http://pmse.scu.edu.cn

高效高强挤出增材制造技术研究进展

朱家威[1]，黄士争[1]，潘 威[1]，Mohini Sain[2]，杨卫民[3]，鉴冉冉[1,2]
(1.青岛科技大学 机电工程学院，山东 青岛 266061；2.多伦多大学机械与工业工程系 生物复合材料及生物质材料加工中心，加拿大 安大略省 多伦多 M5S 3B3；3.北京化工大学 机电工程学院，北京 100029)

摘要：增材制造技术在按需制造、个性定制、异形构件等领域具有明显优势，是先进制造技术的重要研究方向。与传统制造方法(如减材制造、注塑成型)相比，增材制造制品的力学性能通常较差且生产效率较低，限制了其更广泛地应用于适应复杂工况的承载部件。作为制造技术关键评价的速度、质量指标，始终引领着宏微观尺度挤出增材制造技术发展方向。由于逐层逐步增材制造的固有模式，强度差和效率低成为困扰其工程应用的两大挑战。文中从挤出打印层间结合机理、层间断裂机制两方面讨论了研究学者在改善3D打印强度方面的努力，以及在提高打印效率方面的最新进展；最后综述了创新发展的几种注射打印前沿技术，讨论了其技术原理、创新特点和优劣势，将注射成型工艺引入增材制造技术中，有望成为解决两大难题的有效技术途径，为未来挤出增材制造的研究及推动形成新的技术方案提供参考。

关键词：增材制造；挤出打印；打印强度；打印效率；注射打印
中图分类号：TP391.73 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2023)09-0158-08

增材制造技术(Additive manufacturing)是先进制造技术中的重要研究领域，正在从快速原型制造向工业功能组件的先进制造转变，在生物医学、航空航天、智能穿戴、柔性电子等领域显示出强大的生命力，被视为未来实现大规模定制的颠覆性技术。然而，3D打印增材制造工艺使用耗时的逐层逐步方法来制造实体，其工艺设备的高精度和高效率成为未来增材制造技术能否广泛工业应用的关键瓶颈问题。作为一项迅速崛起和发展的技术，增材制造还远远不能满足传统产业在大规模生产模式下的标准化和工业化要求。

挤出打印技术(Extrusion-based printing)，或熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)，因其设备成本低和使用方便，成为最普遍、最流行的增材制造方法，最初由Stratasys公司在20世纪80年代开发，目前数百种系统以更通俗的术语“熔丝制造(Fused filament fabrication, FFF)”进入市场。尽管FDM技术能够生产复杂的三维形状，但与注射成型等技术相比，其制品在特定方向上强度较差以及生产效率较低，其应用仍然受到很大限制，难以满足工程作业要求。因此，3D增材制造技术的进步和突破主要体现在解决打印制品的各向异性特征(特别是堆积方向)和提高打印速度上。本文系统地综述了挤出打印技术领域近年来在提高打印效率和制件强度方面的最新研究进展，主要分为以下4个方面：层间结合机理、层间断裂机制、打印成型效率、注射打印技术，并讨论了高速高强挤出打印技术的发展方向和趋势，以及注射打印技术的潜在应用价值。

1 层间结合机理

基于FDM技术的制品成型过程属于逐层固化累积的方式。如Fig.1所示，在多工艺参数相对较优的情况下，零件的成型效果严重依赖于材料相邻层

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0200
收稿日期：2022-11-22
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52206095)；山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE232)
通讯联系人：鉴冉冉，主要从事高分子加工成型与智能制造研究，E-mail: jianrr@foxmail.com

间黏结情况，FDM 打印的 3D 制品特征本质上表现出各向异性的力学行为，在堆积方向上弱于其他方向[1]。据报道，分层结构特征导致打印零件的显著机械各向异性，堆积方向的拉伸强度仅为层面方向强度的 25%~50%[2]。此外，尽管 3D 打印塑料零件在非堆积方向由于离散层取向表现出一定的力学性能，但研究表明其各个方向的刚度，均低于相应的注射成型零件[3]。因此，为了提高零件的机械可靠性，需要对零件设计和打印路径等进行预测建模和合理规划，例如基于复合材料层压理论进行路径规划[4]、设置非线性的曲线路径[5]或通过增加肋条及内部支撑来增加打印制件结构强度[6]等。尽管如此，增材制造制品在堆积方向上的力学薄弱点依然存在，且目前仍没有任何实际解决方案能完全消除这一缺陷。

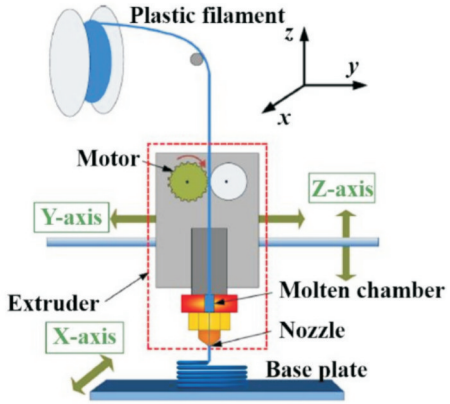


Fig. 1　Process principle of fused deposition modeling (FDM)

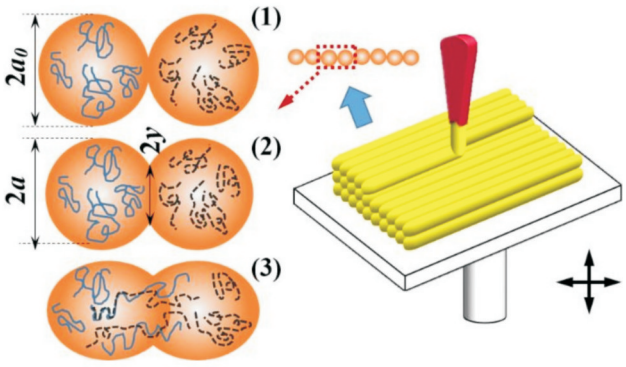


Fig. 2　Bond formation process between two filaments
(1): surface contacting; (2): neck growth; (3): molecular diffusion at interface and randomization

层间结合强度可归因于相邻熔丝之间的界面黏性流动和聚合物链在界面上的相互扩散，如 Fig.2 所示。相邻熔丝层间结合形成过程大致可分为 3 个阶段：界面接触、界面融合生长、界面分子扩散与随机化[7]。为了预测层间界面黏结强度，根据应用于金属或陶瓷烧结的牛顿烧结模型修正的聚合物黏结模型(Frenkel 模型)被提出，用无量纲参数 $\theta=\sin^{-1}(y/a)$ 来评估界面融合生长能力，其为黏度(η)、表面张力(Γ)和初始粒径(a_0)的函数，如式(1)所示[8]

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{dt}}=\frac{\Gamma}{a_0\eta}\frac{2^{-5/3}\cos\theta\sin\theta(1-\cos\theta)^{1/3}}{(1-\cos\theta)(1+\cos\theta)^{1/3}} \quad (1)$$

在应用该模型分析时，应考虑材料黏度与表面张力的温度依赖性。当然，在垂直方向(z-向)上层间融合生长还有可能来自于重力作用下的蠕变变形或零件制造过程中来自 FDM 打印头持续向下的压力。此外，低于某一临界黏结温度时，界面融合生长现象不明显，且该临界温度可能远高于材料的玻璃化转变温度。测定 FDM 零件制造过程中的热轮廓数据，可以帮助理解相邻熔丝层间结合形成机制及其对力学性能的影响。

由此可见，FDM 制件中聚合物熔丝相邻层间黏结的形成主要是由挤出材料的热能驱动所致，界面的温度对制件黏结质量及最终力学性能方面起到重要作用，必须至少保持在材料的玻璃化转变温度(T_g)之上，以确保足够的分子扩散[8]。基于此，一些研究人员试图在沉积过程中通过主动加热界面来提高黏结强度。Partain[9]试图利用热空气流来提高界面温度，但强制气流破坏了结构的几何形状，并没有显示出强度的明显提高。还有一些研究利用辐射能对黏结界面进行主动加热。例如，Ravi 等[10]开发了一种基于近红外激光的预沉积加热方法，即在挤出物沉积之前对喷嘴附近的现有层区域局部加热。结果表明，采用激光束在形成新的层间界面地方局部预加热衬底，可将层间界面温度提高到临界温度以上，以增加分子链的互穿扩散，利用这种方法制造的零件层间结合强度增加了 50%。Luo 等[11]研究了不同激光预热温度下的层间黏合行为(Fig.3)，经过激光预热处理后，层间剪切强度得到提高。并指出，相比于提高环境温度，采用原位激光局部快速预热使分子链渗透更积极，且能够有效避免显著的体积收缩和翘曲变形。Kishore 等[12]报道了一种类似的预热方法，即在靠近打印头处安装红外灯进行现有层区域的局部预热。结果显示，预热过的 20%CF-ABS 复合样品的断裂能增加了 1 倍。

此外，一些研究学者还试图通过制件后处理工艺促进分子扩散来改善 3D 打印层间强度。例如，为了提高层间黏附力，Shaffer 等[13]通过辐射交联的方法，将聚乳酸(PLA)样品与 10%三烯丙基异氰尿酸酯(TAIC)辐射敏化剂混合，打印后暴露在电离辐射

中，促进聚合物链跨层交联以增强制件强度并降低各向异性。尽管相对于未处理的PLA样品，层内强度(*x*-方向)降低了12%，但层间强度(*z*-方向)增加了50%。以类似的方法，Sweeney等[14]对PLA丝材表面进行碳纳米管(CNTs)镀层后打印制件，然后通过微波辐射对碳纳米管进行强局部加热来焊接3D打印热塑性界面，诱导分子链发生界面扩散并使制件层间断裂强度提高了275%。

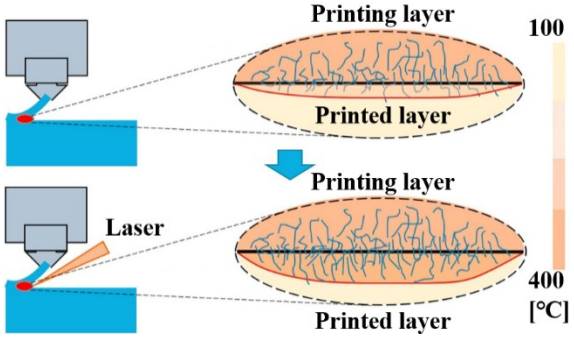


Fig. 3 Diagram of interlayer bonding during extrusion printing with laser assistance

2 层间断裂机制

了解3D打印特征的断裂机制和行为，对于改善3D打印制品堆积方向强度、设计和制造具有高断裂抗力的产品至关重要。Fig.4所示为FDM技术的2种主要断裂失效类型，分为层间断裂与层内断裂，其中层间断裂被定义为相邻离散层之间的脱粘，类似于层压复合材料层间分层；层内断裂被定义为相邻格栅路径之间的脱粘，类似于层内帘线开裂，又称线间断裂。层内断裂可以通过相邻离散层格栅角度的变化来改善，例如十字交叉[0°/90°]、逐层扭曲错位[15]、层内正弦路径[5]等，而FDM逐层堆积的力学薄弱点往往发生在相邻离散层间，层间断裂是打印制件的主要断裂形式[16]。

近年来，科研人员积极研究了3D打印制品的层间断裂模式及其断裂力学特性，并提出了一系列改善打印制品层间强度的方法。Zhang等[17]采用双缺口试样进行搭接剪切试验，测量层间搭接剪切强度以反映界面断裂情况。Young等[18]提出了一种改进的双悬臂梁(DCB)试验以测定和表征FFF打印制品的层间断裂韧性。Jia等[19]通过紧凑拉伸(CT)断裂试验测试了5种打印仿生微结构对制品断裂韧性的影响，包括砖墙结构、同心六边形结构、分支层状结构、交叉层状结构、层间旋转结构，并提出了有利的3D打印微结构模式。研究结果表明，裂纹不能沿着直线扩展，可以增加能量耗散和抗冲击性，这可以被用来改善层间和层内的抗断裂能力。Yavas等[20]基于弹塑性断裂理论分析了纤维增强打印制品的界面断裂力学特性以及层间剪切断裂行为，以预测单轴拉伸、弯曲和剪切条件下的断裂行为及裂纹扩展情况。研究结果表明，与没有纤维增强的制品相比，由于短纤维桥接引起层间黏附力局部增强导致纤维增强制品层间断裂韧性提高，表现出明显的纤维桥接增韧机制，但是其对层间拉伸极限强度的影响不明显。

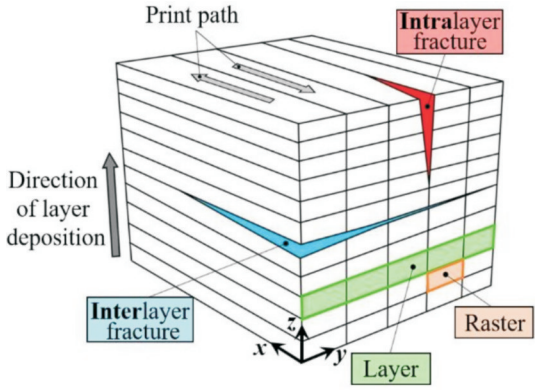


Fig. 4 Fracture failure modes of FDM

大量研究人员试图通过聚合物熔丝与增强体相结合来提高FDM制件的强度和刚度，如短切玻璃纤维[21]、短切碳纤维[22]、连续碳纤维[23]、碳纳米管[24]、氧化锌纳米棒[25]和黄麻植物纤维[25]等。在大多数情况下，虽然增强材料的添加可以提高力学性能的上限，但受到界面薄弱结合力的限制，其作用仍然有限，层间断裂问题仍然是困扰3D打印领域一个难以逾越的难题。此外，Young等[18]指出3D打印零件即使在用碳纤维(CF)增强时也可能表现出较差的断裂韧性，除非仔细选择了工艺参数，如纤维与基体之间的强化学结合、纤维预处理(如等离子处理[11]、上浆预浸处理[26])、挤出温度等，以提高纤维与基体的界面结合情况和均匀分散情况。

因此，一些学者试图尝试摆脱3D打印逐层平面堆积的固有工艺，例如直写工艺，其在非平面基板上打印天线结构方面特别成功[27]。FFF打印系统使用类似的方法在曲面上进行非平面沉积，以将应力从平面界面转移到主要结构上，在制备薄的弯曲零件(壳体)时，比平面层FFF系统更有利[28]。一种六自由度的多轴自由沉积系统也正在开发中，该系统可以在零件芯层表面的多个面上(包括Z向曲面)沉积增强纤维材料(Fig.5)，从而有效地创建了零件外部的“表皮”，提高了力学性能[29]。类似地，王玲课题组[30]开发了一种多自由度连续纤维复合材料打印

系统，该系统包括 1 个六轴机械臂和 1 个回转/翻转打印平台，以完成 *Z* 向打印(对于采用 *X*-*Y* 平面逐层叠加的常规挤出打印工艺，*Z* 向指离散层和打印台的法向)，可实现 *X*/*Y*/*Z* 全方位的离散层叠加，从而增强常规工艺难以解决的 *Z* 向强度问题，改善打印制件的机械各向异性。Shang 等[5]利用六自由度机械臂挤出打印系统通过调整正弦曲线路径的振幅增量实现了非平面(*Z* 向)正弦层打印。可见实现 *Z* 向打印是改善 3D 打印制件机械各向异性和堆积方向强度的关键。

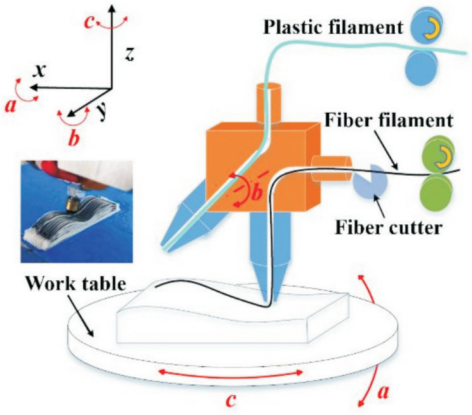


Fig. 5　Schematic of 6-DOF continuous fiber composite extrusion system and its curved surface layer deposition

3　打印成型效率

打印成型效率低是 3D 增材制造技术的另一个不可回避的缺点。制造时间和打印质量存在此消彼长的矛盾关系，这归结于其“由点成线、由线成面、由面成体”的逐步增材制造模式，目前有几种不同的方法被提出以提高其生产速度。例如，Go 等[31]报道了一种熔融沉积打印机，其运行速度比普通熔丝制造(FFF)打印机快 7 倍。FFF 打印技术采用的长丝进给机制，丝材与滚子滑动摩擦使挤出速度存在上限。而该打印机引入了螺母驱动螺纹丝材挤出熔融，类似于丝杠线性致动模式，可以提高挤出速度，并采用激光辅助加热挤出熔丝以适应高的挤出速度。挤出速度的提升还可以通过改变长丝进给这一常规机制，如采用柱塞或螺杆直接驱动熔融物料，以柱塞速度或螺杆转速来调控挤出速度，同时也打破了长丝挤出的材料限制，如 Fig.6 所示。当然单纯增加挤出速度是远远不够的，还要与路径速度、挤出温度、基层温度等过程参数相匹配，从而获得更好的几何精度和层间结合强度。

改变具有恒定进给速度的平面线性打印路径(如变速打印、曲线路径等)，保证表面光洁度和尺寸精度的情况下使堆积时间最短化，可以获得更快的打印速度[32]。当然，要想实现复杂的非平面轨迹路径，需要特殊的路径规划算法和更多的机构运动自由度，这会增加控制系统的成本。Giberti 等[33]提出了一种基于 Bézier 曲线的原始路径规划算法，并开发了一种五自由度的机械系统用于打印平台的路径轨迹移动，包括 3 个平移自由度和 2 个旋转自由度。研究发现，具有 5 个自由度的动力学运动可以减少 3D 打印制件表面的阶梯效应、实现角度沉积、减少支撑材料使用，为传统 3 个自由度打印机无法实现的新路径生成提供了可能性，降低了生产时间。

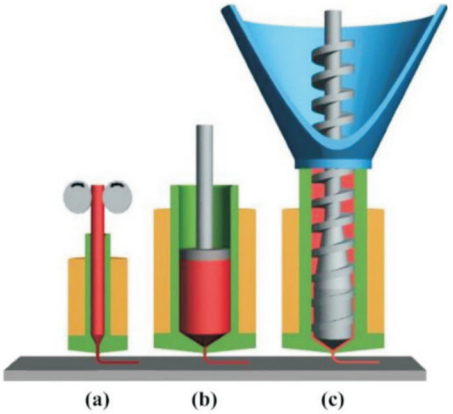


Fig. 6　Overview extrusion based 3D printing principles
(a): filament based extrusion; (b): syringe based extrusion; (c): screw based extrusion[32]

此外，机器学习技术也被积极用于优化打印工艺参数，以提高生产率和打印质量。然而，尽管使用了这种先进的智能技术，由于熔融沉积成型的固有局限，弱层间强度和各向异性特性仍然存在[34]。

目前，3D 打印效率的突破主要集中在立体光固化技术(Stereolithography, SLA)领域，打印速度可提升 1~2 个数量级，例如连续液界制造技术(CLIP)[35]、容积 3D 打印技术[36]、投影立体光刻技术(Projection stereolithography)[37]，以及针对 CLIP 技术改进的高区域快速打印技术(HARP)[38]、双波长光源直写光刻技术[39]和注射连续液界制造技术(iCLIP)[40]。尽管如此，这些新技术仍无法兼顾材料的多样性。

4　注射打印技术

在挤出打印技术领域，为了改善 3D 打印零件层间强度差、打印效率低的问题，最近的研究报道了先打印壳体后注入材料的方法，如 Fig.7 所示，在此称之为注射打印技术(Injection printing)。Belter 等[41]描述了一种填充复合的打印方法(Fig.7(a))，即在打

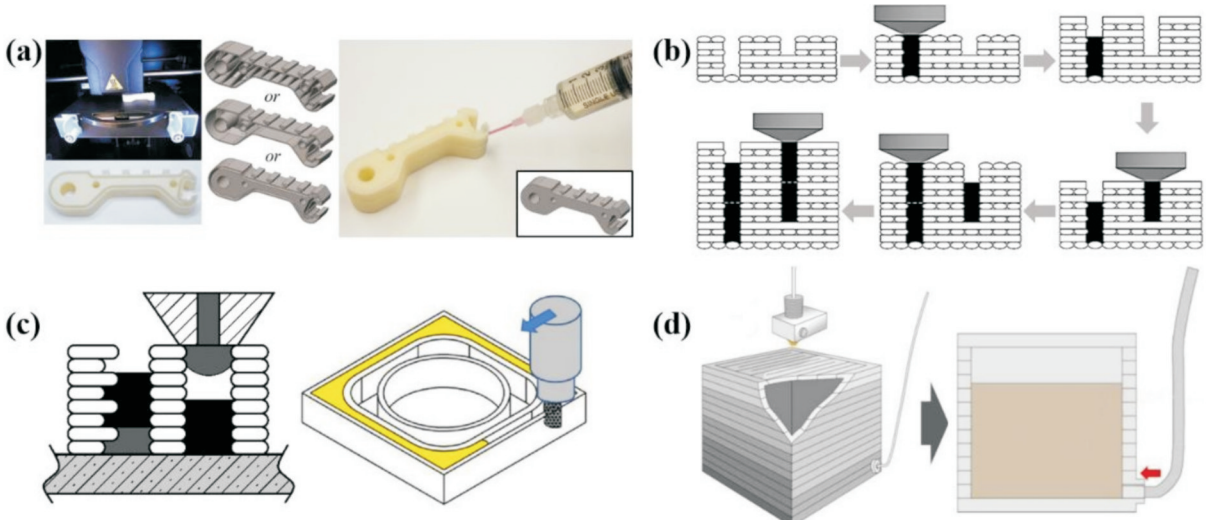


Fig. 7 Overview injection printing principles
(a): “voids” injection; (b): “Z-Pinning” injection; (c): “cavity” injection;(d): “shell-core” injection

印零件中合理设置空隙，然后用高强度液体树脂(例如，环氧树脂)填充空隙，将零件强度和刚度分别提高45%和25%，当然该方法涉及第二材料。Duty等[2]提出了一种“Z-销”打印的方法(Fig.7(b))，在打印堆积方向(*Z*向)上预留销孔，后将熔丝注入预先确定的销孔中以缝合多层，结果表明有销制品层间强度比无销制品提高了3.5倍以上。然而，相较于填充量100%的普通打印制品，其各个方向的极限抗拉强度均明显下降。与此同时，打印机应高度自动化以查找和填充所有垂直销孔矩阵，这需要高精度控制且延长了制造时间。为了改善“Z-销”打印的生产效率，Kazmer等[42]将多销孔结构拓展为一面敞口的型腔结构(Fig.7(c))，即预打印具有敞口型腔的薄壳，然后沿型腔路径以较高流速挤出充填内腔。该方法将打印时间减少到常规FFF打印机的1/4，但由于充填敞口型腔模式，使注入芯的体积收缩明显易产生空隙和热变形，因此无法有效提高层间强度。与Belter的方法类似，Son等[43]将敞口型腔改为封闭模腔(Fig.7(d))，预打印热塑性薄壳，后注入液态热固性壳芯并固化。该策略有效改善了打印制品的机械强度各向异性和生产效率，打印时间减少到常规FFF打印机的1/2。然而，该方法涉及热固性塑料与热塑性塑料异质界面结合，因此需要预先化学抛光薄壳内壁，且化学抛光、树脂固化等工序繁琐。上述方法均未跳脱出FFF打印技术的范畴，严格意义上讲，这几种注射打印方式并未真正用到“注射”动作，与注射成型制品相比，在制品质量(包括强度和精度)和生产效率方面仍存在不小差距。尽管如此，将注射成型引入到增材制造技术中，是解决打印强度和速度限制的重要举措，应用前景广阔。

基于此，笔者所在团队提出“预打印壳体-后注塑壳芯”的注射模塑打印策略，实现聚合物多维度高效高强增材制造，即构建以打印为衣、模塑为核的无模注射成型工艺，结合注射成型与3D打印各自优势，实现工业制品的大规模高性能定制[44-46]。其基本工艺制程如Fig.8所示，即：打印壳体-螺杆后

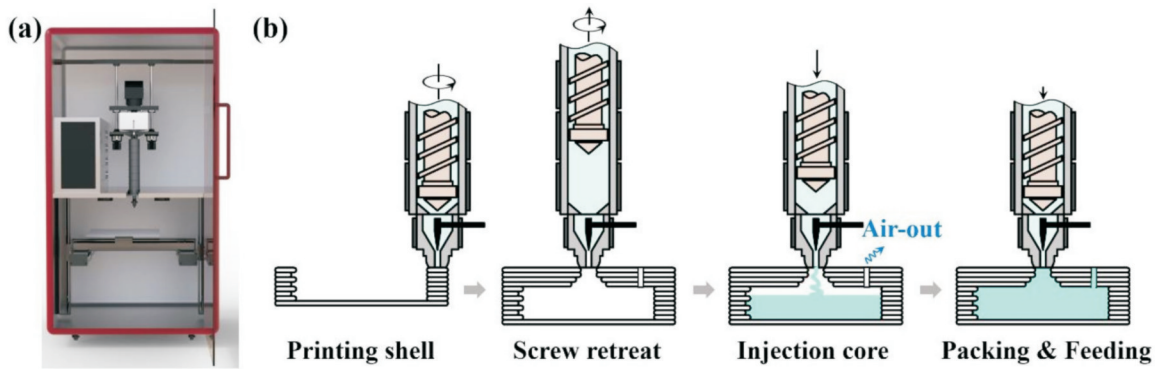


Fig. 8 (a)Injection printing prototype and (b)its process principle

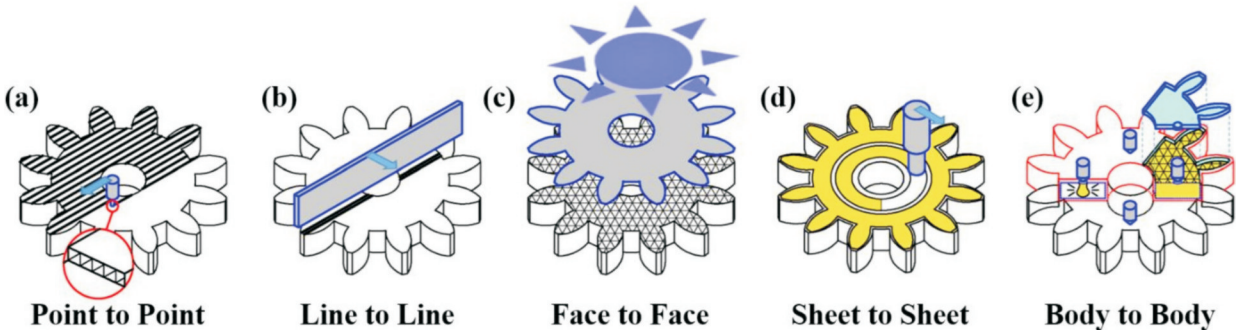


Fig. 9 Comparison between injection printing and common printing methods

退-注射壳芯-保压补缩。

几种注射打印与常见打印方式的对比如 Fig.9 所示。正常来讲，运动维度越小，打印效率越高，FDM 技术(Fig.9(a))需要 3 个维度运动，选择性激光烧结(Fig.9(b))需要 2 个维度运动，立体光固化成型(Fig.9(c))需要 1 个维度运动，前面提到的内腔挤注打印(Fig.7(c)和 Fig.9(d))需要 2 个维度运动，而笔者团队提出的注射模塑打印(Fig.8(e))，打破逐层逐步堆积的固有模式，以模塑成型为主导，可算作 0.5 个维度。因此，传统的 3D 打印方法(如 Fig.9(a)，Fig.9(b)和 Fig.9(c))仅限于以逐层堆积方式构建材料，这更适合被认为是“2.5D 成型”，而以“体到体”的模塑成型方式(Fig.9(d)和 Fig.9(e))构建材料可以实现真正的“3D 快速成型”，有望突破高分子材料挤出增材制造技术有限打印强度和打印效率的困境。

5　结语与展望

(1) 挤出增材制造技术，正朝着高强度、高精度、高效率等方面发展。探明和理解挤出打印特征的层间结合机理和断裂机制成为目前改善 3D 打印制件机械强度和各向异性的主要手段，诸如通过提高界面温度、添加交联助剂等以促进跨层交联，以及通过结构设计和路径规划、增强材料填充等以阻碍裂纹扩展等，均取得了有益效果而被普遍应用。

(2) 3D 打印逐层逐步增材制造的固有模式带来的强度和效率问题，是限制挤出打印技术发展和广泛应用的主要内因，减少运动维度是提高生产效率的重要手段和发展方向。积极寻求打印模式的改进和创新有望改变这一现状，随着技术方法、控制算法、匹配材料等方面的进化，未来以高速高强为目标的挤出增材制造技术，将会在实际应用领域掀起一场革命性的技术升级。

(3) 注射打印技术是一种非常有前景的增材制造技术，是解决目前高分子增材制造技术打印强度差、打印效率低的“固有瓶颈”问题的有效手段。作为一项新技术，由此衍生出的打印与注射一体化的若干关键科学问题和工程问题仍需要进一步解决和完善，诸如“壳-芯”同质界面复合与断裂失效机理、壳芯注射过程界面受力规律及壳壁变形机制、工艺过程对注射打印制品各向同性影响规律、打印与注射流量/流率的差异化难题、小注射装置与大注射容积及小螺杆长径比与大塑化能力之间的矛盾等。

参考文献：

[1] Zaldivar R J, Witkin D B, Mclouth T, *et al*. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D- Printed ULTEM® 9085 material [J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 71-80.

[2] Duty C, Failla J, Kim S, *et al*. Z- Pinning approach for 3D printing mechanically isotropic materials [J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 175-184.

[3] Durgun I, Ertan R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost [J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20: 228-235.

[4] Cuan- Urquizo E, Barocio E, Tejada- Ortigoza V, *et al*. Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: a review on the experimental, computational and theoretical approaches [J]. Materials, 2019, 12: 895.

[5] Shang J, Tian X, Luo M, *et al*. Controllable inter- line bonding performance and fracture patterns of continuous fiber reinforced composites by sinusoidal- path 3D printing [J]. Composites Science and Technology, 2020, 192: 108096.

[6] Stava O, Vanek J, Benes B, *et al*. Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects [J]. ACM Trans Graph, 2012, 31: 48.

[7] Turner B N, Robert J S, Gold S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling [J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20: 192-204.

[8] Sun Q, Rizvi G M, Bellehumeur C T, *et al*. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments [J]. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14: 72-80.

[9] Partain S. Fused deposition modeling with localized pre-deposition heating using forced air [D]. Montana: Montana State University, 2007.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Shaffer S, Yang K, Vargas J, *et al*. On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation [J]. Polymer, 2014, 55: 5969-5979.

[14] Sweeney C B, Lackey B A, Pospisil M J, *et al*. Welding of 3D-printed carbon nanotube-polymer composites by locally induced microwave heating [J]. Science Advances, 2017, 3: e1700262.

[15] Yang Y, Chen Z, Song X, *et al*. Biomimetic anisotropic reinforcement architectures by electrically assisted nanocomposite 3D printing [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1605750.

[16] 汤磊, 刘腾达, 单存清,等. 3D打印个性化大腿假肢接受腔形性协同制造策略 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 172-178.
Tang L, Liu T D, Shan C Q, *et al*. Collaborative manufacturing strategy of shape and performance for the personalized 3D printing transfemoral prosthesis socket [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 172-178.

[17] Zhang W, Cotton C, Sun J, *et al*. Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile- butadiene- styrene composites fabricated by fused deposition modeling [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 137: 51-59.

[18] Young D, Wetmore N, Czabaj M. Interlayer fracture toughness of additively manufactured unreinforced and carbon- fiber-reinforced acrylonitrile butadiene styrene [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 508-515.

[19] Jia Z, Wang L. 3D printing of biomimetic composites with improved fracture toughness [J]. Acta Materialia, 2019, 173: 61-73.

[20] Yavas D, Zhang Z, Liu Q, *et al*. Interlaminar shear behavior of continuous and short carbon fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 204: 108460.

[21] Zhong W, Li F, Zhang Z, *et al*. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 301: 125-130.

[22] 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.

[23] Kabir S M F, Mathur K, Seyam A F M. A critical review on 3D printed continuous fiber- reinforced composites: history, mechanism, materials and properties [J]. Composite Structures, 2020, 232: 111476.

[24] Gardner J M, Sauti G, Kim J W, *et al*. 3- D printing of multifunctional carbon nanotube yarn reinforced components [J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 38-44.

[25] Torrado A R, Shemelya C M, English J D, *et al*. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing [J]. Additive Manufacturing, 2015, 6: 16-29.

[26] 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.

[27] Adams J J, Duoss E B, Malkowski T F, *et al*. Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces [J]. Advanced Materials, 2011, 23 : 1335-1340.

[28] Chakraborty D, Aneesh Reddy B, Roy Choudhury A. Extruder path generation for curved layer fused deposition modeling [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40: 235-243.

[29] Kubalak J R, Wicks A L, Williams C B. Using multi-axis material extrusion to improve mechanical properties through surface reinforcement [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13: 32-38.

[30] 刘腾达, 汤磊, 孙畅宁, 等. 3D打印连续纤维复合假肢接受腔Z向强化制造策略 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 267-275.
Liu T D, Tang L, Sun C N, *et al*. Z- direction enhancing manufacturing strategy for 3D printing prosthetic socket of continuous fiber composite[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 267-275.

[31] Go J, Schiffres S N, Stevens A G, *et al*. Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high- throughput system design [J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 1-11.

[32] Rane K, Strano M. A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts [J]. Advances in Manufacturing, 2019, 7: 155-173.

[33] Giberti H, Sbaglia L, Urgo M. A path planning algorithm for industrial processes under velocity constraints with an application to additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 160-167.

[34] Goh G D, Sing S L, Yeong W Y. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges [J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54: 63-94.

[35] Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, *et al*. Continuous liquid interface production of 3D objects [J]. Science, 2015, 347: 1349-1352.

[36] Kelly B E, Bhattacharya I, Heidari H, *et al*. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction [J]. Science, 2019, 363: 1075-1079.

[37] Grigoryan B, Paulsen S J, Corbett D C, *et al*. Multivascular networks and functional intravascular topologies within biocompatible hydrogels [J]. Science, 2019, 364: 458-464.

[38] Walker D A, Hedrick J L, Mirkin C A. Rapid, large- volume, thermally controlled 3D printing using a mobile liquid interface [J]. Science, 2019, 366: 360-364.

[39] De Beer M P, Van Der Laan H L, Cole M A, *et al*. Rapid, continuous additive manufacturing by volumetric polymerization inhibition patterning [J]. Science Advances, 2019, 5: eaau8723.

[40] Lipkowitz G, Samuelsen T, Hsiao K, *et al*. Injection continuous liquid interface production of 3D objects [J]. Science Advances, 2022, 8: eabq3917.

[41] Belter J T, Dollar A M. Strengthening of 3D printed fused deposition manufactured parts using the fill compositing technique [J]. Plos One, 2015, 10: e0122915.

[42] Kazmer D O, Colon A. Injection printing: additive molding via shell material extrusion and filling [J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101469.

[43] Son J, Yun S, Park K, *et al*. Isotropic 3D printing using material extrusion of thin shell and post-casting of reinforcement core [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 102974.

[44] 鉴冉冉, 贾维辉, 郭鹏, 等. 一种注射3D打印装置: 中国, 113211785A[P]. 2021-08-06.

[45] 鉴冉冉, 林广义, 史忠鹤, 等. 一种桌面级3D打印和复印装置及方法: 中国, 112571791B [P]. 2021-03-30.

[46] 鉴冉冉, 林广义, 史忠鹤, 等. 一种具有增强骨架的异步3D打印方法及装置: 中国, 111823581B[P]. 2020-10-27.

Progress of High Productivity and High Strength Extrusion-Based Additive Manufacturing Technology

Jiawei Zhu[1], Shizheng Huang[1], Wei Pan[1], Mohini Sain[2], Weimin Yang[3], Ranran Jian[1,2]

(*1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Centre for Biocomposites and Biomaterial Processing, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto ON M5S 3B3, Canada;3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

ABSTRACT: Additive manufacturing has distinct advantages in the fields of on-demand manufacturing, personalized customization, special- shaped components, etc. It is an important research direction of advanced manufacturing technology. Compared with traditional manufacturing methods (such as subtractive manufacturing and injection molding), the mechanical properties of additive manufacturing products are generally poor and the production efficiency is low, which limits their wider application to load-bearing parts that adapt to complex working conditions. As the key evaluation index of manufacturing technology, the productivity and quality indicators always lead the development direction of macro/micro scale extrusion-based additive manufacturing technology. Due to the inherent mode of layer by layer incremental manufacturing, poor strength and low efficiency have become two major challenges that limit its engineering application. In this paper, the efforts of researchers in improving 3D printing strength of extrusion-based printing were discussed from the aspects of interlayer bonding mechanism and interlayer fracture mechanism of 3D printing; and the latest progress in improving printing efficiency was reported; finally, several innovative and developing injection printing cutting-edge technologies were reviewed, and their technical principles, innovative characteristics, advantages and disadvantages were analyzed. The introduction of injection molding technology into additive manufacturing technology is expected to become an effective technical approach to solve the two major problems, providing a reference for future research on extrusion additive manufacturing and promoting the formation of new technical solutions.

Keywords: additive manufacturing; extrusion-based printing; printing strength; printing efficiency; injection printing