

CFRP 曲面铣削力及加工缺陷研究

陈雪梅¹ 陈清良¹ 周井文² 陈 燕² 傅玉灿²

(1. 成都飞机工业(集团)公司, 成都, 610091; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)曲面结构不断变化的工件倾角使得在加工过程中易产生分层、毛刺等缺陷。为研究工件倾角对 CFRP 曲面结构可加工性的影响规律,采用金刚石涂层铣刀对不同倾角下 CFRP 叠层平板结构进行顺铣加工试验,对不同坐标系下的铣削力和加工侧面、表面缺陷进行了研究。研究表明,随工件倾角的增大,水平方向上每齿所切材料平均厚度与截面积均减小,等效轴向切深逐渐增大,但是每齿去除材料体积保持不变。机床坐标系下的铣削力几乎不随工件倾角的变化而变化。而在工件坐标系下,铣削力沿工件厚度方向逐渐增大,沿工件长度方向逐渐减小。同时随着工件倾角的增大,侧面表层分层缺陷不断加重,纤维束发生弯曲,裂纹沿纤维方向逐渐扩展至表层内部,加工表面遭受破坏铺层数量也同样增加。

关键词: 碳纤维增强复合材料;加工缺陷;分层;铣削力;工件倾角

中图分类号: TB332; TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0694-07

Study on Milling Force and Machining Defects During Trimming CFRP Curved Surface Structures

Chen Xuemei¹, Chen Qingliang¹, Zhou Jingwen², Chen Yan², Fu Yucan²

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Company, Chengdu, 610091, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The continuous variation of workpiece inclined angle of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) curved surface structures could result in machining defects such as burrs and delamination. In order to investigate the influence of workpiece inclined angle on the machinability of CFRP curved surface structures, down milling is conducted on CFRP laminates with various inclined angles by using a diamond-coated cemented carbide tool. The milling forces in different coordinate systems and machining surface deficiency are studied. The results show that the sectional area and average cutting thickness by pre tooth decrease, and equivalent depth of cut increases with the increase of workpiece inclined angle. However the volume of material to be removed by pre tooth always keeps constant. The milling forces in machine coordinate system also keep constant, while the milling forces in workpiece coordinate system increase along the direction of workpiece thickness and decrease along the direction of workpiece length. The defects of workpiece profile and finished surface get severe with the increase of workpiece inclined angle. The fiber bundles will bend instead of rupture and crack grows into the workpiece along the fiber direction. The numbers of damaged plies also increase with the increase of workpiece inclined angle.

Key words: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); machining defect; delamination; milling force; workpiece inclined angle

基金项目: 国家自然科学基金(51375234)资助项目。

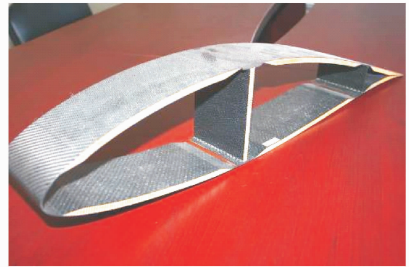
收稿日期: 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

通信作者: 陈燕,女,教授, E-mail: ninaych@nuaa.edu.cn。

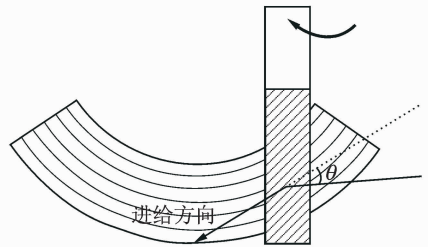
碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有高强度、轻质、高耐腐蚀性和低热膨胀系数等优点,广泛应用于航空航天、先进武器系统、汽车、精密仪器、电子和体育用品等^[1-3]。近年来,国内外对 CFRP 的加工也开展了很多研究。文献[4]对 CFRP 进行正交切削试验,发现表面质量取决于纤维方向,并且当纤维方向与切削方向平行时比与切削方向垂直时得到较好的表面质量。文献[5]进行了 CFRP 的铣削实验,对切屑的形成、表面粗糙度和切削力进行了观察;并对纤维分别由于断裂和弯曲产生的粉末状切屑和带状切屑进行了分析。文献[6]在 8 °C 冷却空气下对 CFRP 进行铣削试验发现 45°方向纤维加工表面质量最差,0°方向纤维加工表面质量最好。文献[7]对 CFRP 进行了切削试验,同时得出了铣削的最佳工艺参数和经验方程。文献[8]用盘铣刀对 CFRP 进行了铣削试验,研究了切削速度、纤维方向等对加工性能的影响。文献[9]利用 2 种不同制作方式的 PCD 刀具加工 CFRP,发现切削力与刀具磨损均与纤维方向关系巨大。文献[10,11]无论是从理论分析和试验发现都认为在加工 CFRP 过程中刀具刃口半径是一个不可忽略的因素,它能够影响纤维的断裂形式、缺陷的形成等。文献[12]对 CFRP 进行了铣削试验,通过正交试验分析了影响粗糙度的主次因素,同时对粗糙度进行了经验公式的拟合,认为单一的粗糙度并不能完整表征表面质量。文献[13]总结了多年来树脂基复合材料加工研究,并逐一进行了分析。文献[14]总结了包括树脂基与金属基复合材料的加工研究,对 CFRP 研究发现由于碳纤维比玻璃纤维和芳纶纤维具有较高的导热性,因此适合高速加工。同时加工 CFRP 更加应该注重刀具的选择。总体而言,CFRP 由于其增强体种类、基体类型、纤维角度、铺层方式及制造方式的不同,加之材料本身的特性使得研究其加工过程比较困难。多年来,国内外诸多学者对 CFRP 的研究为该领域的发展打下坚实的基础,但是相当多的研究均是基于 CFRP 层合板的加工。以铣削为例,几乎所有研究中 CFRP 层合板的装夹方式均是水平装夹,刀具进给方向也是水平方向。但是相当多的 CFRP 结构件(如图 1(a)所示),其并不是平板结构,纤维铺层的铺设和固化成型都是基于产品结构而设计专一模具,因此必然存在相当多的曲面结构。因此在实际加工过程中几乎不可能在任意时刻保持工件水平或者刀具轴向与 CFRP 工件厚度方向垂直。在目前航空航天工

业中,对于 CFRP 曲面结构的铣削加工,刀具的进给方向一般沿与工件瞬时接触点的切向方向,定义工件上任一点切向与水平方向的夹角为工件倾角 θ (如图 1(b)所示),其工件倾角 θ 是不断变化的。

基于国内外关于 CFRP 曲面结构工件的加工研究目前仍然较少,本文拟开展工件倾角 θ 对 CFRP 工件的可加工性研究。利用五轴加工中心,通过变化机床 A 轴使得 CFRP 叠层复合材料工件获得不同的工件倾角 θ 。在此基础上研究不同工件倾角 θ 下铣削力及加工表面缺陷的变化规律,从而为 CFRP 曲面结构的铣削研究加工打下试验基础。



(a) 工件倾角不断变化的 CFRP 曲面结构件



(b) CFRP 曲面工件加工示意图

图 1 工件倾角不断变化的 CFRP 曲面结构件及其加工示意图

Fig. 1 CFRP curved surface structures with various workpiece inclined angles and diagram of trimming of CFRP curved surface structures

表 1 叠层 CFRP 层合板的规格和参数

Tab. 1 Properties and configuration of machined CFRP laminates

增强体	基体	纤维体积比/%	铺层顺序	铺层数	厚度 L/mm	规格/mm
T800 碳纤维	环氧树脂	65	[(135/90/45/0) ₆] _s	32	9	150×200

1 试验材料及方法

试验在 DMG HSC 20 linear 超声辅助五轴精密加工中心上进行(如图 2(a)所示),该机床最大转速 42 000 r/min,最大进给速度 5 m/min。试验刀具为金刚石涂层多齿铣刀(如图 2(b)所示),直径 10 mm,齿数为 12 排,刀具螺旋角为 13.6°。

工件装夹及加工示意图如图 2(c)所示,通过旋转机床 A 轴,获得不同的工件倾角 θ 。刀具转速 N 恒定为 10 000 r/min,进给速度 v_f 恒定为 4 000 mm/min,方向始终沿工件长度方向。径向切深 a_e 恒定为 1 mm,轴向切深随工件倾角的变化而变化,由于其每齿所切除材料形状并不是规则的柱体,因此其等效轴向切深 a_p 为

$$a_p = L / \cos\theta \quad (1)$$

式中: L 为工件厚度, θ 为工件倾角。

综合考虑到螺旋角的影响,设定工件倾角 θ 为 $13.6^\circ, 28.6^\circ, 43.6^\circ$ 和 58.6° ,使得刀具螺旋角沿切削平面展开线与工件厚度方向夹角为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 。铣削方式为顺铣加工,切削液为嘉实多 Syntilo 9954 水基乳化液,体积分数为 4%。实验材料为 CFRP 叠层复合材料,具体参数及规格见表 1。检测内容包括铣削力测量,加工表面缺陷观察。使用 Kistler 9265B 三向压电式测力系统(包括 Kistler 5019A 电荷放大器及 Kistler Dynoware 数据采集系统)在工件坐标系下对铣削力进行测量(如图 2(c)所示 F_x, F_y, F_z 为工件坐标系下直接测量的铣削力, F_x, F_h, F_v 为机床坐标系下的铣削力)。采用 KH-7700 三维视频显微镜对加工表面和加工侧边缺陷进行观测。

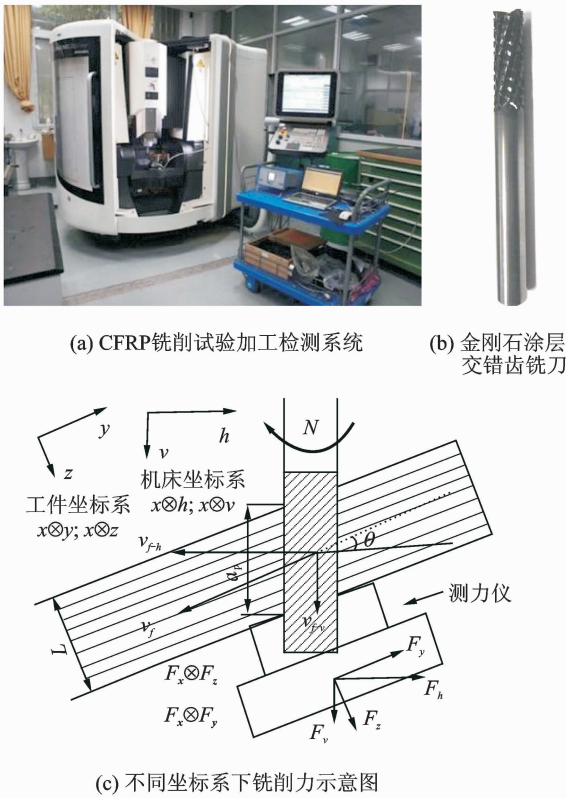


图 2 试验加工检测系统及铣削力测量示意图

Fig. 2 Experimental setup and diagram of measurement of milling force for milling test

2 结果与讨论

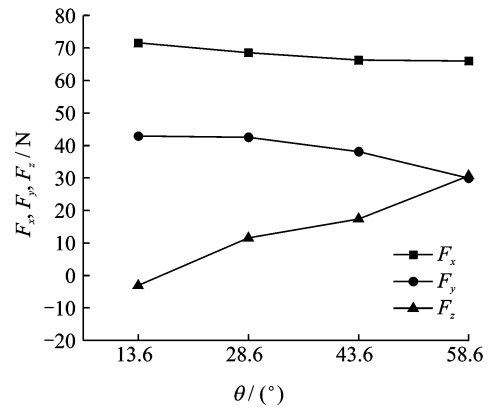
2.1 切削力

如图 2(c)所示为变工件倾角切削示意图,将刀具进给速度 v_f 分别沿水平和垂直方向分解,可得进给速度 v_{f-h} 与 v_{f-v} 。将测得的工件坐标系下铣削力 F_x, F_y, F_z 沿水平方向和垂直方向重新合成可得机床坐标系下铣削力 F_x, F_h, F_v 。

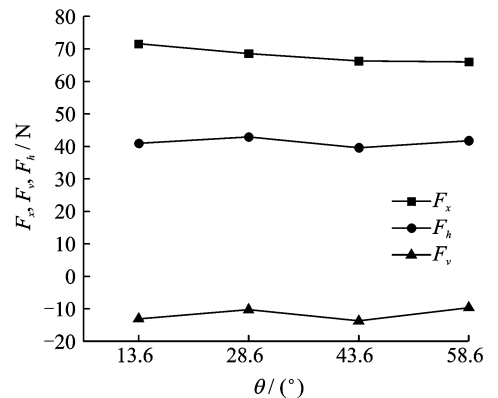
$$\begin{cases} v_{f-h} = v_f \cos\theta \\ v_{f-v} = v_f \sin\theta \\ f_{z-h} = \frac{v_{f-h}}{Nz} \\ F_x = F_x \\ F_h = F_z \sin\theta + F_y \cos\theta \\ F_v = F_z \cos\theta - F_y \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为工件倾角; N 为刀具转速; z 为铣刀齿数; f_{z-h} 为水平方向每齿进给量。

图 3 为工件坐标系下铣削力 F_x, F_y, F_z (图 3(a))与机床坐标系下铣削力 F_x, F_h, F_v (图 3(b))



(a) 工件坐标系下 F_x, F_y, F_z 趋势图



(b) 机床坐标系下铣削力 F_x, F_h, F_v 趋势图

图 3 工件坐标系下 F_x, F_y, F_z 及机床坐标系下 F_x, F_h, F_v 随 θ 变化趋势图

Fig. 3 Milling forces F_x, F_y, F_z and resultant forces F_x, F_h, F_v with various workpiece inclined angles in different coordinate systems

随工件倾角 θ 的变化趋势图。可以发现随着工件倾角 θ 的增大,铣削力 F_x 大小基本不变,铣削力 F_y 逐渐减小,铣削力 F_z 逐渐增大。然而机床坐标系下铣削力 F_x, F_h, F_v 均几乎不随工件倾角 θ 的变化而变化。

然而对于侧铣加工而言,影响其切削力大小的主要因素为每齿进给量、轴向切深及径向切深等,具体如图 4 所示。根据文献[15,16]关于铣削方面的研究,在铣削过程中每齿所切材料厚度是不断变化的,因此采用 h_m 来表示水平方向平均每齿切厚。同时为了计算水平方向每齿去除材料体积 V ,分别计算了每齿去除材料截面积 S 及等效轴向切深 a_p 等切削参数。

$$\left\{ \begin{aligned} h_m &= \frac{1}{\varphi_{\Sigma}} \int_0^{\varphi_{\Sigma}} f_{z-h} \sin\varphi d\varphi = \frac{f_{z-h} a_e}{R \arccos(1 - a_e/R)} \\ S &= \int_{-\frac{1}{2}f_{z-h}}^{\frac{1}{2}f_{z-h}} (a_e - R + \sqrt{R^2 - x^2}) dx - \int_{f_{z-h} - \sqrt{2a_e R - a_e^2}}^{\frac{1}{2}f_{z-h}} (a_e - R + \sqrt{R^2 - (x - f_{z-h})^2}) dx \\ a_p &= L / \cos\theta \\ V &= S \times a_p \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: h_m 为平均每齿切厚; φ_{Σ} 为接触角; φ 为瞬时接触角; f_{z-h} 为水平每齿进给; a_e 为径向切深; R 为刀具半径; S 为每齿去除材料截面积; a_p 为等效轴向切深; L 为工件厚度; θ 为工件倾角; V 为每齿去除材料体积。

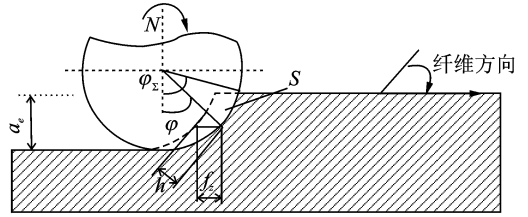


图 4 平均每齿切厚 h_m 与每齿所切材料截面积 S
Fig. 4 Schematic of average cutting thickness h_m and section area S

如图 5 所示,随着工件倾角 θ 的不断增大,平均每齿所切材料厚度 h_m 与每齿去除材料截面积 S 不断减小,等效轴向切深 a_p 不断增大,而每齿去除材料体积 V 几乎不变。说明随着工件倾角 θ 的不断增大,每齿所切材料越来越薄,与此同时被切材料沿刀具轴向越来越长,但每齿被去除材料体积保持不变。

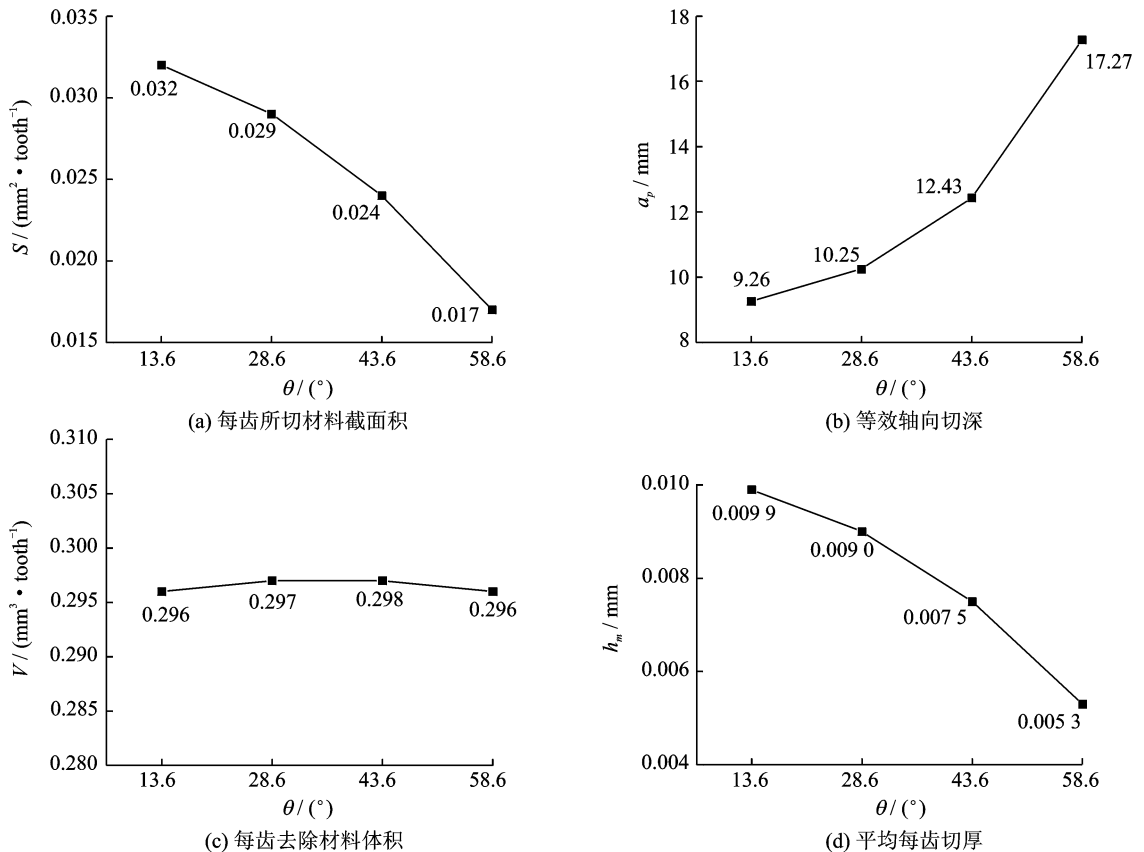


图 5 工件倾角 θ 对各切削参数的影响规律

Fig. 5 Influences of workpiece inclined angle on cutting parameters

根据金属切削原理,一般认为铣削力随平均每齿切厚与轴向切深的增大而增大。然而随着工件倾角 θ 的增大,平均每齿切厚 h_m (或者每齿去除材料截面积 S) 与轴向切深 a_p 的作用此消彼长,最终使得铣削合力几乎不随着工件倾角 θ 的变化而变化。尽管机床坐标系下铣削力 F_x, F_y, F_z 并不随着工件倾角的变化,但是随着工件倾角 θ 的增大(如图 3(a)所示),工件坐标系下铣削力 F_y 逐渐减小,垂直于其厚度方向的铣削力 F_z 逐渐增大。然而当铣削力 F_z 过大时会使得工件产生分层等缺陷,这对于 CFRP 加工而言是需要极力避免的重大缺陷。

2.2 加工表面缺陷

图 6 所示为叠层 CFRP 工件在不同工件倾角

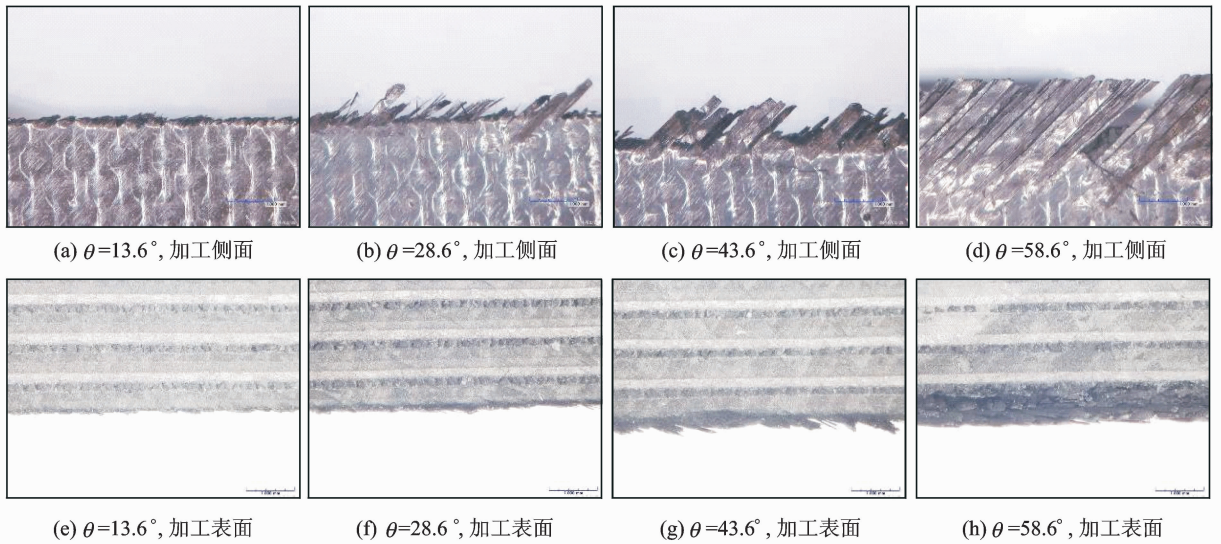


图 6 加工侧面及加工表面缺陷趋势图

Fig. 6 Machining defects of workpiece profile and finished surface with various workpiece inclined angles

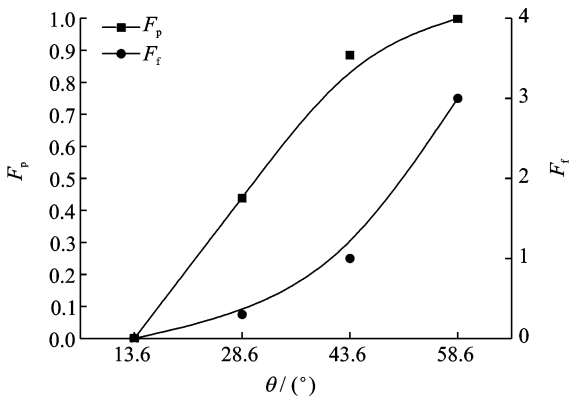


图 7 加工侧面分层因子 F_p 与表面分层因子 F_f 变化趋势

Fig. 7 Delamination factors F_p and F_f with various workpiece inclined angles

θ 下加工侧面和加工表面缺陷趋势图,可以发现随着工件倾角 θ 的增大,无论是加工侧面还是加工表面的缺陷均呈现增大趋势,且缺陷形式为典型的表层铺层发生的分层缺陷。为能够量化分层缺陷的破坏程度,建立关于加工侧面分层因子 F_p 和加工表面分层因子 F_f ,其中定义侧面分层因子 F_p 为沿径向测量的分层长度(或未切断纤维长度) l_p 与径向切深 a_e 的比值;表面分层因子 F_f 为沿工件厚度方向测量的遭受破坏深度 l_f 与单一铺层厚度 d 的比值

$$\begin{cases} F_p = l_p / a_e \\ F_f = l_f / d \end{cases} \quad (4)$$

图 7 所示为侧边分层因子 F_p 与表面分层因子 F_f 随工件倾角 θ 的变化趋势图。可以发现随着倾

角的增大, F_p 及 F_f 均呈现增大趋势。结合图 6 具体表面形貌可以发现当工件倾角较小 ($\theta = 13.6^\circ$) 时,加工侧面(图 6(a))较为完整,有少量微观毛刺和啃边,同时加工表面完整,下表面铺层并没有出现分层现象。当工件倾角增大时 ($\theta = 28.6^\circ$ 和 43.6°) 可以发现加工侧面出现明显的未切断纤维束,同时可见纤维束由松散无序的状态逐渐转为平行四边形片状,且长度也逐渐增大。这属于向典型的表面分层转变,表层纤维束由于缺少相邻铺层纤维的支撑作用,在分力 F_z 的作用下垂直于铺层平面发生弯曲。部分纤维束发生弯曲断裂而被去除,而大部分纤维束仅仅发生弯曲并没有断裂,当刀具离开切削区域后,其回弹至初始位置形成未切断纤维束,由于本身树脂基体属于热固性材料,当纤维

间树脂裂纹产生并发生扩展后,即使纤维束回弹至初始位置仍然存在,纤维与基体之间的结合已经遭受破坏,形成所谓的分层缺陷。当工件倾角达到最大时($\theta=53.6^\circ$),可以发现加工侧面呈现典型的梳排状,片状的纤维层裂纹几乎一致沿着纤维方向并延伸至材料内部,同时分层因子 F_p 达到 1。这一现象说明此时表层纤维束在加工过程中仅仅发生弯曲,而完全没有被切断,同时纤维束之间裂纹均统一沿纤维方向平行排列,说明裂纹一定是在纤维与树脂基体之间扩展的,裂纹并没有扩展至纤维径向。这与之之前工件受到垂直于厚度方向的分力 F_z 的分析是完全一致的,说明随着分力的增大,碳纤维更加容易集束发生弯曲而不是断裂,从而形成分层缺陷。对加工表面分层因子 F_f 的分析同样可以发现,随着工件倾角 θ 的增大,遭受破坏的铺层数量由不到一层(图 6(e))最终发展至三层(图 6(h)),并在 0° 纤维方向铺层得以终止。结合文献[17,18]关于 CFRP 铣削应力场分布理论计算可知, 0° 铺层在分力 F_z 作用下会以最大应力处为中心形成对称的应力场。如图 8 所示, 0° 铺层与相邻铺层间出现了对称型开口分层,但是纤维束并没有发生断裂,加工表面完整且无未切断纤维束。

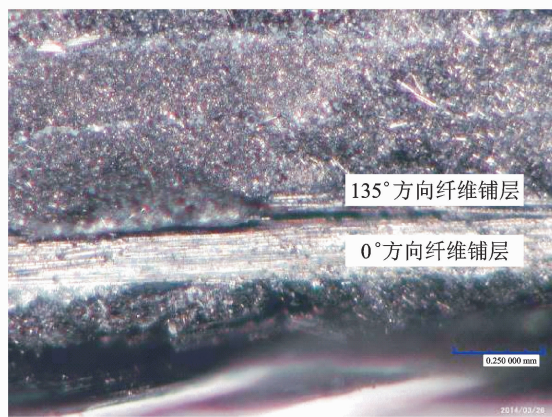


图 8 0° 方向纤维铺层形成的层间开口

Fig. 8 Delamination of 0° fiber direction ply

3 结 论

(1)随工件倾角的增大,水平方向上每齿所切材料平均厚度与截面积均减小,等效轴向切深逐渐增大,但是每齿去除材料体积保持不变,等效于每齿去除材料变薄变长,但体积不变。

(2)随着工件倾角的增大,机床坐标系下铣削力基本保持不变;而在工件坐标系下,沿工件厚度方向铣削力不断增大,沿其长度方向的铣削力不断减小。

(3)随着工件倾角的增大,加工侧面与表面缺陷不断加重。侧面表层分层缺陷不断加重,纤维束发生弯曲,裂纹逐渐扩展至表层内部;加工表面遭受破坏铺层数量也同样增加。

参考文献:

- [1] 张晓虎,孟宇,张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状和趋势[J]. 纤维复合材料,2004,24(1):50-54.
Zhang Xiaohu, Meng Yu, Zhang Wei. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites [J]. Fiber Composites, 2004, 24(1): 50-54.
- [2] 赵稼祥. 碳纤维复合材料在民用航空上的应用[J]. 高科技纤维与应用,2003,28(3):1-4.
Zhao Jiexiang. Application of carbon composite materials for civil aviation [J]. Hi-tech Fiber & Application, 2003, 28(3): 1-4.
- [3] 范玉青,张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的最新进展——飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报,2009,30(3):534-543
Fan Yuqing, Zhang Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology—Advance of aircraft manufacture technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 534-543.
- [4] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP [J]. Composites, 1983, 14(4): 371-376.
- [5] Hocheng H, Puh H Y, Huang Y. Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics [J]. Composites Manufacturing, 1993, 4(2): 103-108.
- [6] El-Hofy M H, Soo S L, Aspinwall D K, et al. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP [J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 94-99.
- [7] 齐锁龙,李勋,陈志同,等. 碳纤维复合材料切边加工实验研究[J]. 航空精密制造技术,2010,46(4):42-45.
Qi Suolong, Li Xun, Chen Zhitong, et al. Experimental study on CFRP workpiece boundary machining [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2010, 46(4): 42-45.
- [8] Pecat O, Rentsch R, Brinksmeier E. Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP [J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 466-470.
- [9] Dold C, Henerichs M, Bochmann L, et al. Comparison of ground and laser machined polycrystalline diamond (PCD) tools in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP) for aircraft structures [J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 178-183.

- [10] Hintze W, Hartmann D, Schütte C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)—An experimental study[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(15): 1719-1726.
- [11] Schulze V, Becke C, Pabst R. Specific machining forces and resultant force vectors for machining of reinforced plastics [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 69-72.
- [12] Azmi A I, Lin R J T, Bhattacharyya D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1/2/3/4): 247-261.
- [13] Gordon S, Hillery M T. A review of the cutting of composite materials[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 2003, 217(1): 35-45.
- [14] Teti R. Machining of composite materials[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 611-634.
- [15] 沈中, 孙暄, 刘钢, 等. 基于平均切削厚度钛合金 TC4 铣削机理[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(4): 614-618.
Shen Zhong, Sun Xuan, Liu Gang, et al. The milling mechanism of Ti6Al4V based on average cutting thickness [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(4): 614-618.
- [16] Shaw M C. *Metal cutting principles* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1984.
- [17] Gururaja S, Ramulu M. Stress distribution due to inclined line loads in fibrous polymer composites[J]. *ICCES*, 2007, 4(2): 73-80.
- [18] Gururaja S, Ramulu M. Failure analysis of a fibrous composite half-space subjected to uniform surface line load[J]. *Journal of engineering materials and technology*, 2009, 131(2): 021013.

