

# 碳纤维复合材料方孔加工工艺

张鹏<sup>1</sup> 杨柳<sup>2</sup> 谭朝元<sup>1</sup> 杨志波<sup>1</sup> 王凯<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

**文 摘** 针对碳纤维复合材料大深度不贯通方孔提出了一种专用的加工工艺。通过试验对比,分析了磨削力、加工质量、刀具磨损、加工效率等因素。结果表明,先钻中心孔后磨削的方式适合于该方孔的加工。并对试验中出现的问题进行了工艺优化,初步解决了碳纤维复合材料大深度不贯通方孔的加工问题。

**关键词** 复合材料,方孔,加工工艺,工艺优化

中图分类号: TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.019

## Processing Technology of Square Hole In Carbon Fiber Reinforced Plastics

ZHANG Peng<sup>1</sup> YANG Liu<sup>2</sup> TAN Chaoyuan<sup>1</sup> YANG Zhibo<sup>1</sup> WANG Kai<sup>1</sup>

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

(2 Beijing Institute of Astronautics System Engineering, Beijing 100076)

**Abstract** This paper presents a new special technics for deep and blind square-hole machining on carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite. Through contrasts between different experiments and considering grinding force, machining quality, tool wear and machining efficiency, the results indicate that the means of first drilling and then grinding is fit for the machining of square-hole. This paper also implements technics optimization according to the problems occurred during experiment. The problem of deep and blind square-hole machining on CFRP is preliminary solved.

**Key words** Composite, Square hole, Processing technology, Process optimization

### 0 引言

随着碳纤维增强复合材料应用的日益广泛,对其进行机械加工的需求愈来愈多。在复合材料舱段对接过程中,通过机械加工多个大深度垂直端框不贯通方孔(方孔),再利用紧固件连接是一种新型的复合材料部位对接方式。该方式为紧固件的操作提供了必要的空间。国外研究主要集中在加工刀具和方式上,刀具的解决方案是基于金刚石涂层硬质合金钻和烧结金刚石刀具。例如聚晶金刚石钻头(PCD)具有很高的硬度和较好的耐磨性<sup>[1]</sup>,在钻孔工艺上,国外很早就提出了高速制孔工艺,该工艺通过提高钻头旋转速度,以减少轴向力,防止钻孔过程中产生分层和

劈裂。在磨削方面,Hocheng等在碳纤维复合材料磨削试验的基础上,提出预测复合材料切削力的机械学模型,分析了切边、表面粗糙度和切削力的影响。Hu等以单向碳纤维复合材料为研究对象,探讨了不同纤维方向下磨削力和表面质量的变化规律<sup>[1-3]</sup>。国内复合材料机械加工工艺研究尚不够深入<sup>[4]</sup>,已有研究成果应用于复合材料钻孔与端面和外圆加工。

本文提出了一种专用的复合材料方孔加工工艺,探讨了复合材料大深度干磨削用刀具及方法,对不同的加工方法进行了对比试验。考虑了磨削力、工件加工质量、刀具磨损、加工效率等因素,对加工工艺进行了优化,为解决复合材料舱段不贯通方孔的加工奠定

了基础。

## 1 加工方案及试验

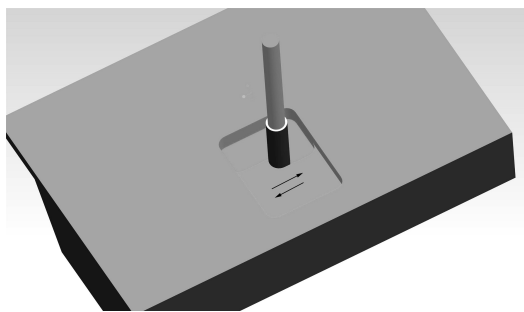
### 1.1 加工方案

碳/环氧复合材料具有硬度高、导热性差、各项异性等特点,是典型的难加工材料之一,按照加工经验,一般不采用车削方式而采用磨削方式<sup>[5]</sup>。

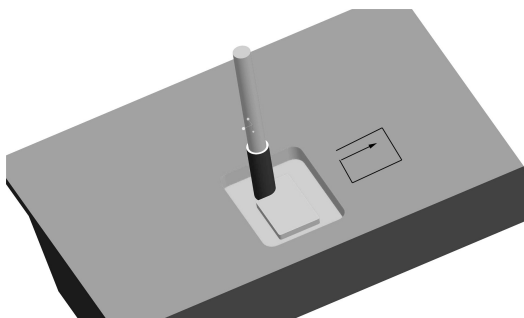
为满足设计要求,方孔加工后表面不能有撕裂、分层等缺陷,原有的复合材料缺陷不能有扩展。为适应大批量生产,方孔加工需有较高的加工效率。

方孔加工采用粗加工和精加工结合的加工方案,粗加工时以较快的切削速度将窗口内大部分复合材料去除,单边保留 0.5 ~ 1 mm 的余量。精加工时将余量去除,保证方孔尺寸、位置、精度及加工质量。

粗加工拟采用直接磨削和先钻孔后磨削(即先钻后磨)2 种加工方式,直接磨削时刀具在加工区域内做往复或回转运动,逐层去除复合材料,直到窗口内的复合材料粗加工量全部加工完,见图 1。先钻后磨加工方式是先在窗口内部钻一个中心孔或多排孔,再用加工刀具将其余复合材料去除,见图 2。



(a) 直线往复运动



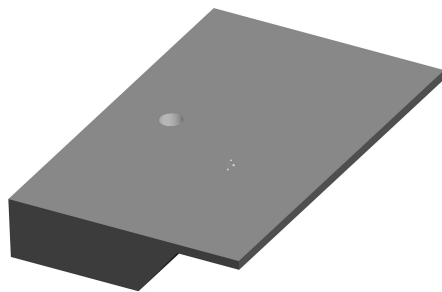
(b) 回转运动

图 1 直接磨削加工

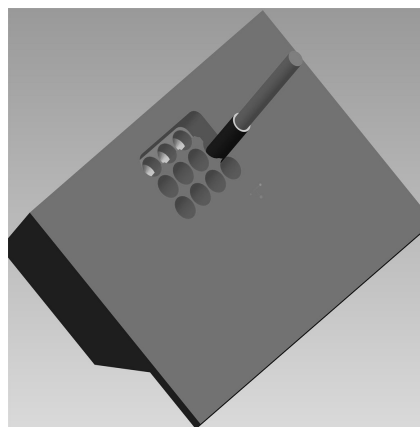
Fig. 1 Direct grinding machining

直接磨削时,依靠电镀金刚石刀具前端面的金刚石颗粒做为主切削刃,侧面的金刚石颗粒作为辅助切削刃将碳纤维复合材料层层去除。去除完一层后,通过轴向进刀,再去掉下一层,轴向力发生在每次进刀时,其大小与刀具直径和进刀速度有关。为保证材料加工质量,减少轴向力进刀速度不亦过高,且刀具直径不亦过大。

采用先钻后磨的加工方式,在加工环节上虽然增加了钻孔工序,但提供了磨削时轴向力始终为 0 的可能,即每次轴向进刀均在钻孔位置进行,磨削过程中只有刀具侧面金刚石颗粒参与加工而前端面的金刚石颗粒不参与加工。在前期钻孔时,钻头直径应略大于磨棒直径,钻头应采用硬质合金麻花钻或 PCD 钻头。在碳纤维复合材料钻孔时,由于钻头易磨损、轴向力过大等,出孔处易产生分层等缺陷,而本文涉及的孔为盲孔,且在钻孔过程中采用机床自动钻孔,可采用高速钻孔等复合材料制孔工艺。



(a) 钻中心孔



(b) 钻多排孔

图 2 先钻后磨

Fig. 2 First drilling then grinding

### 1.2 加工装置及试验

采用江苏多棱制造的数控铣床 TK5660C (主轴转速:0 ~ 12 kr/min,功率:12 kW) 进行,加工刀具采用电镀金刚石磨棒和直径略大于磨棒的硬质合金钻头,利用 Kistler 9257B 三向测力仪和 Kistler 5007 放大器测量进刀时的轴向力,并通过数据采集系统提取轴向力的数据。对最终的加工试验件进行扫描电镜观察和超声探伤,评价其加工效果。试验件选取 200 mm×100 mm×130 mm 的复合材料平板试验件。方孔尺寸为 40 mm×40 mm×30 mm(深度),综合考虑加工质量、加工效率、刀具磨损等因素,选定的加工工艺参数见表 1,加工过程见图 3。

表 1 加工工艺参数

Tab. 1 Processing parameter

工艺	主轴转速 /kr·min <sup>-1</sup>	进给速度 /mm·min <sup>-1</sup>	进给量 /mm·次 <sup>-1</sup>	磨粒粒径 /μm
钻孔	10~12	50~80		
粗加工	4~6	50~80	2~3	178~250
精加工	6~8	20~30	1~1.5	150~178

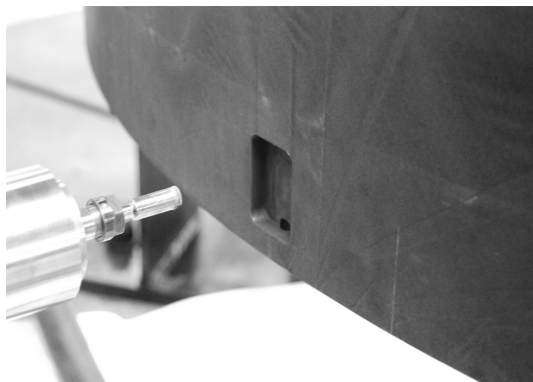


图 3 方孔加工过程

Tab. 3 Manufacturing procedure of square hole

## 2 试验结果与改进措施

### 2.1 轴向力及刀具情况对比

通过选择合适的加工工艺参数,先钻后磨的加工方式能够完成方孔的加工。直接磨削时刀具端部磨损严重,往往不能完成 1 个方孔的加工,端部的金刚石颗粒就已全部脱落,同时加工过程中伴有巨大噪音。这主要是磨削时轴向力过大,且刀具前端的金刚石颗粒脱落造成的。本文钻孔采用直径为  $\Phi 10$  mm 的硬质合金钻头,主轴转速  $n=11$  kr/min,进给速度  $v=70$  mm/min,磨削时磨棒直径  $\Phi 9$  mm,主轴转速  $n=7$  kr/min,进给速度  $v=25$  mm/min,每次进给量  $a=2$  mm。测得加工时轴向力随加工深度的变化见图 4。在碳纤维/环氧树脂复合材料磨削加工中,以断裂去除机理为主<sup>[6]</sup>,直接磨削时树脂粉尘容易聚集并挤压在磨粒周围,产生二次切削使加工温度升高,当加工温度高于  $180^{\circ}\text{C}$ ,树脂软化附着于磨棒上,产生磨棒堵塞现象,从而导致磨削力的急剧增加<sup>[7]</sup>。在先钻多排孔与先钻中心孔的对比试验中,先钻中心孔与先钻多排孔方孔磨削质量及时间基本一致,但钻多排孔的周期大于钻中心孔,采用钻中心孔的方式磨棒磨损严重,采用钻多排孔的方式钻头磨损严重,考虑加工效率选择先钻中心孔后磨削的加工方式。

试验中发现加工轨迹对加工质量及加工周期影响较小,具体加工周期及刀具磨损情况见表 2,综合考虑选择先钻中心孔后磨削的加工方式。

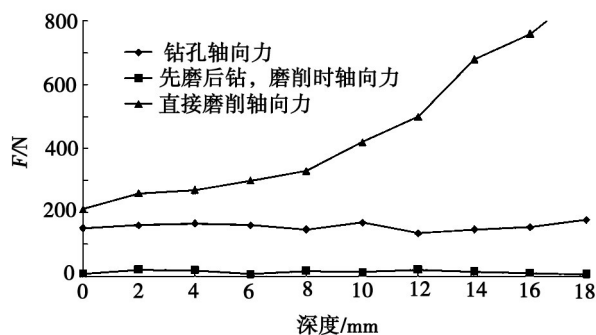


图 4 两种加工方式下轴向力随加工深度的变化

Fig. 4 Thrust of both processing method vary with working depth

表 2 不同加工方式时刀具磨损及加工周期

Tab. 2 Cutting-tool wear and processing cycle

加工方式	运动轨迹	时间/min	刀具磨损情况
直接磨削	直线往复	无法完成	磨损严重
	回转运动	无法完成	
先钻中心	直线往复	40	钻头磨损小
孔后磨削	回转运动	40	磨棒磨损大
先钻多排	直线往复	51	钻头磨损大, 磨棒磨损小
	回转运动	51	

### 2.2 加工中的问题

当主轴转速超过  $8$  kr/min 时,磨削过程中产生的大量切削热无法传递出去,导致刀具和加工区域温度超过复合材料使用温度,引起复合材料烧糊和隆起见图 5,同时还增大刀具的磨损。

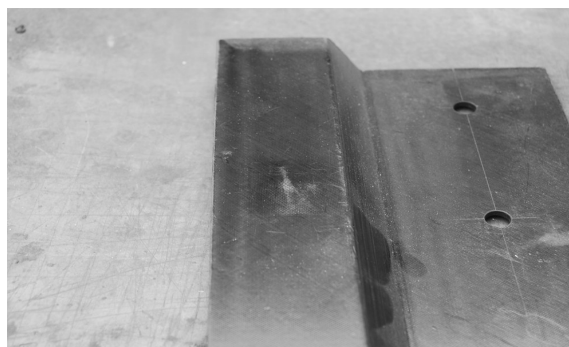


图 5 复合材料试验件隆起

Fig. 5 Composite exemplar uplift

降低主轴转速虽能避免此类情况的发生,但延长了加工周期。试验中发现,即使采用先钻中心孔再磨削的方式,也需要  $40$  min 才能完成一个方孔的加工。对于拥有上百个方孔的复合材料舱段而言,不适合大批量生产。

此外先钻中心孔后磨削金刚石磨头磨损严重,传统磨棒只能加工  $5\sim 6$  个方孔。

### 2.3 改进措施

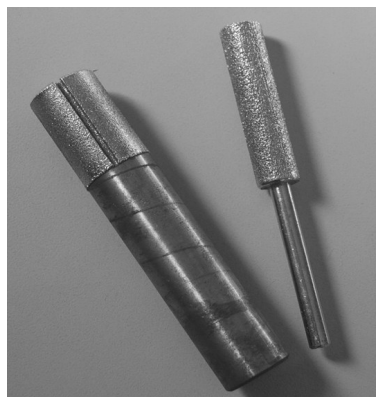
根据平板试验件方孔粗加工试验的结果,初步确定宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 5 期

定加工工艺方案为先钻中心孔后回转磨削的加工方式,同时针对试验中出现的问题进行工艺改进。

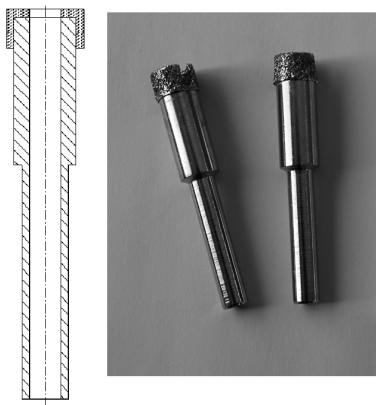
### 2.3.1 刀具的改进

传统的金刚石磨棒为实心结构,主要用于复合材料切边,空间较为开敞。排屑和散热边界条件优于方孔加工。采用传统磨棒用于方孔加工时排屑困难,切削容易产生二次切削,且实心结构散热困难,不仅影响了加工质量和效率,还降低了刀具的使用寿命。加工过程中容易产生切屑堵塞刀具的现象。

为适应方孔这种特殊结构的加工,本文将磨棒设计成中空的结构见图6,只在端面 and 侧面靠近端部的部分镀金刚石颗粒,且跟据需要在前端面设计排屑槽,大大提高了散热面积和排屑空间。



(a) 传统磨棒



(b) 改进后的中空磨棒

图6 刀具改进前后对比照片

Fig. 6 Improved cutting-tool

### 2.3.2 工艺参数的优化

提高进给速度和进给量是提高加工效率的前提。但片面提高加工速度和进给速度,会使复合材料加工质量变差。进给量较大时,复合材料未切断就被拉起,引起复合材料出现撕裂、分层等缺陷。因此需对工艺参数进行优化,在保证质量的前提下,提高加工效率。

复合材料热导率低,且不适合添加冷却液。因此更需要从刀具排屑和刀具本身散热角度考虑将热量

带走。试验发现, $\Phi 9$  mm 带排屑槽的空心电镀金刚石磨头,主轴转速提升至  $10 \text{ kr/min}$  仍不会烧糊和隆起。当然刀具的直径选择要考虑方孔尖角的圆弧半径。但复合材料加工本身就属于不成熟技术,一般来讲设计部门对于方孔尺寸尖角的圆弧半径不会要求过高。也不可能像金属加工一样,将圆弧半径加工至  $R=0$ 。在其他参数不变的情况下,磨头直径越大线速度越高,扭矩增大,产热量增加。磨头直径越小,线速度越低,扭矩减小,产热量小。但直径过小,虽然单位时间内产热量小,但线速度的降低必然带来较慢的进刀速度,不适合产品的批量生产。通过试验发现,在磨头  $\Phi 9$  mm 壁厚  $2 \text{ mm}$  时,加工稳定,转速能够提升至  $10 \text{ kr/min}$ ,进刀速度也能够提升至  $100 \text{ mm/min}$ ,比较适合产品的批生产。此外加工过程中,金刚石颗粒目数越小,即单个金刚石颗粒越大,切削性能越好,加工速度越快,目数越大,既单个金刚石颗粒越小,表面加工质量越高。根据该特点,在粗加工时使用粒径  $178 \sim 250 \mu\text{m}$  刀具,保证加工速度,在精加工时选择粒径  $150 \sim 178 \mu\text{m}$  刀具,提高表面加工质量。此外,粗加工时,可选择直径在  $\Phi 9 \sim \Phi 12 \text{ mm}$  的电镀金刚石磨头,并配合相对直径较大的硬质合金钻头。用于在粗加工时,提高加工过程中的线速度,将大部分切削余量迅速去除。在窗口边缘方向保留  $1 \sim 1.5 \text{ mm}$  加工余量,在深度方向保留  $0 \sim 1 \text{ mm}$  加工余量即可。在精加工时若设计未对方孔倒角做硬性要求,建议选择直径为  $\Phi 9 \text{ mm}$  带排屑槽的电镀金刚石空心磨头,使刀具沿方孔边缘直线运动,将其余的加工余量去除。在深度方向应一次进刀至要求尺寸。优化后工艺参数见表3。采用该工艺参数和改进后的磨棒,每个磨棒可加工  $10 \sim 12$  个方孔,且单个方孔的加工周期只有原来的  $1/2$ 。

表3 优化后工艺参数

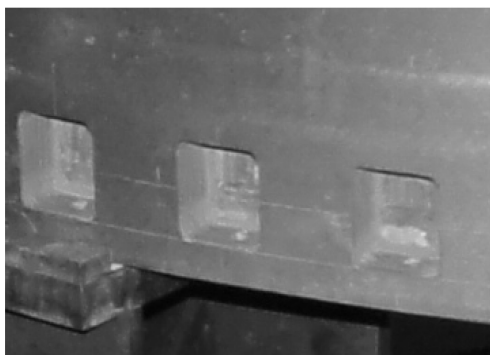
Tab. 3 Processing parameter after optimization

工艺	主轴转速 / $\text{kr} \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度 / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	进给量 / $\text{mm} \cdot \text{次}^{-1}$	磨粒粒径 / $\mu\text{m}$	加工周期 / $\text{min}$
粗加工	9	30 ~ 35	3 ~ 4	178 ~ 250	14
精加工	10	70 ~ 90	0 ~ 0.5	150 ~ 178	4

### 2.4 加工结果

试验件加工完成后,表面完整性较好,没有纤维断裂和被拉起的痕迹,测量加工表面的粗糙度,基本保持在  $1.2 \sim 3.4 \mu\text{m}$ 。经超声探伤无新增缺陷,原有缺陷未扩展,且整个加工过程稳定,噪声较小,能够适用于 C/E 复合材料不贯通方孔的加工。在刀具磨损方面,粗加磨棒和精加磨棒刀具均未出现切削堵塞磨棒的现象。这证明整个加工过程中,加工区温度稳

定,排屑顺畅。方孔加工完成后外观照见图7。



(a) 加工完成的方孔照片



(b) 方孔内表面微观照片

图7 方孔加工完成后照片

Fig.7 Photo of square hole

### 3 结论

(1)“先钻后磨”的方式能够用于大深度不贯通方孔的加工,磨削过程中轴向力稳定、工件表面完整,粗糙度在 $1.2 \sim 3.4 \mu\text{m}$ 。

(2)磨棒运行轨迹、先钻多排孔与先钻中心孔的加工方式对方孔加工质量影响较小。

(3)通过加工工具和工艺参数的优化,消除了方孔加工中隆起和烧糊以及刀具堵塞的现象,且缩短了产品生产周期。

### 参考文献

[1] Hocheng H, Puw H Y, Huang Y. Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics [J]. Composites Manufacturing, 1993, 4(2): 103 ~ 108

[2] Hocheng H. Machinability test of carbon fiber-reinforced

plastics in milling [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1993, 8(6): 717-729

[3] HU N S, Zhang L C. A study on the grindability of multidirectional carbon fiber-reinforced plastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (s1/3): 152-156

[4] 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

[5] 高航, 袁和平. 碳纤维复合材料构件干磨削砂轮研制及其加工性能研究 [J]. 兵工学报, 2011(2): 186-191

[6] Persson E, Eriksson L, Zackrisson L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates [J]. Composites Part A. 1997, 28A: 141-151

[7] 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)

## 航天材料及工艺研究所关于成立北京宇航学会制造技术及材料专业委员会的申请得到批复

北京宇航学会是由北京地区宇航科学技术工作者自愿联合发起成立,经北京市社会团体登记管理机关核准登记的非营利性社会团体。该学会挂靠在中国运载火箭研究院,其工作宗旨是通过开展学术交流、科普宣传等活动,更好地服务经济社会、服务学科建设、服务人才培养,为加速我国宇航科学技术事业的发展,促进航天科学技术与首都社会经济结合,加强国防建设和国民经济发展做出贡献。

为加大材料工艺领域技术成果的转化力度,更好地促进航天事业的发展,航天材料及工艺研究所根据北京宇航学会的章程于2013年8月正式提出了申请,承诺承担专业委员会主任单位的全部职责和义务。日前,北京宇航学会第四届常务理事会第二次会议审议通过了专业委员会调整方案,正式批复设立制造技术及材料专业委员会,挂靠单位为航天材料及工艺研究所。

· 罗焱 ·