

复合材料拉挤成型工艺分析

刘 飞 肖 炜 周 亚 黎迪晖

广东汇天航空航天科技有限公司 广东 广州 510630

摘要：复合材料拉挤成型工艺是一种高效连续的自动化生产方法，以连续纤维为增强体，通过牵引装置依次完成纤维浸渍树脂、预成型、模具固化、牵引及切割工序，最终形成长条状复合材料制品。该工艺具有生产效率高、纤维含量高、制品性能稳定、材料利用率超95%等优势，广泛应用于电气设备、化工防腐、建筑加固及新能源等领域，但存在截面形状受限、复杂结构成型困难等局限性。

关键词：复合材料；拉挤成型工艺；参数分析与优化

引言：随着高端制造领域对材料性能与生产效率要求的持续提升，复合材料因其轻质高强、耐腐蚀等特性成为关键材料。拉挤成型工艺作为复合材料连续化制造的核心技术之一，通过自动化牵引实现纤维浸渍、固化成型等工序的集成化生产，具有效率高、成本低、纤维含量可控等优势。然而，传统工艺在复杂截面成型、热塑性树脂应用及智能化控制方面仍存瓶颈，亟需通过技术创新突破现有局限。

1 复合材料拉挤成型工艺基础理论

1.1 工艺原理与流程

复合材料拉挤成型工艺以连续纤维为增强体，通过牵引装置使纤维依次完成多道工序，最终形成连续长条状复合材料制品，具体流程如下：（1）纤维浸渍：将玻璃纤维、碳纤维等连续纤维束，通过浸胶槽充分浸润树脂基体，确保纤维表面均匀裹覆树脂，为制品强度奠定基础；（2）预成型：浸润后的纤维束进入预成型模具，初步挤压去除多余树脂，同时塑造接近最终产品的截面形状，减少后续模具内成型压力；（3）模具固化：预成型后的纤维束进入加热的成型模具，在设定温度（通常80-150℃）和压力下，树脂发生交联反应固化成型，形成稳定结构；（4）牵引：通过牵引系统（如履带式牵引机）以恒定速度（一般0.5-5m/min）将固化后的制品从模具中拉出，保证生产连续性；（5）切割：根据需求，利用切割设备将连续制品截成设定长度的成品^[1]。

1.2 关键设备与材料

（1）浸胶槽：提供树脂储存与纤维浸润空间，部分配备搅拌装置防止树脂沉淀，保证浸润均匀性；（2）模具设计：核心部件，采用不锈钢材质，内部设加热通道，型腔形状决定制品截面，需精准控制尺寸与表面光洁度；（3）牵引系统：提供稳定牵引力，常见履带式结构，通过调节牵引力与速度，确保制品成型质量；（4）

树脂体系：分热固性（如环氧树脂、不饱和聚酯树脂，固化速度快）和热塑性（如聚丙烯、聚酰胺，可回收再利用）两类。

1.3 工艺优势与局限性

（1）优势：①生产效率高，可连续化作业，适合大批量生产；②材料损耗低，纤维利用率可达95%以上，减少浪费；③结构可设计性强，可通过调整纤维种类、含量及树脂配方，定制不同性能的制品。（2）局限性：①截面形状受限，主要适用于矩形、圆形、工字形等规则截面制品，异形截面成型难度大；②复杂结构成型困难，无法直接制备带有复杂孔洞、凸起或曲面的制品，需后续加工。

2 复合材料拉挤成型工艺参数分析与优化

2.1 主要工艺参数

（1）温度场分布：包含模具温度与固化温度两大核心。模具需采用分段控温设计，入口段（预热区）温度通常设为60-80℃，用于初步软化树脂；中段（固化区）温度提升至120-150℃，促使树脂交联固化；出口段（降温区）降至50-70℃，避免制品因温差过大产生内应力。固化温度需匹配树脂体系特性，热固性树脂需控制升温速率（一般5-10℃/min），防止局部过热导致气泡；热塑性树脂则需精准控制熔融温度与冷却速率，保障结晶度均匀。（2）牵引速度与张力控制：牵引速度通常在0.5-5m/min，需与固化速率匹配，速度过快易导致固化不充分，过慢则降低生产效率。张力控制需保持纤维束恒定受力（一般50-200N），张力过小会导致纤维堆积、制品截面不均，过大则可能拉断纤维，影响力学性能，通常通过伺服电机与张力传感器联动调节^[2]。（3）树脂粘度与浸渍时间：树脂粘度需控制在500-5000mPa·s（25℃），粘度过高会导致纤维浸润不充分，过低则易出现流胶现象，可通过调节温度（每升高10℃，粘度约

降低30%)或添加稀释剂调整。浸渍时间需根据纤维类型与束丝密度设定,玻璃纤维通常需10-30s,碳纤维因表面惰性需延长至20-40s,确保树脂充分渗透纤维间隙。

2.2 参数对制品性能的影响

(1)力学性能:模具温度过低或牵引速度过快,会导致树脂固化不完全,使拉伸强度下降10%-30%、弯曲强度降低15%-25%;张力控制不当会造成纤维取向偏差,若张力波动超过 $\pm 10\text{N}$,制品拉伸强度离散性将增大20%以上。树脂浸润不充分则会产生界面缺陷,导致层间剪切强度下降20%-40%。(2)表面质量:固化温度过高或升温速率过快,树脂会剧烈反应产生气体,使制品孔隙率升高至5%以上;牵引速度与模具温度不匹配时,易出现边缘毛刺(长度超0.5mm)。树脂粘度偏低会导致表面流胶,形成凹陷或气泡,孔隙率每增加1%,表面粗糙度(Ra)约上升0.2 μm 。(3)生产效率与成本:牵引速度从1m/min提升至3m/min,生产效率可提高200%,但需同步升高固化温度(约10-15 $^{\circ}\text{C}$),导致能耗增加15%-20%。树脂粘度若低于500mPa·s,流胶量会增加10%-15%,材料损耗率上升5%-8%;浸渍时间过长(超40s)会延长生产周期,单位产品成本增加8%-12%^[3]。

2.3 优化方法

(1)实验设计(DOE)与正交试验:通过正交表设计多因素(温度、速度、粘度)多水平实验,例如L9(3⁴)正交表可覆盖3个因素4个水平的组合,减少实验次数(从81次降至9次)。利用方差分析(ANOVA)确定各参数影响权重,如温度对固化度的影响贡献率约40%,速度约25%,进而筛选最优参数组合,可使制品拉伸强度提升15%-20%,孔隙率降至2%以下。(2)数值模拟(CFD/FEA耦合分析):采用计算流体力学(CFD)模拟模具内温度场与树脂流动场,预测热点(温差超5 $^{\circ}\text{C}$ 区域)与流胶风险;结合有限元分析(FEA)模拟纤维张力分布与固化动力学,计算固化度随时间的变化曲线,避免局部固化不足(固化度低于85%)。通过模拟优化模具分段控温区间与牵引速度,可减少试错成本30%-40%,缩短开发周期50%。(3)智能算法优化:基于遗传算法构建目标函数(如“最大化拉伸强度+最小化成本”),编码参数(温度:60-150 $^{\circ}\text{C}$,速度:0.5-5m/min),通过选择、交叉、变异操作(交叉概率0.8,变异概率0.05)迭代寻优,可在100代内找到最优解。或采用BP神经网络建立参数-性能映射模型,以500组实验数据为训练集,预测精度可达92%以上,实现参数的实时动态调整,适应不同树脂与纤维组合,制品合格率可提升至95%以上^[4]。

3 复合材料拉挤成型缺陷分析与控制

3.1 常见缺陷类型

(1)孔隙与裂纹:孔隙多以微小气泡形式存在于制品内部或界面处,直径通常为0.1-1mm,严重时形成连续孔隙通道;裂纹分为横向裂纹(垂直于拉挤方向)与纵向裂纹(平行于拉挤方向),横向裂纹多因内应力集中产生,长度可达5-10mm,纵向裂纹常沿纤维束分布,深度可穿透制品截面。(2)纤维偏移或皱褶:纤维偏移表现为增强纤维偏离设计取向,偏移量超过5 $^{\circ}$ 时会显著影响力学性能;皱褶多发生在制品拐角或厚度突变处,纤维束出现堆叠、起皱,皱褶高度超0.2mm时会导致局部强度下降30%以上。(3)表面粗糙度超标:制品表面出现明显凹凸、划痕或流胶痕迹,表面粗糙度(Ra)值超1.6 μm ,严重时伴随边缘毛刺(长度超0.8mm),影响后续装配与外观质量。

3.2 缺陷成因机理

(1)树脂固化收缩应力:热固性树脂固化过程中体积收缩率达3%-8%,当收缩受到模具或纤维约束时,会产生内应力;若应力超过树脂断裂强度(通常为50-80MPa),则会引发裂纹;同时,固化过程中树脂挥发分未及时排出,会形成孔隙。(2)纤维与树脂界面结合不良:纤维表面处理不充分(如碳纤维未做氧化处理),表面能低,与树脂的界面结合力不足;或树脂粘度偏高(超5000mPa·s),无法充分浸润纤维表面,导致界面存在空隙,易引发纤维脱粘与分层缺陷。(3)工艺参数失配:牵引速度与固化温度不匹配,如速度过快(超5m/min)而温度偏低(低于120 $^{\circ}\text{C}$),树脂固化不完全,易产生孔隙;张力控制不稳定(波动超 $\pm 15\text{N}$),会导致纤维受力不均,引发偏移或皱褶;模具温度梯度过大(相邻区域温差超20 $^{\circ}\text{C}$),会加剧内应力,诱发裂纹^[5]。

3.3 控制策略

(1)模具结构改进:采用变截面模具设计,在入口段设置渐变过渡区(长度100-150mm),减少纤维流动阻力,避免皱褶;模具内壁抛光至Ra $\leq 0.2\mu\text{m}$,降低制品表面摩擦,减少粗糙度;在模具出口设置排气槽(宽度0.5-1mm,深度0.2mm),促进挥发分排出,减少孔隙。(2)树脂配方优化:添加5%-10%的弹性体增韧剂(如端羧基丁腈橡胶),降低树脂固化脆性,减少裂纹产生;加入2%-5%的低收缩添加剂(如聚苯乙烯微球),将固化收缩率控制在1%-3%,缓解内应力;调整树脂粘度至1000-3000mPa·s,提升纤维浸润效果。(3)在线监测与反馈调节:采用红外测温仪实时监测模具各段温度,温度偏差超5 $^{\circ}\text{C}$ 时自动调节加热功率;通过张力传感器采集纤维张力数据,构建闭环控制系统,张力波动超

±5N时及时调整牵引电机转速；利用激光轮廓仪在线检测制品表面粗糙度，超标时自动调整模具温度或牵引速度，确保缺陷及时管控。

4 复合材料拉挤成型工艺创新与应用拓展

4.1 工艺创新方向

(1) 热塑性复合材料拉挤：突破传统热固性树脂局限，采用聚丙烯、聚酰胺等热塑性树脂，通过“熔融-浸渍-冷却”流程成型，制品可回收再加工（回收率超80%）；借助高频感应加热技术，将成型周期缩短30%-40%，适配汽车、电子等领域对快速生产与环保的需求。

(2) 3D拉挤技术：打破传统二维规则截面限制，通过可编程牵引系统与多向模具协同，实现T型、L型等复杂截面一次成型；结合局部增强设计，可在制品关键部位叠加纤维层，提升局部强度20%-30%，适配航空航天异形结构件需求。(3) 混杂纤维增强：将碳纤维（高强度）与玻璃纤维（低成本）按3:7-5:5比例混合，通过分层浸渍工艺实现纤维均匀分布；制品既保留碳纤维的高模量（较纯玻璃纤维制品提升40%-50%），又降低成本30%-40%，平衡性能与经济性。

4.2 新兴应用领域

(1) 新能源领域：在风电领域，用于制备风电叶片芯材（长度可达40-60m），重量较传统金属芯材减轻30%-40%，抗疲劳寿命延长至20年以上；在光伏领域，生产光伏支架，耐候性（抗紫外线、耐酸碱）提升50%，使用寿命超15年，且安装便捷性优于钢制支架。(2) 轨道交通领域：用于制造地铁、轻轨的车体结构件（如侧墙板、地板梁），制品密度仅为钢材的1/4-1/5，车体减

重15%-20%，能耗降低8%-12%，同时具备良好的隔音性（降噪量达10-15dB），提升乘坐舒适性。(3) 建筑加固领域：生产GFRP（玻璃纤维增强复合材料）筋材，替代传统钢筋用于桥梁、隧道加固，抗腐蚀性（耐盐水、混凝土碱性环境）远超钢材（使用寿命超50年vs钢材20-30年），且抗拉强度达600-800MPa，可有效提升建筑结构承载能力与耐久性。

结束语

复合材料拉挤成型工艺凭借其高效、稳定、可控的连续化生产优势，已成为高端制造领域不可或缺的核心技术。面对新能源、航空航天等产业对材料性能与环保要求的持续提升，工艺创新需聚焦热塑性基体开发、3D复杂截面成型及智能闭环控制等方向，通过多学科协同突破现有局限。未来，随着材料科学与智能制造技术的深度融合，拉挤工艺将向更高精度、更广应用场景迈进，为全球产业升级提供关键支撑。

参考文献

- [1]陈锦龙.复合材料结构优化设计及其在化工工艺中的应用[J].石油石化物资采购,2024(17):34-36
- [2]姜春艳.复合材料成型工艺的发展[J].建筑设计及理论,2021,(12):94-96.
- [3]陈倩.复合材料成型工艺及应用[J].建筑技术科学,2024,(09):77-78.
- [4]张玲丽,刘善阔.复合材料RTM成型工艺综述[J].建筑技术科学,2024,(05):61-62.
- [5]王铎.复合材料成型工艺方法的探讨[J].建筑技术科学,2023,(08):103-104.