸渍度理论预测模型，再采用有限差分等方法进行数值求解。Wang等<sup>[53]</sup>基于达西定律开发了研究连续纤维3D打印浸渍现象的理论分析模型，将打印工艺参数与浸渍度相关联，获得打印速度、层厚和打印温度3种工艺参数组合作用下的浸渍度预测值<sup>[54]</sup>；在此基础上，Zhang等<sup>[13]</sup>

将连续纤维和聚乳酸 (Polylactic acid, PLA) 打印过程中的热场分布与浸渍模型相结合，给出了考虑变温条件的连续纤维3D打印浸渍模型，如图5所示；Ngo等<sup>[50]</sup>构建了包含纤维的多孔介质浸渍模型，运用有限体积法求解得到不同压力下的浸渍度，并将局部浸渍度与宏观压力分布相结合预测描述热塑预浸料浸渍过程。此外也可以采用光滑粒子动力学<sup>[55]</sup>来描述复合材料浸渍过程中的树脂流动过程。该方法为一种无网格的纯拉格朗日计算方法，采用具有特定性质的粒子集合表示连续流体，可以用来分析不可压缩流动<sup>[56]</sup>和黏性流动<sup>[57-58]</sup>。He等<sup>[59]</sup>即针对短纤维复合材料注塑成型过程，采用光滑粒子动力学方法分析了树脂流体运动规律及树脂与纤维之间的相互作用。

当材料沉积在加工平台后，热塑性复合材料在低温下冷却凝固。对于无定形热塑性基体，凝固成型时间短，且收缩变形小。但对于半结晶热塑性基体，由于结晶相变的发生，其冷却时间更长，且收缩变形大，易导致翘曲变形<sup>[32, 60]</sup>。此外，在复合材料中，纤维的存在会显著影响树脂的结晶形态和结晶度的大小，进一步影响构件的成型性能。一方面，晶体相的存在会影响材料刚度、韧性等材料属性<sup>[60]</sup>；另一方面，晶体与晶体，晶体与无定形体以及晶体与纤维之间的界面都会影响复合材料的断裂性能<sup>[61]</sup>。为了捕捉热塑性树脂基体内部的晶体形态演化，可以采用一系列数值

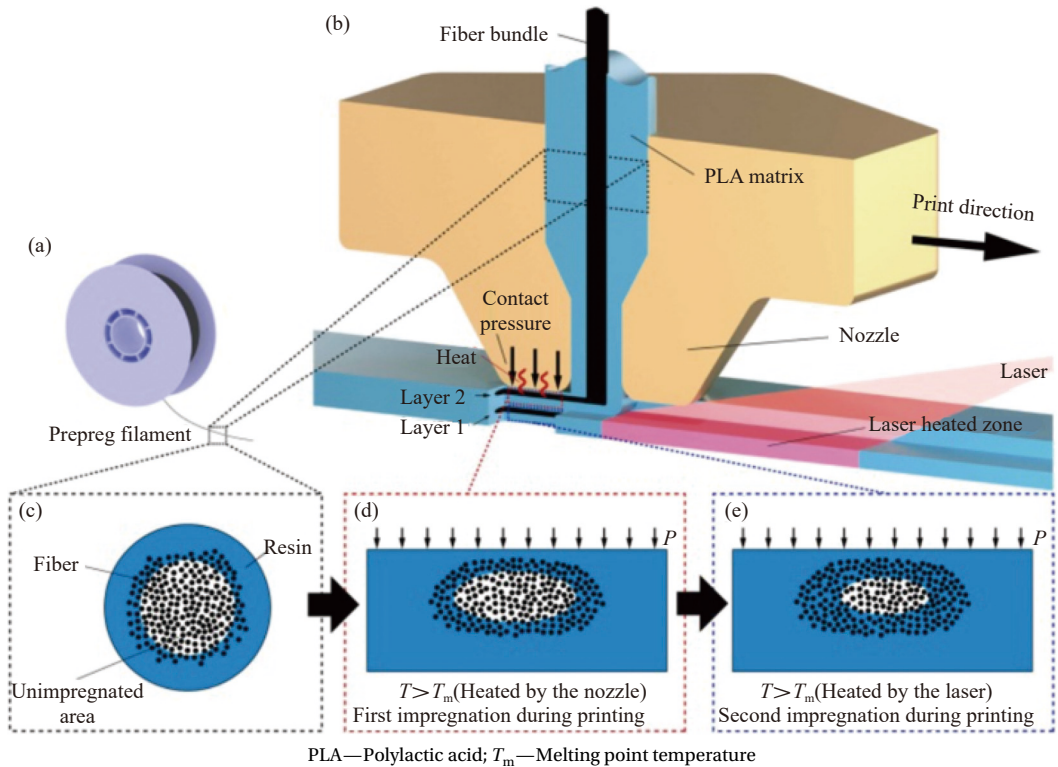


图5 连续纤维3D打印浸渍过程说明：(a) 预浸丝材用于(b) 激光辅助3D打印；(c) 预浸丝材浸渍示意图；(d) 材料受打印过程中喷嘴的压力和加热发生的初次浸渍示意图；(e) 材料受打印过程中喷嘴压力和激光加热的二次浸渍示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Impregnation process illustration of continuous fiber thermoplastic composite material in FDM process: (a) Prepreg filament used in (b) laser-assisted 3D printing; (c) Schematic of impregnation of prepreg filament; (d) Impregnation schematic of materials that are first impregnated during printing under the pressure and heating of nozzle; (e) Impregnation schematic of materials that are second impregnated during printing under the pressure of nozzle and heating of laser<sup>[13]</sup>

计算方法<sup>[62]</sup>，如像素着色法<sup>[63-64]</sup>、相场法<sup>[65-67]</sup>、元胞自动机法<sup>[68-69]</sup>和粗粒化法<sup>[70]</sup>等。其中像素着色法采用尽可能少的像素区分不同晶粒，并基于树脂形核概率密度方程及晶体生长速率方程来捕捉晶粒演化过程<sup>[63-64]</sup>。Ruan等<sup>[64]</sup>即采用像素着色法，针对短纤维增强热塑性复合材料结晶冷却过程，分析了冷却速率、初始温度以及纤维表面形核速率对树脂晶体最终演化形态的影响。相场方法基于扩散界面假设和能量最小化原则捕捉材料内部的相态演变，适用于模拟复合材料成型过程中的包含结晶的复杂相变演化<sup>[65-67]</sup>。Fan等<sup>[67]</sup>运用相场方法研究了聚合物基复合材料在不同过冷度下的结晶形态，并考虑了聚合物材料属性及纤维结构特征的影响。元胞自动机法将聚合物系统视作一系列元胞的组合，将其分为熔融态和晶态两种离散状态，并基于结晶动力学理论控制熔融态单元向晶态的转变过程<sup>[68]</sup>。粗粒化方法在全原子分子动力学模拟的基础上，对系统微观粒子及其相互作用进行抽象和简化，从而减少计算自由度，

能够模拟聚合物链的热力学性质以及结晶相变过程中的结构演化等<sup>[71]</sup>。

此外，在复合材料增材制造过程中，总是难以避免地产生各种各样的微小缺陷，包括微孔洞、微裂纹以及纤维-树脂脱粘等，当这些缺陷的含量、大小等特征到达一定程度时会造成材料性能显著退化<sup>[31, 36, 72]</sup>，因此需要对微小缺陷的形成演化机制有着充分理解。其中孔洞是工艺过程中关键的缺陷之一，针对复合材料制造过程中孔洞缺陷机制和模拟方法可以查阅综述文献<sup>[73]</sup>。微孔洞在加工过程中的行为包括孔洞的形成、在流体中的迁移、在压辊下的压实以及膨胀生长等。对于孔洞在流体中的迁移和压实模型，在树脂液体注塑成型中已经有充分大量的研究，相关方法也可以应用于增材制造过程中，比如在孔洞运动分析中结合树脂在多孔介质中的渗透流动<sup>[73]</sup>。在AFP工艺中，Pitchumani等<sup>[74]</sup>将微孔洞的生长视作在一定压力和温度下聚合物静止熔体中的气体膨胀过程进行分析。Tierney和Gillespie则结合了宏观材

料挤压流动模型和微孔洞生长模型,以模拟孔洞在原位固结时孔洞形态变化的行为,其中生长模型考虑介观孔洞在内压力、表面张力以及孔洞外压力作用下的受力平衡<sup>[12]</sup>。通过介观模型得到孔洞尺寸、占比和分布等特征,引入到复合材料结构模型中,分析材料力学性能,进而得到成型工艺对材料力学性能的影响<sup>[75]</sup>。除了微孔洞,在介观尺度还可能发生树脂和纤维界面脱粘,主要来源于不充分的树脂浸渍,通常采用裂纹演化模型来进行描述,包括采用内聚力模型、虚拟裂纹闭合模型和扩展有限元模型等,具体可以参考综述文献<sup>[76]</sup>。此外也可以采用近场动力学进行研究,该方法基于非局部理论构建数学模型,以统一框架描述空间的连续域和非连续域,适用于模拟复合材料内部的复杂断裂损伤行为<sup>[77-78]</sup>。然而目前的微裂纹生长模型大多从结构力学出发,针对复合材料增材制造工艺,还缺乏与热场、流场等多物理场的耦合分析。

### 2.3 宏观工艺力学方法

热塑性复合材料成型工艺宏观模拟的目的是实现对成型过程的再现和成型构件性能的预测,并结合成型装备的结构及特点,对成型工艺参数匹配进行优化设计。在宏观模型构建的过程中,可采用基于连续介质理论的模拟方法,如有限元(Finite element)、有限体积(Finite volume)等,此外,以光滑粒子动力学(Smoothed particle hydrodynamics)、离散元(Discrete element)为代表的基于离散体系的模拟方法也逐渐被运用到复合材料成型过程的分析当中<sup>[79]</sup>。这些离散方法采用离散粒子表征模拟对象,具有极高的仿真自由度,在模拟复杂流动问题比如连续纤维复合材料成型过程中所涉及的流固耦合行为时具有很大的优势。

针对传统 FDM 工艺,学者们提出了考虑热塑性聚合物在材料挤出、沉积及冷却等不同阶段的工艺模拟方法<sup>[39, 10, 80]</sup>;针对热塑性复合材料 AFP 工艺,Donough 等<sup>[6]</sup>提出了基于传热模型的工艺过程分析框架,并对界面接触、界面熔合以及残余应力等相关模型进行了全面综述。这些都为热塑性复合材料宏观工艺力学的进一步研究奠定了基础<sup>[36]</sup>。

温度场演化分析是复合材料成型过程再现的第一步,且与成型装备和成型工艺密切相关。在沉积过程中,被加热到熔点以上且呈现出粘流态

特征的复合材料熔体被沉积在已沉积材料表面,随后材料快速冷却凝固从而形成构件。同时,纤维的存在会影响材料在沿着纤维方向及垂直纤维方向的黏性、传热和力学性能,导致材料呈现出很强的各向异性<sup>[3, 36, 49]</sup>。由于热塑性复合材料的物理性能和行为直接依赖于温度<sup>[3]</sup>,进一步影响加工参数的选择,因此构建准确的传热模型成为关键。由于 FDM<sup>[36, 39]</sup>和 AFP<sup>[38, 81-82]</sup>加热方式以及成型方式差异,其传热模型有所不同,但都需要考虑热源、材料沉积以及环境温度等因素来构建模型并确定初始及边界条件,如图 6 所示,并采用数值模拟方法进行求解<sup>[36, 83]</sup>。

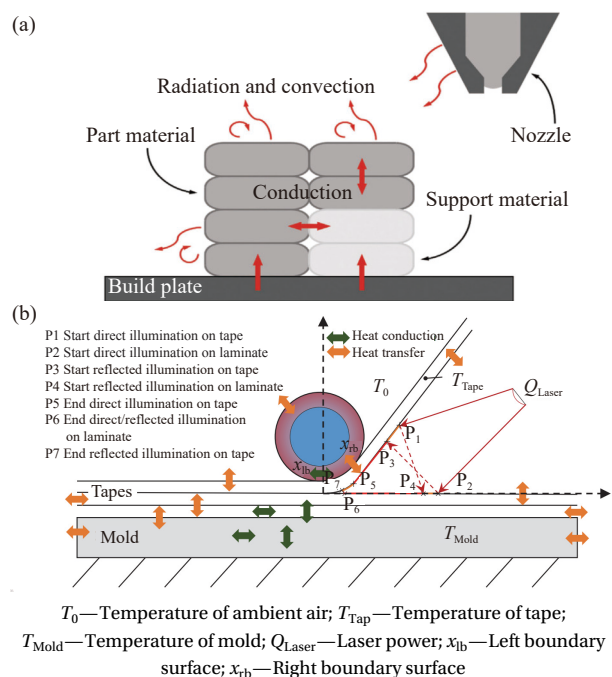


图 6 (a) FDM 传热边界条件示意图<sup>[36]</sup>; (b) AFP 传热边界条件示意图<sup>[83]</sup>

Fig. 6 (a) Schematic diagram of thermal boundary conditions in the FDM model<sup>[36]</sup>; (b) Schematic diagram of thermal boundary conditions in the AFP model<sup>[83]</sup>

在沉积过程中材料内部温度演化结果的基础上,通常将理论模型与计算模型结合,用以分析沉积过程中发生的层间和丝间的界面结合现象。当材料沉积到打印表面后,丝束间和铺层间由于聚合物链扩散而发生界面结合,界面结合质量对成型构件的力学性能和断裂特性有着至关重要的影响<sup>[82]</sup>。针对 AFP 过程,通常基于有限元热分析结果,结合界面紧密接触、界面熔合等等理论计算分析铺层界面结合强度<sup>[6, 82]</sup>。在 FDM 过程中,如图 7 所示,丝束或铺层的界面结合过程包含四个阶段,即丝束表面接触、烧结颈形成、聚合物

链扩散和聚合物链的随机分布<sup>[39]</sup>。通常采用聚合物烧结模型,如 Frenkel 及相关修正模型<sup>[84-85]</sup>,通过考虑加工过程中树脂黏性耗散以及表面张力做功的相互平衡,进一步分析界面结合质量与加工参数之间的关联。然而对于纤维在界面结合中的作用目前仍缺乏充分研究,一方面纤维会影响材料的物理性能,另一方面纤维还会阻碍聚合物链的自由扩散<sup>[37, 49]</sup>。Fan 等<sup>[86]</sup>基于 Frenkel-Eshelby 模型预测连续纤维热塑性复合材料的界面结合质量,并将模拟结果与实验值相比较,认为影响实验值与理论值差异的其中一个原因可能是忽略了纤维对材料内部热力场的影响。

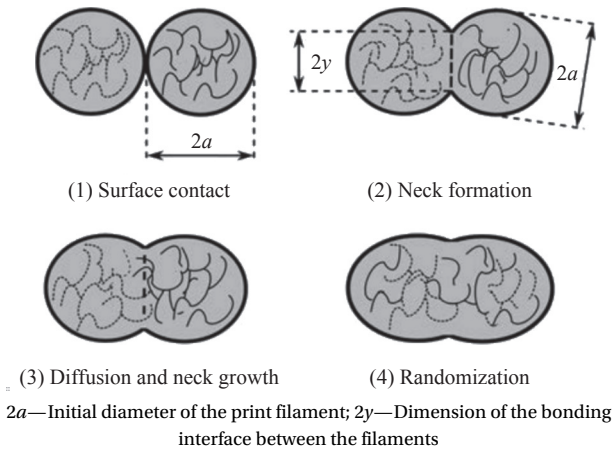


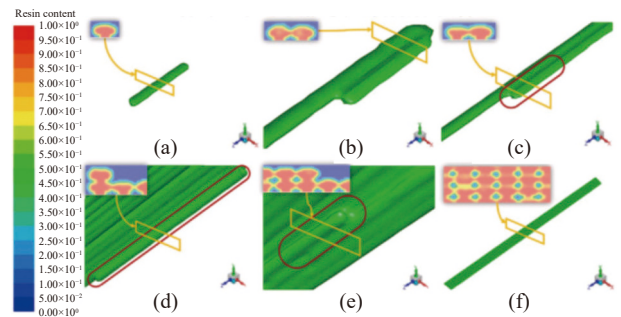
图7 复合材料增材制造的界面结合过程<sup>[39]</sup>

Fig. 7 Interfacial bonding process in additive manufacturing of composite materials<sup>[39]</sup>

材料在沉积后随即进入快速冷却过程,这使得复合材料构件内部大量产生因热胀冷缩产生的残余应力,在完成制备后极易因此而发生翘曲变形现象,严重影响构件几何精度。面对这种工艺问题,研究人员通常采取添加热床以及调整工艺参数等降低温度梯度的方式,来抑制复合材料构件的翘曲变形。为快速确定合适的工艺参数,考虑成型工艺的宏观有限元仿真是一种有效的方法。对于 FDM 工艺,通常基于生死单元技术<sup>[36, 38, 87]</sup>模拟考虑打印速度、打印温度和热床温度等工艺参数影响下的温度场演化情况,并在此温度场演化的基础上,通过热力耦合计算分析打印工艺与翘曲变形的关系,进而提出实现抑制翘曲变形的工艺优化方案。与之类似,针对 AFP 工艺也可采用相同的方式来优化成型工艺。不同的是,相较于 FDM 工艺,AFP 工艺采用激光热源和热压辊耦合的加热方式,在进行温度场模拟时需要将激光加

热和多热源形式考虑其中,因此更具复杂性。

在成型过程的温度场演化信息的基础上,复合材料熔体流动分析也是预测成型质量的关键环节。在连续纤维增强热塑性复合材料成型过程中,可能产生孔洞、褶皱、错位、翘曲变形等宏观缺陷<sup>[17, 31, 36, 88-89]</sup>,并最终影响构件力学性能。其中,孔洞是工艺过程中最常见的缺陷。在成型过程中,宏观孔洞缺陷通常源自于树脂基体内滞留的空气或者铺层之间的间隙(图 8)<sup>[31, 73]</sup>,与工艺参数密切相关。在 FDM 工艺中,树脂在打印头内部熔化为液体,从喷嘴挤出并铺展在打印表面,在这一系列过程中材料的流变特性,包括在打印头中的剪切黏性流动、粘弹性变形和从喷嘴挤出时的拉伸流变行为等<sup>[51]</sup>,共同影响送料速率、加热温度、打印速度等工艺参数的选择,以及打印头及喷嘴几何结构的设计<sup>[39]</sup>。在 AFP 工艺中,流体运动主要表现为材料在压辊作用下的横向挤压流动,可以基于材料的流变特性,分析铺层形貌变化与压辊压力及铺放速率等工艺参数之间的关联<sup>[52, 90-91]</sup>。因此,在成型过程的流动数值模拟中,通常将这些材料特性作为模型的输入。考虑到热塑性树脂的剪切流变行为,通常采用考虑剪切速率影响的幂律模型和 Carreau 模型等<sup>[39, 51-52]</sup>和考虑温度影响的 WLF 模型<sup>[92]</sup>来描述其黏度。此外,材料的粘弹性效应同样是流动分析时需要考虑的重要因素,对此常采用 Phan-Thien-Tanner 模型<sup>[93-94]</sup>来描述该效应。



Resin content represents the proportion of resin at the current location. When the value is 1, it means that the location is entirely composed of resin, and when the value is 0, it means that the location is entirely composed of air

图8 FDM 中界面结合过程中的孔洞缺陷示意图<sup>[95]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of void defects in the interfacial bonding process in FDM<sup>[95]</sup>

在结合温度场演化结果和流动模拟的基础上,复合材料流动耦合分析已经被用于分析工艺对构件孔隙率大小或宏观孔洞演化的影响,从而优化

工艺参数。对于 FDM 工艺，宏观孔洞通常来源于丝束及丝束在界面结合过程中产生的间隙，如图 8 所示，Fu 和 Yao<sup>[95]</sup> 将连续纤维复合材料的特征引入多相流动模型当中，考虑了温度变化和树脂凝固等现象，并分析了堆叠方法、丝间距和层厚对孔隙率的影响。对于 AFP 工艺，通常结合介观孔洞生长模型和宏观孔洞压实模型进行描述，以获取铺层内部的孔隙率分布情况，其中对于宏观孔洞压实现象，常通过模拟可压缩的纤维-树脂-孔洞混合物在压实辊下的挤压流动行为来进行分析<sup>[74]</sup>。此外，在铺带内部还可能存在尺度与铺带相当的大尺寸孔洞，针对这类宏观孔洞，Simacek 等<sup>[96]</sup> 开发了一种动态演化模型，提出工艺参数调整策略使树脂从富树脂区域填充宏观孔洞区域。

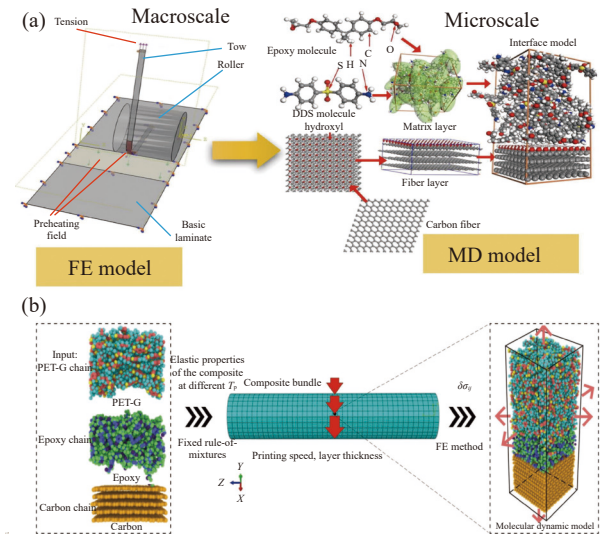
总体而言，宏观工艺模拟方法能够较为准确地再现复合材料成型过程，相对全面反映成型工艺。但是，宏观模拟也有其局限性，比如难以在宏观尺度下考虑微介观物理现象的影响。多尺度模拟方法是实现微-介-宏观统一的解决办法，能够再现成型过程的同时考虑不同尺度下的物理现象和工艺机制。

## 2.4 多尺度模拟

各尺度模型均有自己的适用范围和特定的研究对象，相互之间由于尺度的差异难以直接互用。多尺度模拟策略能够作为沟通各个尺度模型的桥梁，更好地实现各尺度物理机制的协同考虑。目前，解决多尺度模拟问题主要有两种思路：顺序多尺度和并发多尺度<sup>[97]</sup>。

顺序多尺度方法分别在不同尺度下分析相关工艺机制，然后通过在不同尺度间传递特定物理量的方式实现多尺度数据传递<sup>[97]</sup>。譬如，从自上而下的角度，使用宏观模型确定在工艺参数作用下的某些特定物理量(如应变能)<sup>[98]</sup>。随后，这些与工艺相关的物理量被用作微观和介观模型的输入，从而探索工艺参数与微介观物理现象之间的联系。如图 9(a) 所示，Sun 等<sup>[98]</sup> 提出了一种针对 AFP 工艺的多尺度协同优化方法，即在宏观尺度下考虑铺放速度、铺放压力和铺放温度的耦合作用进行有限元模拟获取材料应变能信息，并将其引入到原子尺度模型中分析 AFP 工艺参数对复合材料微观性能和界面性能的影响。Guan 和 Pitchumani<sup>[11]</sup> 针对自动铺放工艺构建了宏观铺层传热模型，同时选取代表性单元进行介观结晶演

化模拟，考虑热场演变与结晶过程的相互影响，实现多尺度多物理场耦合。反过来，从自下而上的角度，这些微介观模型的分析结果也可以为理解工艺对微观缺陷形成的影响和微观缺陷对最终复合材料构件性能的影响提供更多见解，并且由此得到的等效结构或性能参数也可以通过均质化思想应用在宏观尺度模型中，以实现更为准确的宏观性能预测。如为了进一步分析纤维表面树脂结晶形态对复合材料性能的影响，Tohidi<sup>[99]</sup> 将纤维表面横晶结构特征引入到复合材料代表体积单元中进行有限元计算，并分析横晶对材料应力场分布和拉伸性能的影响。Liu 等<sup>[100]</sup> 通过 MD 方法预测双树脂基复合材料参数，用于打印压力的有限元计算当中，实现了自下而上的参数传递，并将考虑了工艺参数的打印压力作为 MD 模型的边界条件(自上而下)，分析了工艺参数与微观界面性能之间的映射关系(图 9(b))。



$T_p$ —Print temperature;  $\delta\sigma_{ij}$ —Forming stress under nozzle squeezing; FE—Finite element; MD—Molecular dynamics; DDS—Diamino diphenyl sulfone; PET-G—Polyethylene terephthalate glycol  
图 9 (a) 自动铺放工艺的多尺度协同模拟<sup>[98]</sup>; (b) 连续纤维 3D 打印的多尺度优化模型<sup>[100]</sup>

Fig. 9 (a) Multi-scale modeling of the automated fiber placement process<sup>[98]</sup>; (b) Multi-scale modeling of the 3D printing process<sup>[100]</sup>

顺序多尺度方法能够高效便捷的实现不同尺度间的信息交流，将工艺对不同尺度物理机制的影响合并分析。但是，这种通过特定物理量沟通不同尺度的做法会导致某些信息的丢失<sup>[97, 101]</sup>。因此，为提高计算精度和研究不同尺度间的复杂动态问题，并发多尺度方法应运而生。该方法将不同尺度模型耦合起来，可以实现尺度之间的同时

双向信息传递。但是，由于计算成本过高，该方法目前仍未得到广泛应用<sup>[97]</sup>。并发多尺度模拟需要解决的关键问题是实现不同尺度模型的有效耦合，常用的耦合方法有 Edge-to-Edge 和 Bridging Domain (BD)，详细内容可以参考综述文献<sup>[101]</sup>。并发多尺度模拟多用来分析复合材料在载荷作用下变形及失效分析。例如，Niknafs 等<sup>[102]</sup>使用 BD 方法耦合了有限元模型和 MD 模型，研究了脆性固体中的裂纹扩展行为。这种做法可以应用于复合材料增材制造过程中的纤维-树脂微界面形成分析中，通过有限元模型将成型工艺中产生的温度、应力参数传递到微观界面处的分子模型中，从而准确建立成型工艺与微界面的联系。此外，Markesteyn 等<sup>[103]</sup>提出了一种耦合 MD 和计算流体力学的并发多尺度流动模拟策略。该方法亦可以在模拟成型过程中宏观树脂流动的同时考虑其微观聚合物链的流动细节，这有助于我们更深刻地理解复合材料增材制造过程中的树脂流动行为。

### 3 讨论与展望

热塑性连续纤维增材制造技术、设备及工业应用的发展，对工艺过程建模的准确性和效率提出了越来越高的要求。同时，自动化、数字化和智能技术的进步给工艺建模带来了机遇和挑战。

#### 3.1 数据驱动算法辅助多尺度模拟工艺机制研究

借助先进的数据驱动算法，可以进一步加速工艺机制分析以及针对特定装备的工艺参数优化及装备的模块化优化<sup>[104]</sup>。在复合材料工艺机制研究的过程中，主要有以下 3 种途径借助数据驱动算法。一是基于大量的实验数据，借助数据驱动算法，快速构建工艺参数与成型结构宏观力学性能间的联系<sup>[104]</sup>，该方法的缺点是所需的数据量非常大，更换材料及调整装备之后都需要重新收集数据构建模型。Wanigasekara 等<sup>[105]</sup>开发了一种结合数据驱动和虚拟样品技术的预测模型，以根据自动铺丝工艺参数(如温度、压实力、沉积速率等)预测材料的宏观力学性能。第二种方法是数据驱动算法结合各个尺度的数值模拟方法，通过调整时间步长、优化模型参数和提高采样效率等手段，以加速模拟同时提高模型准确度<sup>[106]</sup>。三是结合多尺度模拟和数据驱动算法，构建基于物理模型的数据模型<sup>[88]</sup>，能够有效优化不同尺度间的信息传递。针对多层次分析方法，Xiao 等<sup>[107]</sup>提出运用数据驱动算法来桥接微纳米尺度与宏观尺

度模型之间的联系，其主要思路是，首先利用分子动力学方法探究材料在纳米尺度的物理机制，生成相应的数据集，接着应用数据驱动算法对收集的数据集进行训练，得到材料失效/缺陷分类模型以及应力回归模型，最后将这些训练后的模型应用于连续介质模型中，以分析和预测材料在宏观尺度的力学行为。Ingólfsson 等<sup>[108]</sup>则提出将数据驱动与并行多尺度模拟结合，从相邻的粗尺度更好地对细化尺度进行采样，并从相邻的细化尺度实时反馈以提高粗尺度的保真度。考虑不同的物理机制，相似的思路同样可以应用于复合材料成型工艺机制分析中。

总而言之，数据驱动技术能够加快计算速度和提高计算精度，同时促进不同尺度间信息的有效传递，有助于实时预测打印构件的力学性能和失效行为<sup>[109-110]</sup>，实现工艺参数的调控和优化<sup>[111]</sup>。尽管如此，这类研究目前还处于初期阶段，且主要集中于复合材料的结构力学特性分析<sup>[97]</sup>，对于工艺机制的深入理解仍需开展更广泛的研究工作。

#### 3.2 基于数字孪生的复合材料增材制造

基于数字孪生的复合材料智能制造融合了多物理场制造仿真、人工智能、大数据分析等技术，通过建立虚拟模型与装备物理模型之间的多维度信息交互关系，能够实时监控、分析和优化实际装备的运行状态，预测和预防装备故障，提高复合材料构件的生产效率和质量<sup>[112-115]</sup>。如图 10 所示，Shen 和 Li<sup>[112]</sup>提出了数字孪生在增材制造技术中的应用框架，包括结合物理模型、数据融合驱动模型以及控制模型三者的融合，其中多尺度多物理场模型起着关键作用，能够反映真实的制

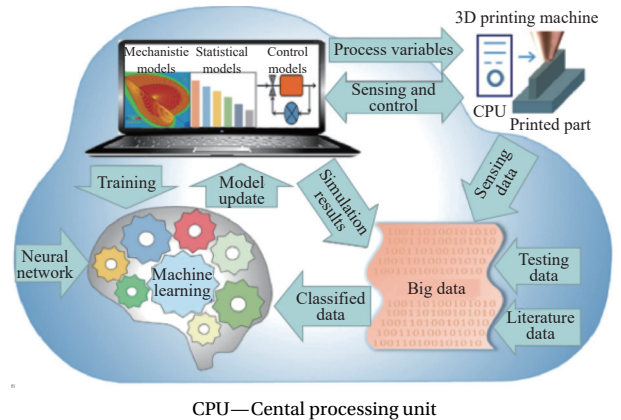


图 10 基于 3D 打印制造技术的数字孪生应用框架<sup>[112]</sup>

Fig. 10 Digital twin framework based on 3D printing manufacturing technology<sup>[112]</sup>

造过程, 并准确地对整个过程动力学进行封装。Brasington 等<sup>[88]</sup>也指出多尺度物理模型和数字驱动模型的混合建模能促进数字孪生在自动铺放工艺的应用。由此可见, 数字孪生在未来复合材料增材制造中有着巨大的发展前景, 并且离不开多尺度多物理场模型的支撑, 需要进一步优化物理模型, 实现效率和精度的全面提升<sup>[112]</sup>。

#### 4 结论

热塑性复合材料在增材制造过程中经历了从固态至粘流态再至固态的转变, 其力学行为和性能与制造过程中的热场、流场以及相变场息息相关, 需要从多物理场耦合的角度进行分析。虽然宏观工艺力学方法多基于现象学模型, 但因其与最终复合材料构件处于同一时空尺度, 故其优势在于能够较方便地考虑真实加工工艺对缺陷形成的影响, 并且模拟结果能够很方便地同宏观实验结果进行对比修正。相较而言, 微介观模型虽然从基础物理理论发展而来, 能够准确真实地描述物理现象, 但由于尺度限制且无法考虑宏观尺度下的诸多干扰因素, 其模拟结果通常难以直接用于指导发生在宏观条件下的加工工艺。多尺度工艺力学方法旨在将各个时空尺度方法的优势集合起来, 从而形成既具有真实物理意义又具有实际工艺指导意义的工艺分析方案。因此, 多尺度工艺力学方法对加工工艺的发展有着重要的促进作用, 尤其是对涉及多尺度、多物理场、多材料、多界面特征的复合材料加工工艺。随着技术的发展, 多尺度工艺模拟与数据驱动算法和数字孪生的结合将会为连续纤维增强热塑性复合材料构件结构快速定制、工艺设计及高效制备带来更大的发展空间。

#### 参考文献:

- [ 1 ] RAJAK D K, PAGAR D D, MENEZES P L, et al. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications[J]. *Polymers*, 2019, 11(10): 1667.
- [ 2 ] PRASHANTH S, SUBBAYA K, NITHIN K, et al. Fiber reinforced composites-A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 6(3): 2-6.
- [ 3 ] BARILE M, LECCE L, IANNONE M, et al. Thermoplastic composites for aerospace applications[M]. *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. Cham: Springer, 2020: 87-114.
- [ 4 ] VALINO A D, DIZON J R C, ESPERA JR A H, et al. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites[J]. *Progress in Polymer Science*, 2019, 98: 101162.
- [ 5 ] 胡记强, 王兵, 张涵其, 等. 热塑性复合材料构件的制备及其在航空航天领域的应用 [J]. *宇航总体技术*, 2020, 4(4): 61-70. HU Jiqiang, WANG Bing, ZHANG Hanqi, et al. Fabrication of thermoplastic composite components and their application in aerospace[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2020, 4(4): 61-70(in Chinese).
- [ 6 ] DONOUGH M J, ST JOHN N A, PHILIPS A W, et al. Process modelling of in-situ consolidated thermoplastic composite by automated fibre placement—A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107179.
- [ 7 ] CAI R, JIN T. The effect of microstructure of unidirectional fibre-reinforced composites on mechanical properties under transverse loading: A review[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(22): 1360-1377.
- [ 8 ] TIAN X, TODOROKI A, LIU T, et al. 3D printing of continuous fiber reinforced polymer composites: Development, application, and prospective[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(1): 100016.
- [ 9 ] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展 [J]. *固体力学学报*, 2018, 39(1): 1-68. CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2018, 39(1): 1-68(in Chinese).
- [ 10 ] XIA H, LU J, DABIRI S, et al. Fully resolved numerical simulations of fused deposition modeling. Part I: Fluid flow[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(2): 463-476.
- [ 11 ] GUAN X, PITCHUMANI R. Modeling of spherulitic crystallization in thermoplastic tow-placement process: Spherulitic microstructure evolution[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(9): 1363-1374.
- [ 12 ] TIERNEY J, GILLESPIE JR J W. Modeling of heat transfer and void dynamics for the thermoplastic composite tow-placement process[J]. *Journal of Composite Materials*, 2003, 37(19): 1745-1768.
- [ 13 ] ZHANG J, YANG W, LI Y. Process-dependent multiscale modeling for 3D printing of continuous fiber-reinforced composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 73: 103680.
- [ 14 ] GHNATIOS C, FAYAZBAKHS K. Warping estimation of continuous fiber-reinforced composites made by robotic 3D printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102796.
- [ 15 ] GUO H, YANG X, LI T. Molecular dynamics study of the behavior of a single long chain polyethylene on a solid surface[J]. *Physical Review E*, 2000, 61(4): 4185.
- [ 16 ] WANG S, YAN X, CHANG B, et al. Atomistic modeling of the effect of temperature on interfacial properties of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced polyamide 6

- composite: From processing to loading[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(48): 56454-56463.
- [ 17 ] OROMIEHIE E, PRUSTY B G, COMPSTON P, et al. Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques[J]. *Composite Structures*, 2019, 224: 110987.
- [ 18 ] GRANT C. Automated processes for composite aircraft structure[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2006, 33(2): 117-121.
- [ 19 ] JAYASEKARA D, LAI N Y G, WONG K H, et al. Level of automation (LOA) in aerospace composite manufacturing: Present status and future directions towards industry 4.0[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 44-61.
- [ 20 ] MARSH G. Automating aerospace composites production with fibre placement[J]. *Reinforced Plastics*, 2011, 55(3): 32-37.
- [ 21 ] GAN D, DAI J S, DIAS J, et al. Singularity-free workspace aimed optimal design of a 2T2R parallel mechanism for automated fiber placement[J]. *Journal of Mechanisms*, 2015, 7(4): 041022.
- [ 22 ] ZHANG X, XIE W, HOA S V, et al. Design and analysis of collaborative automated fiber placement machine[J]. *International Journal of Advanced Robotics*, 2016, 1(1): 1-14.
- [ 23 ] ASSADI M, FIELD T. AFP processing of dry fiber carbon materials (DFP) for improved rates and reliability[J]. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2020, 2(3): 1196-1201.
- [ 24 ] Coriolis. Coriolis C5 compact-fiber placement machine for 2D net shape blanks[EB/OL]. [2024-03-15]. <https://www.coriolis-composites.com/fiber-placement-machines/coriolis-c5-compact/>.
- [ 25 ] 邵忠喜. 纤维铺放装置及其铺放关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
SHAO Zhongxi. Research on key technology of fiber placement machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010(in Chinese).
- [ 26 ] 张小辉, 朱玉祥, 张少秋, 等. 先进复合材料自动铺丝技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(7): 54-61.  
ZHANG Xiaohui, ZHU Yuxiang, ZHANG Shaoqiu, et al. Research progress on automated fiber placement technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(7): 54-61(in Chinese).
- [ 27 ] ZHANG W, LIU F, TAO J, et al. Overview of current design and analysis of potential theories for automated fibre placement mechanisms[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(4): 1-13.
- [ 28 ] AZAROV A, ANTONOV F, VASIL'EV V, et al. Development of a two-matrix composite material fabricated by 3D printing[J]. *Polymer Science Series*, 2017, 10: 87-90.
- [ 29 ] PERVAIZ S, QURESHI T A, KASHWANI G, et al. 3D printing of fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: A status review[J]. *Materials*, 2021, 14(16): 4520.
- [ 30 ] WICKRAMASINGHE S, DO T, TRAN P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments[J]. *Polymers*, 2020, 12(7): 1529.
- [ 31 ] YANG C, TIAN X, LIU T, et al. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(1): 209-215.
- [ 32 ] NIKIEMA D, SERGENT A, BALLAND P. Study of the industrial potential of Markforged X7 3D printer [J]. *Mechanics and Industry*, 2024, 25(4): 1-10.
- [ 33 ] PRÜSS H, VIETOR T. Design for fiber-reinforced additive manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137(11): 111409.
- [ 34 ] SHANG J, ZHANG W, LIU F, et al. Z-direction performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composites with sinusoidal structure[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 239: 110069.
- [ 35 ] ZHANG K, ZHANG W, DING X. Multi-axis additive manufacturing process for continuous fibre reinforced composite parts [J]. *Procedia CIRP*, 2019, 85: 114-120.
- [ 36 ] ADAM L, LIETAER O, MATHIEU S, et al. Numerical simulation of additive manufacturing of polymers and polymer-based composites[M]. *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 115-146.
- [ 37 ] PENUMAKALA P K, SANTO J, THOMAS A. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108336.
- [ 38 ] 陈吉平, 李岩, 刘卫平, 等. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放原位成型技术的航空发展现状 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(4): 784-794.  
CHEN Jiping, LI Yan, LIU Weiping, et al. Development of AFP in-situ consolidation technology on continuous fiber reinforced thermoplastic matrix composites in aviation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 784-794(in Chinese).
- [ 39 ] TURNER B N, STRONG R, GOLD S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20(3): 192-204.
- [ 40 ] PAQUET E, VIKTOR H L. Molecular dynamics, monte carlo simulations, and langevin dynamics: A computational review[J]. *BioMed Research International*, 2015, 2015(1): 183918.
- [ 41 ] LEE D C, KWON G, KIM H, et al. Three-dimensional Monte Carlo simulation of the electrical conductivity of

- carbon nanotube/polymer composites[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(4): 045101.
- [42] LIU B, HUANG Y, JIANG H, et al. The atomic-scale finite element method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(17-20): 1849-1864.
- [43] ZHANG M, JIANG B, CHEN C, et al. The effect of temperature and strain rate on the interfacial behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites: A molecular dynamics study[J]. *Polymers (Basel)*, 2019, 11(11): 1766.
- [44] WANG X Q, JIAN W, BUYUKOZTURK O, et al. Degradation of epoxy/glass interface in hygrothermal environment: An atomistic investigation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 206: 108534.
- [45] YAN Y, XU J, ZHU H, et al. Molecular dynamics simulation of the interface properties of continuous carbon fiber/polyimide composites[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 563: 150370.
- [46] DRISSI-HABTI M, EL ASSAMI Y, RAMAN V. Multiscale toughening of composites with carbon nanotubes—Continuous multiscale reinforcement new concept[J]. *Journal of Composites Science*, 2021, 5(5): 135.
- [47] JIANG B, ZHANG M, FU L, et al. Molecular dynamics simulation on the interfacial behavior of over-molded hybrid fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Polymers (Basel)*, 2020, 12(6): 1270.
- [48] YAN X, CAO P, TAO W, et al. Atomistic modeling at experimental strain rates and timescales[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(49): 493002.
- [49] BRENKEN B, BAROCIO E, FAVALORO A, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 1-16.
- [50] NGO S I, LIM Y I, HAHN M H, et al. Prediction of degree of impregnation in thermoplastic unidirectional carbon fiber prepreg by multi-scale computational fluid dynamics[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 185: 64-75.
- [51] BANERJEE R, RAY S S. Role of rheology in morphology development and advanced processing of thermoplastic polymer materials: A review[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(31): 27969-28001.
- [52] AUSIAS G, DOLO G, CARTIÉ D, et al. Modeling and numerical simulation of laminated thermoplastic composites manufactured by laser-assisted automatic tape placement[J]. *International Polymer Processing*, 2020, 35(5): 471-480.
- [53] GAROFALO J, WALCZYK D. In situ impregnation of continuous thermoplastic composite prepreg for additive manufacturing and automated fiber placement[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 147: 106446.
- [54] WANG F, WANG G, NING F, et al. Fiber-matrix impregnation behavior during additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced poly(lactic acid) composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101661.
- [55] YASHIRO S. Application of particle simulation methods to composite materials: A review[J]. *Advanced Composite Materials*, 2017, 26(1): 1-22.
- [56] MORIKAWA D, SENADHEERA H, ASAI M. Explicit incompressible smoothed particle hydrodynamics in a multi-GPU environment for large-scale simulations[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2021, 8: 493-510.
- [57] LIU M, LI S. On the modeling of viscous incompressible flows with smoothed particle hydro-dynamics[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2016, 28(5): 731-745.
- [58] YANG D, WU K, WAN L, et al. A particle element approach for modelling the 3D printing process of fibre reinforced polymer composites[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2017, 1(1): 10.
- [59] HE L, LU G, CHEN D, et al. Three-dimensional smoothed particle hydrodynamics simulation for injection molding flow of short fiber-reinforced polymer composites[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2017, 25(5): 055007.
- [60] MURMU U K, ADHIKARI J, NASKAR A, et al. Mechanical properties of crystalline and semicrystalline polymer systems[J]. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, 2022, 2: 917-927.
- [61] NING N, FU S, ZHANG W, et al. Realizing the enhancement of interfacial interaction in semicrystalline polymer/filler composites via interfacial crystallization[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(10): 1425-1455.
- [62] LU X, DETREZ F, ROLAND S. Numerical study of the relationship between the spherulitic microstructure and isothermal crystallization kinetics. Part I. 2-D analyses[J]. *Polymer*, 2019, 179: 121642.
- [63] DURIN A, CHENOT J L, HAUDIN J M, et al. Simulating polymer crystallization in thin films: Numerical and analytical methods[J]. *European Polymer Journal*, 2015, 73: 1-16.
- [64] RUAN C, OUYANG J, LIU S. Multi-scale modeling and simulation of crystallization during cooling in short fiber reinforced composites[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(7-8): 1911-1921.
- [65] GRÁNÁSY L, PUSZTAI T, BÖRZSÖNYI T, et al. Phase field theory of crystal nucleation and polycrystalline growth: A review[J]. *Journal of Materials Research*, 2006, 21(2): 309-319.
- [66] BAHLOUL A, DOGHRI I, ADAM L. An enhanced phase field model for the numerical simulation of polymer crystallization[J]. *Polymer Crystallization*, 2020, 3(4): e10144.
- [67] FAN M, HE W, LI Q, et al. PTFE crystal growth in composites: A phase-field model simulation study[J]. *Materials*, 2022, 15(18): 6286.

- [68] RAABE D, GODARA A. Mesoscale simulation of the kinetics and topology of spherulite growth during crystallization of isotactic polypropylene (iPP) by using a cellular automaton[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, 13(5): 733.
- [69] FANG H, WANG X, GU J, et al. A novel crystallization kinetics model of transcrystalline used for crystallization behavior simulation of short carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2019, 59(4): 854-862.
- [70] SPINA R, SPEKOWIUS M, HOPMANN C. Multiphysics simulation of thermoplastic polymer crystallization[J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 455-469.
- [71] HALL K W, SIRK T W, KLEIN M L, et al. A coarse-grain model for entangled polyethylene melts and polyethylene crystallization[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2019, 150(24): 244901.
- [72] ELHAJJAR R, GRANT P N, ASHFORTH C. Composite structures: Effects of defects[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd, 2018: 43-84.
- [73] MEHDIKHANI M, GORBATIKH L, VERPOEST I, et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(12): 1579-1669.
- [74] PITCHUMANI R, RANGANATHAN S, DON R, et al. Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(9): 1883-1897.
- [75] POLYZOS E, KATALAGARIANAKIS A, POLYZOS D, et al. A multi-scale analytical methodology for the prediction of mechanical properties of 3D-printed materials with continuous fibres[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101394.
- [76] SENTHIL K, AROCKIARAJAN A, PALANINATHAN R, et al. Defects in composite structures: Its effects and prediction methods—A comprehensive review[J]. *Composite Structures*, 2013, 106: 139-149.
- [77] 张恒, 张雄, 乔丕忠. 近场动力学在断裂力学领域的研究进展[J]. *力学进展*, 2022, 52(4): 852-873.  
ZHANG Heng, ZHANG Xiong, QIAO Pizhong. Advances of peridynamics in fracture mechanics[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(4): 852-873(in Chinese).
- [78] NISHIKAWA M, MATSUDA N, HOJO M. Fiber-reinforced composites modeling using peridynamics[M]. *Peridynamic Modeling, Numerical Techniques, and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 309-326.
- [79] WU K. Computational modelling of fluid-solid interaction problems by coupling smoothed particles hydrodynamics and the discrete element method[D]. Leeds: University of Leeds, 2017.
- [80] XIA H, LU J, TRYGGVASON G. Fully resolved numerical simulations of fused deposition modeling. Part II—solidification, residual stresses and modeling of the nozzle[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(6): 973-987.
- [81] LIU Y, MUKHERJEE S, NISHIMURA N, et al. Recent advances and emerging applications of the boundary element method[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2011, 64(3): 030802.
- [82] 曹忠亮, 富宏亚, 付云忠, 等. 基于自动铺放技术的热塑性复合材料原位固化成型研究进展: 热传导行为及层间性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 894-900.  
CAO Zhongliang, FU Hongya, FU Yunzhong, et al. A review of robotic prepreg placement and in-situ consolidation for manufacturing fiber-reinforced thermoplastic composites: Heat transfer behavior and interlaminar properties[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(5): 894-900(in Chinese).
- [83] KOLLMANNBERGER A, LICHTINGER R, HOHENESTER F, et al. Numerical analysis of the temperature profile during the laser-assisted automated fiber placement of CFRP tapes with thermoplastic matrix[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2017, 31(12): 1563-1586.
- [84] SUN Q, RIZVI G, BELLEHUMEUR C, et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, 14(2): 72-80.
- [85] RODRÍGUEZ J F, THOMAS J P, RENAUD J E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, 9(4): 219-230.
- [86] FAN C, SHAN Z, ZOU G, et al. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of continuous fiber reinforced composites in additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1): 21.
- [87] LI Z, YANG T, DU Y. Dynamic finite element simulation and transient temperature field analysis in thermoplastic composite tape lay-up process[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2015, 28(4): 558-573.
- [88] BRASINGTON A, FRANCIS B, GODBOLD M, et al. A review and framework for modeling methodologies to advance automated fiber placement[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2023, 10: 100347.
- [89] YADAV N, SCHLEDJEWSKI R. Review of in-process defect monitoring for automated tape laying[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 173: 107654.
- [90] ÇELIK O, PEETERS D, DRANSFELD C, et al. Intimate contact development during laser assisted fiber placement: Microstructure and effect of process parameters[J]. *Com-*

- posites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 134: 105888.
- [ 91 ] CHENG J, ZHAO D, LIU K, et al. Modeling and impact analysis on contact characteristic of the compaction roller for composite automated placement[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(23): 1418-1432.
- [ 92 ] DU J, WEI Z, WANG X, et al. An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 234: 332-341.
- [ 93 ] PHAN D D, HORNER J S, SWAIN Z R, et al. Computational fluid dynamics simulation of the melting process in the fused filament fabrication additive manufacturing technique[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 33: 101161.
- [ 94 ] THIEN N P, TANNER R I. A new constitutive equation derived from network theory[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1977, 2(4): 353-365.
- [ 95 ] FU Y, YAO X. Multi-scale analysis for 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 216: 109065.
- [ 96 ] SIMACEK P, ADVANI S G, GRUBER M, et al. A non-local void filling model to describe its dynamics during processing thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 46: 154-165.
- [ 97 ] JEBABI M, DAU F, CHARLES J L, et al. Multiscale modeling of complex dynamic problems: An overview and recent developments[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016, 23: 101-138.
- [ 98 ] SUN S, HAN Z, ZHANG J, et al. Multiscale collaborative process optimization method for automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113215.
- [ 99 ] TOHIDI S D, ROCHA A M, DOURADO N, et al. Influence of transcrystalline layer on finite element mesoscale modeling of polyamide 6 based single polymer laminate composites[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111555.
- [100] LIU F, WANG S, ZHANG W, et al. Mechanical and interfacial analysis of 3D-printed two-matrix continuous carbon fibre composites for enhanced structural performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 180: 108105.
- [101] CHENG Z Q, LIU H, TAN W. Advanced computational modelling of composite materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 305: 110120.
- [102] NIKNAFS S, SILANI M, CONCLI F, et al. A coarse-grained concurrent multiscale method for simulating brittle fracture[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2022, 254: 111898.
- [103] MARKESTEIJN A, KARABASOV S, SCUKINS A, et al. Concurrent multiscale modelling of atomistic and hydrodynamic processes in liquids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2021): 20130379.
- [104] WANG C, TAN X P, TOR S B, et al. Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101538.
- [105] WANIGASEKARA C, OROMIEHIE E, SWAIN A, et al. Machine learning based predictive model for AFP-based unidirectional composite laminates[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(4): 2315-2324.
- [106] BISHARA D, XIE Y, LIU W K, et al. A state-of-the-art review on machine learning-based multiscale modeling, simulation, homogenization and design of materials[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(1): 191-222.
- [107] XIAO S, HU R, LI Z, et al. A machine-learning-enhanced hierarchical multiscale method for bridging from molecular dynamics to continua[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32: 14359-14373.
- [108] INGÓLFSSON H I, BHATIA H, AYDIN F, et al. Machine learning-driven multiscale modeling: bridging the scales with a next-generation simulation infrastructure[J]. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2023, 19(9): 2658-2675.
- [109] FONTES A, SHADMEHRI F. Data-driven failure prediction of fiber-reinforced polymer composite materials[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 120: 105834.
- [110] TANG Y, WANG Q, CHENG L, et al. An in-process inspection method integrating deep learning and classical algorithm for automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116051.
- [111] CAI R, WEN W, WANG K, et al. Tailoring interfacial properties of 3D-printed continuous natural fiber reinforced polypropylene composites through parameter optimization using machine learning methods[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103985.
- [112] SHEN T, LI B. Digital twins in additive manufacturing: A state-of-the-art review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131: 63-92.
- [113] WANG Y, TAO F, ZUO Y, et al. Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials[J]. *Engineering*, 2023, 22: 23-33.
- [114] POLINI W, CORRADO A. Digital twin of composite assembly manufacturing process[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(17): 5238-5252.
- [115] SOORI M, AREZOO B, DASTRES R. Digital twin for smart manufacturing: A review[J]. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2023, 2: 100017.