

# CFRP 加工表面粗糙度对力学性能的影响

范文涛,陈燕,陈逸佳,谢松峰

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,江苏 南京 210016)

**摘要:**选用三维表面算术平均高度  $Sa$  表征 CFRP 的表面粗糙度,以磨削样件的拉伸和压缩强度为标准,研究 CFRP 多向层合板在不同铣削参数下所产生的加工表面粗糙度对力学性能退化的影响。结果表明: $Sa$  对拉伸强度及压缩强度的影响不显著, $Sa > 15 \mu\text{m}$  时拉伸强度退化量会增多,加工时温度过高会对 CFRP 基体造成损伤,进而影响压缩强度。

**关键词:**CFRP;  $Sa$ ; 铣削; 拉伸强度; 压缩强度

**中图分类号:**TH145 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0027-03

## Effect of Surface Roughness on Mechanical Behavior of CFRP

FAN Wentao, CHEN Yan, CHEN Yijia, XIE Songfeng

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:**  $Sa$  is used to characterize the surface roughness of CFRP, and the tensile and compressive strength of the ground sample is applied as the standard to study the effect of the surface roughness of CFRP multi-directional laminates on the degradation of mechanical properties under different milling parameters. The result shows that effect of  $Sa$  on the tensile strength and compressive strength is not evident. When  $Sa$  is more than  $15 \mu\text{m}$ , the degradation of tensile strength will increase. When the temperature is too high, the CFRP matrix will be damaged and the compressive strength will be affected.

**Keywords:** CFRP;  $Sa$ ; milling; tensile strength; compressive strength

## 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、轻质和抗疲劳等优良特性在航空航天工业中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。复合材料的大量使用给飞机设计和航空制造工业都带来了极具影响力的变革,各航空制造大国都在竞相提升复合材料在新一代大型飞机上的应用。复合材料在飞机结构上的用量已经成为衡量其先进性的重要指标<sup>[2-3]</sup>。为满足生产实际要求,经常需要通过铣削加工使复合材料达到尺寸及精度要求,不同的加工表面质量及表面损伤也可能导致应力集中,使之提前发生断裂失效<sup>[4]</sup>。

GHIDOSSI P 等<sup>[5]</sup>研究了碳/环氧和玻璃/环氧复合材料的加工工艺对其力学性能的影响。通过表面粗糙度测量和显微观察对加工过程进行详细的分析和评估。研究的主要结论是加工工艺在某些参数下对复合试样强度有显著影响。HADDAD M 等<sup>[6]</sup>研究了由不同加工工艺(即传统刀具切削、磨料水射流加工(AWJM)、金刚石磨削(ADS)产生的缺陷及其对 CFRP 准静态(压缩和层间剪切)力学性能的影响,选择了不同的加工条件,以便获得具有不同表面质量的试样。结果表明:AWJM 样品具有更好的抗压性能,而 ADS 样品具有更高的层间剪切强度,用传统刀具切削的试样具有更高的疲劳极限。机械加工工

艺导致的表面粗糙度不同以及加工缺陷对力学性能的影响没有一致的规律,反而是加载方式的不同对材料力学性能的影响更为显著。此外, $Ra$  不适用于评价复合材料的表面质量。李皓<sup>[7]</sup>通过对不同表面质量试件静载强度的试验分析,发现复合材料铣削加工会在一定程度上导致其材料拉伸和压缩强度性能降低,且压缩强度对加工损伤更为敏感;影响层厚度  $\Delta h$  的增加会导致较为明显的材料强度弱化。

上述研究表明,不同的机械加工条件下复合材料的力学性能会有差异。为研究加工表面粗糙度对复合材料力学性能的影响规律,避免线粗糙度  $Ra$  在表征复合材料时的不确定性,本文选用三维表面算术平均高度  $Sa$  来表征 CFRP 加工表面粗糙度,采用不同工艺制备的表面粗糙度大小不同的标准试样,进行拉伸性能及压缩性能测试,研究表面粗糙度的改变是否会对材料性能造成影响。

## 1 试验与设备

### 1.1 试样制备

试验采用 T800 型 CFRP 层合板作为试验材料,纤维体积含量 65%。层合板的铺层方向为 $[(-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ)_2]_s$ ,共 16 层,厚度为 3 mm。

**基金项目:**国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20190507)

**第一作者简介:**范文涛(1996—),安徽黄山人,硕士研究生,研究方向为高效精密加工技术。

采用磨削和铣削两种工艺制备得到不同表面粗糙度大小的力学测试试样,其中磨削试样作为标准件。磨削试样由砂轮片切割获得,砂轮片外径 300 mm,内径 125 mm,线速度  $v_s = 1.6 \text{ m/s}$ ,进给速度  $v_w = 100 \text{ mm/min}$ ,径向切深  $a_e = 3 \text{ mm}$ ,轴向切深  $a_p = 2 \text{ mm}$ 。

铣削刀具采用金刚石涂层菱齿铣刀,为比较不同表面粗糙度对力学性能的影响,采用铣削参数为主轴转速  $n = 6\ 000 \text{ r/min}$ ,进给速度分别为  $v_f = 200、400、600、800、1\ 000、1\ 200、1\ 400、1\ 600、1\ 800 \text{ mm/min}$ ,切宽和切厚分别为刀宽与板厚,铣削的方式为逆铣,铣削加工工装如图 1 所示。一共可以得到 9 组具有不同表面粗糙度大小的试样。

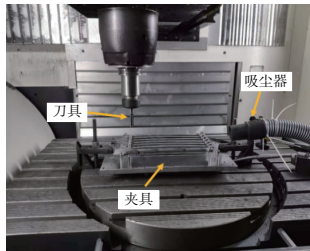


图 1 工装示意图

## 1.2 表面粗糙度检测

选用  $Sa$  来表征表面粗糙度的大小,采用 Sensofar 3D 光学轮廓仪对加工后的表面进行非接触式拍摄和测量,测量参数为:选用 Nikon20 倍镜,单个视场范围  $877 \mu\text{m} \times 660 \mu\text{m}$ , $x、y$  轴采样间距  $D_x = 0.645 \mu\text{m}$ 、 $D_y = 0.645 \mu\text{m}$ ,纵向分辨率  $D_z = 8 \text{ nm}$ ,横向分辨率  $R_1 = 0.31 \mu\text{m}$ ,数值孔径  $N_A = 0.45$ ,拍摄  $3 \times 4$  共 12 个视场拼接后截取  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的采样面积,就可以得到样件表面三维形貌及各点坐标,通过计算得到表面方均根高度  $Sa$  的大小。

## 1.3 力学强度测试

力学强度测试内容包含常用的拉伸强度测试和压缩强度测试。ASTM 相关标准获取的材料性能数据在各国复合材料界都被普遍接受,因此在本文中拉伸与压缩测试标准按 ASTM 标准执行。分析不同表面粗糙度对 CFRP 力学性能退化的影响规律。力学性能测试采用 ZwickRoell z100 全自动电子拉力试验机,如图 2 所示。



图 2 ZwickRoell z100 全自动电子拉力试验机

拉伸性能测试标准参考 ASTM D 3039-17 聚合物基复合材料拉伸标准试验方法,测试试样的名义尺寸:长度  $l = 200 \text{ mm}$ ,宽度  $w = 12 \text{ mm}$ ,厚度  $b = 3 \text{ mm}$ 。依据标准 CFRP

多向层合板采用砂纸作为加强片,测试的试样个数不少于 5 件。停止试验后,需对样件的断裂形式进行观察,断裂模式符合 ASTM 标准的数据才有可信度。通过试验测得最大拉伸载荷  $F_t$ ,拉伸强度  $\sigma_t$  计算公式如下:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{w \cdot b} \quad (1)$$

压缩性能测试标准参考 ADTM D6641-16,采用联合加载方法评价树脂基复合材料压缩强度特性,测试试样的名义尺寸为:长度  $l = 140 \text{ mm}$ ,宽度  $w = 12 \text{ mm}$ ,厚度  $b = 3 \text{ mm}$ 。由于采用联合加载的试验方法,试样无需加强片。测试的试样个数不少于 5 件。停止试验后,对样件的断裂形式进行观察,查看断裂模式是否符合 ASTM 标准。通过试验测得最大压缩载荷  $F_c$ ,压缩强度  $\sigma_c$  计算公式如下:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{w \cdot b} \quad (2)$$

为了对复合材料的力学性能进行正确的评估,需要统计每一组试验的数据,计算出测试性能的平均值、标准差和离散系数,如式(3)-式(5)所示。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$C_v = \frac{S_{n-1}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\bar{x}$ 是力学性能平均值; $n$ 是样本数量; $S_{n-1}$ 是样本的标准差; $x_i$ 是性能的测试值; $C_v$ 是性能的离散系数。

为了研究 CFRP 加工表面粗糙度对力学性能的影响规律,以磨削试样为基准,根据材料力学性能测试结果,计算各种表面损伤下试样的力学性能退化指标  $\alpha_s$ , $\alpha_c$  的计算方法如下:

$$\alpha_s = \frac{S_0 - S_D}{S_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $S_0$ 为 CFRP 砂轮片切割样件的拉伸强度、压缩强度; $S_D$ 为不同表面粗糙度铣削试样的拉伸强度、压缩强度,强度单位均为 MPa。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铣削表面粗糙度结果

磨削试样的  $Sa$  仅有  $1.2 \mu\text{m}$ ,如图 3 所示,磨削试样的表面质量好,无明显缺陷。

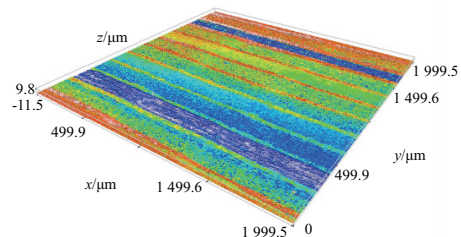


图 3 铣削试样表面三维形貌图

如图 4 所示,随着进给速度的增大, $Sa$  先发生了一个

小幅的下降,随后一直增大,当进给速度为 1 800 mm/min 时,  $S_a$  达到了 26.3  $\mu\text{m}$ 。

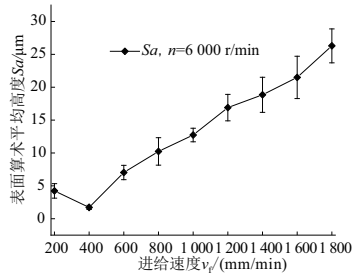


图 4 进给速度对表面粗糙度  $S_a$  的影响规律

图 5 显示的是铣削表面的三维形貌图。可以看出,当  $S_a$  较小时,表面整体高度起伏较小,也没有极端的表面“峰”或“谷”出现;但是当  $S_a$  较大时,不仅不同铺层之间的高度存在差异,且表面有连续且较深的“凹坑”和较高的“峰”。这些“凹坑”最深处可达 67.5  $\mu\text{m}$ ，“峰”最高 96.9  $\mu\text{m}$ 。这些缺陷在材料受载荷时会产生应力集中,但是复合材料基体的应变同时受到纤维以及结合界面的强度影响,需要研究因表面粗糙度改变而引起的表面缺陷是否足以影响到材料的力学强度。

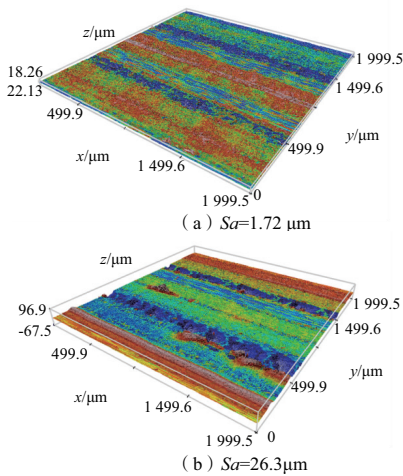


图 5 铣削试样表面三维形貌图

### 2.2 表面粗糙度对拉伸强度的影响

经过测试,磨削 CFRP 试样的拉伸强度为 718.8 MPa, 拉伸模量为 45.8 GPa, 拉伸试样的断口如图 6 所示,均为符合标准的断裂形式。



图 6 拉伸失效试样断口图

根据测试结果,  $S_a$  为 10.24  $\mu\text{m}$  时拉伸强度达到最大值, 为 708.74 MPa; 当  $S_a$  为 12.73  $\mu\text{m}$  时拉伸强度最小, 为 656.26 MPa, 比最大值下降了 7.4%。本次试验材料性能离散系数在 0.49% ~ 7.58% 之间, 试验结果在一定范围内波动, 但在 ASTM D3039-17 标准提供的参考范围内。因此可以认为试验结果符合要求, 并无异常。

图 7 显示的是表面粗糙度  $S_a$  对拉伸强度退化的影响结果。可以看到 CFRP 层合板试样拉伸强度的离散性非常大, 铣削试样的拉伸强度相较于磨削试样均发生了不同程度的退化。  $S_a$  未能对拉伸强度显现出具体的影响趋势, 但是当  $S_a > 15 \mu\text{m}$  时, 拉伸强度退化量总体增大。一方面, 在本文中的加工条件下无论何种表面粗糙度的试样, 拉伸强度退化最多的有 8.67%, 说明在本文的工况下并不会对拉伸强度造成急剧的退化, 另一方面, 复材拉伸强度自身的离散系数就偏大, 对表面质量带来的小幅强度变化造成了干扰。

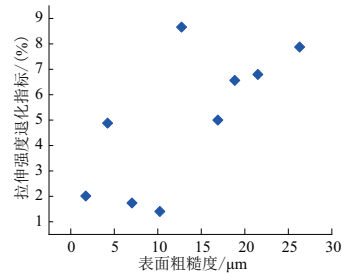


图 7 表面粗糙度对拉伸强度的影响

### 2.3 表面粗糙度对压缩强度的影响

经过测试,磨削 CFRP 试样的压缩强度为 576.7 MPa, 性能离散系数 12.87%, 断裂形式均符合标准。

压缩破坏的断口主要有横向剪切断裂和开花型劈裂两种模式, 如图 8 所示。复合材料的横向断裂一般由于材料成分的泊松比不同以及试样上横向应变存在的不均匀分布造成, 不论是哪种破坏模式, 可能都伴随着一系列其他现象: 纤维和基体的非弹性和非线性特性, 层间应力、表面层分离、整体失稳。这些现象的不同组合可能会造成即使使用相同的材料和试验程序, 也很难得到统一的失效模式或者得到较为一致的测试结果。

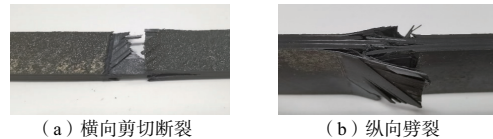


图 8 压缩失效试样断口图

当  $S_a$  为 4.23  $\mu\text{m}$  时压缩强度达到最大值, 为 596.31 MPa; 当  $S_a$  为 10.24  $\mu\text{m}$  时压缩强度最小, 为 512.69 MPa, 比最大值下降了 14.02%。本次试验材料性能离散系数在 0.38% ~ 12.88% 之间, 与 ASTM D6641-16 标准中的结果无明显差异。因此可以认为试验结果符合要求, 并无异常。

对不同表面粗糙度下的试样压缩强度进行统计, 结果如图 9 所示。可以看到层合板试样压缩强度的离散性非常大, 从个体的角度来看, 变化趋势不够显著。值得注意的是, 有一些铣削样件的压缩强度都显著高于磨削样件, 因此这部分试样的拉伸强度退化率是负数。磨削样件的表面质量好, 无明显表面缺陷, 其拉伸强度好于所有铣削试样, 但是在压缩强度中却不一样, 说明压缩强度不仅受表面粗糙度与缺陷影响, 还与加工的工艺方式有关。

(下转第 60 页)



可在不同的复杂环境下,仍保持较高的修正精度,对于五轴数控机床正向以及反向行程位置定位均可保持较高的修正性能,可有效提升五轴数控机床的定位精度。

### 3 结语

五轴数控机床被大量用于复杂曲面零件加工。加工时,因为受到机床精度、伺服系统动态特征匹配性较差等问题的干扰,存在一定程度的加工误差。为高精度修正五轴数控机床加工误差,本文提出了五轴数控机床加工误差动态修正方法,该方法对五轴数控机床加工误差的漏补率极低,低于 1.5%,且误差修正耗时极短,修补耗时低于 115 ms。本文方法应用后,五轴数控机床加工叶盘、叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴工件的淘汰率极低,均不到 1%,符合五轴数控机床加工误差修正需求。

#### 参考文献:

- [1] 刘巍,严洪悦,李肖,等. 机床动态检测中的高速图像运动去模糊还原[J]. 仪器仪表学报,2018,39(5):224-232.
- [2] 姜魏梁,招瑞丰. 基于扰动观测器的机床加工误差迭代学习控制[J]. 中国工程机械学报,2019,17(5):427-431.
- [3] 李海,李迎光,程英豪,等. 基于机床几何误差模型的数控加工形位误差预测[J]. 工具技术,2019,53(6):74-79.
- [4] 陆兴华,张忠海. 融合机床加工特性的主轴回转误差预

测[J]. 机床与液压,2019,47(20):33-37.

- [5] 江晖,曾飞,黄舟. 一种基于误差控制的曲线逼近数控加工策略研究[J]. 机床与液压,2019,47(10):31-34.
- [6] 胡东方,郭建伟. 弧面凸轮的非等径廓面加工误差控制[J]. 系统仿真学报,2019,31(4):727-732.
- [7] 王延忠,初晓孟,苏国营,等. 机床误差对面齿轮齿面形貌的影响规律[J]. 北京工业大学学报,2018,44(7):1017-1023.
- [8] 赫焕丽,王量. 基于最小二乘法的五轴机床静态误差建模[J]. 中国工程机械学报,2019,17(3):268-271,277.
- [9] 武剑,顾成劫,杜正春,等. 立式加工中心关键部件误差辨识分析[J]. 机械设计与研究,2018,34(4):81-84.
- [10] 刘焕牢,李小力,苏妙静,等. 数控机床误差补偿研究新方向——几何误差动态特性[J]. 工具技术,2019,53(11):8-11.
- [11] 谢飞,王玲,谭峰,等. 基于新陈代谢原理的机床热误差伪滞后建模[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(7):154-159,170.
- [12] 刘冰,陈诚,王勇,等. 某型复合加工机床床身动态特性分析与结构优化[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(3):72-77.
- [13] 俞建超,林有希. 高速加工中无氧铜的动态力学性能[J]. 上海交通大学学报,2018,52(5):587-592.
- [14] 张巍,郑敏利,姜彬,等. 车削大螺距外螺纹加工误差分布特性[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(2):45-52.
- [15] 黄华,王庆文,郭润兰,等. 基于状态空间模型的机床加工精度分析[J]. 工程设计学报,2019,26(3):321-329.

收稿日期:2020-11-18

(上接第 29 页)

的时候采用的是干式金刚石砂轮机切割,加工过程中的温度较高,对基体会有一定的影响,而压缩强度的性能主要由基体决定。从这里可以看出,若要保证 CFRP 的压缩性能,加工时减少基体的损伤尤为重要。

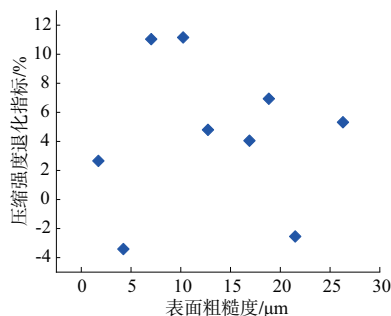


图9 表面粗糙度对压缩强度的影响

### 3 结语

1) 表面粗糙度  $S_a$  随着进给速度在 200~1 800 mm/min 范围内逐渐增大时,先小幅下降后持续增大。 $S_a$  较大时 CFRP 铣削表面有较多“凹坑”与“峰”。

2) CFRP 加工表面粗糙度  $S_a$  对拉伸强度和压缩强度的影响不显著,但是当  $S_a > 15 \mu\text{m}$  时,拉伸强度退化量增加。

3) CFRP 基体的性能对压缩强度影响更大,加工温度过高会损伤树脂基体,影响材料的压缩强度。

#### 参考文献:

- [1] 李春奇,殷俊,傅玉灿,等. 航空叠层材料制孔技术研究现状与发展趋势分析[J]. 机械制造与自动化,2015,44(3):24-26,35.
- [2] CHE D M, SAXENA I, HAN P D, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers; a literature review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(3): 034001.
- [3] 宁莉,杨绍昌,冷悦,等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程,2020(5):123-128.
- [4] HODGKINSON J M. Flexure [M]//Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. Amsterdam: Elsevier, 2000: 124-142.
- [5] GHIDDI P, EL MANSORI M, PIERRON F. Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(7/8):989-999.
- [6] HADDAD M, ZITOUNE R, BOUGHERARA H, et al. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 57:136-143.
- [7] 李皓. 基于能量法 CFRP 切削机理与加工表面质量表征方法研究[D]. 天津:天津大学,2016.

收稿日期:2020-12-10