

复合材料成型方法比较与优化选择

周 峰

广东汇天航空航天科技有限公司广州分公司 广东 广州 510000

摘要: 本文聚焦航空航天复合材料成型方法。先阐述其核心分类及原理,分为高压、低压和特殊成型法。接着分析常用方法特性,如热压罐成型法质量高但成本大,RTM成型法适合复杂构件但孔隙率稍高,自动铺丝/铺带成型法精度高但设备投资大。随后从力学性能、成型精度与表面质量、制备成本与效率多角度对比不同方法。最后提出优化选择策略,包括基于构件性能、结构特征、制备成本与效率的选择,为航空航天复合材料成型方法的选择提供全面参考。

关键词: 航空航天复合材料;成型方法;性能对比;优化选择

引言: 航空航天领域对复合材料构件性能要求严苛,促使成型方法呈现多样化。不同成型方法在原理、特性上差异显著,且在力学性能、成型精度、制备成本与效率等多方面存在对比差异。这些差异使得成型方法的选择并非随意为之,而是需要综合多方面因素进行考量。从构件性能需求、结构特征,到制备成本与效率,每一个因素都可能成为决定成型方法的关键。因此,深入了解航空航天复合材料成型方法的分类、特性、对比以及优化选择策略,对于提高航空航天构件的制造质量、降低成本、提升生产效率具有重要意义,也是推动航空航天事业持续发展的关键环节。

1 航空航天复合材料成型方法核心分类及原理

在航空航天领域,复合材料凭借其优异的性能被广泛应用,而复合材料成型方法作为制造高质量构件的关键环节,种类丰富多样。依据成型压力、温度条件以及成型机理的不同,航空航天复合材料成型方法主要划分为高压成型法、低压成型法以及其他特殊成型法这三大类别。(1) 高压成型法是借助外部施加的高压力,推动树脂基体在压力作用下充分填充增强体之间的空隙。在此过程中,高压能够有效排除复合材料内部的气泡和挥发物,极大地减少孔隙等缺陷的产生,进而提高复合材料的密度和力学性能。以热压罐成型为例,将预浸料铺层放置在模具中,再整体放入热压罐内,通过抽真空并施加高压,同时精确控制温度使树脂固化,最终得到高质量的复合材料构件^[1]。(2) 低压成型法主要依靠树脂自身的流动性,使其在较低压力甚至无压条件下完成对增强体的浸润与固化。这种方法操作相对简便,设备成本较低,尤其适用于一些形状较为复杂、对压力敏感的构件成型。像真空辅助成型,利用真空产生的负压,将树脂吸入铺有增强体的模具中,实现浸润和固化。(3)

特殊成型法则是针对航空航天领域中一些具有复杂几何形状、特殊性能需求的构件而设计的专用工艺。例如自动铺丝成型,可根据构件的形状精确控制纤维的铺放路径和方向,实现复杂曲面构件的高效成型,同时保证构件的力学性能均匀性。各类方法的核心原理都围绕树脂基体的固化反应与增强体的复合成型展开,通过精准控制成型参数,如压力、温度、时间等,使增强体与基体充分结合,形成结构均匀、性能稳定的复合材料构件,以满足航空航天领域对构件的严苛要求。

2 航空航天复合材料常用成型方法及特性分析

2.1 热压罐成型法

热压罐成型法是航空航天复合材料制造中极为关键的高压成型手段。其原理是将预浸料铺层形成的坯体置于热压罐内,在精确调控的温度、压力与时间协同作用下,预浸料中的树脂熔融并流动,充分浸润增强体,同时将坯体中的空气排出,经固化反应形成复合材料构件。该方法工艺优势显著,热压罐能营造均匀稳定的温压环境,有效降低构件孔隙率,使制品结构致密、力学性能卓越,成型精度也较高,可胜任复杂曲面构件的制备。其优点突出,成型构件强度、模量高,疲劳性能好,尺寸稳定性佳,且能与多种航空航天常用复合材料适配。不过,它也存在明显不足,热压罐设备购置成本高昂,运行能耗大,导致成型周期较长。而且,单次成型构件的尺寸受限于热压罐容积,综合这些因素,使得该方法的制备成本居高不下^[2]。

2.2 树脂传递模塑成型(RTM)

树脂传递模塑成型是航空航天领域常用的一种低压成型方法。其核心工艺原理为,先把增强体预制品精准放置于密闭模具之中,接着借助压力装置,将液态树脂注入模具型腔内。在压力作用下,树脂充分浸润增强

体, 确保二者紧密结合, 随后通过加热方式促使树脂固化, 最终形成符合设计要求的复合材料构件。该方法工艺优势明显, 成型过程无需配备高压设备, 模具结构相对简易, 能够实现构件的一体化成型, 尤其擅长制备形状复杂、尺寸较大的构件。而且, 成型过程中树脂用量可精准控制, 材料利用率较高。其优点突出, 设备投资成本低于热压罐成型, 成型周期较短, 构件表面质量好, 适合进行批量生产。不过, 它也存在一些不足, 成型构件的孔隙率比热压罐成型略高, 树脂浸润均匀性受模具设计和注射参数影响较大, 对树脂的流动性有着较高要求。

2.3 自动铺丝/铺带成型法

自动铺丝/铺带成型法是依托自动化技术发展而来的高精度复合材料成型方法。其核心工艺原理是, 借助专门的自动化设备, 依据预先设定的程序, 将预浸丝束或预浸带精准地按照特定铺层角度、厚度均匀铺覆在模具表面。完成铺层后, 再通过热压方式使复合材料固化成型。其中, 自动铺带更适用于大面积、规则曲面构件的铺覆; 自动铺丝则在复杂曲面及异形构件的铺覆上更具优势。该方法工艺特色鲜明, 铺层精度极高, 对铺层角度的控制能力强, 能轻松实现复杂的铺层设计, 进而有效提升构件的力学性能, 同时大幅减少人工操作带来的误差, 显著提高生产效率。其优点在于成型构件铺层质量均匀, 力学性能一致性好, 高度适配航空航天领域对构件高精度、高性能的要求, 可实现规模化生产。不过, 该方法设备投资大, 设备调试难度高, 对预浸料质量要求严苛, 小批量生产时成本优势不明显^[3]。

3 航空航天复合材料成型方法多角度对比

3.1 力学性能对比

在航空航天复合材料成型方法中, 不同方法所制备构件的力学性能存在明显差异。(1) 热压罐成型法凭借较高的成型压力以及均匀的温度条件, 使得构件内部孔隙极少, 增强体与基体之间能够形成极为紧密的结合。这种紧密结合的结构赋予了构件出色的拉伸、弯曲、剪切强度以及良好的疲劳性能, 完全能够满足航空航天领域关键承力构件对力学性能的严苛要求。(2) 自动铺丝/铺带成型法由于铺层精度极高, 能够依据构件的实际受力情况精准设定铺层角度, 这使得构件的力学性能一致性表现出色, 接近热压罐成型法的水准。不过, 受铺层工艺以及固化参数等因素的影响, 该方法所制备构件的冲击性能相较于热压罐成型构件稍逊一筹。(3) RTM成型法因成型压力相对较低, 构件内部孔隙相对较多, 且树脂浸润的均匀性难以做到完全理想, 所以其整体力学

性能低于热压罐成型法和自动铺丝/铺带成型法, 更适用于非承力或次承力构件的制造。

3.2 成型精度与表面质量对比

在成型精度上, 自动铺丝/铺带成型法优势显著。其依靠先进的自动化铺层技术, 能精准控制每一层预浸料的铺放, 使得铺层厚度误差极小, 构件整体尺寸精度极高, 特别适合制造对尺寸精度有着严苛要求的航空航天构件。(1) 热压罐成型法通过模具与热压罐的紧密配合、协同控制, 也能保证较高的成型精度, 虽略逊于自动铺丝/铺带成型法, 但足以满足绝大多数承力构件的精度需求。(2) 而RTM成型法的成型精度受多方面因素制约, 模具精度、树脂收缩率以及注射参数等都会对其产生影响, 导致尺寸误差相对较大, 往往需要后续加工来修正表面精度。(3) 就表面质量而言, RTM成型法所制备的构件表面光滑平整, 没有明显的铺层痕迹, 通常无需进行复杂的后处理工序。自动铺丝/铺带成型法表面质量整体较好, 不过可能会存在轻微的铺层搭接痕迹。热压罐成型法构件表面有时会出现轻微的压痕, 需进行简单的后处理才能满足表面质量要求^[4]。

3.3 制备成本与效率对比

在制备成本上, 热压罐成型法存在明显劣势。其不仅需要高额的设备投资, 运行过程中的能耗也相当大, 而且成型周期漫长, 单批次成型往往要耗费较长时间, 诸多因素叠加导致单位构件成本居高不下。(1) 自动铺丝/铺带成型法设备购置成本较高, 不过其自动化程度出众, 能大幅提升生产效率, 在批量生产时, 可通过规模效应分摊成本, 使得单位构件成本低于热压罐成型法; 但在小批量生产场景下, 其成本会高于RTM成型法。RTM成型法设备投资低、能耗小, 成型周期相对较短, 人工成本也较低, 无论是在批量生产还是小批量生产模式下, 单位构件成本始终处于最低水平。(2) 从生产效率来看, 自动铺丝/铺带成型法自动化程度最高, 铺层速度极快, 在批量生产时效率优势最为突出。RTM成型法无需进行复杂的铺层后处理, 成型流程简洁, 效率位居其次。热压罐成型法固化时间长, 且部分情况需人工铺层, 整体生产效率最低。

4 航空航天复合材料成型方法的优化选择策略

4.1 基于构件性能需求的选择

在航空航天复合材料成型方法的优化选择中, 精准匹配构件性能需求是关键原则。针对航空航天关键承力构件, 像机翼主梁、机身框架这类部件, 它们需要承受巨大的载荷, 对强度、模量、孔隙率以及疲劳性能有着极高要求。此时, 热压罐成型法或自动铺丝/铺带成型

法是优先之选。其中,对于复杂曲面承力构件,自动铺丝成型法能更好地适应其形状,实现精准铺层;大面积规则承力构件则更适合自动铺带成型法,以提高生产效率。对于非承力或次承力构件,例如机舱内饰、尾翼辅助构件等,它们对力学性能的要求相对较低。在这种情况下,优先选用RTM成型法,既能够满足构件的基本性能需求,又能有效降低制备成本。而对于对尺寸精度要求极为严苛的精密构件,像发动机叶片、导航系统外壳等,自动铺丝/铺带成型法凭借其高精度的铺层控制,可确保构件尺寸误差处于允许范围内。

4.2 基于构件结构特征的选择

构件的结构特征是决定成型方法适配性的关键因素。

(1)当面对形状简单、尺寸较小的构件,例如小型支架、连接件等,由于这类构件成型难度相对较低,在满足性能需求的前提下,可灵活选择任何一种成型方法。不过,从成本控制角度出发,优先推荐RTM成型法,其设备投资低、能耗小,能有效降低制备成本。(2)对于复杂曲面、异形构件,像机身蒙皮、发动机舱体等,成型难度较大,需优先考虑自动铺丝成型法或RTM成型法。若构件需要承受较大载荷,自动铺丝成型法凭借其铺层精度高、能精准匹配构件受力需求的特点,更为合适;而载荷较小的复杂构件,选择RTM成型法即可满足要求。(3)对于大面积、规则曲面构件,如机翼蒙皮、尾翼面板等,自动铺带成型法或热压罐成型法是优先选择,二者能在保证生产效率的同时,兼顾构件的力学性能。(4)对于有一体化成型需求的构件,如整体式机身段、一体化机翼,优先选用RTM成型法或自动铺丝/铺带成型法,可减少构件拼接,提升结构的整体性^[5]。

4.3 基于制备成本与效率的选择

在确保构件性能及结构要求得以满足的基础上,需综合考量制备成本与生产效率,以实现成型方法的优化选择。(1)在批量生产场景下,自动铺丝/铺带成型法与RTM成型法是优先之选。若批量构件对力学性能有较高要求,自动铺丝/铺带成型法凭借其高精度铺层和良好的

力学性能一致性,能更好地满足需求;若构件对力学性能要求一般,RTM成型法则可凭借较低的设备投资、能耗以及较短的成型周期,大幅提升生产效率,有效降低单位构件成本。(2)小批量生产时,为避免高设备投资带来的成本浪费,优先选用RTM成型法。不过,若小批量构件为关键承力构件,为确保构件性能达标,热压罐成型法则是更合适的选择。(3)对于工期紧张的项目,RTM成型法与自动铺丝/铺带成型法可缩短成型周期,优先选用以保障项目按进度推进。而对于成本敏感型项目,在性能允许的范围内,优先采用RTM成型法,以此实现制备成本的最大化降低。

结束语

综上所述,航空航天复合材料成型方法的选择是一个复杂且关键的决策过程。基于构件性能需求、结构特征以及制备成本与效率等多方面的综合考量,能够为不同类型构件找到最为适配的成型方法。这不仅有助于确保构件满足航空航天领域严苛的性能要求,还能在保证质量的前提下,实现成本的合理控制与生产效率的有效提升。随着航空航天技术的不断发展,对复合材料构件的要求也将日益提高,未来需要持续探索和创新成型方法,不断优化选择策略,以适应新的挑战和需求,推动航空航天事业迈向新的高度。

参考文献

- [1]杨泽青,杜竞旋,胡宁,张延星,金一.复合材料模压成型工艺参数优化方法[J].河北大学学报(自然科学版),2025,45(1):104-112.
- [2]高竹青,刘彬,白永平.碳纤维增强复合材料加工成型工艺[J].塑料助剂,2025(3):77-81.
- [3]李文政,梁建国.多层复合材料构件的快速拓扑及取向优化[J].工程塑料应用,2025,53(1):74-82.
- [4]李新荣,淑梅,王霞,万永.复合材料框架式成型中的模具设计研究[J].中国铸造装备与技术,2024,59(1):64-69.
- [5]施小威.纳米复合材料的工艺参数优化及光催化性能研究[J].信息记录材料,2024,25(10):27-29.