

复合材料机械加工技术的研究分析

薛磊¹ 马洪杰² 刘虎²

1. 山东双一游艇有限公司 山东 德州 253000

2. 山东双一科技股份有限公司 山东 德州 253000

摘要: 复合材料因其独特性能和广泛应用而备受关注。机械加工技术对其性能有重要影响,涉及切削力、切削热、分层、纤维断裂等难点。常用加工设备与刀具的选择至关重要。关键技术包括切削、磨削、特种加工及加工过程优化。智能化监测、表面处理技术以及严格的安全管理,共同确保复合材料机械加工的高效与质量。未来研究将聚焦于提高加工精度,延长刀具寿命,减少环境污染,实现绿色制造。

关键词: 复合材料; 机械加工技术; 加工难点; 关键技术

引言

复合材料作为现代工程领域的明星材料,凭借其高强度、低密度和耐腐蚀性等特性,在船舶制造、航空航天、汽车制造和风电行业等多个领域展现出巨大潜力。然而,复合材料的机械加工却面临诸多挑战,如切削力和切削热的影响、分层和纤维断裂等问题。因此,深入研究复合材料机械加工技术,优化加工过程,对于充分发挥复合材料性能具有重要意义。

1 复合材料概述

复合材料作为一种先进的工程材料,以其独特的性能和广泛的应用领域而备受瞩目。复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学方法组成的新材料,这些材料在性能上取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料。其分类多样,按结构特点可分为纤维复合材料、夹层复合材料、细粒复合材料和混杂复合材料等。纤维增强复合材料,如碳纤维增强树脂基复合材料,以其高强度、高模量的特性在航空航天领域得到广泛应用。颗粒增强复合材料,则是将硬质细粒均匀分布于基体中,如弥散强化合金,能有效提升材料的整体性能。复合材料展现出显著的物理与力学性能。它们通常具有低密度、高强度、优异的导热性能以及良好的耐腐蚀性,这些特性使得复合材料在替代传统材料时表现出显著优势。其低密度特性可明显降低产品的重量,提高燃油效率和操控性能;高强度和耐腐蚀性则保证了材料在恶劣环境下的稳定性和耐久性。在应用领域方面,复合材料在船舶制造、航空航天、汽车制造、风电行业等行业展现出巨大的应用潜力。在航空航天领域,复合材料因其轻质高强、热稳定性好的特点,被广泛应用于飞机、火箭和卫星的结构部件中。汽车制造中,碳纤维复合材料正逐渐成为推动行

业发展的关键力量,其轻质、高强度和高刚度的特性显著提升了汽车的燃油效率和性能。

2 复合材料机械加工技术基础

2.1 机械加工对复合材料性能的影响

在复合材料机械加工进程中,切削力与切削热是影响复合材料性能的两大核心要素。(1)切削力在加工中起着关键作用。机械加工时,刀具与复合材料相互作用产生切削力,致使复合材料内部形成应力场。当此应力超出材料的承载阈值,复合材料内部便会出现纤维与基体的界面脱粘现象,严重时甚至引发纤维断裂。从微观层面剖析,这些微观结构的改变,会影响复合材料的宏观力学性能,如强度和刚度,降低材料的承载能力和稳定性。(2)切削热的影响同样不容忽视。复合材料热导率较低,在加工过程中切削热难以有效散发,会在局部区域大量积聚,致使加工区域温度急剧升高。高温环境下,基体材料可能发生热分解、软化等物理化学变化,改变复合材料的原始性能。过高的温度还会削弱纤维与基体间的结合力,破坏复合材料结构的整体性,对其综合性能产生不利影响。(3)切削力和切削热并非孤立作用,而是相互耦合、协同影响复合材料性能。在实际加工中,必须综合考量这两个因素,通过优化加工工艺、合理选择加工参数等手段,最大程度降低它们对复合材料性能的负面影响,确保复合材料的加工质量与性能稳定性^[1]。

2.2 复合材料机械加工的难点

复合材料加工过程中容易出现一系列问题。分层是较为常见的问题,在切削过程中,切削力的作用会使复合材料层间产生剥离,尤其是在钻孔、铣削等加工操作中。分层的产生降低了复合材料的强度,还会影响其后续的使用性能。纤维断裂也是一个突出问题。复合材

料中的纤维具有高强度和高模量的特点,但在加工过程中,由于刀具与纤维的相互作用,纤维容易发生断裂。纤维断裂会破坏复合材料的结构完整性,导致表面质量变差,影响产品的外观和性能。表面质量差也是复合材料加工中亟待解决的问题。除了分层和纤维断裂导致的表面缺陷外,加工过程中的切削参数选择不当、刀具磨损等因素也会使复合材料表面出现粗糙度增加、划痕等问题,这对于一些对表面质量要求较高的应用场景来说是无法接受的。这些问题的产生原因主要与复合材料的结构特性有关。复合材料是由纤维和基体组成的多相材料,其各向异性明显,不同方向上的力学性能差异较大。在加工过程中,刀具与复合材料的接触情况复杂,难以保证均匀的切削状态,容易引发上述问题。复合材料机械加工的难点还包括刀具的选择与磨损问题。不同种类的复合材料需要特定的刀具来避免过度磨损,确保加工效率和表面质量。

2.3 常用加工设备与刀具

在复合材料加工过程中,常用加工设备与刀具的选择至关重要。(1)数控机床作为复合材料加工的核心设备,凭借其高精度和高自动化程度,成为实现复杂形状加工的首选。精密的编程控制,数控机床能够准确指导刀具的运动轨迹和切削参数,确保加工过程的精准度和效率。在航空航天等高技术领域,面对形状各异的复合材料零部件,数控机床展现了其无可比拟的加工优势。

(2)激光加工设备以其独特的非接触式加工方式,在复合材料加工领域同样占据重要地位。激光束的高能量密度使得加工过程热影响区小、精度高,尤其适用于对热变形敏感的复合材料。在电子设备制造中,激光加工设备常用于复合材料的微孔加工和精密切割,满足了该领域对加工精度和细节处理的高要求。(3)专用刀具在复合材料加工过程中同样不可或缺。鉴于复合材料的特殊性,普通刀具难以满足其加工需求。因此,专用刀具通常采用高硬度、高耐磨性和良好耐热性的特殊材料制成,并结合复合材料的特性进行几何形状的优化设计。在选择刀具时,需综合考虑复合材料的类型、加工工艺和具体加工要求,以确保刀具的适用性和加工质量。如针对硬度较高的复合材料,应选用硬度更高的刀具材料;而在追求高精度加工时,则需选择几何形状精度高、刃口锋利的刀具^[2]。

3 复合材料机械加工关键技术分析

3.1 切削加工技术

切削参数对复合材料加工质量有着至关重要的影响。切削速度、进给量和切削深度是三个主要的切削参

数。切削速度过高,会导致切削温度急剧升高,加剧刀具磨损,同时能使复合材料表面产生烧伤和热损伤;切削速度过低,则会降低加工效率。进给量过大,容易引起切削力增大,导致分层、纤维断裂等问题;进给量过小,又会影响加工效率和表面质量。切削深度的选择也需要谨慎,过大的切削深度会使切削力大幅增加,对加工质量产生不利影响。为了优化切削工艺,高速切削和微量润滑切削等技术得到了广泛应用。高速切削是指在较高的切削速度下进行加工,能提高加工效率。高速切削时,切削力和切削热的分布发生变化,有利于改善加工质量。但高速切削对刀具和设备的要求较高,需要配备高性能的刀具和先进的冷却润滑系统。微量润滑切削则是在切削过程中,向切削区域喷射少量的润滑剂,以减少刀具与工件之间的摩擦和磨损,降低切削温度。微量润滑切削既能够提高加工质量,又符合环保要求,是一种具有发展前景的切削工艺。

3.2 磨削加工技术

(1)砂轮特性是影响磨削效果的基础因素。砂轮的硬度、粒度和结合剂等特性,会直接作用于复合材料表面。硬度较高的砂轮,适合处理硬度较高的复合材料,凭借其耐磨性,能有效去除材料。然而,若硬度选择不当,会导致砂轮过度磨损,磨削力异常增大,最终破坏复合材料的表面平整度和完整性。粒度方面,细粒度砂轮可实现对复合材料表面的精细磨削,获得极佳的表面光洁度,适用于对表面质量要求严苛的加工场景。但细粒度砂轮磨削效率较低,加工耗时较长。粗粒度砂轮则正好相反,磨削效率高,但加工后的表面粗糙度较大,适用于对表面质量要求不高、追求加工效率的情况。

(2)磨削参数对复合材料的表面质量具有至关重要的影响。磨削速度、进给速度和磨削深度的合理选择,直接关系到加工的成功与否。若磨削速度过高,磨削区域会瞬间产生大量热量,导致磨削温度急剧攀升,极易引发磨削烧伤和裂纹,严重损害复合材料的表面性能。相反,磨削速度过低则无法充分展现砂轮的磨削效能,导致加工效率低下。进给速度和磨削深度过大,会增加磨削力,破坏复合材料的表面结构,降低其表面质量。

(3)合适的冷却方式是控制磨削烧伤与裂纹的关键手段。由于磨削过程中会产生大量热量,充分的冷却显得尤为重要。冷却液喷淋是常见的冷却方式,冷却液能迅速带走磨削区域的热量,降低磨削温度,减少磨削烧伤和裂纹的产生。冷风冷却则通过低温气流对磨削区域进行冷却,避免了冷却液可能带来的污染问题,特别适用于对环境要求较高的加工场景。合理选择冷却方式,并

结合恰当的砂轮特性和磨削参数，能有效提升复合材料的磨削加工质量^[3]。

3.3 特种加工技术

特种加工技术在复合材料加工领域展现出了独特且重要的应用价值，其中激光加工与水射流加工尤为突出。激光加工技术，凭借其高能激光束的快速作用机制，能够在复合材料表面实现精确而高效的加工。这一过程中，激光束使材料迅速熔化乃至汽化，无需传统机械接触，避免了因切削力引发的分层、纤维断裂等不良现象。尤为重要的是，激光加工技术以其高精度的特点，成为复合材料微细加工的理想选择，尤其适用于航空航天领域中对精度要求极高的薄壁结构件和复杂形状零部件的制造。水射流加工技术则另辟蹊径，通过高压水射流携带磨料对复合材料进行切割。高压泵将水加压至极高水平，经由特殊设计的喷嘴形成高速水射流，磨料在水流的带动下以极高的速度冲击复合材料表面，实现材料的精准去除。这一加工方式的一大优势在于无热影响区，即加工过程中不会因热量累积而改变复合材料的原有性能。因此，水射流加工技术特别适用于对热敏感复合材料的加工，且能处理各种形状和厚度的复合材料，在汽车制造行业中，常用于切割对精度和热影响有严格要求的复合材料车身零部件。总的来说，激光加工与水射流加工技术以其独特的加工原理和显著的优势，在复合材料加工领域发挥着不可替代的作用。

3.4 加工过程优化与安全保障

在复合材料机械加工关键技术中，除了切削、磨削、特种加工等技术外，加工过程的优化与安全保障同样不容忽视。（1）智能化加工监测系统的引入是提升加工稳定性与质量可追溯性的关键。在加工过程中，通过在设备上安装各类传感器，实时采集切削力、温度、振动等数据。这些数据经分析处理后，可直观反映加工状态。如切削力出现异常波动时，系统能及时发出预警，

操作人员可据此调整加工参数，避免刀具损坏与工件质量问题；这些数据被存储记录，为后续产品质量分析与工艺改进提供详实依据，实现加工质量的全程追溯。

（2）加工后的表面处理技术对于提升复合材料性能至关重要。复合材料加工后表面可能存在微观缺陷，影响其耐腐蚀性与疲劳寿命。化学涂层处理可在材料表面形成保护膜，增强耐腐蚀性；喷丸处理则通过在材料表面产生压应力，提高其疲劳强度。合理选择并运用这些表面处理技术，能进一步挖掘复合材料的性能潜力，拓展其应用领域。（3）加工过程中的人员管理与安全保障不可轻视。操作人员需经过严格培训，熟悉复合材料加工特性与设备操作规范。制定完善的安全操作规程，如在特种加工区域设置防护装置，防止激光辐射与高压水射流伤人。定期开展安全培训与应急演练，提升员工安全意识与应对突发情况的能力，确保加工过程安全有序进行^[4]。

结束语

综上所述，复合材料机械加工技术的深入研究与优化，不仅提升了加工效率和质量，还为复合材料的广泛应用奠定了坚实基础。未来，随着智能化、自动化技术的不断发展，复合材料机械加工将迎来更多创新，进一步推动材料科学与制造技术的进步。同时，加强安全管理，确保加工过程的人员和设备安全，也是复合材料机械加工领域不可忽视的重要方面。

参考文献

- [1]程柏.SiC纤维增强陶瓷基复合材料的水导激光加工技术研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2022(1):9-10.
- [2]焦浩文,陈冰,左彬.C/SiC复合材料的制备及加工技术研究进展[J].航空材料学报,2021,41(1):19-34.
- [3]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.
- [4]马瑛剑.纤维增强复合材料的性能及机械加工技术[J].科技创新与应用,2020(14):97-98.