

复合材料成型技术研究现状

刘飞 周亚肖 炜 黎迪晖

广东汇天航空航天科技有限公司 广东 广州 510630

摘要: 随着高端制造对材料性能要求的提升,复合材料成型技术正加速向高效、智能、绿色方向演进。本文聚焦复合材料成型技术研究现状。首先概述复合材料成型技术,接着详细阐述模压、液体、缠绕及3D打印等成型技术的研究进展。同时指出该技术面临高性能材料依赖进口、生产工艺能耗高、回收体系不完善、复杂结构件制造难度大等挑战。最后展望其发展趋势,包括高性能化、绿色环保、智能化以及多功能集成化方向,旨在为复合材料成型技术的进一步发展提供全面的参考与指引。

关键词: 复合材料;成型技术;研究进展;挑战;发展趋势

引言:复合材料凭借其优异的性能,如高强度、高模量、耐腐蚀等,在航空航天、汽车制造、建筑等众多领域得到广泛应用。而复合材料成型技术作为将复合材料转化为实际产品的关键环节,其发展水平直接影响着复合材料制品的质量与性能。随着科技的不断进步,复合材料成型技术取得了显著进展,多种成型方法不断涌现并持续优化。然而,在实际应用与发展过程中,该技术也面临着诸多挑战。深入研究复合材料成型技术的现状、挑战与发展趋势,对于推动相关产业升级、提升我国复合材料领域的国际竞争力具有重要意义。

1 复合材料成型技术的概述

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。复合材料成型技术则是将复合材料的各组分材料,按照设计要求加工成特定形状和尺寸制品的关键工艺过程,其质量直接影响复合材料制品的性能与应用。复合材料成型技术具有多样性的特点。常见的成型方法包括模压成型、液体成型、缠绕成型、拉挤成型以及3D打印成型等。模压成型是将一定量的预浸料放入金属模具中,在加热、加压条件下固化成型,能制备形状复杂、尺寸精度较高的制品;液体成型是将液态树脂注入铺有增强材料的模具型腔,经固化成型,适用于大型复杂结构件;缠绕成型是把连续纤维浸渍树脂后,按照一定规律缠绕在芯模上,固化后脱模得到制品,多用于制造压力容器等回转体;拉挤成型则用于生产连续的、截面形状固定的型材。不同的成型技术各有优劣,适用于不同的产品需求和生产场景。成型技术的选择需综合考虑复合材料的类型、制品的结构与性能要求、生产规模以及成本等因素。随着科技的进步,复合材料成型技术不断创新与发展,朝着高性能、绿色环保、智能化和多功能

集成化的方向迈进,以满足日益增长的工业需求,推动各领域的技术革新与产业升级^[1]。

2 复合材料成型技术研究现状

2.1 模压成型技术

模压成型技术作为复合材料成型的关键工艺,正朝着高效、智能、绿色方向发展。在材料体系方面,为满足不同领域需求,模压成型材料不断优化。高性能树脂体系具备良好粘度-温度特性,与增强体界面匹配性佳,固化时间大幅缩短,如部分预浸料体系固化时间可控制在30分钟以内,甚至5分钟内完成固化,极大提升了生产效率。在工艺创新上,自动化与智能化深度融合。自动化铺丝铺带技术结合模压成型,实现复杂曲面构件精准铺层,减少人工误差。智能温控与压力控制系统,可根据材料特性和工艺要求,精确调节模压过程中的温度与压力参数,保证制品质量稳定性。绿色环保成为模压成型技术发展的重要方向。通过优化工艺参数,降低能耗与碳排放,同时开发可回收利用的复合材料体系,实现资源循环利用。此外,模压成型技术与其他工艺的集成创新不断涌现,如与注塑工艺结合,实现复杂结构件的一体化成型,拓展了应用领域,提升了产品综合性能。

2.2 液体成型技术

液体成型技术凭借独特优势,在复合材料成型领域占据重要地位,当下正不断取得新进展。在材料适配性拓展方面成果显著。传统液体成型技术主要针对特定树脂体系,如今通过研发新型树脂与固化剂组合,能适配更多种类的纤维增强材料,无论是高性能碳纤维、玻璃纤维,还是新兴的天然纤维,都能实现良好浸润与固化,拓宽了复合材料的应用范围,满足不同行业对材料性能的多样化需求。工艺控制精度大幅提升。借助先进的传感器与智能控制系统,可实时监测树脂流动速度、

压力分布、固化程度等关键参数，并依据实时数据精准调整工艺条件。这使得成型过程中纤维与树脂的分布更加均匀，制品内部缺陷大幅减少，孔隙率可控制在极低水平，显著提升了复合材料的力学性能与可靠性。成型效率与质量稳定性持续优化。新型模具设计与制造技术，结合优化的工艺流程，缩短了树脂充模时间，提高了生产效率。同时，严格的工艺规范与质量检测标准，确保每一批次制品的质量稳定性，降低了废品率，提升了企业经济效益，推动液体成型技术在更广泛的工业领域得到应用。

2.3 缠绕成型技术

缠绕成型技术作为复合材料成型的重要方法，在诸多领域展现出强大生命力，当前正不断取得新突破。在设备精度与自动化程度上显著提升。现代缠绕机采用高精度滚珠丝杠、伺服电机等先进部件，使缠绕过程中的运动控制精度大幅提高，重复定位精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内。同时，自动化控制系统实现了从纤维张力控制、缠绕轨迹规划到树脂浸渍等全流程自动化操作，减少了人工干预，不仅提高了生产效率，还保证了产品质量的稳定性，降低了废品率。材料性能与适配性不断优化。新型高性能纤维材料如高模量碳纤维、芳纶纤维等的应用，使缠绕制品的力学性能得到极大提升，能够满足更高强度、更轻量化的设计要求。同时，针对不同应用场景，研发出多种专用树脂体系，与纤维的匹配性更好，固化后的制品具有优异的耐腐蚀、耐高温等性能。应用领域持续拓展。除了传统的压力容器、管道制造，缠绕成型技术在航空航天、新能源汽车等领域的应用日益广泛。

2.4 3D打印成型技术

3D打印成型技术作为复合材料成型领域的前沿技术，正以迅猛之势发展，展现出巨大潜力。在材料种类拓展上成果丰硕。早期3D打印多局限于单一塑料材料，如今已能处理多种复合材料。金属基复合材料3D打印可制造高强度、耐高温的航空航天零部件；陶瓷基复合材料打印出的制品具备优异的耐磨、耐腐蚀性能，应用于高端制造与生物医疗领域；碳纤维增强复合材料则大幅提升了打印制品的力学性能，满足结构承载需求。打印精度与速度实现双提升。先进的打印设备采用高精度运动控制系统与优化的打印算法，打印层厚可控制在微米级别，表面粗糙度显著降低，能精准制造复杂精细结构。同时，多喷头并行打印、高速激光扫描等技术的应用，使打印速度大幅提高，缩短了产品开发周期，降低了生产成本。智能化与集成化趋势明显。借助物联网、大数据与人工智能技术，实现打印过程的实时监控与智

能调控，自动优化打印参数，确保打印质量稳定^[2]。

3 复合材料成型技术面临的挑战

3.1 高性能材料依赖进口

当前，国内复合材料领域在高性能原材料方面存在显著短板。高端碳纤维、高性能树脂基体等关键材料，部分性能指标难以达到国际先进水平，导致在航空航天、高端装备制造等对材料性能要求严苛的行业，不得不大量依赖进口。这种依赖不仅使国内企业在采购时面临成本高昂、供应周期不稳定等问题，还容易在国际市场波动或贸易摩擦等情况下，遭遇供应中断的风险，严重制约了国内复合材料产业向高端化、自主化发展的进程。

3.2 生产工艺能耗高

复合材料成型工艺普遍存在能耗较高的问题。热压罐成型工艺需长时间高温高压环境，加热与加压过程能耗巨大；注塑成型工艺中，模具加热、原料熔融等环节也消耗大量能源。高能耗不仅增加了生产成本，使产品在市场上的价格竞争力下降，而且与当下节能减排、绿色发展的时代要求相悖。随着能源成本的不断上升和环保要求的日益严格，高能耗问题已成为复合材料成型技术进一步推广和应用的重要阻碍。

3.3 回收体系不完善

复合材料回收利用面临诸多难题，回收体系尚不完善。一方面，复合材料由多种不同性质的材料复合而成，分离难度大，现有回收技术难以高效、低成本地实现纤维与基体材料的分离和再利用。另一方面，回收产业链不健全，缺乏专业的回收处理企业和完善的市场回收机制，导致大量废弃复合材料无法得到合理回收，只能被填埋或焚烧，既造成资源浪费，又对环境产生污染，不利于复合材料产业的可持续发展。

3.4 复杂结构件制造难度大

制造复杂结构件是复合材料成型技术面临的一大挑战。复杂结构件往往具有不规则形状、内部结构复杂等特点，在成型过程中，纤维的铺放方向和分布难以精确控制，容易出现纤维取向不合理、局部纤维含量不均等问题，影响结构件的力学性能。同时，复杂结构件的模具设计制造难度大，成本高昂，且成型过程中容易出现缺陷，如孔隙、裂纹等，导致产品合格率降低，增加了生产成本和生产周期，限制了复合材料在复杂结构领域的应用^[3]。

4 复合材料成型技术的发展趋势

4.1 高性能化

复合材料成型技术正朝着高性能化方向加速迈进。在材料层面，研发新型高性能纤维与基体材料是关键，

如更高强度、模量的碳纤维,耐高温、耐腐蚀的陶瓷基体等,以提升复合材料整体性能。成型工艺上,不断优化现有工艺参数,像热压罐成型中精确控制温度、压力与时间,减少内部缺陷,提高制品致密度与力学性能。同时,探索创新成型技术,如自动铺丝成型能精准控制纤维铺放角度与路径,实现复杂结构高性能化制造。此外,通过纳米改性、界面优化等手段,增强纤维与基体间的界面结合力,进一步提升复合材料的综合性能,满足航空航天、高端装备等领域对材料性能日益严苛的要求。

4.2 绿色环保

绿色环保是复合材料成型技术发展的必然趋势。在原材料选择上,优先采用可回收、可降解的生物基材料,减少对传统石油基材料的依赖,降低资源消耗与环境污染。成型工艺方面,致力于开发低能耗、低排放的工艺技术,如低温固化成型技术,降低能源消耗与有害气体排放。同时,加强废弃复合材料的回收再利用技术研究,建立完善的回收体系,通过物理、化学等方法实现纤维与基体的分离与再生,提高资源利用率。此外,在生产过程中,采用清洁生产技术,减少废水、废渣的产生,实现复合材料成型技术的绿色可持续发展。

4.3 智能化

智能化正深刻改变复合材料成型技术。借助先进的传感器技术,在成型过程中实时监测温度、压力、纤维铺放状态等关键参数,实现生产过程的精准控制。利用大数据与人工智能算法,对监测数据进行深度分析,优化工艺参数,提前预测并预防缺陷产生,提高产品质量与生产效率。自动化设备的广泛应用也是智能化的重要体现,如自动化铺丝机、机器人喷涂等,减少人工干预,提升生产的一致性与稳定性。此外,通过建立数字化工厂,实现生产流程的数字化管理与监控,实现从原材料采购到成品出厂的全流程智能化管控,推动复合材料成型技术向智能化、自动化方向升级。

4.4 多功能集成化

复合材料成型技术正朝着多功能集成化方向发展。通过材料设计与工艺创新,使复合材料不仅具备高强度、轻量化等基本性能,还能集成多种功能,如导电、导热、电磁屏蔽、隐身等。例如,在航空航天领域,研发具有隐身功能的复合材料结构件,既能满足结构强度要求,又能有效降低雷达反射截面积。在电子领域,开发导电复合材料,用于制造柔性电路板等。同时,通过多层复合、梯度结构等设计,实现不同功能区域的集成,满足复杂工况下的多功能需求。多功能集成化复合材料的应用,将拓展复合材料的应用领域,提升产品的附加值与竞争力^[4]。

结束语

当下,复合材料成型技术研究正呈现出蓬勃发展的态势,多种成型技术齐头并进、不断革新。模压、液体、缠绕、3D打印等技术在材料适配、工艺精度、生产效率等方面均取得显著进步,有力推动了复合材料在航空航天、汽车制造等领域的广泛应用。然而,技术发展仍面临成本控制、大规模生产稳定性等挑战。展望未来,随着跨学科技术的深度融合与协同创新,复合材料成型技术有望突破现有瓶颈,实现更高效、更绿色、更智能的发展,为高端制造业的升级提供更为坚实的材料支撑。

参考文献

- [1]刘嘉,周蕾,罗文东,陈小丽,吴江.复合材料成型技术研究现状[J].橡塑技术与装备,2022,48(08):27-31.
- [2]陈超,唐中华,张帅,郭长龙,倪敏轩,刘秀,王希,孙萌萌.复合材料热隔膜预成型技术的工程化应用研究[J].纤维复合材料,2021,38(03):32-35+51.
- [3]蒋贵刚,孙天峰,陈静,房怡,周占伟.先进复合材料网咯结构制备工艺及关键技术研究进展[J].纤维复合材料,2020,37(04):101-105+109.
- [4]李丹,良辰.复合材料成型技术[J].航空制造技术,2023(16):38-39.