

eVTOL 复合材料结构低成本快速制造技术综述

肖 炜 尹怀江

广东汇天航空航天科技有限公司 广东 广州 510000

摘 要: 电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 的快速发展对复合材料结构提出了“高性能、低成本、快交付”的迫切需求, 探索适用的低成本快速制造技术成为产业规模化的关键。本文系统梳理了热压罐工艺、预浸料模压 (PCM)、树脂转移模塑 (RTM)、真空辅助树脂灌注 (VARI) 和热塑复材模压五种主流制造技术, 从设备投资、生产节拍、单件成本等维度构建了经济性对比模型, 并结合eVTOL典型部件特征提出了工艺选型策略。研究表明, 热塑复材模压在短周期与可回收性上优势显著, 适合中等批量生产; PCM工艺在效率与质量间取得良好平衡; RTM与VARI工艺在中等批量复杂结构件中具有成本优势; 热压罐工艺仍是小批量高要求部件的基准。针对eVTOL不同部件的特征与量产需求, 合理选择并融合上述五种工艺, 结合材料国产化与自动化装备, 是实现eVTOL复合材料结构低成本规模化制造的有效路径。

关键词: 电动垂直起降飞行器 (eVTOL); 复合材料; 快速制造; 工艺选型; 经济性分析

1 引言

低空经济作为国家战略性新兴产业, 正迎来爆发式增长。其中, 电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 凭借零排放、低噪音和垂直起降能力, 成为城市空中交通 (UAM) 的核心载体^[1]。随着全球低空开放政策逐步落地、新能源航空技术持续迭代, eVTOL已从研发验证阶段迈向商业化试运营阶段, 规模化量产成为行业发展的核心命题。为满足严苛的轻量化与适航要求, eVTOL的机身、机翼、旋翼等主承力结构大量采用碳纤维增强树脂基复合材料, 其用量占比普遍超过60%, 是保障飞行器结构效率、续航能力的核心材料。然而, 传统航空复合材料制造工艺存在设备投资大、生产周期长、能耗高、人工依赖度高等瓶颈, 难以匹配eVTOL未来万架级的年产需求, 也无法支撑整机成本的市场化管控^[2]。因此, 在保证结构力学性能、满足航空适航标准的前提下, 探索适配规模化生产的低成本快速制造技术, 突破工艺效率与成本管控双重壁垒, 成为推动eVTOL产业商业化落地的关键。本文聚焦热压罐工艺、预浸料模压 (PCM)、树脂转移模塑 (RTM)、真空辅助树脂灌注 (VARI) 和热塑复材模压五种核心工艺, 系统对比其在eVTOL领域的应用现状、技术优劣与经济性, 旨在为行业工艺选型、产线规划提供科学依据。

2 eVTOL典型部件特征与工艺需求

eVTOL结构部件在尺寸、形状及载荷环境上差异显

著, 对制造工艺提出了多维度的要求。机身与客舱通常尺寸较大 (5-10 m), 涉及多曲面融合, 要求极高的刚性与气动表面质量, 传统上依赖热压罐工艺, 但亟需向更高效的液体成型工艺过渡, 以适配大规模量产的成本与效率需求。旋翼与推进器承受高频交变载荷, 对疲劳性能、结构稳定性要求极高, 需严格控制孔隙率 ($\leq 2\%$), 同时要保证部件尺寸一致性, PCM或高压RTM工艺是兼顾性能与量产效率的潜在优选方案。货舱门与舱盖等中等尺寸部件, 形状相对规则, 要求轻量化与高精度配合, 非常适合采用快速模压类工艺以提升生产节拍, 降低单件制造成本^[3]。此外, eVTOL各类承力接头、加强构件虽尺寸较小, 但对结构强度、成型精度要求严苛, 同样需要匹配对应的高效成型工艺, 实现全结构件的低成本规模化制造。

3 五种核心制造工艺分析

3.1 热压罐工艺

热压罐工艺通过在密闭罐体内提供均匀的温度与压力环境, 使预浸料固化成型。该工艺制备的复合材料孔隙率极低 ($\leq 0.5\%$), 力学性能优异, 成型质量稳定性高, 是目前航空航天领域应用最广、成熟度最高的基准工艺^[4]。然而, 其生产周期通常长达4-8 h, 设备投资动辄千万元以上, 能耗巨大 (80-150 kWh/件), 且预浸料储存、转运成本较高, 人工铺层耗时耗力。在eVTOL发展初期 (年产数百架以内), 热压罐工艺仍是大型复杂主承力结构 (如机身蒙皮、整体机翼) 的首选, 可最大程度保障结构性能与适航合规性, 但随着产量攀升, 其高昂的单件成本、漫长的生产周期将成为制约产业规模化的核心因素。其核心技术瓶颈在于难以突破固有的长周期

作者简介: 肖炜 (1990-), 男, 天津人, 中级工程师, 硕士, 主要从事航空复合材料开发与制造工艺研究。

尹怀江 (1987-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事低空飞行器先进材料与先进制造技术研究。

热力学循环限制，且大型热压罐的能耗与折旧成本在小批量场景下难以分摊，无法适配大批量生产需求。

3.2 预浸料模压工艺（PCM）

预浸料模压（Prepreg Compression Molding, PCM）将预浸料层合板置于精密温控的金属模具中，在高温（通常130-150℃）高压（5-15 MPa）下快速闭模固化。PCM工艺省去了传统热压罐的漫长保温保压流程，生产节拍可缩短至10-25 min/件，尺寸精度高（±0.1 mm），表面质量优良，成型过程自动化程度易提升^[5]。与热压罐相比，PCM大幅降低了能耗与单件制造成本，特别适合eVTOL中厚度均匀、形状较规则的中等尺寸部件（如翼肋、加强框、旋翼叶片）的批量化生产。其核心技术瓶颈在于厚截面部件在快速升温固化时易产生内部放热峰失控及残余应力集中，影响结构力学性能，同时前期精密温控模具的开发成本较高，对模具材料与加工精度要求严苛。

3.3 树脂转移模塑（RTM）

树脂转移模塑（Resin Transfer Molding, RTM）属于闭模液体成型技术，将干纤维预成型体置于闭合模腔内，在压力下注入低粘度树脂并加热固化。RTM工艺能够实现双面光洁，尺寸控制精确，且无需冷藏预浸料，材料存储与运输成本相对较低，可实现复杂结构的整体成型，减少零部件拼接工序^[6]。高压RTM（HP-RTM）进一步提高了注射压力（可达10 MPa以上），加快树脂浸润与固化速度，将成型周期缩短至15-30 min。在eVTOL制造中，RTM工艺非常适合生产具有复杂型面和内部空腔的结构件，如起落架支柱、复杂接头、旋翼等，在中等批量（1000-10000件/年）场景下展现出极佳的质量与效率平衡。其核心技术瓶颈在于复杂预成型体的自动化高效制备，以及多注射口条件下树脂流动前沿的精确预测与控制，易出现缺胶、孔隙等成型缺陷。

3.4 真空辅助树脂灌注（VARI）

真空辅助树脂灌注（Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI）利用真空负压将树脂导入铺设在单面刚性模具上

的干纤维预成型体中。与RTM相比，VARI仅需单面硬模和真空袋材，模具成本极低，且不受部件尺寸限制，可实现超大尺寸构件的整体一体化成型，特别适合超大型结构（如eVTOL整体机翼、大型机身壁板）的制造^[7]。然而，VARI工艺的树脂流动较慢，生产节拍较长（120-240 min/件），且厚度方向的尺寸精度略逊于闭模工艺，孔隙率控制难度相对较高。通过引入高渗透性树脂和优化导流网络、真空辅助系统，可进一步提升VARI在eVTOL大型部件中的应用潜力，但孔隙率的稳定控制（目标≤1%）、树脂浸润均匀性仍是其面临的主要技术挑战。

3.5 热塑复材模压

热塑复材模压以聚醚醚酮（PEEK，加工温度约380-400℃）、聚苯硫醚（PPS）等热塑性树脂为基体，通过加热熔融后在模具中加压冷却成型。该工艺无需化学固化反应，成型周期极短（5-15 min/件），且具备优异的断裂韧性、抗冲击性能、耐湿热性能以及可无限次回收重塑的绿色环保特性，契合航空制造业低碳发展趋势^[8]。在eVTOL领域，热塑复材模压不仅适用于内饰板、座椅骨架等次承力结构，正逐步向机身罩、小型连接件、功能构件等主承力相关部件扩展。尽管目前高性能热塑性预浸料成本较高，但其在全生命周期内的综合成本优势和可持续发展潜力巨大。其核心技术瓶颈在于高熔体粘度导致的纤维浸渍困难，易出现复合材料层间结合力不足问题，以及高温（>350℃）成型装备的国产化开发、工艺参数精准调控难度较大。

4 经济性对比与工艺选型策略

4.1 全维度经济性对比

为全面评估上述五种工艺在eVTOL量产中的适用性，本文从适用批量、单件相对成本、生产节拍、设备投资规模等维度构建了经济性对比模型，如表1所示。数据综合自近年行业报告与工程实践，结合航空复合材料制造成本核算标准、eVTOL产业量产规划进行梳理分析，具备较强的行业参考价值^[9-11]。

表1 eVTOL复合材料主流制造工艺经济性对比

工艺类型	适用批量（件/年）	单件相对成本 ^a	生产节拍（min/件）	设备投资规模 ^a	尺寸精度	可回收性
热压罐工艺	100-1000	高	240-480	高	高	差
PCM	1000-50000	中	10-25	中	高	差
RTM	1000-10000	中低	15-60	中	高	差
VARI	500-5000	低	120-240	低	中	差
热塑复材模压	1000-50000	中低	5-15	高	高	优

^a注:单件相对成本与设备投资规模均以热压罐工艺为基准(设为“高”),其他工艺与之进行相对比较。

4.2 基于部件特征的选型策略

基于经济性阈值分析,结合eVTOL产业不同发展阶段的产能规划,eVTOL制造企业应根据部件特征、性能要求与生产规模进行科学选型,具体策略如下:

(1)小批量、大尺寸复杂曲面部件(如早期原型机机身、机翼):优先采用热压罐工艺以确保质量稳定性与适航符合性,或采用VARI工艺以降低模具投资,缩短研发试制周期;

(2)中大批量、中等尺寸规则部件(如货舱门、翼肋、加强构件):PCM工艺是兼顾效率、精度与成本的最佳选择,可快速实现规模化量产;

(3)中等批量、复杂三维结构(如起落架、接头、旋翼):RTM(特别是HP-RTM)能够实现高质量整体成型,有效减少装配工序,提升结构整体性;

(4)大批量、高抗冲击与环保要求部件(如内饰、机身罩、外部连接件):热塑复材模压凭借极短的节拍和可回收性成为最优解,可大幅降低全生命周期制造成本^[9]。

5 结论

eVTOL的商业化成功高度依赖于复合材料结构的低成本快速制造能力,工艺选型与技术融合是实现量产突破的核心抓手。热压罐工艺、PCM、RTM、VARI和热塑复材模压五种工艺各具优势,分别适配不同生产规模、部件类型与性能需求,不存在单一的“万能工艺”。eVTOL制造企业应摒弃传统的单一工艺依赖,结合自身产品结构 with 产能规划,构建多工艺融合的柔性生产体系,实现各类部件的精准工艺匹配。未来,随着国产高性能碳纤维、快速固化树脂、热塑性基体材料的技术成熟与成本下探,结合数字化工艺仿真、自动化铺放、智能模压等高端装备的迭代应用,这五种核心工艺的单件成本有望

进一步下降20%-30%,生产效率实现大幅提升。建立基于全生命周期成本(LCC)的科学选型机制,持续推进复合材料制造技术的国产化、自动化、绿色化升级,将为中国eVTOL产业在全球低空经济竞争中构筑坚实的制造壁垒,推动低空经济产业高质量发展。

参考文献

- [1]冯宇.低空经济发展规划与产业政策分析[J].中国民航,2022,28(3):12-18.
- [2]张华.低空经济产业链协同创新模式研究[J].科技管理研究,2023,43(7):112-120.
- [3]陈明.高压树脂传递模塑(HP-RTM)在eVTOL结构件中的应用研究[J].航空制造技术,2024,31(2):45-52.
- [4]黄敏.热压罐工艺质量控制与成本分析[J].航空材料学报,2022,42(2):89-96.
- [5]赵强.预浸料压缩模塑工艺参数研究[J].塑料工业,2023,51(5):67-74.
- [6]韩磊.树脂转移模塑工艺参数优化研究[J].玻璃钢/复合材料,2023,50(4):56-62.
- [7]马强.真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺优化[J].纤维复合材料,2023,40(1):23-30.
- [8]赵芳.热塑性复合材料在eVTOL内饰中的应用[J].航空制造技术,2024,31(6):89-96.
- [9]李华,张伟.预浸料快速模压工艺经济性阈值研究[J].复合材料科学与工程,2024,31(3):112-120.
- [10]钱勇.复合材料全生命周期成本模型构建[J].系统工程理论与实践,2022,42(5):1234-1245.
- [11]Abe K, Suzuki T. Cost analysis of thermoplastic composite compression molding for automotive applications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 165: 107345.