

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.011

3D打印连续纤维增强尼龙复合材料冲击性能

谈丽姿^{1,2}, 聂祥樊³, 罗楚养⁴, 胡晓安⁵, 藺诗韵^{1,2}, 於琳涛^{1,2}

(1. 重庆交通大学航空学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学绿色航空技术研究院, 重庆 401120;
3. 空军工程大学航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室, 西安 710038; 4. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心,
上海 201620; 5. 南昌航空大学飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘要: 连续纤维增强热塑性复合材料中增强相纤维起承载作用, 增强相在打印层内部的填充状态及层间的分布位置会对产品的力学性能产生重要影响。为探究不同纤维状态下增材制造件的抗冲击能力, 采用熔融沉积工艺制备纤维增强热塑性复合材料, 并对复合材料进行冲击性能测试, 对断裂表面的扫描电子显微镜图进行分析, 深入研究了熔融沉积成型过程中纤维填充方式、纤维叠层顺序、纤维种类以及不同纤维堆叠方向对复合材料抗冲击性能及破坏机制的影响。结果表明, 玻璃纤维增强复合材料0°填充的抗冲击性能最佳, 冲击强度为197.54 kJ/m², 约为抗冲击能力最差的90°填充方式的5倍; 三种叠层顺序中包裹式分布的抗冲击能力最佳, 冲击强度可达230.56 kJ/m², 约比均匀式分布试件的冲击强度高16.7%。玻璃纤维试样冲击强度最优, 略高于高强度高温玻璃纤维, 垂直堆叠试样的抗冲击性能普遍高于水平堆叠试样, 最高冲击强度可达282.76 kJ/m²。对3D打印过程中纤维状态进行研究, 为提高3D打印连续纤维增强热塑性复合材料的冲击性能提供参考。

关键词: 冲击强度; 熔融沉积; 复合材料; 连续纤维; 纤维填充; 微观分析

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0064-08

Impact Resistance of 3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Materials

Tan Lizi^{1,2}, Nie Xiangfan³, Luo Chuyang⁴, Hu Xiaoran⁵, Lin Shiyun^{1,2}, Yu Lintao^{1,2}

(1. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. The Green Aerotechnics Research Institute of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 401120, China; 3. National Key Lab of Aerospace Power System and Plasma Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 4. Donghua University, Collaborative Innovation Center for Civil Aviation Composites, Shanghai 201620, China; 5. School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In continuous fiber reinforced thermoplastic composites, the reinforcing phase fibers play a load-bearing role, and the filling state of the reinforcing phase inside the printing layer and the distribution position between layers have a significant impact on the mechanical properties of the product. To investigate the impact resistance of additive manufacturing parts under different fiber states, fiber reinforced thermoplastic composites were prepared using melt deposition technology, and impact performance experiments were conducted on the composite materials, scanning electron microscope images of the fracture surface were analyzed. The fiber filling, method and fiber stacking, sequence during the melt deposition molding process, the influence of fiber types and different fiber stacking directions on the impact resistance and failure mechanism of composite materials were deeply studied. The results show that the optimal impact toughness of glass fiber reinforced composite material filled at 0° is 197.54 kJ/m², which is about 5 times that of the 90° filling method with the worst impact resistance; The optimal impact toughness of the wrapped distribution in the three stacking sequences can reach 230.56 kJ/m², which is approximately 16.7% higher than the impact toughness of the uniformly distributed specimen. The optimal impact toughness of glass fiber specimens is slightly higher than that of high-strength high-temperature glass fibers. The impact performance of vertically stacked specimens is generally higher than that of horizontally stacked specimens, with a maximum impact toughness of 282.76 kJ/m². By studying the fiber state during the 3D printing process, reference is provided for improving the impact performance of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites.

Keywords: impact toughness; fused deposition modeling; composite material; continuous fiber; fiber filling; micro analysis

基金项目: 装备预研重点实验室基金项目(614220220200207, 614220220200208)

通信作者: 聂祥樊, 副教授, 主要从事复合材料增材制造研究

收稿日期: 2023-10-27

引用格式: 谈丽姿, 聂祥樊, 罗楚养, 等. 3D打印连续纤维增强尼龙复合材料冲击性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12):64-71.

Tan Lizi, Nie Xiangfan, Luo Chuyang, et al. Impact resistance of 3D printed continuous fiber reinforced composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):64-71.

纤维增强复合材料具有比重小、强度高、抗冲击等优点,在航空航天、车辆工程等领域已经得到了广泛应用^[1],将3D打印技术应用于纤维增强复合材料制造,有望在保证强度、实现轻量化的同时实现复杂构件的快速制造^[1-3]。

熔融沉积成型(FDM)技术作为3D打印技术的一种,因操作简单、材料利用率高而被广泛使用^[3-5]。将纤维添加到热塑性树脂材料中能改善FDM制件的力学性能。研究发现连续纤维增强热塑性复合材料(CFRTPC)的拉伸强度和拉伸弹性模量往往优于短切纤维增强复合材料^[6-10]。近年来,为提高3D打印CFRTPC的力学性能,诸多学者研究了FDM成型工艺参数^[9],纤维状态包括纤维取向^[11]、纤维分布及纤维种类^[12]等对材料拉伸及压缩性能的影响^[12-15]。但对3D打印增材制造件冲击强度相关的研究较少^[13]。3D打印公司Stratasys联合航空公司Aurora Flight Sciences在迪拜航空展上发布了世界首架3D打印的喷气动力无人飞机,该飞机服役过程中结构可能会遭到工具坠落、碎石、冰雹、飞鸟甚至武器碎片等冲击威胁,导致飞机结构破坏失效^[16]。格伦研究中心使用FDM制备了压气机入口导流叶片^[17],叶片在使用过程中可能会面临外物冲击威胁,冲击损伤会降低材料的结构刚度和强度,导致损伤增长并最终断裂。冲击损伤对结构完整性的影响程度是3D打印复合材料能否有效使用的一个重要问题。因此有必要对3D打印CFRTPC冲击性能进行研究。但目前尚无标准测试方法适用于3D打印制造的CFRTPC部件的抗冲击性能研究。笔者参考传统方式成型复合材料冲击强度的研究方法,开展3D打印CFRTPC部件的抗冲击性能研究。

Pereira等^[18]对使用传统方式成型的定向黄麻纤维增强环氧基复合材料进行了摆锤冲击实验。斜李昕等^[19]对碳纤维复合材料试样进行了简支梁低速冲击性能试验,根据低速冲击响应特性曲线及损伤模式探究了复合材料能量吸收机理。Hong等^[20]利用缺口冲击破坏试验研究了编织碳纤维增强热塑性复合材料的冲击性能及破坏机制。Hetrick等^[21]研究了3D打印连续Kevlar纤维增强复合材料的缺口冲击特性,结果表明交替堆叠顺序的样品表现出较少的能量吸收。Caminer等^[22]研究了不同构建方向、层厚度和纤维体积含量对FDM技术制造的3D打印连续碳、玻璃和Kevlar®纤维增强尼龙复合材

料冲击性能的影响。综上所述,复合材料体系中纤维起承载作用,纤维在层内的填充状态及纤维层间分布不同均会给试件的冲击性能带来影响。3D打印连续纤维复合材料冲击性能的相关研究还有所欠缺,研究材料体系不够全面,缺乏对基体相Onyx的相关研究,对堆叠顺序的研究仅限于交替堆叠。

笔者利用FDM工艺对3D打印试样进行简支梁缺口冲击实验,在Mark X7 3D打印机上制备冲击实验所需样件。以短切碳纤维增强尼龙Onyx为基体相,深入研究了纤维层内填充方式、层间叠层分布及不同纤维种类下纤维堆叠方向几类不同纤维状态对FDM纤维增强复合材料冲击性能及损伤模式的影响。目的是研究FDM成型的CFRTPC的冲击性能,得到显示出更好的冲击强度和耐受性的层内、层间纤维状态及抗冲击性能最佳的纤维种类与打印方向。

1 实验部分

1.1 3D打印材料

基体材料:短切碳纤维增强尼龙(Onyx),美国Markforged公司;

增强材料:预浸渍碳纤维(CF),美国Markforged公司;

预浸渍玻璃纤维(GF):美国Markforged公司;

预浸渍高强度高温玻璃纤维(HSHT GF):美国Markforged公司。

Kabir等^[23]通过热降解温度分析得出预浸料长丝中的塑料均为第六类尼龙,预浸料长丝中纤维相关信息暂未公开。文中涉及两种不同的玻璃纤维,其中一种是未经特殊处理的玻璃纤维,另一种是该公司研制的新型玻璃纤维(HSHT GF)更适用于高温条件,丝材性能有所改变。

为全面研究不同类型纤维的抗冲击能力,对这两种不同类型的玻璃纤维分别展开研究工作。以上几种耗材均为Markforged公司的专利产品,在此不做详细探讨。表1为根据现有资料整理的材料基本参数。

表1 打印耗材参数

材料	拉伸弹性模量/ GPa	弯曲弹性模量/ GPa	丝材密度/(g· cm ⁻³)	纤维体积分 数/%	纤维密度/(g· cm ⁻³)	纤维数量
Onyx	2.4	3.0	1.2	10.5	2.10	
CF	60	51	1.4	45.0	1.76	998±2
GF	21	22	1.5	38.0	2.15	393±3
HSHT GF	21	21	1.5	36.0	2.21	388±1

1.2 主要仪器及设备

连续纤维增强复合材料 3D 打印机: Mark X7 型, 美国 Markforged 公司;

塑料摆锤冲击试验机: PIT-501J 型, 深圳万测实验设备有限公司;

场发射扫描电子显微镜 (FESEM): GeminiSEM360 型, 德国卡尔蔡司公司。

1.3 试样制备

试件长 120 mm, 高 8 mm, 厚度 10 mm。采用三维建模软件 Solidworks 对试件进行建模, 将所得三维模型以 STL 格式导出, 并加载到 Mark X7 专用切片软件 Eiger 中进行切片处理。Eiger 允许用户更改打印件在打印平台上的位置及摆放姿态, 打印前选择基体相和增强相耗材, 设置打印参数。表 2 和表 3 分别为本研究涉及到的打印固定参数及变量参数。

表 2 冲击样件打印固定参数

层厚	顶层/底层层数	壁板层数	基体填充方式	基体填充密度
0.1 mm	4/4	2	实心	100%

表 3 冲击样件打印变量参数

纤维填充方式	纤维堆叠顺序	纤维种类	纤维堆叠方向
同心, 0°, ±45°, 90°	均匀, 夹心, 包裹	CF, GF, HSHT GF	水平打印, 垂直打印

纤维填充方式决定纤维在层内的路径与增强方向。笔者聚焦于四种填充方式, 同心填充、0°填充、±45°填充及 90°填充。0°填充是沿着试样的长度方向进行纤维填充; 同心填充指纤维从样品的外部几何形状开始, 用逐渐缩小的纤维环打印填充形状。堆叠顺序指打印纤维层与基体层的交替顺序。纤维叠层顺序决定纤维增强层在整个试件中的分布位置。为提高纤维叠层顺序的均匀性与分散性, 对增强层与基体层的排布进行了分组。水平堆叠时 FDM 成型冲击试件一共可分为 80 层, 为保证成型试件质量底部和顶部分别设置四层壁板, 增强层 36 层与基体层 44 层(包含系统设置顶层和底层各 4 层)。均匀式分布, 纤维增强层以 9 层为一组共四组, 基体 Onyx 层以 12 层为一组共分为三组, 纤维增强层与基体层交替均匀的分布在试件中; 夹心式分布纤维增强层集中在试件中部(23~57 层), 基体 Onyx 层分为两组, 每组 18 层分布于试件两端; 包裹式分布反之, 但纤维层数与基体层数不变。纤维的种类决定着增强相的力学性能以及纤维与基体相之间的浸渍程度。纤维堆叠方向的不同, 在打印层

厚相同的情况下影响试样的打印层数。笔者研究水平堆叠与垂直堆叠两种堆叠方向, 水平堆叠总层数为 80 层, 垂直堆叠总层数为 100 层。

1.4 测试与表征

由于目前尚无标准测试方法适用于 FDM 制造的 CFRTPC 部件的抗冲击性测试, 笔者参考 GB/T1451-2005 纤维增强塑料筒支式冲击强度实验方法对 FDM 成型复合材料进行冲击性能分析。利用 Caminer 等^[22]相同的方式使用 3D 打印机直接成型冲击试样。

通过摆锤冲击试验机进行纤维增强复合材料冲击实验。选择能量为 15 J 的摆锤用于测试。跨距设为 70 mm。每组设置 5 个平行实验, 整理实验数据获得冲击强度的平均值、标准差及离散系数。

实验分为三大类以开展相关研究。将实验分别命名为 F 类、S 类和 T 类, 分别研究纤维填充方式、纤维叠层顺序及两种不同纤维堆叠方向下三种不同种类纤维对 FDM 成型连续纤维增强复合材料的冲击性能的影响。F 类实验中根据纤维填充的不同模式分为 4 组。其中 F-a 组设为同心填充, 填充圈数为 4 圈; F-b 组设为 0°填充; F-c 组设为 ±45°填充; F-d 组设置为 90°填充。S 类实验基于 F 实验中获得的最佳填充方式, 根据均匀、夹心、包裹 3 种纤维叠层顺序分为三组, 分别标注为 S-F, S-e, S-f。T 类实验选择均匀式叠层方式不变, 只改变纤维种类及堆叠方向。设置纯 Onyx 试件为对照实验组, 水平打印的 Onyx 试件标记为 T-h, 垂直打印的 Onyx 试件标记为 T-k。水平打印的 HSHT GF 标记为 T-g, 垂直打印的 HSHT GF 标记为 T-j, 水平打印的碳纤维增强试样标记为 T-l, 垂直打印的碳纤维增强试样标记为 T-m。水平打印玻璃纤维试样相关性能可通过 S 类实验结果获得此处命名为 T-s, 垂直打印 GF 增强试样标记为 T-i。

使用场发射扫描电子显微镜进行测试, 观察不同纤维试样的表面形貌, 纤维与树脂基体的界面。由于纤维增强热塑性复合材料不导电因此测试之前需进行镀金处理。

2 结果与讨论

2.1 纤维填充方式对冲击性能的影响

图 1 表示玻璃纤维在相同纤维叠层顺序, 纤维堆叠方向下不同纤维填充类型对冲击性能的影响。由图 1 可得, 增强层数相同的情况下, 纤维填充方式

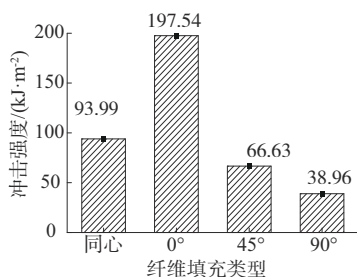


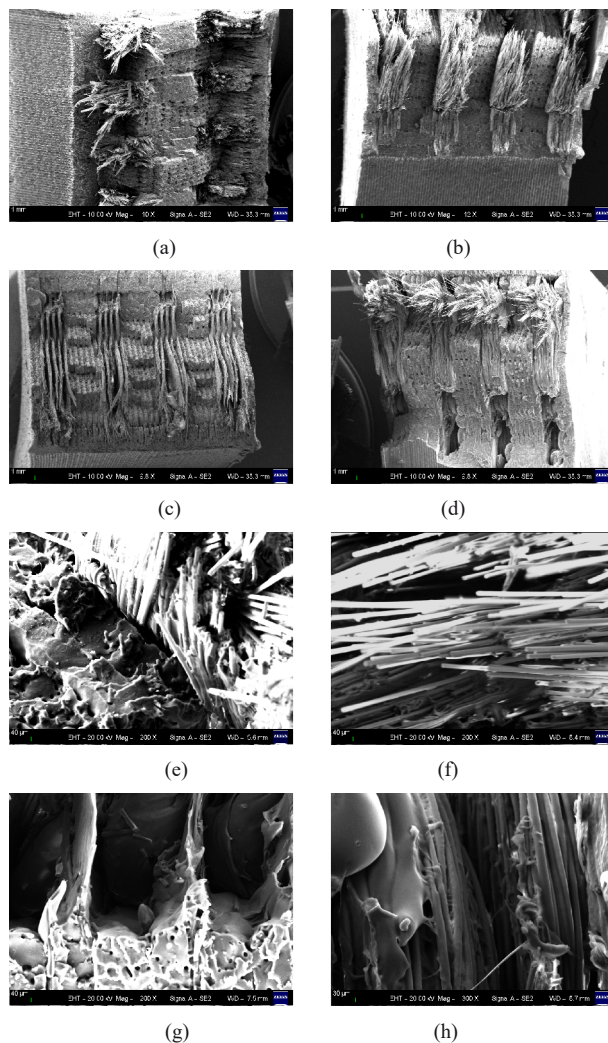
图1 纤维填充方式对冲击性能的影响

对材料的抗冲击性能有显著影响。其中0°填充的抗冲击性能最佳,冲击强度可达到197.54 kJ/m²;同心填充次之,冲击强度为93.99 kJ/m²;±45°填充试样的冲击强度略低,为66.63 kJ/m²;90°填充冲击强度仅为38.96 kJ/m²,0°填充的冲击强度约为其5倍。

纤维填充方式对应层内纤维铺层路径,纤维铺层路径不同,打印过程中丝材道与道之间界面结合的强弱程度有所不同,这可能是引起冲击强度差异的原因之一。纤维增强复合材料往往表现出各向异性。同一试样平行于纤维方向与垂直于纤维方向的力学性能不同^[1,4]。本节开展的试验中,纤维填充方式为0°和同心填充的填充模式中纤维方向垂直于冲击能量施加方向,横向纤维承担了大部分冲击载荷,因此冲击强度较高。90°填充时纤维方向平行于冲击能量施加方向,沉积丝材之间的结合界面需承担冲击载荷,由于丝间结合可能存在空隙,浸渍不完全等问题,导致试件在受到冲击载荷时迅速发生破坏,因此90°填充的试件抗冲击性能较差。

图2为不同纤维填充方式的断面微观形貌图。图2a和图2e为同心填充,可以观察到纤维增强层同心的内圈仍为基体填充。设置的纤维同心圈数为切片软件Eiger允许的最大圈数。圈数不能继续增加的原因可能是打印纤维丝材尺寸一定,同心圈数过多会使内圈纤维产生重叠挤压破坏,从而影响打印质量及试件的承载能力。

从图2b可以看出,0°填充方式纤维可以覆盖整个打印层,中心部分无树脂填充,因此其抗冲击性能优于同心填充增强效果。0°增强与同心增强纤维取向垂直于载荷方向,试件被破坏时纤维承担了大部分载荷。试样在吸收和耗散能量时发生了纤维拔出与纤维断裂破坏,可以观察到大量纤维拔出,纤维在拉伸侧充分发挥了其抗拉能力强的特性。打印过程中纤维在转折处会引入空隙缺陷,也存在纤维挤压折断的风险,由图2g和图2h可以看出,±45°填充与90°填充都会引入较多的折点,这是其



a—同心填充(放大10倍);b—0°填充(放大12倍);
c—±45°填充(放大10倍);d—90°填充(放大10倍);
e—同心填充(放大200倍);f—0°填充(放大200倍);
g—±45°填充(放大200倍);h—90°填充(放大300倍)

图2 不同纤维填充方式断面的SEM图

抗冲击性能较差的原因之一。±45°填充冲击载荷与纤维取向成一定角度,纤维的承载能力可正交分解到平行于载荷及垂直载荷方向,纤维的承载作用没有完全发挥。90°填充转折处的纤维能够起到一定承载作用,但其它平行于冲击载荷的纤维束基本无法起到的承载作用。大部分载荷由丝间结合界面及转折处连续纤维承担,由于转折处纤维空隙缺陷较多,FDM技术丝材打印时需要熔融上一道丝材进行连接,结合过程时间短、压力小,导致丝间结合效果不佳,因此其抗冲击能力远不如纤维丝束直接承载的0°填充。

2.2 纤维叠层顺序对冲击性能的影响

图3为玻璃纤维在纤维填充方式、纤维堆叠方

向相同情况下,不同纤维叠层顺序对冲击性能的影响。经切片软件可知,在增强层数量不变、纤维填充方式相同的情况下,整个试件的纤维含量不变(每个试件的纤维消耗量为 3.27 cm^3)。纤维叠层顺序在一定程度上影响着复合材料试样的冲击性能。纤维增强层在试件中均匀分布时试件的抗冲击性能为 197.54 kJ/m^2 ,略低于夹心式分布的 202.99 kJ/m^2 ,包裹式纤维叠层顺序的冲击强度最佳为 230.56 kJ/m^2 ,约比均匀式分布试件冲击强度高 16.7% 。

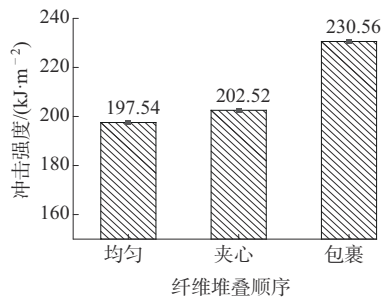
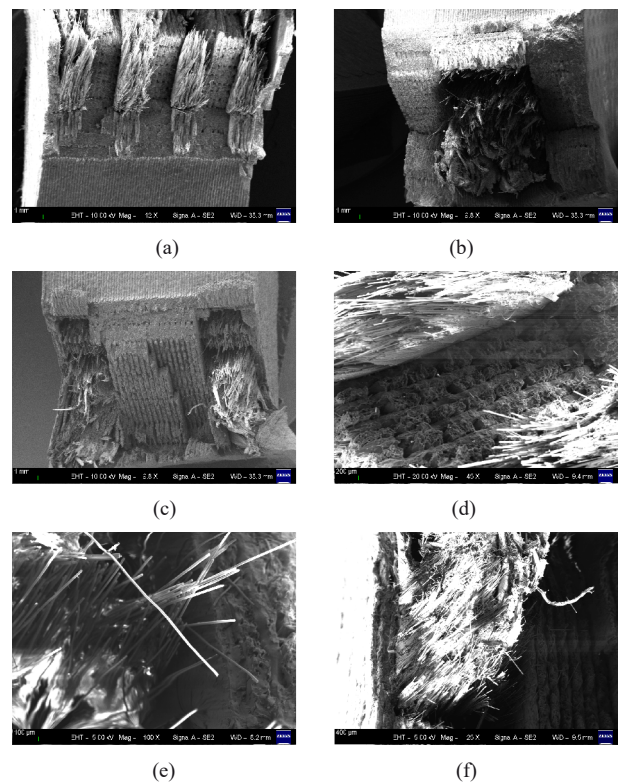


图3 纤维叠层顺序对冲击性能的影响

FDM成型纤维增强复合材料试件孔隙率偏高,层与层之间浸渍程度低,界面结合性能不佳是导致FDM成型纤维增强复合材料试样成型质量不佳的重要原因。因此减少纤维层与基体层之间界面的数量,可以降低层间结合缺陷带来的负面影响。均匀分布时纤维层与基体层的直接界面数量为8,夹心式界面数量为2,包裹式界面数量为4。因此均匀分布的抗冲击性能最差。纤维与基体界面剪切应力是控制应力传递效应的重要参数,影响着复合材料的冲击强度。当试样受到外力作用时纤维的存在可以限制裂纹的扩展,从而提高试件的力学性能。夹心分布时纤维集中于试件中部时,两侧的基体部分受冲击载荷迅速发生破坏,中部聚集的纤维没有很好地发挥限制裂纹扩展及承载作用。包裹分布纤维分布于试样上下两端承受大部分冲击载荷,从两端限制裂纹向内扩展,在一定程度上保护了内部基体层,因此包裹式分布比夹心式分布的抗冲击性能强。

图4为不同纤维叠层顺序的微观形貌图。从图4中可以观察到三种试样都发生了不同程度的纤维拔出与纤维断裂破坏。另外从图4a和图4b可以明显看出基体层与纤维层之间的分层现象。因为均匀分布纤维层与基体层结合界面多,因此发生缺陷的概率更大,给试样的抗冲击性能带来了更多不可逆的负面影响。夹心分布纤维与基体结合界面数



a—均匀分布(放大10倍);b—夹心分布(放大10倍);
c—包裹分布(放大10倍);d—均匀分布(放大45倍);
e—夹心分布(放大100倍);f—包裹分布(放大25倍)

图4 不同纤维叠层顺序微观形貌图

量较少,对冲击性能影响不大。包裹分布几乎未观察到界面分层现象,这可能与纤维的充分承载有关。从图4a可以看出,均匀分布试样的主要失效方式为成束的纤维拔出及界面分层。图4c和图4f显示出包裹式叠层方式以纤维断裂、纤维拔出失效为主,没有明显的分层现象,这也是其抗冲击性能较强的主要原因。纤维拔出与界面分层是纤维与基体间浸渍效果不理想的产物,纤维干丝与树脂之间的浸渍压力不足,浸渍时间短,都有可能浸渍效果不佳。界面分层是由于打印过程中打印层对上一层熔融不够充分,打印速度较快两层之间相互浸渍时间不够造成的。

2.3 纤维种类及堆叠方向对冲击性能的影响

本节研究的纤维种类分别为连续碳纤维、玻璃纤维及高强度高温玻璃纤维。设置无连续纤维增强的纯Onyx试样为对照组。堆叠方向分为水平取向和垂直取向,打印层厚均为 0.1 mm ,纤维用量均为 $(3.27\pm 0.01)\text{ cm}^3$ 。图5为纤维填充方式及纤维叠层顺序相同的情况下不同纤维种类及堆叠方向对试件冲击强度影响。结果表明,无连续纤维增强相的

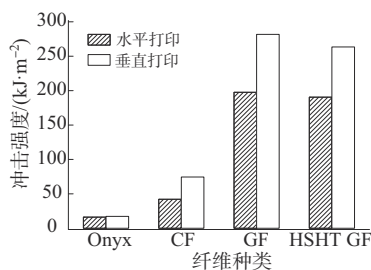


图5 纤维种类及堆叠方向对试件冲击强度影响

试样冲击强度最差,仅为 16.19 kJ/m^2 ,玻璃纤维增强材料的冲击强度略高于高强度高温玻璃纤维可达 197.54 kJ/m^2 ,该强度约为纯 Onyx 试样的 12 倍。另外从图中可以看出打印方向对纤维增强复合材料抗冲击性能的提升高于纯 Onyx 试样,碳纤维增强试样抗冲击性能最差,仅为 74.47 kJ/m^2 ,玻璃纤维增强复合材料抗冲击性能的提升最为显著,垂直打印玻璃纤维增强材料的冲击强度可达 281.76 kJ/m^2 。复合材料样件由于纤维增强材料的类型而导致冲击性能的差异可以通过纤维静态材料性能的差异来解释。纤维材料静态参数见表 1。高强度高温玻璃纤维增强 Onyx 试样冲击强度略低于玻璃纤维试样的原因可能是高强度高温玻璃纤维与基体相 Onyx 的浸渍结合弱于玻璃纤维与基体相的结合,该猜想可从破坏件断口的 SEM 图中得到验证。

图 6 为不同纤维种类的断面微观形貌图(括号为放大图的放大倍数)。从图 6 可以发现,不同的纤维类型对应着不同的失效方式。对比几种断面图可将破坏形式大致分为脆性行为 and 韧性行为。纯 Onyx 试样及碳纤维增强试样的断裂行为更具脆性,表现为更加整齐的断口形貌,更少的纤维拔出,更多的纤维脆性断裂;玻璃纤维及高强度高温玻璃纤维表现出更具韧性的断裂行为,表现为更加粗糙的断口形貌,更多的纤维拔出与基体撕裂现象。另外观察纤维层与基体层之间的结合界面,发现 HSHT GF 增强试样纤维层与基体层之间存在明显的分层缝隙,而 GF 增强试样几乎没有观察到缝隙,这印证了上述关于 HSHT GF 与基体相 Onyx 的浸渍结合弱于玻璃纤维与基体相的结合的猜想。这些破坏方式上的差异体现了增强纤维本身的属性差别。

图 7 为不同纤维堆叠方向的断面微观形貌。其中,图 7a 和图 7c 分别为水平堆叠与垂直叠的无纤维增强的试样,图 7b 和图 7d 分别为水平堆叠与垂直堆叠的连续纤维增强试样。观察无纤维增强的试样可以发现,无论是水平堆叠还是垂直堆叠,打印

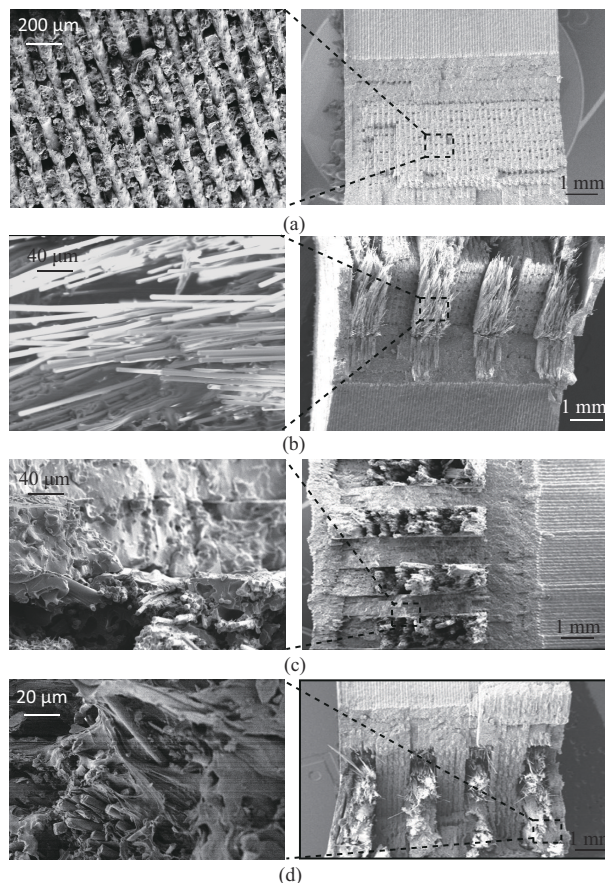
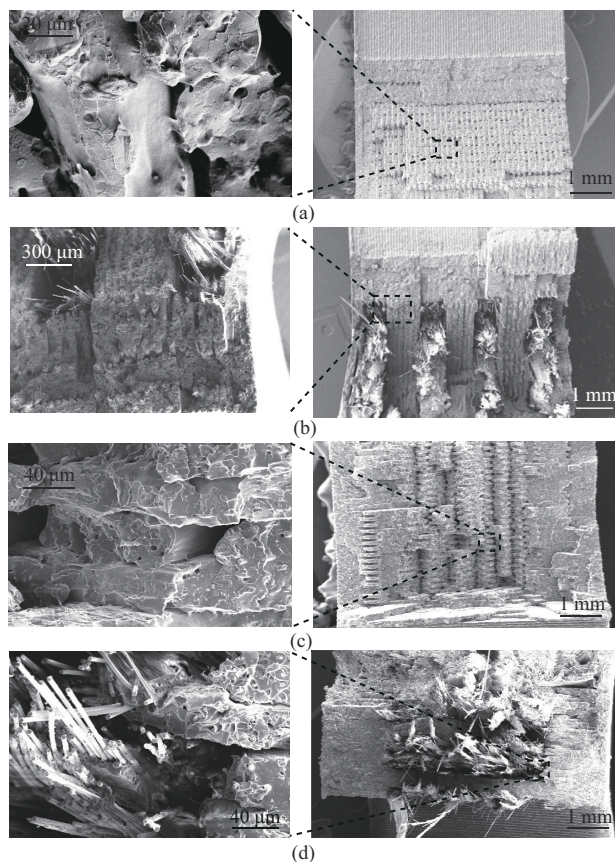
不同样品及其局部放大图:a—纯 Onyx 试样;b—GF 增强;
c—CF 增强;d—HSHT GF 增强

图6 不同纤维种类的断面微观形貌图

过程中道间间隙都是存在的。道间空隙的大小与喷嘴直径、打印间距等工艺参数相关。另外在水平堆叠的试件上可以明显地看到层间间隙,而垂直堆叠的试件的层间间隙则较小,这可能是由于打印层数不同导致的差异,同时也是造成垂直堆叠比水平打印试样抗冲击性强的原因之一。水平打印与垂直打印的纤维增强试样,由于纤维承担载荷的方式不同,其破坏机理也存在差异。对于水平堆叠纤维,断裂与拔出为主要的纤维失效形式,基体部分一般为脆性断裂。垂直堆叠的冲击载荷垂直于增强层,大部分的载荷由单层吸收,因此除纤维断裂与纤维拔出外还存在层内变形及层间分层(图 7 d)。这表明从微观分析的角度分析,纤维堆叠方向显著的影响着试样的抗冲击性能。

3 结论

针对 FDM 技术成型连续纤维增强热塑性复合材料,通过简支梁缺口冲击实验,研究了 3D 打印过程中纤维层内填充方式、层间叠层顺序及纤维种类与堆叠方向对复合材料冲击性能的影响,得出如下



水平打印: a—纯Onyx; b—纤维增强试样;

垂直打印: c—纯Onyx; d—纤维增强试样

图7 不同纤维堆叠方向的断面微观形貌图

结论:

(1)纤维填充方式对FDM成型连续纤维增强复合材料的冲击性能有显著影响。玻璃纤维增强复合材料 0° 填充抗冲击性能最佳,为 197.54 kJ/m^2 ; 90° 填充抗冲击性能最差; 0° 填充试样的冲击强度约为 90° 填充试样的5倍。

(2)在纤维含量不变的情况下,改变纤维增强层叠层顺序,对复合材料增材制造件的抗冲击性能有显著影响。玻璃纤维增强复合材料 0° 填充时,夹心式抗冲击性能略高于均匀式。包裹式抗冲击效果最佳,其冲击强度可达 230.56 kJ/m^2 ,约比均匀式分布试件冲击强度高16.7%。

(3)玻璃纤维增强试样的抗冲击性能略高于高强度高温玻璃纤维,碳纤维增强试样抗冲击性能最差,仅为 74.47 kJ/m^2 。纤维增强试样的抗冲击性能均高于无纤维增强试样。垂直堆叠试样普遍比水平堆叠试样的抗冲击性能高,垂直堆叠方向纤维增强试样冲击强度高于水平对堆叠方向,垂直堆叠最高冲击强度可达 282.76 kJ/m^2 ,为水平堆叠试样的

1.75倍。

本研究丰富了3D打印CFRTPC冲击性能研究的理论基础,为提高3D打印连续纤维增强热塑性复合材料的冲击性能提供参考。

参考文献

- [1] 邢悦,何鹏飞,李竞龙,等.连续纤维增强聚合物复合材料增材制造工艺研究进展[J].复合材料学报,2023,40(7):3 703-3 721. Xing Yue, He Pengfei, Li Jinglong, et al. Additive manufacturing for continuous fiber-reinforced polymer composites: A review on processing technique[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(7):3 703-3 721.
- [2] Goh G D, Yap Y L, Agarwala S, et al. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(1). DOI:10.1002/admt.201800271.
- [3] Zhuo P, Li S, Ashcroft I A, et al. Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109143.
- [4] 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). DOI: 10.3390/polym12071529.
- [5] Liu G, Xiong Y, Zhou L. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications[J]. Composites Communications, 2021, 27. DOI: 10.1016/J.COCO.2021.100907.
- [6] 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.
- [7] Deleon A C, Chen Q, Palaganas N B, et al. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications [J]. Reactive and Functional Polymers, 2016, 103:141-155.
- [8] 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.
- [9] Rijckaert S, Daelemans L, Cardon L, et al. Continuous fiber-reinforced aramid/PETG 3D-printed composites with high fiber loading through fused filament fabrication[J]. Polymers, 2022, 14 (2). DOI:10.3390/polym14020298.
- [10] Kabir S 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. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111476.
- [11] Dickson A N, Barry J N, McDonnell K A, et al. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16:146-152.
- [12] Krzikalla D, Měsíček J, Halama R, et al. On flexural properties of additive manufactured composites: Experimental, and numerical

- study[J]. *Composites science and technology*, 2022, 218. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109182.
- [13] Díaz-Rodríguez J G, Pertúz-Comas A D, González-Estrada O A. Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 211. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108657.
- [14] 杨来侠,刘波,刘腾飞,等.3D打印连续纤维增强聚碳酸酯复合材料预浸丝制备与性能[J].*复合材料学报*,2023,40:1-13.
Yang L X, Liu B, Liu T F, et al. Preparation and properties of 3D printing continuous fiber reinforced polycarbonate composite prepreg filaments[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40: 1-13.
- [15] He Q, Wang H, Fu K, et al. 3D printed continuous CF/PA6composites:Effect of microscopic voids on mechanical performance[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 191. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108077.
- [16] 王计真.考虑初始应力的X850/IM+复材板高速冲击试验[J].*航空科学技术*,2020,31(1):81-84.
Wang Jizhen. High-speed impact tests of composite panels under prestressing[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(1): 81-84.
- [17] 马绪强,苏正涛.民用航空发动机树脂基复合材料应用进展[J].*材料工程*,2020,48(10):48-59.
Ma Xuqiang, Su Zhengtao. Application progress of resin based composite materials for civil aviation engines[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(10):48-59.
- [18] Pereira A C, Monteiro S N, De Assis F S, et al. Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2017, 6 (4):312-316.
- [19] 斜李昕,王秋成,陈光耀.碳纤维复合材料低速冲击特性及损伤分析研究[J].*机电工程*,2016,33(7):815-821.
Tou Lixin, Wang Quicheng, Cheng Guangyao. Analysis on low velocity impact performance and damage behavior of carbon fiber composite beam[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(7):815-821.
- [20] Hong S W, Ahn S S, Li H, et al. Charpy impact fracture characteristics of CFRP composite materials according to variations of fiber array direction and temperature[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14:253-258.
- [21] Hetrick D R, Sanci S H R, Ashour O, et al. Charpy impact energy absorption of 3D printed continuous Kevlar reinforced composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55(12):1 705-1 713.
- [22] Caminero M, Chacón J, García-Moreno I, et al. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2018, 148:93-103.
- [23] Kabir S F, Mathur K, Seyam A-F M. The road to improved fiber-reinforced 3D printing technology[J]. *Technologies*, 2020, 8(4). DOI:10.3390/technologies8040051.