

# 大型复合材料构件数字化加工 工装与装置的开发与应用\*

## Development and Application of Digital Machining Device and Equipment for Large Composites Component

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 高航 王奔 黄均亮 佟宇 郭东明



高航

大连理工大学机械工程学院教授、博士生导师。任现代制造技术研究所副所长、精密与特种加工教育部重点实验室副主任,兼任中国机械工程学会中国生产工程分会常务理事、中国生产工程分会光整技术专业委员会主任委员、国际磨粒加工技术学会常务委员、国际磨粒加工技术期刊(International Journal of Abrasive Technology) 远东地区主编。

复合材料是由 2 种或 2 种以上不同性质的材料,通过物理或化学方法复合而成的一种综合性能优于原

结合测量加工一体化技术,采用先进的数字化工装设备加工航空航天等领域使用的大型复合材料构件,已经是复合材料构件加工的大势所趋。复合材料加工过程中的缺陷产生机理、复合材料加工工具研制以及数字化加工装备的制造,已经成为国内大型复合材料构件数控加工装置或装备研制和开发的关键因素。

各组成材料性能、能克服单一材料缺陷的新型材料。根据材料的结构、性能或组成,复合材料可分为多种类型。其中,碳纤维/树脂复合材料(简称 C/E 复合材料)作为一种典型的先进复合材料,具有重量轻、模量高、比强度大和耐腐蚀等一系列优点,在诸如飞机机翼、大型运载火箭舱段、航天飞行器舱体等航空航天与国防军工产品的研制与生产中得到越来越广泛的应用。例如,波音 787“梦想”飞机为大幅度减轻结构重量,大量采用了复合材料,所用复合材料占 50% 左右,提高燃油效率 20%<sup>[1]</sup>。

复合材料构件制造成型后,为满足与其他零部件的装配及连接要求,需要进行大量的机械加工,涉及到多种加工工艺,如制孔(包括铆接孔、盲孔等)、开窗口、异形法兰加工、切割以及打磨端面 and 侧面等。然

而, C/E 复合材料力学性能呈各向异性,层间强度低,且碳纤维的硬度高(HRC=53~65),强度大,为机械加工带来了极大的困难,加工过程中极易出现撕裂、毛刺、分层、烧伤等加工缺陷,属于典型的难加工材料。

随着航空航天及军事装备技术的快速发展,对复合材料结构件的要求日益严格,复合材料结构件的加工精度、表面质量、生产效率等因素已成为影响其使用性能、可靠性和使用寿命等的重要因素。为避免造价昂贵的复合材料构件在机械加工中出现较严重的加工损伤甚至报废的现象,确保复合材料的加工质量,目前国内复合材料制孔加工技术仍沿用落后、低效的“细分工序”手工作业。即使对 C/E 复合材料构件上精度只有 H8 或 H9 的孔都需要采用手持电(气)钻的“钻底孔-(划孔)-扩

\* 国家科技重大专项(2012ZX04003031)、航空科学基金(20111663003)、国家自然科学基金(50875034)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目资助。

孔-粗铰孔-精铰孔-铤窝”5道工艺。这造成生产效率极其低下,工人劳动强度很大,且加工质量很大程度上依赖于工人的技术水平。一架波音747民机上铆接/螺接孔的数量有300多万个,一架F-16战机上有4万个孔需要加工。面对如此巨大的加工量要求,如此落后的加工现状已严重限制了型号产品的量产能力和研制进度,无法满足航空航天等领域的高速发展和应用需求。

复合材料构件的数字化加工是实现高效低损伤加工的重要手段。然而,大型复合材料构件(如飞机机翼、蒙皮等)长达几米或十几米,其专用加工装备研制的成本高昂,使得装备制造企业及使用企业均面临较大的经济问题。同时,针对复合材料的加工,材料加工过程中的缺陷产生机理、新型加工工具的研制是实现大型复合材料构件加工装置研制的基础。

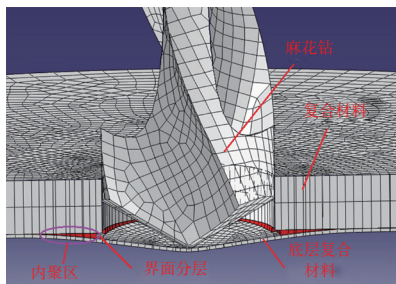
随着复合材料制备技术的发展,大型复合材料构件制备过程中多采用共固化技术,从而减少构件的数量<sup>[2]</sup>。然而,复合材料构件共固化过程中,由于材料内部存在较大的残余应力,共固化后的复合材料构件的几何尺寸与设计尺寸容易产生偏差,导致机械加工过程中的加工位置精度难于保证。为保证机械加工时的位置精度,针对共固化成型后的复合材料构件需进行必要的几何位置测量,从而修正机械加工的位置。测量加工一体化技术已经成为大型复合材料构件实现数字化高效低损伤加工的重要因素。

结合测量加工一体化技术,采用先进的数字化工装设备加工航空航天等领域使用的大型复合材料构件,已经是复合材料构件加工的大势所趋。复合材料加工过程中的缺陷产生机理、复合材料加工工具研制以及数字化加工装备的制造,已经成为国内大型复合材料构件数控加工装置

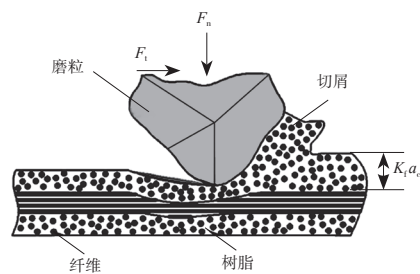
或装备研制和开发的关键因素。

## C/E 复合材料加工缺陷产生机理

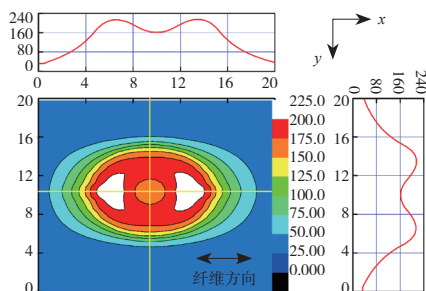
切削力及切削热是导致复合材料加工缺陷产生的主要原因。采用传统的硬质合金麻花钻加工C/E复合材料时,由于碳纤维与树脂2种材料性能的巨大差异,且材料为层铺结构,在切削轴向力的作用下,可能导致孔入口、出口处形成各种各样的缺陷。当作用在材料层间的轴向力大于层间强度时,材料发生分层现象,材料表面形成撕裂缺陷,未被切断的纤维形成毛刺缺陷。另外,加工过程中产生的切削热一旦高于某一温度,



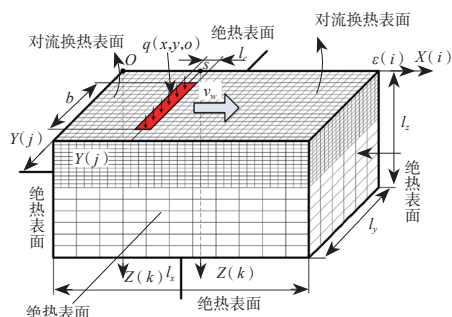
(a) 钻孔力学模型



(b) 磨粒加工力学模型



(c) 钻孔加工温度场模型



(d) 磨削加工温度场模型

图1 复合材料加工切削力及温度场分析

将导致C/E复合材料层间强度急速降低,进一步恶化材料的加工损伤程度<sup>[3]</sup>。

碳纤维丝的高强、高硬和高磨蚀性,是C/E复合材料加工过程中刀具磨损严重的直接原因。由此引起的切削力及切削热的增加,将导致加工质量随着加工过程的进行急剧恶化。由于目前复合材料制孔加工仍以手

工加工为主,手工制孔过程中,因钻孔出口处材料剩余厚度的减小导致钻削轴向力急剧减小,从而因操作者的惯性引起钻孔出口速度过快,因此极易产生毛刺、撕裂等缺陷。

为深入研究C/E复合材料加工缺陷成因,采用有限元方法模拟分析不同刀具形式加工时的临界轴向力及其对分层损伤的影响规律,采用数值仿真的方法对加工时的温度场进行了建模及仿真分析<sup>[4]</sup>,并建立了加工过程的力学模型<sup>[5]</sup>,对不同缺陷产生的条件进行分析及试验验证,为高质量加工刀具及设备研制提供理论支持。部分复合材料切削力及切削热的研究如图1所示。

## 复合材料加工工具研制

目前,航空航天和军工科研院所与企业研制生产的各种复合材料舱段结构件、机翼和蒙皮等,基本上沿用金属加工工具。国外一些著名的刀具制造公司,如瓦尔特公司(Walter)、山特维克公司(Sandvik)等都推出系列化的复合材料制孔刀

具,其结构多为具有特殊刃型的硬质合金整体钻头和PCD钻头,但是价格昂贵,使得诸多企业只能“望洋兴叹”。国内至今尚缺乏有针对性的专用刀具设计方法和制造技术。在碳纤维丝产能不断提高、C/E复合材料应用日益推广的今天,开发经济适用的复合材料加工系列工具,是当前和今后一个时期复合材料应用技术发展过程中的关键问题之一。

通过对标准麻花钻钻削过程力学分析,可知:刀具顶角和横刃宽度越大,轴向力越大。据此提出在设计刀具时应尽量减小横刃宽度和刀具顶角,但是这样做也会降低刀具的寿命。另外,理论分析结果也表明,钻头圆角半径越小,越能够保持较长的锋利性,切削力就越小。

在理论分析的基础上,作者结合相关科研项目,研制了具有更高耐磨性的PCD刀具和金刚石涂层刀具,减小了切削力并提高了刀具寿命。研制出的PCD制孔刀具和金刚石纳米涂层螺旋面整体硬质合金钻头,具有减小轴向钻削力15%~30%,刀具耐用度提高2倍以上、且性价比高等优点。用于C/E复合材料制孔,可显著减轻加工出口毛刺和撕裂缺陷,加工质量和使用寿命能够满足企业生产加工需求,为C/E复合材料构件的高效加工提供了经济适用的长寿命制孔工具。

套料加工方法可以有效地降低加工切削力及切削热。针对C/E复合材料的特点,研制出超硬磨料套料加工工具,辅助以良好的冷却措施以及刀具设计参数的优化,有效地降低了制孔过程中的轴向切削力和磨削温度<sup>[6]</sup>。针对C/E复合材料大直径( $\phi 50\sim 80\text{mm}$ )深孔(30~45mm)套料加工排屑不畅、极易堵塞和易产生高温的难题,设计发明了一种具有自风冷排屑功能的金刚石磨料套料工具,加工效率提高1倍以上,刀具寿命提高2倍以上。

针对C/E复合材料干磨削极易堵塞砂轮的难题,发明了新型微磨料群可控排布打磨工具,采用“掩膜设计排布+激光制备掩膜+选择性金刚石磨料复合电镀”工艺制备,工艺简便、经济性好<sup>[7]</sup>,显著降低了C/E复合材料磨削温度和磨削力,砂轮不易堵塞,加工效率提高1倍,工具寿命提高3倍以上,实现了C/E复合材料构件外圆和端面的低损伤高效磨削加工。

除此之外,研制开发的系列电镀超硬磨料(金刚石)多刃套料工具及其组合制孔工具、超硬磨料超薄切割工具等,已在航空航天企业的C/E复合材料构件型号产品的研制和批产中得到了成功应用。研制的部分复合材料加工工具如图2所示。

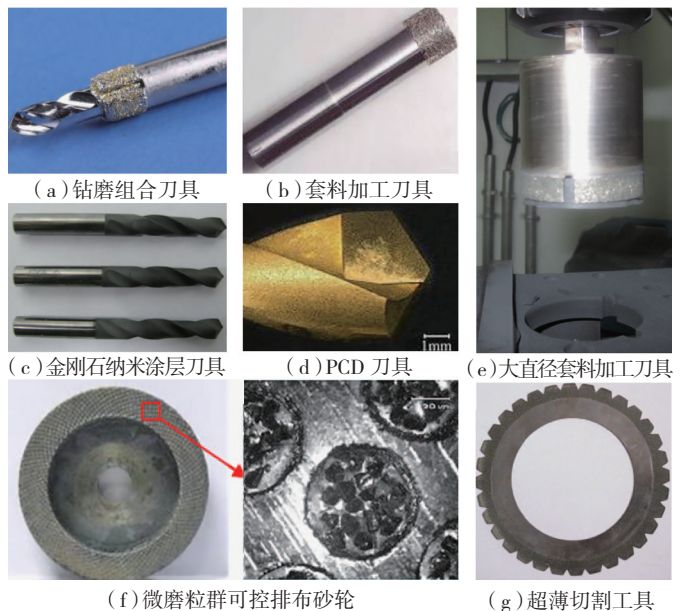


图2 研制的部分复合材料加工工具

### 大型复合材料构件数字化加工装备

由于复合材料构件特殊的加工要求以及缺乏针对性的加工技术,在复合材料生产中很少看到采用现有的通用数控机床加工复合材料构件。在数控机床普遍应用的今天,唯独缺少适合C/E复合材料构件的数字化加工设备。国外在这方面的研究起步较早,且已开始采用先进的数字化工装设备加工大型复合材料构件,主要有多点阵成形真空吸附式柔性工装、机器人柔性制孔装配系统、自动钻铆机、柔性轨道制孔设备、自动钻孔与环铆系统等。

多点阵真空吸盘式柔性制孔装

配工装系统主要由多个立柱吸盘组成,在数控系统控制下吸盘三维移动自动调整可形成完全符合被加工工件自由曲面的吸附点阵,其定位夹持蒙皮、升降舵、翼梁、机身等壁板类复合材料构件精度高、可靠,能适应不同外形的工件,可降低加工综合成本<sup>[8]</sup>。机器人柔性制孔装配系统多用于机翼壁板和装配质量要求更高的机身、翼盒、骨架等构件的装配。Airbus

公司和Electroimpact公司针对飞机复合材料壁板类构件共同研发了一套具有4种功能(压紧并探测工件厚度、钻孔和镗孔、检测制孔质量、安装螺栓或铆钉)的机器人柔性制孔装配系统<sup>[9]</sup>。针对壁板类大尺寸薄壁构件的装配制孔自动钻铆机也是先进制孔技术的一个发展方向。美国通用电气机械公司(GEMCOR)研制了世界上第一台自动钻铆机。

由于复合材料应用领域的特殊性,国外对C/E复合材料加工装备的关键技术保密严格。如柔性工装(托架)是自动钻铆机的关键组成部分,国内企业虽从国外购买了先进的自动钻铆机,但由于技术封锁,无法购买作为关键部件的托架系统<sup>[10]</sup>,所以

仍难以真正实现大型复合材料构件的数字化加工。因此,独立自主开发先进适用的C/E复合材料高效低损伤数字化加工专用装备已经成为国内航天航空、国防等领域产品研制和生产中亟待解决的一个问题。

针对大型复合材料构件专用加工设备研制的高成本问题,作者提出了以数字化工装代替大型设备实现数字化加工的设计思想。通过与航空航天企业合作,开发研制了多种针对大型复合材料构件的数字化加工工装或装置,有效地解决了加工生产中的实际问题,满足了企业需求。

例如,针对某大直径超长C/E复合材料薄壁筒形构件两端和中部切边、开矩形非对称窗口以及法向制孔等特殊要求,研制出如图3所示的专用数控钻铣磨工艺装置,有效解决了超大构件多工段位置加工和多工位方向的加工难题,实现了端面轴向制孔、周边径向制孔、周边开窗口、端面成形边切割以及表面修磨的高效低损伤数字化加工。

针对某 $\phi 2500\text{mm}$ 大型C/E复合材料构件端框面临的急需在周边加工出如图4所示几十个均布的等壁厚矩形深盲孔的加工难题,由于企业缺乏必要的大型回转式数控机

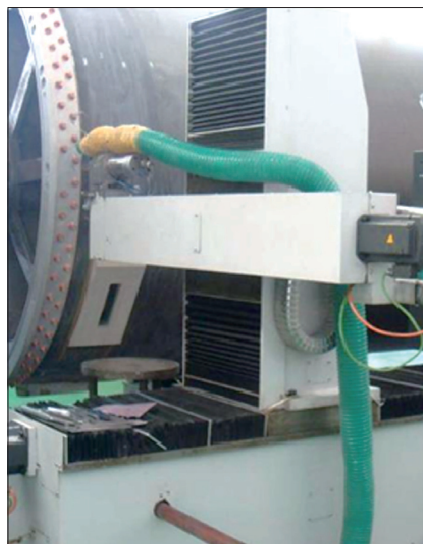


图3 研制的某大型筒类C/E复合材料构件数控钻铣磨工装

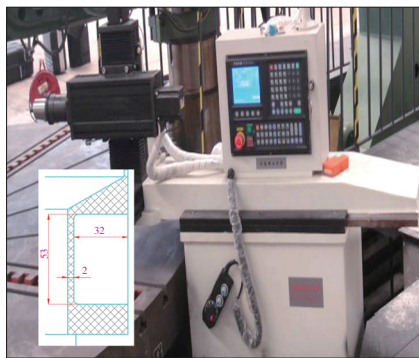


图4 研制的矩形深盲孔数控钻铣工装

床,为此在现有 $\phi 5000\text{mm}$ 转台的基础上,研制了专用数控钻铣装置,成功解决了型号产品研制的急需。

针对某航空复合材料TJB构件单曲面法向制孔要求和共固化工字梁位置随机形变的特点,研制了如图5所示的基于测量加工一体化技术的四轴三联动数控加工

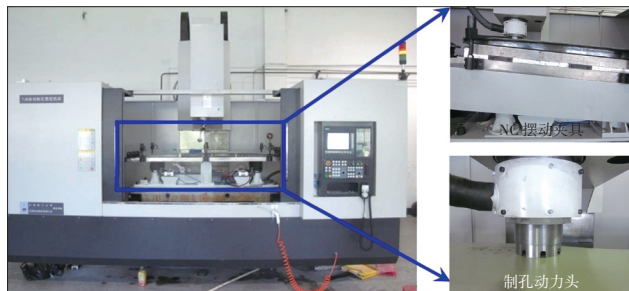


图5 研制的某航空复合材料TJB构件加工设备

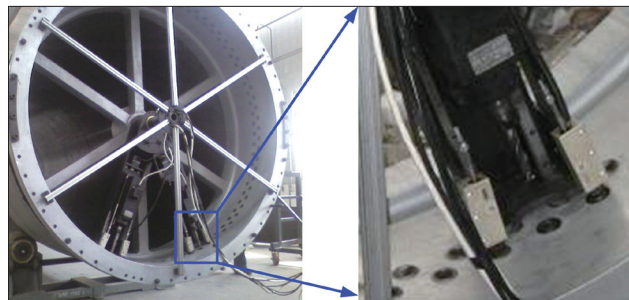


图6 针对某大型复合材料构件研制的数字化加工工装

位置在线测量的数控制孔程序补偿修正方法,实现了位置和形状存在随机误差的复合材料共固化结构件的数控自动制孔加工。

针对大型薄壁C/E复合材料筒类构件与其铝合金端框螺接孔的由内向外向心制孔难题,发明了如图6所示的一种大型复合筒双工位自定心自动制孔装置。该装置采用双工位自定心结构和电机驱动的自动进给制孔,不仅实现了大型C/E复合材料构件厚壁端框(20mm)与铝合金连接法兰(20mm)的叠层结构上百个 $\phi 17\text{mm}$ 螺接孔由内向外自定心、径向高效、高质自动制孔需求,加工质量和效率得到显著提高,而且节省

了超大型机床研制费用,节省了传统大型数控机床加工需要的构件中心和位置找正系统,大大降低了加工及使用成本。

## 结论

以复合材料加工缺陷产生机理研究为基础,研制出适用于复合材料的系列化加工工具,是实现复合材料高效低损伤加工的重要前提。

专用数控加工工装的研制成功

和应用,解决了企业大型C/E复合材料构件数字化加工中的技术瓶颈问题,推动了C/E复合材料数字化加工的发展,为缩短航天航空和国防相关型号产品的研制周期和批产能力提供了可靠的技术保障。

针对具体的复合材料构件结构特点,研制专用的数字化加工测量一体化工艺工装或装置,而非选用高成本的大型通用机床或加工中心,是实现大型复合材料构件高效、高质、低成本加工最有效的技术途径。

本文共有参考文献11篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)