

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.026

纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景

明越科^{1,2,3,4}, 黄润鹏¹, 范英¹, 王钊¹, 信成浩¹, 王奔^{2,3,4}

(1. 比亚迪汽车工业有限公司汽车工程研究院, 广东深圳 518000; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;

3. 西安交通大学高端装备研究院, 西安 710115; 4. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054)

摘要: 针对纤维增强树脂基复合材料传统制造工艺面临的技术瓶颈, 简述了该类复合材料3D打印技术的国内外研究进展, 系统性总结出“短纤维/热塑性→短纤维/热固性→连续纤维/热塑性→连续纤维/热固性”的纤维增强复合材料3D打印发展趋势。通过国内外不同工艺方案的审视对比, 凸显出纤维增强复合材料3D打印在高性能材料替代利用、减轻工艺复杂性、提升生产灵活性以及降低成本等多方面的核心潜力, 揭示了这项技术在汽车制造产业链中的应用前景, 指出了纤维增强复合材料3D打印技术的后续设计应用与创新发展趋势。

关键词: 短纤维; 连续纤维; 复合材料; 3D打印; 汽车应用

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0184-08

Research progress and automotive application prospects of 3D printed fiber reinforced composites

MING Yueke^{1,2,3,4}, HUANG Runpeng¹, FAN Ying¹, WANG Zhao¹, XIN Chenghao¹, WANG Ben^{2,3,4}

(1. Automotive Engineering Research Institute, BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. iHarbour Academy of Frontier Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710115, China; 4. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract : Aiming at the technical bottlenecks faced by the conventional fabrication process of fiber reinforced polymer composites, the domestic and international research progress of 3D printing technology in the field of the composites were briefly described. The development trends of the 3D printed fiber reinforced composites were systematically summarized, spanning from short fiber/thermoplastics, short fiber/thermosets, to continuous fiber/thermoplastics and continuous fiber/thermosets. By reviewing and comparing different process schemes at home and abroad, the core potentials of the composite 3D printing in terms of advanced material substitution, reduction of process complexity, enhancement of production flexibility, and cost savings, were highlighted. The broad prospects of this technology among the automotive manufacturing chains were revealed. Further design and application, and innovative progressions of the composite 3D printing in the future were pointed out.

Keywords : short fiber ; continuous fiber ; composite ; 3D printing ; automotive application

纤维增强树脂基复合材料作为高性能非金属复合材料的代表之一, 是由各类纤维增强体(例如碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、陶瓷纤维、天然纤维等)与聚合物基体复合而成^[1-3]。它的聚合物种类按照成型和性能又划分为两种: 热塑性塑料, 即未交联聚合物, 在负载下具有较高强度及应变, 加热即软化或熔融, 经反复加热和冷却循环后仍具有再成型的能力; 热固性树脂, 即高度交联的聚合物, 固化(硬化)后表现出优异的综合力学性能和低应变, 由于分子链间的深度聚交联, 不具备再次成型能力^[4]。

以连续碳纤维(CCF)增强热固性环氧树脂复合材料为例: 一方面, CCF依靠其高强度、高模量、低密度、耐疲劳和抗冲击等特点, 成为了纤维增强复合材料的首选纤维; 另一方面, 热固性环氧树脂由致密三维结构内高度交联的网状大分子构成, 其强度、刚度、硬度以及耐热性等均得到显著增强^[5-6]。因此, 兼具了碳纤维增强体和热固性树脂基体双重性能优势的CCF/环氧树脂复合材料, 凭借其高比强度和比模量、轻质、耐腐蚀/疲劳/温度/冲击及可设计性等优势, 在替代金属、节能减排、复杂结构、特殊功能用材等多个方面发挥

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005395), 陕西省重点研发计划项目(2022-JBGS3-09)

通信作者: 王奔, 博士, 副教授, 硕士生导师、联合博士生导师, 研究方向为复合材料增材制造、复合材料雷击防护

收稿日期: 2024-08-11

引用格式: 明越科, 黄润鹏, 范英, 等. 纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 184-191.

MING Yueke, HUANG Runpeng, FAN Ying, et al. Research progress and automotive application prospects of 3D printed fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 184-191.

着愈发重要的作用^[7-9]。这些优异的性能特点使得纤维增强复合材料不仅符合了各类军/民用飞行器结构向大跨度、高耸、重载、轻质、高强以及在各类极端恶劣环境中工作应用的需要,同时也能够满足现代建筑施工及机械制造行业发展的要求,从而被越来越广泛地应用于风电叶片、体育休闲、航空航天、压力容器、混配模成型、汽车交通、碳碳复材、建筑、电子电气、船舶、芯材等重要领域中^[10-11]。进入21世纪以来,纤维增强复合材料的市场应用范围不断扩大、销售收入快速增长^[12]。根据图1a统计数据显示,2022年全球复合材料应用需求总量达到约208 kt,风电叶片行业由于对玻璃钢复合材料的巨大需求占据最大份额(53.4 kt, 25.7%),高端汽车用品排名第六,需求量和所占份额分别达到14.6 kt和7.0%。而且2022年全球复合材料市场的总体销售规模已超过260亿美元,如图1b所示。其中,由于高需求和高客单价,航空航天成为复合材料构件最大的终端市场,销售额和所占份额分别达到12.25亿美元和46.7%,而汽车交通行业凭借销售额11.6亿美元和所占份额4.4%仍位列第六名^[13-14]。因此,高性能纤维增强复合材料的前沿创新与拓展应用,以及其工业化生产的技术、效率和规模,对于现代新能源汽车产业的发展进步及推广普及,拥有着极其重要的战略地位和经济价值,不仅

考验了汽车行业内的技术创新能力,更是衡量一个国家工艺材料基础与科技竞争力的重要指标之一^[15-17]。

传统纤维增强复合材料的成型工艺主要包括手糊成型、模压成型、缠绕(编织)成型、树脂传递模塑成型、自动铺丝/带成型等^[18-20]。通过以上成型工艺制备得到复合材料预成型体后,其中的热固性树脂基样件还需要进一步通过加热、加压或辐射化学等方式,使得预聚物单体以及其他增韧、增稠、活性材料共同完成固化反应,从而促进纤维与树脂之间的浸渍结合,控制表面质量及孔隙,提升成品的纤维含量和力学性能等。截至目前,适用于纤维增强热固性复合材料的固化源主要分为热固化、光固化、 γ /X射线固化、微波固化等^[21-24]。

然而,在纤维增强复合材料传统成型及固化工艺中,始终存在工序步骤繁杂、制备周期长、生产及固化设备与使用成本高等难题。同时,芯模或底模的硬性需求以及较低的自动化程度,使得纤维增强复合材料传统成型及固化工艺在高精度复杂构件(例如镂空结构、拓扑结构、点阵结构、晶格结构等)方面的工艺可行性低,甚至根本无法实现。据统计,由于缺乏行业创新和受到现有成型及固化方式制约,仅纤维增强复合材料的制造成本就达到了其整个价值链的70%以上^[25-26]。因此,寻求新型的复合材料低成本、无模具、一体化成型及固化工艺,成为了促进纤维增强复合材料进一步发展与未来应用的重要举措和必然趋势。

1 国外复合材料3D打印研究进展

3D打印在复合材料领域的应用尚处于起步阶段。在复合材料终端制造市场中,3D打印零部件所占份额不足1%,但该技术凭借其成型工艺的先进性,在大多数复合材料行业垂直领域拥有巨大的发展机遇与应用潜力^[27-28]。随着3D打印技术的创新发展及其在复合材料领域中日益增长的拓展趋势,国外研究人员将3D打印技术与复合材料相结合,已经提出了多种高性能复合材料增材制造工艺并获得广泛的研究关注^[29]。

1.1 短纤维增强热塑性复合材料3D打印

短纤维增强复合材料的3D打印凭借无须增设单独喂料系统或额外加热端、兼容常规3D打印设备、对材料的加工工艺性好、能够适应多种复杂形状和需求等优势,成为了最早出现以及最先发展成熟的一类复合材料增材制造技术^[30-32]。它主要包含了短纤维增强熔融沉积成型(FDM)、短纤维增强选区激光熔化(SLM)、短纤维增强光固化等工艺类型,并且已被众多国外3D打印相关企业,例如美国3D Systems、荷兰Ultimaker及德国EOS等,通过多版本的设备迭代和材料研发,成功实现了商业化应用。

其中,在2014年,美国橡树岭国家实验室 Tekinalp 等^[33]率先将短碳纤维(SCF)引入热塑性丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)共聚物中,SCF长度为0.2~0.4 mm。研究人员尝试以此作为3D打印原料并通过FDM设备挤出打印,从微观结构和力学性能两个方面的研究结果表明:与传统模压成型ABS样件相比,3D打印SCF/ABS样件的拉伸强度和拉伸弹

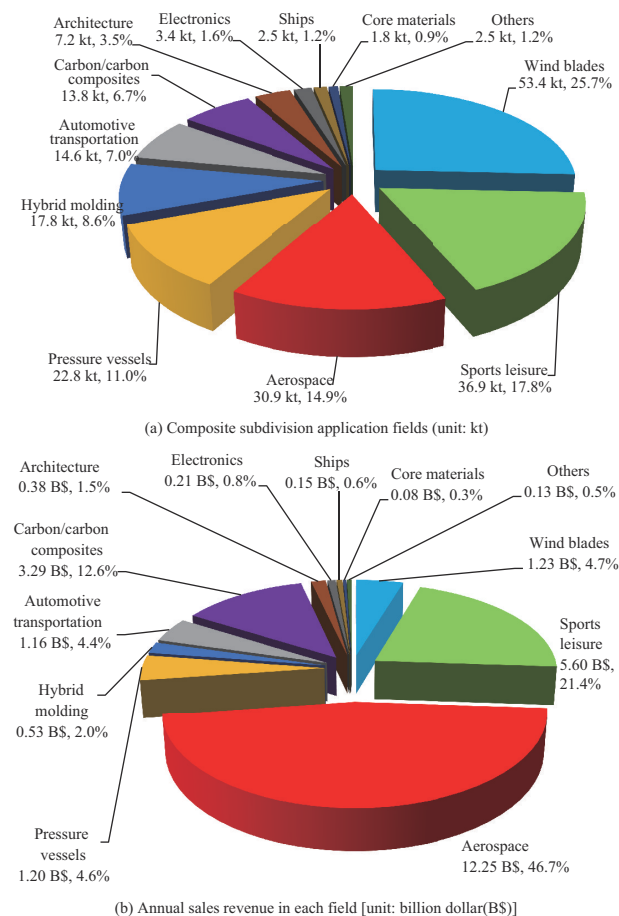


图1 2022年全球复合材料的应用领域及销售收入

Fig. 1 Application fields and sales revenue of global composites market in 2022

性模量分别提升了115%和700%。

美国德克萨斯理工大学Ning等^[34]测试了添加不同含量和长度的短纤维对改善3D打印样件力学性能的影响规律,分别以SCF和ABS颗粒作为增强体和热塑性树脂基体,制备了适用于FDM工艺的SCF/ABS丝材。通过力学试验机测试了3D打印SCF/ABS复合材料样件的拉伸性能,结果表明:单向拉伸强度在SCF质量分数为0%~5%下与SCF添加量呈正相关关系,并在SCF质量分数为5%时达到最大值,即42 MPa;但它随纤维含量的继续增加而发生明显下降,在SCF质量分数为10%时降低至34 MPa。关于样件失效模式及原因,采用了扫描电子显微镜对加载后SCF/ABS样件的断裂界面进行了深入观察和分析。整体的工艺流程依次分为“颗粒粉碎→搅拌混合→丝材挤出→FDM打印→力学测试→微观观察”,为早期短纤维增强复合材料的增材制造及性能表征提供了较为完整的系统性研究方案。

1.2 短纤维增强热固性复合材料3D打印

由于热塑性塑料基体的性能局限性,美国哈佛大学Compton等^[35]提出了一种基于热固性环氧树脂的“油墨”材料,采用纳米黏土、SiC晶须及短纤维增强后,利用直写技术(DIW)进行3D打印成型。通过多向拉伸测试结果表明:所制备SiC/SCF增强环氧树脂样件的横向拉伸强度及拉伸弹性模量最高达到43.9 MPa和8.06 GPa,纵向拉伸强度及拉伸弹性模量最高达到66.2 MPa和24.54 GPa。此外,研究人员受巴尔沙木结构启发,通过控制多比例、高长径比纤维增强材料的排列,制造出结构和性能可控的多种仿生复合材料样件,如轻质蜂窝、桁架结构等。

意大利米兰理工大学Griffini等^[36]和Invernizzi等^[37]提出了一种通过光固化丙烯酸树脂和热固化环氧树脂共配获得的顺序互穿聚合物网络(IPN)材料,并将其作为基体,通过紫外光和热处理双重固化协助的3D打印技术,制备短纤维增强复合材料结构件。研究人员进行了差示扫描量热法和动态力学试验分析,以研究光交联和热交联反应对IPN系统发展的影响。最终,IPN树脂顺利装载了SCF,并成功实现了紫外线辅助3D打印成型的光/热协同双固化工艺,其SCF增强样件最高拉伸强度和拉伸弹性模量分别达到41.7 MPa和4.4 GPa。此外,还对采用短玻璃纤维(SGF)和SCF增强IPN材料的复杂构件打印可行性进行了验证。

1.3 连续纤维增强热塑性复合材料3D打印

尽管短纤维增强复合材料的3D打印在低成本、易加工以及可塑性等多方面具有明显的工艺优势,并且对比纯塑料3D打印样件,已经取得了一定的增强效果。但是相比于传统连续纤维复合材料预浸料制品,短纤维增强复合材料的3D打印仍然存在两大局限性:一方面,短纤维的长径比低,在复合材料样件内的应力分配、传递及承载能力受限,而且短纤维通常随机添加于打印丝材中,它的纤维取向可控性、一致性不足,从而大幅减弱了实际的性能提升幅度;另一方面,短纤维的分散性差、团聚性强,难以均匀分散并有效填充

复合材料孔隙缺陷,同时其添加导致聚合物基体黏性增加,打印可行性降低,故纤维含量相对较低(质量分数不高于15%)^[38~40]。

为此,国外不少研究学者又尝试将连续纤维引入到3D打印技术当中,以期望大幅提升复合材料3D打印零部件的力学性能^[41~42]。在2014年,美国圣地亚哥举办了SolidWorks World 2014大会。其间,美国Markforged公司于会上首次发布了以高强度连续纤维为增强材料的复合材料3D打印机“Mark one”^[43]。它基于预浸丝熔融共挤出原理,采用双喷头设置,其中一个打印常规热塑性丝材,包括ABS、聚乳酸(PLA)、聚酰胺(Polyamide, PA)等,另一个喷头加热熔融挤出连续纤维增强(碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等)的热塑性复合材料预浸丝。目前,其制备CCF/PA复合材料样件拉伸强度及拉伸弹性模量分别大幅增加至800 MPa和51 GPa,并随后在2016~2020年期间,又陆续推出了Mark Two, Onyx Pro, X系列等多种桌面级和工业级连续纤维3D打印设备。

东京理工大学和日本大学研究人员报告了一种用于连续纤维增强热塑性塑料的压辊辅助3D打印技术^[44~46]。该技术基于干纤维原位浸润原理,通过双通道分别向喷头输送连续纤维与热塑性基体,干纤维在喷头内与熔融树脂浸渍复合并一同挤出,再通过压辊辅助系统作用完成压实黏附。利用该技术原理搭建的试验平台,研究人员采用CCF和PA原材料,制备了在有/无压辊辅助条件下的单轴拉伸样件,拉伸测试结果表明:无压辊打印CCF/PA复合材料样件的拉伸强度为777 MPa,压辊辅助作用将其进一步提升至1 031 MPa,而且孔隙率也从原来的10%降低至约3%。此外,研究人员还制备了具有蜂窝、菱形、矩形和圆弧核心形状的多种轻质夹层结构,并通过三点弯曲测试评估了这些结构不同方向的功能特性及性能强化效果。

德国卡尔斯鲁厄理工学院Li等^[47~49]在连续纤维增强热塑性复合材料的3D打印中,使用微波加热代替传统的电阻加热,为高性能复合材料的增材制造提供了一种新型熔融挤出方法。在消除了固有的慢速和接触所需的传热缺点情况下,微波带来的瞬时和体加热优势允许以更高的速度制造复合材料零部件。研究人员利用对不同纤维含量样件测量得到的介电常数,建立起纤维与树脂基体之间的微尺度微波辐射和传热模型,模拟了移动复合材料长丝在常规加热和微波加热过程中的皮芯温差,揭示了温差、长丝直径和打印速率之间的关联影响关系。在保持不同打印速率条件下,所制备CCF/PA样件的拉伸强度分别达到356 MPa (10 mm/s), 358 MPa (20 mm/s), 313 MPa (35 mm/s)和347 MPa (50 mm/s)。

1.4 连续纤维增强热固性复合材料3D打印

常规的热塑性塑料(包括ABS, PLA, PA等)的物理力学性能不足,存在强度、硬度、刚性相对较低,耐温性、耐腐蚀性、耐疲劳性较差,可靠性低,产品寿命短等缺陷。而部分特殊的聚芳醚酮系热塑性化合物[包括聚醚酮(PEK)、聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酮酮(PEKK)、聚醚醚酮酮(PEKKK)等]凭借醚

键、酮键直接和碳基衔接,其力学性能及耐温性虽然能够得到有效提高,但是300~400℃甚至以上的超高成型温度并不适用于普通3D打印设备、加热源以及操作环境。此外,热塑性基体与纤维丝束之间的界面相容性差、缺乏化学反应以及存在的不良润湿行为等,也导致了纤维/树脂的弱界面结合和高孔隙含量,从而造成热塑性复合材料样件层间/界面性能较低,断面存在明显的缝隙开裂缺陷、层间裂纹扩展和大量的纤维拔出等现象^[50-51]。因此,它们始终未能完全发挥出连续纤维增强复合材料与3D打印的性能和技术优势,一定程度限制了其普及推广与工业化进程。

不同于未交联、仅依靠分子间作用力结合的热塑性塑料,热固性聚合物分子链间通过深度化学键合,形成了牢固的三维空间网络大分子结构,从而能够表现出更高的强度、硬度,以及更低的应变。因此,进一步探索性能更优、实用性更强的连续纤维增强热固性复合材料的3D打印成型工艺及固化方式,成为国外目前复合材料与增材制造领域的研究热点^[52-54]。

2015年,美国Continuous Composites公司开发出一种连续纤维3D打印技术(CF3D)^[55]。该技术采用连续干纤维丝束在打印头内部在线浸渍光固化树脂预聚物,通过控制打印头按照设计轨迹移动,使浸渍完成的纤维/树脂复合丝束从打印喷嘴挤出,并在紫外光辐照下即时完成定型及固化反应,从而实现了连续纤维增强热固性复合材料的3D打印成型紫外光固化工艺。据Composites world报道,CF3D技术采用了与美国Arkema公司合作开发的聚合物UV快速固化热固性树脂方案,适用于各类商业纤维,包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维以及细金属丝等。其中,3D打印CCF增强热固性复合材料样件的纤维体积分数达到50%~60%,平均拉伸强度为765 MPa。

2019年,俄罗斯Anisoprint公司联合赫罗纳大学、考纳斯理工大学及莫斯科国立技术大学等,提出了一种热固性和热塑性双基体的连续纤维增强复合材料3D打印技术^[56]。研究人员首先将连续干纤维提前浸渍热固性预聚物并固化,以制备出连续纤维增强热固性复合材料的3D打印丝材;然后,将该丝材与常规热塑性塑料丝材分别输送至3D打印头,加热融化热塑性基体并使其包裹连续纤维增强热固性丝材后共同挤出打印。利用该技术打印的CCF增强热固性环氧树脂及热塑性PLA双基体复合材料样件的纤维体积分数达到25%~27%,拉伸强度及拉伸弹性模量分别达到750 MPa和60 GPa,压缩强度为290 MPa。

美国特拉华大学Shi等^[57]发明了一种基于动态毛细管驱动连续纤维增强热固性复合材料增材制造工艺,并命名为局部面内辅助加热3D打印。研究人员通过加热器局部加热CCF丝束,以形成梯度温度分布,这导致液态热固性预聚物滴落在纤维表面时,从低温到高温区域表现出逐渐降低的黏度分布。黏度的降低改变了聚合物的物化性能(如表面能、接触角等),使聚合物熔体由于毛细管效应完成了对干纤维

的润湿和浸渍。与此同时,较高的温度又引发预聚物分子链发生聚合交联反应而固化,从而同步实现“注入液态预聚物”“预浸干纤维”和“固化反应成型”的完整工艺策略。该技术成型及固化CCF/环氧树脂复合材料样件的平均拉伸强度及拉伸弹性模量分别达到810 MPa和108 GPa。

美国科罗拉多大学He等^[58]提出了一种基于DIW原理的连续纤维增强热固性复合材料3D打印技术。研究人员先将热固性预聚物作为打印油墨材料提前装载于注射器内,连续纤维通过进料管从顶部一并送入注射器内部;然后,通过施加压力推动活塞以进行油墨挤出沉积,其在针管内复合纤维丝束后共同挤出打印;最后,针对预成型样件,利用紫外光辐照或热后固化处理,以完成聚合交联反应。它的增强材料采用了碳纤维或玻璃纤维,而树脂基体则由热固化聚酰亚胺和UV固化丙烯酸酯调配形成,所制备复合材料样件的纤维体积分数最高达到36%,平均拉伸强度为500 MPa。

2 国内复合材料3D打印研究进展

自20世纪90年代末期以来,国内纤维增强复合材料增材制造工艺便逐渐开始发展,并且,其年增长率持续维持在令人瞩目的20%~40%,这表现出该工艺强劲的生命力与广阔的应用前景。3D打印作为一项新兴制造技术,正在逐步重塑传统制造业的边界^[59]。

然而,与传统复合材料生产工艺相比,当前国内复合材料3D打印的成熟度仍较低,主要体现在以下多项环节还停留于实验测试或样机阶段,暂无法满足批量生产和工程应用的严苛要求,包括纤维输送(柔性纤维的精准、连续及高效输送)、附着定型(纤维与基体之间的牢固结合,打印形状的精确挤出黏附及支撑定型)、打印精度(毫米级打印分辨率与X-Y-Z多向制造精度)、固化控制(高固化度、低缺陷、绿色的固化配方、反应方式及环境要求)、性能评估(标准化复合材料力学性能数据及失效模式与高可靠性的各向异性仿真分析)、缺陷检测(高效、准确且统一的复合材料内外部缺陷检测方法)、装备研发(适用于纤维增强复合材料增材制造的工业自动化设备)等^[51]。

随着国内增材制造产业的整体崛起,国内复合材料3D打印技术得到迅速发展^[60]。得益于国家层面的政策扶持、高校及科研机构的深入研究,以及企业界的大量横/纵向经费投入,国内复合材料3D打印技术已经取得了多项突破性成果,不仅在基础理论、材料创新、工艺优化等方面取得了显著进展,而且在回收利用、软硬件设备等方面也不断获得新成就,这为推动该技术从实验室走向商业化生产奠定坚实基础。未来,随着跨学科(材料、机械、控制、软件等)的合作深化、技术创新的持续推动,以及汽车行业等市场的高需求增长,国内纤维增强复合材料增材制造领域有望迎来更加璀璨的发展篇章^[61]。

其中,早在2001年,北京航空航天大学钟卫红团队为克服传统3D打印纯ABS样件的低强度和低硬度缺陷,采用SGF、增塑剂、相容剂等多种性能改性剂对ABS进行改性^[62]。

研究结果表明:SGF提高了3D打印ABS样件的拉伸强度至58.60 MPa(提升幅度达239%),但削弱了其柔韧性和可加工性,不利于形成3D打印用的丝材,通过在SGF/ABS中添加少量的增塑剂和增容剂,可显著改善复合材料的塑性和可加工性,使最终挤出的短纤维增强丝材在FDM打印机上稳定使用。

西安交通大学田小永团队将连续纤维引入PLA基体,并通过FDM设备进行挤出打印^[63-65]。研究人员发明了一种智能复合材料3D打印头,其具有连续纤维和热塑性丝材的双通道,可实现两种丝材同时供给,干纤维丝束经熔融PLA浸渍包覆后在熔腔压力作用下完成共挤出打印,最后沿三维模型切片处理得到的外轮廓曲线以及内部填充路径,成型CCF/PLA复合材料样件。利用基于该原理搭建的3D打印实验平台,研究人员系统性分析了打印过程中的工艺参数及纤维含量对所打印样件微观界面和力学性能的影响规律,工艺优化后的样件平均弯曲强度及弯曲模量分别达到390 MPa和30.8 GPa,纤维体积分数最高能够达到28.4%。此外,研究人员还提出了一种基于热塑性复合材料的回收和再制造策略,即将3D打印的CCF/PLA样件置于热风枪下,通过热气流作用将纤维丝束与PLA基体再次分离,分析比较了纯PLA样件、初次打印的CCF/PLA样件,以及经过回收再制造的CCF/PLA样件之间的强度和结构变化差异。

西安交通大学段玉岗团队利用低能电子束辐射固化3D打印技术成功制备了CCF/环氧树脂格栅,并由此提出了非金属雷击防护的复合材料3D打印应用场景^[66]。研究人员通过集成用于纤维打印的FDM模型和用于热固性环氧预聚物快速反应的电子束辐射固化方式,在室温条件下,实现了快速制造高纤维含量(质量分数58%)的CCF导电路径,并且提出了大规模导电结构的复合材料增材制造方法。通过标准化波形的人工模拟雷击试验,检验了该方法在玻璃纤维层合板表面随形打印CCF/环氧树脂格栅的雷击防护效果。凭借沿纤维方向上表现出的高电热性能、横竖相互搭接的打印电路、配合单束3 000根碳丝并联等材料、结构及工艺优势,受100 kA雷击后的试验样件弯曲强度仅降低了9.9%,与商用铜网的保护效果相当(约10%)。

浙江大学栾丛丛等^[67]针对连续纤维增强复合材料构件制造和实验教学需求,结合分层叠加制造工艺,融合模块化设计思想,研制了模块化异质多材料原位可控增材制造实验平台,包括双喷头打印模块、变姿态成形平台、驱动模块及控制系统等。研究人员以CCF或连续玻璃纤维为增强材料,PLA或聚氨酯为基体材料,进行了平台功能、性能测试与验证。结果表明:该软硬件平台能够实现纯树脂材料、连续纤维与热塑性基体复合材料以及连续纤维多方向增强结构等的可控打印,为异质多材料结构件快速制造提供了一种新工艺和新设备。

综上所述,通过对比短纤维和连续纤维增强热塑性复合材料的3D打印技术可以发现:短纤维的最初引入起到了一

定程度上改善3D打印纯树脂样件性能的作用及效果,但由于短纤维的长径比低、缺乏连续性、分散性差、添加量少等因素,其增强幅度往往非常有限。而利用连续纤维代替短纤维作为增强体,以双通道分别供给,经热塑性基体熔融浸渍后从喷头共挤出,辅以压辊、微波等辅助机构完成打印操作的改进策略,能够在此基础上进一步提升材料的力学性能,并且易于调控纤维方向以制备具有多种复杂结构的复合材料。另外,将连续纤维增强体与热固性树脂基体相结合,克服了热塑性塑料分子的自身缺陷,这使得连续纤维增强热固性复合材料3D打印样件的力学性能得到大幅提升^[53,68]。同时,基于热固性树脂与纤维表面之间良好的界面相容性,其微观结合得以进一步改善,纤维含量也随之提高。此外,在深入对比分析国内外不同科研人员的研究路径后,可以总结得出3D打印用复合材料正朝着“短纤维/热塑性→短纤维/热固性→连续纤维/热塑性→连续纤维/热固性”的发展趋势向前探索,并始终瞄准高性能、高纤维含量、无模具、低成本、一体化成型及固化的发展目标不断前进,以期未来替代传统复合材料生产工艺,实现工程化应用。

3 复合材料3D打印的汽车应用前景

随着各大汽车制造商的产品种类日益丰富,近年来市场又涌入了众多新势力品牌和车型,行业竞争的激烈演变驱动了汽车产品升级换代的需求空前高涨^[69]。而且,消费者对于非金属材料、轻量化设计和个性化定制的追求也在悄然兴起,这给汽车制造商提出了新的挑战:如何在满足新品快速研发上市的同时,实现高性能材料迭代和低成本工艺创新。

在汽车工业这个技术密集型的大规模生产领域,每辆汽车的精密组件众多,数量可达数千甚至数万,其中涉及的零部件不仅种类繁多,而且包含许多形状复杂、精密设计的结构。这些部件由于精细的几何特征和对生产精度的严格要求,往往导致生产周期显著延长,并伴随着较大的材料浪费,增加了产品成本和研发项目的整体周期。而3D打印技术以能快速原型制造、减少传统工艺中的复杂模具需求和实现材料节约等特性,为优化汽车零部件生产过程及缩短研发周期提供了革命性的全新开发方案。通过3D打印成型工艺,汽车制造商得以有效提高生产效率,大幅降低制造成本,同时还能够更好地满足定制化和快速响应市场变化等需求^[70]。这一技术的普及应用正逐渐成为汽车行业寻求高效和可持续制造解决方案的关键转折点。

实际上,3D打印在汽车行业的最早应用可以追溯到20世纪90年代。最初它主要用于部分简单模型制作、零部件原型测试、小批量定制零件生产、轻量化结构开发等,后续又扩展到个性定制、改装、维修以及售后市场。截至目前,许多汽车制造商正在积极探索和采用3D打印技术,尤其是在创新和技术整合方面走在前沿的大型企业。尽管许多公司已经率先在增材制造领域进行了初步尝试,但在产品应用领域仍处于基础发展阶段,仅限于某些特定的创新项目、实验性生产或概念车类。

材料在3D打印中扮演着重要角色。早期,树脂材料是较为常见的打印原材料。然而,汽车生产工艺通常对材料性能具有高强高韧、耐高温/腐蚀/疲劳等严苛要求,由此,常规树脂材料性能不足成为了限制3D打印在汽车关键结构件中大规模应用的主要瓶颈。但随着材料科学领域的持续飞跃,特别是纤维增强复合材料的崛起,为3D打印聚焦汽车行业带来了前所未有的机遇。复合材料的优异力学性能恰好弥补了传统材料限制的短板,而3D打印的多尺度和自由成型能力,又在轻量化设计以及复杂几何结构等方面凸显优势。如图2所示,三者的高效结合突破了传统材料和工艺的局限性,推动了汽车产业的进一步技术创新。截至目前,复合材料3D打印已经应用在汽车子系统内的诸多零部件上,包括车身结构(前后车门、前舱、行李箱、翼子板、上下车身框架等)、内外饰(主副仪表骨架/面板、座椅骨架/护板、软内饰地毯/顶棚/行李箱的镂空骨架/盖板、外饰前后保/前舱饰件/顶盖饰板/侧围护板等)、散热及通风系统(散热格栅、风道等)、电池组件(玻纤防护或散热外壳、电池托盘、底板等)、售后及定制组件(前/后唇、侧裙、迎宾踏板、尾翼,以及售后紧急修复或定制升级的复合材料替换件)等^[71-72]。

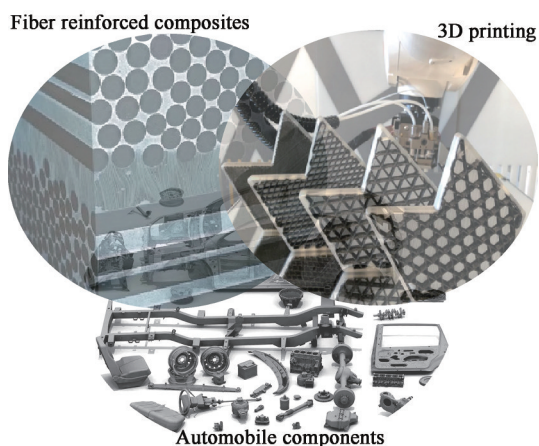


图2 纤维增强复合材料、3D打印工艺与汽车零部件结合示意图

Fig. 2 Combination illustration of fiber reinforced composites, 3D printing, and automotive components

此外,对环保的关注也促进了3D打印材料与技术的更迭,研发人员目前已开发出可生物降解或回收的天然纤维增强复合材料,良好地契合了汽车行业对可持续性材料的追求,响应了低碳制造趋势,也预示着一个更加灵活、高效和绿色的汽车零部件生产新时代的到来。

4 结论与展望

纤维增强复合材料凭借高比强度和比模量、轻质、耐高温/腐蚀/疲劳以及可设计性等优势,在汽车行业中存在广泛的应用空间和迫切的制造需求。针对复合材料传统成型工艺中难以实现的低成本、无模具、一体化成型及固化等关键性难题,综述了新兴复合材料3D打印技术的国内外研究现状,重点关注了3D打印从短纤维/热塑性复合材料的初级探索,逐步发展到短纤维/热固性复合材料、再到连续纤维/热塑

性复合材料和连续纤维/热固性复合材料的发展趋势,揭示了这项技术在汽车制造产业链中的应用前景。这些发现为在未来车型设计和研发周期中,实现材料更新、工艺优化、成本控制、效率提升以及个性定制等,提供了前瞻性的新兴策略框架,包括潜在解决方案、技术支持路径以及关键数据积累,也为复合材料3D打印技术的进一步应用与创新发展奠定坚实基础。

然而,对比常规金属或塑料生产工艺,复合材料3D打印作为一种前沿的制造革新,其工业化成熟度尚处于基础发展阶段。在关键技术领域,如纤维连续性和定向沉积技术、成型固化过程的实时调控、高效高精打印质量、材料性能的全面优化、自动化设备和缺陷检测等,仍然面临严苛挑战,距离大规模商业化生产还存在显著差距。这要求研究人员必须强化关键共性技术研发,加快突破高性能增强体及基体材料研制、高质量高稳定性增材制造装备研发、核心打印规划软件编制等,积极跟踪国内外增材制造技术发展动态,提早规划和布局新一代高性能纤维增强复合材料和3D打印工艺在新能源汽车行业中的应用蓝图,确保在未来的市场竞争中始终占据技术优势,推动汽车产业的绿色革命和创新升级。

参考文献

- [1] 马小娥,等.材料科学与工程概论[M].北京:中国电力出版社,2009.
MA Xiao'e, et al. Introduction to materials science and engineering [M]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [2] 顾宜.材料科学与工程基础[M].北京:化学工业出版社,2002.
GU Yi. Fundamentals of materials science and engineering[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2002.
- [3] 陈光.新材料概论[M].北京:国防工业出版社,2013.
CHEN Guang. Introduction to new materials[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2013.
- [4] RUDOLF R.热固性树脂[M].上海:东华大学出版社,2009.
RUDOLF R. Thermosetting resin[M]. Shanghai: Donghua University Press,2009.
- [5] 杜善义.复合材料学报,2007,24(1):1-14.
DU Shanyi. Acta Materiae Compositae Sinica,2007,24(1):1-14.
- [6] 陈平,等.环氧树脂及其应用[M].北京:化学工业出版社,2006.
CHEN Ping, et al. Epoxy resin and its applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2006.
- [7] MENG F R, et al. Environmental Science & Technology, 2017, 51 (21):12 727-12 736.
- [8] 冯军.航空制造技术,2009(22):38-42.
FENG Jun. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(22): 38-42.
- [9] 苏小萍.高科技纤维与应用,2004,29(5):34-36,39.
SU Xiaoping. Hi-tech Fiber and Application, 2004, 29(5): 34 - 36,39.
- [10] 尚金龙,等.塑料工业,2019,47(1):148-151.
SHANG Jinlong, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(1):

- 148–151.
- [11] SAMAL S, et al. *Fibers*, 2021, 9(4). DOI:10.3390/fib9040023.
- [12] HOLMES M. *Reinforced Plastics*, 2014, 58(6):38–45.
- [13] ZHANG J, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110463.
- [14] 林刚. 2022 全球碳纤维复合材料市场报告[R]. 广州:广州赛奥碳纤维技术股份有限公司, 2022.
- LIN Gang. 2022 global carbon fiber composite materials market report[R]. Guangzhou: Guangzhou Saiao Carbon Fiber Technology Co., Ltd., 2022.
- [15] 林刚, 等. *高科技纤维与应用*, 2015, 40(2):1–12.
- LIN Gang, et al. *Hi-tech Fiber and Application*, 2015, 40(2):1–12.
- [16] 刘友丹, 等. *航空制造技术*, 2011(20):64–67.
- LIU Youdan, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011 (20):64–67.
- [17] 魏晓娟. *现代塑料加工应用*, 2016, 28(6):48.
- WEI Xiaojuan. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2016, 28(6):48.
- [18] 何亚飞, 等. *纤维复合材料*, 2011(2):7–13.
- HE Yafei, et al. *Fiber Composites*, 2011(2):7–13.
- [19] 景婷婷. *现代工业经济和信息化*, 2016(20):69–70.
- JING Tingting. *Modern Industrial Economy and Informatization*, 2016(20):69–70.
- [20] 张小溪. *科技与企业*, 2014(18):165.
- ZHANG Xiaoxi. *Technology and Enterprise*, 2014(18):165.
- [21] ENDRUWEIT A, et al. *Polymer Composites*, 2010, 27(2): 119–128.
- [22] Kim H, et al. *Materials*, 2020, 13(7). DOI:10.3390/ma13071720.
- [23] LI Z, et al. *Applied Composite Materials*, 2018, 25:965–982.
- [24] 张小辉, 等. *航空制造技术*, 2011(15):45–48.
- ZHANG Xiaohui, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(15):45–48.
- [25] 陈杨如, 等. *复合材料成型工艺*[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2012.
- CHEN Yangru, et al. *Composite material forming process*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2012.
- [26] 刘怡, 等. *中国塑料*, 2018, 32(6):1–9.
- LIU Yi, et al. *China Plastics*, 2018, 32(6):1–9.
- [27] HUGHES B, et al. *Technology and Engineering Teacher*, 2016, 75 (4):18–21.
- [28] NGO T D, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172–196.
- [29] WANG X, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 110: 442–458.
- [30] EL MOUMEN A, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 171:166–182.
- [31] GOH G D, et al. *Advanced Materials and Technologies*, 2019, 4 (1). DOI:10.1002/admt.201800271.
- [32] MOHAN N, et al. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(1): 47–59.
- [33] TEKINALP H L, et al. *Composites Science and Technology*, 2014, 105:144–150.
- [34] NING F D, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 80: 369–378.
- [35] COMPTON B G, et al. *Advanced Materials*, 2015, 26(34):5 930–5 935.
- [36] GRIFFINI G, et al. *Polymer*, 2016, 91:174–179.
- [37] INVERNIZZI M, et al. *Materials*, 2016, 9(7). DOI: 10.3390/ma9070583.
- [38] 田小永, 等. CN108908941A[P]. 2020-01-14.
- TIAN Xiaoyong, et al. CN108908941A[P]. 2020-01-14.
- [39] 孔甜甜, 等. *塑料工业*, 2017, 45(3):51–55, 75.
- KONG Tiantian, et al. *China Plastics Industry*, 2017, 45(3): 51–55, 75.
- [40] 刘晓军, 等. *塑料*, 2017, 46(6), 61–66.
- LIU Xiaojun, et al. *Plastics*, 2017, 46(6):61–66.
- [41] KABIR S M F, et al. *Composite Structures*, 2019, 232. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111476.
- [42] ZINDANI D, et al. *International Journal of Lightweight Materials & Manufacture*, 2019, 2(4):267–278.
- [43] BLACK S. 3D printing continuous carbon fiber composites?[EB/OL]. (2014-05-01) [2024-12-10]. <https://www.compositesworld.com/articles/3-d-printing-continuous-carbon-fiber-composites>.
- [44] UEDA M, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 137. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.105985.
- [45] MATSUZAKI R, et al. *Scientific Reports*, 2016, 6. DOI:10.1038/srep23058.
- [46] SUGIYAMA K, et al. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2018, 113:114–121.
- [47] LI N Y, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 182. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107612.
- [48] LI N Y, et al. *CIRP Annals*, 2020, 69(1):221–224.
- [49] LI N Y, et al. *Composites Science and Technology*, 2019, 187. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107939.
- [50] 明越科, 等. *航空制造技术*, 2019, 62(4):34–38.
- MING Yueke, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(4):34–38.
- [51] 明越科, 等. *航空制造技术*, 2021, 64(15):58–65.
- MING Yueke, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(15):58–65.
- [52] MING Y K, et al. *Materials*, 2019, 12(9). DOI: 10.3390/ma12091369.
- [53] SAFARI F, et al. *Polymers and Polymer Composites*, 2022, 30. DOI:10.31219/osf.io/65bzz.
- [54] STRUZZIERO G, et al. *Additive Manufacturing*, 2021, 48. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102458.
- [55] MASON H. Continuous composites, Arkema partner to advance continuous-fiber 3D printing[EB/OL]. (2019-09-26)[2024-12-10].

- <https://www.compositesworld.com/news/continuous-composites-arkema-partner-to-advance-continuous-fiber-3d-printing>.
- [56] ADUMITROAIE A, et al. *Materials*, 2019, 12(18). DOI: 10.3390/ma12183011.
- [57] SHI B H, et al. *Matter*, 2020, 2(6):1 594–1 604.
- [58] HE X, et al. *Additive Manufacturing*, 2021, 40. DOI: 10.1016/j.addma.2021.101921.
- [59] 卢秉恒,等. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4):1–4.
LU Bingheng, et al. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1–4.
- [60] 邢悦,等. *复合材料学报*, 2023, 40(7):3 703–3 721.
XING Yue, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 3 703–3 721.
- [61] 秦若森,等. *材料导报*, 2022, 36(17):196–204.
QIN Ruosen, et al. *Materials Reports*, 2022, 36(17):196–204.
- [62] ZHONG W H, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2001, 301(2):125–130.
- [63] 田小永,等. CN104149339B[P]. 2016-04-13.
TIAN Xiaoyong, et al. CN104149339B[P]. 2016-04-13.
- [64] 田小永,等. *航空制造技术*, 2016, 59(15):26–31.
TIAN Xiaoyong, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(15):26–31.
- [65] LUO M, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121:130–138.
- [66] WANG B, et al. *Additive Manufacturing*, 2019, 31(6). DOI: 10.1016/j.addma.2019.100967.
- [67] 栾丛丛,等. *实验技术与管理*, 2021(3):107–112.
LUAN Congcong, et al. *Experimental Technology and Management*, 2021(3):107–112.
- [68] TIAN X Y, et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(1). DOI: 10.1016/j.cjmeam.2022.100016.
- [69] 范武,等. *内燃机与配件*, 2023(8):55–57.
FAN Wu, et al. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2023(8): 55–57.
- [70] 玉河,等. *时代汽车*, 2024(11):130–132.
YU He, et al. *Auto Time*, 2024(11):130–132.
- [71] 邢志鹏,等. *汽车测试报告*, 2023(20):46–48.
XING Zhipeng, et al. *Car Test Report*, 2023(20):46–48.
- [72] 冉友敏,等. *汽车知识*, 2023, 23(9):152–154.
RAN Youmin, et al. *Automotive Knowledge*, 2023, 23(9): 152–154.