

复合材料在机械结构中的设计与制造工艺集成研究

丁 豹

江西恒大高新技术股份有限 江西南昌 330096

摘要: 复合材料凭借轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能,在机械结构领域的应用日益广泛。设计与制造工艺的有效集成是发挥复合材料性能优势、保障机械结构质量与可靠性的核心。本文系统分析复合材料机械结构的设计特性,包括材料性能优势、可制造性要求及设计与制造的关联性;详细阐述预浸料铺层成型、树脂传递模塑成型、增材制造等关键制造工艺的技术特点;深入研究面向制造的设计方法、参数协同优化、质量控制策略等集成路径。研究旨在为复合材料机械结构的高效设计与精准制造提供技术支撑,推动复合材料在机械工程领域的规模化应用。

关键词: 复合材料;机械结构;设计特性;制造工艺;集成方法

引言

在现代机械工程向轻量化、高性能、长寿命方向发展的背景下,传统金属材料逐渐难以满足高端装备的设计需求。复合材料由两种或多种性质不同的材料通过物理或化学方法复合而成,兼具各组分材料的优点,在比强度、比刚度、耐腐蚀性等方面表现出显著优势,已成为航空航天、汽车制造、工程机械等领域的理想材料。复合材料机械结构的性能不仅取决于材料本身的特性,更依赖于设计与制造工艺的协同配合。当前,部分机械结构项目存在设计与制造脱节的问题,设计方案未充分考虑制造工艺的可行性,导致工艺实施困难、产品质量缺陷、生产成本增加等问题,制约了复合材料性能的充分发挥。因此,深入研究复合材料机械结构的设计特性与关键制造工艺,探索设计与制造工艺的集成方法,对于提升复合材料机械结构的设计水平、制造质量与应用效益具有重要的理论与实践意义。

一、复合材料机械结构的设计特性

(一) 复合材料的性能特点与设计优势

复合材料具有显著区别于传统金属材料的性能特点,为机械结构设计提供了更多优化空间。其最突出的优势是轻质高强,例如碳纤维复合材料的比强度是普通钢材的数倍,在相同承载要求下,采用复合材料制造的机械结构重量可大幅减轻,有助于降低装备能耗、提升机动性能。在汽车工业中,复合材料车身结构相较于传统钢制结构,重量可减少30%以上,同时刚度与强度保持不变甚至提升。

复合材料的性能具有可设计性,通过合理选择增强

体与基体材料的类型、比例,以及调整增强体的排列方式,可实现机械结构在不同方向上的性能定制。针对机械结构中不同部位的受力特点,可设计出各向同性或各向异性的复合材料结构,使材料性能与结构受力需求精准匹配。此外,复合材料还具有良好的耐腐蚀、抗疲劳性能,在恶劣工作环境下使用寿命显著长于金属材料,可降低机械结构的维护成本与更换频率^[1]。

(二) 结构设计的可制造性要求

复合材料机械结构的设计必须充分考虑制造工艺的可行性,满足可制造性要求,否则会导致设计方案难以落地或产品质量不达标。可制造性要求贯穿设计全过程,首先体现在结构形状与尺寸设计上,应避免过于复杂的内部结构、尖锐棱角或过大的结构厚度,这些设计会增加成型难度,容易产生气泡、裂纹等缺陷。例如,在设计复合材料机械臂时,应采用平滑过渡的轮廓与合理的壁厚分布,便于成型工艺中的材料流动与压实。

材料选择与铺层设计也需符合可制造性要求。不同制造工艺对复合材料的形态、粘度、固化特性等有特定要求,设计时需根据选定的制造工艺选择适配的材料体系。铺层设计应考虑铺层的连续性与可操作性,避免铺层褶皱、重叠或无法铺覆的情况,同时合理安排铺层顺序,确保结构成型后的力学性能均匀稳定。此外,设计还需预留必要的工艺孔、定位基准与脱模斜度,为制造过程中的装夹、定位、脱模等工序提供便利。

(三) 设计与制造工艺的关联性分析

复合材料机械结构的设计与制造工艺存在密切的关联性,设计方案直接决定制造工艺的选择与实施难度,而制造工艺的特性又反过来制约设计方案的优化空间。

设计阶段对制造工艺的选择具有导向作用,不同的结构形式、性能要求需对应不同的制造工艺。例如,大型复杂曲面的机械结构更适合采用树脂传递模塑成型工艺,而高精度、复杂结构的小型零件则可选择增材制造工艺。

制造工艺的技术参数会影响设计目标的实现,设计时需充分考虑工艺参数对结构性能的影响。例如,预浸料铺层成型工艺中,铺层压力、固化温度与时间等参数会影响复合材料的致密性与粘结强度,设计时需根据材料特性与结构性能要求,明确工艺参数的控制范围。同时,制造过程中可能出现的工艺缺陷,如孔隙、分层、纤维取向偏差等,也需在设计阶段提前预判,通过优化设计方案降低缺陷产生的概率,或设置必要的质量控制节点^[2]。

二、复合材料机械结构的关键制造工艺

(一) 预浸料铺层成型工艺

预浸料铺层成型工艺是复合材料机械结构制造中应用广泛的传统工艺,其核心流程是将预先浸渍树脂的纤维布(预浸料)按照设计的铺层方案逐层铺覆在模具表面,经过压实、固化、脱模等工序形成最终结构。该工艺的优势在于铺层精度高,可精准控制纤维的取向与铺层顺序,能够充分发挥复合材料的各向异性优势,满足机械结构特定方向的力学性能要求。

预浸料铺层成型工艺适用于制造大型、承载要求高的复合材料机械结构,如航空发动机叶片、工程机械臂等。在工艺实施过程中,铺层操作的规范性至关重要,需确保预浸料无褶皱、无气泡,各层之间紧密贴合。压实工序可排除铺层间的空气,提高结构致密性;固化工序需严格控制温度、压力与时间,确保树脂充分固化,形成稳定的结构形态。该工艺的不足之处在于生产周期较长,手工铺层劳动强度大,适合批量较小、精度要求高的产品制造。

(二) 树脂传递模塑成型工艺

树脂传递模塑成型工艺是一种闭模成型工艺,其原理是将干纤维增强体预先放置在密闭模具内,然后将液态树脂通过压力注入模具,树脂在流动过程中浸渍纤维增强体,待树脂固化后脱模得到复合材料结构。该工艺具有成型效率高、产品表面质量好、尺寸精度高的特点,能够实现复杂形状机械结构的一体化成型,减少后续加工工序。

树脂传递模塑成型工艺的关键在于模具设计与树脂注入参数控制。模具需具备良好的密封性与刚度,确保树脂不泄漏且结构成型后尺寸稳定。树脂注入压力、温

度与速度需根据结构形状、纤维体积分数等因素合理调整,确保树脂能够均匀浸渍所有纤维,避免出现干斑、孔隙等缺陷。该工艺适用于批量生产中尺寸、复杂形状的复合材料机械结构,如汽车底盘部件、电子设备外壳等,在兼顾产品质量的同时能够提高生产效率、降低制造成本^[3]。

(三) 增材制造工艺

增材制造工艺,又称3D打印技术,是近年来快速发展的复合材料制造工艺,其核心是基于离散-堆积原理,通过逐层打印的方式将复合材料粉末或丝材成型为三维结构。该工艺无需传统模具,能够快速制造出复杂形状的机械结构,尤其适合小批量、个性化产品的生产,以及结构的快速原型制作。

复合材料增材制造工艺主要包括熔融沉积成型、选择性激光烧结、光固化成型等类型。熔融沉积成型工艺通过加热喷头将复合材料丝材挤出,按照预设路径逐层堆积;选择性激光烧结工艺利用激光扫描熔化复合材料粉末,实现层间粘结;光固化成型工艺则通过紫外光照射使光敏树脂基复合材料固化成型。该工艺的优势在于设计自由度高,可实现复杂内部结构、镂空结构的制造,且材料利用率高,减少废弃物产生。然而,在当前阶段,这种先进的制造工艺在应用于生产大型且具备高强度要求的机械结构时,仍然面临着一些显著的局限性。具体而言,其在打印速度方面尚未达到理想水平,导致生产效率无法满足大规模应用的需求;同时,所打印出的结构在致密度上还有待加强,以确保机械部件的内部结构均匀且无缺陷;此外,力学性能的稳定性也是当前需要重点攻克的技术难题,只有不断提升这一性能指标,才能确保机械结构在实际应用中具备足够的可靠性和耐久性。因此,针对这些关键问题进行深入研究和持续优化,是推动该工艺迈向成熟应用的关键所在。

三、设计与制造工艺的集成方法

(一) 面向制造的设计方法应用

面向制造的设计方法是实现设计与制造工艺集成的核心手段,其核心思想是在设计初期就充分考虑制造工艺的要求,将制造约束融入设计决策过程,确保设计方案不仅满足性能要求,而且具备良好的可制造性。在复合材料机械结构设计中,面向制造的设计方法首先要求设计人员深入了解各类制造工艺的技术特点、适用范围与约束条件,根据结构的性能需求、尺寸大小、形状复杂度等因素,提前选定合适的制造工艺。

某汽车零部件企业在设计碳纤维复合材料油底壳时,

采用面向制造的设计方法，在设计初期即确定采用树脂传递模塑成型工艺。设计过程中，充分考虑该工艺的模具结构要求与树脂流动特性，优化油底壳的结构形状，采用平滑的曲面过渡与合理的壁厚分布，避免尖角与复杂内部空腔；同时在结构上设置树脂流动通道与排气孔，确保成型过程中树脂能够充分浸渍纤维。通过该方法，油底壳的设计方案与制造工艺高度适配，成型过程中未出现干斑、气泡等缺陷，产品一次合格率显著提升^[4]。

（二）设计参数与工艺参数的协同优化

设计参数与工艺参数的协同优化是实现设计与制造工艺深度集成的关键，通过建立设计参数、工艺参数与结构性能之间的关联模型，优化调整各项参数，实现结构性能、制造效率与成本的综合最优。设计参数主要包括结构尺寸、铺层方案、材料配比等，工艺参数包括成型温度、压力、时间、树脂注入速度等，两者相互影响、相互制约。

某航空航天企业在设计复合材料机翼结构时，开展了设计参数与工艺参数的协同优化。设计参数方面，通过有限元分析优化机翼的铺层角度与铺层厚度，确保结构的强度与刚度满足要求；工艺参数方面，针对预浸料铺层成型工艺，优化固化温度曲线与加压压力。通过正交试验方法，研究不同铺层方案与固化参数组合对结构力学性能的影响，建立多目标优化模型，最终确定最优的设计参数与工艺参数组合。

（三）集成过程中的质量控制策略

设计与制造工艺集成过程中的质量控制是保障复合材料机械结构质量的重要环节，需建立全流程质量控制策略，覆盖设计、原材料、制造、检测等各个阶段。设计阶段的质量控制是一个至关重要的环节，它主要涵盖了多个方面的内容，其中包括设计方案评审和仿真分析验证等关键步骤。在设计方案评审环节，通常会组织多个专业的专家团队进行综合评估，以确保设计方案不仅在理论上具备高度的合理性，而且在实际制造过程中也具备可行性。此外，通过利用先进的有限元分析等仿真工具，可以对设计结构的力学性能进行精准预测，同时还能有效识别出成型过程中可能出现的潜在缺陷，从而提前采取相应的预防措施，确保最终产品的质量和性能达到预期标准。这一系列的质量控制措施，旨在从源头上保障设计的科学性和制造的可靠性，为后续的生产环节奠定坚实的基础。

原材料质量控制是基础，需建立严格的原材料检验标准，对复合材料的纤维强度、树脂含量、固化特性等

关键指标进行检测，确保原材料质量符合设计要求。制造过程中的质量控制需设置关键工序质量控制点，实时监测工艺参数的执行情况，如预浸料铺层的厚度与平整度、树脂传递模塑成型的树脂注入压力与温度、增材制造的打印速度与层间温度等。同时，采用在线检测技术，如超声检测、红外热成像检测等，及时发现成型过程中的缺陷并采取补救措施。产品成型后，通过力学性能测试、无损检测等手段对产品质量进行最终验证，确保结构性能满足设计要求^[5]。

结语

复合材料在机械结构中的应用为机械工程的轻量化、高性能发展提供了重要支撑，而设计与制造工艺的有效集成是发挥复合材料优势的核心前提。复合材料机械结构的设计需充分考虑材料的性能特点与可制造性要求，紧密结合制造工艺的技术特性，避免设计与制造脱节。预浸料铺层成型、树脂传递模塑成型、增材制造等关键制造工艺各有优势与适用场景，需根据结构需求合理选择。通过面向制造的设计方法应用、设计参数与工艺参数的协同优化、全流程质量控制策略的实施，能够实现设计与制造工艺的深度集成，提升复合材料机械结构的设计水平、制造质量与生产效率。未来，随着复合材料技术与制造工艺的不断进步，设计与制造工艺的集成度将进一步提高，为复合材料在机械工程领域的更广泛应用奠定基础。在实际工程应用中，需持续积累设计与制造经验，不断优化集成方法，推动复合材料机械结构向更高性能、更低成本、更短周期的方向发展。

参考文献

- [1]徐旭冉.细菌纤维素基功能复合材料的结构设计及其性能研究[D].南京理工大学,2022.
- [2]王海东,秦泽云,王庆东.复合材料电子吊舱结构与铺层设计研究及应用[J].电子机械工程,2020(004):036.
- [3]白翠平,马其华,周天俊.车用CFRP油底壳的结构与制造工艺并行优化设计[J].工程设计学报,2020,27(5):8.DOI:10.3785/j.issn.1006-754X.2020.00.075.
- [4]赵天,李营,张超,等.高性能航空复合材料结构的关键力学问题研究进展[J].航空学报,2022,43(6):43.DOI:10.7527/S1000-6893.2022.26851.
- [5]张泽月,罗俊波,杨芳,等.碳纤维复合材料机械臂结构与性能优势研究[J].合成纤维,2021.