碳纤维/树脂基复合材料铣削表面粗糙度及表面形貌研究

李锋[1]，李涌泉[2]，李文科[3]，王博[1]，李哲君[1]

（1.西安航空学院，西安 710089；2.北方民族大学，银川 750021；
3.西安航空发动机(集团)有限公司，西安 710021）

摘　要：目的 研究了CFRP材料铣削加工过程中，部分主要工艺对CFRP材料加工表面质量的影响规律，为工艺参数优化，提高此类零件的表面质量提供依据。**方法** 设计了CFRP材料铣削中的切削参数、刀具结构、加工方法与加工表面粗糙度及表面形貌之间的单因素试验。通过单调改变一个切削参数而其余切削参数不变，得到了工件表面粗糙度和表面形貌随切削参数、刀具结构、加工方法的变化规律。**结果** 当铣削速度增大时，工件的表面粗糙度变化不大，表面微坑缺陷的数量却有所增加，但变小、变浅。当进给速度增大时，工件表面粗糙度呈上升趋势，表面缺陷也随之增加。无涂层多齿刀具铣削后的工件表面粗糙度最大，其次是金刚石涂层多齿刀具铣削的工件，最小的是金刚石涂层交错齿刀具铣削的工件。多齿刀具加工后的表面有较多的微坑缺陷，但普遍深度较浅且面积较小。交错齿刀具对分层缺陷的抑制作用最明显，但在左旋和右旋刀齿交错处容易出现较严重的加工缺陷。与普通机械加工方法相比，超声振动加工方法得到的工件表面质量较好，可以有效减少表面微坑缺陷，改善CFRP铣削加工表面质量。**结论** CFRP材料铣削加工时，为了获得较好的加工表面质量，切削参数应选用较高的切削速度和较低的进给速度，切削刀具宜选用多齿带涂层刀具。和普通机械加工方法相比，超声振动铣削加工方法更为有利于获得好的表面质量。

关键词：碳纤维/树脂基复合材料；铣削；表面粗糙度；表面形貌

中图分类号：TQ322.4　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2017)09-0264-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.042

Surface Roughness and Surface Morphology of Milled Carbon/Epoxy Composite Surface

LI Feng[1], *LI Yong-quan*[2], *LI Wen-ke*[3], *WANG Bo*[1], *LI Zhe-jun*[1]

(1.Xi'an Aviation College, Xi'an 710089, China; 2.Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China;
3.Xi'an Aero Engine (Group) Co., Ltd, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: As a kind of excellent polymer matrix composite, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is widely used in manufacturing of aircraft and spacecraft components. CFRP components are usually near net shape, but they also shall be subject to

收稿日期：2017-03-30；修订日期：2017-04-30

Received：2017-03-30；**Revised**：2017-04-30

基金项目：宁夏自然科学基金重点项目（NZ16083）

Fund：Supported by the Key Natural Science Foundation Project of Ningxia (NZ16083)

作者简介：李锋（1982—），男，讲师，主要研究方向为高速高效切削技术。

Biography：LI Feng (1982—), Male, Lecturer, Research focus: high efficient cutting technology.

通讯作者：李涌泉（1985—），男，博士，讲师，主要研究方向为金属材料及表面工程。

Corresponding author：LI Yong-quan (1985—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: metal materials and surface engineering.

second cutting after demoulding to ensure size of the assembly. This work aims to investigate rule of effects of some main processes on surface quality of CFRP during milling process, so as to provided basis for optimizing cutting parameters and further improving surface quality of such parts. A single-factor experiment was designed among cutting parameters, tool structure, machining method, finished surface roughness and morphology of CFRP. Law of change in surface roughness, cutting parameters, tool structure and machining method was obtained by adjusting one of the cutting parameters and reserving the rest of cutting parameters. As the milling speed increased, surface roughness of the workpiece changed slightly, surface micro-pit defects increased but diminished and shallowed. As the feeding speed increased, both the surface roughness and surface defects increased. Uncoated multitooth cutter exhibited the maximum workpiece surface roughness, followed by multitooth cutter with diamond coating, and finally staggered tooth cutter with diamond coating. In addition, surface processed by the multitooth cutter had more micro-pit defects, which were generally shallow and small. The staggered tooth cutter had inhibition most significant effects on delamination defect, but serious processing defects might be present in joints of left- and right-hand cutter teeth. Compared with common mechanical machining, workpiece acquired in ultrasonic vibration machining method exhibited better surface quality of the CFRP, less surface micro-pit defects and better CFRP milling surface quality. In order to obtain a better surface quality during CFRP milling, higher milling speed and lower feed speed as well as multitooth coated cutter shall be selected. Compared with common machining method, the ultrasonic vibration machining method may contribute to better surface quality.

KEY WORDS: carbon fiber/resin-based composite; milling; surface roughness; surface morphology

碳纤维增强树脂基复合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer，简称 CFRP）具有质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、疲劳性能优越、可设计性强等优点，被广泛应用于航空航天领域[1-2]。CFRP 构件通常是近净成形，但为了保证其装配尺寸，脱模后还要通过机械加工对其进行二次切削加工，钻孔与铣削是最常见的两种方式。CFRP 材料是由作为增强体的碳纤维和作为基体的树脂材料混合而成，是一种具有各向异性力学性能的多相结构材料。其独特的物理结构和化学特性，使其在机械加工中容易出现各种问题，主要为刀具磨损严重、材料去除率低、工艺参数难以控制、表面质量差等[3]，这在很大程度上制约了碳纤维增强树脂基复合材料的发展和应用。因此，研究 CFRP 材料在机械加工中存在的诸多问题具有较高的理论意义和实用价值。

国内外学者对 CFRP 材料的机械加工进行了较多研究[4-9]，但主要是对钻孔工艺的研究，而对铣削工艺的研究较少。本文通过切削试验，研究了部分主要工艺对 CFRP 加工表面质量的影响规律，为优化 CFRP 材料铣削加工工艺参数、提高工件加工表面质量具有重要的指导意义。

1　试验

1.1　试验条件

试件为 21 层的板状斜纹织物碳纤维增强树脂基复合材料（T300/阻燃环氧树脂），几何尺寸为 194 mm×84 mm×19 mm。试验机床选用 YHVT850Z 立式加工中心，最大转速 8000 r/min，功率 11 kW。刀具选用 SGS 公司生产的无涂层多齿刀具、金刚石涂层多齿刀具和金刚石涂层交错齿刀具，刀具直径均为 12 mm。其中，多齿刀具为 12 齿右螺旋，螺旋角为 10°，主切削刃前角为 15°，后角为 30°；交错齿刀具共有 8 个刀齿，左旋和右旋刀齿螺旋角均为 30°，主切削刃前角为 10°，后角为 20°。采用 ALICONA 公司非接触式三维表面形貌测量仪测量表面粗糙度，采用扫描电镜（SEM）进行观察及分析，超声振动铣削加工试验采用 SY-2000 型超声波发生器达到声振系统的谐振。

1.2　试验方案

切削参数、刀具结构和加工方法等是影响 CFPR 切削表面性能的主要因素。这些工艺如果选取合理，能有效避免 CFRP 复合材料的表面缺陷[10]。

采用单因素试验法研究切削参数、刀具结构和加工方法对 CFRP 铣削表面质量的影响，铣削表面质量用表面粗糙度 S_q 和表面形貌来评价。试验采用的切削参数如表 1 所示，刀具结构有无涂层多齿、金刚石涂层多齿和金刚石涂层交错齿，加工方法有普通机械加工和超声振动加工。

试验采用无冷却顺铣加工方式。考虑到复合材料制品脱模后的铣边操作多属于精加工，一般需要去除的余量较小，因此采用统一的径向切深 a_e=1 mm，轴向切深 a_p=6 mm。切削速度 v_c、进给速度 v_f 的选取是在实际加工经验的基础上拓宽范围确定的。先研究刀具结构对表面质量的影响，确定一种最有利于表面质量的刀具结构，再采用该刀具结构研究加工方法对表面质量的影响。

表 1　切削参数
Tab.1 Cutting parameters

切削速度 v_c/(m·min^{-1})	进给速度 v_f/(mm·min^{-1})
125	100
125	300
125	500
125	700
50	400
100	400
150	400
200	400

2　试验结果分析

2.1　切削参数对加工表面质量的影响

CFRP 侧铣切削参数与表面粗糙度之间的关系如图 1 所示。当切削速度 v_c 从 50 m/min 增大至 100 m/min 时，三种刀具加工后的工件表面粗糙度均减小；当切削速度 v_c 从 100 m/min 增大至 150 m/min 时，金刚石涂层交错齿刀具加工后的工件表面粗糙度略微减小，其余两种刀具加工后的工件表面粗糙度继续增大，且增大的速度相差不大。当切削速度 v_c 从 150 m/min 增大至 200 m/min 时，无涂层多齿刀具加工后的工件表面粗糙度略微减小，其余两种刀具加工后的工件表面粗糙度增大，且增大的速度也相差不大。当进给速度 v_f 从 100 mm/min 增大至 700 mm/min 时，

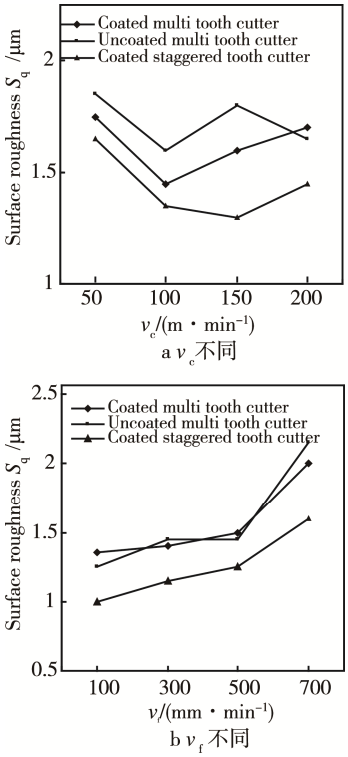


图 1　表面粗糙度随切削参数的变化曲线
Fig.1 Variation of surface roughness with cutting parameters: a) different v_c, b) different v_f

三种刀具加工后的工件表面粗糙度呈现一直增大趋势。而且，100 ~ 500 mm/min 时增加速度较缓，500 ~ 700 mm/min 时增加速度较快。

图 2 为不同切削参数下加工表面形貌的变化。对

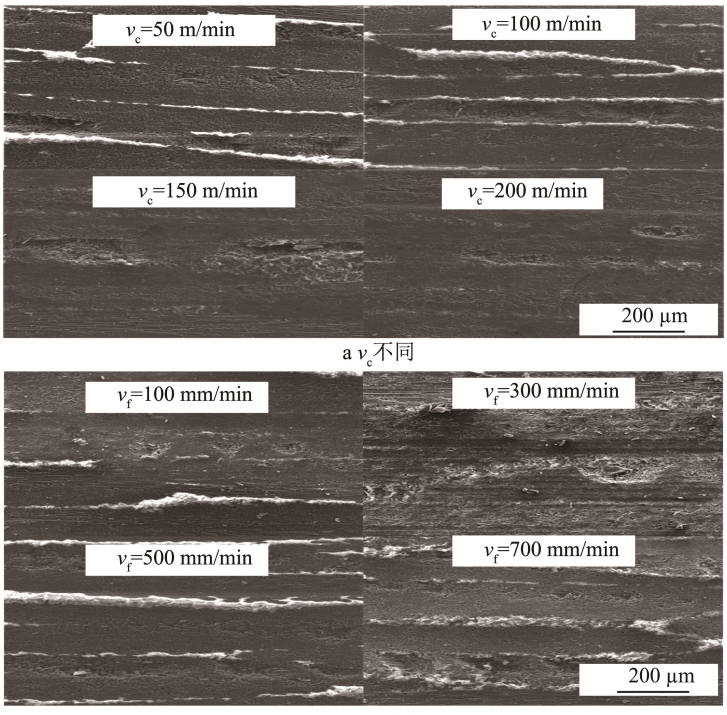


图 2　表面形貌与切削参数之间的关系
Fig.2 Variation of surface morphology with cutting parameters: a) different v_c, b) different v_f

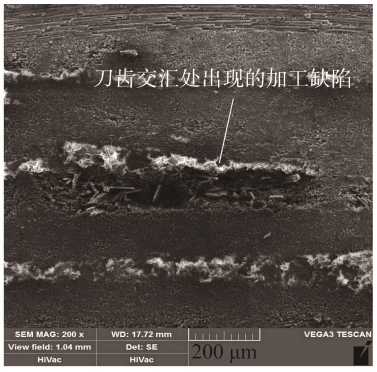
比发现，当切削参数变化时，微坑几何特征的改变最为明显[11]。当切削速度增大时，微坑数量增加，但深度变浅。当进给速度增大时，纤维层的破坏逐渐加重，微坑由浅而小变为深而广。

根据表面粗糙度和表面形貌随切削参数的变化可知，CFRP 材料铣削加工时，要想获得较为光滑的加工表面，减少微观缺陷的产生，宜采用较高的切削速度和较低的进给速度。

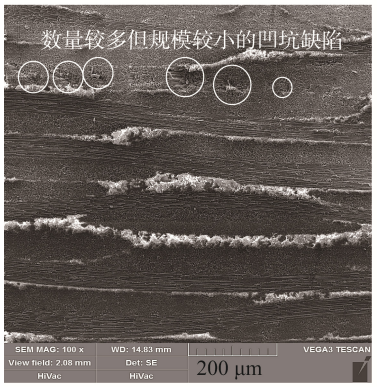
2.2　刀具结构对加工表面质量的影响

传统刀具加工 CFRP 材料时存在刀具磨损严重、使用寿命短和加工表面质量差等问题。结构合理的新型刀具有助于减少 CFRP 铣削加工中的缺陷。从图 1 可以发现，随着切削速度和进给速度的增大，无涂层多齿刀具加工后的工件表面粗糙度略大于涂层多齿刀具加工的工件，涂层多齿刀具加工后的工件表面粗糙度略大于涂层交错齿刀具加工的工件。因此，涂层交错齿刀具加工后的工件表面较光滑，这是交错齿刀具特殊的左旋刃和右旋刃共同作用的结果[12]。

图 3 为不同结构刀具加工后的工件表面形貌。由图 3a 可见，金刚石涂层交错齿刀具加工后的工件表面比较光整，缺陷少，尤其是分层缺陷较少[12]。但在工件中间位置，即被交错齿刀具左右旋刀齿交汇处加工的位置，出现了较严重的撕裂凹坑缺陷。图 3b 所示的金刚石涂层多齿铣刀加工后的表面缺陷比较少，但分层缺陷多于交错齿刀具加工的表面，并且分层程度也相对较大。此外，金刚石涂层多齿刀具加工后的工件表面，凹坑缺陷分布较广，但普遍小而浅。无涂层多齿刀具加工后的工件表面缺陷种类与金刚石涂层多齿刀具加工的表面相同，但缺陷数量和程度均多于涂层刀具加工的表面。



a 金刚石涂层交错齿刀具加工



b 金刚石涂层多齿刀具加工

图 3　不同刀具加工后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology after processing with differernt cutter: a) staggered tooth cutter with diamond coating b) multitooth cutter with diamond coating

交错齿刀具加工后的工件表面粗糙度虽然较小，但却会在刀齿交错处出现撕裂凹坑，这种缺陷对材料性能有很大的潜在威胁。因此，在 CFRP 材料加工时，应选用多齿铣刀和耐磨涂层铣刀，以抑制毛刺、撕裂和分层等缺陷的产生。

2.3　加工方法对加工表面质量的影响

为了解决传统加工方法加工 CFRP 材料存在的问题，不少新型的加工方法应运而生，如高压水射流加工、激光切割、电火花加工和超声振动加工等[13]。图 4 是普通机械加工和超声加工对 CFRP 材料加工表面质量的影响。从图中可以看出，随着切削速度和进给速度的增大，普通机械加工的工件表面粗糙度大于超声加工的工件表面粗糙度。在选取的试验参数范围内，当切削速度 v_c 从 50 m/min 增大至 100 m/min 时，

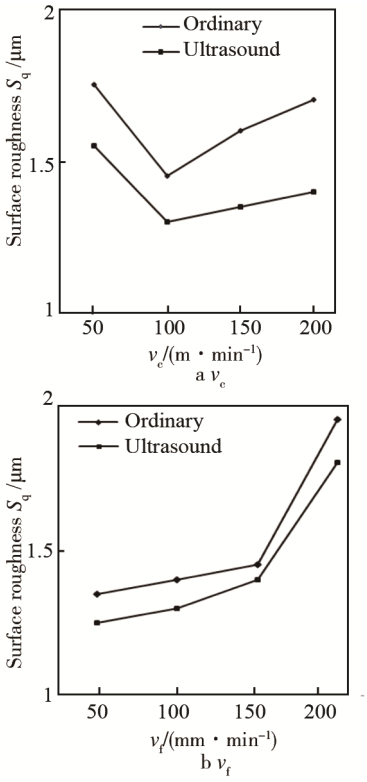
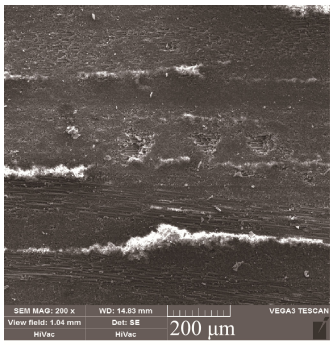


图 4　表面粗糙度与加工方法之间的关系

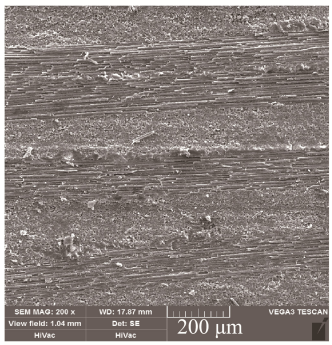
Fig.4 Relationship between surface roughness and processing method

两种加工方法对应的工件表面粗糙度均减小。当切削速度 v_c 从 100 m/min 增大至 200 m/min 时，两种加工方法对应的工件表面粗糙度均增大，但变化范围不大。当进给速度 v_f 从 100 mm/min 增大至 700 mm/min 时，两种加工方法对应的工件表面粗糙度均呈现一直增大的趋势，且 100 mm/min ~ 500 mm/min 时增加速度缓慢，500 mm/min ~ 700 mm/min 时增加速度较快。

通过扫描电镜观察超声铣削和普通铣削后的工件表面，都发现了纤维与基体脱粘、裂纹、基体与纤维分离、纤维断裂后形成的凹坑等缺陷[13]，如图 5 所示。和普通机械加工相比，超声加工后的工件表面缺陷少很多，尤其是凹坑缺陷。不仅凹坑的数量减少，凹坑尺寸也变小。另外，观察普通铣削和超声振动铣削后的加工表面纤维断口，发现普通切削 CFRP 材料时，碳纤维主要以挤压或拉伸断裂为主，容易出现纤维拔出或挑起等现象。而超声加工碳纤维复合材料时，纤维主要以直接剪断型为主，纤维断口较为光滑，CFRP 铣削加工表面也较为平整。超声振动加工方法有利于改善 CFRP 铣削加工表面质量，尤其是可以减少凹坑缺陷。



a 普通铣削



b 超声振动铣削

图 5　普通铣削与超声振动铣削工件表面形貌

Fig.5 Workpiece surface of' common milling (a) and ultrasonic vibration milling (b)

3　结论

1）CFRP 材料加工时，较高的切削速度和较低的进给速度有利于获得更好的加工表面，可以减少微观缺陷。

2）CFRP 材料加工时，无涂层刀具的工件表面粗糙度最大，其次是涂层多齿刀具，涂层交错齿刀具获得的表面粗糙度最小。但交错齿刀具在刀齿交错处容易出现较大的撕裂凹坑，CFRP 材料加工时宜选用多齿带涂层刀具。

3）和普通机械加工方式相比，超声振动铣削加工方式有利于改善 CFRP 铣削加工表面质量，尤其是可以显著减少、减小凹坑缺陷。

参考文献：

[1] MKADDEM A, DEMTRCI I, MANSOR M E. A Micro–Macro Combined Approach Using FEM for Modeling of Machining of FRP Composites: Cutting Forces Analysis[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(15-16): 3123-3127.

[2] SHYHA I, SOO S L, ASPINWALL D, et al. Effect of Laminate Configuration and Feed Rate on Cutting Performance when Drilling Holes in Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(8): 1023-1034.

[3] JAHROMI A S, BAHR B. An Analytical Method for Predicting Cutting Forces in Orthogonal Machining of Unidirectional Composites[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(16): 2290-2297.

[4] LIU D, TANG Y, CONG W L. A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates[J]. Composite Structures, 2012, 94(4): 1265-1279.

[5] KILICKAP E, YARDIMEDEN A, CELIK Y H, et al. Investigation of Experimental Study of End Milling of CFRP Composite[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2015, 22(1): 89-95.

[6] TSAO C C. Taguchi Analysis of Drilling Quality Associated with Core Drill in Drilling of Composite Material[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2007 (32): 877-884.

[7] LEE S, JEONG S, PARK J, et al. Study on Drilling Characteristics and Mechanical Properties of CFRP Composites[J]. Acta Mechanica Sollda Sinica, 2008, 21(4): 364-368.

[8] 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, 26(5): 604-609.
ZHANG Hou-jiang. Study on Cutting Forees of Unidireetional Carbon Fiber Reinfocred Plasties under Ortho Gonal Cutting[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 604-609.

[9] 徐宏海, 徐倩, 刘东. 碳纤维复合材料高速铣削实验研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 167-169.
XU Hong-hai, XU Qian, LIU Dong. Experimental Study on the High Speed Milling of Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. Machinery Design & Manu-

facture, 2009(12): 167-169.

[10] 刘峰, 孙剑飞, 陈五一, 等. 高模量碳纤维复合材料钻削力和加工缺陷分析[J]. 工具技术, 2015, 49(5): 12-16.
LIU Feng, SUN Jian-fei, CHEN Wu-yi. Analysis on Cutting Force and Machining Defects in Drilling High Modulus CFRP[J]. Tool Engineering, 2015, 49(5): 12-16.

[11] 胡宝刚, 杨志翔, 杨哲. 复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2000(5): 24-27.
HU Bao-gang, YANG Zhi-xiang, YANG Zhe. Present Situation and Development Trend of Study on Machining Processing of Omposite Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(5): 24-27.

[12] 林有希, 禹杰, 林华. 碳纤维/树脂基复合材料高速铣削的刀具磨损机理[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 138-145.
LIN You-xi, YU Jie, LIN Hua. Wear Mechanism of Tool in High-speed Milling of Carbon/Epoxy Composite[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 138-145.

[13] 胡安东, 陈燕, 傅玉灿, 等. 超声振动辅助铣磨加工对 CFRP 切削力和表面质量的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 788-796.
HU An-dong, CHEN Yan, FU Yu-can, et al. Effects of Uitrasonic Vibration-assisted Grinding on Cutting Force and Surface Quality of CFRPE[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4): 788-796.