

航模机翼复合材料结构设计

朱有为 陈浩恩 张倩 刘军波
西安理工大学

DOI:10.32629/etd.v7i6.21012

[摘要] 熔融沉积成型(FDM)3D打印技术因其成型灵活、成本低廉而被广泛应用于航模制造领域。然而,传统FDM^[1]工艺多采用单一材料打印,难以兼顾多项性能需求。在航模机翼应用中,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PETG)^[2]材料虽韧性良好,但存在密度较大、耐候性差、耐热性不足的问题;丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物(ASA)^[3]材料虽具有优异的耐候性与耐热性,但韧性较差、强度略低且材料成本高。针对上述矛盾,本文提出一种航模机翼复合材料结构设计:以ASA材料打印构件外壳,发挥其耐候、耐热的优势;以PETG材料填充内部,利用其柔韧性和高强度特性;在结构中心嵌入碳纤维杆作为增强骨架,进一步提升整体刚度。该复合结构在性能上实现了内外互补的同时,在质量与成本方面,相较于纯PETG打印实现了减重,相较于纯ASA打印降低了材料成本。本研究为FDM 3D打印技术在航模机翼及其他轻质结构件制造中的材料选型与结构优化提供了新的思路与参考。

[关键词] FDM 3D打印; 航模机翼; 复合材料; ASA; PETG; 碳纤维杆; 结构优化; 轻量化设计
中图分类号: TP334.8 **文献标识码:** A

Design of Composite Material Structure for Model Aircraft Wings

Youwei Zhu Haoen Chen Qian Zhang Junbo Liu
Xi'an University of Technology

[Abstract] Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology is widely used in model aircraft manufacturing due to its flexible forming capability and low cost. However, conventional FDM^[1] processes mostly rely on single-material printing, which fails to satisfy multiple comprehensive performance requirements. In the application of model aircraft wings, polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG)^[2] features favorable toughness, yet suffers from high density, poor weather resistance and insufficient heat resistance. Acrylonitrile-styrene-acrylate copolymer (ASA)^[3] boasts excellent weather resistance and thermal resistance, whereas it is inferior in toughness, slightly low in strength and high in material cost. To address the above contradictions, this paper proposes a composite structural design for model aircraft wings. The outer shell is printed with ASA to take full advantage of its weather and heat resistance; the inner part is filled with PETG to utilize its flexibility and high strength; carbon fiber rods are embedded in the structural center as reinforcing skeletons to further enhance the overall stiffness. This composite structure achieves complementary internal and external performance advantages. In terms of weight and cost, it realizes weight reduction compared with full PETG printed structures and cuts down material costs in contrast with full ASA printed structures. This study provides new ideas and references for material selection and structural optimization of FDM 3D printing in the fabrication of model aircraft wings and other lightweight structural components.

[Key words] FDM 3D Printing; Aircraft Model Wing; Composite Material; ASA; PETG; Carbon Fiber Rod; Structural Optimization; Lightweight Design

引言

熔融沉积成型(FDM)属于增材制造领域的重要技术分支,它的产生可以追溯到20世纪80年代末。该技术依靠设备投入少、操作简便、原料来源广等特点,在快速原型制造中具有明显的优

势,逐渐成为消费级市场和工业生产中的一种主要的应用方案。得益于计算机辅助设计性能的不断改善、切片算法的不断改进以及新型专用材料的不断突破,FDM技术的应用范围已经从最初的原型制作发展到功能件直接制造,并且被广泛应用于航空航

天、汽车制造、医疗器械研发、建筑行业等各个领域。与传统的减材加工方式相比,FDM技术大大降低了材料的消耗,也打破了复杂几何形体和个性化制品生产的限制,在轻量化结构的设计和实现方面有着重要的意义,从而促进了相关领域的发展。

熔融沉积(Fused Deposition Modeling, FDM)技术在航模制造领域应用之后,对传统航空模型结构件的生产方式产生了根本性的改变。与传统的用轻质木材覆膜、泡沫材料填充、玻璃纤维增强塑料复合工艺来建造机翼的方式不同,后者的操作流程比较繁琐,很大程度上依靠人工的经验。复杂的翼型结构研发的时候,这种方式很难达到灵活调节、快速更新的目的。FDM技术由于三维数字化建模的优势,可以使得零部件得到正确的3D打印,在传统注塑成型只能使用专用模具的方面大大超越,缩短了由概念提出到性能测试的时间距离。该技术内嵌式一体成型构件,可以有效地减小装配误差,又可以大大提高成品的整体刚度和稳定性。

目前,全球范围内航模爱好者和科研机构把熔融沉积挤出成型(FDM)技术广泛应用于航空模型机体结构关键部位的制造,即机身框架、翼展构件、连接单元、动力支撑系统等主要部件。虽然FDM打印技术由于工艺成熟而被广泛使用,但是单一材料不能同时满足航空模型翼面轻质化设计、高强度特性、优异抗冲击能力、环境适应性等各方面的需要。机翼是主要的飞行部件,承受主要的飞行载荷,即升力载荷、气流载荷、冲击载荷等,机翼的性能参数直接决定着飞行平台的稳定性、寿命。

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PETG)由于具有很好的韧性、良好的层间结合性能和稳定的挤出加工性能,在熔融沉积型3D打印技术中占有很重要的地位,被广泛应用于功能性部件的制作。显著优点是抗冲击能力强、抗裂性好,适用于各种应力状态,在大荷载作用下仍然可以起到支撑的作用。该材料存在密度大、紫外线诱导老化敏感、高温下尺寸稳定性下降等缺点,这些缺点都会对它的实际应用效果产生不利影响,在航空模型制造等对可靠性要求极高的领域中需要慎重考虑。相比之下,丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物(ASA)具有很强的耐候性、抗紫外线降解性,在户外条件下长期稳定性好;但是力学性能较差,生产成本高。如果完全用ASA作为3D打印基体材料,不仅会增加整体制造成本,还会对最终产品的机械强度造成影响。因此,在选择合适的3D打印材料时需要综合权衡各方面的性能要求和经济可行性。

单一材料不能满足复杂应用需求的时候,多材料复合打印技术就成为FDM领域的重要研究方向。该技术通过科学搭配不同的材质,不但可以实现功能的整合,还可以明显改善综合性能指标。在此基础上,本文提出了一种ASA外层、PETG中层、碳纤维加强杆的航模机翼设计方案。ASA材料主要用作机翼表面耐候、耐高温材料,PETG主要用作结构的韧性和抗冲击材料,碳纤维棒作为主要的支撑单元,大大提高了机翼的刚度和稳定性。经过力学仿真分析、质量数据统计、成本效益评价,证明该方案在提高航

模飞行器性能方面是可行的、经济的,为用FDM技术开发高性能航模设备提供理论依据和技术参考。

1 制作工艺

本文主要研究复合材料机翼制造的关键流程,分为设计、成形、集成这三个主要部分。各个阶段都会对最终产品的性能以及成型质量产生影响。为了提高复合材料体系的综合可靠性,在整个工艺链中应该系统地整合材料选择、加工参数设定、结构优化、装配方式改进等各个要素,并采用协同调控的方法。

1.1 设计

本文以SolidWorks三维建模软件为依托,建立航模机翼的几何模型,使用复合材料结构优化技术对内部支撑体系进行系统的重构。按照轻量化设计思想,改变网格参数会使得材料用量明显减少,力学性能指标稳定可靠。按照功能分区原则,把机翼主体分成ASA(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯)外覆层和PETG(聚对苯二甲酸乙二醇酯)基层两个模块。ASA外覆层为主要承压防护结构,耐候性、表面硬度好,厚度为1.2毫米;PETG基层为低密度多孔网络,通过孔隙率的精确控制达到减重的目的,在关键部位设计直径3.2毫米的圆形孔洞,集成碳纤维增强型杆件。初步设计完成后,用STL格式文件导入Cura切片软件中,得到详细的切片指令,给之后的3D打印操作提供可靠的依据。

为了得到ASA和PETG两种材料最好的打印效果,本文分别设计了两种工艺参数方案。在ASA材料制备中,将层片厚度设为0.2mm,熔融沉积温度设为260℃,加热平台温度设为90℃,打印速度设为40mm/s;PETG材料采用相同的层厚配置,熔融沉积温度降低到240℃,加热平台温度相应降低到80℃,其他条件不变。两者都用30%填充密度,机械性能好,耗材少。实验前对打印基板做热处理得到一个封闭的恒温环境来减小温度不一致所造成的成型翘曲,使成品质量更加稳定。

1.2 打印

采用双喷头熔融沉积成型(FDM)技术,对机翼组件进行3D打印制备实验。初期用聚己内酯(PETG)为原料进行成形加工,用内部支撑结构辅助成型;构件自然冷却到室温后,小心地去掉支撑体,保证表面光洁度和形态精度。接着用丙烯酸酰胺(ASA)代替PETG基体,按照预设的轮廓信息进行全包围式的打印,保证ASA外层可以紧密贴合PETG基体,为之后的集成提供可靠的基底。通过对工艺参数尤其是固化速率的有效控制,大大提高了两种材料之间界面结合性能以及综合机械性能。

复合材料构件增材制造时,喷嘴堵塞、材料收缩、层间结合强度低等问题要得到解决,对相关参数变化趋势进行实时监测。ASA材质由于具有明显的热胀冷缩特性,在成型时容易产生严重的翘曲变形,因此必须对打印环境进行精确的温度控制;而PETG树脂常常会出现由于高熔融黏度造成的“拉丝”现象,可以通过调整回抽速率来改善工艺表现。对参数进行合理的配置,并配合细致的调校工作,可以有效地提高打印件的整体精度和表面质量。

1.3 装配

打印工艺完成后,采用精密打磨技术对碳纤维杆表面进行处理,从而改善碳纤维杆与环氧树脂基体之间的界面交互性能。随后在碳纤维杆外周均匀涂覆一层厚度适中、结构致密的环氧树脂保护层,填充到预定通孔区域,待材料完全固化后进行下一步操作。由于碳纤维增强复合材料具有良好的机械性能,该部件的应用可以大大提高机翼的刚度,也可以有效地减小弯曲载荷作用下产生的动态响应偏差。

ASA外壳和PETG内衬的装配工艺主要是依靠环氧树脂胶黏剂来达到材料之间紧密结合的目的。为了提高界面附着力,在组装过程中用热风枪对连接处进行局部加热,再施加一定的外力,使两者在接触面上产生微米级的分子重合。装配完成后要对整个结构做外观检查及几何参数测量,无明显变形、位置偏移。

2 成果验证

本研究利用万能材料试验机按照ASTM D790标准对复合材料机翼构件进行三点弯曲试验。选取厚度为10mm、宽度为20mm、长度为150mm的试样,跨距为100mm,加载速率为5mm/min。各个实验数据都做了五次重复测量,得到均值作为统计结果。重点分析抗弯强度、弹性模量、断裂伸长率等主要力学指标,对不同材料组合的性能特点以及协同作用进行分析。

表1 力学性能测试结果

材料 \ 物理量	抗弯强度 (MPa)	弯曲模量 (GPa)	伸长率 (%)
纯 PETG	52.3 ± 2.1	1.85 ± 0.08	6.2 ± 0.5
纯 ASA	48.7 ± 1.9	2.12 ± 0.09	3.8 ± 0.4
PETG+碳纤维	68.5 ± 2.5	3.56 ± 0.12	4.5 ± 0.4
复合结构材料	72.4 ± 2.3	3.81 ± 0.11	5.1 ± 0.5

表1给出了四种试件类型在三点弯曲试验中得到的抗弯强度、弹性模量、断裂伸长率等主要参数。统计结果表明,不同的结构力学属性存在较大的差别。

抗弯强度分析可知,纯PETG和纯ASA试件的力学性能特征相似,证明这两种材料具有满足普通航模机翼结构强度要求的基本条件。将碳纤维杆嵌入PETG基体之后,复合材料样本的抗弯强度提高到68.5MPa,主要是由于碳纤维优异的增强作用以及对材料抵抗弯曲应力能力的明显改善。在采用ASA作为外层、PETG作为内核的设计方案中,新型复合材料样品表现出更好的整体性能,其抗弯强度达到72.4MPa,比初始复合材料提高了约5.7%,说明ASA和PETG界面有很好的协同增效作用。

根据弯曲模量测试数据可知,纯PETG材料由于分子链柔顺性较强,具有最低的弹性模量(1.85GPa),具有较好的韧性;纯ASA材料的硬度较高,弹性模量为2.12GPa。在PETG基体中加入碳纤维杆之后,弯曲强度提高92.4%以上,证明了碳纤维增强增韧的效果。当ASA壳体和碳纤维杆一起构成复合结构的时候,整体

弯曲模量达到3.81GPa,在所有样本类型中最好。该改进主要是由于ASA材质和碳纤维之间协同作用对材料刚度的优化。较高的弯曲模量可以降低飞行过程中翼面受载变形的风险,也可以明显改善飞行器的姿态稳定性及运行可靠性。

断裂伸长率测试结果表明,纯PETG样品具有较好的韧性、延展性,初始值为6.2%;纯ASA样品的断裂伸长率只有3.8%,刚性更好。当碳纤维被加入到PETG基体中时,复合材料(PETG+碳杆)的断裂伸长率只有4.5%,说明虽然碳纤维提高了材料的力学性能,但是它对提高材料的柔韧性的作用不大。采用ASA外层、PETG内层的双组分结构得到最高的断裂伸长率(5.1%),说明该多相体系可以保持高强度的同时提高综合机械性能。

从研究数据可以看出,该复合材料在弯曲强度、弹性模量、断裂伸长率等主要的机械性能指标上具有比较均衡的特性。相比于纯基体材料来说,其力学性能得到显著改善,韧性优良,说明ASA外层/PETG中间层/碳纤维内芯三层结构的设计思路是可行的、实用的,为高性能功能材料的研发提供了重要的理论依据和实践依据。

3 质量与成本分析

为了更好的了解复合结构的实际工程应用价值,本文选取了各种典型的结构形式作为对比参照,对它们的性能指标以及生产成本作了系统的评价。对打印样品质量检测结果和原料耗用数据进行统计分析,可以全方位地体现该类结构在轻量化设计、经济性优化等方面所具有的技术优势以及潜在的经济效益。

表2 质量与材料成本对比

材料 \ 指标	质量 (g)	质量变化	材料成本 (元/件)	成本变化
纯 PETG	142.5 ± 2.3	基准	28.5	-41.2%
纯 ASA	124.8 ± 1.9	-12.4%	48.5	基准
复合结构材料	129.6 ± 2.0	-9.1%	35.8	-26.2%

表2为三种试件的质量和材料成本对比。

根据质量数据的统计分析可知,纯PETG结构的质量值为142.5克。结果可以归因于PETG材料本身具有高密度的特性,为了保证力学性能而需要额外添加的原料。与之相反的是纯ASA结构具有很好的轻量化性能,质量最低,仅为124.8克。采用复合结构材料所得构件质量为129.6克,在保持优良机械性能的基础上,比传统设计质量降低了约9.1%,再次证明了该类材料在减重方面有较大的潜力和意义。

根据材料成本数据可知,ASA材质单价高,纯ASA结构单位生产成本达到48.5元/件,是三种设计方案中成本最高的。PETG材质成本较低,大约30元,但是耐候性、耐温性较差。复合结构方案合理地组合各种材料,保证良好的性能,在保持35.8元/件以下的单位制造成本基础上进行比较,说明了科学配比的重要性。

该复合材料体系具有较好的服役性能, 具有明显的优势。ASA外层由于具有很好的抗紫外老化性能, 可以延缓材料的降解速度, 从而大大提高制品的实际使用寿命; 而PETG内层由于具有很好的韧性, 可以显著提高对机械冲击损伤的抵抗能力。添加碳纤维增强后, 刚性、强度都有明显提高, 在工作环境苛刻的情况下, 机翼结构的安全性、可靠性依然可以得到保证。

根据前面的研究, 本研究提出的ASA外层、PETG内衬、碳纤维加强的复合结构在轻量化设计、力学性能、经济性等方面有明显的优势。该结构不但大大减轻了机翼的质量负担, 而且降低了材料成本, 提高了结构的抗疲劳性能和飞行控制品质。对于FDM3D打印技术在航模上的应用有着重大的指导意义和理论价值。

4 结论

本文针对传统熔融沉积制造(FDM)工艺在航模机翼成型过程中所遇到的单一材料不能同时满足力学特性和功能需求的技术瓶颈, 提出了一种新的多材料集成设计方法。采用ASA高韧性聚苯乙烯作为外部防护层, PETG共聚酯作为内部支撑基体, 碳纤维增强复合材料作为主梁结构, 从而达到整体构件性能的明显提升, 并实现优化配置。

研究表明, ASA材料可以提高机翼的耐候性、耐热性; PETG材料因为具有良好的韧性、抗冲击性而受到人们的关注; 碳纤维棒的应用大大提高了整体结构的刚性。通过三点弯曲试验

数据可知, 该复合材料结构的抗弯强度、弯曲模量、断裂伸长率等主要力学指标都优于单个材料对应的单独结构形式, 实现了机械性能中“硬度”和“柔性”的最佳结合。

本研究采用质量与成本分析模型, 得出结论为提出的设计方案比纯PETG结构减重效果明显, 经济性优于纯ASA结构, 充分体现了该设计在工程应用中的优势。该复合结构把轻量化、高强度、优良的环境适应性这些关键参数综合起来, 给航模机翼的开发赋予了可靠的理论支撑和技术支持, 有着十分重要的实践意义和推广价值。

未来的研究可以采用拓扑优化技术、多材料协同增材制造工艺、有限元分析方法等手段, 对复合结构内部排列的最优设计方案进行深入研究, 从而达到更加明显性能提升的目的。

[参考文献]

- [1]张永超, 何科, 陈荣, 等. 基于FDM的GF/PLA复合材料3D打印工艺研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2025, 23(04): 41-45.
- [2]邱杨, 礼嵩明, 蒋诗才. 3D打印用PETG功能复合材料的制备及性能[J/OL]. 航空制造技术, 1-9[2026-05-08].
- [3]王威, 李昀, 周晔, 等. ASA高分子模板支架体系自动化监测分析研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(08): 74-80.

作者简介:

朱有为(2006--), 男, 汉族, 安徽合肥人, 本科生在读, 研究方向: 电子科学与技术。