

复合材料加工技术分析

刘 虎¹ 薛 磊² 马洪杰¹

1. 山东双一科技股份有限公司 山东 德州 253000

2. 山东双一游艇有限公司 山东 德州 253000

摘要: 复合材料因其优异的物理和化学性能, 在多个领域得到广泛应用。本文概述了复合材料的特性, 如高强度、轻质、耐腐蚀等, 并探讨了常见的加工方法, 包括机械加工、热压成型、缠绕成型和拉挤成型。本文着重分析了复合材料加工过程中的质量控制要点, 包括原材料质量控制、加工工艺参数控制以及加工过程中的缺陷检测与控制。这些控制措施对于确保复合材料制品的性能和质量至关重要。

关键词: 复合材料; 加工技术; 分析

引言

复合材料凭借高强度、轻质、耐腐蚀、耐磨损及良好的热稳定性等独特优势, 在航空航天、汽车制造、风力发电及船舶制造等多个领域大放异彩。然而复合材料的加工却是一项技术密集型任务, 其过程相对复杂, 对技术和设备有着特定要求。本文旨在深入剖析复合材料的加工技术, 详细阐述其特性, 并着重探讨加工过程中的质量控制要点, 以为复合材料加工领域提供有价值的参考和借鉴。

1 复合材料的特性

复合材料, 作为一类由两种或两种以上不同性质的材料通过物理或化学方法结合而成的新型材料, 展现出了诸多独特的性能优势。以下是对复合材料特性的详细阐述: 复合材料的密度相较于传统金属材料普遍较低, 但其强度和模量却异常突出^[1]。以碳纤维增强复合材料为例, 其比强度 (即材料的强度与其密度之比) 是钢材的5倍以上, 而比模量 (即材料的弹性模量与其密度之比) 也达到了钢材的2至3倍。这一特性使得复合材料在航空航天等重量敏感型领域大放异彩, 能够显著减轻结构重量, 进而提升整体性能和效率。在航空航天器的设计中, 复合材料的这一优势有助于减少燃料消耗, 增加飞行距离, 同时提高飞行器的机动性和载荷能力。复合材料的疲劳性能显著优于传统金属材料。在承受交变载荷 (即周期性变化的载荷) 时, 复合材料能够表现出更高的耐久性, 疲劳裂纹扩展速率相对较低。这意味着在长期使用过程中, 复合材料部件更不容易因疲劳而损坏。复合材料在航空发动机叶片、汽车零部件等需要长期承受交变载荷的关键部件中得到了广泛应用。这些部件在复合材料的加持下, 使用寿命得以延长, 可靠性得到显著提升。复合材料的可设计性是其另一大亮点。通过精

心选择增强材料和基体材料, 并调整它们的组成比例和铺层方式, 可以设计出具有特定性能的复合材料, 以满足不同工程领域的多样化需求。在飞机机翼的制造过程中, 可以根据机翼不同部位的受力情况, 量身定制复合材料铺层结构, 以实现最佳的力学性能。这种高度定制化的设计方式使得复合材料在航空航天、汽车、风力发电、船舶等工业领域具有广泛的应用前景。许多复合材料还具备出色的化学稳定性, 能够在恶劣的化学环境中保持性能稳定。以玻璃纤维增强塑料为例, 它在酸、碱等腐蚀性介质中表现出良好的耐受性, 常被用于制造化工管道、储罐等设备。这些复合材料制品在化工、石油、海洋等行业中发挥着重要作用, 确保了生产设备的长期稳定运行。

2 常见的复合材料加工方法

2.1 机械加工

机械加工, 作为塑造复合材料形状与尺寸的关键技术, 其原理在于利用切削刀具对复合材料执行切削、钻孔、铣削、磨削等精密操作。尽管与金属材料的机械加工在基本原理上相似, 但复合材料的独特性质——非均匀性和各向异性, 为加工过程带来了诸多特殊挑战。

(1) 复合材料的硬度和强度显著, 纤维与基体的紧密结合, 使得切削过程中所需的切削力远超金属材料。以碳纤维增强复合材料为例, 其切削力甚至可达加工相同尺寸铝合金的两至三倍, 这无疑对加工设备和刀具的承受力提出了更高要求。(2) 刀具磨损问题同样突出。复合材料中的纤维, 特别是硬度极高的碳纤维, 对刀具的切削刃造成剧烈磨损, 严重缩短了刀具的使用寿命。硬质合金刀具在加工此类复合材料时, 其寿命往往仅为加工金属材料时的几分之一, 这无疑增加了加工成本和时间成本。(3) 复合材料的各向异性特性还容易导致加工

缺陷的产生。在加工过程中,复合材料易出现分层、撕裂、毛刺等缺陷,尤其是在钻孔时,当钻头即将钻透板材背面时,由于纤维支撑作用的突然消失,背面分层现象尤为明显,这严重影响了加工质量和产品的可靠性。尽管存在上述挑战,机械加工在复合材料领域的应用仍具有不可替代性。它适用于对复合材料进行高精度的外形加工,如航空航天零部件的复杂外形制造、汽车模具的精确轮廓加工等。然而,加工成本高、刀具损耗大、加工效率相对较低以及加工缺陷控制难度大等问题,仍是当前机械加工复合材料领域亟待解决的关键难题。

2.2 热压成型

热压成型,这一将预浸料在模具中经特定温度和压力固化成型的工艺,正成为复合材料制造领域的关键技术^[2]。其原理简单而精妙:树脂基体在热力作用下熔化流动,充分浸润纤维,填充空隙,同时在压力作用下排除气泡,使复合材料结构致密,最终固化成所需形状。第一,热压成型制品的质量令人瞩目。得益于纤维与基体的紧密结合,制品内部结构致密,孔隙率低,力学性能卓越。在航空航天领域,热压成型制造的结构件强度和模量均能满足严苛的设计要求,确保飞行安全。第二,成型精度同样是热压成型的一大亮点。模具的精确设计与制造,确保了制品的尺寸精度与表面质量。在飞机机身蒙皮的制造中,热压成型技术使得蒙皮表面平整,尺寸精确,满足飞机的装配需求,为飞行器的整体性能提供有力保障。第三,生产效率方面,热压成型展现出了其批量化生产的潜力。相较于手工成型方法,热压成型能够大幅提高生产效率,满足大规模生产的需求。在汽车内饰件的生产中,热压成型技术快速、准确地生产出大量形状复杂的内饰件,为汽车制造业的快速发展提供了有力支持。第四,热压成型技术也面临一些挑战。设备投资与模具成本较高,对操作人员的技术水平提出严格要求。生产过程中能源消耗较大,需要在节能减排方面做出更多努力。总体而言,热压成型技术在复合材料制造领域具有广泛的应用前景。它不仅能够满足形状复杂、尺寸精度要求高、力学性能要求严格的复合材料制品的制造需求,还能在一定程度上提高生产效率,为复合材料制造业的快速发展贡献力量。

2.3 缠绕成型

缠绕成型技术,通过将连续纤维或纤维织物浸胶后,精心缠绕于芯模之上,并在特定温度和压力下固化成型,为复合材料制品的制造开辟了新路径。这一工艺的核心在于缠绕规律的选择,包括环向、螺旋和平面等多种方式,通过精准调控缠绕角度与层数,可确保制品

在不同方向上展现出所需的力学性能^[3]。缠绕成型技术能够最大化地发挥纤维的强度优势。在制品受力方向上,纤维得以有序排列,从而显著提升复合材料的力学性能。在制造压力容器时,合理的缠绕工艺使得纤维成为承受内压的主力军,确保了容器的安全稳定。生产效率方面,缠绕成型技术同样表现出色。自动化生产线的引入,使得缠绕速度大幅提升,非常适合批量生产。在风力发电机叶片的制造中,缠绕成型工艺以其高效、精准的特点,迅速制造出大量尺寸一致的叶片,满足了清洁能源领域对高效、可靠设备的迫切需求。缠绕成型制品的质量稳定性也备受赞誉。自动化设备的精确控制,确保了工艺参数的稳定,从而使得制品的壁厚均匀、力学性能一致。在管道制造中,缠绕成型技术确保了管道壁厚的精确控制,提高了产品的整体性能。缠绕成型技术也面临一些挑战。设备投资较大,芯模的设计与制造相对复杂,这在一定程度上限制了其应用范围。对于非回转体形状的制品,缠绕成型技术的制造难度较大,需要进一步的技术创新与突破。尽管如此缠绕成型技术在回转体形状复合材料制品的制造中,仍展现出无可替代的优势与价值。

2.4 拉挤成型

拉挤成型,这一独特的复合材料加工技术,通过将连续纤维束或纤维织物浸渍树脂后,在牵引力的作用下穿越成型模具,实现树脂的固化成型,最终产出具有连续截面形状的复合材料制品。此过程中,纤维被均匀分布于树脂基体中,赋予制品卓越的强度和刚度。(1)生产效率是拉挤成型技术的一大亮点。作为一种连续生产工艺,其生产速度之快,令人瞩目。在生产复合材料型材时,拉挤成型的速度可达每分钟数米甚至更高,远超传统加工方法,满足了大规模生产的需求^[1]。(2)原材料的高利用率也是拉挤成型技术备受青睐的原因之一。在加工过程中,纤维和树脂的浪费几乎为零,大大降低了生产成本,提高了经济效益。这一特点使得拉挤成型在复合材料制造领域具有独特的竞争力。(3)制品性能的均匀性同样值得称赞。由于拉挤过程中纤维和树脂的分布极为均匀,制品在长度方向上的力学性能表现稳定,这为制造长尺寸的复合材料制品提供了有力保障。在建筑、桥梁、电力、交通等领域,这种均匀性能的制品具有广泛的应用前景。(4)拉挤成型技术也存在一定的局限性。由于制品的形状完全受限于模具,只能生产具有固定截面形状的制品。对于形状复杂、多变的复合材料制品,拉挤成型技术难以胜任。这一限制在一定程度上影响了其应用范围。尽管如此拉挤成型技术以其高

效、均匀、经济的特点，在复合材料制造领域仍占据重要地位。随着技术的不断进步和创新，相信未来拉挤成型技术将在更多领域展现出其独特的价值和潜力。

3 复合材料加工过程中的质量控制要点

3.1 原材料质量控制

纤维的性能对复合材料的性能起着关键作用，因此要严格控制纤维的品种、规格、强度、模量等指标。对于碳纤维，要检查其拉伸强度、拉伸模量、纤维直径等参数是否符合要求，同时要注意纤维的表面处理情况，确保纤维与基体之间具有良好的界面结合性能。基体材料质量控制：基体材料的性能也会影响复合材料的性能，要控制基体材料的树脂类型、固化剂种类、粘度、固化特性等参数。在使用环氧树脂作为基体材料时，要确保环氧树脂的纯度、分子量分布符合要求，固化剂的配比准确，以保证复合材料的固化质量。

3.2 加工工艺参数控制

(1) 温度控制。在热压成型、缠绕成型等加工过程中，温度对树脂的固化反应和复合材料的性能有重要影响。要严格控制加工过程中的温度，确保温度均匀分布，避免出现局部过热或过冷现象。在热压成型时，要根据树脂的固化曲线，合理设定升温速率、保温温度和保温时间，以保证树脂充分固化，同时避免树脂分解或性能下降。(2) 压力控制。压力也是影响复合材料成型质量的重要因素。在加工过程中，要根据制品的形状、尺寸和材料特性，合理施加压力，确保复合材料压实，排除气泡，提高制品的密度和力学性能。在缠绕成型时，要控制缠绕张力，使纤维在缠绕过程中保持适当的张紧度，避免出现松弛或张力不均匀的情况。(3) 加工速度控制。加工速度会影响复合材料的成型质量和生产效率。在拉挤成型等连续加工过程中，要根据树脂的固化速度和制品的质量要求，合理控制加工速度。如果加工速度过快，树脂可能来不及充分固化，导致制品性能

下降；如果加工速度过慢，则会降低生产效率。

3.3 加工过程中的缺陷检测与控制

(1) 分层是复合材料加工中常见的缺陷之一，会严重影响复合材料的力学性能。可以采用超声检测、X射线检测等无损检测方法对分层缺陷进行检测^[4]。在加工过程中，要通过优化加工工艺参数，如降低切削力、合理控制压力等，减少分层缺陷的产生。对于已经出现的分层缺陷，可以采用修补工艺进行修复，如注射树脂等方法。(2) 孔隙率过高会降低复合材料的强度和模量，影响制品的性能。可以采用密度法、金相分析等方法检测复合材料的孔隙率。在加工过程中，要通过提高树脂的浸润性、加强排气等措施，降低孔隙率。在热压成型时，可以采用真空辅助成型技术，提高排气效果，降低孔隙率。

结语

总而言之，复合材料的加工技术涵盖多个关键环节，每一环节都直接关系到最终产品的性能与质量。通过严格管理原材料质量、精细调控加工工艺参数，并及时检测与控制加工缺陷，我们能确保复合材料制品展现出卓越的性能与持久的质量。展望未来，技术的持续革新将推动复合材料加工技术迈向更高效、更智能化的新高度，为复合材料行业的蓬勃发展注入强劲动力。

参考文献

- [1]张东致,王翀,段正才,等.基于复合材料制造加工的玻璃纤维加固技术分析[J].当代化工研究,2019(3):60-61.
- [2]陈清良,王晓宇,刘元吉,等.复合材料加工技术及装备发展综述[J].机械制造与自动化,2024,53(3):1-9.
- [3]苏春杰.碳纤维复合材料低温辅助小孔加工技术研究[D].山东:山东理工大学,2023.221-225.
- [4]朱子百.对纤维增强复合材料机械加工技术的研究分析[J].中国机械,2021(5):85-86.