

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.10.012

基于连续纤维增材制造工艺的四旋翼无人机拓扑优化

熊婷¹, 钱波^{1,2}, 胡珍涛¹, 茅健^{1,2}, 赵嫚^{1,2}, 刘钢^{1,2,3}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201600; 2. 机械工业航空大型复杂薄壁构件智能制造技术重点实验室, 上海 201600;
3. 上海交通大学四川研究院, 成都 610213)

摘要: 针对四旋翼无人机实现轻量化和提升力学性能的需求, 提出一种连续纤维增材制造工艺和拓扑优化构型设计相结合的方法。首先基于复合丝材制备工艺, 以连续碳纤维为增强材料, 短切碳纤维填充尼龙为基体材料, 通过熔融沉积成型制得复合材料样件, 研究成型方向、纤维分布区域和成型路径方式对样件力学性能影响, 得到连续碳纤维复合材料的最佳工艺参数为平放打印、纤维层均匀间隔分布和 0° 成型路径。其次, 利用拓扑优化技术对承载能力最弱工况下的四旋翼无人机重新设计, 优化后模型的质量比优化前减轻了 48%。再结合最佳工艺参数制备不同连续纤维体积分数的四旋翼无人机样件进行压缩性能测试, 结果表明连续纤维体积分数为 35% 时, 可在较低成本下提高样件的力学性能。

关键词: 连续纤维; 增材制造; 工艺原理; 拓扑优化; 四旋翼无人机

中图分类号: TB302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)10-0076-09

Topology Optimization of Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle based on Continuous Fiber Additive Manufacturing Process

Xiong Ting¹, Qian Bo^{1,2}, Hu Zhentao¹, Mao Jian^{1,2}, Zhao Man^{1,2}, Liu Gang^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology of Large Complex Thin-Wall Components of Machinery Industry Aviation, Shanghai 201600, China;
3. The Sichuan Research Institute of Shanghai Jiao Tong University, Chengdu 610213, China)

Abstract: A method combining continuous fiber additive manufacturing process and topology optimization configuration design was proposed to meet the requirements of lightweight and improving mechanical performance for quadcopter unmanned aerial vehicles. Firstly, based on the preparation process of composite wire materials, continuous carbon fibers were used as reinforcing materials and nylon materials filled with chopped carbon fibers were used as the matrix material, the composite samples were prepared by fused deposition modeling. The effects of molding direction, fiber distribution area, and molding path on the mechanical properties of the samples were studied. It is found that the optimal process parameters for continuous carbon fiber composite materials are flat printing, evenly spaced distribution of fiber layer, and 0° molding path. Secondly, topology optimization technology was used to redesign the quadcopter unmanned aerial vehicle with the weakest load-bearing capacity, and the mass of the optimized model decreased by 48% compared to before. Combined with the optimal process parameters, quadcopter unmanned aerial vehicle samples with different continuous fiber volume fractions were prepared for compression performance testing. The results show that when the continuous fiber volume fraction is 35%, the mechanical properties of the samples can be improved at a lower cost.

Keywords: continuous fiber; additive manufacturing; technical principle; topology optimization; quadcopter unmanned aerial vehicle

3D 打印也称增材制造, 是一种将数字模型通过材料逐层堆积制造工艺生成实体模型的智能制造

技术^[1]。与传统的等材制造和减材制造不同, 该技术生产过程不依赖辅助模具, 能够按需快速制造出

通信作者: 钱波, 博士, 副教授, 主要研究方向为增材制造

收稿日期: 2023-08-03

引用格式: 熊婷, 钱波, 胡珍涛, 等. 基于连续纤维增材制造工艺的四旋翼无人机拓扑优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(10): 76-84.

Xiong Ting, Qian Bo, Hu Zhentao, et al. Topology optimization of quadcopter unmanned aerial vehicle based on continuous fiber additive manufacturing process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10): 76-84.

复杂样件。拓扑优化是通过对初始构型施加约束载荷及定义性能目标,来预测主应力传力路径和寻求材料最优分配的结构设计方法。拓扑优化在设计空间构型上灵活,但可能存在复杂结构,导致传统加工难以完成制造过程,将拓扑优化和增材制造两种技术巧妙结合,可以实现一体化设计制造^[2]。热塑性树脂打印样件强度较低,连续纤维增强树脂基复合材料强度高、密度低、抗疲劳,目前打印方式以熔融沉积成型(FDM)为主,可低成本、短时间制备可回收的高性能复合材料,广泛应用于生物医疗、海洋船舶、轨道交通、航空航天等领域^[3-7]。随着科技的快速发展,多旋翼无人机领域不断创新,但仍存在一些缺点。以四旋翼为例,其操作简便灵活,但受限于承载性能不足且续航时间短的缺陷,其适用场合受到限制。有效的解决方式是对初始模型做拓扑优化减重,使用比尼龙、聚碳酸酯等工程塑料力学性能更优的碳纤维复合材料,通过3D打印制造出无人机实体,从优化构型、轻质材料、制造工艺等方面提升无人机结构性能。

纤维复合材料的力学性能表现存在差异,不少学者研究了纤维类型、打印参数、纤维排布对3D打印连续纤维增强复合材料力学性能的影响。Dickson等^[8]以尼龙为基体材料,以连续碳纤维、连续玻璃纤维、连续凯夫拉纤维为增强材料进行试件制备并进行弯曲力学试验,测得试件弯曲弹性模量分别为13.02,3.87,4.61 GPa,发现以连续碳纤维增强尼龙材料效果比其它两种纤维好。Hu等^[9]研究发现碳纤维复合材料试件的弯曲性能随着打印速度的提高会轻微降低。Hao等^[10]也通过实验得出增加打印速度会削弱弯曲强度的结论,并且弯曲性能随打印温度的升高而提高,随层厚和线宽的增加而降低。Mei等^[11]研究了纤维填充图案类型和纤维层数对3D打印连续纤维增强复合材料拉伸性能的影响,实验结果表明拉伸性能随着纤维层数的增加而提高,且纤维层数相同时,填充图案采用长方形打印的样件拉伸性能最高。Araya-Calvo等^[12]研究了纤维填充图案类型和纤维含量对3D打印连续纤维增强复合材料压缩性能的影响,总结出体积分数为24%的纤维在同心圆图案打印下,可产生最大压缩效应。

笔者将连续纤维增材制造工艺与拓扑优化相结合以实现四旋翼无人机结构、材料、功能一体化,

通过连续碳纤维复合材料增材的制造实验得到连续碳纤维复合材料在成型方向、纤维分布区域和打印成型路径的最佳工艺参数,3D打印出拓扑优化构型设计后的不同连续纤维体积分数的四旋翼无人机样件,为提升四旋翼无人机综合性能提供一种经济可行的制造思路。

1 连续碳纤维复合材料增材制造实验

1.1 主要原材料

连续碳纤维丝材:具有热塑性涂层的碳纤维束,美国Markforged公司;

短切碳纤维填充尼龙丝材:Onyx,美国Markforged公司。

连续碳纤维和Onyx的基本性能参数见表1。

表1 连续碳纤维与Onyx材料基本性能参数

性能	连续碳纤维	Onyx	测试标准
拉伸强度/MPa	700	40	ASTM D3039/D638
拉伸弹性模量/GPa	54	2.4	ASTM D3039/D638
弯曲强度/MPa	470	71	ASTM D790
弯曲弹性模量/GPa	51	3	ASTM D790
热变形温度/°C	105	145	ASTM D648
密度/(g·cm ⁻³)	1.4	1.2	
线径/mm	0.4	1.75	

1.2 主要仪器及设备

双喷头连续纤维3D打印机:Mark Two型,美国Markforged公司;

万能试验机:UTM4204型,济南恒思盛大仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Sigma 300/500型,德国蔡司公司。

1.3 制样方法

双喷头3D打印机两个喷嘴相互独立,由剪切机构开停来完成喷嘴交替工作,样件制备过程原理如图1所示,首先将G代码数据文件传入打印机,输

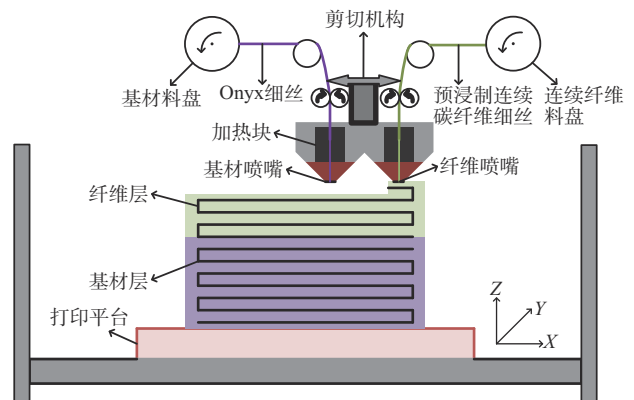


图1 双喷头连续纤维3D打印机工作原理

送装置从两侧料盘上将连续碳纤维丝材和 Onyx 丝材导入加热块装置,经过高温,两种材料中的热塑性树脂部分处于熔融状态,从而使两种材料向下进入左右喷嘴,程序通过控制喷嘴在 XY 平面移动,每结束一层的打印任务,工作平台会下降一个层高距离,继续新层的打印。打印的参数设置为:层高 0.125 mm,喷嘴温度 275 °C,打印速度 15 mm/s。

1.4 实验方案设计

成型方向实验中,制备了 6 个纤维含量相同的标准样条,采用 3 种方案,分别是样条侧放打印、样条立放打印、样条平放打印,如图 2 所示。

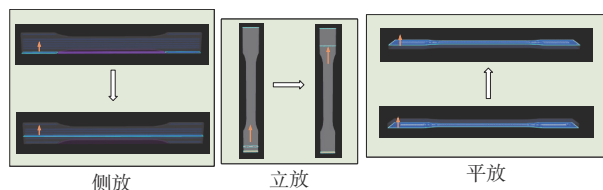


图2 三种成型方向

纤维分布区域、打印成型路径方式实验中,考虑实验成本,制备轮廓尺寸为 80 mm×20 mm×2 mm 的圆弧跑道样件,共有 16 层,其中顶层和底层各有两层 Onyx 基底,所以对中间 12 层材料进行设计。由于纤维轴向承担主要载荷,纤维增强效果最好,因此每种工艺参数下的拉伸、弯曲、压缩样条都从一个圆弧跑道样件的矩形区域提取,长度分别为 6, 4, 1 cm,具体跑道取样方式如图 3 所示。

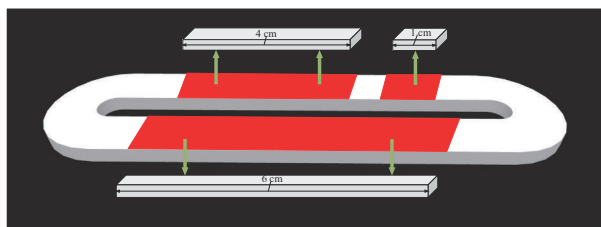
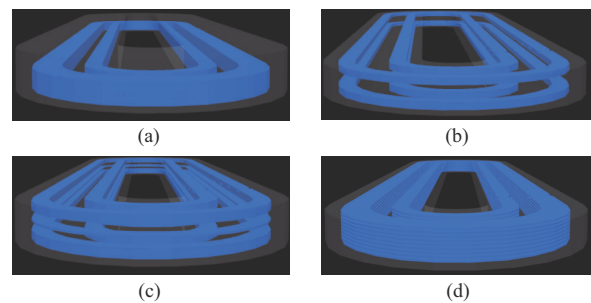


图3 跑道取样方式

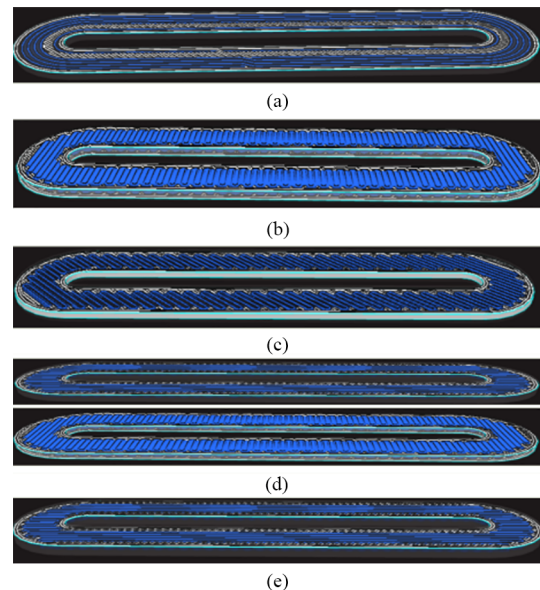
中间 12 层纤维分布区域方式有 4 种,制备了 4 个圆弧跑道样件,纤维和 Onyx 各占 6 层,方案如图 4 所示。图 4a 纤维呈现 6 层一端分布,集中分布在 1 至 6 层;图 4b 纤维呈现 3 层两端分布,分别位于 1 至 3 层、10 至 12 层;图 4c 纤维呈现 2 层前中后分布,分别位于 1 至 2 层、6 至 7 层、11 至 12 层;图 4d 纤维呈现单层间隔分布,均位于偶数层。

中间 12 层纤维的成型路径方式有 5 种,制备了五个圆弧跑道样件,每个样件纤维含量保持一致。方案如图 5 所示,依次为环形、90°,45°,0°/90°,0°的成型路径方式。



a—6层一端分布;b—3层两端分布;
c—2层前中后分布;d—单层间隔分布

图4 纤维分布区域



a—环形;b—90°;c—45°;d—0°/90°;e—0°

图5 成型路径方式

1.5 力学性能测试

拉伸性能按 GB/T 1447-2005 测试,标距为 25 mm,加载速率为 2 mm/min;

弯曲性能按 GB/T 1449-2005 测试,跨距为 35 mm,加载速率为 2 mm/min;

压缩性能按 GB/T 1448-2005 测试,标距为 10 mm,加载速率为 2 mm/min。

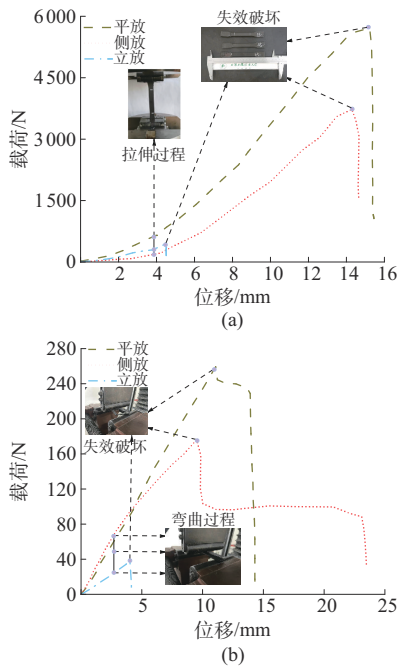
1.6 结果与讨论

(1)成型方向对复合材料样件力学性能的影响。

在 3 种成型方向上样件拉伸性能测试中的载荷-位移曲线如图 6a 所示,当样条平放时,拉伸峰值载荷为 5 712 N,因为拉伸载荷传力路径与纤维方向一致时材料强度可达最优;样条侧放时,峰值载荷为 3 728 N,由于单层打印截面的中间区域宽度太窄,不利于纤维填充,导致纤维主要集中在样条两端;立放时样件拉伸峰值载荷最低,仅为 453 N,因为连续纤维在垂直方向上,两层之间孔隙率较高,

贴合效果不如层内结合方式,强度主要由基体强度、孔隙率和界面结合度决定。

在3种成型方向上样件弯曲性能测试中的载荷-位移曲线如图6b所示,在平放、侧放、立放3个成型方向,弯曲峰值载荷依次为259,176,38 N,平放打印的弯曲性能最佳。因为纤维方向承受载荷能力更强,且宽纤维层面的剪切次数减少,保证了纤维长度连续性,能够缓解应力集中,延迟断裂失效时间点。

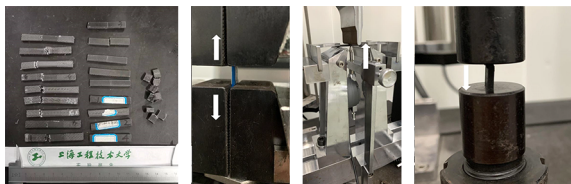


a—拉伸载荷-位移曲线; b—弯曲载荷-位移曲线

图6 不同成型方向的复合材料样件力学性能

(2)纤维分布区域和成型路径方式对复合材料样件力学性能的影响。

对9个圆弧跑道取样,如图7a所示,在电子万能试验机上做拉伸性能、弯曲性能和压缩性能测试,如图7b至图7d所示。

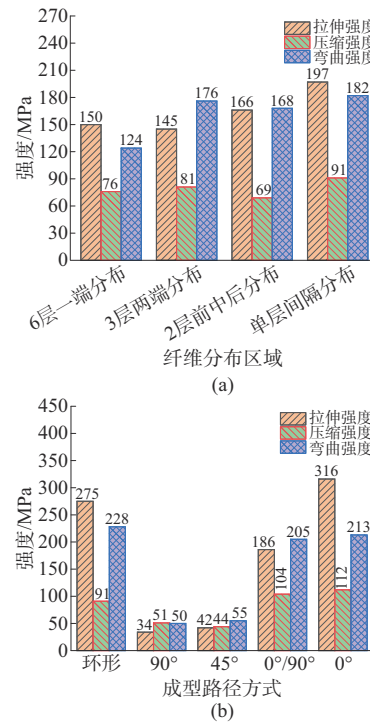


a—跑道提取样件; b—拉伸试验; c—弯曲试验; d—压缩试验

图7 对圆弧跑道取样做力学性能测试

图8a与图8b分别为6层纤维分布区域和5种成型路径方式对复合材料样件拉伸强度、压缩强度、弯曲强度的影响。由图8a和图8b可以看出,纤维分

布和成型路径方式对连续纤维复合材料样件的拉伸强度和弯曲强度影响较大,对压缩强度影响较小,这与压缩荷载作用下孔隙的膨胀和纤维的失稳有关。综合来看,纤维单层间隔分布下性能最好,其次是2层前中后分布,性能最差的是纤维集中一端分布方式。因为纤维均匀分布在各层时,有利于增大纤维层之间的接触压力,提高纤维与基体的浸渍率和界面结合度,可减少打印过程中产生的孔隙,提升样件力学性能。 0° 成型路径的拉伸强度和压缩强度最高,弯曲强度最大的是环形成型路径, $0^\circ/90^\circ$ 压缩性能仅次于 0° , 90° 的拉伸强度最低。因为当拉伸载荷方向与纤维同向,拉伸性能在纤维轴向上表现最优;当拉伸方向与纤维方向垂直,即在 90° 成型路径上,拉伸性能主要取决于纤维与基体界面结合程度; 45° 成型路径方式下各向力学性能都低,因为样条在剪切力作用下容易导致提前失效。

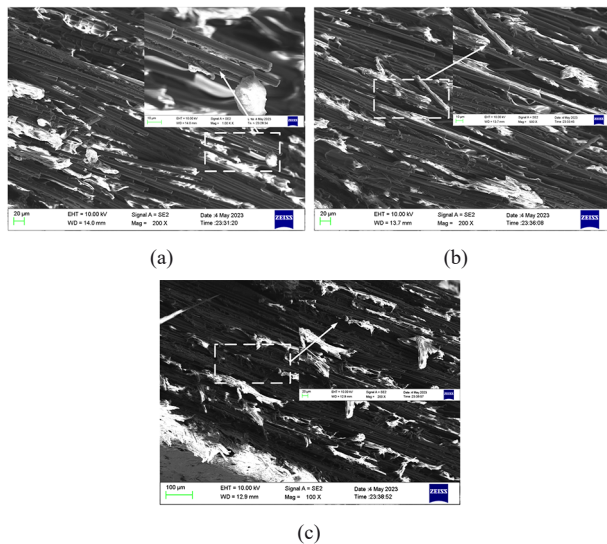


a—纤维分布区域; b—成型路径方式

图8 不同纤维分布区域和成型路径方式下复合材料样件的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度

图9为连续碳纤维拉伸失效后微观断面SEM图。图9a中,长短不一的纤维从纤维束中被拔出,纤维束溃散成大量分散纤维丝,部分纤维断裂后产生应力集中,导致裂纹快速扩展引起纤维脆断,并伴有纤维翘曲;图9b中,基体纤维结合界面发生撕裂,纤维与基体排列不紧密,浸渍率较低,引起了更

多孔隙产生,纤维在载荷作用下直接被折断;图9c中,基体在纤维中分布不均匀产生撕裂,内部纤维几乎不被基体渗透,只有少量外部纤维可以黏附到基体,界面结合度过低导致过早失效。因为纤维表面光滑呈现化学惰性和熔融状态下基体黏度大不易流动,导致两者难以在内部产生有效结合作用,而纤维浸渍率低与拉丝速度和浸渍温度有关,浸渍率过低时,纤维与Onyx将出现明显分离现象,样件内部产生气泡,影响最终力学性能。



a—纤维拔出; b—纤维折断; c—纤维撕裂

图9 连续碳纤维复合材料样件微观断面SEM图

1.7 实验小结

基于上述实验,采用平放打印、纤维层均匀间隔分布、0°成型路径的工艺参数打印连续碳纤维复合材料,可使样件力学性能最佳。而在其它成型方向、纤维分布区域和成型路径方式下,纤维层与载荷的相对位置更容易被改变,从而使复合材料样件层间性能远低于层内性能,且界面黏附性不强造成内部孔隙率较大,容易出现基体开裂和界面分层损伤,发生纤维拔出和断裂等问题^[13-14]。为了提升连续纤维FDM打印产品的质量,尤其是提升纤维复合材料Z方向上力学性能,可从纤维错位、缺陷、空隙和树脂类型等影响因素开展进一步的研究。

2 四旋翼无人机主体结构与原理

图10为四旋翼无人机主体结构,机体呈现X型,中心部分是放置电源、控制器等设备的承载座,往外四个悬臂点位安装电机和旋翼。将机身4个旋翼以对角线为界分为两组,每组转动方向相反,抵消各方向扭矩。已知无人机实际飞行情况分为5

种:悬停、垂直、俯仰、翻滚、偏航,1和3点位逆时针旋转控制飞行左右方向,2和4点位顺时针旋转控制飞行进退方向。悬停工况时,每个点位以同等速度转动,向上的升力与向下的重力与阻力相抵,机体处于静止,达到空中悬停目的;垂直工况时,各点位转速大小一致,保持同等加速度运动,机体可实现上升与下落;俯仰工况时,左右方向控制点位速度不变,进退方向两个点位分别瞬时增速和减速,使得2,4点位旋翼产生升力差,触发机体形成角加速度,实现机体俯仰飞行。翻滚工况时,则与俯仰相反,进退点位速度保持不变,控制左右点位一个加速一个减速,形成速度差,实现机体左右飞行。偏航工况时,每组点位转速组内两两相同,各组转速大小存在区别,例如,当1,3点位旋翼速度大小大于2,4点位时,机体反作用力方向跟随1,3点位,即实现逆时针偏转飞行。

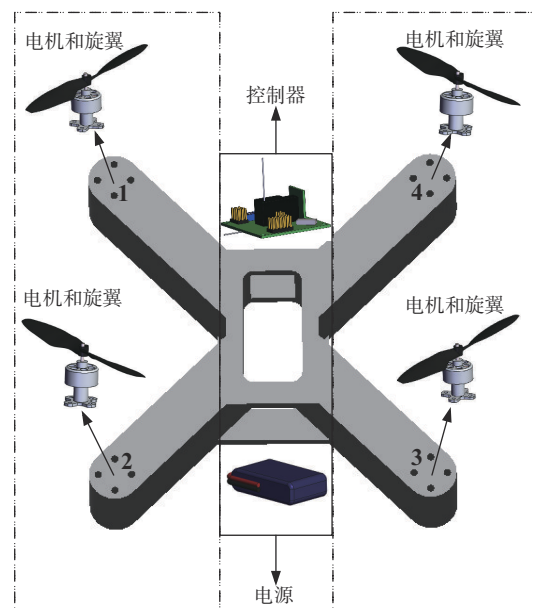


图10 四旋翼无人机主体结构图

3 理论模型与流程

3.1 拓扑理论与数学模型

以变密度法^[15-16]插值方式寻求拓扑构型材料最优分布设计,把设计域内材料的有无状态分别用1和0表示,当密度浮动于二者之间时候,优化结果可能出现棋盘格不稳定现象,不利于重构与制造,因此引入惩罚因子 p ,使浮动密度趋向0或1,对应插值模型为:

$$E(x_e) = E^{\min} + x_e^p (E^0 - E^{\min}) \quad (1)$$

式中: x_e 表示单元密度; p 为惩罚因子; E 为材料的弹性模量; E^0 表示实体材料的弹性模量; E^{\min} 表示

孔洞材料的弹性模量。

选取两种优化方案,分别以柔度和质量最小为目标函数,对应体积约束和尺寸约束,具体数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{find: } x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \\ & \text{min: } C = \sum_e^N x_e^p u_e k_e u_e \\ & s. t. \begin{cases} F = KU \\ \frac{v^*}{v_0} = f \\ 0 \leq x_e \leq 1 (e = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{find: } x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \\ & \text{min: } M = \sum_e^N x_e^p v_0 \rho \\ & s. t. \begin{cases} F = KU \\ d_1 \geq d^* \\ 0 \leq x_e \leq 1 (e = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x_e 和 p 含义与式(1)中相同; U, F, K 为整体位移、力矢量、刚度矩阵; u_e 和 k_e 为单元位移矢量和单元刚度矩阵; N 为单元总数; C 表示柔度,作为优化目标函数; v_0 为初始体积; v^* 为优化后体积; f 为体积约束分数; M 表示质量,作为优化目标函数; ρ 为密度; d_1 和 d^* 为任意网格尺寸和最小网格尺寸。

3.2 拓扑优化流程

拓扑优化的分析流程如图11所示:首先明确设计域和非设计域,定义好优化的目标函数与约束条件,再由优化算法做有限元分析,不断迭代设计变量单元密度,判断是否满足优化要求,直至得到最

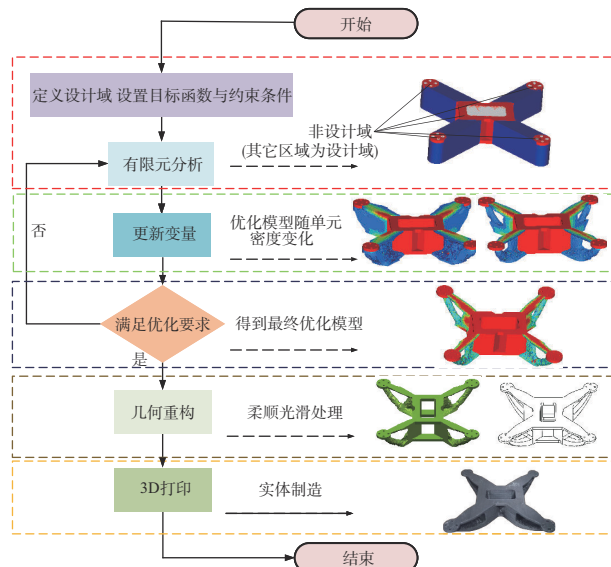


图11 拓扑优化流程

终优化模型并进行几何重构,最后进行3D打印。

4 构型分析与优化

4.1 初始工况强度分析

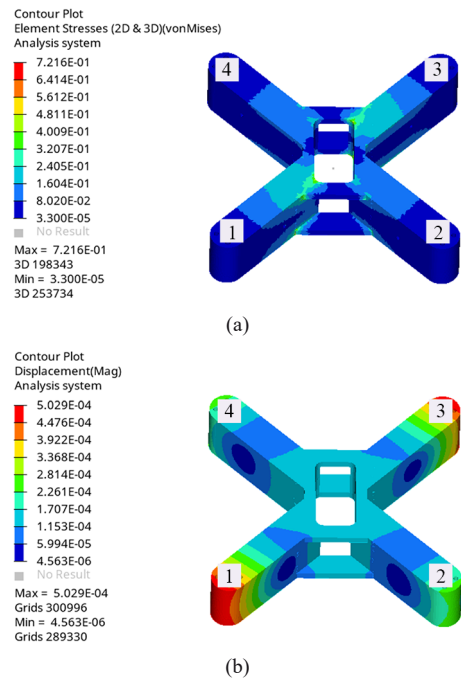
在对四旋翼无人机拓扑优化之前,首先对不同运动状态下无人机的受力状况进行静力学仿真,对承载性能最劣的工况做拓扑优化分析。选用连续碳纤维复合材料,重力和风力集中施加在承载座中心区域质量点上,整体质量0.4 kg,风阻为20 N,4个点提供升力,再对整体施加惯性释放。表2为5种工况下4个点旋翼提供升力和强度分析数据。

表2 5种工况下各点位旋翼升力与强度

状态	F_1/N	F_2/N	F_3/N	F_4/N	等效应力/ 10^{-1} MPa	位移/ 10^{-4} mm
悬停	5.98	5.98	5.98	5.98	2.646	1.661
垂直	9	9	9	9	6.717	4.362
俯仰	7	10	7	6	4.868	3.731
翻滚	10	7	6	7	4.868	3.731
偏航	7	10	7	10	7.216	5.029

注: F_1, F_2, F_3, F_4 为1,2,3,4点位对应的旋翼升力。

偏航工况下无人机的等效力和位移最大,图12为对应云图。偏航情况下进退点位组速度大于左右点位组速度,因此2,4点位旋翼升力比1,3点位大,等效力与位移最大区域集中在1,3点位对角线上,造成了机体顺时针飞行。所以接下来以偏航工况下的无人机为拓扑优化对象,通过有限元分析软件HyperWorks的OptiStruct模块,比较不同约



a—等效力云图; b—位移云图

图12 偏航工况下四旋翼无人机等效力与位移云图

束条件和优化目标下的拓扑优化结果,选择最佳优化方案。

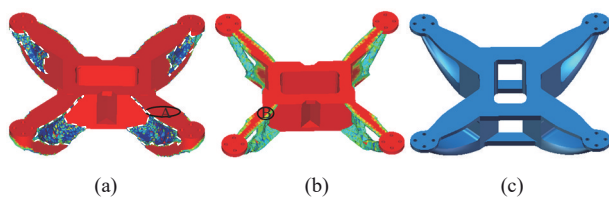
4.2 拓扑优化与重构

以上述偏航工况为优化对象,定义旋翼安装点位面和承载座为非设计域,剩余部分为设计域,为探索最优设计结果,分别设置两大组优化方案,以最小柔度为优化目标,设置体积约束分数为20%,35%,40%;以最小质量为优化目标,设置网格最小尺寸为10,14,16 mm,且两大组方案同时定义形状对称,表3为优化方案与结果。

表3 拓扑优化方案与结果

方案	优化目标	约束条件		等效应力/MPa	位移/ 10^{-3} mm
		体积约束分数/%	网格最小尺寸/mm		
1	柔度最小	20		2.712	2.269
2	柔度最小	35		1.783	1.648
3	柔度最小	40		1.157	1.208
4	质量最小		10	3.477	6.071
5	质量最小		14	3.146	4.247
6	质量最小		16	2.984	3.961

由表3可知,拓扑优化方案中以柔度为优化目标的等效应力与位移均比以质量为优化目标的小,因为柔度最小优化旨在提高材料承受载荷强度能力,而质量最小优化则考虑最大限度将材料去除。图13a为方案3拓扑构型,等效应力和位移最低,质量更大,构型中白色虚线圈住部分为应力偏小处,该处材料优先去除,其余部分则相反,旋翼安装面和承载座的连接区域A较宽,缓解了承载座载荷分散到4个旋翼点位。在方案4,5,6中,网格尺寸对优化应力和位移影响差别不大,取最小网格尺寸为中间值的优化方案5,对应拓扑构型如图13b所示,质量最小且材料保留清晰,承载座分配给旋翼点位的载荷主要通过连接区域B传递,该连接处宽度较小,在极端载荷下容易发生断裂。为了减轻质量且降低柔度,笔者结合两种优化方案进行二次重构,即基于方案5优化构型,参考方案3在旋翼面与承载座之间较宽的连接方式,最后得出二次重构模型如图13c所示。



a—方案3拓扑构型; b—方案5拓扑构型; c—二次重构模型

图13 拓扑优化构型云图与重构模型

4.3 轻量化校核

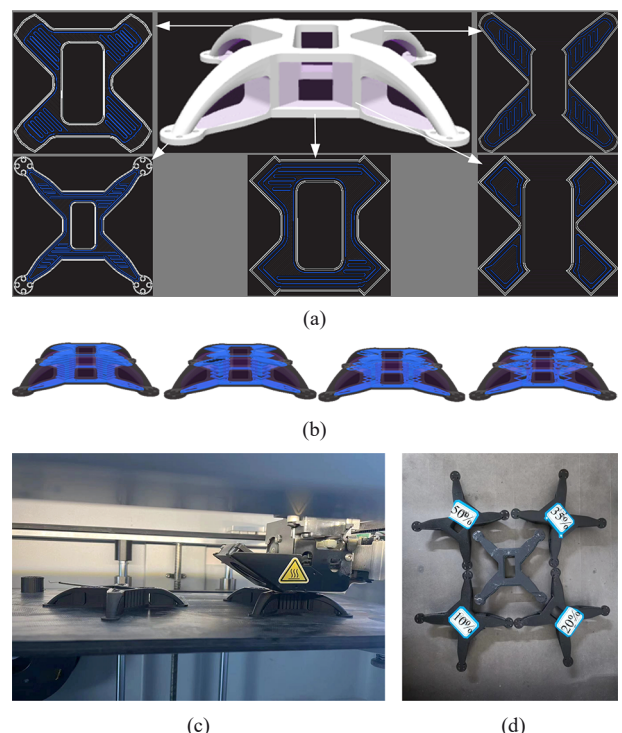
对重构四旋翼模型与优化前构型进行偏航工况下数据分析,结果见表4。优化前该工况下等效应力为0.721 6 MPa,位移为 5.029×10^{-4} mm,质量为0.27 kg;优化后等效应力为1.111 MPa,仅增加0.389 4 MPa,仍处于材料屈服强度极限之内,位移最大为 1.743×10^{-3} mm,相比优化前微小增大,质量为0.14 kg,降低了48%,达到了轻量化效果。

表4 优化前后数据

模型状态	等效应力/MPa	位移/mm	质量/kg
优化前	0.721 6	5.029×10^{-4}	0.27
优化后	1.111 0	1.743×10^{-3}	0.14

5 不同连续纤维体积分数下四旋翼无人机打印测试

为了探究连续纤维体积分数对样件力学性能的影响,基于实验所得最佳工艺参数,打印连续纤维体积分数分别为0%,10%,20%,35%,50%的无人机样件。图14a为连续纤维路径分布,从下至上逐层打印,当铺设层表面空间足够时,连续纤维优先采用轴向纤维 0° 铺设,而在区域狭窄处则通过其它倾斜角度填充。图14b为体积分数50%,35%,20%,10%的连续纤维分布,连续纤维含量越多,形成的



a—连续纤维路径分布; b—连续纤维体积分数为50%,35%,20%,10% (从左至右)的连续纤维分布; c—打印过程; d—不同体积分数的连续纤维四旋翼无人机样件

图14 样件制备

连续纤维层越厚,连续纤维层整体呈现均匀分布,每个样件靠近顶部和底部区域的连续纤维层厚度稍大,这样可增加这些区域承受外界载荷的能力。图14c为Mark Two打印四旋翼无人机实体过程;图14d为打印好的5个不同体积分数的连续纤维四旋翼无人机样件。

对打印好的四旋翼无人机样件进行压缩试验,图15为对应载荷-位移曲线。图15显示,没有添加连续纤维的样件在位移0.92 mm失效,仅能承受532 N的最大压缩载荷,当连续纤维体积分数依次增加到10%,20%,35%,50%时,最大压缩载荷也随之增大,分别是2 512,4 060,5 590,6 425 N,比连续纤维体积分数为0%的样件最大压缩载荷提高了47%,76%,105%,120%。连续纤维从无到有,无人机样件压缩强度明显提高,但是连续纤维体积分数达到50%后最大压缩载荷增速减缓,样件力学性能提升效果降低。虽然增加连续纤维含量可提高载荷承受能力,但是也可能影响连续纤维与基体的充分浸渍,导致界面结合性弱,引入更多杂质,增加无人机样件孔隙率,最终影响力学性能。考虑制造成本,当连续纤维体积分数为35%时,打印的四旋翼无人机样件在实现轻量化的同时提高了压缩承载力,更符合实际应用需求。

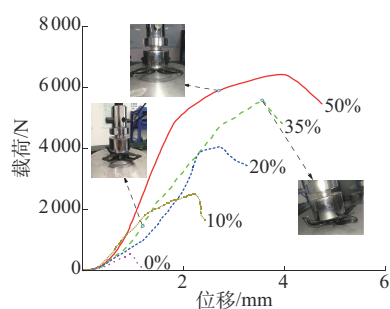


图15 四旋翼无人机样件载荷-位移曲线

6 结论

(1)探究了连续碳纤维复合材料的成型方向、纤维分布区域和成型路径方式对样件力学性能影响,得出了最佳3D打印工艺参数为平放打印、纤维层均匀间隔分布、0°成型路径的。

(2)对四旋翼无人机做了悬停、垂直、俯仰、翻滚、偏航工况下的静力学分析,选取承载能力最差的偏航工况进行拓扑优化,重构模型质量较优化前降低了48%。

(3)基于最佳工艺参数,制备了5个不同连续纤维体积分数的四旋翼无人机样件并进行压缩性能

测试,得出连续纤维体积分数在35%时可控制成本并提高产品力学性能。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 朱继宏,周涵,王创,等.面向增材制造的拓扑优化技术发展现状与未来[J].航空制造技术,2020,63(10):24-38.
Zhu Jihong, Zhou Han, Wang Chuang, et al. Status and future of topology optimization for additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10):24-38.
- [3] 毕向军,田小永,张帅,等.连续纤维增强热塑性复合材料3D打印的研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(2):138-142.
Bi Xiangjun, Tian Xiaoyong, Zhang Shuai, et al. Research progress in 3D printing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):138-142.
- [4] 秦若森,孙守政,韩振宇,等.3D打印连续纤维增强热塑性复合材料成型质量的研究进展[J].材料导报,2022,36(17):200-208.
Qin Ruosen, Sun Shouzheng, Han Zhenyu, et al. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: A review on molding quality[J]. Materials Reports, 2022, 36(17):200-208.
- [5] 范聪泽,单忠德,邹贵生,等.3D打印连续纤维复合材料丝材的成形规律[J].中国机械工程,2020,31(9):1 089-1 097.
Fan Chongze, Shan Zhongde, Zou Guisheng, et al. Forming laws of continuous fiber composite filaments in 3D printing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9):1 089-1 097.
- [6] 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 Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7):3 703-3 721.
- [7] 肇研,孙铭辰,张思益,等.连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J].复合材料学报,2022,39(9):4 274-4 285.
Zhao Yan, Sun Mingchen, Zhang Siyi, et al. Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9):4 274-4 285.
- [8] 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.
- [9] Hu Q X, Duan Y C, Zhang H G, et al. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53:1 887-1 898.
- [10] Hao W F, 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.
- [11] Mei H, Ali Z, Ali I, et al. Tailoring strength and modulus by 3D printing different continuous fibers and filled structures into composites[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2019, 2:312–319.
- [12] Araya-Calvo M, López-Gómez I, Chamberlain-Simon N, et al. Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22:157–164.
- [13] 龙昱,李岩,付昆昆. 3D打印纤维增强复合材料工艺和力学性能研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9):4 196–4 212.
Long Yan, Li Yan, Fu Kunkun. Recent advances in 3D printed fiber reinforced composites: Processing technique and mechanical performance[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4 196–4 212.
- [14] 李岩,龙昱,郝瀚岑,等. 3D打印纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. *力学季刊*, 2022, 43(04):731–750.
- Li Yan, Long Yu, Hao Lucen, et al. Recent advances in the mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced composites[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2022, 43(4):731–750.
- [15] 谷小军,李城彬,王文龙,等. 拓扑优化与增材制造技术的融合及其在民用飞行器设计中的应用[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(14):14–20.
Gu Xiaojun, Li Chengbin, Wang Wenlong, et al. Integration of topology optimization and additive manufacturing technology and its application in civil aircraft structural design[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(14):14–20.
- [16] 陈继文,陈清朋,王琛,等. 面向熔融沉积成型技术的曳引机壳拓扑结构优化设计[J]. *中国工程机械学报*, 2019, 17(4):304–310.
Chen Jiwen, Chen Qingpeng, Wang Chen, et al. Topology optimization design of traction machine shell oriented fused deposition modeling technology[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2019, 17(4):304–310.
- ~~~~~
- (上接第75页)
- [13] Deniz S, Ayegül A E. Numerical simulation and experimental analysis for evaluating warpage of a 3D thin-walled polymeric part using the injection compression molding process[J]. *International Polymer Processing: The Journal of the Polymer Processing Society*, 2022, 37(2):164–175.
- [14] 么大锁,贺莹,于洋洋. 基于RBF神经网络和遗传算法的注塑成型质量控制与预测[J]. *塑料工业*, 2020, 48(4):71–76.
Me Dasuo, He ying, Yu Yangyang. Injection molding quality control and prediction based on RBF neural network and genetic algorithm[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(4):71–76.
- [15] Kitayama S, Yamazaki Y, Takano M, et al. Numerical and experimental investigation of process parameters optimization in plastic injection molding using multi-criteria decision making[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, 85(4):95–105.
- [16] 张栋伟,王骥. 基于Moldflow的轴承座冷却系统结构优化[J]. *塑料工业*, 2016, 44(12):46–50.
Zhang Dongwei, Wang Ji. Structural optimization of cooling system of a bearing stand based on Moldflow[J]. *China Plastics Industry*, 2016, 44(12):46–50.
- [17] 杜鹏辉,于江涛,于昕世,等. 基于Taguchi试验的空调导风板预变形控制[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(6):68–72, 84.
Du Penghui, Yu Jiangtao, Yu Xinshi, et al. Predeformation control of air conditioner deflector based on Taguchi experiment[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(6):68–72, 84.