

碳纤维复合材料柱型舱段窗口数控加工方法

孙艳杰¹ 董波² 蒋文革² 李兰柱² 丁江民¹

(1 大连交通大学机械工程学院,大连 116028)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 使用碳纤维复合材料构件数控高速钻磨机床,对 T300/AG80 碳纤维复合材料柱型舱段构件方形窗口特征数控加工方法进行了研究。根据结构件材料特性和形状特点,得出了主轴转速 6 000 ~ 18 000 r/min、进给速率 5 ~ 25 mm/min 适用于柱型舱段方形窗口数控加工的优化参数和程序,实现了碳纤维复合材料柱型舱段窗口的数控加工。

关键词 碳纤维复合材料,柱型舱段,方形窗口,数控加工

NC Machining Method for CFRP Window of Cylindrical Module

Sun Yanjie¹ Dong Bo² Jiang Wenge² Li Lanzhu² Ding Jiangmin¹

(1 College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract This article studies the CNC machining methods of square window of T300/AG80 carbon fiber cylindrical composite, with the high-speed drilling and grinding CNC machine tools for carbon fiber reinforced plastics. According to structure and characteristics of the material properties, optimized process parameters and CNC programs for processing the square cylindrical module are obtained with spindle speed of 6 000 to 18 000 r/min and feed rate of 5 to 25 mm/min, which makes the realization of the automatic processing of the columnar module window of CFRP.

Key words CFRP, Columnar module, Square window, NC process

0 引言

碳纤维复合材料是典型的难加工材料^[1]。目前对碳纤维复合材料的绝大部分研究主要集中在结构件的设计、成型及性能测试等方面,有关碳纤维复合材料构件的二次加工理论、自动化加工制造技术及表面质量评价标准方面的研究较少,并且,由于应用领域的特殊性,国内外相关技术研究进展的报道更少^[2]。我国在碳纤维复合材料加工制造领域的研究起步较晚,目前仍处于手工操作结合机床加工的半自动化状态。本文通过复合材料构件数控高速钻磨机床,对 T300/AG80 碳纤维复合材料柱型舱段方形窗口进行数控加工研究。

1 数控加工方案

1.1 结构件状态及加工特征

碳纤维复合材料结构件为圆柱形回转体壳段,上、下端框采用与圆柱段共固化一体成型,壳体直径 650 mm,高度为 500 mm,圆柱壁厚 3 mm,端框厚 7

mm。材料为国产 T300/AG80,母线方向铺层角度为 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_5/\pm 45^\circ$,单层无纬布厚 0.15 mm,纤维体积分数 $(60\pm 5)\%$ 。

碳纤维复合材料柱型舱段待加工特征为圆柱面方形窗口,位置处于圆柱段的中部,窗口尺寸为 100 mm×80 mm(弦长×高),窗口圆角 R10,尺寸公差均为 ± 0.5 mm,窗口壁厚 3 mm,窗口特征边均为径向。

1.2 材料特性

T300/AG80 基本性能参数见表 1。

表 1 T300/AG80 复合材料的性能

Tab.1 Mechanical properties of T300/AG80 CFRP material

拉伸强度	拉伸模量	比强度	比模量	密度
/GP a	/GP a	$/10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	$/10^7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	$/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1.47	137	1.01	9.47	1.45

1.3 产品质量要求

超声波无损探伤,分层缺陷面积不大于产品可探

收稿日期:2010-10-19

作者简介:孙艳杰,1981 年出生,硕士,主要从事碳纤维复合材料加工研究。E-mail:yanjie20@126.com

面积 1% ,疏松、夹杂等缺陷面积不大于产品可探面积的 2% ,单个最大分层缺陷 5 cm^2 ,孔隙率 <math>< 2\%</math> 。

1.4 加工机床及刀具

z 轴滑板选用碳纤维复合材料构件加工专用的数控高速钻磨机床(图 1),它是回转式、高速、高回转精度、进给量无级可调、能够实现三轴随动的数控机床。机床主要由底座、回转工作台、立柱、滑枕四大部件组成,采用西门子 Sinumerik 802D 数控操作系统。底座和立柱是数控高速钻磨机床的基础部分,直线导轨通过与丝杠的配合完成 z 轴方向的移动及精确定位,滑枕通过直线导轨与丝杠配合完成 y 轴方向的移动及精确定位,回转工作台在伺服电机的带动下实现自身的旋转及精度定位。



图 1 碳纤维复合材料数控高速钻磨机床

Fig. 1 High-speed drilling and grinding CNC machine tools for CFRP

碳纤维复合材料柱型舱段窗口加工刀具采用金刚石套料钻头,刀具直径 8 mm,磨料为 80[#],磨料层为聚晶金刚石(PCD),结合剂为电镀金属结合剂。为便于排屑,减少磨屑堵塞磨料层,刀具中空,前端开有对称凹槽,刀杆采用高强度合金,以保证刀具刚度,最大程度降低加工中产生的变形和振动,保证加工质量。

1.5 数控加工方案及流程

根据对结构件的加工特征分析和机床自身的固有特性,以尽可能减小缺陷出现的可能性和避免不确定因素对加工产生影响为原则,进行磨削加工装置初步参数确定,加工中观察加工质量和构件磨削状态,并以电主轴输出电流值为参考,观察加工过程中是否有异常现象。碳纤维复合材料构件加工前,进行外观检查,观察是否有明显的缺陷或成型质量问题,并用超声波探伤仪进行内部缺陷探伤;加工后再次进行上述过程,对比探伤结果,检查窗口加工后是否出现新增缺陷。加工采用无垫板钻孔方式,直接用钻头在复合材料构件上加工,构件背面不采取预顶紧措施。为避免切削液对碳纤维复合材料性能的不良影响,加工中采用干式切削方法,用吸尘器吸出。

碳纤维复合材料柱型舱段窗口加工流程见图 2。

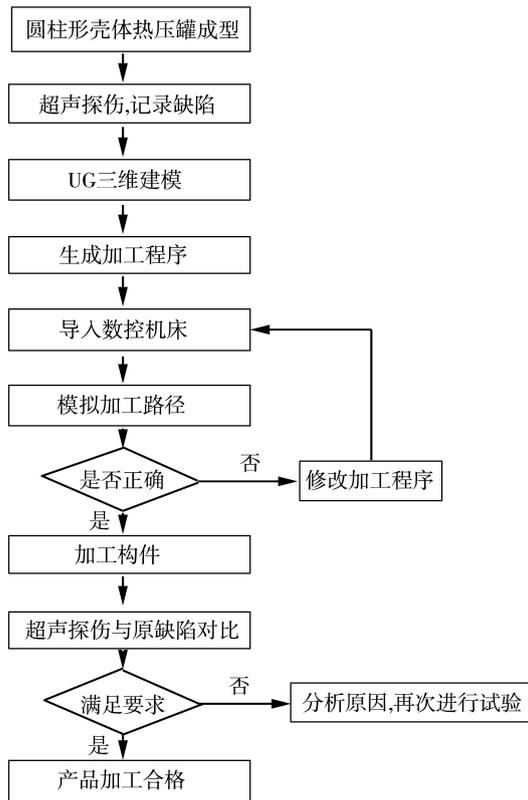


图 2 碳纤维复合材料柱型舱段窗口加工方案及流程

Fig. 2 Process plan and scheme for CFRP

2 柱型舱段窗口数控加工方法

2.1 UG 加工模型

利用三维建模软件 UG 建立碳纤维复合材料柱型舱段及窗口加工模型(图 3)。利用 UG 数控加工功能,实现数控加工中矩形窗口的数控模拟加工,生成加工轨迹(图 4),并使用 UG 后处理功能进行程序生成,通过传输软件导入数控机床中,并应用于实际生产。

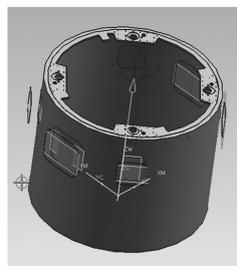


图 3 柱型舱段窗口加工模型

Fig. 3 Processing model for window of columnar module

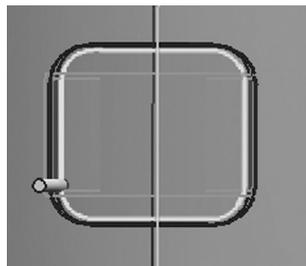


图 4 柱型舱段窗口刀具加工轨迹

Fig. 4 Cutter path of processing of columnar module window

2.2 加工参数优化选择

在柱型舱段窗口加工前,先进行等厚度、相同铺层角度和加工特征的平板试验件加工试验,以获得不同转速、进给速率下平板试验件加工质量,结果见表2。

表2 T300/AG80 平板试验件加工参数及结果¹⁾

Tab.2 Process parameters and results of T300/AG80 breadboard

主轴转速 / $r \cdot \text{min}^{-1}$	进给速率 / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	加工状态 及效果
6000	5	质量好,噪音小
	10	质量好,噪音小
	15	质量好,噪音中
	20	质量差,噪音大,发热严重
9000	10	质量好,噪音小
	15	质量好,噪音中
	20	质量差,噪音大,有振动
	25	噪音大,发热严重,振动较大
12000	10	质量好,噪音小
	15	质量好,噪音小
	20	质量好,噪音中
	25	质量差,噪音大,有振动
15000	10	质量好,噪音小
	15	质量好,噪音小
	20	质量好,噪音中
	25	质量一般,噪音大,有振动
18000	10	质量差,噪音大,有振动
	15	质量差,噪音大,有振动
	20	质量差,噪音大,振动较大
	25	质量差,噪音大,振动很大

注:1) 吃刀量为0.8~1.0 mm;质量指的是窗口特征边缘加工质量,评判标准为是否有毛刺、分层或撕裂等缺陷;噪音指的是刀具与试验件加工时摩擦产生的声音;振动指的是加工中试验件和刀具主轴产生的振动。

从平板试验件加工中可知,主轴转速增高,引起振动对加工质量有较大的影响,针对不同主轴转速给出如下合理进给速率:

- (1) 主轴转速 n 为 6 000 ~ 9 000 r/min, 进给速率 $v < 10$ mm/min;
- (2) 主轴转速 n 为 9 000 ~ 12 000 r/min, 进给速率 $v < 15$ mm/min;
- (3) 主轴转速 n 为 12 000 ~ 15 000 r/min, 进给速率 $v < 20$ mm/min。

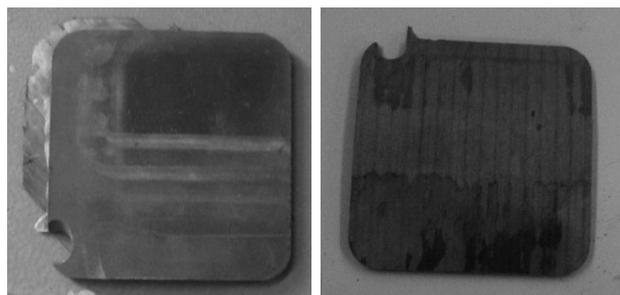
另外,若 $n < 6 000$ r/min, 不推荐使用,加工效率太低;而 $n > 15 000$ r/min 时,主轴产生较大的振动,影响了产品加工质量,不适合本复合材料构件数控高速钻磨机床加工。

2.3 矩形窗口特征加工

平板试验件与柱型舱段同炉成型,被加工的窗口特征除外形有弧面和平面区分外,其他所有参数、性能、尺寸等均与柱型舱段窗口完全一致。若以磨削进给量 1 mm 计算,加工长 100 mm (弧长 100.399 mm)

的窗口,内外弧长只相差 0.3 mm,此值相对于进给速率可以忽略,而不管弧面还是平面,加工中刀具始终与被加工面垂直,两种构件加工中的受力状态和区域一致,弧面微小加工段与平面微小加工段除机床部件动作不同外本质上完全一样。平板试验件加工亦使用数控高速钻磨机床,加工时,碳纤维复合材料平板使用夹具将加工特征四周完全固定在回转工作台上,保证了试验件的刚度,最大限度降低试验件加工中产生的变形和振动。柱型舱段窗口加工中,舱段也是通过夹具固连在回转工作台上,由于柱型舱段自身刚度和连接都很强,可认为其被加工的窗口特征周围具有平板试验件等同的大刚度,两种构件加工中力和振动的传递特性基本是一致的,故将平板试验件得出的加工参数应用于柱型舱段窗口加工是合理的。

根据平板试验件试验结果,同时提高加工效率,碳纤维复合材料柱型舱段窗口数控加工参数最终确定为:金刚石套料钻头直径规格 $D = 8$ mm,机床主轴转速 12 000 ~ 15 000 r/min,磨削加工进给速率 10 ~ 20 mm/min,厚度方向每次进给量 0.8 ~ 1.0 mm。加工中根据工件的厚度进行加工次数调整,本特征在加工程序中给定 4 次进给 ($0.8 + 0.8 + 0.8 + 0.7 = 3.1$ mm)。由于最后一刀进给速率和吃刀量会大大影响加工质量,故最后一刀进给速率应适量放缓 (10 ~ 15 mm/min),吃刀量应减小,避免加工边缘出现大量毛刺、撕裂和劈裂现象,见图5。



(a) 加工参数不合理 (b) 加工参数合理

图5 加工参数选择对加工质量的影响

Fig.5 Effect of process parameters on machining quality

复合材料柱型舱段放在数控机床回转工作台上,进行找正并固定,利用回转工作台的旋转来实现窗口加工,并且加工时采用“浅切深大进给”的切削方式进行加工^[3],在加工过程中调整加工进给参数,柱型舱段窗口数控加工过程及结果见图6,经外观检查及超声波探伤对比,本次数控加工没有出现撕裂、劈裂、分层等缺陷,超声波探伤后无新增缺陷,加工质量满足要求。同时,对高模量碳纤维(M40J)复合材料进行了相关试验,效果也很好。

由于不同树脂、不同角度铺层、不同厚度、不同加

工曲面和特征的复合材料构件,在使用不同直径的刀具时其加工参数均有所不同,应根据结构件材料特性

和形状特点,选择优化加工参数。

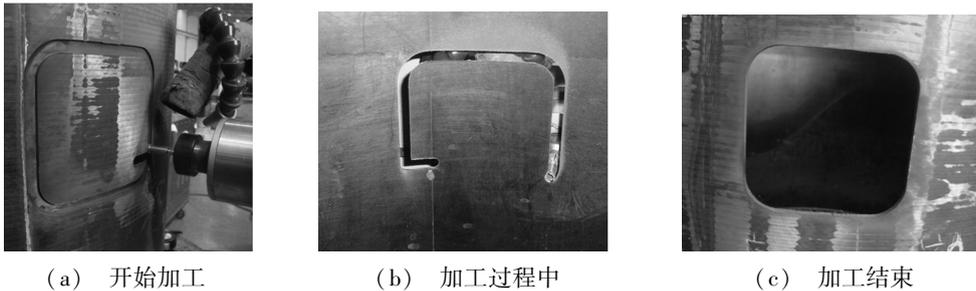


图6 碳纤维复合材料柱型舱段窗口数控加工过程

Fig.6 Progress of NC machining of columnar module window of CFRP

3 结论

实现了使用金刚石套料刀具对 T300/AG80 碳纤维复合材料柱型舱段方形窗口的数控加工,并通过平板试验件对加工参数和加工程序进行优化。根据结构件材料特性和形状特点,得出了主轴转速 6 000 ~ 18 000 r/min、进给速率 5 ~ 25 mm/min 适用于柱型舱段方形窗口数控加工的优化参数和程序。并选用主轴转速 12 000 ~ 15 000 r/min、加工进给速率 10 ~ 20 mm/min、进给量 0.8 ~ 1.0 mm 对碳纤维复合材料柱型舱段构件方形窗口特征进行数控加工,产品质量、

加工效率得到显著提高。

参考文献

- [1] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003
- [2] 张厚江,樊锐,陈五一,等. 高速钻削碳纤维复合材料钻削力的研究[J]. 航空制造技术,2006(12):76-79
- [3] 康永峰. 碳纤维复合材料回转壳体数控加工技术研究[D]. 大连理工大学,2008:16-19

(编辑 李洪泉)

(上接第 45 页)

[4] Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors; an overview [J]. Compos. Sci. Technol., 2004, 64: 155-170

[5] Tang S F, Deng J Y, Wang S J, et al. Fabrication and characterization of an ultra-high-temperature carbon fiber-reinforced ZrB₂ - SiC matrix composite [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2007, 90(10): 3320-3322

[6] Tong C Q, Cheng L F, Liu Y S, et al. Microstructure and mechanical properties of 2D C/SiC composites fabricated by CVI combining with slurry infiltration [J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(3): 317-322

[7] 王建方. 碳纤维在 PIP 工艺制备陶瓷基复合材料过程中的损伤机理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003

[8] Lee S H, Sakka Y. Dispersion behavior of ZrB₂ powder in aqueous solution [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2007, 90(11): 3455-3459

[9] Tong C Q, Cheng L F, Yin X W, et al. Oxidation behavior of 2D C/SiC composite modified by SiB₄ particles in inter-bundle pores [J]. Compos. Sci. Technol., 2008, 68(3/4): 602-607

[10] Takeda M, Kagawa Y, Mintsuno S, et al. Strength of a hi-nicalonTM/ silicon-carbide-matrix composite fabricated by the multiple polymer infiltration-pyrolysis process [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1999, 82(6): 1579-1581

[11] 王建方,陈朝辉,郑文伟,等. C_v/SiC 制备过程中纤维热应力损伤研究[J]. 复合材料学报,2001,18(4):68-71

(编辑 李洪泉)