

复合材料成型技术研究进展

毛海亮

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: 复合材料成型技术涵盖热压、树脂传递模塑、拉挤与缠绕、增材制造等多种类型。本文梳理各类成型技术的演进脉络, 聚焦效率提升、精度优化及应用场景拓展。阐述成型工艺、设备及辅助材料的关键突破方向, 包括工艺精准管控、设备智能化升级、辅助材料适配等。探讨成型技术高效化、绿色化与低成本化、一体化、智能化的发展趋势, 推动复合材料成型技术进步, 满足多领域对高性能复合材料构件的需求。

关键词: 复合材料; 成型技术; 技术演进; 突破方向; 发展趋势

引言: 复合材料凭借卓越性能, 在航空航天、汽车制造、生物医用等众多领域广泛应用。成型技术作为复合材料制备的关键环节, 对构件性能、质量与成本影响重大。从早期传统工艺到如今融合先进技术的创新工艺, 其发展历程漫长。不同成型技术各具特点优势, 在演进中不断突破。深入探究复合材料成型技术的分类、演进、突破方向及发展趋势, 有助于推动行业发展, 满足各领域对高性能复合材料的迫切需求。

1 成型技术分类及核心工艺方向

1.1 热压成型相关技术

热压成型是通过加热加压实现材料固结的经典工艺, 核心是将材料置于模具中, 加热至玻璃化转变温度以上使材料进入高弹态, 同时施加定向压力促使材料填充模具结构, 再经保温加压与冷却脱模完成成型^[1]。该技术可通过真空环境排出模具空腔气体, 避免成型过程中产生气泡, 对模具表面进行防粘连处理可提升高深宽比结构的脱模效果, 其技术源头可追溯至20世纪末的微结构制造研究, 目前广泛应用于高性能材料的致密化成型。

1.2 树脂传递模塑成型相关技术

树脂传递模塑成型采用闭模操作模式, 无需预浸料与热压罐, 可有效控制成型成本。工艺核心是将纤维增强材料铺放于密闭模腔, 通过压力将树脂胶液注入模腔, 浸润增强材料后完成固化脱模。该工艺所用原材料包括树脂体系、增强材料与填料, 树脂以不饱和聚酯树脂、环氧树脂为主, 增强材料多采用玻璃纤维制品, 填料可降低成本并吸收固化放热, 成型过程可实现流水作业, 通过树脂压注机与专用模具保障成型稳定性。

1.3 拉挤与缠绕成型相关技术

拉挤成型与缠绕成型均属于连续化自动化成型工艺, 二者在结构适配性上形成互补。拉挤成型通过牵引装置将连续纤维浸润树脂后送入加热模具, 固化后连续

拉出并定长切割, 专注于等截面长直型材生产, 可实现高纤维含量与稳定力学性能。缠绕成型则将浸润树脂的纤维束按预设角度缠绕于心轴, 经加热固化后拆除芯模, 擅长回转体构件成型, 可通过精准控制纤维取向充分发挥材料力学性能, 两种工艺均需专用设备支撑, 在规模化生产中具备显著优势。

1.4 增材制造成型相关技术

增材制造成型又称3D打印, 以分层沉积为核心原理, 突破传统成型工艺的结构限制, 可精准制造复杂结构构件且材料浪费较少。该技术通过控制材料分布与微观结构, 可制备满足特定功能需求的复合材料, 涵盖光固化、材料喷射、粉末床熔融等多种类别。其优势在于可实现定制化精准设计与高效成型, 适配聚合物基、金属基等多种复合材料体系, 近年来在航空航天、生物医用等领域的研究应用持续推进, 成为复合材料成型技术的重要发展分支。

2 各类成型技术的技术演进

2.1 热压成型技术演进

热压成型技术作为复合材料成型领域的传统核心工艺, 演进历程围绕效率提升、流程简化与性能优化逐步推进。早期热压成型依赖人工操作, 成型周期长且参数控制粗放, 固化时间常达数小时。随着材料科学与装备技术发展, 快速固化模压料逐步推广应用, 将成型周期缩短至数分钟, 大幅提升生产效能。纤维增强体的浸渍方式从传统预混、预浸向现场混合、浸渍转变, 省去复杂预浸胶、预固化及存储工序, 降低生产成本的同时提升工艺灵活性^[2]。连续纤维及其织物定制铺层技术的应用, 推动热压制品从纯短切纤维增强向精准结构优化转变, 兼顾轻量化与力学性能提升, 相关技术演进已在澎湃新闻科普报道及行业研究中得到系统梳理。

2.2 树脂传递模塑成型技术演进

树脂传递模塑成型技术起源于20世纪40年代末,最初为成型飞机雷达罩发展而来,历经数十年迭代实现工艺成熟与应用拓展。早期技术存在树脂浸润不均、成型精度不足等问题,限制应用范围。后续通过优化注射压力控制与固化制度,提升树脂与纤维织物的适配性,减少制品内部缺陷。模具技术不断升级,从玻璃钢模逐步发展为表面镀金属模,使用寿命大幅延长,降低规模化生产的模具成本。微机控制注射机组的应用,实现注射过程的精准调控,推动技术从手糊成型改进型闭模工艺,发展为适合中等规模生产、环境友好的成熟成型技术,相关演进脉络可参考抖音百科行业词条及材料科学领域期刊报道。

2.3 拉挤与缠绕成型技术演进

拉挤成型技术与缠绕成型技术作为连续纤维增强复合材料的核心理制造方法,其技术演进紧密跟随材料科学与自动化控制的发展步伐。拉挤成型早期受限于牵引速度与树脂固化效率的匹配问题,制品长度与生产效率受限。随着高频感应加热技术与智能牵引系统的应用,拉挤成型实现高速连续生产,制品长度突破传统限制,且纤维含量与排列精度显著提升。缠绕成型技术则通过引入多轴数控系统与在线张力控制,实现了纤维路径的精确规划与张力动态调整,使复杂曲面制品的制造成为可能。近年来,机器人技术与3D视觉系统的融合,进一步提升了缠绕成型的自动化水平与制品质量一致性,为大型储罐、压力容器等高端装备的制造提供了技术支撑。

2.4 增材制造成型技术演进

增材制造成型技术起步较晚,早期以简单聚合物构件成型为主,存在成型精度低、材料适配性差等局限。随着分层控制技术的优化,成型精度逐步提升,可实现微观结构的精准调控。材料体系的拓展的推动下,逐步适配金属基、陶瓷基复合材料,打破传统工艺的材料限制。成型速度的提升与设备成本的降低,推动技术规模化应用,结合人工智能技术实现成型过程的智能监测与误差修正^[3]。其演进始终依托材料科学与数字制造技术的进步,参考增材制造领域的前沿研究成果,逐步成为复合材料复杂构件成型的核心技术之一。

3 成型技术的关键技术突破方向

3.1 成型工艺优化方向

成型工艺优化聚焦全过程精准管控,针对传统工艺参数匹配不合理、缺陷防控能力不足等瓶颈展开攻关,核心是通过动态调控工艺参数,构建适配不同材料体系的工艺方案。温度、压力、固化时间等核心参数的调控逻辑不断优化,摒弃固定参数模式,根据材料特性实时

调整,有效抑制气泡、分层、裂纹等常见缺陷。工艺组合模式持续创新,打破单一工艺局限,通过不同工艺的有机融合,兼顾成型效率与构件性能。流程设计不断精简,剔除冗余操作环节,在不影响成型质量的前提下缩短周期,相关优化路径借鉴材料加工过程控制领域的成熟研究,形成兼具科学性与实用性的工艺体系,推动成型工艺向精密化、高效化升级。

3.2 成型设备改进方向

成型设备改进以精度提升与智能化升级为核心,针对传统设备控制精度不足、操作依赖性强等问题进行系统性升级。核心部件结构持续优化,温度控制系统采用精准控温模块,压力与牵引速度调控引入闭环反馈机制,大幅提升参数控制精度,减少人为操作带来的误差。数控技术与智能监测系统深度融合,搭建设备运行实时监测平台,可及时捕捉运行异常并完成自动调整,提升设备运行稳定性。设备适配能力不断拓展,通过结构改进实现不同规格、不同类型复合材料的成型适配,扩大应用范围。同时,设备操作流程进一步简化,使用寿命显著延长,相关改进技术源自机械制造与自动化控制领域的前沿成果,推动成型设备摆脱传统依赖,向智能化、通用化发展。

3.3 成型辅助材料适配方向

成型辅助材料适配围绕材料协同性提升展开,通过辅助材料改性与选型优化,实现与基体材料、增强材料的精准匹配,为成型质量提供保障。固化剂、促进剂等辅助材料针对性研发,根据不同树脂体系的固化特性调整成分比例,优化固化反应速率,减少固化过程中的体积收缩与内应力,提升构件尺寸稳定性。脱模剂、偶联剂性能持续优化,增强脱模便捷性的同时,提升材料界面结合强度,减少界面缺陷。辅助材料种类不断拓展,环保型、高效型产品逐步替代传统材料,兼顾环保需求与成型性能,降低对环境的影响。相关适配技术参考高分子材料改性与材料界面科学领域的研究成果,实现辅助材料与成型工艺、主体材料的深度适配,为复合材料成型技术的绿色化、高质量发展提供支撑。

4 成型技术的发展趋势

4.1 高效化发展方向

成型技术的高效化发展已成为行业核心追求之一。随着制造节奏的持续加快,缩短成型周期、提升生产效率成为技术革新的关键方向^[4]。新型加热与冷却系统的研发,使温度控制更为精准迅速,减少了等待时间,加快了材料固化或冷却速率。高速运动控制技术的应用,让模具开合、材料输送等动作更加流畅快速,显著提升了

单位时间内的制品产出量。此外,多工位并行作业模式的探索,进一步挖掘了生产潜力,通过合理分配工序,实现了生产流程的无缝衔接,为大规模制造提供了有力支撑。

4.2 绿色化与低成本化发展方向

绿色化与低成本化协同推进是复合材料成型技术的重要发展导向,契合双碳目标与行业可持续发展需求。绿色化发展主要围绕原材料低碳替代、生产工艺能耗削减及废弃物回收利用展开,低温热处理技术可将废弃复合材料转化为可再利用产品,实现材料全生命周期闭环管理,有效降低碳足迹。生物基树脂与天然纤维的研发应用,减少对化石能源依赖,部分生物基复合材料可实现自然降解,从源头降低环境负担。低成本化发展通过优化成型工艺、采用回收材料及简化生产流程实现,回收碳纤维处理技术可保留原始纤维大部分刚度性能,降低高性能复合材料生产成本,相关技术探索已在行业权威研究及协会报告中得到系统阐述。

4.3 一体化成型发展方向

一体化成型技术致力于打破传统分工序制造模式,实现结构与功能的同步集成,提升构件性能并降低制造成本。该方向核心是通过区域化材料选型与工艺整合,根据构件不同区域的力学性能与功能需求,合理搭配连续纤维预浸料、非连续纤维预浸料及功能材料,在单一成型流程中完成构件制造。成型过程中通过模具预热、精准铺放、真空处理及分阶段温压控制,确保构件各区域材料结合紧密,实现材料性能最大化利用。一体化成型可减少工序衔接带来的误差与成本,提升构件轻量化水平,相关工艺创新已通过发明专利申请予以公开,成为航空航天、汽车等领域构件制造的重要发展路径。

4.4 智能化发展方向

智能化发展是复合材料成型技术的高阶演进方向,核心在于融合数字化、仿生学及智能材料技术,实现成型过程的精准可控与构件功能的升级。人工智能与数字孪生技术的结合,可构建虚拟制造环境,模拟成型全过

程并提前优化工艺参数,提升生产可靠性。仿生材料技术借鉴自然界生物结构特性,开发具有自修复、环境响应功能的复合材料,通过内置微胶囊结构实现损伤自主修复,拓展复合材料应用场景^[5]。智能响应型复合材料可根据环境温湿度变化自动调节物理性能,适配不同服役工况。生物医用领域的智能化复合材料研发,实现药物精准递送与组织修复功能,相关技术进展已在行业权威报道中详细披露,推动复合材料从结构支撑材料向主动功能智能系统升级。

结束语

复合材料成型技术正经历从单一工艺向多技术融合、从经验驱动向数据驱动的深刻变革。高效化发展通过工艺优化与设备升级缩短周期,绿色化路径依托低碳材料与循环利用降低环境负荷,一体化成型实现结构功能集成,智能化技术赋予材料自适应与自修复能力。这些趋势不仅提升复合材料制造效率与质量,更拓展其在极端环境、生物医用等领域的应用边界。随着材料科学、数字技术与制造工艺的交叉,复合材料成型技术将持续突破传统局限,为高端装备制造与可持续发展提供核心支撑。

参考文献

- [1]陈秋云,韩小勇,陈俊林,等. 民机复合材料液体成型技术研究与应用进展[J]. 合成纤维,2025,54(1):40-46.
- [2]孙丽,王淑霞,陈玉锦,等. 碳纤维增强热塑性复合材料关键成型工艺研究进展[J]. 广东化工,2026,53(4):63-66.
- [3]禹岳,王喆,姚沛衡,等. 复合材料液体成型树脂流动前锋监测技术研究进展[J]. 材料导报,2022,36(23):247-254.
- [4]肖遥,李东升,吉康,等. 大型复合材料航空件固化成型模具技术研究与应用进展[J]. 复合材料学报,2022,39(3):907-925.
- [5]蒋诗才,包建文,张连旺,等. 液体成型树脂基复合材料及其工艺研究进展[J]. 航空制造技术,2021,64(5):70-81,102.