

# 碳纤维增强树脂基复合材料壳体 相贯线孔加工工艺

张 鹏 孙艳杰 王保林 赵 振 李兰柱

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 介绍一种用于碳纤维复合材料大直径不垂直相贯线孔加工方法。综合考虑了加工温度,加工质量,排屑及加工效率等问题。结果表明,采用一种简易的加工工装保证了孔的尺寸及位置精度,使相贯线孔能够一次性加工完成。通过对传统磨头的工艺改进解决了排屑及散热问题,并提高了复合材料的表面加工质量。

**关键词** 复合材料,相贯线孔,加工工艺,工艺改进

中图分类号:TH16,TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.018

## Machining Process of Intersecting Line Hole of Carbon Fiber

ZHANG Peng SUN Yanjie WANG Baolin ZHAO Zhen LI Lanzhu

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

**Abstract** A machining method of the large diameter and non-orthogonal intersecting lines of holes of carbon fiber composite materials is introduced in this paper. The problem of process temperature, machining quality, chip removing and processing efficiency are considered. The size and position accuracy of the hole are guaranteed by an easy mechanical devices, which make the intersecting lines of holes can be produced in one operation. The problem of chip removing and heat dissipation is solved by the improvement of the traditional diamond grain, and the quality of the machined surface of the composites is greatly improved.

**Key words** Composite, Intersecting lines, Processing technology, Process optimization

### 0 引言

碳纤维复合材料硬度高、各向异性且层间强度低,容易出现分层、撕裂等加工缺陷,是典型的难加工材料<sup>[1]</sup>。随着复合材料的广泛应用,对其结构尺寸提出了更高的要求,一些特殊结构及尺寸的加工已成为了碳纤维复合材料推广应用的瓶颈。

为满足某些特殊的使用要求,碳纤维复合材料壳体需加工不同直径、不同方向的相贯线孔。对于大直径,不垂直的相贯线孔尚无成熟的加工工艺方案。传统方案往往通过刀具靠模,按模具的轮廓线将此类相贯线孔加工完成。但加工质量差,效率低,且相贯线与轴线角度难以保证。利用数控设备,通过刀具按相

贯线孔轮廓进刀的方式能够保证开孔的结构尺寸,但对于不垂直的相贯线孔需要一台至少5轴的数控机床,将加工余料一层一层的剥离。数控设备成本较高、加工碳纤维复合材料需有专业的除尘设备防止碳纤维粉尘对机床造成损伤。

本文介绍了一种实用的碳纤维复合材料大直径、不垂直的相贯线孔加工方法。并介绍了该方法所需的工装结构及加工刀具。通过实际生产验证,该方法能够将碳纤维复合材料相贯线孔一次性加工完毕,无分层和毛刺等缺陷。

### 1 待加工件特征及加工方案

#### 1.1 待加工件特征

收稿日期:2014-05-22

基金项目:高档数控机床与基础制造装备科技重大课题;2012ZX04003-031

作者简介:张鹏,1984年出生,硕士,主要从事复合材料加工、装配、虚拟制造等方面的研究。E-mail:zhangpeng@emails.bjut.edu.cn

壳体材料是树脂基碳纤维增强复合材料(MT300),壳体厚度8 mm,相贯线孔轴线与壳体轴线夹角 $40^\circ$ ,孔径 $\varphi 80$  mm,要求加工后不能产生分层、撕裂等缺陷,且孔出口处不允许有毛边。

## 1.2 加工方案

对于上述有特殊结构、尺寸特征的加工通常采用与复合材料尺寸结构一致的样板固定在产品表面,作者按照样板轮廓用电磨或其他工具将碳纤维复合材料去除的方法<sup>[2]</sup>。该加工方法对操作者的操作技能要求较高,尺寸精度难以保证,且经常产生各种各样的加工缺陷,在相贯线轮廓加工中,尺寸精度难以保证且出孔处经常有毛边产生。

为防止复合材料相贯线孔加工过程中出现分层等缺陷,并提高加工效率,若能使加工刀具沿相贯线轴线进刀,尽可能减少轴向力,并一次性将相贯线轮廓加工完毕,则成为了碳纤维复合材料相贯线孔加工的理想方案。见图1所示。

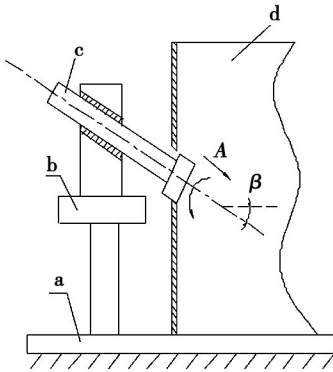


图1 大直径相贯线孔加工原理图

Fig1 Large-diameter Intersection line cutting schematic diagram

a为工作平台,b为刀具定位夹紧机构,c为加工刀具,d为待加工工件。

通过将刀具夹紧机构b与工件d固定在同一工作平台上,从而确定刀具夹紧机构b与工件d的相对位置,通过刀具夹紧机构b保证刀具c的位置及刀具轴线与工件的夹角 $\beta$ 。刀具沿着A向运动,并以一定的角速度自转,直到将加工余量去除。

## 2 结果与讨论

### 2.1 加工刀具

在复合材料加工质量方面,减少加工过程中轴向力能有效避免分层等缺陷<sup>[4]</sup>。电镀金刚石刀具是近年来发展迅速的一种碳纤维复合材料专用加工刀具。电镀金刚石刀具切削原理和普通的钻头不同,电镀金刚石刀具钻孔的实质是“以磨代钻”,加工过程中每一个磨粒的运动轨迹是螺旋线。刀具端面和侧面上的磨粒为主切削部分,这些磨粒大多数是负前角,一个具有很大负前角的切削刃以很高的速度切入复合宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第6期

材料表面,磨粒切削刃和纤维之间产生摩擦、挤压作用,并克服纤维和基体的弹性变形阻力形成切屑<sup>[3]</sup>,见图2。此加工方法能够大大减少轴向力,在大孔径加工方面有很好的效果。电镀金刚石刀具的加工已在国内外有多篇学术论文发表,在纤维角度、电镀金刚石刀具结构、刀具的轴向力及磨削工艺参数方面进行了详细论述,本文不再详细论述<sup>[5]</sup>。

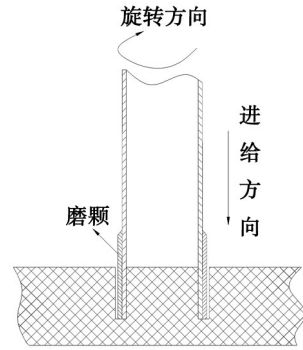


图2 套料磨头加工原理图

Fig.2 Skeleton drawing super-hard abrasive tool processing

在设计用于大直径、大厚度碳纤维复合材料相贯线孔加工的金刚石磨料刀具上,主要还需具备以下4点原则。

(1)最小接触面积原则:采用无中心的套料方式能够有效地降低轴向切削力,工具与被加工材料的接触面积越小,则轴向力也越小,因此设计刀具时应尽可能增大环形套料工具的内径,即减小套料磨头的壁厚。

(2)最少有效磨粒数原则,对于相贯线孔加工而言,端面的金刚石颗粒作为主切削刃,侧面的金刚石颗粒作为辅助切削刃。在保证切削顺利进行的情况下,端面上最少的金刚石颗粒个数称为最少有效磨粒数。而加工相贯线孔的电镀金刚石磨头既要满足第1条尽量减少磨头的壁厚,同时又要适当增加壁厚,以保证在端面的每个横截面上存在的金刚石颗粒大于最少有效磨粒数量。

(3)均匀磨损原则,在相贯线孔加工时的均匀磨损原则主要是指前端面金刚石颗粒的均匀磨损,即金刚石颗粒高度方向的磨损一致,以达到磨头的最长使用寿命。一旦有个别直径尺寸的颗粒磨损严重即使其余直径尺寸的金刚石颗粒未磨损也无法继续加工。

(4)容屑、排屑原则,几乎所有的切削刀具都要考虑排屑问题,在碳纤维复合材料加工粉尘和树脂容易附着在磨头上产生二次切削就更更要考虑排屑的顺畅和容屑的能力,因此需在刀具的前端面上设计排屑槽;此外还需要考虑磨料参数选择。根据以上4点原则,本文设计的大直径、大厚度相贯线孔加工刀具及

整个加工装置见图3所示。

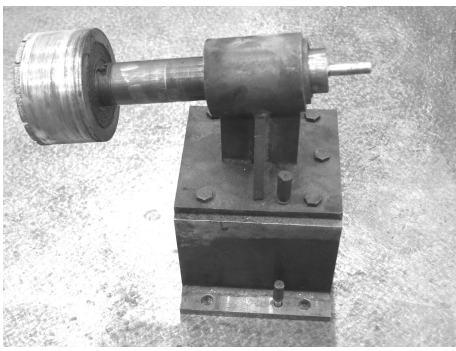


图3 加工装置照片

Fig. 3 Photo of processing unit

## 2.2 加工过程

按加工方案中的设想,为使操作简单,刀具尾部设计成可用手电钻夹持,由手电钻提供动力。加工过程见图4,由于相贯线孔径较大,使磨头的线速度较高,因此在大直径相贯线加工过程中,大都未产生加工缺陷,这也跟碳纤维复合材料高速钻孔能够提高加工质量的结论一致。

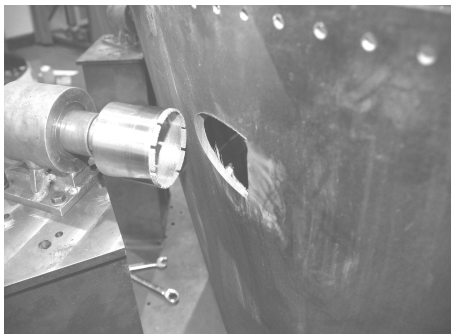


图4 加工过程图片

Fig. 4 Manufacturing operation

## 2.3 加工结果

通过该装置施加与水平方向成 $\beta$ 角的轴向力,利用电镀金刚石磨头的金刚石颗粒将碳纤维余料一次性去除,能够完成碳纤维复合材料大直径不垂直相贯线孔的加工。孔的位置精度,尺寸精度通过工装保证,使整个加工一次性完成,操作简单且效率较高。

复合材料加工与金属加工不同,因碳纤维复合材料的树脂具有吸水性,复合材料加工过程中往往不添加冷却液。而MT300复合材料的使用温度不超过 $180^{\circ}\text{C}$ 。为保证复合材料的性能同时防止加工过程中由于温度过高而产生烧糊或隆起等现象。复合材料加工需控制切削区温度。磨削是产热量较高的加工工艺,试验表明在同样的加工工艺参数下 $\beta$ 角对加工区温度影响不大,在相贯线直径小于 $\varphi 50\text{ mm}$ 时,加工区温度基本一致,但当相贯线直径大于 $\varphi 50\text{ mm}$ 时,加工区温度随直径的增大略有上升,加工深度则是影响加工区温度的最主要因素,当加工深度超过

10 mm时,加工区温度超过复合材料使用温度。用激光测温仪测得加工区温度随加工深度变化见图5。

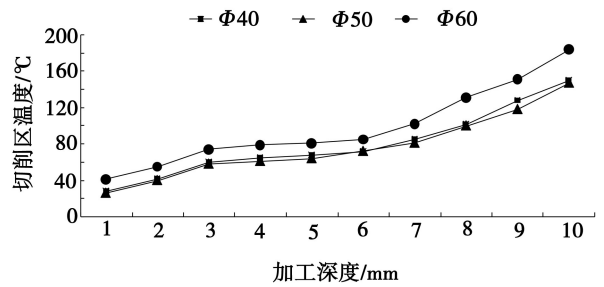


图5 加工区温度随加工深度变化曲线

Fig. 5 Cutting temperature variation curve

从图5中可以看出,当切削深度达到10 mm时,加工区温度超过 $180^{\circ}\text{C}$ ,需停止加工。也就是说采用上述的工艺方法和加工刀具只能加工厚度在10 mm以内的相贯线孔加工。若需加工厚度超过10 mm的相贯线孔,则需退刀待刀具和加工区温度冷却后再进行加工。

此外,试验还表明相贯线孔表面粗糙度主要与金刚石颗粒目数有关,目数越多即金刚石颗粒越细表面加工质量越高,但金刚石颗粒越细加工效率越低。金刚石颗粒目数还影响相贯线出口处的毛边,金刚石颗粒目数较大容易使出孔处形成毛边。图6为相贯线孔出孔毛边照片。

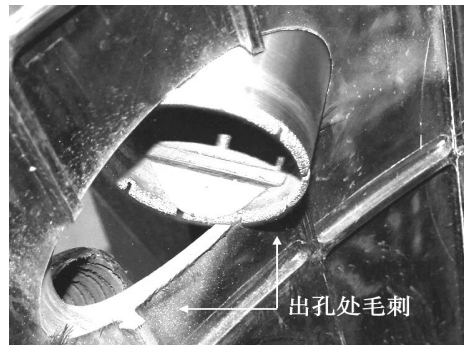


图6 出孔处毛刺照片

Fig. 6 Burr at the hole of carbon fiber

## 2.4 改进措施

通过上述装置虽然能够完成碳纤维复合材料相贯线孔的加工。但出孔处毛刺较多,复合材料表面加工质量不高,碳纤维复合材料热导率低,加工过程中产生的切削热无法及时传递出去。磨头加工时,碳纤维容易附着在金刚石颗粒表面,产生二次切削,影响复合材料表面加工质量且降低刀具使用寿命。在大直径,大厚度的相贯线孔加工中,由于切屑较多,上述问题则更为严重。对于传统的金属加工往往通过添加冷却润滑降低切削温度,同时带走多余的切屑。在复合材料加工过程中,冷却润滑液渗入碳纤维复合材料中产生湿热膨胀,由于纤维和树脂的膨胀系数不

表1 自风冷加工刀具仿真结果

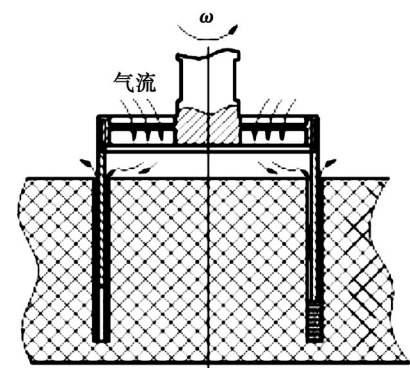
Tab.1 Simulation result of "self-ventilated" cutting tool

叶片数量	叶片倾角/(°)	出口流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	出口速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
8	50	0.623	12.51
	40	0.610	11.89
6	30	1.230	36.90

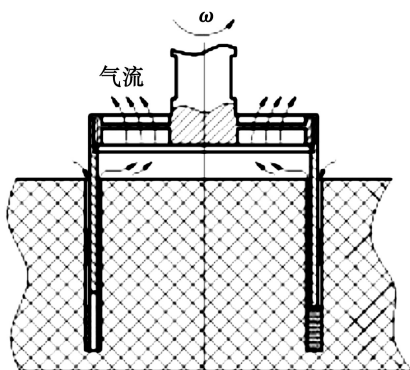
同,很容易产生复合材料分层,因此复合材料磨削均为干式磨削。在大厚度、大直径孔壳体孔加工时为防止切削温度过高,只能一次完成 10 mm 以内的复合材料相贯线孔加工。

为提高加工深度,需从刀具本身着手,在冷却和排屑方面对刀具进行改进。本文设计了一种新型的自风冷加工刀具,同时解决了冷却和排屑两大问题,见图 7。该刀具的上端面为带有叶片的叶轮,叶轮由二片以上有一定角度的叶片组成;叶片的形状是平面或曲面,倾斜角度根据向外排气或向内吸气不同采用顺时针或逆时针方向。在切削部分端面带有二个以上的排屑槽。刀具旋转带动叶轮旋转通过排风或吸气的方式将切屑排出,同时将集聚在加工区的热量带走。为保证排风的速度和出口流量对不同叶轮数量、角度的出口风力进行了仿真计算,边界条件定义为叶片转速 5 kr/min,刀具直径  $\varphi 50$  mm,叶片厚度 1.5 mm。进口边界条件为静压 0.1 MPa,出口边界条件为静压 99 kPa。见图 8,仿真结果见表 1。

自风冷刀具加工时,气流可通过刀具外侧壁和孔壁之间进入加工区域,并在刀具内部和外界之间形成循环。将加工区域的切屑带走,从而减少了切屑与刀具及树脂基体之间的摩擦,降低了切削区域的温度和刀具的磨损。



(a) 向外排风方式



(b) 向内吸气方式

图7 自风冷加工刀具加工原理图

Fig.7 Skeleton drawing of "self-ventilated" cutting tool

此外,针对金刚石颗粒目数大,效率低质量好,目数小效率高质量差的矛盾上。可在刀具端面和侧面分别镀两种不同大小的金刚石颗粒,并将原有的圆柱形磨头改为略有锥角的倒锥形,在刀具端面镀颗粒较粗,目数较低的金金刚石,保证加工效率,在侧面镀颗粒较细,目数较高的金刚石,保证表面加工质量和加工精度。使相贯线斜孔先由端面粗金刚石颗粒加工一次后经侧面细金刚石颗粒加工完成。同时保证了复合材料表面加工质量和加工效率。

采用带锥角并镀不同颗粒大小的金刚石磨头加工原理见图 9。在刀具钻入复合材料时与普通的磨料刀具相同,由扭矩产生的沿线速度方向的剪切力,会使复合材料表层在无约束的条件下可能产生一些毛刺、或表层的分层。而未切削部分承载能力强,故由轴向力而引起的缺陷较少。

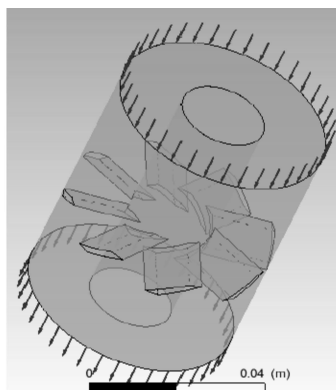


图8 自风冷刀具出口风力仿真

Fig.8 Emulation of exiting wind power

随着加工的继续,圆锥部分金刚石颗粒即较细金刚石颗粒参与磨削并进行扩孔。与复合材料作用时,形成垂直母线的力  $F$ ,并产生垂直分力和水平分力,水平分力由于锥度较小可忽略,而垂直分力可减少孔入口处纤维被拉起和分层的缺陷。在扩孔的同时,由于加工余量小,且金刚石颗粒较细,易于形成较好的加工表面。

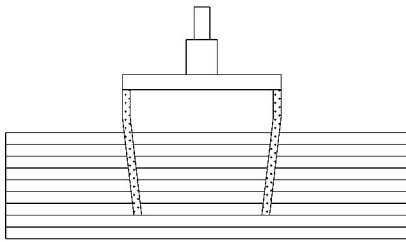


图9 带锥度金刚石磨头加工示意

Fig 9 Drilling model by new-type abrasive drill

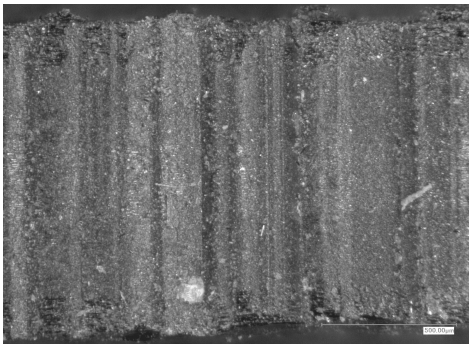
当加工至出口时,未切削部分变薄,承载能力下降,在轴向力的作用下容易产生分层等缺陷。但锥段通过出口时,相当于采用小余量的多次切削的方法将余量去除。所以最初的缺陷会随着锥段的深入被剔除,孔出口处质量较好。

试验发现,采用带锥段并镀不同金刚石颗粒的磨头,并在上端面安装叶片后,加工壳体厚度可达到 20 mm,一次性完成,且不会产生烧糊等现象。复合材料表面加工质量良好,出孔处无毛刺现象,见图 10,扫描电镜见图 11。

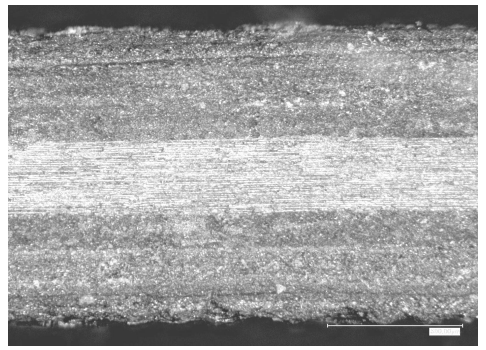


图10 相贯线孔照片

Fig. 10 Photo of intersection lines



(a) 改进前扫描电镜照片



(b) 改进后扫描电镜照片

图11 孔边显微照片对比

Fig. 11 Micrographs of hole drilled by two drills

### 3 结论

采用该装置及电镀金刚石磨头能够用于碳纤维复合材料大直径不垂直相贯线孔的加工。加工尺寸位置精度较高,操作简单,且整个加工一次性完成,但加工表面质量不高,且散热及排屑困难。通过设计自风冷有排屑功能的金刚石磨头,解决了排屑散热和排屑两大问题。并使一次性加工厚度提升至 15 mm。在切削刃方面通过设计带倾角端面和侧面镀不同大小的金刚石颗粒提高了相贯线孔表面加工质量,表面粗糙度在 2.3 ~ 4.5  $\mu\text{m}$ 。

### 参考文献

- [1] 魏威, 韦红金. 碳纤维复合材料高质量制孔工艺[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1): 115-118
- [2] 李志强, 樊锐, 陈五一, 等. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 航空制造技术, 2003, (12): 34-37
- [3] 鲍永杰, 高航, 董波, 等. C/E 复合材料“以磨代钻”制孔工艺[J]. 宇航材料工艺. 2010, 40(4): 47-49
- [4] 于晓江, 曹增强, 蒋红宇, 等. 碳纤维增强复合材料结构钻削工艺[J]. 航空制造技术, 2010, (15)
- [5] 张鹏, 王保林, 孙艳杰, 等. 复合材料湿法加工工艺[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(4): 68-71

(编辑 任涛)