

# T800 碳纤维增强复合材料精密切削加工机理

蔡晓江<sup>1</sup> 唐宏亮<sup>1</sup> 倪云龙<sup>1</sup> 陈明<sup>2</sup>

(1 上海航天控制技术研究所精密与超精密加工技术中心,上海 201109)

(2 上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

**文 摘** 以正交切削试验为手段,研究 T800 CFRP 在小切削余量条件下的切削加工过程和表面形成规律,深入探讨了 CFRP 在精密切削加工中的切削取向、切削参数范围以及刀具刃口钝圆半径等几个关键问题。试验结果表明:CFRP 在切削加工中表现出极为显著的各向异性,切削取向非常重要,0°和 135°两个纤维方向上获取了较小的切削力,0°和 90°两个纤维方向上形成了较为光滑、平整的表面质量。在精密削 CFRP 的场合,为获得较小的切削力并得到较好的加工表面质量,0°纤维方向角是最佳切削方向,切削速度应达到 200 m/min 以上,要选择较小的刀具刃口钝圆半径,切削厚度应大于刀具刃口钝圆半径。

**关键词** 碳纤维增强树脂基复合材料,精密切削,切削力,表面质量

中图分类号: TG501

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.016

## Precision Machining Mechanism of T800 Carbon Fiber Reinforced Polymer

CAI Xiaojiang<sup>1</sup> TANG Hongliang<sup>1</sup> NI Yunlong<sup>1</sup> CHEN Ming<sup>2</sup>

(1 Precision and Ultra-Precision Machining Technology Center, Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109)

(2 School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract** In this paper, orthogonal cutting was used to investigate material cutting and surface forming process of CFRP composite materials under small cutting parameters. An intensive discussion was given about several key problems when machining CFRP for high precision, such as fiber orientation, cutting parameter range and cutting edge radius. Experimental results indicate that CFRP behaves with notable anisotropy and cutting direction affects cutting process greatly. 0° and 135° cutting directions result low cutting force level, and 0° and 90° cutting directions generate improved surface quality. As to precise cutting of CFRP, to reduce cutting force and improve surface quality, the 0° fiber orientation is advised, cutting speed is supposed to exceed 200 m/min, cutting edge radius should be sharp, and cutting depth should exceed cutting edge radius.

**Key words** Carbon fiber reinforced polymers (CFRP), Precision machining, Cutting force, Surface quality

### 0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有比强度和比模量大、热胀系数小、抗辐射放射、可设计性强等诸多优势,自 20 世纪 70 年代开始应用于航空航天领域<sup>[1-2]</sup>。随着近年来航空航天工业的快速发展,无论在强调飞行性能的军用飞机、要求经济舒适的民用飞机,还是力求更大载重能力的运载火箭、要求在空间高低温及辐射环境下稳定工作的卫星,采用 CFRP 成型更轻、更强、更稳定的结构件已经成为大势所趋。波音公司的梦想客机 B787、空客最新的 A350XWB

中复合材料的用量均超过了 50%<sup>[3]</sup>;运载火箭的发动机壳体,如美国大力神-4、法国阿里安-2 火箭改型、日本 M-5 火箭等以及卫星承力框架及各种安装支架都已经广泛采用 CFRP 复合材料结构。可以说,CFRP 复合材料的应用水平已经成为衡量航空航天结构先进性的重要指标。

与传统金属材料结构件的加工成型不同,CFRP 复合材料结构件可以通过各种固化工艺铺设、缠绕来实现复杂结构件的近净成型,直接得到最终的零件几何结构形式,一般只需要进行连接装配制孔,没有金

收稿日期:2016-03-14

基金项目:航天先进技术联合研究中心(USCAST2015-15)

作者简介:蔡晓江,1991 年出生,博士,主要从事复合材料切削加工技术、数字化制备装备工作。E-mail:cxj0927@163.com

属加工中常用的大余量的切削去除加工,制造装配效率极高。尽管如此,在高精度的应用场合,CFRP 复合材料的成型精度不足,为了能够达到最终零件所要求的几何尺寸、形状精度和表面质量,需要在材料成型之后再进行一次二次切削加工来进一步提高结构件的精度和表面质量<sup>[4]</sup>。尤其是在航天控制系统中,星敏支架、姿控力矩飞轮以及其他控制系统用复合材料化结构件的精度将直接影响最终控制系统精度,因此对 CFRP 复合材料进行精密级机械加工成为必需。

目前切削加工技术仍是 CFRP 复合材料应用中主要的技术瓶颈之一。主要的研究集中在航空领域的连接装配制孔和铣边加工,且切削加工精度等级较低<sup>[5]</sup>。这主要是由于 CFRP 复合材料与传统金属材料有着本质的区别,由两相材料复合带来的显著各向异性对切削性能的影响具有方向性,导致传统各向同性金属材料的切削理论不再适用<sup>[6-7]</sup>。近年来研究者已经开始研究 CFRP 复合材料的切削去除机理,但仍主要面向航空制造业加工精度在 8 级以下的普通钻削制孔加工,对于在小切削余量条件下精密加工过程中材料的去除过程和表面形成机理仍不明确。本文主要通过试验研究在小切深条件下 CFRP 复合材料的精密切削去除过程和表面质量,得到不同纤维方向角条件下的切削力、表面粗糙度、表面形貌,为 CFRP 复合材料的精密切削加工提供试验依据。

## 1 试验设计

采用同向铺层的 T800 CFRP 单向层合板来研究在精密切削加工中的材料去除机理与表面形成。图 1 所示为 CFRP 单向层合板直角自由切削试验的配置图。可以看到,试验所采用的是正交飞刀的方法,飞切具有一定纤维方向的 CFRP 板料来实现不同纤维方向角下的直角自由切削。

CFRP 层合板按不同方向切割形成从 0° 到 180°

每隔 15° 一个不同的纤维方向角 ( $\theta$ ), 试验所用刀具均为特殊定制的正交飞刀, 只有一条主切削刃参与切削加工(刃口钝圆半径 15  $\mu\text{m}$ 、前角 25°、后角 15°)。考虑到精密切削加工的余量范围, 切削厚度  $a_c$  采用 0.005、0.01、0.015、0.020、0.025 共 5 个水平, 切削速度  $v_c$  采用 100、150、200、250、300 共 5 个水平。

切削力的采集通过 Kistler-9272 测力仪完成, 粗糙度轮廓的测量采用日本三丰 SJ-210 粗糙度仪进行, 表面形貌 SEM 照片的采集由扫描电子显微镜完成。

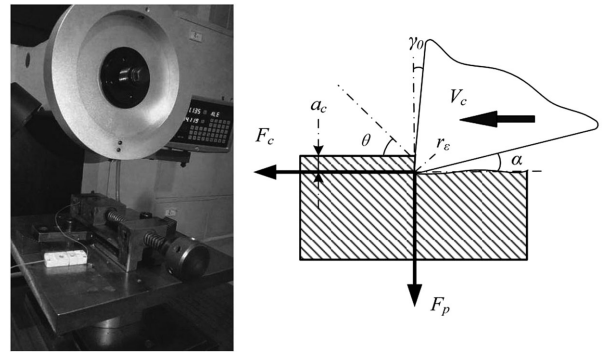


图 1 CFRP 复合材料切削试验配置图

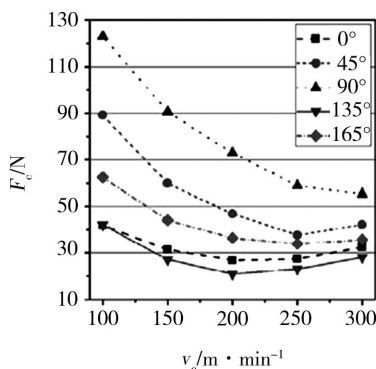
Fig.1 Scheme of cutting CFRP composite materials

## 2 结果分析

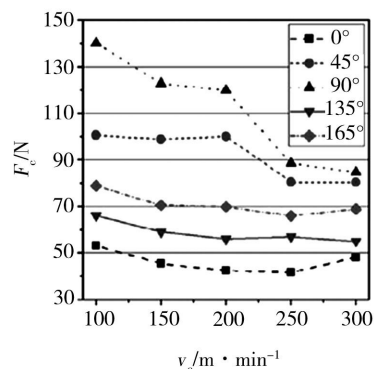
### 2.1 切削力

#### 2.1.1 切削速度对切削力的影响规律

如图 2 所示, 在试验参数范围内, 切削速度  $v_c$  对主切削力  $F_c$  的影响分为两个阶段: (1)  $v_c$  在 100~200 m/min 内,  $F_c$  随  $v_c$  的变大快速下降,  $v_c$  的提高明显使切削的进行更为轻快, 碳纤维的切断也更为顺利; (2)  $v_c$  在 200~300 m/min 内,  $F_c$  随  $v_c$  的变大不再明显, 并出现了略微上升的趋势, 即当  $v_c$  超过 200 m/min 之后, 提高  $v_c$  不再能进一步降低  $F_c$ 。



(a) 主切削力



(b) 切深力

图 2 切削速度对切削力的影响规律

Fig.2 Effects of cutting speed on cutting force in horizontal direction

考虑到对于精密切削加工要求尽量降低切削力, 在切削 CFRP 的过程中应选择 200 m/min 以上的高

速加工。另外, 不同纤维方向角条件下切削力各向异性差别明显, 选择 0° 和 135° 进行切削将获得更小的

切削力。

### 2.1.2 切削厚度对切削力的影响规律

如图3所示,主切削力 $F_c$ 均在切削厚度 $a_c$ 增大到 $15\ \mu\text{m}$ 之后出现了增大变缓的趋势(除 $90^\circ$ 方向),即在 $a_c = 15\ \mu\text{m}$ 的切削厚度成为一个临界值,在小于此临界值时 $F_c$ 随 $a_c$ 变大的增长速度更快,而在大于此临界值之后 $F_c$ 的增长趋势明显放缓。考虑到所采

用正交飞刀的刃口钝圆半径为 $15\ \mu\text{m}$ ,这种 $F_c$ 的变化规律可以解释为钝圆半径的尺度效应,即在切削CFRP时,切削厚度 $a_c$ 对主切削力的影响存在尺度效应,其中刀具刃口钝圆半径是临界值。因此,在精密切削CFRP时选择小的刃口钝圆半径可以获得较小的切削力,切削厚度与刃口的选择存在匹配关系,切削厚度应略大于刀具刃口钝圆半径。

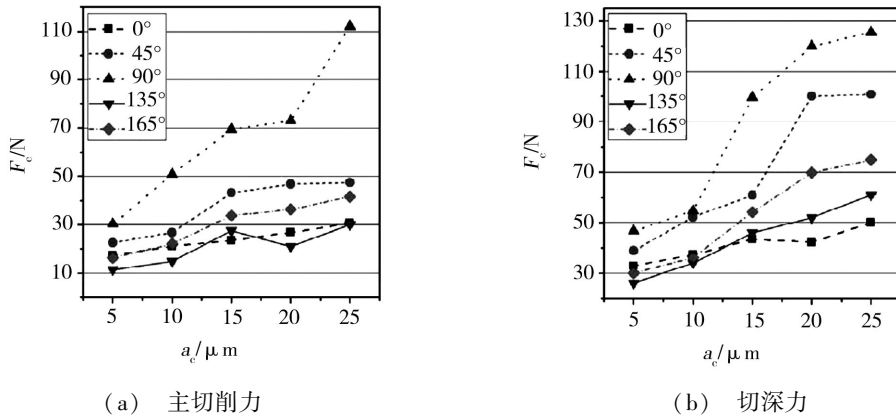


图3 切削厚度对切削力的影响规律

Fig.3 Effects of cutting depth on cutting force

### 2.2 表面粗糙度

如图4所示,在正交切削同向铺层的CFRP单层合板时, $Ra$ 具有显著方向性,不同的纤维方向上 $Ra$ 差异极大。在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的逆纤维方向上, $Ra$ 恶化极为严重,远远超过了顺纤维方向上的 $Ra$ 值,顺纤维方向上, $Ra$ 值较小,加工表面较为平滑; $90^\circ$ 则是 $Ra$ 值陡变的分界线。此外,沿着切削方向上的 $Ra$ 值大于与之对应的加工表面在垂直切削方向上的 $Ra$ 值。可见在保证表面粗糙度方面,选择小的顺纤维方向角或是 $180^\circ$ 可以获得约 $1.5\ \mu\text{m}$ 的表面粗糙度,可以作为精加工的切削方向,而在逆纤维方向角上表面粗糙度的迅速恶化表示不宜选择在精密切削加工中作为切削方向。

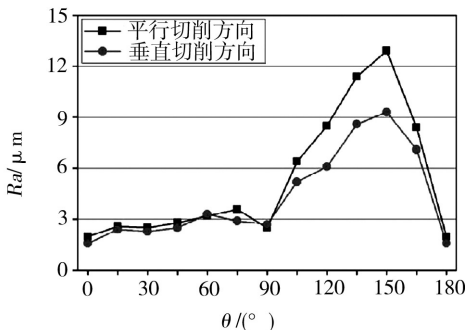


图4 纤维方向角对表面粗糙度的影响规律

Fig.4 Effects of fiber orientation angle on  $Ra$

### 2.3 表面形貌

如图5所示,即为CFRP在不同纤维方向角条件下的已加工表面形貌特征,可以看到 $0^\circ$ 纤维方向角条件下的加工表面的纤维断口较少,主要由长纤维纵向铺成,表面相对平整、光滑,少量存在的纤维断口是在界面层剥分离未完全的纤维受到刀具进一步的挤压所形成的 $45^\circ$ 斜断口; $45^\circ$ 顺纤维切削时的加工表面,可以看到是由纤维横断口组成的表面,表面为规律性起伏表面,表面完整性较好但光滑度相对较差; $90^\circ$ 纤维方向角条件下的加工表面主要由整齐的纤维横断口组成,表面基本平整,表面规律排布的纤维横断口是纤维受到刀具剪切作用而形成的,呈整齐平断口形貌; $135^\circ$ 逆纤维方向角条件下的CFRP已加工表面十分粗糙,存在纤维弯断后留下的空隙(纤维拔出)、凹坑,逆纤维方向角条件下纤维断裂发生的位置有向工件材料内部传播的趋势,从而导致在CFRP内部出现裂纹、撕裂凹坑等。

从表面微观形貌来看,CFRP复合材料在 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 两个纤维方向上形成了较为光滑、平整的表面,可以考虑作为精密加工的切削方向,而在逆纤维方向上表面形貌结果恶劣且有内部裂纹,不宜作为精密加工的切削取向。

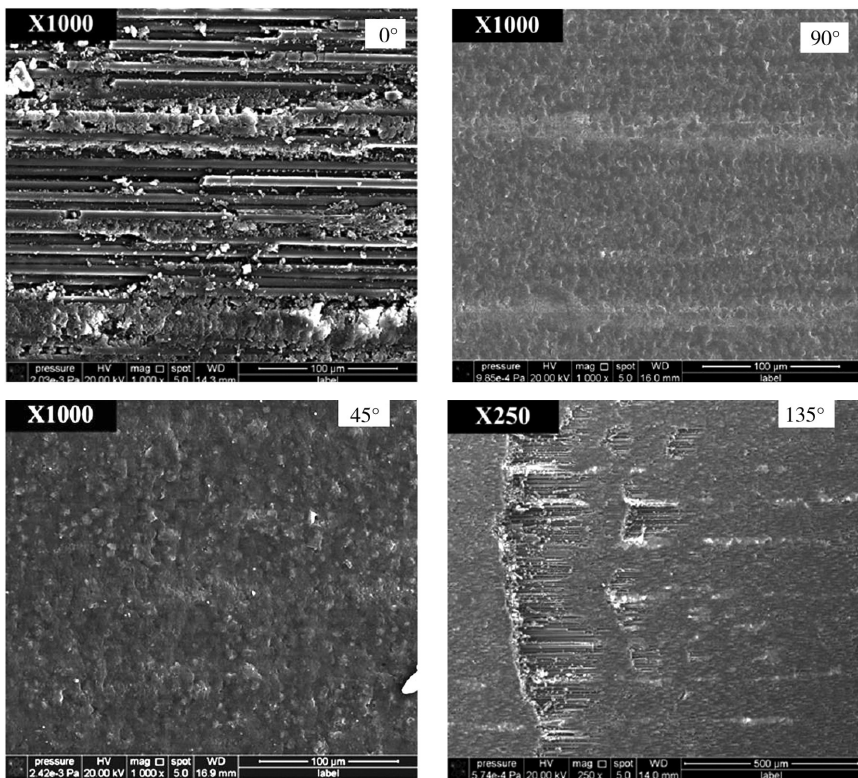


图5 不同纤维方向角条件下的表面微观形貌

Fig.5 Surface topography of CFRP unidirectional laminates cut with different fiber orientations

### 3 结论

(1) CFRP 复合材料与各向同性金属材料不同,其切削加工表现出显著的各向异性,因此在精密切削加工中必须选择合适的切削取向才能得到较小的切削力和较高的表面质量;

(2) 在精密切削 CFRP 的过程中应选择 200 m/min 以上的高速加工,以获得较小的切削力。不同纤维方向角条件下切削力各向异性差别明显,选择 0° 和 135° 进行切削将获得更小的切削力。

(3) 在精密切削 CFRP 时选择小的刃口钝圆半径可以获得较小的切削力,切削厚度与刃口的选择存在匹配关系,切削厚度应略大于刀具刃口钝圆半径。

(4) CFRP 复合材料在 0° 和 90° 两个纤维方向上形成了较为光滑、平整的表面,可以考虑作为精密加工的切削方向,而在逆纤维方向不宜作为精密加工的切削取向。

#### 参考文献

- [1] 黎小平, 张小平, 王红伟. 碳纤维的发展及其应用现状[J]. 高科技纤维与应用, 2005(5): 28-34, 44.
- [2] 上官倩芩, 蔡迎华. 碳纤维及其复合材料的发展及应用[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2008(3): 275-279.
- [3] 陈祥宝, 张宝艳, 邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. 中国材料进展, 2009(6): 2-12.
- [4] TETI R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 611-634.
- [5] 张厚江. 单向碳纤维复合材料直角自由切削力的研究[J]. 航空学报, 2005(5): 604-609.
- [6] 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.
- [7] WANG X M, ZHANG L C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(10): 1015-1022.