

碳纤维增强复合材料铣削加工表层损伤演化研究

周井文¹, 潘华东¹, 杨叶¹, 杨斌¹, 陈燕²

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 通过引入工件倾角的定义, 采用 PCD 立铣刀对 CFRP 层压板材料进行切边试验, 并对加工过程中的铣削力进行测量, 对加工表层不同缺陷形式进行观察分类。研究了不同表层纤维方向、工件倾角和刀具进给量对 CFRP 表层的缺陷形式和演化规律。结果表明: CFRP 层压板铣削表层缺陷主要可以分为崩边、毛刺、撕裂和分层缺陷, 其中表层撕裂缺陷是最主要的缺陷形式; 刀具进给量是影响表层缺陷, 尤其是撕裂缺陷形成和发展的最主要的因素; 垂直于铺层平面的切削分力直接影响表层缺陷演变与转化。

关键词: 碳纤维增强复合材料 (CFRP); 加工缺陷; 铣削力; 分层; 毛刺; 崩边

Research on Damage Evolution of Skin Layer During Trimming of CFRP

ZHOU Jingwen¹, PAN Huadong¹, YANG Ye¹, YANG Bin¹, CHEN Yan²

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Polycrystalline diamond (PCD) end mill was applied during the trimming experiment of CFRP by introducing the definition of workpiece inclined angle. The milling forces were recorded and different types of machining defects were observed at the same time. The influences of carbon fiber angle, workpiece inclined angle and feed rate on the types and evolution of machining defects were analyzed. The results show that the main machining defect is avulsion of carbon fiber bundles with small amount of chipping, burrs and delamination. The feed rate of cutter is the most significant factor on the occurrence of machining defects especially on the avulsion of fiber bundles. The cutting force perpendicular to the laminate panel has the direct influence on the occurrence and evolution of defects.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastics (CFRP); Machining defect; Milling force; Delamination; Burr; Chipping

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.103

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 作为先进复合材料中应用较早、应用范围较广的复合材料之一, 因其具有高比强度、高模量、高抗冲击性等一系列优点^[1-2], 目前已经广泛应用于诸如飞机机翼^[3]、运载火箭舱段、整流器内罩、航天器舱体、卫星平台等航空航天领域的主要结构中^[4]。

然而作为典型的各向异性和非均匀性材料, CFRP 在机械加工过程中极易产生分层、表层撕裂、毛刺、崩边、烧伤等缺陷, 近年来国内外学者对 CFRP 低损伤加工, 尤其在表层缺陷研究开展了诸多工作。El-Hofy^[5] 在研究了不同刀具涂层、纤维方向和冷却条件下 CFRP 加工表面缺陷形式, 并进行了详细的分类描述, 认为 0° 纤维方向铺层加工表面质量最佳。Hintze^[6] 等对 CFRP

切槽加工认为, 表层分层缺陷与纤维切削角存在必然联系, 并进行了钻削验证。后续 Hintze^[7] 等建立了基于纤维切削角的表层碳纤维 (束) 最小弯曲模型, 解释了不同类型缺陷产生的理论临界损伤深度。Sheikh-Ahmad^[8] 等对不同表层缺陷形式进行了详细分类, 认为采用高切削速度、低进给量能够有效提高加工表面质量并抑制分层缺陷的产生。Feito^[9] 等采用不同的有限元模型对 CFRP 切削过程进行仿真, 结果表明工件的夹持方式对加工缺陷的产生影响重大。Faraz^[10] 等研究了关于刀具刃口半径对分层缺陷的影响, 并定义了钻削加工过程中出口缺陷的评价方式, 这一评价方式在其他诸多文献中均可见^[11]。

多年来国内外对于 CFRP 的加工性研究均着重于

层压板或多层缠绕结构的讨论,随着复合材料整体净成型技术的不断发展,各类整体结构件的研制成功使得实际生产加工环节需要面对各类异型、甚至曲面结构,这意味着在实际机械加工过程中不可能完全保持刀具轴线垂直于铺层堆叠方向,具体如图1所示,定义工件上任一点切向与水平方向的夹角为工件倾角 θ 。本文主要讨论不同工件倾角和铣削进给量下CFRP表层损伤产生的形式和不同形式损伤演化的过程,确定铣削力与表面缺陷类型、损伤演化的关系,界定铣削加工低损伤安全区域。

1 试验及方法

试验在DMG HSC 200 linear 超声辅助五轴精密加工中心上进行(如图2(a)所示),机床最大转速

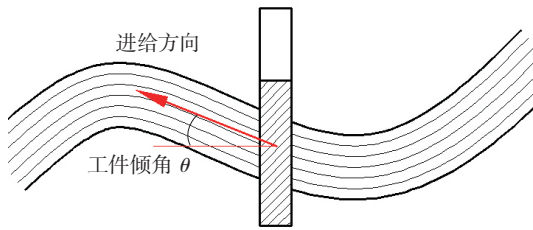
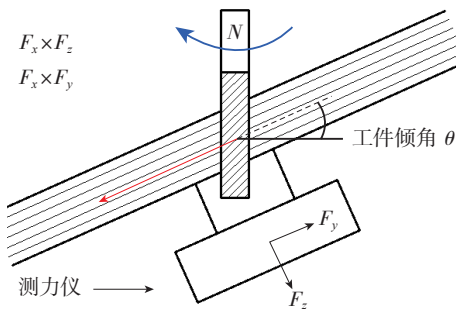


图1 CFRP产品零件刀具路径示意图

Fig.1 Diagram of tool path during CFRP products



(a)CFRP 铣削试验加工检测系统



(b)工件装夹示意图

图2 加工检测系统

Fig.2 Machining inspection system

42000r/min,功率14kW。工件装夹及加工如图2(b)所示,通过旋转机床A轴,获得不同的工件倾角 θ ,来模拟实际加工过程,并采用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)对铣削力进行测量。试验用刀具为焊接PCD刀片三刃立铣刀(图3),刀具直径为10mm。试验用CFRP层压板铺层方式分别为[(135/90/45/0) 6_s]、[(90/45/0/135) 6_s]、[(45/0/135/90) 6_s]、[(0/135/90/45) 6_s]以获得4种不同的表层纤维方向,其他规格和参数见表1。

加工条件及参数层面,刀具切削转速 N 恒定为8000r/min,每齿进给量 f_z 分别为0.002mm/tooth、0.004mm/tooth、0.008mm/tooth、0.012mm/tooth、0.016mm/tooth,切削宽度 a_e 为1mm,工件倾角分别为 12° 、 24° 、 36° 、 48° 和 60° ,试验采用全因素试验。在试验完成后采用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。

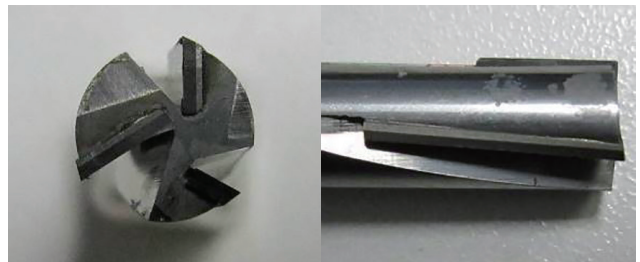


图3 试验用PCD立铣刀

Fig.3 PCD end mill for experiment

表1 叠层CFRP层合板规格和参数

增强体	基体	纤维体积比/%	铺层方式	铺层数	厚度L/mm	规格/(mm × mm)
T800碳纤维	环氧树脂	65	对称铺层	32	9	150 × 200

2 结果与讨论

2.1 表层损伤分析

图4所示为4种典型的CFRP层合板表层加工缺陷,分别为崩边缺陷、毛刺缺陷、撕裂缺陷和分层缺陷。崩边缺陷主要是由于纤维(束)沿垂直于铺层平面方向发生弯曲断裂而形成。毛刺缺陷则主要是由于纤维(束)在平行于铺层平面内发生弯曲退让,但未被切除而形成了簇状毛刺。而对于表层撕裂缺陷,纤维束整体发生弯曲退让,同时裂纹扩展至未加工表面,但纤维束并未发生断裂。说明此时纤维束整体受力超过碳纤维与树脂基体之间的黏结力,导致裂纹在内部沿纤维方向扩展,纤维集束弯曲退让而与基体发生分离,在刀具离开切削区域后纤维束回弹至原位置形成图4所示缺陷。

陷形貌。分层缺陷如图 5 所示,针对不同的铺层方式,其 0°铺层方向均可能出现类似开口状分层缺陷。根据 Gururaja^[12-13] 对于不同方向纤维复合材料在线性载荷下应力分布的分析可以认为,切削刃对纤维铺层的作用力可以等效为线性静载荷。载荷方向垂直于铺层厚度方向,同时应力沿载荷中线对称分布,在载荷中心点应力最大。这解释了图 4 (d) 中对称开口状分层,对于图 5 (b) 中出现了纤维断裂,分析认为这是由于当应力过大时,纤维束发生断裂,形成自由端。

为分析上述各类型加工缺陷随表层纤维方向、工件

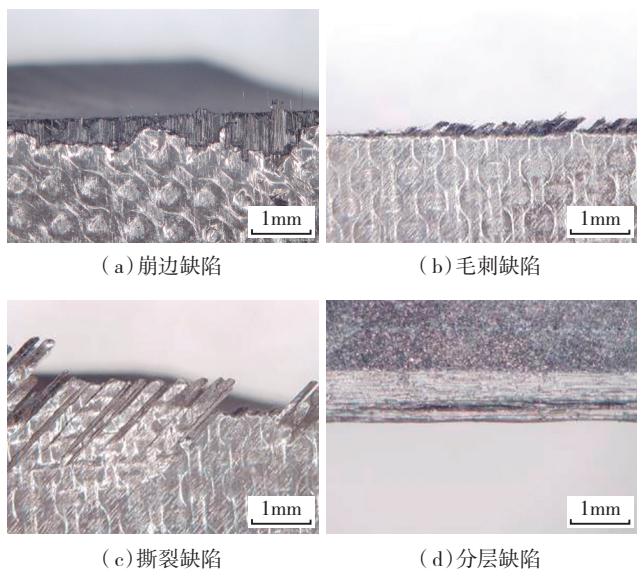


图4 表层4种类型缺陷形式
Fig.4 4 types of damage on skin layer of CFRP laminates

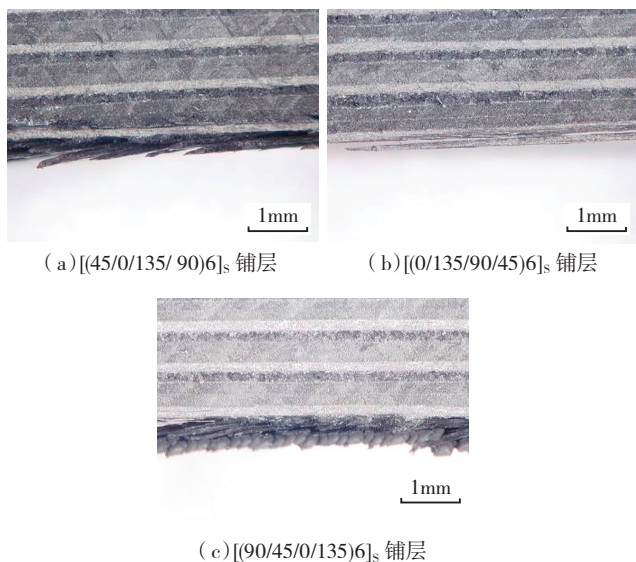


图5 0° 纤维方向铺层分层缺陷

Fig.5 Delamination of laminate plies with 0° fiber direction

倾角、进给量的变化规律,定量采样 20mm 长度的加工侧面,记录未损伤区域和各类损伤所占比例。图 6 所示为 45°、90°和 135°表层纤维方向 CFRP 层合板铣削加工后未损伤区域占比。可以发现每齿进给量是影响损伤区域的主要因素,影响程度随工件倾角的增加而急剧增大。同时在采用较低的进给量($f_z < 0.008 \text{ mm/tooth}$)和较小的工件倾角($\theta < 36^\circ$)下 45°和 90°表层纤维 CFRP 几乎无加工缺陷,而 135°表层纤维 CFRP 加工缺陷演化对加工参数更为敏感。

各类型表层缺陷随工件倾角、刀具进给量的变化规律如图 7~9 所示。可以发现对 45°和 90°表层纤维 CFRP 其崩边缺陷高发区域为较低的工件倾角,并且其分布比例随工件倾角的增大而逐步减少,但是对于崩边缺陷而言,在所有参数下其最高占比并不高,分别为 11.2% (45°) 和 9.3% (90°)。而毛刺缺陷变化规律基

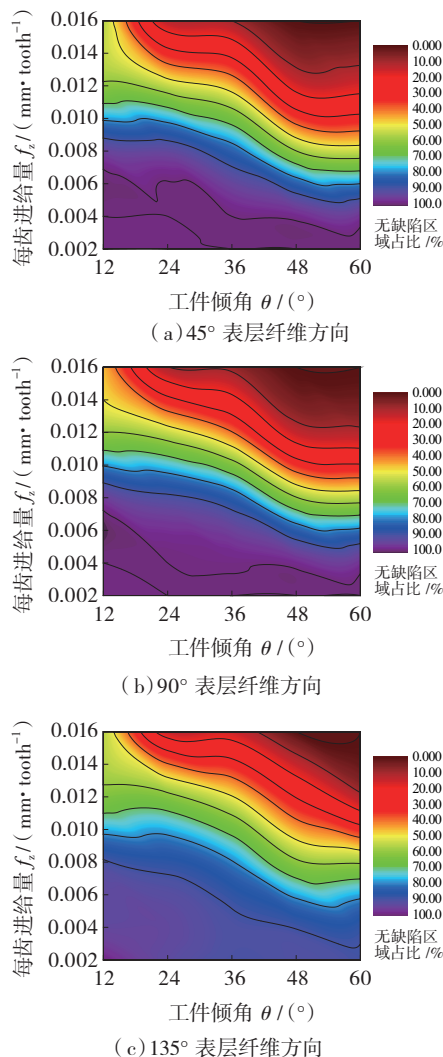


图6 不同表层纤维方向无损伤区域比例
Fig.6 Proportion of undamaged area with different fiber directions

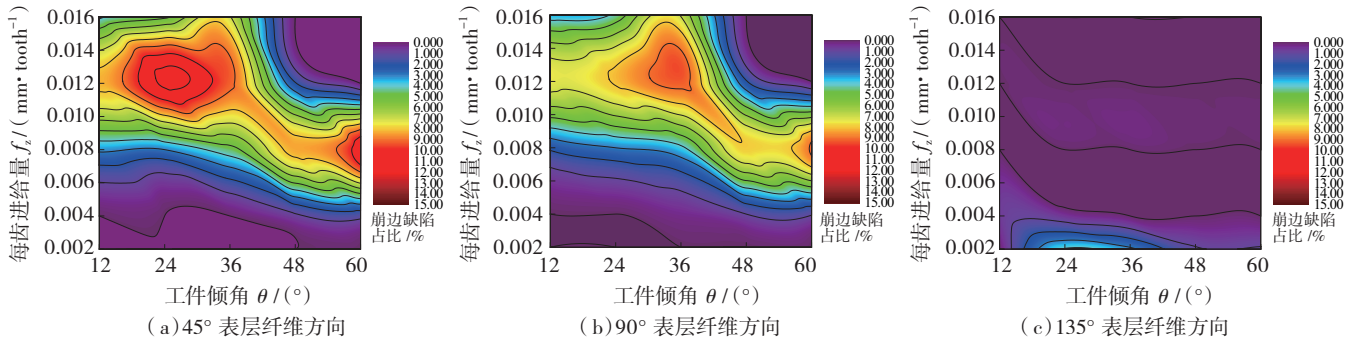


图7 不同表层纤维方向崩边区域比例

Fig.7 Proportion of chipping area with different fiber directions

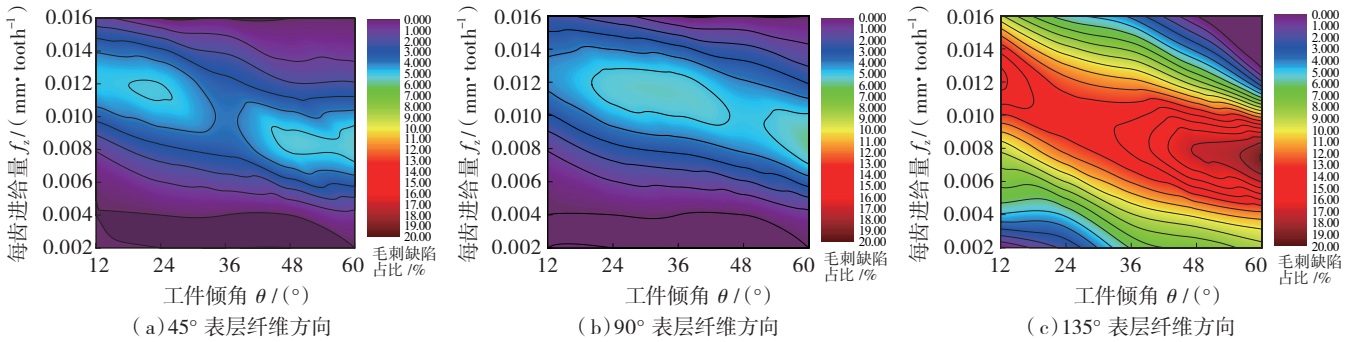


图8 不同表层纤维方向毛刺区域比例

Fig.8 Proportion of burr area with different fiber directions

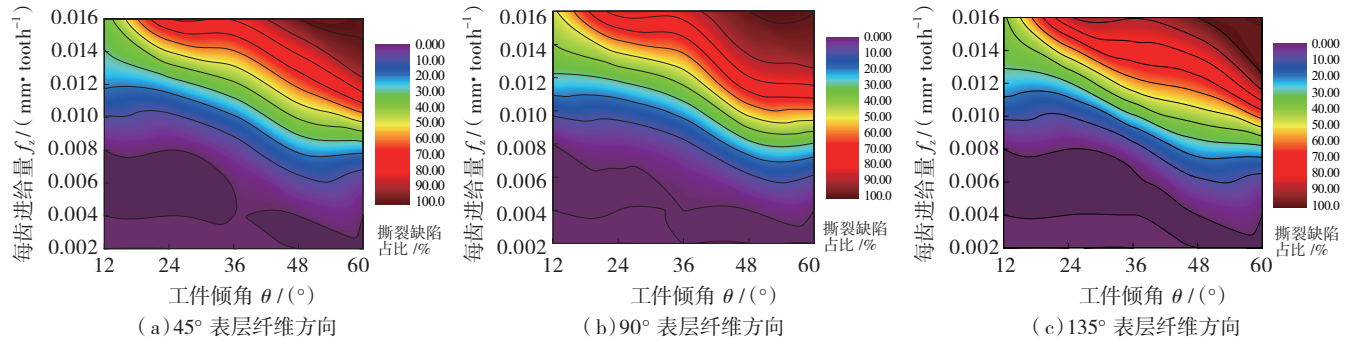


图9 不同表层纤维方向撕裂区域比例

Fig.9 Proportion of torn area with different fiber directions

本与崩边缺陷类似,但是占比更低,分别为 5.5% (45°) 和 5.8% (90°)。而 135°表层纤维 CFRP 其缺陷分布及演化规律与 45°和 90°表层纤维 CFRP 并不一致。其崩边缺陷则倾向于产生于低进给量和工件倾角条件下,但是占比非常低,仅为 4.1%。相比而言其毛刺缺陷占比则比较高,最高为 18.7%,且其分布规律类似。然而对 3 种纤维方向 CFRP 的撕裂缺陷对比发现,其变化规律非常一致,并且与崩边、毛刺缺陷相比而言其占比非常高,在较高的工件倾角和进给量条件下其占比几乎达到了 100%。

综上所述可以发现 3 种纤维方向 CFRP 其主要损伤形

式均为表层撕裂,且这一损伤趋势随着刀具进给量的增大而不断增大,并且这一损伤在高工件倾角下的形成更加迅速。对比分析 3 种类型损伤形式,认为崩边缺陷和毛刺缺陷是向表层撕裂转化的过渡状态。对于 45°和 90°表层纤维 CFRP 在低参数下更加倾向于产生崩边缺陷,辅以毛刺缺陷(如图 10 和图 11 所示),一旦撕裂缺陷形成,占比将不断增大,此时崩边和毛刺缺陷将被其逐步取代。而对于 135°表层纤维 CFRP,在低参数状态下其主要缺陷形式为毛刺,几乎无崩边缺陷,且其毛刺缺陷即使在非常低的加工参数下也极易出现,如图 12 所示。一旦出现撕裂缺陷,毛刺缺陷将直接向其

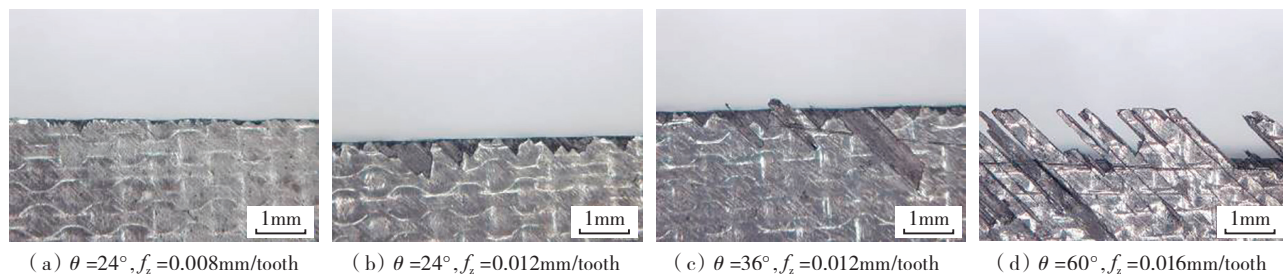


图10 45° 表层纤维方向CFRP加工缺陷演化规律
Fig.10 Machining defects evolution of CFRP with 45° fiber direction

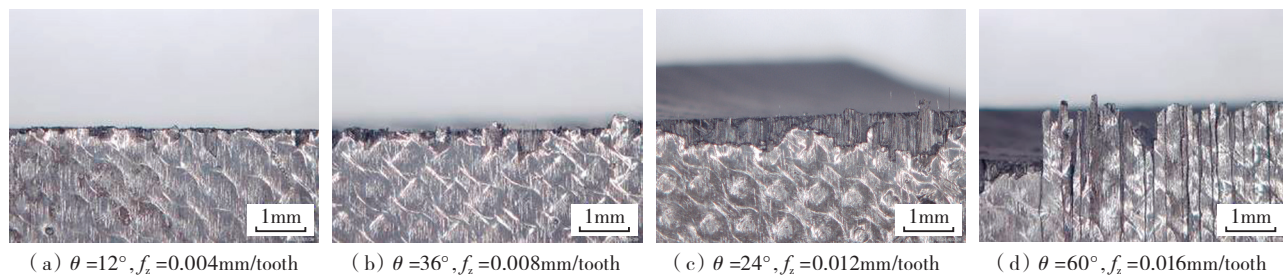


图11 90° 表层纤维方向CFRP加工缺陷演化规律
Fig.11 Machining defects evolution of CFRP with 90° fiber direction

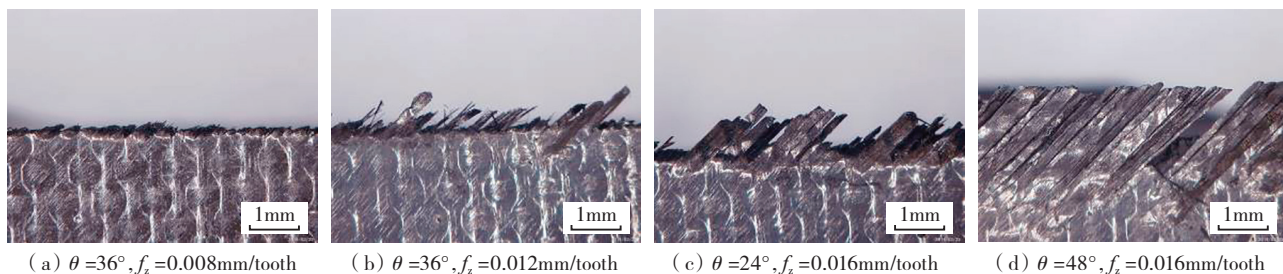


图12 135° 表层纤维方向CFRP加工缺陷演化规律
Fig.12 Machining defects evolution of CFRP with 135° fiber direction

转化。

2.2 铣削力分析

图 13 (a) 所示为 CFRP 层压板所受到的垂直于铺

层平面的切削力 F_z 随刀具进给量和切削力的变化规律, 可以发现随着刀具进给量的不断增大, 切削力 F_z 迅速增大, 同时随着工件倾角的不断增大, 切削力也呈现上

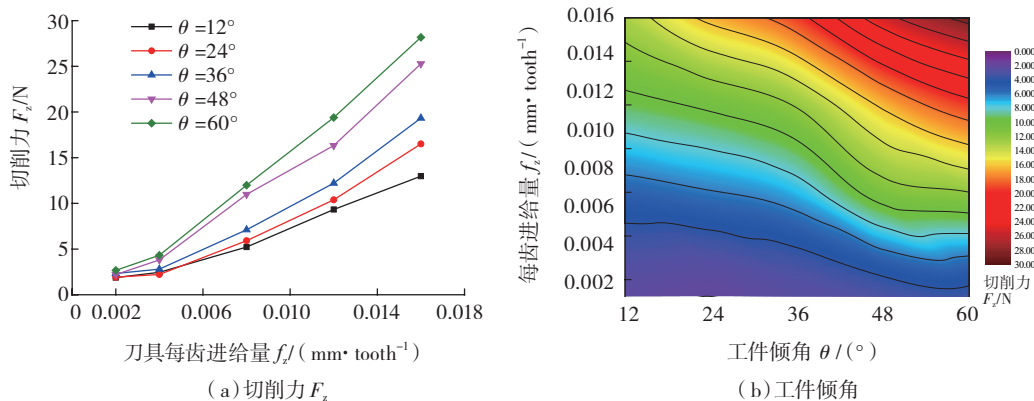


图13 铣削力 F_z 随进给量和工件倾角变化规律
Fig.13 Milling force F_z various workpiece inclined angle and feed rate

升趋势。根据陈雪梅等^[14]的研究,随着工件倾角 θ 的增大,平均每齿切厚 h_m 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。但是随着工件倾角的增大,将导致垂直于CFRP厚度方向的铣削力 F_z 逐渐增大。将切削力与工件倾角和刀具进给量联系,做出等高线图,如图13(b)所示。可以发现切削力 F_z 的变化规律与图6无损伤区域的分布相似,说明CFRP层合板受到垂直于铺层平面的切削力 F_z 与所产生的缺陷形式存在联系,对比发现当切削力 F_z 小于9~10N时,对于45°和90°表层纤维CFRP几乎无任何缺陷,对于135°表层纤维CFRP当 F_z 小于9~10N时,可避免出现明显的表层撕裂缺陷,但是不可避免地会出现毛刺缺陷。

综上所述,对于曲面结构叠层CFRP结构件侧铣加工,从材料层面,表面铺层纤维方向角选择优先级为 $0^\circ > 135^\circ > 90^\circ = 45^\circ$;然而实际产品加工环节并不具有材料结构的决定权。因此结合上文分析,在实际加工过程中,尤其是多轴联动铣削加工中,需采用较低的进给量($f_z < 0.008\text{mm/tooth}$)和较小的工件倾角($\theta < 36^\circ$)才能有效控制加工缺陷的大量产生。

3 结论

(1) CFRP层压板铣削表层缺陷主要可以分为崩边、毛刺、撕裂和分层缺陷。

(2) 表层分层缺陷只出现在 0° 表层纤维CFRP加工表面,而 45° 、 90° 表层纤维CFRP主要缺陷为撕裂缺陷,辅以崩边缺陷。 135° 表层纤维CFRP主要缺陷也为撕裂缺陷,辅以毛刺缺陷。

(3) 刀具进给量是影响表层缺陷,尤其是撕裂缺陷形成和发展的最主要因素,同时在高工件倾角下缺陷形成对进给量更加敏感。

(4) 垂直于铺层平面的切削分力是影响缺陷形成的直接因素,当切削力小于约9~10N时,对于 45° 和 90° 表层纤维CFRP几乎无任何缺陷,对于 135° 表层纤维CFRP当切削力小于约9~10N时,可避免出现明显的表层撕裂缺陷,但是不可避免地会出现毛刺缺陷。

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] CHAWLA K K. Composite materials: science and engineering[M]. Berlin: Springer, 2012.

[3] 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.
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] HINTZE W, HARTMANN D. Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 443-448.
 [8] SHEIKH-AHMAD J, URBAN N, CHERAGHI H. Machining damage in edge trimming of CFRP[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(7): 802-808.
 [9] FEITO N, LÓPEZ-PUENTE J, SANTIUSTE C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling[J]. Composite Structures, 2014, 108: 677-683.
 [10] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(15): 1185-1196.
 [11] GAITONDE V N, KARNIK S R, RUBIO J C, et al. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites[J]. Journal of Composite Materials, 2011: 0021998311401087.
 [12] GURURAJA S, RAMULU M. Stress distribution due to inclined line loads in fibrous polymer composites[C]//International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences (ICCES). Dunhuang, 2007.
 [13] 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): 1-8.
 [14] 陈雪梅,陈清良,周井文,等. CFRP曲面铣削力及加工缺陷研究[J]. 南京航空航天大学学报(社科版),2014,46(5): 694-700.
 CHEN Xuemei, CHEN Qingliang, ZHOU Jingwen, et al. Study on milling force and machining defects during trimming CFRP curved surface structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Social Sciences), 2014, 46(5): 694-700.

通讯作者: 周井文, 硕士、工程师, 研究方向为高效精密加工技术、复合材料加工技术, E-mail: zjw8635233@163.com。(责编 大漠)