

# 国家自然科学基金委员会

## 简 报

第 3 期 (总 492 期)

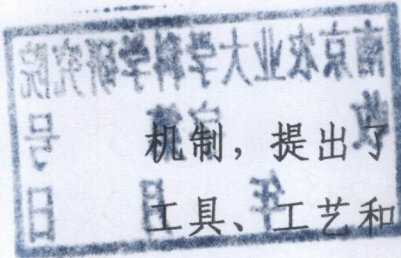
国家自然科学基金委员会

2018 年 7 月 24 日

### 我国自主研制的高性能碳纤维复合材料构件加工技术与装备突破传统复材加工质量及效率瓶颈

本文提要:在国家自然科学基金委员会-辽宁联合基金重点项目“航空装备中复材/金属叠层结构高质高效制孔技术”以及面上项目“碳纤维增强树脂基复合材料切削工艺基础数据源的获取”等支持下,大连理工大学贾振元教授领衔,航天材料及工艺研究所、哈尔滨飞机工业集团有限责任公司等单位研究人员共同组成的科研团队,在高性能碳纤维复合材料构件高质高效加工技术与装备研发方面取得了重大进展,揭示出碳纤维复合材料加工过程中的材料去除机理和损伤产生





机制，提出了复合材料加工损伤抑制原理，研制出新型加工工具、工艺和装备，解决了碳纤维复合材料加工损伤大、效率低的国际性难题，为碳纤维复合材料在我国航空、航天和交通等领域大规模应用奠定了基础。

树脂基碳纤维增强复合材料具有质量轻、强度高及易实现构件一体化设计制造的特点，已成为国内外航空航天装备减重增效的首选材料，在飞机上的应用，可以实现 15%-30% 的减重效益。然而，由于碳纤维复合材料的非均质性和各向异性，其在加工过程中极易产生分层、撕裂等损伤，严重影响构件的承载性能，加之高端装备构件结构复杂，且损伤容限要求苛刻，使得碳纤维复合材料构件加工难上加难。为满足高端装备研制对复合材料构件的加工需求，企业不得已采用传统切削工艺和手工作业方式，致使加工损伤严重、质量差、效率低，严重制约我国航空航天高端装备研制和批量生产进程。因此，实现碳纤维复合材料构件的高质高效加工，是保障航空航天高端装备研制和批量生产的重要前提，也是国内外高端装备制造领域所面临的严峻挑战。

国外对加工技术与装备严密封锁，高性能碳纤维复合材料构件高质高效加工已成为我国航空航天领域亟待解决的“卡脖子”难题。对此，贾振元团队瞄准碳纤维复合材料构件加工中的材料宏、细观去除机理及损伤成因这一关键科学问题攻关，从加工理论、工具、工艺、装备等方面开展系统研究，实现了高性能碳纤维复合材料构件高质高效数字化加



工，解决了碳纤维复合材料加工损伤难以控制、加工效率低的国际性难题。

### 一、牢牢抓住“卡脖子”的科学问题，开展创新研究

与金属等均质材料不同，碳纤维复合材料是以碳/石墨纤维为增强材料、以树脂为基体构成的非均质材料，其宏观表现为明显的层叠特征及各向异性。这些独有的特点造成其宏、细观切削过程与金属等均质材料不同。目前由于缺乏复合材料加工过程中材料去除机理和损伤产生机制等基础理论研究和装备研发，国内外在实际工程中依然主要沿用金属切削理论，采用传统或经验改进型刀具、常规加工工艺和装备。由于复合材料力、热行为及去除方式更加复杂，致使现有的加工理论、工具、工艺对于碳纤维复合材料的匹配性差，从而造成加工损伤严重、加工效率低，这是国际性加工难题。因此，如何突破传统金属等均质材料切削理论体系束缚，深入揭示碳纤维复合材料构件加工中宏、细观材料去除机理及损伤产生机制，成为解决其高质高效加工这一国际性难题的关键。

为此，团队在理论研究方面实现了以下创新：

一是考虑碳纤维复合材料中纤维、树脂以及纤维/树脂界面不同的力学、热学性质，分析在实际切削过程中树脂基体等周围材料对纤维的约束作用，建立了同时考虑纤维所受切向和法向约束作用、以及树脂等材料温变特性的单纤维切削模型，结合发明的单纤维切削实验方法，获得了切削过程中



分别表征材料去除及损伤形成的纤维断裂、界面开裂行为与切削力、热之间的关联关系。

二是考虑到刀具前角、后角、切削刃等各部位对复材所产生的切削作用不同，对复材切削过程中刀-工接触区域进行划分，据此建立复材宏观切削力及切削热的计算模型，获得了刀具几何、加工参数对切削力、热的影响规律。

三是通过自主设计、搭建原理性试验平台，实现了对碳纤维复合材料切削过程的在线动态显微观测，结合所建立的理论模型，从根源上揭示了碳纤维复合材料的加工机理及损伤形成机制，提出了“微元去除”和“反向剪切”的损伤抑制方法，即一方面通过“微刃”刀具结构分散材料去除体积，降低切削力，抑制加工损伤，同时通过增加切削刃数量保证材料最终去除效率。另一方面针对复材表层等区域中纤维在切削过程中所受周围材料约束作用较弱，易产生“纤维切不断”的问题，通过在刀具上附加局部反向切削刃，在与已加工侧边缘的共同作用下对边缘未切断纤维产生反向剪刀式切削，从而有效降低毛刺、撕裂等损伤。此外，针对复材切削过程中加工质量受温度影响大的问题，基于已求解的工艺参数对切削热的影响规律，探明了适合于复材高质高效加工的最适温度区间，由此提出了“适温切削”加工工艺策略，并建立了能够实现碳纤维复合材料适温切削的散热量计算方法。

上述理论，充分考虑了碳纤维复合材料的非均质性、各向异性以及切削过程中刀-工接触特性，实现了碳纤维复合



材料切削理论的源头创新，为高质高效加工工具、工艺和装备研发奠定了坚实的基础。围绕该研究，共授权发明专利 35 项，并在《国际机床与制造杂志》《复合材料结构》《先进制造技术》等国际知名期刊上发表高层次论文 54 篇，论文被德国卡尔斯鲁厄大学的沃尔克舒尔茨、英国朴茨茅斯大学的哈姆纳塔达卡尔等人多次引用。

## 二、促进基础研究与技术应用融通，推动加工技术取得重大突破

研究团队基于“微元去除”和“反向剪切”的刀具设计思想，开发出碳纤维复合材料高质高效系列新型加工工具。如：铣削系列工具（多刃微齿端刃铣刀、多刃微齿钻尖铣刀），应用于航空装备机翼结构中的大厚板边缘轮廓及超大孔的铣削加工中，实现了大厚板高质量连续铣削，并突破了大直径复材连接孔传统的“钻-扩-铰”繁琐工序，大幅提升了加工质量和效率，解决了大厚度、大尺寸复材孔难以高质、高效加工的难题；钻削系列工具（微齿麻花钻、微齿双顶角钻、微齿双阶梯钻和微齿钻铰一体化刀具），应用于大客/宽体客机复材构件多工位连接孔的加工，改变了传统制孔后需对孔入口、出口等处毛刺等损伤进行多次手工修磨的局面，同时改善了刀具寿命，大幅减少了换刀等辅助工艺时间，有效提升了加工质量和效率，解决了传统制孔难以实现一次性、低损伤、百余孔连续、自动化制孔难题；微刃系列工具（筒状立式微刃刀具、盘式微刃刀具和超大孔径微刃刀具），应用于某航天装备超长窄缝结构关键构件、某航天器舱段异型



盲窗、某高速飞行器构件异型深腔加工，首次实现了复材超长窄缝特征的高质量加工，并解决了传统由于所加工几何特征过于复杂而导致的异形盲窗、深腔加工质量差、甚至无法加工的难题。

上述新型加工工具，相比于山特维克、玛帕等国际知名刀具厂商生产的碳纤维复合材料刀具，加工质量显著提升，寿命提高 2-5 倍，价格仅为其 1/6-1/4。

此外，基于“适温切削”加工工艺策略，开发出负压逆向冷却工艺以及自风冷排屑工艺。其中，负压逆向冷却工艺应用于大客/宽体客机构件小直径深孔的制孔中，使得制孔分层损伤由 2mm 降低至 0.08mm，解决了传统工艺方法由于散热困难造成难以一次性高质量制孔的难题。所发明的具有自风冷排屑功能的加工装置，解决了某武器发射筒段厚板超大孔一次性、低损伤加工难题，相比于使用传统加工工具进行“钻-扩-铰”多次加工，分层损伤由 10mm 降低至 0.1mm，同时加工效率提高 5 倍。基于上述高质高效加工工具及工艺，创建了典型高性能碳纤维复合材料构件切削加工工艺数据库，实现了材料、刀具、工艺的精准匹配，为典型航空航天复合材料构件（筒段类、盒段类、异形类等）数字化加工提供工艺基础。

### 三、快速推进成果应用，提升高端装备竞争力

研究团队通过将上述理论与技术成果，应用于航天一院、三院和哈飞、沈飞、上飞等企业高性能碳纤维复合材料构件加工中，不仅解决了企业的关键技术问题，同时还推动了技



术革新，对提升我国高端装备的国际竞争力具有重要意义。研发的高性能碳纤维复合材料构件高质高效加工技术与装备，以军民共享、军民互促、军民互融的模式推广应用，不仅应用于大型客机、大型运输机制造等国民经济支柱产业，还推广到某新型航天装备、某新型航天器、某高速飞行器、某重型飞机、系列直升机等重点型号关键复合材料构件的加工中，进而从经济、军事等多维度实现了碳纤维复合材料高质、高效、数字化制造技术发展的跨越，为我国航空航天高端装备的研制和批量生产做出了突出贡献。研究成果获得2017年国家技术发明一等奖。

---

分送：中共中央办公厅、全国人大常委会办公厅、国务院办公厅、全国政协办公厅。

国家科教领导小组办公室；党中央、国务院有关部（委）、局及有关部门；各科学基金会；各省、直辖市、自治区、计划单列市科技厅。

---

国家自然科学基金委办公室

2018年7月24日印发

---

