

纤维方向对碳纤维复合材料加工性能的影响<sup>\*</sup>

## Effect of Fiber Orientation on Machining Performance of Carbon Fiber-Reinforced Plastics

上海飞机制造有限公司 龚佑宏 韩舒 杨霓虹  
南京航空航天大学 韩胜超

**[摘要]** 由于碳纤维复合材料(CFRP)的各向异性,其纤维铺层方向是影响加工性能的重要因素。本文以单向碳纤维复合材料(UD-CFRP)为研究对象,选用4种不同的纤维方向角度铺层的碳纤维复合材料结构进行铣削试验研究。通过从切削力、切口质量和刀具磨损等方面的分析,得出了纤维方向角 $\theta$ 小于 $90^\circ$ 时,碳纤维复合材料结构铣削力较大,对刀具磨损较严重,已加工表面切口质量较好的结论。

**关键词:** 碳纤维复合材料 纤维方向 切口质量 刀具磨损 切削力

**[ABSTRACT]** The fiber orientation is a key factor that determines the machining performance of carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) because it's anisotropic. Unidirectional carbon fiber-reinforced plastics (UD-CFRP) which have four different fiber orientation angles are selected by milling experiment, and the cutting force, cutting surface quality and the wear of tool are analyzed. The conclusion is researched that the cutting force will be higher and the wear of tool will be more, but the cutting surface will be good when the fiber orientation angle  $\theta < 90^\circ$  during the cutting process of UD-CFRP.

**Keywords:** CFRP Fiber orientation Cutting surface quality Wear of tool Cutting force

碳纤维复合材料因其具有高比强度、高比模量、良好的抗疲劳性和抗腐蚀性等优点,目前已广泛应用于航空航天等领域,是当前国际上竞争最激烈的高技术新材料之一。为了满足航空航天等领域高精装配要求,碳纤维复合材料制件需要进行机械加工以获得良好的加工表面质量。而碳纤维复合材料因其各向异性、层间强度低、硬度高、导热性差等特点,在切削过程中易产生基体开裂、分层、纤维拔出等缺陷,属于典型的难加工材料。目前国内外学者已在碳纤维复合材料的切削机理方面

进行了一系列的研究。

A.Koplev等<sup>[1]</sup>在1983年利用快速落刀试验法第一个提出复合材料的切屑形成过程是材料断裂过程的观点。日本大阪大学的花崎伸作等人<sup>[2]</sup>利用有限元分析方法得出碳纤维被切断是由刀具前进引起的垂直于纤维自身轴线的剪切应力超过纤维剪切强度极限造成的。北京航空航天大学的张厚江等<sup>[3]</sup>对单向碳纤维的切削机理进行了理论分析研究,并给出了切削力的理论计算公式。张秀丽等<sup>[4]</sup>通过显微镜观察切削过程和借助SEM观察切削表面研究了纤维方向对玻璃纤维复合材料加工质量的影响。这些研究均取得了一定的结果,但针对纤维方向对碳纤维复合材料结构铣削性能影响的试验研究尚少。

本文以单向碳纤维复合材料(UD-CFRP)为研究对象,通过改变不同的纤维方向角度进行铣削试验,从切削力、切口质量和刀具磨损等方面对碳纤维复合材料的加工机理进行分析,为碳纤维复合材料铣削加工表面质量的改善和刀具的优选提供基础。

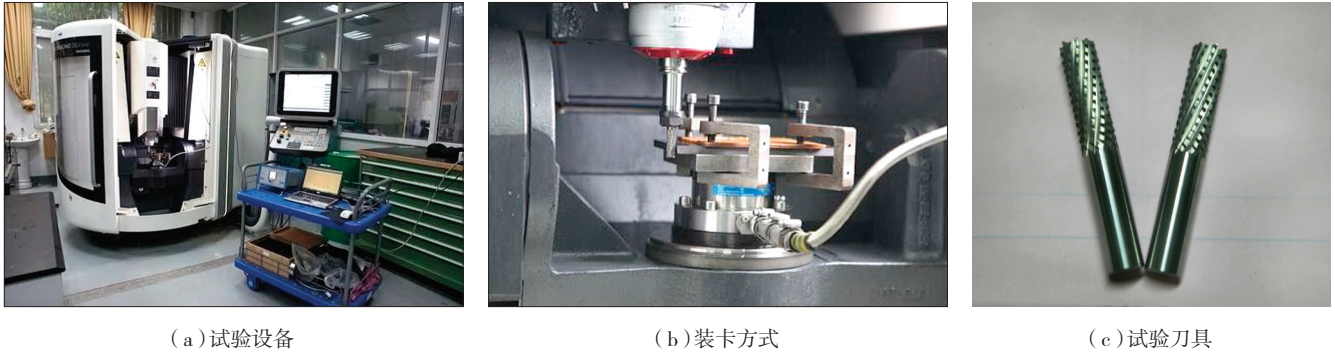
## 1 实验材料及方法

本次试验用机床为DMG HSC 20 linear 超声辅助五轴加工中心,如图1(a)所示,最大转速为24000r/min,最大进给速度为5m/min。碳纤维复合材料实验板采用压条压板的方式进行装卡,如图1(b)所示。试验用刀具为硬质合金多刃铣刀,如图1(c)所示。

为了研究方便,从单向碳纤维复合材料试样研究入手。试验采用中模高强碳纤维增韧环氧树脂预浸料单向铺贴制备而成的复合材料试样,铺层共32层,试件厚约6mm。选用4种纤维方向角 $\theta$ (纤维方向角 $\theta$ 为切削速度方向与纤维的铺层方向的夹角,如图2所示)进行试验,这4种纤维方向角 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 。

采用项目前期研究优化后的切削参数<sup>[5]</sup>对上述4种不同纤维铺层方向的碳纤维复合材料进行铣削试验,试验过程中采用Kistler 9272测力仪对铣削力进行测量和记录,铣削完成后,采用Hitachi S3400扫描电镜对刀

\* 中国商飞“C919客机复合材料结构件制造工艺研究”技术攻关引进技术资助。



(a) 试验设备 (b) 装卡方式 (c) 试验刀具

图1 试验设备和铣刀结构

Fig.1 Experimental equipments and structure of milling tool

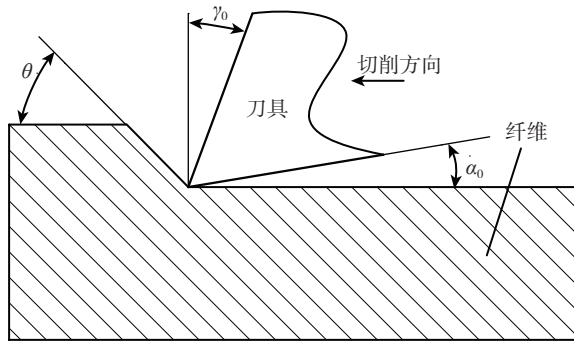


图2 纤维方向角示意图

Fig.2 Diagram of fiber orientation angle

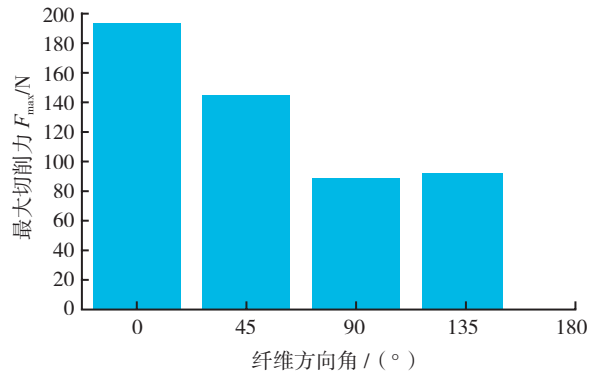


图3 不同纤维方向角最大切削力对比图

Fig.3 Contrast figure of cutting force on different fiber orientation angles

具的磨损情况和已加工试验件切口质量进行检测,采用 Mahr M1 粗糙度测量仪检测已加工复材切口的粗糙度。铣削试验切削参数及试验结果见表 1。

表1 铣削试验参数及检测结果

铣削类型	顺 铣				
铣削参数	切削速度 $V_s=157m/min$			进给量 $V_f=1000mm/min$	
	径向切深 $a_e=1mm$			轴向切深 $a_p=6mm$	
纤维方向角 $\theta / (^\circ)$	最大切削力 /N			刀具后刀面磨损量 $V_B/\mu m$	切口表面粗糙度 $R/\mu m$
	$F_{xmax}$	$F_{ymax}$	$F_{zmax}$		
0	180.0	40.14	58.23	72	2.904
45	127.2	50.54	48.58	65	1.788
90	69.95	45.12	31.67	34	2.911
135	76.60	36.99	35.40	40	4.596

## 2 结果与讨论

### 2.1 切削力及切削比能分析

通过表 1 中各纤维方向角  $\theta$  条件下的最大切削力数据,可进一步画出不同纤维方向角  $\theta$  在铣削时最大切削力的对比图(图 3)。

从图 3 可以看出,不同纤维方向角  $\theta$  下碳纤维复合

材料铣削时的最大切削力  $F_{max}$  由大到小分别对应的纤维方向角为  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$  和  $\theta=90^\circ$ 。分析认为,碳纤维垂直于纤维轴向的剪切强度小于其轴向的拉伸强度,故当刀具切削纤维时,垂直于纤维切削所需切削力小于平行于纤维拉断纤维所需切削力。当纤维方向角  $\theta$  依次为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $90^\circ$  时,刀具垂直于纤维轴向切削的几率逐渐增大,平行于纤维轴向切削的几率逐渐减小,综合作用下,铣削力  $F_{max}$  逐渐减小。

切削比能是指去除单位体积 ( $1mm^3$ ) 材料所消耗的能量,是评价刀具切削性能的重要指标之一。若使用同一刀具切削不同材料时,切削比能越小则说明材料的切削性能越好。切削比能的定义见式(1)。

$$e_s = \frac{F_x V_s}{v_w a_p b} \quad (N \times m^{-2}) \quad (1)$$

式中,  $F_x$  为垂直于进给方向的切削力,  $V_s$  为切削速度,  $v_w$  为进给速度,  $a_p$  为轴向切深,  $b$  为径向切深。

根据表 1 和式(1)可得不同纤维方向角  $\theta$  下铣削碳纤维复合材料的切削比能,如表 2 所示。

由表 2 可知,不同纤维方向角  $\theta$  其切削比能由大到小的顺序分别为:  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$  和  $\theta=90^\circ$ 。当纤维方向角  $\theta \geq 90^\circ$ , 其切削性能要优于  $\theta < 90^\circ$ , 纤维

表2 不同纤维方向角下的切削比能

纤维方向角 $\theta / (^\circ)$	切削比能 $e_s / (N \times mm^{-2})$
0	3.141
45	2.220
90	1.221
135	1.337

方向角  $\theta=90^\circ$  时,其切削性能最优;纤维方向角为  $0^\circ$  时,其切削性能最差。

### 2.2 切口质量分析

通过表 1 中切口粗糙度数据可进一步画出不同纤维方向角  $\theta$  下碳纤维复合材料铣削的切口粗糙度对比图,如图 4 所示。

由图 4 可知,纤维方向角  $\theta=135^\circ$  时,其已加工表面粗糙度值最大;纤维方向角  $\theta=45^\circ$  时,其已加工面表面粗糙度值最小。即当切削方向顺着纤维铺层方向时,其切口质量较好,而当切削方向逆着纤维铺层方向时,其切口质量较差。

为深入了解纤维方向角对已加工表面形貌的影响,本文采用扫描电镜对表 1 中已加工表面进行了观察,如图 5 所示。

由图 5 可知,当纤维方向角  $\theta=135^\circ$  时,其已加工表面质量最差。此种情况属于逆切,刀具对前端材料的推挤作用导致复合材料间的层间分离。刀具前端材料在刀具作用下发生弯曲,当弯曲应力超过碳纤维复合材料的弯曲强度极限时,底部发生断裂。断裂点发生在最大弯曲应力处,所以断裂点往往不在刀刃处,而是在刀刃的下方。刀具继续前进,刀具对其前端材料推挤作用加

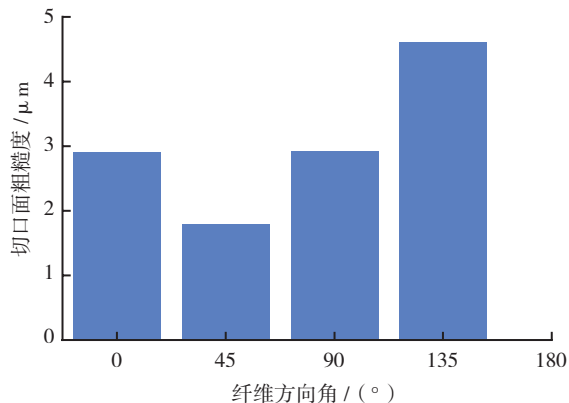


图4 不同纤维方向角切口粗糙度对比图  
Fig.4 Roughness of cut surface on different fiber orientation angles

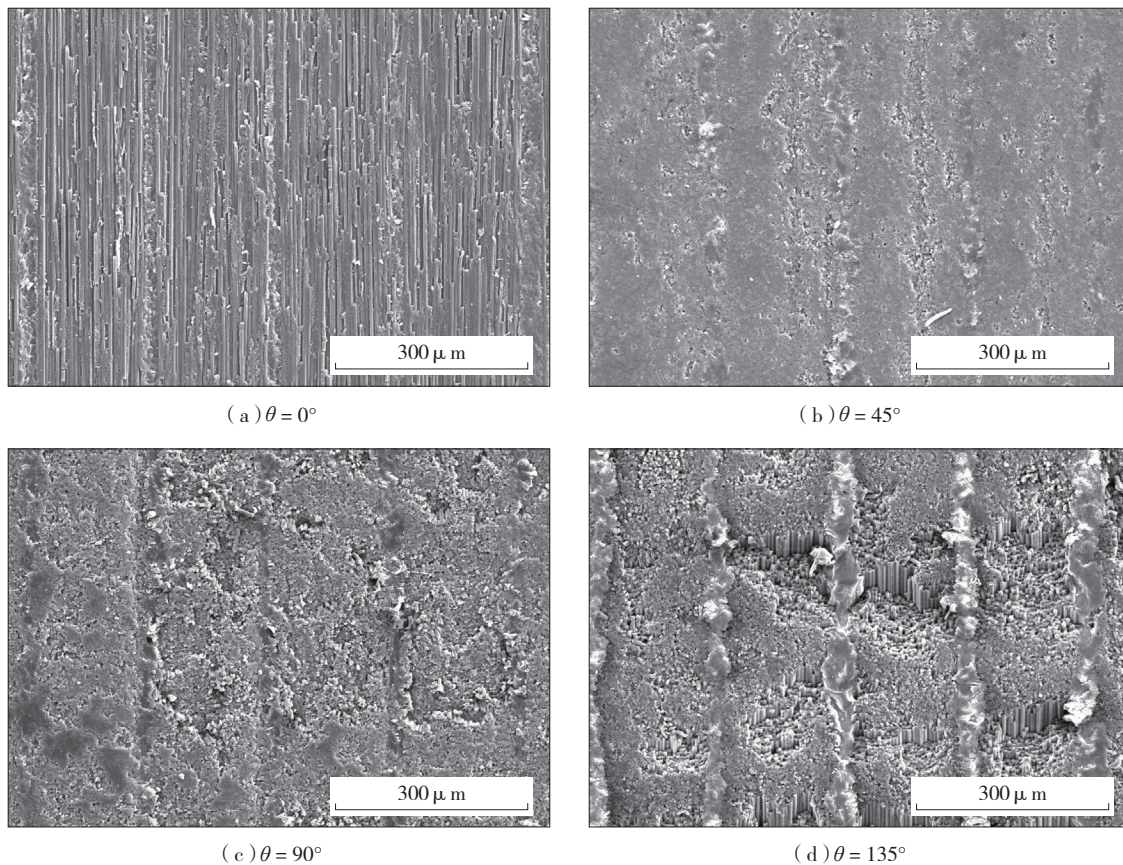


图5 不同纤维方向角下切口SEM图  
Fig.5 SEM of cut on different fiber orientation angles

强,当前端材料底部断裂点处的剪切应力超过材料剪切强度极限时,发生剪切断裂,形成切屑,同时已加工面形成微坑。

### 2.3 刀具磨损分析

根据表 2 中数据可得不同纤维方向角  $\theta$  下铣削加工时其刀具磨损量与切削力的对应关系,如图 6 所示。

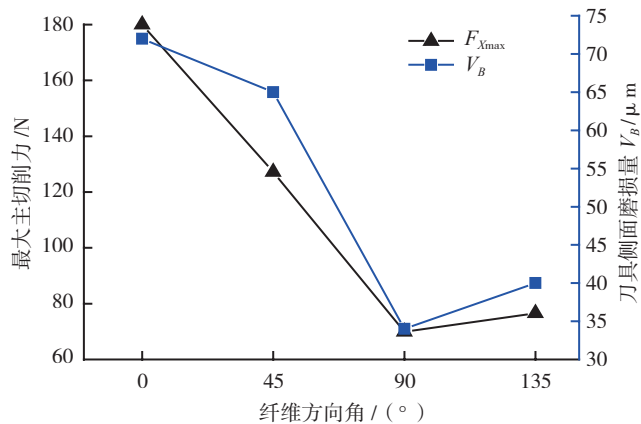


图6 不同纤维方向角铣削刀具磨损量与主切削力关系  
Fig.6 Relation of wear of tool flank and maximum main cutting force on different fiber orientation angles

由图 6 可知,刀具磨损量和切削力是相互作用、相互关联的两个参量。同时可以得知,不同纤维方向角对刀具磨损作用由大到小依次为  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$  和  $\theta=90^\circ$  方向。分析认为刀具后刀面磨损主要由回弹的纤维对后刀面的摩擦造成。当纤维方向角为  $\theta=0^\circ$  时,刀具对纤维层有压迫的切削分力,纤维层产生变形,切削时刀具离开,纤维层恢复形状,对后刀面产生挤压摩擦,而  $0^\circ$  纤维的回弹量最大,故该层纤维处刀具的后刀面磨损最大。其他纤维方向角对刀具的摩擦规律同理可解释。

### 3 结论

(1) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,纤维方向角  $\theta$  对切削力和切削比能有一定的影响。

当纤维方向角  $\theta \geq 90^\circ$ ,其切削性能要优于  $\theta < 90^\circ$  时,纤维方向角  $\theta=90^\circ$ ,其切削性能最优;纤维方向角为  $0^\circ$  时,其切削性能最差。

(2) 纤维方向角  $\theta$  是影响碳纤维复合材料层合板铣削加工表面质量的重要因素。通过对切口形貌及粗糙度的分析,纤维方向角  $\theta=45^\circ$  时,其已加工表面质量最好;当纤维方向角  $\theta$  为  $135^\circ$  时,其已加工表面质量最差。即,当切削方向顺着纤维铺层方向时,其切口质量较好,而当切削方向逆着纤维铺层方向时,其切口质量较差。

(3) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,不同纤维

维方向角  $\theta$  对刀具磨损作用不一样。磨损量由大到小依次为  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$  和  $\theta=90^\circ$ 。

(4) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,应综合考虑纤维方向角对切口质量和刀具寿命影响,尽量使刀具切削方向垂直于纤维方向进行,且避免逆切情况。

### 参考文献

- [1] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chip and cutting forces in machining CFRP. Composite, 1983, 14(4):371-376.
- [2] 花崎伸作. CFRP 切削における工具摩耗机构. JSME C 编. 日本机械学会论文集. 日本: 日本机械学会, 1994, 60 (1):297-302.
- [3] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料切削机理的研究. 航空制造技术, 2004(7):57-59.
- [4] 张秀丽, 谢朝晖, 张恒. 纤维方向对复合材料加工质量影响的试验研究. 中国机械工程, 2009, 20(21):2617-2620.
- [5] Gong Y H, Yang N H, Shu H, et al. Surface morphology in milling multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. Advanced Materials Research, 2013(683): 158-162. (责编 日午)

(上接第 136 页)

材料自动化生产的重要因素。

### 4 未来趋势展望

自动丝束铺放技术是目前先进的低成本复合材料构件制造技术,它极大地发挥了复合材料的优势,如可设计性好、易于整体成型等,但是目前由于缺乏成熟的丝束铺放工艺设备,无法为丝束铺放系统提供良好平台,加之相关设备的限购,极大地增加了该项工艺研究的难度。因此,我们必须立足现有设备,积极积累相关工艺经验,为将来丝束铺放工艺大规模工程化应用奠定良好的技术基础。

### 参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2008(1):50-53.
- [3] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展. 中国材料进展, 2009, 28(6):28-32.
- [4] 邵冠军, 游有鹏, 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (S1):144-148.
- [5] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现. 武汉大学学报, 2007, 53(5):613-616.
- [6] 林福建. 自由型面复合材料零件铺放束成型轨迹规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [7] 李善缘, 王小平, 朱丽君. 复合材料铺丝成型中的路径规划. 宇航材料工艺, 2009(2):25-29.
- [8] 周焱. 复合材料自动铺丝 CAD 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. (责编 亦非)