

# 薄层芳纶复合材料壳体的后加工研究

蒋海滨 魏伯荣

(西北工业大学化学工程系 西安 710072)

李名琦

(汉江机械厂 襄樊 441002)

**文 摘** 针对芳纶复合材料壳体后加工存在的问题,本文采用了通用机械加工和激光加工两种方法,通过优化加工工艺,分析了钻头的几何形状、转速、加工条件(冷却和施加背衬材料)等因素对加工的表面质量及尺寸的稳定性的影响,进而探讨了采用通用机械加工方法需要注意的一些问题,且对比分析了激光加工的特点及其实际应用的条件。

**关键词** 芳纶复合材料,机械加工,激光

## Study on Machining of Thin Aramid Composite Shell

Jiang Haibin Wei Borong

(Dept. of Chem. Eng., Northwestern Polytechnic University Xi'an 710072)

Li Mingqi

(Hanjiang Machinery Plant Xiangfan 441002)

**Abstract** In response to problems with machining of thin aramid composite shell, laser and general machining techniques were investigated. Some issues of general machining were studied by optimizing process of the machining and analyzing factors which affect surface quality and dimension precision, such as geometry shape of drill, rotate speed, machining condition (cooling and addition of backing) and etc. Characteristics of the laser machining and localization of its application were also analyzed in comparison, with the general machining.

**Key words** Aramid composites, Machining, Laser

### 1 前言

复合材料成型后,多数情况下尚须进行一定的后加工,以满足装配、连接等要求,因此后加工是复合材料制品的最后工序。它的好坏直接关系到复合材料制品的质量,因此是一个必须重视的生产工艺环节<sup>[1]</sup>。

复合材料的后加工通常分为常规和特种两类方法<sup>[2]</sup>。而两类方法都或多或少对复合材料造成损

伤,对特定的复合材料制品必须选择合适的加工方法,以保证良好的加工表面质量,且最大限度地减少对复合材料的整体性能的影响。

芳纶复合材料加工的主要问题是:加工表面质量差,有大量的松散绒毛现象<sup>[3]</sup>,特别在复合材料的钻入口和钻出口有纤维拔出和压碎现象。薄层芳纶复合材料壳体的后加工技术是其产品批量生产的关键技术之一,本文研究芳纶复合材料壳体的后加工

收稿日期:2000-10-08;修回日期:2000-11-27

蒋海滨,1971年出生,工程师,主要从事复合材料的研究工作

— 38 —

宇航材料工艺 2002年 第2期

问题,主要通过分析钻头的几何形状、转速、加工条件(冷却和施加背衬材料)等因素对加工的表面质量及尺寸的稳定性的影响,探讨通用加工需要注意的一些问题。同时,对比分析了激光加工的特点和实

际应用的条件。

## 2 实验部分

### 2.1 原材料

实验用纤维织物和树脂分别如表 1、表 2 所示。

表 1 几种纤维织物及性能指标

Tab.1 Properties of different fabrics

织物代号	面密度 /g·m <sup>-2</sup>	厚度 /mm	经、纬纱根数 /根·cm <sup>-1</sup>	织法	原纱规格 /tex	断裂强力/N·cm <sup>-1</sup>	
						径向	纬向
AF-500	170	0.25	5×5	平纹	158	1 025	1 057
GF-200	205	0.20	18×15	平纹	12.5	445	370

表 2 几种树脂体系及性能指标

Tab.2 Properties of different resin systems

树脂体系	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa	延伸率 /%
环氧	1.14	75	3.3	130	3.4	1.5
不饱和聚酯	1.22	50	2.4	80	2.5	1.3
改性乙烯基酯	1.03	72	3.1	115	3.1	9.6

### 2.2 试件的制备

按设计要求裁预浸料,在模具中正交铺层,在热压机上成型,对不同的树脂体系按各自的固化工艺条件执行。

### 2.3 薄层芳纶复合材料壳体的后加工

#### 2.3.1 芳纶复合材料的机械加工

对芳纶复合材料在切割机(自制)上进行切割实验,切割速度为 10 mm/s;在改制的立式钻床上进行钻孔实验。钻孔选择标准高速钢钻头(Φ8 mm)、三点钻(Φ8 mm)、中心点钻(Φ1.8 mm、Φ8 mm、Φ12 mm、Φ24 mm)及芳纶专用钻头(Φ8 mm),其转速为 6 000 r/min,进刀速度为 0.2 mm/r~0.3 mm/r。

试件采用芳纶(7层 AF-500)复合材料,背衬材料用厚度为 0.4 mm 玻璃纤维复合材料(纤维体积分数约为 55%),进行钻孔加工时采用水冷却。

#### 2.3.2 孔的尺寸精度测量

用标准塞规测量孔的最大尺寸  $D_{max}$  和最小尺寸  $D_{min}$ 。

$$\text{平均尺寸误差 } F = (D_{max} - D_{min})/2$$

宇航材料工艺 2002 年 第 2 期

#### 2.3.3 芳纶复合材料的激光加工

运用 NEL-500A 激光切割机(中美合资南京东方激光有限公司制)进行切割、打孔实验。切割速度为 25 mm/s~30 mm/s。孔的尺寸精度的测量方法同 2.3.2 节。

## 3 结果与讨论

### 3.1 后加工对复合材料的损伤

复合材料的后加工(钻孔、切割)会导致复合材料的不同程度的损伤,损伤小可减小复合材料修补带来的质量增加,并减少结构的疲劳强度的损失<sup>[1]</sup>。损伤主要有分层、树脂/纤维劈开、树脂受到热破坏。

后加工后的试件棱边表明<sup>[4]</sup>,绝大多数的机加问题与最外层纤维有关,必须施加一种指向复合材料内部的剪切力,或者在材料外部施加背衬材料才能将纤维剪断。

### 3.2 影响通用机械加工效果的因素

表 3 列出了各种钻头(Φ8 mm)的加工孔的表面质量和尺寸精度。可以看出在指定的工艺条件下,中心点钻的加工效果与芳纶专用钻头的加工效果相

近,能基本满足芳纶薄层复合材料壳体的钻孔要求。

表3 各种钻头加工孔的表面质量和尺寸精度

Tab.3 Surface quality and dimension precision of machining holes with different drills

钻头的种类	材料	孔的表面质量	尺寸平均误差/mm
标准钻头	W <sub>18</sub> Cr <sub>4</sub> V	表面粗糙,出口有少量分层	0.12
三点钻	W <sub>6</sub> Mo <sub>5</sub> Cr <sub>4</sub> V <sub>2</sub> Al	表面光滑,出口有少量分层	0.08
中心点钻	W <sub>6</sub> Mo <sub>5</sub> Cr <sub>4</sub> V <sub>2</sub> Al	表面光滑,出口基本没有分层	0.06
专用钻头	WC-TiC-CO	表面光滑,出口基本没有分层	0.06

影响芳纶复合材料的钻孔质量的因素主要有:钻头的几何形状、转速、进刀速度、加工条件以及孔径的大小。

### (1) 钻头的几何形状

三种钻头的几何形状见图1。钻头的几何形状包括螺旋角度(选用的标准钻头为29°、57°)、卸料角(标准钻头为10°)、尖部角度(标准钻头为118°)。三点钻和中心点钻是在标准钻头的基础上磨削而成,三点钻的尖部角度为25°。钻头的结构参数按下列公式计算:

$K = 0.22d^{0.87}$ ,  $q = 0.93d$ ,  $q_1 = q - (0.5 \sim 1.5)$   
(当  $d > 15 \text{ mm}$ ),  $q_1 = q$  (当  $d < 15 \text{ mm}$ ),  $B = 0.682d \cos \beta$ ,  $f = 0.174d^{0.675}$ 。其中  $d$  为钻头直径,  $K$  为钻头尖处的芯厚,  $q$  为刃背直径,  $q_1$  为刃背尾部直径,  $B$  为刃瓣宽度,  $\beta$  为螺旋角度,  $f$  为刃带宽。

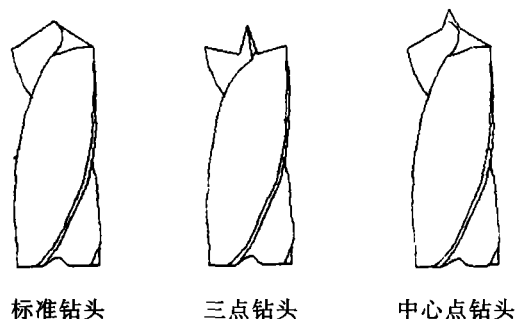


图1 三种钻头的几何形状

Fig.1 Geometry shapes of three drills

钻头是将树脂和纤维完全切断后才能将切屑从卸料槽中排出,卸料角度对切断材料的排出影响很大,因为芳纶纤维在被切断前受拉变形,被切断的纤维的位置后,特别是出口处。如果卸料角合适(如三点钻有负角度的卸料角)使纤维的受拉方向指向钻头的中心点,则会有有效的切断纤维。而中心点钻

是其尖部在轴向力的作用下首先刺透复合材料,减少了纤维受拉变形现象,故出口的分层现象较少。芳纶专用钻头的形状类似于中心点钻,只是其螺旋槽要窄,但螺旋角度大。

螺旋槽的宽度和角度主要影响切断碎屑的排出效果,因为树脂受热效应的影响往往会堵塞螺旋槽,而使钻孔中断。芳纶专用钻头一般要求的转速值为20 000 r/min ~ 30 000 r/min<sup>[3,5]</sup>,其卸料槽可窄一些,在本实验转速(6 000 r/min)的条件下,芳纶专用钻头树脂堵塞现象较严重,标准钻头的槽宽和螺旋角比较合适。

### (2) 转速和进刀速度

转速和进刀速度二者是影响钻头施加给复合材料的轴向力的主要因素,轴向力的大小直接影响复合材料孔的两端面的分层程度<sup>[6]</sup>。一定转速能够提供足够的剪切力和剪切速率,芳纶的高韧性和高强度要求较高的转速才能有效的切断芳纶纤维,在转速较低时,部分纤维会被从树脂基体中拔出,缠绕在钻头的螺旋槽中,很快就不能继续加工,只有当转速较高时,钻头的主刃提供的切削力才足以快速切断纤维,切割面才光滑。进刀速度大,轴向力增大,复合材料的切割端面的分层程度增大,降低进刀速度,可有效地减少分层现象。因此在加工允许的条件下,应尽可能地减小进刀速度。当然过高的转速对刀具的磨损严重,刀具的使用寿命短,而且转速还受机床本身限制。

### (3) 背衬材料

经验证明背衬材料是加工芳纶复合材料孔位不可缺少的条件,背衬材料一般要求本身较脆(加工容易,不堵塞钻头),它主要限制芳纶纤维在钻入口或

钻出口处的变形。如果没有背衬材料,四种钻头的加工质量都较差,且分层严重。选用玻璃纤维增强复合材料作背衬材料是因为它可方便地手糊成型,且其表面可以通过砂纸打磨改型,重复利用率高,特别适用作薄层壳体曲面的背衬材料。背衬材料也可用在复合材料的加工部位涂覆树脂层(0.2 mm)或铺层时在表面增加一层玻璃纤维来代替,但对厚度、表面质量要求较严格的薄层壳体不适用。

#### (4)冷却条件

冷却可降低加工区域的温度,减少热效应,提高刀具的使用寿命和加工质量<sup>[7]</sup>。较高的工作温度必然引起分层,甚至烧焦树脂,通过冷却,树脂受热软化堵塞钻头的现象减少。液氮冷却使加工区域在低温条件下材料呈脆性,其加工效果较好,但加工成本提高。

#### (5)复合材料的特性

复合材料的纤维含量、铺层方向和其厚度对钻孔质量的影响较大,随着复合材料厚度的增加,其钻孔、切割的难度增加,加工造成的损伤程度增大。纤维的0°/90°方向有利于加工,而单向纤维的加工效果较差<sup>[8]</sup>。纤维的体积含量的增加自然增加了加工的困难。

#### (6)孔径

随着孔径的增大,加工性变好。孔径增大,钻头的切割速率提高,纤维的变形角度变小。用中心点钻加工不同尺寸的孔的加工质量见表4。表中的数据表明,孔径的尺寸增大,其加工的精度增加,孔的表面质量好。孔径增大可以降低转速而不影响加工的质量,Φ24 mm的孔需要的转速只有2 000 r/min。相反,小孔径的加工困难很大,从目前采用的转速6 000 r/min(改制钻床可连续使用的最快转速),仍不能满足小孔的加工。

表4 不同孔径的加工质量

孔径 $\Phi$ /mm	孔的表面质量	尺寸误差 /mm
1.8	表面粗糙,出口分层、起毛严重	0.12
8	表面光滑,出口基本没有分层	0.06
12	表面较光滑,出口基本没有分层	0.08
24	表面较光滑,出口基本没有分层	0.12

### 3.3 激光切割、打孔加工

(1)激光切割机在加工过程中控制的主要工艺参数为:(a)激光平均输出功率,功率越大,切口宽度增大;(b)脉冲峰值功率,功率增大,切割面的粗糙度降低;(c)脉冲频率和宽度,频率增大,粗糙度降低;(d)切割速率,速度慢,切口宽度大,速度快,刀口不整齐,粗糙度增大;(e)焦点位置,控制离焦距为0的时候,复合材料的上下表面的切口宽度都达到了最小值。

(2)激光切割的断面光滑,可见的分层现象少,其切割弧线、小角度的效果与直线切割的效果相近。而自制切割机不能切弧度较小位置,在弧度较小的位置存在明显的分层现象(对玻璃纤维增强复合材料也存在同样的问题)。因为要保证薄层芳纶复合材料壳体空间旋转间距,切割刀片(圆钢片)的尺寸不能太小,否则,切割位置精度差。由于在弧度较小的位置加工,复合材料的受力不是点接触(如图2所示),因此非切割位置的受压变形产生分层。激光能切割复合材料的厚度范围较宽,NET-500A激光切割机能切的最大厚度可达到10 mm,且切割、钻孔质量较好,不受弧度限制。

激光打孔的表面质量和尺寸精度见表5。激光切割的尺寸精度主要与机床的加工精度有关,激光束本身对尺寸精度的影响较小,因为激光束对复合材料的影响主要是热效应影响,没有纤维受拉变形现象。

(3)激光加工存在的问题主要是激光切割机的机械部分的问题,为满足薄层芳纶复合材料壳体孔位加工、废边切除,我们采用了五坐标的数控机械设备和专用夹具定位,薄层芳纶复合材料(厚度为2 mm~9 mm)的切割、打孔的效果很好,并已进行大量加工。

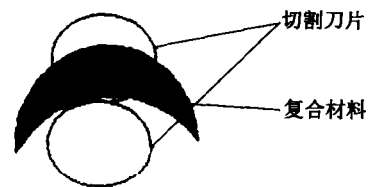


图2 弧度位置切割示意图

Fig.2 Incising schematic sketch of radian location

表5 激光打孔的表面质量和尺寸平均误差

Tab.5 Surface quality and dimension average error of laser machining

孔径 $\Phi$ /mm	表面质量	尺寸平均误差 /mm
1.8		0.02
8	孔的表面较光滑,没	0.02
12	有分层、起毛现象	0.04
24		0.06

#### 4 结论

(1)中心点钻在转速为 6 000 r/min,进刀速度为 0.2 mm/r ~ 0.3 mm/r 的条件下加工芳纶复合材料可取得与芳纶专用钻头相近的效果。

(2)在切割速度为 25 mm/s ~ 30 mm/s 时,激光加工芳纶复合材料的效果较好。

#### 参考文献

- 1 杨光松.损伤力学与复合材料损伤.国防工业出版社,1995

社,1995

- 2 赵祖虎.复合材料特种加工技术.宇航材料工艺,1998;(4):32~34

- 3 杨爱玉译.凯夫拉复合材料的切割与钻孔.航天工艺,1988;(1):46~50

- 4 蒋海滨.芳纶增强头盔的研究.西北工业大学硕士学位论文,2000

- 5 Santhan A G, Krishnamurthy R, Malhotra S K. Mechanics of tool wear during machining of advanced fibrous composites. NIST Spec. Publication, 1993:847, 489 ~ 500

- 6 Erik P, Ingvar E, Leif Z. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates. Composites, 1997;28A:141 ~ 151

- 7 Doyle D J, Kokosa J M. Chemical by-products of laser cutting of kevlar. Polymer Preprocessing, 1986;2 792:206 ~ 207

- 8 Di L A. Thermal damage in layer cutting of (0/90)aramid/epoxy laminates. Composites, 1989;20(2):115 ~ 119

(编辑 马晓艳)

## 光栅调制漂白法假彩色编码技术

光栅调制漂白法假彩色编码技术应用于临床放射医学诊断取得的成果为国内首创,是一项具有实际应用和推广价值的新技术。它可以提高人眼视觉对图像灰度的分辨能力和增强图像边缘,从而获得更多的人体内部结构和病变的信息,并具有以下特点:假彩色图可以保持原黑白图的图形结构,可用于电学密度分割假彩色显示技术不能处理的黑白图像;图像亮度高,可直接投影观察,并可方便地选取正色或补色图像;操作过程简便、装置简单,技术易掌握,处理图像成本低,便于广泛推广。

研制的光学假彩色处理仪,具有制作光栅调制位相图及光学空间滤波显示假彩色图像两种功能。可供医疗单位将 X 射线、X-CT 等黑白图像处理、显示为按密度变化的假彩色图像,以提高对良性和恶性肿瘤的识别能力。亦可供理、工科大学、师范院校在物理光学实验中,将假彩色处理作为典型的白光付立叶光学实验,并可供科研单位、遥感单位处理流场、电镜、生物、遥感等黑白图像。本成果结构能清楚地反映光学原理,操作简便,非专业光学人员很容易掌握使用方法。大直径、大相对孔径、消色差聚光变换镜和曝光器等均可独立使用。

· 李连清 ·