

# M40/4211 复合材料层合板铣削加工试验

宁志鹏 杨晶 刘汉良 李光

(北京卫星制造厂,北京 100094)

**文 摘** 通过分析碳纤维复合材料的性能特点及对切削加工性能的影响,提出了铣削刀具材料和几何结构形式的选用原则,介绍了几种适于碳纤维复合材料铣削的加工刀具。针对碳纤维复合材料中常用的 M40/4211 复合材料层合板进行加工缺陷试验和切削试验,总结出影响 M40/4211 复合材料层合板加工质量的因素及规律,得到每种刀具加工 M40/4211 复合材料层合板的最佳加工参数,较高的切削速度配合恰当的进给速度可以有效提高 M40/4211 复合材料层合板的加工质量和加工效率。

**关键词** 铣削, M40/4211 复合材料层合板, 铣削刀具, 切削参数优化

中图分类号: TH16, TG659

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.019

## Experimental Study on M40/4211 Composite Laminates Milling

NING Zhipeng YANG Jing LIU Hanliang LI Guang

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** This paper analyzes the performance characteristics of CFRP and its impact on the cutting performance. The selection principles of milling tool material and geometry are proposed, several milling tools which are suitable for CFRP are introduced. Through a series of M40 defects testing and milling testing, influencing factors and laws of M40 processing quality are summarized. The best processing parameters for each kind of milling tools machining M40 are obtained. As a result, the condition of higher cutting speed and proper feed rate can improve M40 processing quality and efficiency.

**Key words** M40/4211 Composite laminates, Milling tool, Optimization of cutting parameters

### 0 引言

碳纤维复合材料具有许多良好的物理性能和力学性能,如密度小、比强度大、比模量大、良好的热稳定性、抗化学腐蚀、抗疲劳以及振动阻尼等优良特性等<sup>[1]</sup>,因而在航空航天、先进武器系统等领域具有广阔的应用前景。

考虑到复合材料成型工艺的难度与成本,碳纤维复合材料零件在复合成型时重要结构部位通常都留有一定的余量,如一些有装配精度要求的安装面和轮廓等。这些特征都需要通过高质量与高精度的铣削加工来完成,以实现纤维增强复合材料零件高精度连接和装配的要求。因此,碳纤维复合材料成型后的铣削加工,作为精确制造各种高精度轮廓的工艺途径,已成为复合材料制造过程中不可或缺的一部分,越来越受到重视。

### 1 碳纤维复合材料结构特性和加工性能分析

碳纤维复合材料具有各向异性、不均匀性和不连续性,层间强度低的特点,从微观上看,它是一种不均匀材料。目前,航天产品中几种常用的碳纤维复合材料物理力学性能如表 1 所示。

表 1 常用碳纤维复合材料单向板性能

Tab. 1 Common unidirectional CFRP board performance

碳纤维 复合材料	纵向拉伸 模量/GPa	横向拉伸 模量/GPa	剪切模量 /GPa	泊松比 /%	密度 /kg·m <sup>-3</sup>
M40/4211	240	7.0	4.6	0.3	1640
M55J/4211	330	6.2	4.1	0.3	1630
M60J/4211	350	6.2	4.5	0.35	1630

不同于传统的金属切削原理,碳纤维复合材料的切削不严格经历塑性变形、晶粒滑移、后刀面挤压与摩擦的过程,直接表现为纤维材料的拉断和基体材料

收稿日期: 2014-12-02

作者简介: 宁志鹏, 1983 年出生, 硕士, 主要从事 CAD/CAM 技术、航天结构产品机加工工艺技术的研究。E-mail: nzp68@126.com

的脆性断裂。当切削加工时,刀具产生的切削力通过基体最终传递到增强相——纤维上,材料的各向异性常导致复合材料制品出现纤维拔出、纤维束开裂、交界裂纹、纤维束拉毛、内部脱粘和分层塌边等缺陷,会降低复合材料的力学性能和表面加工质量。切削区域材料受到刀具的挤压、拉伸、弯曲和剪切的综合作用,切屑的形成多为树脂破裂和纤维的拉伸、挤压、剪切断裂等。

碳纤维复合材料的树脂基体固化后呈脆性,其强度以及纤维和树脂的结合强度远低于纤维自身的强度,切削加工中复合材料变形的过程首先是树脂基体和结合界面之间发生脆性断裂破坏,然后是纤维被剪切或者拉断的过程,增强纤维由于其强度韧性较高,是切削过程中的主要磨损要素。碳纤维复合材料切削加工中,切削速度方向与纤维铺设方向的夹角为纤维方向角( $\theta$ ),纤维方向角影响着复合材料的切削方式、纤维的断裂形式、切屑形态和最终的加工精度<sup>[2]</sup>。

## 2 碳纤维复合材料铣削刀具

高效的机械加工材料去除方式要求刀具材料的硬度远远高于被切除工件材料的硬度。目前碳纤维复合材料铣削刀具一般采用整体硬质合金为基体,薄的PVD金刚石涂层、钎焊PCD刀片或在切削刃处烧结PCD。刀具刃形设计的重点在于减小刀具在切削加工过程中的轴向力,抑制分层、翻边和毛刺等缺陷的产生,具体可通过增大钻头的刀尖角,减小刀具的螺旋角,改变刀具刃形结构等方法来实现。

通过调研多个刀具厂家的复合材料刀具,分别选用交叉刃压迫式铣刀、小螺旋角铣刀和菠萝刃铣刀进行刀具切削试验,取得了较好的加工效果。

### 2.1 交叉刃压迫式铣刀

交叉刃压迫式铣刀采用左、右螺旋刃的设计,锋利的切削刃同时具有上切和下切的螺旋槽,切削时平衡刀具上下轴向力,确保将切削力合力指向材料的内侧,以获得稳定的切削条件,可抑制材料的分层,刀具及加工效果如图1所示。该刀具适用于加工较厚的碳纤维层合材料或夹层材料。



图1 交叉刃压迫式铣刀及加工效果

Fig. 1 Schematics of compression end mill and its machining effect

### 2.2 小螺旋角铣刀

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第2期

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刃的铣刀,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,刀具及加工效果如图2所示。

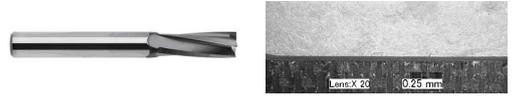


图2 小螺旋角铣刀(螺旋角 $\theta=10^\circ$ )及加工效果

Fig. 2 Low helix end mill and its machining effect

### 2.3 “菠萝刃”铣刀

这种刀具的上切、下切菱形刃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,刀具及加工效果如图3所示。

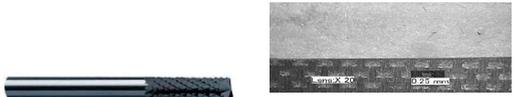


图3 “菠萝刃”铣刀及加工效果

Fig. 3 Router end mill and its machining effect

## 3 M40/4211 复合材料层合板加工缺陷试验

### 3.1 加工缺陷试验环境条件

针对碳纤维复合材料中常用的M40/4211复合材料层合板进行加工缺陷试验,试验环境条件如下:

(1)加工机床:DMC1035 V,机床最高转速8 000 r/min,最大进给20 000 mm/min。

(2)试验材料:厚度为5 mm的M40/4211复合材料层合板。

(3)加工刀具:交叉刃压迫式铣刀。

(4)试验工艺参数:以刀具厂家推荐的参数为基础,结合实际工况来确定试验中的主轴转速和进给速度。

(5)冷却方式:气冷。

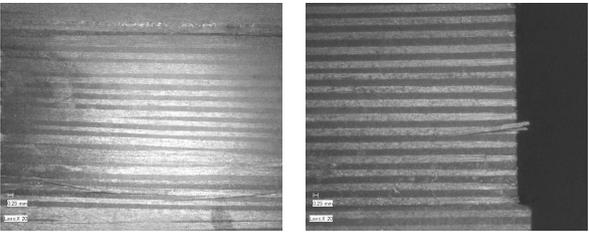
(6)装卡方式:虎钳,压板。

(7)表面形貌及加工缺陷的检测设备:日本KEYENCE公司的超景深三维显微系统VHX-600E。

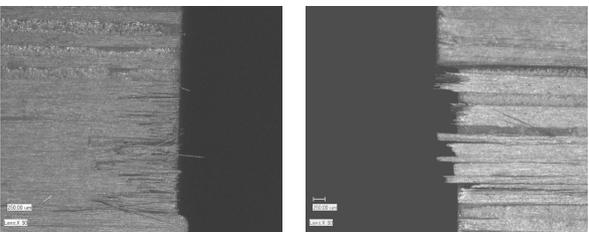
### 3.2 加工缺陷试验

图4为试验中检测到的纤维束抽丝、拉毛、开裂等工艺缺陷。刀具施加在纤维束上的正压力导致平行铺层的纤维束一部分受到挤压、拉伸、摩擦的作用,

基体材料破碎从而失去对碳纤维的粘附力,在各种因素的作用下,纤维束发生撕裂、散落,致使单根或者成束纤维抽出形成纤维抽丝现象和纤维束开裂<sup>[3]</sup>,如图4(a)(b)所示。在试件的边缘因受切削挤压力的作用,基体脱落,造成纤维束底部没有基体的支撑,形成拉毛现象,拉毛通常出现在试件的边缘位置,如图4(c)所示。图4(d)则是由于相邻垂直面切削加工中,对纤维束的剪切作用造成纤维束边缘参差不齐,切削力使背面的基体脱落纤维束开裂所造成的综合加工缺陷。



(a) 纤维抽丝 (b) 纤维束开裂



(c) 基体脱落纤维束拉毛 (d) 纤维束开裂边缘不齐

图4 切削加工纤维束缺陷

Fig. 4 Cutting defects of CFRP

碳纤维复合材料成形阶段产生的各种缺陷会在切削加工中继续存在并被放大。在碳纤维材料铣削加工中还发现因材料铺层间隙出现的分层、孔洞等加工缺陷,见图5。这种缺陷与切削加工工艺过程无关,唯一有效的方法就是对碳纤维复合材料进行严格铺层工艺管理和探伤检测,避免基体和碳纤维之间出现孔隙,增大一次加工中的成品率,避免二次加工中出现类似的缺陷。



(a) 孔洞 (b) 分层

图5 因制备中铺层缺陷出现的孔洞与分层

Fig. 5 Voids and delamination due to defects in the preparation of CFRP

碳纤维复合材料加工中因各向异性,造成基体和纤维之间出现明显脱落分层现象也是切削加工中的

主要缺陷之一,如图6所示即为纤维束与基体材料出现分层的现象。

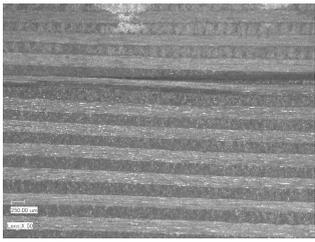


图6 碳纤维分层脱出

Fig. 6 Carbon fiber layering prolapse

通过对试验样件的检测,发现单层纤维铺层的复合材料,当制备中纤维铺层均匀,纤维平行未发生扭曲变形时,其切削加工出现的缺陷率较小;而材料本身铺层制备中严重扭曲变形,在切削加工中出现上述加工缺陷的机率较大,如图7与图5所示。

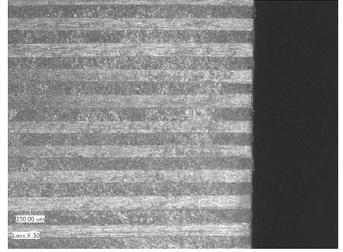


图7 铺层均匀的碳纤维材料

Fig. 7 CFRP with evenly spread layer

实验结果表明,M40/4211 复合材料层合板的加工质量受碳纤维复合材料中纤维的强度、模量、铺丝方式、含胶量以及局部缺陷等多种因素的影响,其影响规律如下:

- (1)碳纤维复合材料中纤维的强度和模量越大,材料的可加工性越差,加工难度越大;
- (2)切削方向与纤维方向平行或垂直时加工质量较好,切削方向与纤维方向呈45°时加工质量较差;
- (3)纤维复合材料含胶量越高,加工质量相对越好;
- (4)纤维复合材料中的局部缺陷会影响并放大复合材料的加工质量。

#### 4 M40/4211 复合材料层合板铣削加工试验及参数优选

选择合理的工艺参数是提高碳纤维复合材料加工质量和效率的重要途径,直接影响着零件的加工效率和加工质量以及刀具的使用寿命<sup>[4-5]</sup>。本文针对M40/4211 复合材料层合板使用上述3种碳纤维复合材料铣刀进行切削试验,以求得到每种刀具的最佳加

工参数,达到优化工艺参数的目的,同时探索切削速度和进给速度对 M40/4211 复合材料层合板加工质量的影响。

#### 4.1 切削试验环境条件

切削试验环境条件如下:

- (1)加工机床:DMC1035V,机床最高转速 8 000 r/min,最大进给 20 000 mm/min。
- (2)试验材料:厚度为 5 mm 的 M40/4211 复合材料层合板。
- (3)加工刀具:交叉刃压迫式铣刀,小螺旋角铣刀和“菠萝刃”铣刀。
- (4)试验工艺参数:以刀具厂家推荐的参数为基

础,结合实际工况来确定试验中的主轴转速和进给速度。

(5)冷却方式:气冷。

(6)装卡方式:虎钳,压板。

(7)表面检测设备:Mahr MarSurf M300C 粗糙度仪,对加工表面质量进行检测。

#### 4.2 铣削刀具的切削参数优选

首先为了验证碳纤维材料宏观加工质量与加工表面粗糙度之间的关系,使用交叉刃压迫式铣刀在厚度为 5 mm 的 M40/4211 复合材料层合板上进行切削试验,试验参数如表 2 所示,切削效果如图 8 和图 9 所示。

表 2 刀具试验参数及粗糙度

Tab. 2 Tool cutting parametres and roughness

试验序号	主轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	进给速度/ $mm \cdot \min^{-1}$	切削速度/ $m \cdot \min^{-1}$	每齿进给量/ $mm \cdot \text{齿}^{-1}$	粗糙度/ $\mu m$
1	5000	300	94.2	0.015	1.13
2	5000	400	94.2	0.02	1.10
3	5000	500	94.2	0.025	1.28
4	5000	600	94.2	0.03	1.52
5	5500	300	103.62	0.014	1.28
6	5500	400	103.62	0.018	1.10
7	5500	500	103.62	0.023	1.18
8	5500	600	103.62	0.027	1.30

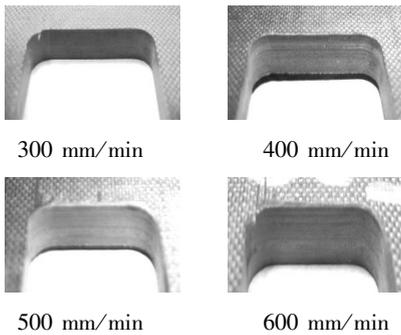


图 8  $n=5\ 000\ r/min$  时切削效果对比

Fig. 8 Comparison of cutting performance at  $n=5\ 000\ r/min$

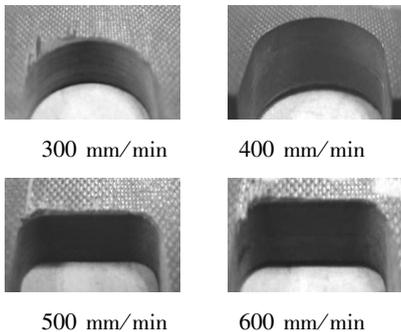


图 9  $n=5\ 500\ r/min$  时切削效果对比

Fig. 9 Comparison of cutting performance at  $n=5\ 500\ r/min$

经过对比可以发现,碳纤维材料的宏观切削效果表现与加工表面粗糙度基本一致,所以引入表面粗糙度进行加工效果的评价是可行的。

针对交叉刃压迫式铣刀,进行工艺参数选用与优化试验,主轴转速分别选择 4 500、5 000、5 500、6 000、6 500 r/min,进给速度分别选择 200、300、400、500、600 mm/min,进行单因素切削试验。

将不同转速下进给速度与表面质量的关系绘制成折线图,图 10 为主轴转速 6 500 r/min 时进给速度和切削效果关系图。

实验结果表明,在主轴转速一定的条件下,随着进给速度的提高加工质量改善,但进给速度高于一定数值时,加工质量呈下降态势。

将不同进给速度下主轴转速与表面质量的关系绘制成折线图,实验结果表明,在进给速度较低时,随着主轴转速的提高加工质量下降;在进给速度适中时,随着主轴转速的提高加工质量变化不大;在进给速度较高时,随着主轴转速的提高,加工质量呈现先改善后变差的趋势,进给速度为 200 mm/min 时主轴

转速和切削效果关系如图 11 所示。

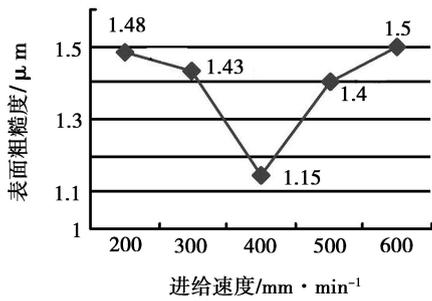


图 10  $S=6\ 500\ \text{r}/\text{min}$  时进给速度与切削效果关系图

Fig. 10 The diagram of feed rate and cutting effect at  $S=6\ 500\ \text{r}/\text{min}$

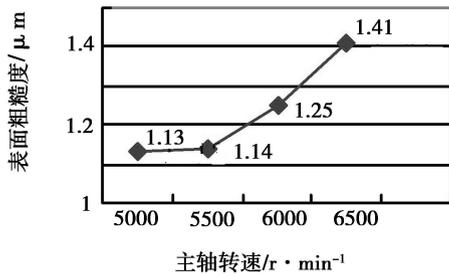


图 11  $f=200\ \text{mm}/\text{min}$  时主轴转速与切削效果关系图

Fig. 11 The diagram of spindle speed and cutting effect at  $f=200\ \text{mm}/\text{min}$

综合考虑 M40/4211 复合材料层合板加工质量及加工效率因素,交叉刃压迫式铣刀最优加工参数为: $n=5\ 500\ \text{r}/\text{min}$ , $f=400\ \text{mm}/\text{min}$ 。

采用同样方法,进行了小螺旋角铣刀和“菠萝刀”铣刀进行了工艺参数选用与优化试验,得到了刀具的最佳工艺参数。

综上所述,通过开展加工工艺参数对 M40/4211 复合材料层合板加工表面质量的影响工艺试验研究及检测分析,获得以下规律:

(1)在进行 M40/4211 复合材料层合板轮廓加工时,应选择逆铣加工方式。

(2)较高的切削速度可以使刀具迅速切断纤维防止分层、撕裂等现象,同时也有利于提高加工效率。

(3)当转速一定时,随着进给量的提高,加工质量改善,但进给量超过一定数值时,将使加工轴向力增大,导致材料分层和剥离。

(4)通过工艺试验得到的 3 把刀具加工 M40/4211 复合材料层合板最佳工艺参数如表 3 所示。

表 3 典型碳纤维复合材料切削加工工艺参数

Tab. 3 Typical CFRP machining process parameters

刀具类型	刀具直径 $\Phi/\text{mm}$	主轴转速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	进给速度 $/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	备注
交叉刃压迫式铣刀	6	5500	400	逆铣
小螺旋角铣刀	6	8500	700	逆铣
“菠萝刀”铣刀	6	4200	600	逆铣

## 5 结论

针对碳纤维复合材料铣削加工中存在的加工质量不稳定,碳纤维复合材料不同程度地存在分层、撕裂、翻边、毛刺等加工缺陷,提出了铣削刀具材料和几何结构形式的选用原则,介绍了几种适于碳纤维复合材料铣削的加工刀具。通过进行 M40/4211 复合材料层合板材料加工缺陷试验和切削试验,总结出 M40/4211 复合材料层合板加工质量的影响因素及规律,得到每种刀具加工 M40/4211 复合材料层合板的最佳加工参数,同时探索了切削速度和进给速度对 M40/4211 复合材料层合板加工质量的影响,对于碳纤维复合材料铣削刀具和切削参数选用有一定的参考意义。在进行碳纤维复合材料铣削加工时,需要根据实际加工的材料及工况的不同进行切削试验,寻找合适的加工参数,以期得到最佳的加工效果及加工效率。

## 参考文献

- [1] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1181-1185
- [2] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料切削机理的研究[J]. 航空制造技术, 2004(7): 57-59
- [3] 牟云飞. 基于随机孔隙模型的 CFRP 孔隙率超声检测研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009
- [4] Denkena B, Boehnke D, Dege J H. Helical milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008(1): 64-69
- [5] 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

(编辑 任涛)