

# 碳纤维复合材料联合3D打印工艺 在航空器起落架轻量化设计中的应用研究

高洪亮 王新波 高浩习

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050200

**摘要：**航空器起落架是飞机的核心承载构件，近年来，随着民航业的快速发展，其必须满足当前行业的高要求，不仅强度达到标准，还要实现轻量化设计。常规起落架以高强钢材为主，其重量相对较大，整体油耗较高，而碳纤维复合材料的应用，因其高强度和高弹性模量等优势，有望实现轻量化设计的首选，而3D打印为设计提供新的技术支持。本文从材料结构力学角度出发，进而探讨与传统高强钢材存在的差异，结合3D打印工艺，提出两者联合在航空器起落架轻量化设计的具体应用策略。研究结果将为航空器起落架的轻量化设计提供新思路，以期促进航空行业的持续发展。

**关键词：**碳纤维；复合材料；3D打印；航空器；起落架；拓扑优化

随着我国航天领域对轻质、低能耗等需求的不断提高，碳纤维复合材料的应用，其密度高达1.7-1.9g/cm<sup>2</sup>，已在航空器起落架材料中广泛采用，然而，传统成形技术很难实现复杂承载构件的集成制造。以激光熔化成形为代表的3D打印技术，能够精确调控零件的受力状态，一次成形出复杂构件，二者联合为航空器起落架的轻量化设计结构的优化提供支持。因此，文章旨在促进碳纤维复合材料与3D打印技术结合，探讨该联合技术在起落架轻量化设计的应用曲靖市，对推进飞机轻量化发展有着重要意义。

## 一、材料和工艺概述

### (一) 碳纤维复合材料力学性能分析

针对航空器起落架多向承载要求，本研究选用T800级碳纤维环氧树脂复合材料，利用其优良的结构机械特性，实现对航空器起落架各向承载能力的有效调控。为了确定该结构与常规结构300M高强钢材在机械特性上的差别，采用室内试验方法，获得该结构的主要结构参数（如表1）。

从结构力学观点来看，碳纤维复合材料具有较大的

比强和比模量：根据抗拉强度分析，其达到1027 MPa/(g/cm<sup>2</sup>)，是300M钢的4.2倍；结构比强度为83.3 GPa/(g/cm<sup>2</sup>)，为300 M的3.1倍，即在同等机械特性条件下，可实现航空器起落架的轻量化。通过调节纤维铺设角，实现复合材料力学特性的方向性优化：考虑到起落架受到的竖向荷载作用，将0度的纤维率提高到60%，从而提高其轴向承载力。在横向撞击荷载作用下，将结构中的各向异性的纤维含量提高到30%，以提高其抗剪力能力，以保证其与飞机结构的受力特性的精确匹配。

### (二) 3D打印工艺技术特点

利用激光熔化沉积（LMD）3D打印技术，将碳纤维复合粉体按照预先设定的轨迹层层叠加，实现航空器起落架的整体成形，其特点在于：一是结构的高度灵活，可以加工出常规加工中无法实现的镂空、点阵支承等轻质构件，降低材料的浪费。二是提高材料的利用效率，相比于常规的切割，3D打印的材料使用率可以达到95%，减少生产的成本。三是成形高质量，实现一次精确成形，精确的激光焦斑，使成形后的成形精度达到0.1-0.3mm，达到航空器起落架重要部件的组装需求。

表1 碳纤维复合材料参数分析

| 材料类型                               | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 抗拉强度<br>(MPa) | 弹性模量<br>(GPa) | 弯曲强度<br>(MPa) | 疲劳寿命 (10 <sup>7</sup> 次循环) | 断裂韧性<br>(MPa·m <sup>1/2</sup> ) |
|------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------------------------|
| T800 ([0° /45° /-45° /90° ]<br>铺层) | 1.8                        | 1850          | 150           | 1600          | ≥ 1.2 (应力比R=0.1)           | 75                              |
| 300M 高强度钢 (热处理态)                   | 7.85                       | 1900          | 210           | 2200          | ≥ 1.0 (应力比R=0.1)           | 65                              |

通过正交试验, 得出最佳的打印参数, 800 mm/min 的扫描速度, 即2200W的激光功率, 0.15 mm的层厚, 15 g/min的送粉量度。在该工艺条件下, 样品的致密性达到99.2%, 孔隙度只有0.8%, 机械性能降低幅度小于5%, 否则将导致材料拉伸强度降低15%~20%, 不能满足航空器起落架的承载要求。

## 二、联合设计的优势

相对于300 M钢质起落架, 采用碳纤维复合材料与3D打印技术制作的航空器起落架, 在重量、性能等多个层面上都具备明显的优势。

就轻型效应而言, 常规支线飞机钢制起落架为280 kg, 而相同尺寸的飞机, 经过组合加工后, 其质量降低到162 kg, 降低约42%。据航空行业统计, 飞机结构质量每减轻1%, 其飞行距离就能提高0.5%~0.8%, 由此可以提高飞机的飞行距离2.1%~3.36%, 年均节约18, 000L左右的燃料消耗量, 大幅提高飞机的经济性能。

从机械匹配角度看, 常规钢制航空器起落架需采用焊接或螺栓连接的方法进行多个构件的装配, 以适应多维承载要求, 具有应力集中风险。碳纤维复合材料与3D打印技术联合, 可以实现一体成型, 可以减少薄弱连接情况的发生。根据有限元分析, 在降落时撞击载荷情况下, 联合航空器起落架的最大受力为850 MPa, 低于其所能承受的最大拉伸强度1850 MPa, 其安全系数为2.18; 常规钢起落架的最大工作压力为920 MPa, 安全系数为2.07, 二者都能达到安全性的设计指标, 但是组合技术的起落架具有较高的安全性和较低的质量。

结构优化方面, 由于传统钢制起落架受到制造技术的制约, 需要考虑到切割的可能性, 因此很难获得高质量的航空器起落架; 组合技术可采用3D打印技术制备出点阵式缓冲构件, 即在缓冲支撑部分采用中心方点阵结构, 其厚度为5 mm, 厚度为0.3 mm, 重量降低20%, 比常规固体减振更好, 从而提高起落架的耐撞击能力, 降低撞击荷载。

## 三、碳纤维复合材料联合3D打印工艺在航空器起落架轻量化设计中的具体应用

### (一) 基于载荷路径的拓扑优化与3D打印成型应用

常规起落架结构设计主要依靠人工经验进行, 往往会出现物料分配和荷载传递途径不相适应的情况, 从而造成部分构件的材料多余或强度不够的问题。基于航空器起落架的真实受力状态, 采用HyperWorks对其加载途径进行数值模拟, 获取最优的受力范围, 进而采用3D打

印技术, 完成最优结构整体成形。

收集飞机起飞、着陆、滑行等相关运行参数, 以此构建起落架有限元模型。通过对航空器起落架的分析, 发现在飞机着陆过程中, 飞机的减震支柱和轮叉等部件需要更多的材料来承担主负荷, 而对于连接耳片和非承载能力的壳体, 则可以通过空心或薄壁来减轻重量。利用3D打印技术制备航空器起落架样品, 并在防振杆部分进行渐变和非承载器壳体的蜂窝式空心结构。

### (二) 定向纤维铺层与3D打印复合结构应用

由于碳纤维复合材料的机械特性呈非均匀特性, 常规成形技术很难对其进行精确的取向铺设, 而3D打印技术可以精确地调控其在起落架中的空间布局, 从而达到对飞机各个部分的应力要求的精确匹配。通过3D打印主体结构取向纤维束组合成形技术, 在飞机起降平台的重要承载部件上, 实现对飞机起降平台的局部增强和刚度的有效控制。

采用3D打印技术, 将T800型碳纤维束, 直径为1mm, 引入到三维结构中, 将其轴向拉伸强度提高到2100 MPa, 比常规3D打印的材料增强13.5%。对于起落架减震支柱部他发, 在纵向上铺设与轴心呈0°角的连续碳纤维, 实现高达1750 MPa的轴向抗压, 以达到较高的抗压性。对于起落架的叉臂结构, 铺设纵横向+45度的横向交错结构, 以提高其抗剪和耐折性能, 达到1600MPa。

### (三) 3D打印点阵支撑与轻量化结构一体化应用

针对现有起落架非承载部件, 传统使用实心结构, 存在大量的材料冗余问题, 充分发挥3D打印技术的优点, 通过非承载部件上构建点阵支撑, 以达到结构支撑与轻质的双重作用, 并确保其刚性和耐撞性。

基于体心立方单元, 可依据各部件的刚性需求调节其尺寸和壁厚: 需要经受小撞击和空气动力荷载, 其网格尺寸为8mm, 壁厚0.6mm, 其质量可降低到0.8 g/cm<sup>2</sup>, 比实体构件轻65%。在保证总强度80 GPa的前提下, 起落架的内侧支撑部分为5mm, 在1.2 g/cm<sup>2</sup>的情况下, 其质量降低50%, 而刚性不低于80 GPa。为了防止其在组装中损坏, 3D打印时, 使用点阵与棱边组合方式, 使其具有3 mm的宽度和2 mm的厚度, 提高耐撞性。

### (四) 3D打印模块化接口与维修便捷性优化应用

当前维修模式下, 为保证航空器起落架系统的正常工作, 通用航空器的维修方案规定周期性检查。这些检验性工作只是在现有的飞机构型前提下, 通过频繁的功

能检测及时发现已出现故障的系统，并在下次飞行前排除。由于起落架系统本身较为复杂，涉及液压系统、机械传动机构、电子传感及指示系统，其故障随机性、偶发性更大，较难总结出故障发生的规律。采用3D打印技术制备模块化界面，将其划分成承力主体、减震构件和轮轴构件三大模块，采用3D打印高精密法兰界面进行对接，接合面间距不超过0.1 mm，保证构件的刚性和密封性能，并提高维护的方便性。

结构上，承载体和减振构件之间通过3D打印整体成型，凸缘直径120mm，螺钉孔8个，尺寸误差为 $\pm 0.05\text{mm}$ ，保证组件对齐的准确性；主轴总成与承载本体的截面为锥形比例为1:10锥形、15mm宽、5mm深的锥形与键槽式固定方式，提高连接的稳定性并防止径向窜动。各组件都有各自的缺陷探测孔，不需要拆卸整个构件即可利用内视镜对其内部进行检查。

应用该技术后，当航空器起落架检修过程中，当减振零件发生泄漏事故时，检修人员只需将8个联接螺钉拆除，即可在1.5小时之内将其替换完毕；然而，常规的单片起落架需要拆卸完整的起落架进行拆卸，时间超过6个小时，维护效率提高75%。模块化的结构使得组件的存货费用下降40%—原来需要储存完备的起落架零件，现在只需要储存各种组件，节省60%的库存；经过模块的替换，航空器起落架总体综合性能试验合格率达到98%，较常规维护后的95%有所提高，证明模块化界面的可靠性。

#### （五）碳纤维复合材料表面3D打印耐磨涂层应用

针对起落架轮轴等部件在使用中面临着严重的摩擦和磨损问题，传统碳纤维基复合材料硬度相对较低，容易发生磨损失效情况，采用3D打印技术在其表层构建碳化钨耐磨涂层，在不增重的前提下，提高其耐磨性能和服役寿命。

利用3D打印技术，以50–100 $\mu\text{m}$ 的碳化钨粉和Ni基的比例，在直升机起落架主轴上喷涂0.5 mm的涂料，实现激光功率1800 W，扫描速度600 mm/min，保障涂层与复合材料的良好粘结。对镀层进行研磨处理，获得达

到精度 $Ra < 0.8\mu\text{m}$ 的工件，达到轴承组装的技术指标。

进行力学性能试验，结果发现：3D打印后的碳化钨膜布氏硬度达到HB850，比普通碳纤维增强24.3倍；在500 N、300 r/min的条件下，制备的耐磨膜比无涂层的低93.3%。通过对某架航空器维护资料分析，安装这种涂料后，起落架轴的服役时间由2000架次提高到6000架次，维护时间增加3倍，轮轴更新费用减少67%；该涂料的质量只有0.8公斤，对飞机起降平台的总体轻量化作用微乎其微，充分满足耐磨和轻量化的要求。

#### 结语

碳纤维复合材料与3D打印技术在航空器起落架轻量化设计中的应用，取得明显突破，通过关键技术分析，联合设计航空器起落架比普通钢制航空器起落架轻量化42%，提高维修与检查便利性。拓扑优化和3D打印技术解决部件的冗余性；取向纤维铺设提高机械性能的匹配程度；点阵结构增强部件的重量；模块化界面设计提高部件的维护便利性；抗磨损的涂料提高了部件的使用寿命。未来，相关行业必须持续探讨新型碳纤维复合材料和3D打印技术的联合机制，提高航空器起落架的耐热和耐撞击能力。采用人工智能算法对3D打印工艺进行优化，以达到性能、质量、造价、最佳均衡，为新一代航空器起落架的研制奠定理论基础。

#### 参考文献

- [1]何昕,王经义,李颖哲,赵瑞.基于ANN-LSTM模型的航空器着陆阶段运行轨迹预测[J].舰船电子工程,2024,44(12):61-64+105.
- [2]凌小方,莫文静,裴昌凡,余睿.量子测量技术在航空制造业中的应用前景[J].科技创新与应用,2024,14(35):27-30.
- [3]柳倩,李章萍,柴宇华.民用无人驾驶航空器系统标准化现状分析[J].山东航空学院学报,2024,41(06):39-46.