

碳纤维复合材料 J 型筋条数控加工工艺研究

吴涛

中国航空制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300

[摘要]碳纤维复合材料具有比强度高、比模量高、耐高温、耐腐蚀等特点, 以其优异的力学性能和可加工性, 不仅在航空航天等领域得到了广泛应用, 也逐渐延伸应用至汽车、体育休闲等领域, 对于碳纤维产品的精度要求也越来越高, 因此碳纤维复合材料在数控加工中的需求也逐步提高, 而数控铣削作为现代加工技术的重要手段, 使用正确的数控加工工艺方法对碳纤维复合材料的加工质量具有重要影响。此文旨在研究碳纤维复合材料 J 型筋条数控铣削技术, 分析加工过程中遇到的关键问题, 并提出相应的优化措施, 从而减少碳纤维复合材料的加工缺陷。

[关键词]碳纤维; J 型筋条; 复合材料; 数控加工工艺

DOI: 10.33142/nsr.v2i2.16982

中图分类号: TH13

文献标识码: A

Research on CNC Machining Technology of J-shaped Steel Bars in Carbon Fiber Composite Materials

WU Tao

Composite Materials Technology Center of AVIC Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, 101300, China

Abstract: Carbon fiber composite materials have the characteristics of high specific strength, high specific modulus, high temperature resistance, and corrosion resistance. With their excellent mechanical properties and processability, they have been widely used not only in aerospace and other fields, but also gradually extended to automotive, sports and leisure fields. The precision requirements for carbon fiber products are also increasing. Therefore, the demand for carbon fiber composite materials in CNC machining is gradually increasing. CNC milling, as an important means of modern machining technology, has a significant impact on the processing quality of carbon fiber composite materials by using the correct CNC machining process methods. This article aims to study the CNC milling technology of J-shaped steel bars in carbon fiber composite materials, analyze the key problems encountered during the processing, and propose corresponding optimization measures to reduce the processing defects of carbon fiber composite materials.

Keywords: carbon fiber; J-shaped reinforcing bars; compound material; CNC machining technology

引言

随着新材料技术的发展进步, 新一代飞行器的发展正朝着“轻质化、寿命长、可靠性高、能效高、低成本”的方向发展, 先进复合材料以其轻量化、比强度高、比模量高、耐腐蚀、耐高温等特点在航空航天领域得到广泛应用, 复合材料与钛合金、铝合金、合金钢成为了航空航天领域的四大新型结构材料, 其中复合材料加筋壁板是一种典型的航空航天复合材料连接结构, 应用极其广泛, 具有承载能力优异、结构简单且轻量化、便于整体成型以及刚度符合设计要求等一系列优点^[1], 使得此种材料在航空复合材料领域的应用越来越广泛, 本文主要研究对复合材料加筋壁板制件 J 型筋条的数控加工工艺, 以减少在数控加工过程中所导致出现的分层、脱黏及毛刺等常见缺陷。

1 碳纤维复材制件 J 型筋条结构分析

碳纤维复合材料 J 型筋条 (以下简称 J 型筋条) 是一种常见的结构元件, 主要用于增强结构的整体性能和稳定性, 作为加强筋、支撑结构或连接件, 用于提高结构的承载能力、减少应力集中和防止结构变形。引入 J 型加强筋提高了复材壁板的整体刚度, 复合材料加筋壁板实现了整体成型, 即使用高强度结构胶膜将筋条与蒙皮直接粘接,

采用了 J 型、T 型、 Ω 型等结构设计的加筋壁板, 可较大程度提高加筋壁板结构的抗弯等方面力学性能^[2]。

将 J 型筋分解, 其生产过程为分别铺叠一个 Z 型部分和一个 C 型部分, 再对两个部分进行组合成为一个完整的 J 型筋条组件, 其结构示意图见图 1:

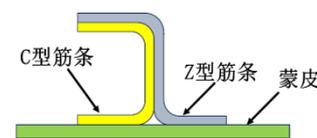


图 1 J 型筋条结构示意图

C 型和 Z 型部分的铺层为 $[-45^\circ/45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ]$, 由单层厚度为 0.125 mm 预浸料铺叠后固化成型, 因此 J 型筋条本质结构为由多层厚度均匀的预浸料铺叠组成的复合材料制件。

近年来, 为便于复材制件装配, 对于复材制件的尺寸精度要求以及表面质量要求越来越高, 在对此种结构进行数控铣削时, 极易出现缺陷。对于碳纤维复合材料来讲, 由于数控铣削所导致的常见缺陷有分层、劈丝、翻边以及阶差等等, 其中分层是最主要的缺陷之一, 它是指相邻层之间的局部分离或附着力不足, 在收到数控刀具的高速铣

削时, 由于受到切削力和切削热的影响, 铺层间出现脱胶或开裂的现象。分层缺陷降低了碳纤维复合材料的压缩强度和刚度, 影响材料结构的完整性, 当存在分层缺陷的碳纤维板材在承受机械和热载荷的条件下, 材料结构中的分层缺陷会发生延伸, 最终导致材料部件失效, 情况严重时会导致材料发生断裂, 是灾难性破坏的前兆^[3]。劈丝和翻边也是碳纤维复合材料的常见缺陷, 指的是由于在刀具对碳纤维进行切削时, 未将碳丝切断, 从而残留下一根或多根残余碳丝, 而残余碳丝往往被刀具挤压或拉扯, 导致碳丝在碳纤维表层出现脱黏的现象, 若未经过妥善处理, 极有可能会发生延伸或扩散, 从而导致出现制件报废。本文通过对 J 型筋条加工刀具、固持方式及工艺参数等多种因素进行调整改善, 有效减少了 J 型筋条加工分层缺陷, 为后续异型筋条数控加工工艺提供了参考。

2 加筋壁板 J 型筋条数控加工工艺方法改善

2.1 刀具选择

碳纤维复合材料的加工刀具与金属加工刀具是具有极大差异的, 这是由于复合材料结构与金属材料结构不同, 从而导致铣削机理的不同。

金属材料在铣削加工时可以认为其本质为一种均匀材料, 而碳纤维复合材料由于是不同方向铺层构成的层合板结构, 造成其不同层数纵向及横向的强度差异极大, 也就是说, 碳纤维复合材料为一种非均匀材料。铣削加工属于减材制造, 在对金属材料进行铣削加工时, 减材时通过数控铣刀对金属材料的塑性变形, 以金属切屑的形式将其剪切下来, 而对于碳纤维复合材料而言, 其由纤维结构组成, 纤维具有硬且脆的特点, 通过纤维的脆性断裂来达到减材效果, 因此其切屑的形式表现为粉末状, 这就要求碳纤维复合材料数控加工刀具相比于金属数控加工刀具需要更加耐磨, 硬度更高, 因此碳纤维复合材料加工刀具需要 CVD 金刚石涂层来提高刀具使用寿命。

从切削热的角度来对碳纤维复合材料和金属材料进行分析, 切削热是由于刀具的高速铣削以及刀具与材料间的摩擦产生的。在对于金属材料进行切削时, 产生的切削热大部分被切削时产生的切屑带走, 并且在金属材料进行切削时可以使用冷却液进行冷却, 而碳纤维复合材料在切削过程中, 由于碳纤维复合材料的导热性较差, 切削热无法有效散出, 另一方面多种碳纤维复合材料在加工中不允许使用冷却液, 以免冷却液通过毛细作用渗入和损坏层间结构, 由此使碳纤维复合材料的切削热问题进一步放大。

综上所述, 在选择碳纤维复合材料加工刀具时应注意以下几点:

(1) 碳纤维复合材料具有高耐磨、硬度高等特点, 刀具应选择带有 CVD 涂层铣刀, 可以提高刀具的耐磨性, 增加刀具使用寿命。

(2) 由于碳纤维复合材料是由多层预浸料铺叠而成,

刀具选择小角度螺旋角切削刀可减小铣削过程中的轴向力, 从而有效减小复合材料之间的分层趋势以及抑制工件上表面的翻边趋势, 可获得良好的侧壁表面质量。

(3) 在对碳纤维进行加工时, 高速切削会产生极高的热量, 而碳纤维材料的导热性极差, 因此刀具应选择较深的排屑槽, 在排除切屑的同时可以最大程度上带走产生的切削热, 避免过高的切削热损坏产品。

(4) 刀具材料应选用超硬材料, 如硬质合金、聚晶金刚石 (Poly Crystalline Diamond, PCD) 等, 而传统碳素工具钢和高速钢材料耐磨性无法达到要求^[4]。

在本文研究中依据上述分析分别选取直径为 10mm, “菠萝刀型复合材料立铣刀”“小螺旋角铣刀”以及“80 目电镀金刚砂磨轮”, 刀具齿形见图 2。

菠萝刀型复合材料立铣刀: 这种刀具的上切、下切菱形刀设计能有效切断纤维材料。同时较深的排屑槽在切削加工过程中能够通过切屑的排出带走大量的切削热, 避免碳纤维复合材料机体的损伤。此外, 带金刚石涂层的刀具表面能够提高刀具的耐磨性能, 延长刀具的使用寿命。

小螺旋角铣刀: 为避免铣削时出现纤维的分层、翻边缺陷, 可使用较小螺旋角切削刀的铣刀, 可减小铣削过程中的轴向力, 从而有效减小层合材料之间的分层趋势以及抑制工件上表面的翻边趋势, 可获得良好的侧壁表面质量。

80 目电镀金刚砂磨轮: 金刚砂磨轮在加工时的轴向切削力极小。表面加工质量较好, 同时金刚砂磨轮相较于复合材料加工刀具价格较低, 性价比较高, 有利于批产项目的生产应用。

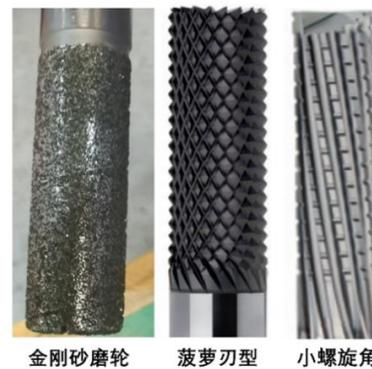


图 2 试验刀具齿形

2.2 固持方式

碳纤维复合材料数控加工常采用真空吸附的固持方式, 此种固持方式装夹及拆卸简便, 不会对产品产生多余物或造成缺陷, 但此种方式也存在一定的局限性, 由于 J 型筋条宽度较窄, 常见的 J 型筋条宽度在 40mm 以下, 若对其采用真空吸附, 力度较小, 无法起到期望的作用, 因此在现阶段 J 型筋条数控加工时, 仅对 J 型筋条下方蒙皮采用真空吸附固定, J 型筋条依靠与蒙皮的胶接力度与筋

条本身刚度来进行固定,在进行高速铣削加工时因刚性不足,刀具与J型筋条减材加工会导致J型筋条出现振颤,从而使产品的被加工表面出现接刀痕且易出现分层缺陷。

为避免因J型筋条刚性不足发生振颤而出现质量缺陷的问题,本文设计了适用于J型筋条通用装夹方法,用以改善J型筋条碳纤维复合材料的加工质量。在设计碳纤维复材加筋壁板类产品数控铣削工装时,针对J型筋条处设计随型芯模夹具,芯模距离尽边尺寸要求1~2mm处,以免加工时刀具伤到芯模,芯模填充在J型筋条下方并予以固定,降低振颤以改善加工质量,装夹改善方式见图3:

2.3 加工试验工艺方法

为全面考虑影响J型筋条复合材料加工质量的生产因素,本文加工试验采用正交试验法,从主轴转速、进给速度两个维度进行验证,通过产品加工质量方面考量,确定最优工艺参数。

根据J型筋条成型工艺决定,J型筋条在成型后,相较于尽边尺寸留有1~2mm工艺余量,但余量无法确定,因此在加工试验时刀具由距离尽边尺寸2mm处开始切削,采用进给量0.5mm分层加工的方式执行数控程序。因余

量较小,进给量调整空间较小,因此进给量不作为本次试验验证因素,转速以2000rad为单位、进给速度以200mm/min为单位进行递增。

由表1可以看出,在对J型筋条进行高速切削时,在选定的试验参数内,主轴转速越高,筋条表面质量越好,这是因为主轴转速增大后,切削区材料剪切角增大,铣削过程中剪切面减小,铣刀切削阻力减小^[5],但当试验设备将主轴转速提高至16000rad/min时,主轴负载明显提高且发出异响,因此未在继续提高转速进行试验。

进给速度越快,表面质量提高,这是因为进给速度与切削力之间呈负相关,即进给速度增大后,切削变形系数减小,材料在高速切削状态下来不及变形,刀具与切屑间的摩擦系数减小,在切削过程中实际产生的切削力会变小,而且径向力降低更为明显^[5]。但在达到800mm/min时,表面质量反而降低,出现明显阶差,但在提高随型芯模的夹紧力度后,阶差消失,因此判断为随着进给速度增加,导致随型芯模的夹紧力不足以固定J型筋条,由此发生振颤导致,因此后期可继续改善随型芯模的夹具设计,以此提高加工效率。

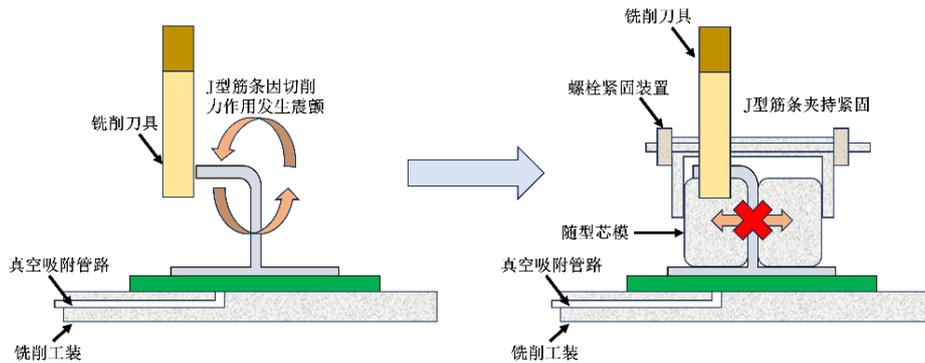


图3 J型筋条装夹改善方式示意图

表1 J型筋条工艺参数验证

主轴转速 S (rad/min)		10000	12000	14000	16000
进给速度 F (mm/min)					
200	表面质量	存在毛刺及劈丝	存在毛刺及劈丝	存在毛刺及劈丝	存在毛刺及劈丝
		存在分层	存在分层	无分层	无分层
		存在阶差	无阶差	无阶差	无阶差
400	表面质量	存在毛刺及劈丝	存在毛刺及劈丝	存在毛刺及劈丝	无毛刺及劈丝
		存在分层	存在分层	无分层	无分层
		无阶差	无阶差	无阶差	无阶差
600	表面质量	存在毛刺/分层	存在毛刺	无毛刺及劈丝	无毛刺及劈丝
		无分层	无分层	无分层	无分层
		无阶差	无阶差	无阶差	无阶差
800	表面质量	存在毛刺	无毛刺及劈丝	无毛刺及劈丝	无毛刺及劈丝
		无分层	无分层	无分层	无分层
		存在阶差	存在阶差	存在阶差	存在阶差

3 结语

本文基于碳纤维复合材料J型筋条在数控加工中所产生的分层、阶差及劈丝等缺陷,从数控加工的刀具选择、固持方式以及工艺参数设计等多方面进行分析研究,取得了诸多有意义的成果,可为后续异型筋条的数控加工提供了参考。

复合材料随着科技发展应用越来越广泛,对于型面要求、尺寸精度以及表面质量的要求也越来越高,不仅应加强对碳纤维制件的数控加工工艺研究,也应加强对于蜂窝芯材数控加工工艺的研究,蜂窝材料的特殊结构和力学性能,使得其数控加工过程变得非常困难^[6],相较于碳纤维材料的加工更有难度,如何在复合材料发展日新月异的今天,充分利用数控技术推动复合材料的发展成为新的研究方向。

[参考文献]

[1]李吻,李勇,还大军.Z-pin 增强复合材料帽型加筋壁板接

头拉伸性能[J].航空学报,2016,37(6):2003-2012[Z].

[2]刘文,古武,崔博,等.复合材料 J 型加筋壁板制造技术研究[J].航空制造技术,2017(16):70-74.

[3]魏莹莹,安庆龙,蔡晓江,等.碳纤维复合材料超声扫描分层检测及评价方法[J].航空学报,2016,37(11):3512-3519.

[4]申翔宇.碳纤维壁板结构倒角边数控铣削刀具试验[J].现代制造技术与装备,2024,60(12):186-188.

[5]寇凡.航空碳纤维增强树脂基复合材料铣削加工工艺参数优化[D].陕西:西安工业大学,2022.

[6]王宏涛.五轴数控机床加工芳纶纸蜂窝薄层区域的工艺改进分析[J].中国机械,2024(36):61-64.

作者简介:吴涛(1994.7—),男,专业:复合材料数控加工,职称:工程师,籍贯:北京。