复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

纤维增强复合材料增材制造缺陷：形成原因和在线监测研究进展

董万鹏 果春焕 曹洪硕 孙兵 李竞龙 孙江曼 张学军 邢悦 梁秀兵 姜风春

Defects in additive manufacturing of fiber-reinforced composites: Research progress on formation causes and online monitoring

DONG Wanpeng, GUO Chunhuan, CAO Hongshuo, SUN Bing, LI Jinglong, SUN Jiangman, ZHANG Xuejun, XING Yue, LIANG Xiubing, JIANG Fengchun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.001

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

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

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

复合材料学报. 2024, 41(9): 4502-4517 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.005

连续纤维增强3D打印复合材料工艺缺陷及其失效行为研究进展

Research progress on process defects and failure behaviors of continuous fiber-reinforced composite materials via 3D printing

复合材料学报. 2024, 41(9): 4478-4501 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240026.001

超高温氧化物陶瓷激光增材制造技术与缺陷控制研究进展

Research progress on laser additive manufacturing technology and its defect control for ultra-high temperature oxide ceramics

复合材料学报. 2021, 38(3): 668-679 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201022.001

碳纤维增强树脂基复合材料气瓶电磁超声在线监测方法及失效机制

Electromagnetic ultrasonic on-line monitoring method and failure mechanism of carbon fiber reinforced resin matrix composite material gas cylinder

复合材料学报. 2024, 41(4): 1820-1829 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230824.002

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

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 42 卷 第 3 期 3 月 2025 年
Vol. 42 No. 3 Mar 2025

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.001

纤维增强复合材料增材制造缺陷：形成原因和在线监测研究进展

分享本文

董万鹏[1,2]，果春焕[1]，曹洪硕[3]，孙兵[2]，李竟龙[2]，孙江曼[3]，张学军[3]，邢悦*[2]，梁秀兵[2]，姜风春*[1]

（1.哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院，哈尔滨 150001；2.军事科学院 国防科技创新研究院，北京 100071；
3.北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室，北京 100029）

摘 要：纤维增强树脂基复合材料（FRC）因其高比强度、耐腐蚀和低成本等优异特性而被广泛应用于航空航天、轨道交通、风电能源等领域。然而，复合材料在成型过程中会发生复杂的物理与化学变化，不可避免地会产生内部缺陷；特别是在增材制造（AM）过程中，快速的升温-降温循环进一步增加了缺陷形成的概率。因此，成形缺陷与在线监测的研究对于提高纤维增强复合材料增材制造的质量具有重要意义。本文总结了复合材料树脂基体中残余应力、孔洞缺陷、富树脂缺陷以及界面缺陷的形成机制，分析了上述缺陷对于复合材料宏观力学性能的影响，探明了各类缺陷的微观成因。继而，结合缺陷的形成原因归纳了基于光纤布拉格光栅传感器、应变和位移传感器、声发射技术和热力学监测的在线监测技术，对其技术特点、应用案例及局限性展开了深入讨论，以期为相关的科学研究提供参考和借鉴。

关键词：增材制造；缺陷；纤维增强复合材料；在线监测；形成原因

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2025)03-1135-17

Defects in additive manufacturing of fiber-reinforced composites: Research progress on formation causes and online monitoring

DONG Wanpeng[1,2], GUO Chunhuan[1], CAO Hongshuo[3], SUN Bing[2], LI Jinglong[2], SUN Jiangman[3], ZHANG Xuejun[3], XING Yue*[2], LIANG Xiubing[2], JIANG Fengchun*[1]

(1. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China; 3. State Key Lab of Organic-Inorganic Composite, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Fiber-reinforced resin matrix composites (FRC) are extensively utilized in sectors such as aerospace, rail transportation, and wind energy due to their exceptional properties, including high specific strength, corrosion resistance, and cost-effectiveness. However, during the molding process, these composites undergo complex physical and chemical transformations that inevitably lead to the formation of internal defects. Notably, the rapid thermal cycling associated with additive manufacturing (AM) processes further escalates the likelihood of defect formation. Consequently, research into manufacturing defects and online monitoring is crucial for enhancing the quality of FRC produced through additive manufacturing. This study provides an in-depth summary of the mechanisms behind the formation of defects within the resin matrix of composites, including residual stress, porosity, resin-rich areas, and interfacial defects. It analyzes the impact of these defects on the macroscopic mechanical properties of the composites and elucidates the micro-level origins of each defect type. Subsequently, the paper consolidates online detection techniques based on Fiber Bragg Grating (FBG) sensors, strain and displacement sensors, acoustic

收稿日期：2024-05-13；**修回日期**：2024-06-18；**录用日期**：2024-07-05；**网络首发时间**：2024-07-20 16:10:58
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.001
通信作者：邢悦，博士，研究员，博士生导师，研究方向为增材制造连续纤维增强复合材料 E-mail: xingyuequeen@163.com；
姜风春，博士，教授，博士生导师，研究方向为金属基复合材料设计、制造，增材制造技术与装备 E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn

引用格式：董万鹏，果春焕，曹洪硕，等. 纤维增强复合材料增材制造缺陷：形成原因和在线监测研究进展 [J]. 复合材料学报，2025，42(3)：1135-1151.
DONG Wanpeng, GUO Chunhuan, CAO Hongshuo, et al. Defects in additive manufacturing of fiber-reinforced composites: Research progress on formation causes and online monitoring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3): 1135-1151(in Chinese).

emission technology, and thermodynamic monitoring. It discusses the technical characteristics, application scenarios, and limitations of these techniques, aiming to offer insights and references for scientific research in this field.

Keywords: additive manufacturing; defects; fiber-reinforced composites; online monitoring; formation causes

由于纤维增强复合材料 (Fiber reinforced composites，FRC) 具有比刚度高、比强度高、可设计性强、耐腐蚀等优异的综合性能，已广泛应用于航空航天、船舶工程、车辆制造等领域。纤维增强复合材料的性能往往很大一部分取决于所使用纤维的类型，常用的纤维增强材料类型主要有天然纤维和合成纤维。天然纤维 (黄麻、剑麻、亚麻、香蕉、竹子等) 因其优异的成本效益、低密度、高灵活性、可回收性和可持续性而受到越来越多的研究兴趣[1]。然而，低冲击强度和高亲水性限制了天然纤维的进一步应用，通常可以通过表面改性[2]和混杂技术[3]来改善。相比之下，合成纤维 (玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、硼纤维等) 由于可设计性强、比强度高而被广泛应用[4]，其中，碳纤维和玻璃纤维增强复合材料制造工艺最成熟、应用最为广泛。为满足不同的应用要求，出现了多种类型的复合材料成型工艺，例如热压[5]、编织[6]、缠绕、拉挤以及新兴的增材成型[7]。如图 1 所示，复合材料在制造过程中纤维可能会出现断裂缺陷，树脂基体常出现孔洞、杂质和过挤出；此外，树脂-纤维界面处会发生分层和未渗透。总之，不论是传统的成型方法或者是近些年来新兴的增材制造，均会产生类似的内部缺陷，但各类缺陷所占的比例不同，例如层压板更容易出现分层缺陷；编织物更易出现孔洞缺陷；增材制造复合材料更易产生未渗透区域[8-9]，这些缺陷不同程度导致了最终制件的性能衰减。

熔融沉积成形 (Fused deposition modeling，FDM) 是目前在 FRC 增材制造中广泛使用 3D 打印工艺，因其成本低且操作简单，可以打印多个方向以及多种材料的大型复杂零件[10]。在打印过程中常见的如聚丙烯腈丁二烯苯乙烯 (ABS)、聚乳酸 (PLA) 和聚丙烯 (PP) 等聚合物熔化作为基体，基体材料通过加热融化后从喷嘴挤出，然后通过喷嘴同时将基体与短/长纤维挤出形成单个打印道，打印头沿着预定的路径移动，逐层沉积材料，每一层沉积后，材料迅速冷却固化，与之前的层粘接。由于所使用的聚合物材料通常以长丝形式供给，因此 FDM 也称为熔丝制造 (Fused filament fabrication，FFF)。除了上述常见的聚合物基体之外，FDM 还可用于打印各种其他聚合物材料，包括水凝胶[11]、生物基聚合物[12-13]、热固性聚合物 (例如环氧树脂)[14-15] 以及高性能聚合物例如聚醚醚酮 (PEEK)[16]。目前针对 FDM 打印 FRC 的研究大多数都集中在短纤维增强复合材料 (Short fiber reinforced composites，SFRCs) 上，只有少数连续纤维增强，虽然短纤维增强复合材料与未增强的复合材料相比具有更好的力学性能，但与连续纤维增强复合材料 (Continuous fiber reinforced composites，CFRC) 的力学性能相比，仍有很大差距。增材制造连续纤维增强复合材料则将连续纤维增强复合材料与增材制造的优点相结合，既充分发挥了连续纤维的增强作用，又具有增材制造技术无模自由成形、可设计性强以及可以实现传统加工工艺难以成形的复杂构件的成形等工艺特点，这使得采用拓扑优化等设计方法增强零件的性能成为可能，也有利于实现复杂构件的快速成形[17-21]。目前传统工艺复合材料通过材料体系

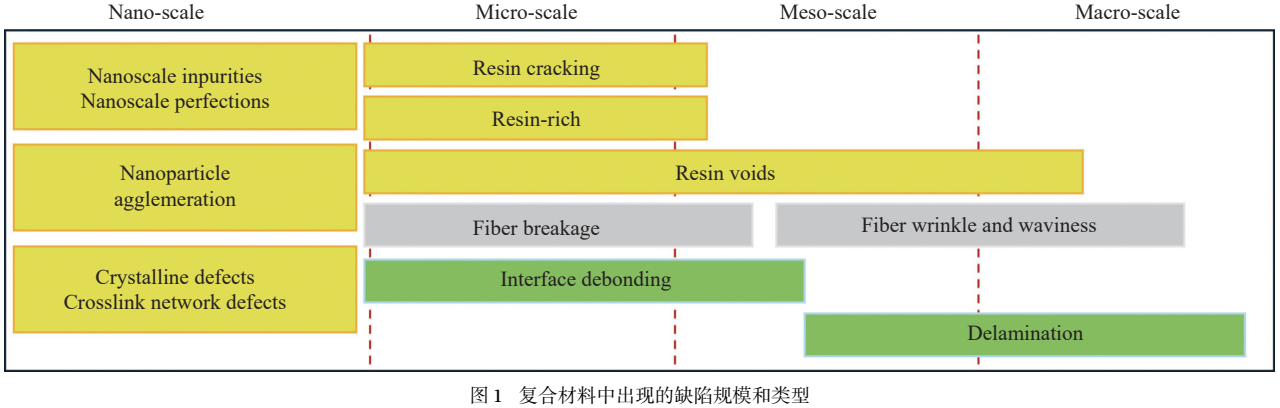


图 1　复合材料中出现的缺陷规模和类型

Fig. 1　Scale and type of defects in composites

设计、纤维含量和纤维取向调控，其拉伸强度可以达到数百兆帕，在一定条件下接近铝的拉伸强度[22]；然而增材制造复材由于打印过程中熔融层沉积到固体层上而形成的不同打印层之间由于层间未完全融合或纤维分布不均匀，层间粘合较弱，打印过程中纤维与基体的结合时间较短，纤维与基体之间结合也较为不紧密，在界面处易产生缺陷，且由于材料冷却过程中的收缩，打印件可能出现翘曲和变形，从而导致增材 FRC 部件的力学性能与传统加工方式得到的复合材料的性能相比较差[23]。例如，FDM 打印的连续碳纤维增强 ABS 拉伸强度约为 150 MPa，较相同材料注塑加工样件低 33%[24]；这主要是因为 FDM 成型方式使样件同时存在 3 种类型的界面，它们均不利于载荷的传递，所以导致力学性能的大幅衰减[7, 25]。一类是两条不同打印道之间存在纳米级界面，涉及非最佳聚合物链间扩散，尤其是在增材制造过程中熔融的树脂基体在已经冷却的上一层上成形，缩短了层与层之间扩散的时间。第二类是由于聚合物与纤维之间粘合性以及润湿性较差，FDM 打印 CFRC 的浸渍纤维束和聚合物基体之间存在微尺度界面不利于结合。第三类是在相邻的四个打印道之间可能存在缺乏粘合的介观界面，如图 2 所示。FDM 打印 FRC 的巨大潜力使得在过去 10 年内出现了大量旨在改善这些不同界面处的粘合，消除界面处缺陷的研究。基于此，本文首先归纳了 FDM 打印过程中各类缺陷的成因与消除措施，尤其是打印过程中温度对缺陷产生的影响，目前对于 FDM 打印 FRC 的力学性能是结构应用的主要关注点，那么监测结构健康对于降低维护成本、提高可靠性、优化安全性和改进材料设计非常重要[26]。进而，介绍了在线监测技术在纤维增强复合材料增材制造领域应用的最新进展，包括光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器、应变位移传感器、声发射技术以及热力学方面的监测手段，总结了现有问题并对未来发展趋势进行了展望。

1 纤维增强复合材料的增材缺陷成因

纤维增强树脂基复合材料在制造过程中出现缺陷的可能性非常高。近年来，复合材料缺陷引起的产品质量问题和安全事故频发，损坏事件日益普遍。2020 年，一批波音 787 客机因飞机碳纤维复合材料机身表面存在微小裂纹而被召回，造成重大经济损失。由此可见，对纤维增强复合材

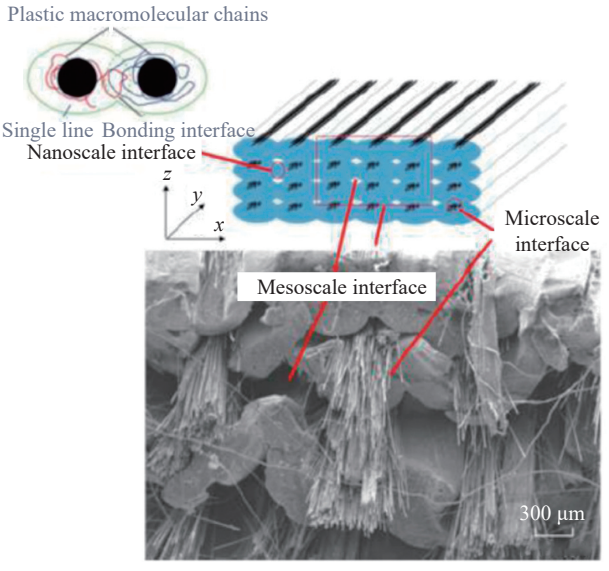


图 2 熔融沉积成形 (FDM) 打印中产生的多尺度界面[7]

Fig. 2 Multiscale interfaces in fused deposition modeling (FDM) process[7]

料制造缺陷的深入研究对于复杂复合材料结构的强度和可靠性非常重要，如分析复合材料制造工艺、相应的缺陷和残余应力分布、缺陷对复合材料力学性能的影响、制造和成型工艺的优化、复合材料内部结构的改善、纤维与树脂界面的改性。而对于增材制造 FRC 来说，与 FRC 传统加工方法的要求类似，对于 FRC 的性能要求最首先考虑的就是纤维与基体的相容性和适用性，从而确保基体与纤维、层内界面以及层间之间良好的相互作用，以减少加工过程中出现的缺陷[27]。因此增材制造成形 FRC 的缺陷可主要分为两类，一类是主要在树脂基体中出现的缺陷如树脂富集、孔洞等缺陷；另一方面是纤维与基体结合不良导致的缺陷。

1.1 复合材料树脂基体缺陷

复合材料中树脂基体的缺陷具有宏观、细观、微观等多种尺度，难以控制，会降低以树脂基体为主的复合材料的压缩强度、层间剪切性能、抗冲击性能等力学性能。而且，树脂基体的凝固或结晶会产生残余应力和固化变形，影响工程复合材料结构的精度和安全使用，导致复合材料过早失效。因此，本部分对树脂基体的研究从残余应力、孔洞和富树脂 3 个方面进行阐述。

1.1.1 树脂基体的残余应力

当热塑性树脂从熔融状态冷却时，无规液体结构可能部分转变为有序周期性结晶结构[28]。这个过程称为结晶。这里，总体结晶度通常作为内

部结构的宏观表示，定义为结晶相质量 (m_c) 与总结晶相的质量之比 X_{mc}。质量 (m_t) 或结晶体积 (V_c) 与总体积 (V_t) 的比率 X_{vc}。结晶动力学方程可以描述热塑性树脂的成核和结晶过程。热塑性树脂结晶后体积会收缩。树脂的收缩应变可以直接由结晶度计算出来。此外，力学性能由非晶相和结晶相的特性以及结晶度的瞬时体积分数决定[29]。根据标准线性固体动粘弹性模型，由非晶态组成的动态机械存储弯曲柔量 S'和损失弯曲柔量 S''(S'_{am}, $S'_{am'}$) 和结晶度 (S'_{cr}, $S'_{cr'}$) 贡献表示为结晶度的函数。热塑性树脂结晶的理论模型总结于表 1 中。

表 1　热塑性树脂结晶理论模型

Table 1　Theoretical model for thermoplastic resin crystallization

Purpose of model	Equation	Ref.
Crystallization kinetic equation	$X_{vc}=X_{vc}^{\infty}[w_1F_{vc1}+(1-w_1)F_{vc2}]$	[30]
Isothermal crystallization process	$F_{vci}=1-\exp\left(-K_i(T)n_i\cdot t^{n-1}\right)$	[30]
Non-isothermal crystallization process	$F_{vci}=1-\exp\left[-\int_0^t K_i(T)n_i\cdot t^{n_i-1}\mathrm{d}t\right]$	[30]
Crystallization of PEEK(Polyether Ether Ketone)	$X_{vc}=X_{vc}^{\infty}(1-\exp(-K_{PEEK}(T)\cdot t^n))$	[31]
Crystallization shrinkage strain	$\dot{\varepsilon}_r^c=\dfrac{-1+\sqrt{1+(4/3)\left[\dfrac{\rho(X_{vc})^{n+1}-\rho(X_{vc})^n}{\rho(X_{vc})^n}\right]}}{2}$	[28]
Linear solid kinetic-viscoelastic	$S'=S'_{am}(1-X_{vc})+S'_{cr}(X_{vc})$ $S''=S''_{am}(1-X_{vc})+S''_{cr}(X_{vc})$	[29]

Notes: X_{vc} is ratio of mass (m_t) or crystal volume (V_c) to total volume; S' and S'' are storage and loss bending compliance; S'_{am} and S''_{am} are storage and loss bending compliance of non-crystal volume; S'_{cr} and S''_{cr} are storage and loss bending compliance of crystal volume; F_{vci} is normalized volume fraction crystallinity for the ith mechanism; w_1 is weight factors; K_i is crystallization rate constant for ith mechanism; n_i is Avrami exponent; T is temperature; t is time; $K_{PEEK}(T)$ is crystallization rate constant for polyetheretherketone (PEEK); ρ is density; $\dot{\varepsilon}_r^c$ is crystallization shrinkage strain.

基于上述方程，还可以模拟热塑性树脂基复合材料的成型过程。研究发现，无论采用何种树脂，树脂固化后复合材料中都会存在残余应力，这些应力会影响复合材料的内部界面强度。而对于纤维以及连续纤维增强的复合材料，由于树脂基体中还含有纤维，因此除了树脂基体产生的残余应力，与金属增材制造过程相似，在凝固过程中由于纤维与基体的物理性质不匹配，导致还存在纤维与基体之间的残余应力，因此推测增材制造 FRC 的残余应力比单纯由树脂固化产生的要高，但此方面研究较少，且由于纤维的存在，使用方程描述凝固过程也显得较为困难。

1.1.2　树脂基体孔洞缺陷

打印过程中孔洞的主要来源是纤维浸渍过程中的空气滞留[32]或打印逐层累计过程中的空气滞留[33]，这会导致层内孔洞缺陷和层间孔洞缺陷。此外，由于树脂在熔化凝固过程中易产生挥发物，溶解在树脂中的水分在熔化过程中气化也会导致孔洞缺陷[32-34]。此类缺陷会导致复合材料基体和界面的弱化。另外，孔洞缺陷会导致复合材料在受到外力作用时产生应力集中，使局部区域提前达到应力极限，从而影响复合材料的整体强度。

图 3 显示了增材制造成形的短纤维增强复合材料的横截面显微照片，可以清楚地观察到复合材料内部的孔洞缺陷，增材制造零件的孔洞含量比压缩成型短纤维复合材料的空隙含量要高出许多，这是由于熔融的热塑性树脂黏度较高，并且打印过程凝固速度较快，树脂无法充分浸润前一层打印的基体就凝固了，导致层间孔洞的形成。但是随着短切碳纤维含量的增加，不同打印道之间的孔洞有明显减小的趋势，这是由于随碳纤维含量的增加，热影响导致的树脂基体膨胀减少，试样总体的导热系数增加，有助于先前成形的打印层在与刚挤出的熔融的材料接触后再次软化从而消除孔洞。但是纤维含量的增加也不可避免的导致了纤维和基体之间界面的增多，同样会产生纤维之间的孔洞[35]。连续纤维增强复合材料增材过程中不同打印道之间产生的孔隙示意图如图 4 所示，可看出该缺陷的产生源于同一层之间的不同的打印道和不同打印层之间由于缺乏聚合物的扩散，不可避免地会产生孔洞，在承受载荷时作为应力集中点，降低成形试样的力学性能[36]。

喷嘴行进路径、堆叠方法和打印间距对 FDM 打印复合材料的层间缺陷含量有显著影响。打印

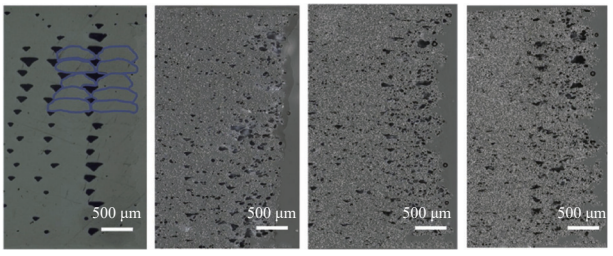


图 3 FDM 打印短纤维复合材料的横截面显微照片[35]

Fig. 3 Cross-section photomicrographs of FDM printed short-fiber composites[35]

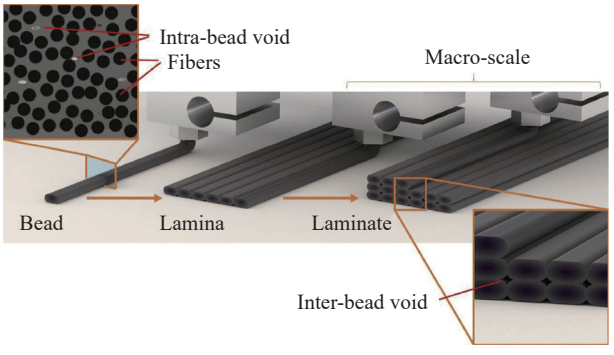
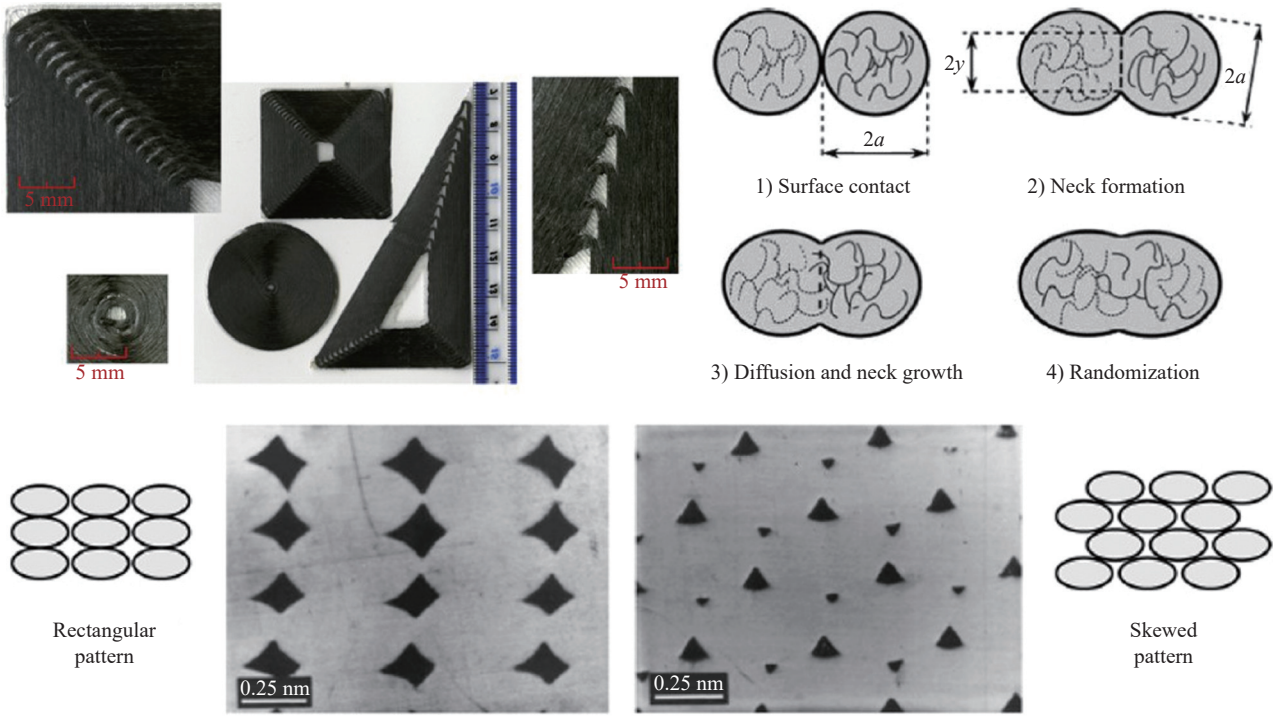


图 4 多打印道之间孔洞缺陷[36]

Fig. 4 Multi-scale inter-bead void defects[36]

间距较小有助于不同打印道之间形成有效的键合，促进其分子扩散，减小了打印道之间的缺陷；在打印过程将下一层与上一层错开一小段也有助于打印道之间的孔洞被下一层填补，消除缺陷，如图 5 所示[25]。此外，界面接触将直接影响 3D 打印复合材料的层间剪切强度。Tian 等[37] 系统分析了 3D 打印连续碳纤维增强聚乳酸复合材料的界面性能，重点研究了温度和压力对打印过程层间粘合力的影响。结果发现，当喷嘴温度为 200~230℃ 时，不仅可以实现热塑性树脂向纤维束的渗透，而且可以保证层间的粘合。Caminero 等[38] 分析了 3D 打印复合材料的层间粘合性能，发现对于尼龙材料来说，由于尼龙材料润湿性较差，层厚的增加会显著影响层间的孔洞，导致孔洞增多，层间性能变弱。并且与非单向复合材料相比，单向复合材料具有更高的拉伸强度和更少的内部缺陷，这是由于单向复合材料表现出显著的各向异性，在沿纤维方向承受载荷的主要是纤维，使得其拉伸强度显著提升[39]。

然而，层内缺陷主要取决于树脂基体中的纤维含量、取向分布及复合材料流动性，这与材料的本征特性和打印参数密切相关，尤其是打印过程的温度设置和沉积压力。这是由于纤维含量和纤维取向会影响复合材料的孔隙含量。Hou 等[40]



2*a*—Width; 2*y*—Adjacent features

图 5 增材制造喷嘴行进路径、堆叠方式和打印间距对孔洞的影响[25]

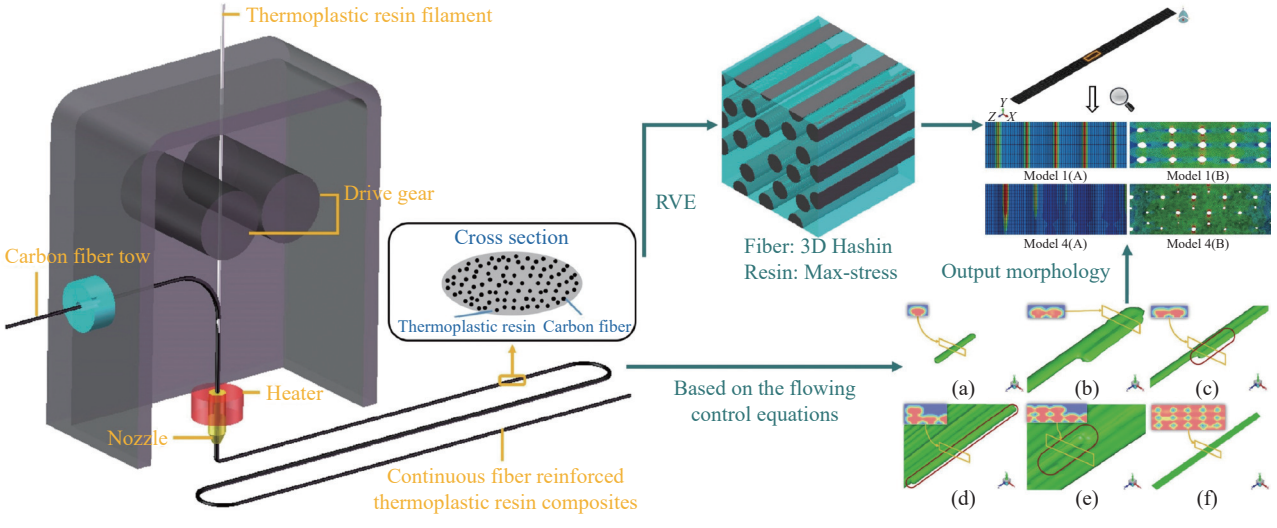
Fig. 5 Effects of additive manufacturing nozzle travel path, stacking method and print spacing on pores[25]

建立了在不同载荷下 CFRC 的本构模型，发现沿纤维方向分布的孔洞对 3D 打印 CFRC 在不同载荷下的失效过程有很大影响，而随纤维含量的增加沿纤维方向分布的孔洞也显著增加，会对试样力学性能产生不利的影响。Joshi 等[41] 详细讨论了纤维含量和空隙率之间的映射关系。通过对 FDM 打印的 CFRC 进行计算机断层扫描 (CT) 扫描发现孔洞含量随着纤维体积分数的增加而增加；当纤维体积分数达到 50vol% 时，孔洞率达到 6.8%。孔洞通常沿纤维方向 (纵向) 分布，且分布集中，这可能是纤维复合材料板容易发生横向断裂的原因。Valino 等[42] 在对大麻、黄麻、亚麻等天然纤维进行加热的打印过程中，当温度超过 200℃ 时，纤维发生热降解，导致复合材料孔洞率增加，严重影响了复合材料的力学性能。

建模仿真是对打印过程孔隙形成分析的一个有效方法，但由于模型建立较为困难因此相关工作尚较少。Fu 等[43] 建立了分析 3D 打印复合材料熔融-沉积-凝固过程的理论模型，并通过此模型实现了 3D 打印复合材料的空洞缺陷模拟，如图 6 所示。此外，经过对工艺参数的调控进行模拟，他们发现喷嘴几何形状是影响 3D 打印复合材料缺陷分布的最重要因素之一，由于在拐角处喷嘴直接与纤维束进行作用，如果喷嘴形状过于尖锐，会导致纤维断裂从而使得孔洞缺陷产生[44]。

1.1.3 树脂基体树脂富集

富树脂区是指基体材料局部富集的区域，在此处纤维局部缺乏，这是复合材料中的常见现象[45]。在 FDM 打印 FRC 过程中，往往会发生连续纤维的断裂，且断裂的位置通常无法预测；由于树脂基体的挤出速度一般是恒定的，因此打印拐角、圆弧等形状时经常会形成树脂富集[46]。



RVE—Representative Volume Element

图 6 3D 打印复合材料的孔洞缺陷模拟[43]

Fig. 6 Void defect simulation of 3D printed composites[43]

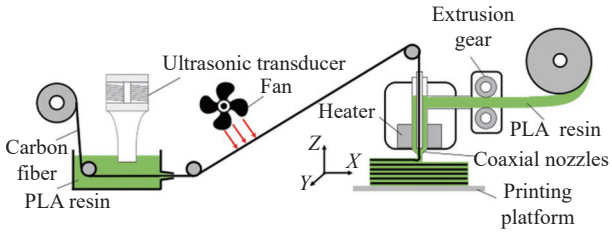
树脂富集在增材过程中很难控制，且会对复合材料的力学性能产生负面影响。Huang 等[47] 研究了含有富树脂缺陷的纤维增强树脂基复合材料的拉伸和压缩性能，发现由于富树脂缺陷的随机产生，复合材料样品的强度存在较大的分散性。Ghayoor 等[48] 在碳纤维/环氧树脂复合材料中人为形成了富树脂的缺陷，发现相比于无缺陷的样品，富树脂的缺陷会减少复合材料失效的起始应变。Ahmadian[49] 等的研究工作表明，富树脂的微米尺度的缺陷对复合材料的剪切强度和韧性影响很小，但是对横向受压下的材料强度和韧性有显著影响，这是由于当受压时，裂纹拓展到该区域时裂纹的拓展速度会显著增加，导致材料失效提前，且该处很容易成为应力集中的区域，影响材料性能。Al-Shawk 等[50] 在研究中发现，较大尺寸的富树脂的缺陷在拉伸过程中由于富树脂区产生的应力应变与周围区域不匹配，导致应力集中的产生，从而导致材料过早失效。因此，富树脂作为复合材料微观缺陷中的一种，会对其宏观力学性能产生较大的负面影响，进而大幅降低材料的使用寿命。

1.2 复合材料纤维与树脂之间的界面问题

树脂固化后，连续纤维和树脂基体将通过界

面层作为纽带结合在一起。界面具有传递载荷的作用，界面的结构可能会对纤维增强树脂基复合材料的强度产生影响。界面上的化学反应可以有效提高纤维与树脂之间的粘合力，放大纤维的补强效果。复合材料在承受外载荷时，如果增强材料与基体之间的相互作用力过小，就会出现一定的缺点，即界面结合强度较差。因此，对纤维与基体之间的界面进行增强以形成有效的应力传递非常重要。

增强纤维与基体之间的界面可以通过对纤维的界面改性来实现。复合材料的界面改性包括化学力和物理力的改善，使界面层能够均衡地传递载荷。在 FDM 打印 CFRC 过程中首先将连续纤维用聚合物熔体预浸渍以生产预浸料，以便有足够的时间让基体材料渗透纤维；丝状预浸料经过 FDM 打印机打印成复合材料，那么就可在预浸渍过程中对基体与纤维之间的界面改性来改善纤维与基体的界面结合。由于碳纤维边缘活性基团较少，表面能呈惰性，与树脂的粘接界面为圆柱面，比表面积小，接触角大，接触不良，导致润湿性能低，粘接性差。因此，形成的复合材料具有低的界面结合强度和低的层间剪切强度。Liu 等[51]用丙酮去除商业碳纤维的环氧树脂浆料，然后用聚酰胺分散粘合剂浸渍纤维，与含有上浆碳纤维的印刷复合材料相比，具有退浆碳纤维的印刷复合材料纤维与基体结合较为紧密。Liu 等[52]在玻璃纤维的预浸渍过程中，使用了一种阶梯形的预浸渍模具，能够显著地改善在浸渍过程产生的纤维断裂的问题，提升打印试样的力学性能；同时他们还发现随着浸渍模具出口直径的减小，预浸渍丝材的纤维含量和圆度均有提升，纤维含量和圆度分别可达到 48.45% 和 89.90%，这使得打印之后的试样的综合性能得到了改善。Qiao 等[53]在 PLA 浸渍碳纤维的预浸渍过程中使用超声波发生器 (图 7)，研究发现超声波可以增加碳纤维的表面粗糙度，从而增加碳纤维与基材之间的接触面积，与未处理材料相比，当超声振幅为 40 μm、PLA 溶液质量分数为 10wt%、浸渍拉拔速度为 15 mm·s^{-1} 时得到了最佳的预浸渍纤维。综上，纤维浸渍行为是连续纤维复材增材制造过程中的关键因素之一，直接影响着工艺稳定性和制件的力学性能，已有较多相关研究工作[37, 54, 55]和辅助方式[56-58]来增强预浸效果，本文就不作重点逐一讨论了。



PLA—Polylactic acid

图 7　使用超声波发生器预浸渍的示意图[53]

Fig. 7　Schematic of pre-impregnating with ultrasonic generator[53]

2　纤维增强复合材料增材过程在线监测研究进展

先前的研究大多数将 3D 打印 CFRTPC 的宏观综合性能与材料缺陷和微观结构联系起来，以尝试减少相应的缺陷形成并改善界面结合，据前文所述 FDM 打印部件综合性能的一个很重要的因素就是打印过程中的温度控制，它对树脂基体结晶行为有直接影响。更具体地说，该温度显着影响当前打印层和先前沉积层之间的界面温度，对于在线浸渍来说还显著影响了纤维与基体的结合，因此控制层间以及纤维与基体间粘附力的链间扩散现象[59-60]。这就是许多研究在普通 FDM 打印机中添加原位在线预热装置的原因[56, 61-62]。与其他类型的设备相比，激光预热系统在给定表面上能够提供给定热量的能力是它的一种优势，从对单纯树脂基体打印的预热[56]以及 CFRC 的打印预热[61]能够看出它对于试样综合性能的改善有较大的作用。此外，打印过程的温度变化显著影响着树脂基体的结晶过程，从而对与试样的残余应力分布、孔洞等缺陷的形成有显著的影响。因此监测并调控打印过程中试样的温度变化就显得尤为重要，目前对于打印过程的温度的调控研究主要集中在在线监测以及数字建模等方面的研究。将力传感器、位移传感器、高速相机和红外相机综合使用的多传感器融合在线监测对打印过程进行全场在线监测，然后结合机器学习或者是神经网络等辅助措施对在线监测的数据进行处理，实时反馈到打印机进行工艺参数的调节是目前的研究热点。

2.1　热力学监测

对于在线浸渍的 CFRC 的打印，由于浸渍只有在树脂温度达到熔点时才能进行，因此热场的演变是影响浸渍程度的关键因素，它影响材料内缺陷的分布，从而最终决定其轴向拉伸强度，且

由于温度影响熔融材料流动、积聚以及与现有材料粘合的方式，因此挤出材料的温度对缺陷的形成、层间粘合强度以及打印的其他方面有很大影响，对其最终性能至关重要。但目前的研究仅针对打印过程中喷嘴的温度改变进行实验，或者是为了解决打印过程中的层间结合问题添加如激光辅热等辅助措施，但是仍然较为局限，缺少对FDM打印整个过程温度变化的控制以便实时纠正打印过程中产生的缺陷。Zhang等[63]通过在打印的试样中嵌入热电偶，通过热电偶对打印过程的温度变化进行监测，同时建立FDM打印的热模型，通过热模型与热电偶实时监测相互结合来得到打印过程的温度演变，但由于热电偶嵌入到试样中，位置固定，无法做到对整个过程进行测量，因此精度较低。而Liu等[64]就使用了热成像仪对带有丝预热的FDM打印过程进行实时监测，如图8所示，热成像仪一般用于金属增材制造过程中对于金属熔池的温度识别，由于金属增材制造熔池温度梯度较大，热成像仪成像较为准确，而对与FDM打印，能看出整体温度差异不大，因此识别精度较低，仅能得到大致温度。为了改善上述热电偶以及热成像仪识别较为不精确的问题，Lewis等[65]将两个红外传感器集成到打印头上，如图9所示，通过这种方式，传感器提供挤出机两个不同运动轴的温度数据，并促进原位测量系统的多方向观察能力。并且由于红外传感器视场较大，在挤出机周围的挤出机和传感器之间的空间内安装了低发射率抛光铝板，作为热辐射屏蔽，限制传感器的视场，提高精度。并且在打印过程中同时结合热电偶监测来验证传感器的识别准确率。试验结果表明，由于两传感器安装位置，X方向的传感器对+X方向的打印识别较为准确，Y方向的对+Y的打印识别较为准确，但目前仍只能识别到打印过程出现的1.5 mm以上的孔洞。

2.2 光纤布拉格光栅传感器

基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)的传感器因其环境稳定性、质量轻、尺寸小、灵敏度高、多路复用能力和抗电磁干扰能力而在过去30年中被广泛应用。因此，它们似乎适合作为应变传感器集成到FRC材料中。尽管如此，这种类型的传感器集成到FRC中的相关研究很少，并且还有进一步研究的空间。Kousiatza等[66]研究了在FDM打印过程中将FBG传感器嵌入连续碳

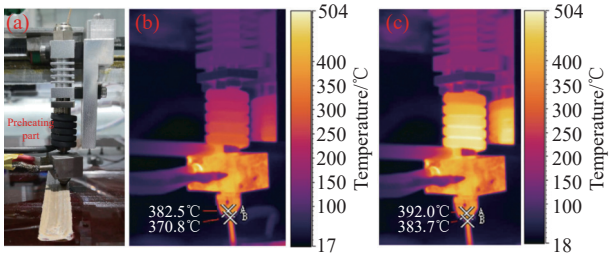
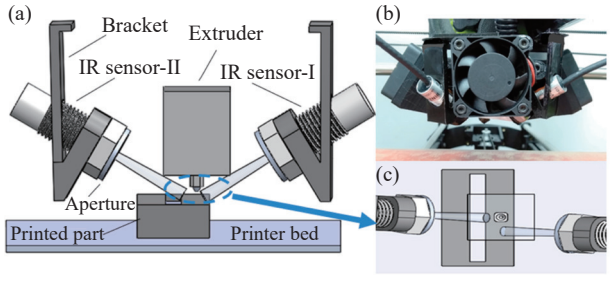


图8 (a) 带有预热部分的打印喷嘴；(b) 预热部分关闭、加热块温度设置为410℃时打印喷嘴和复合丝的温度分布；(c) 当预热温度设置为405℃、加热块温度设置为410℃时打印喷嘴和复合丝的温度分布[64]

Fig. 8 (a) Printing nozzle with preheating part; (b) Temperature distribution of the printing nozzle and composite filament when the preheating part is off, and the temperature of heating block is set equal to 410℃; (c) Temperature distribution of the printing nozzle and composite filament when preheating temperature is set equal to 405℃, and the temperature of heating block is set equal to 410℃[64]



IR—Infrared

图9 (a) 测量熔池温度的传感器示意图；(b) 与挤出机机头相连的两个传感器的图像；(c) 传感器两个不同传感区域的俯视图[65]

Fig. 9 (a) An illustration of sensors measuring melt pool temperature; (b) Image showing both sensors attached with the extruder head; (c) Top view showing two different sensing zone for the sensors[65]

纤维或玻璃纤维增强尼龙复合材料样品中。制备了碳纤维复合材料3种不同的纤维取向(±45°、0°和90°)的试样，而玻璃纤维增强样品则设计为仅以±45°取向的纤维，在实验中，设计打印的样品具有相同的长度和宽度，但玻璃纤维增强复合材料打印的层数更多。打印过程中打印到设计高度的一半时打印停止，以便手动嵌入光纤传感器和K型热电偶(图10(a))。此后，恢复打印过程，并监测打印过程的温度变化和残余应变，直到打印过程结束，如图10(b)所示。随后，将3D打印的CFRC样本从打印床上取出后，进一步记录测量结果。此外，根据记录的热载荷下的FBG波长，还计算了每种3D打印CFRTP复合材料在相关温度范围内的热膨胀系数。通过显微镜观察FBG传感器和CFRC材料之间的界面。计算了3D打印过程中FFF制造的复合材料样品产生的残余应变的

大小。关于热电偶记录的连续层沉积过程中的温度变化，在 0°和 90°增强纤维取向的情况下温度变化是均匀的，而当增强纤维取向为±45°时温度变化不均匀。纤维类型因其热性能的差异而对结果具有显着影响。在同一作者的另一工作中使用了类似的方法[67]，但使用的是纯树脂打印样品而不是 3D 打印 CFRC。更准确地说，通过在不同层嵌入 FBG 传感器和热电偶对 3D 打印纯丙烯腈丁二烯苯乙烯 (ABS) 进行原位监测(图 11)。同样重要的是，还研究了试样在基板上的位置对所产生的残余应变大小的影响。从试样底部的布拉格峰值波长值计算所得的实时压缩应变小于上部的平均压缩应变大小，但是 FBG 波长的变化只有在 FBG 传感器上面沉积的第一层完全固化时才能检测到变化。在该研究中，3D 打印过程中的温度变化不仅来自热电偶的直接测量，还可以通过忽略凝固残余应变并结合初始温度，根据 FBG 传感器的峰值波长值计算得出。

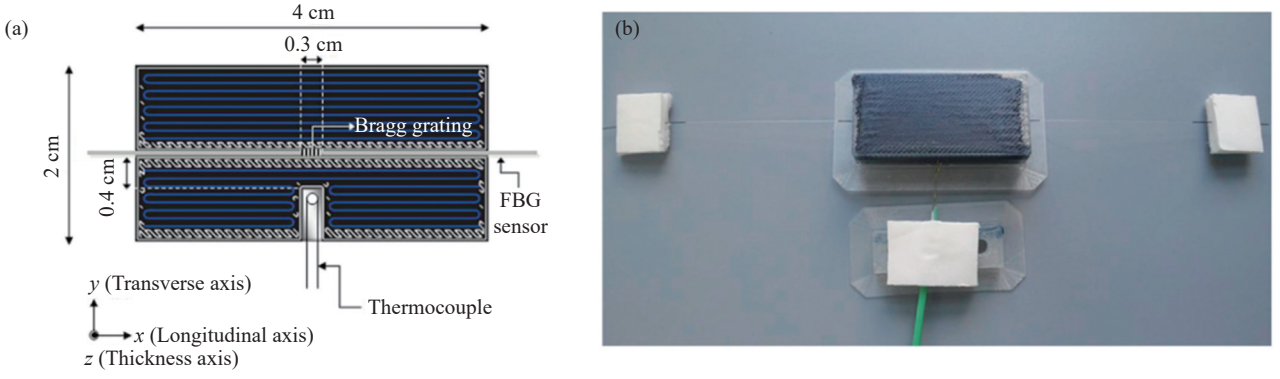


图 10 (a) 3D 打印连续纤维增强复合材料 (CFRC) 0°方向纤维增强方向的示意图以及光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器和热电偶的位置；(b) 包含嵌入式 FBG 传感器和热电偶的 3D 打印 CFRC 试样[66]

Fig. 10 (a) Schematic of the midplane of a 0° fiber reinforcement orientation of a 3D printed continuous fiber reinforced composites (CFRC) with the location of the fiber Bragg grating (FBG) sensor and the thermocouple; (b) Picture of a 3D printed CFRC specimen containing an embedded FBG sensor and a thermocouple[66]

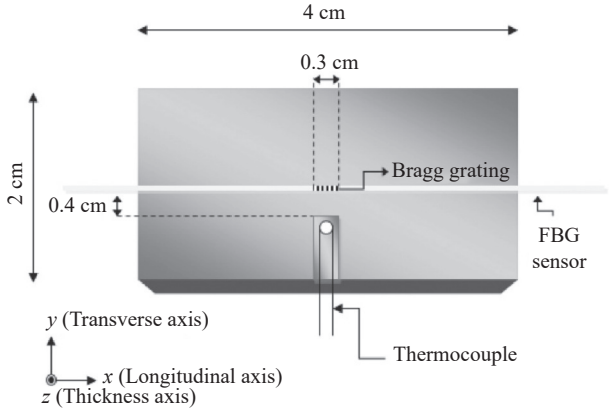


图 11 3D 打印树脂示意图[67]

Fig. 11 Schematic of a 3D printed resin[67]

此类传感器在单树脂材料成形的应用较为普及，这归因于其较高的可靠性，并且由于单树脂材料的物性参数较为容易计算，由 FBG 测量的数据经计算可得到打印过程的各项参数变化。由于 FDM 打印 CFRC 最近几年才刚刚出现，它们在 3D 打印 CFRC 中的应用仍处于起步阶段。最近，有研究也成功将 FBG 传感器用于监测 PLA 基体 FDM 过程中的残余应力的演化，从而能够更好地了解由此产生的结构特性[68]。并且 FBG 传感器对在传统 CFRC 层压板成形过程中的预应力损失以及表面形貌变化的在线监测研究较为成熟[69]。因此对于将 FBG 使用到 FDM 打印 CFRC 上还有很长的一段路要走。

2.3 应变和位移传感器

除了 FBG 传感器之外，还存在其他传感器来检测结构在使用过程中的应变。最传统的技术是使用应变计，而现在随着 3D 打印的逐渐成熟，可以将含有导电墨水的纳米颗粒直接沉积到基材上，然后进行热烧结程序以得到纳米颗粒构建的导电路径[70]。这种成形技术使成形出微米尺寸的导线成为可能，因此可通过此方法制成毫米尺寸的应变片。在其他研究中，使用含有导电颗粒的导电聚合物通过 FDM 可以较为简单地打印出所需的应变计的导电路径[71]，通过使用 FDM 技术，打印出的应变计导电路径是毫米尺寸的导线，因此形成的应变计传感器的尺寸可达到厘米级。不同

的研究表明 FDM 已成功将 3D 打印应变传感器应用到材料打印的过程中[71-74]。如将具有由石墨烯填充的导电丝制成的导电路径的应变计集成到 3D 打印的 PLA 样本中。当对 PLA 样品进行加载和卸载过程时，由于传感器具有的非线性响应、滞后效应和重复性偏差是此类传感器的固有缺陷，因此必须对应变计信号进行校准[71]。由于应变计基材和导电墨水的粘弹性性质[74]，应变传感器的 FDM 打印也可以在高度柔性的基底上进行，以检测较大的应变水平[75-76]。

除了可以 FDM 直接打印内嵌的应变传感器外，Zhang 等[77] 还在 FDM 打印 CFRC 过程中在打印基板的一端使用了原位牵引力监测系统，如图 12 所示，由于 3D 打印过程中，纤维束主要受到粘性力 (F_V)、向下的压力 (F)、牵引力和法向力 (T 和 F_N) 的作用，这些力分别由挤出腔、喷嘴尖端和印刷床施加，以在恒定的打印速度下实现力平衡。而通过原位力监测系统就可以通过监测打印过程中的牵引力，经过计算就可以得到其他力的大小，通过改变打印的层厚就可以改变打印过程中的牵引力，以此来解释 FDM 打印过程中打印压力对孔洞形成的影响。同样，除了将力传感器集成到基板上，有研究[78] 将力和扭矩的传感器集成到打印头上，同样通过记录打印头在 FDM 过程中受到的力来得到打印头的力与缺陷生成的联系。

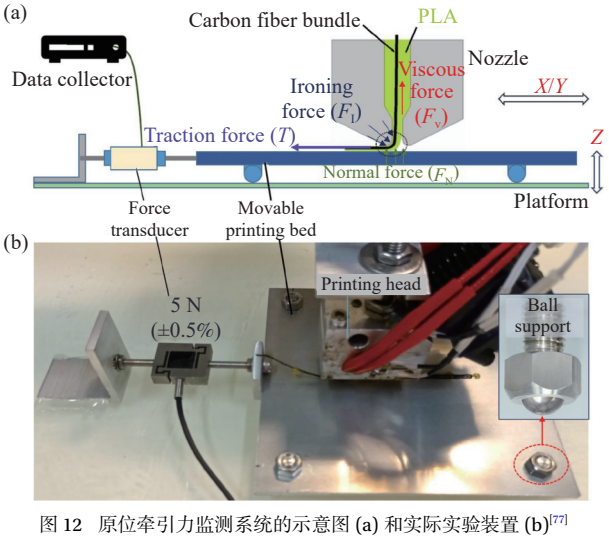


图 12　原位牵引力监测系统的示意图 (a) 和实际实验装置 (b)[77]

Fig. 12　Schematic (a) and actual experimental setup (b) of an in-situ traction force monitoring system[77]

2.4　声发射

声发射 (Acoustic emission technology，AE) 被定义为材料内快速释放能量而产生的高频应力波[79]。它是当材料内部结构发生不可逆变化时在固体中发生的瞬态弹性波辐射现象。典型的声发射频率在 10 kHz~1 MHz 范围内。裂纹扩展、塑性变形、相变和摩擦可以释放显著的弹性波，并可以通过压电换能器捕获。声发射技术是研究复合材料在力学实验和制造过程中损伤的高效技术，而将 AE 技术与增材制造过程相结合就可以实现对增材制造全过程进行在线监测，实时监测增材制造过程中缺陷的产生。Zhang 等[79] 在复合材料层压板的三点弯曲实验中就已经使用 AE 对弯曲试验过程进行了监测，结果表明通过对完全过程中 AE 信号的采集，能够实时地反映出弯曲过程中试样缺陷的产生。但是目前在增材制造过程中 AE 技术的应用主要集中在对试样表面缺陷的识别。Pan 等[80] 就将 AE 与 Micro-CT 技术相结合，通过对 AE 采集到的数据与 Micro-CT 的数据进行比较，将 Micro-CT 识别的内部损伤与 AE 的信号特征峰进行对照，得到 FDM 打印试样的 AE 实时监测技术。在 CFRC 打印过程中，如果打印速度过快那么往往会产生纤维断裂等缺陷，而纤维断裂则往往会产生一个极为明显的 AE 信号变化，Yang 等[81] 就将 AE 集成到挤出机构上，如图 13 所示，并提出了一个名为相对相似度的概念来评估 AE 信号的不对称性，通过相对相似度可以准确识别出连续纤维打印过程中声信号的改变。

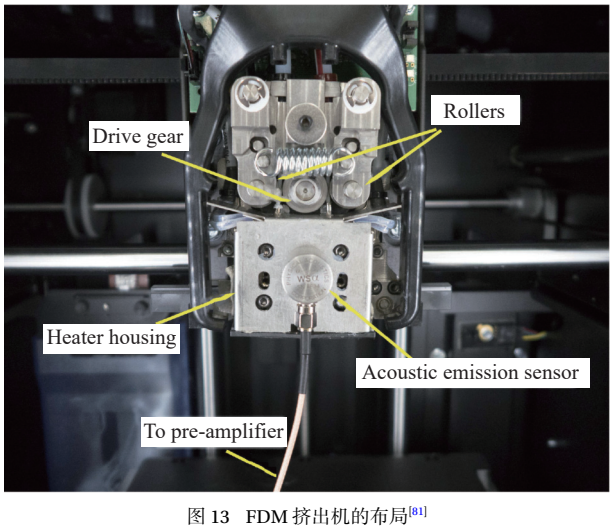


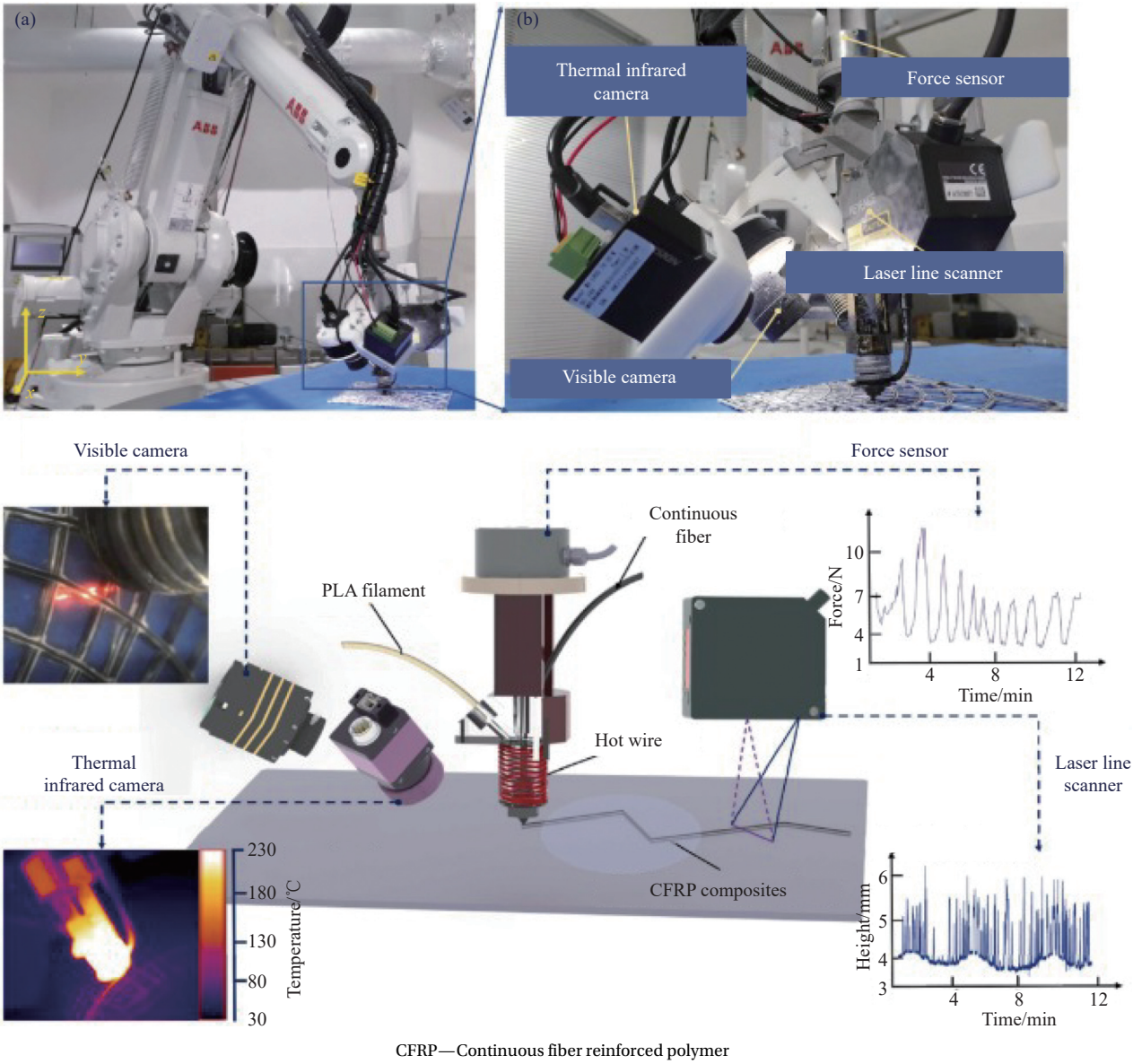
图 13　FDM 挤出机的布局[81]

Fig. 13　Layout of the FDM extruder[81]

2.5　机器学习融合多传感器在线监测

根据前文所述可知目前对于在线监测在增材制造的过程监控方面已经有了一些研究，布拉格光栅衍射技术、声发射技术、红外传感等都已经

用于成形过程的缺陷监测以及打印过程的全场监测。然而单一传感器的在线监测往往有着一定的局限性，比如只能监测部分缺陷产生位置、或者是监测精度不够等，因此，将多传感器综合使用，通过多传感器数据收集和融合来获得整个 FDM 过程充分且可靠的信息，并且由于多传感器的综合使用，使得通过在线监测来说明打印过程的机制，增强系统抗干扰的能力成为了可能。但是由于传感器数量的增加，多个传感器收集的数据数量呈几何倍数的增加，因而需要将在线监测与机器学习相融合，通过预先训练的模型能够快速地处理大量的数据，并且通过对数据的分析能够实现对缺陷的产生进行识别，并且能够对不同类型的缺陷进行分类，建立工艺参数—传感器信号—FDM 打印复合材料缺陷的关系，进而能够通过在线监测实时识别缺陷的产生来对工艺参数进行闭环的调整。Lu 等[82] 就提出了一种用于 CFRC 复合材料 AM 现场过程评估的高速相机、激光位移传感器、视觉识别以及力信号综合的多传感器框架 (图 14)，并建立了不同传感器所获得信号之间的相关性。如图 15 所示，采用高速相机识别来揭示工艺参数对 CFRC 缺陷 (即错位和磨损) 的影响。使用激光位移传感器的点云图像来重建层状复合材料的 3D 形貌，然后评估结构的表面粗糙度。通过融合

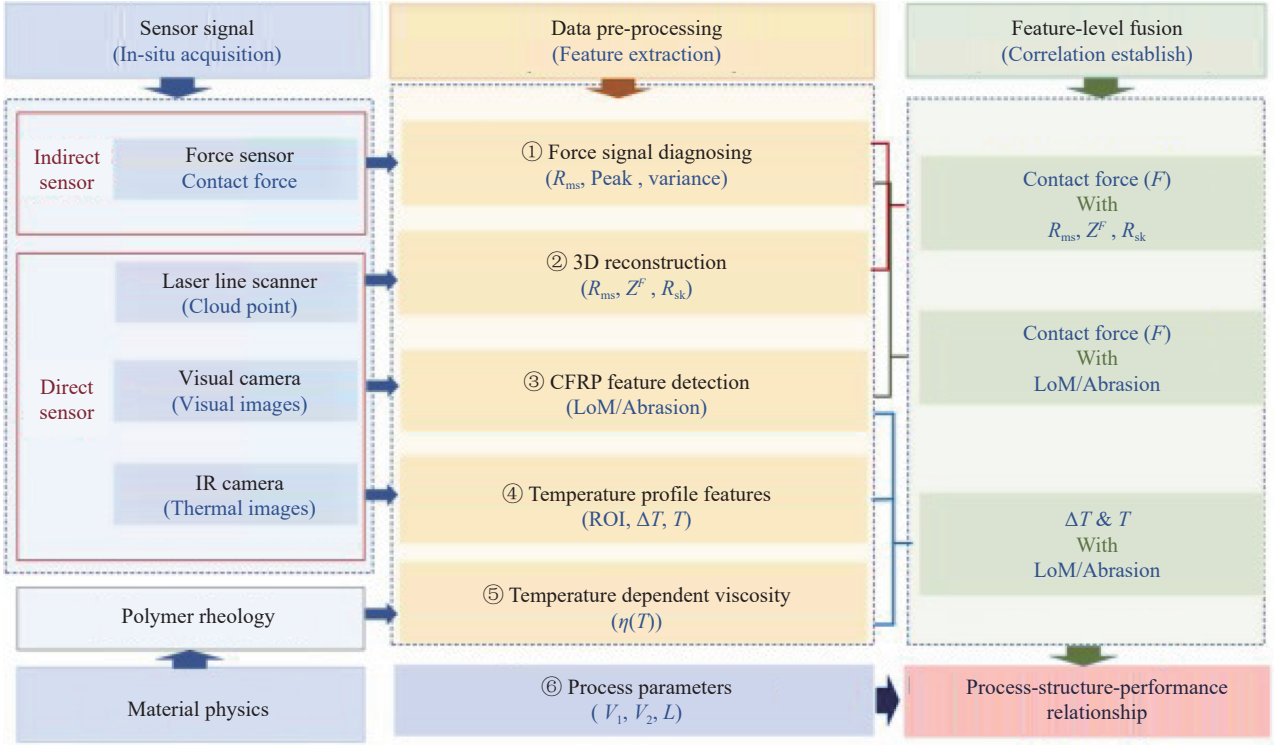


CFRP—Continuous fiber reinforced polymer

图 14　基于机器人的增材制造现场多传感监控系统示意图[82]

Fig. 14　Illustration of in-situ multisensing monitoring system for robot-based AM[82]

视觉识别图像和力信号建立接触力和局部缺陷之间的关系。通过融合力数据和浊点，分析了接触力对表面粗糙度、平均层厚度和局部层厚度的影响。红外和可见光图像的融合可以实现通过改变打印速度和路径转向角度引起的局部温度梯度，从而与纤维错位 (LoM) 程度相关。采用去噪、重构、滤波等数据预处理技术提取了原位采集的传感器信号的特征值，通过组合来自时间或空间数据的特征值来创建相关关系，最终建立了打印过程—结构—性能的关系。他们通过多传感器综合使用对打印过程的工艺参数与缺陷和性能建立联系之后，进一步通过机器学习的手段，将打印过程产生的错位和纤维磨损的缺陷进行量化，开发了如图 16 所示的软件机构来进行工艺参数的闭环调整，通过打印过程监测的图像或视频揭示 CFRC 产生的缺陷，对缺陷进行实时检测，监测数据与数据库对比进行评估，当识别出缺陷时，系统会生成新的工艺参数组合来实时调整打印过程[83]。



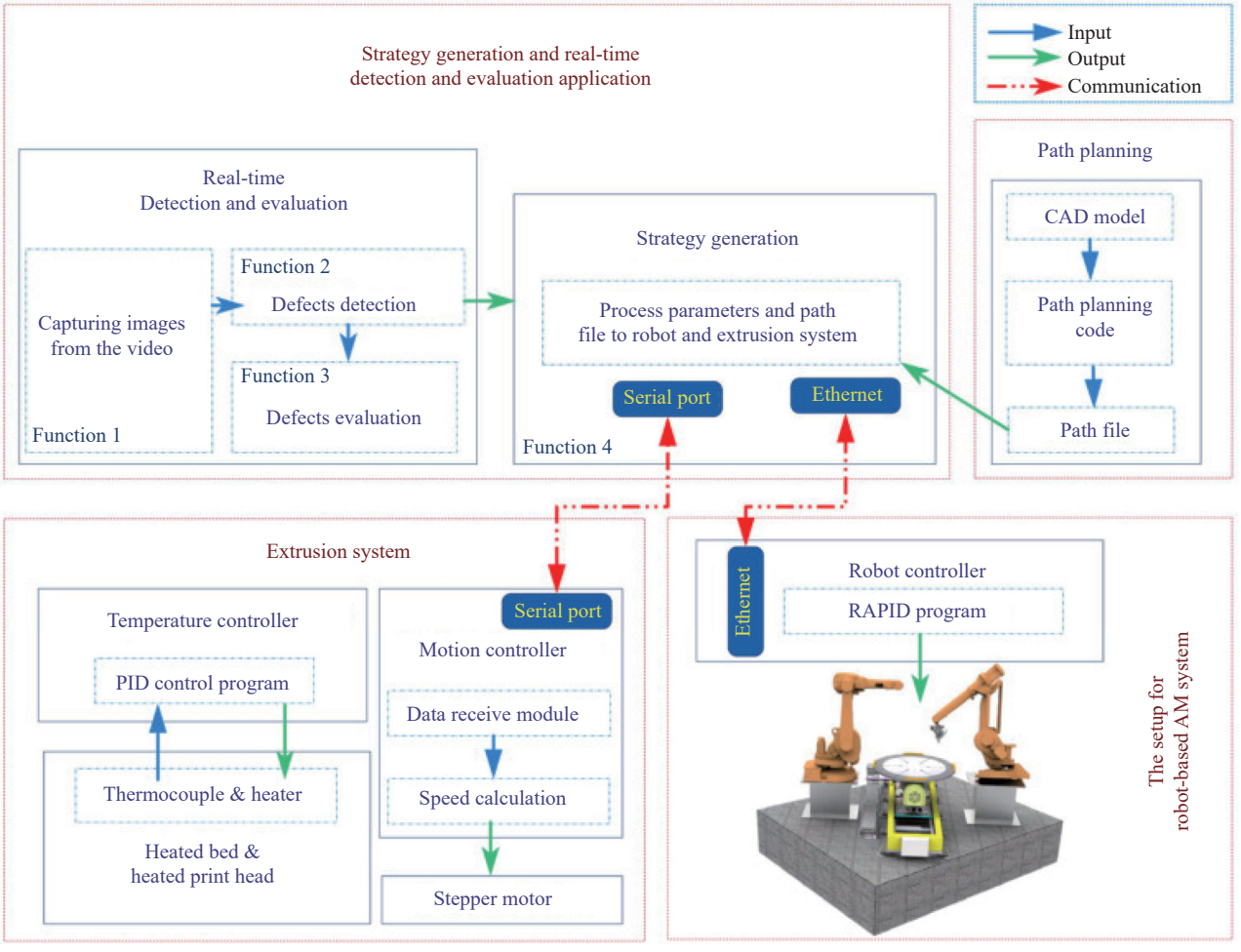
R_{ms}—Root mean square; Z^F—Depth; R_{sk}—Skewness; LoM—Loss of material; ROI—Region of interest; ΔT—Temperature change; T—Temperature; $\eta(T)$—Temperature-dependent viscosity; V_1, V_2—Velocity; L—Length

图 15　数据相关性分析策略[82]

Fig. 15　Overview of correlation analysis strategy[82]

3　总结与展望

纤维增强复合材料的增材制造技术，尽管具有显著的优势，但在成型过程中不可避免地会引入各种缺陷，这些缺陷对材料的最终性能构成了挑战。本文深入探讨了树脂基体中残余应力、孔洞、富树脂区域以及界面缺陷的形成机制，并分析了这些缺陷对复合材料宏观力学性能的具体影响。纤维增强复合材料增材制造由于是逐层累计制造，同时纤维内部也会存在未完全浸渍的区域，会导致制件存在天然的孔洞缺陷；除了 FDM 打印的孔洞缺陷之外，由于增材制造是一个逐层累计的过程，树脂基体经过了一个加热到冷却的过程，并且每层的热历史还不尽相同，这又会导致残余应力以及界面不匹配的问题出现。通过对缺陷微观成因的深入理解，本研究为优化增材制造工艺提供了理论基础。此外，本文还综述了基于光纤布拉格光栅传感器、应变和位移传感器、声发射技术以及热力学监测的在线检测技术。这些技术的归纳与讨论，不仅为复合材料的实时监测提供了技术参考，也为未来监测技术的发展指明了方向。未来的研究需要进一步深入树脂基体的结晶动力学和取向机制，以实现对 FRC 力学性能的精



CAD—Computer-aided design; PID—Proportional integral derivative; RAPID—Robot application programming interface description

图 16　基于机器人的增材制造系统的闭环调整软件架构[83]

Fig. 16　The software architecture of the robot-based AM system[83]

确调控。同时，对增材制造过程中的参数优化和打印策略改进也是提升材料性能的关键。在线监测技术的发展，尤其是多传感器融合技术的应用，将是实现增材制造过程控制、提高监测精度和实现闭环控制的重要途径。此外，机器学习等先进数据处理技术的应用，将为从大量监测数据中提取有用信息、预测和分类缺陷提供强有力的工具。通过这些技术的融合与创新，可以预期将显著提升纤维增强复合材料增材制造的可靠性和效率，进而推动该技术在更多高端领域的应用。

参考文献：

[1] TAKAGI H. Review of functional properties of natural fiber-reinforced polymer composites: Thermal insulation, biodegradation and vibration damping properties[J]. Advanced Composite Materials, 2019, 28(5): 525-543.

[2] 陈意伟, 单忠德, 杨旭静, 等. 连续纤维增强 PEEK 增材制造力学性能与成型质量优化 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5): 61-67.
CHEN Yiwei, SHAN Zhongde, YANG Xujing, et al. Parameter optimization of mechanical properties and forming accuracy for continuous fiber reinforced PEEK additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5): 61-67(in Chinese).

[3] SWOLFS Y, MORTON H, SCOTT A E, et al. Synchrotron radiation computed tomography for experimental validation of a tensile strength model for unidirectional fibre-reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 77: 106-113.

[4] CHEN C H, CHENG C H. Effective elastic moduli of misoriented short-fiber composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 1996, 33(17): 2519-2539.

[5] 杨磊, 周磊, 林宇东, 等. 激光增材制造连续碳纤维增强复合材料 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 411-428.
YANG Lei, ZHOU Lei, LIN Yudong, et al. Laser additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced com-

posites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(19): 411-428(in Chinese).

[6] POODTS E, MINAK G, MAZZOCCHETTI L, et al. Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component using the RTM process[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56: 673-680.

[7] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 80: 369-378.

[8] 陈杨, 何继敏, 常义, 等. 连续纤维增强复合材料模内混合注射成型研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9): 145-149, 154.
CHEN Yang, HE Jimin, CHANG Yi, et al. Research progress of in-mold hybrid injection molding of continuous fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9): 145-149, 154(in Chinese).

[9] 于天森, 高华兵, 王宝铭, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4): 139-144.
YU Tianmiao, GAO Huabing, WANG Baoming, et al. Research progress of molding process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 139-144(in Chinese).

[10] RAHIM T N A T, ABDULLAH A M, MD AKIL H. Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites[J]. Polymer Reviews, 2019, 59(4): 589-624.

[11] CHEN Z, ZHAO D, LIU B, et al. 3D printing of multifunctional hydrogels[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(20): 1900971.

[12] 张峻瀚, 杨宇, 刘贞鹏, 等. 连续碳纤维/环氧树脂基复合材料增材制造设备研制 [J]. 轻纺工业与技术, 2024, 53(2): 14-18.
ZHANG Junhan, YANG Yu, LIU Zhenpeng, et al. Development of additive manufacturing equipment for continuous carbon fiber/epoxy resin-based composite materials[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2024, 53(2): 14-18(in Chinese).

[13] SHARMA R, SINGH R, PENNA R, et al. Investigations for mechanical properties of Hap, PVC and PP based 3D porous structures obtained through biocompatible FDM filaments[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 132: 237-243.

[14] MING Y, DUAN Y, WANG B, et al. A novel route to fabricate high-performance 3D printed continuous fiber-reinforced thermosetting polymer composites[J]. Materials, 2019, 12(9): 1369.

[15] HAO W, LIU Y, ZHOU H, et al. Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites[J]. Polymer Testing, 2018, 65: 29-34.

[16] ZANJANIJAM A R, MAJOR I, LYONS J G, et al. Fused filament fabrication of peek: A review of process-structure-property relationships[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1665.

[17] CHANDRASEKHAR A, MIRZENDEHDEL A, BEHANDISH M, et al. FRC-TOuNN: Topology optimization of continuous fiber reinforced composites using neural network[J]. Computer-Aided Design, 2023, 156: 103449.

[18] CHENG P, WANG K, LE DUIGOU A, et al. A novel dual-nozzle 3D printing method for continuous fiber reinforced composite cellular structures[J]. Composites Communications, 2023, 37: 101448.

[19] CHEN R, BRATTEN A, RITTENHOUSE J, et al. Additive manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced SiC ceramic composite with multiple fiber bundles by an extrusion-based technique[J]. Ceramics International, 2022, 49(6): 9839-9847.

[20] DONG W, BAO C, LU W, et al. Fabrication of a continuous carbon fiber-reinforced phenolic resin composites via in situ-curing 3D printing technology[J]. Composites Communications, 2023, 38: 101497.

[21] GUO A, LIU C, LI S, et al. Water absorption rates and mechanical properties of material extrusion-printed continuous carbon fiber-reinforced nylon composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 3098-3112.

[22] BRENKEN B, BAROCIO E, FAVALORO A, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 1-16.

[23] ALIHEIDARI N, CHRIST J, TRIPURANENI R, et al. Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process[J]. Materials & Design, 2018, 156: 351-361.

[24] 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.

[25] BLOK L G, LONGANA M L, YU H, et al. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 176-186.

[26] CAI J, QIU L, YUAN S, et al. Structural health monitoring for composite materials[M]//Composites and their applications. London: IntechOpen, 2012: 415.

[27] YUAN S, LI S, ZHU J, et al. Additive manufacturing of polymeric composites from material processing to structural design[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 219: 108903.

[28] BARAN I, CINAR K, ERSOY N, et al. A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24: 365-395.

[29] BRAUNER C, PETERS C, BRANDWEIN F, et al. Analysis of process-induced deformations in thermoplastic composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(22): 2779-2791.

[30] TIERNEY J J, GILLESPIE JR J W. Crystallization kinetics behavior of PEEK based composites exposed to high heating and cooling rates[J]. Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2004, 35(5): 547-558.

[31] CHEN P, CAI H, LI Z, et al. Crystallization kinetics of polyetheretherketone during high temperature-selective laser sintering[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101615.

[32] JUDD N C W, WRIGHT W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites—An approvisal[J]. Sampe Journal, 1978, 14(1): 10-14.

[33] HUANG H, TALREJA R. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(13): 1964-1981.

[34] KARDOS J L, DUDUKOVIĆ M P, DAVE R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting—Matrix composites[J]. Epoxy Resins and Composites IV, 1986, 80: 101-123.

[35] TEKINALP H L, KUNC V, VELEZ-GARCIA G M, et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing[J]. Composites Science and Technology, 2014, 105: 144-150.

[36] VAN DE Werken N, TEKINALP H, KHANBOLOUKI P, et al. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100962.

[37] TIAN X, LIU T, YANG C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 198-205.

[38] CAMINERO M A, CHACÓN J M, GARCÍA-MORENO I, et al. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. Polymer Testing, 2018, 68: 415-423.

[39] JUSTO J, TÁVARA L, GARCÍA-GUZMÁN L, et al. Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites[J]. Composite Structures, 2018, 185: 537-548.

[40] HOU Z, TIAN X, ZHENG Z, et al. A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 189: 107893.

[41] JOSHI S C, SHEIKH A A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2015, 10(4): 175-185.

[42] 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.

[43] FU Y, YAO X. Multi-scale analysis for 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 216: 109065.

[44] FU Y, KAN Y, FAN X, et al. Novel designable strategy and multi-scale analysis of 3D printed thermoplastic fabric composites[J]. Composites Science and Technology, 2022, 222: 109388.

[45] LI X, SHONKWILER S, MCMAINS S. Detection of resin-rich areas for statistical analysis of fiber-reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 225: 109252.

[46] ZHANG G, WANG Y, QIU W, et al. Geometric characteristics of single bead fabricated by continuous fiber reinforced polymer composite additive manufacturing[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 70: 431-437.

[47] HUANG F, PANG X, ZHU F, et al. Transverse mechanical properties of unidirectional FRC including resin-rich areas[J]. Computational Materials Science, 2021, 198: 110701.

[48] GHAYOOR H, MARSDEN C C, HOA S V, et al. Numerical analysis of resin-rich areas and their effects on failure initiation of composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 117: 125-133.

[49] AHMADIAN H, YANG M, SOGHRATI S. Effect of resin-rich zones on the failure response of carbon fiber reinforced polymers[J]. International Journal of Solids and Structures, 2020, 188: 74-87.

[50] AL-SHAWK A, TANABI H, SABUNCUOGLU B. Investigation of stress distributions in the resin rich region and failure behavior in glass fiber composites with microvascular channels under tensile loading[J]. Composite Structures, 2018, 192: 101-114.

[51] LIU T, TIAN X, ZHANG M, et al. Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 114: 368-376.

[52] LIU X, SHAN Z, LIU J, et al. Mechanical and dielectric properties of continuous glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composite components prepared by additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2024, 81: 103978.

[53] QIAO J, LI Y, LI L. Ultrasound-assisted 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100926.

[54] WANG F, WANG G, NING F, et al. Fiber–matrix impregnation behavior during additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101661.

[55] OMURO R, UEDA M, MATSU-ZAKI R, et al. Mechanical testing[J]. SAMPE Journal, 2018, 54(5): 12.

[56] LUO M, TIAN X, SHANG J, et al. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 121: 130-138.

[57] LUO M, TIAN X, ZHU W, et al. Controllable interlayer shear strength and crystallinity of PEEK components by laser-assisted material extrusion[J]. Journal of Materials Research, 2018, 33(11): 1632-1641.

[58] LUO M, TIAN X, SHANG J, et al. Bi-scale interfacial bond behaviors of CCF/PEEK composites by plasma-laser cooperatively assisted 3D printing process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 131: 105812.

[59] MCILROY C, OLMSTED P D. Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing[J]. Polymer, 2017, 123: 376-391.

[60] KUMRAI-WOODRUFF R, WANG Q. Temperature control to increase inter-layer bonding strength in fused deposition modelling[C]//International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Reston, VA: American Society of Mechanical Engineers, 2020, 83952: V006T06A002.

[61] RAVI A K, DESHPANDE A, HSU K H. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 179-185.

[62] KISHORE V, AJINJERU C, NYCZ A, et al. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components[J]. Additive Manufacturing, 2017, 14: 7-12.

[63] ZHANG J, YANG W, LI Y. Process-dependent multiscale modeling for 3D printing of continuous fiber-reinforced composites[J]. Additive Manufacturing, 2023, 73: 103680.

[64] LIU X, SHAN Z, LIU J, et al. Mechanical and electrical properties of additive manufactured high-performance continuous glass fiber reinforced PEEK composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 247: 110292.

[65] LEWIS J, MOORE A L. In situ infrared temperature sensing for real-time defect detection in additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102328.

[66] KOUSIATZA C, KARALEKAS D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process[J]. Materials & Design, 2016, 97: 400-406.

[67] KOUSIATZA C, TZETZIS D, KARALEKAS D. In-situ characterization of 3D printed continuous fiber reinforced composites: A methodological study using fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Science and Technology, 2019, 174: 134-141.

[68] CHEN J, LIU B, ZHANG H. Review of fiber Bragg grating sensor technology[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2011, 4: 204-212.

[69] DENG J, RASHID K, LI X, et al. Comparative study on prestress loss and flexural performance of rectangular and T beam strengthened by prestressing CFRC plate[J]. Composite Structures, 2021, 262: 113340.

[70] RAHMAN M T, MOSER R, ZBIB H M, et al. 3D printed high performance strain sensors for high temperature applications[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(2): 024501.

[71] GOODING J, FIELDS T. 3d printed strain gauge geometry and orientation for embedded sensing[C]//58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017: 0350.

[72] DIJKSHOORN A, WERKMAN P, WELLEWEERD M, et al. Embedded sensing: Integrating sensors in 3-D printed structures[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7(1): 169-181.

[73] SHEMELYA C, BANUELOS-CHACON L, MELENDEZ A, et al. Multi-functional 3D printed and embedded sensors for satellite qualification structures[C]//2015 IEEE Sensors. Busan: IEEE, 2015: 1-4.

[74] MUNASINGHE N, WOODS M, MILES L, et al. 3-D printed strain sensor for structural health monitoring[C]//2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). Bangkok: IEEE, 2019: 275-280.

[75] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. Advanced Materials, 2014, 26(36): 6307-6312.

[76] AN B, MA Y, LI W, et al. Three-dimensional multi-recognition flexible wearable sensor via graphene aerogel printing[J]. Chemical Communications, 2016, 52(73): 10948-10951.

[77] ZHANG Z, LONG Y, YANG Z, et al. An investigation into printing pressure of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 162: 107162.

[78] DE BACKER W, SINKEZ P, CHHABRA I, et al. In-process monitoring of continuous fiber additive manufacturing through force/torque sensing on the nozzle[C]//AIAA scitech 2020 forum. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020: 1632.

[79] ZHANG P, ZHOU W, YIN H, et al. Progressive damage analysis of three-dimensional braided composites under flexural load by micro-CT and acoustic emission[J]. Composite Structures, 2019, 226: 111196.

[80] PAN Z, ZHOU W, ZHANG K, et al. Flexural damage and failure behavior of 3D printed continuous fiber composites by complementary nondestructive testing technology[J]. Polymer Composites, 2022, 43(5): 2864-2877.

[81] YANG Z, JIN L, YAN Y, et al. Filament breakage monitoring in fused deposition modeling using acoustic emission technique[J]. Sensors, 2018, 18(3): 749.

[82] LU L, YUAN S, YAO X, et al. In-situ process evaluation for continuous fiber composite additive manufacturing using multisensing and correlation analysis[J]. Additive Manufacturing, 2023, 74: 103721.

[83] LU L, HOU J, YUAN S, et al. Deep learning-assisted real-time defect detection and closed-loop adjustment for additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 79: 102431.