纤维夹角和铣削参数对CFRP铣削力的影响

杨振朝　薛　阳　李　言　肖继明　元振毅

（西安理工大学机械与精密仪器工程学院，西安　710048）

文　摘　为探索CFRP铣削加工中出现的分层、崩边等表面缺陷形成机理，对CFRP进行铣削加工实验。基于单因素实验法获得了纤维夹角对CFRP铣削力的影响规律，基于中心复合曲面设计，获得了硬质合金刀具铣削CFRP过程中铣削速度、每齿进给量和铣削深度对铣削力的影响规律，并构建了铣削力的预报模型。实验结果表明：纤维夹角在0°~90°，铣削力随纤维夹角的增大而降低，而在90°~180°，铣削力随纤维夹角的增大而增大。f_z和a_e对三个方向铣削力影响都较为显著。v_c对y向和z向铣削力影响较为显著，而对x向铣削力影响不显著。铣削力随三个铣削参数的升高而增大，其中每齿进给量对铣削力影响最大。

关键词　CFRP，铣削力，纤维夹角，铣削参数

中图分类号：TG156　　DOI：10. 12044/j. issn. 1007-2330. 2018. 06. 015

Influence of Fiber Angle and Milling Parameters on Milling Force of CFRP

YANG Zhenchao　XUE Yang　LI Yan　XIAO Jiming　YUAN Zhenyi

（School of Mechanic and Precision Instrument Engineer，Xi'an University of Technology，Xi'an　710048）

Abstract　In order to explore the formation mechanism of surface defects such as delamination and chipping in milling of CFRP，the milling experiment of CFRP was carried out. Based on the single factor method，the influence of the fiber angle on the milling forces of CFRP was obtained. Using the central composite response surface method，the influence of milling speed，feed per tooth and milling width on the milling forces was analyzed，and the prediction models of the milling forces during the milling of CFRP were established. The experimental results show that the milling forces decrease with the increase of the fiber angle from 0° to 90°，while the milling force increase with the increase of the fiber angle from 90° to 180°. f_z and a_e have a significant influence on the three-direction milling forces. v_c has a significant influence on the y-direction and z-direction milling forces，while the influence on the x-direction milling force is not significant；the milling forces increase with the three milling parameters，and the feed per tooth has the greatest influence on the milling forces.

Key words　CFRP，Milling force，Fiber angle，Milling parameters

0　引言

碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）凭借其高比强度、耐高温、耐疲劳、耐腐蚀等优点，在航空和航天领域被广泛应用[1-2]。但是因CFRP的力学性能呈现各向异性，层间结合强度较低，在切削加工过程中，易形成毛刺、分层、崩边等表面缺陷，严重影响了工件的强度和疲劳寿命[3-4]。由于碳纤维的存在，相对于金属而言，CFRP在加工过程中存在切削力较大、刀具磨损极快的问题。研究表明，可以用切削力信号的分析结果评估刀具磨损和表面质量[5]。因此，对CFRP铣削力进行研究，对控制刀具磨损和工件表面质量具有重要意义。

CFRP切削力的影响因素主要有纤维夹角和切削用量。纤维夹角对CFRP切削力有显著影响，研究表明，纤维夹角取90°~180°时，刀具前角越大，切削力越大[6-7]；当纤维夹角为140°时，径向切削力达到最大值，而最大切向切削力发生在纤维夹角为120°[8]；0°和135°两个纤维方向上获取了较小的切削

收稿日期：2018-06-26

基金项目：国家自然科学基金项目（51775431，51475367）；陕西省科技统筹创新工程计划（2014SZS10-Z01）；陕西省自然科学基础研究项目（2015JQ5182）

第一作者简介：杨振朝，1982年出生，博士，讲师，主要研究方向为航空难加工材料切削加工技术、表面完整性控制技术等。E-mail：zcyang@xaut.edu.cn

力[9]。切削用量三要素中进给量对CFRP切削力影响最大，切削力随着进给量的增大而呈现增大趋势，建议在较高切削速度和较低的进给量下可以获得较低的切削力[9-14]。硬质合金（HTi10）、涂层（VP15TF）与金属陶瓷（NX2525）三种刀具中VP15TF刀具的主铣削力最小，最适合CFRP的铣削加工[15]。

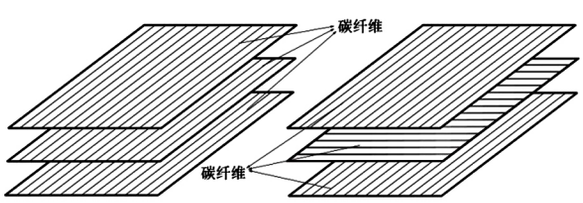
由此可见，由于CFRP本身的不均匀性和力学性能的各向异性，使得其切削机理比金属切削更加复杂，虽然目前取得了一些研究成果，但随着航空航天工业对构件要求的进一步提高，CFRP的切削技术在试验和理论分析方面仍需要进一步深入研究。本文基于单因素实验法研究CFRP铣削过程中纤维夹角对铣削力的影响，采用中心复合响应曲面法研究铣削用量对铣削力的影响，并建立了三个方向铣削力的预报模型，拟为CFRP铣削过程中铣削力控制和参数优化提供依据。

1 CFRP铣削实验

1.1 材料

采用CFRP层合板，采用东丽T300型碳纤维树脂经过高温高压固化而成，根据要求铺设成单向层合板和多向层合板。纤维所占比例为60%~70%，纤维密度为1.74~1.79 g/cm^3，弹性模量为226 MPa，泊松比为0.307，拉伸强度为3.5 GPa。每层纤维厚度为0.16 mm，共铺设24层，板厚为4 mm。

单向层合板为单一纤维方向铺设，用于研究纤维夹角对铣削力的影响。多向层合板铺设方向为0°和90°交叉铺设，用于研究铣削用量对铣削力的影响。两种层合板铺层方式如图1所示。为便于铣削过程中的安装，将固化好的CFRP样品切割成200 mm×60 mm×4 mm尺寸。



（a） 单向层合板　　（b） 多向层合板

图1 两种层合板铺层方式示意图

Fig. 1 Two kinds of CFRP laminates

1.2 实验设备及过程

所有铣削实验在哈斯加工中心上进行，如图2所示，该机床具有刚性强、精度高、稳定性好等优点，最大主轴转速为3×10^4 r/min。

采用的K型四齿硬质合金立铣刀，直径d=10 mm，γ_0=10°，α_0=12°，β=40°。铣削力信号由9257B三向测力仪测得，经由5070A电荷放大器放大，通过数据采集模块以及笔记本进行数据采集和分析。将铣削力测量数据中连续50个最大值的平均值作为最终铣削力的大小。



图2 哈斯加工中心

Fig. 2 HAAS machining center

每组参数条件下走两刀，顺铣，干切削。实验加工现场及铣削力测试装置如图3所示。



（a） 实验加工现场　　（b） 铣削力测试装置

图3 实验现场及铣削力测量系统

Fig.3 Experimental site and milling force measurement system

1.3 方案设计

通常在铣削时，定义工件进给方向与纤维走向之间的夹角θ为纤维夹角，如图4所示。因此，实验过程中，通过改变单向层合板角度来获得不同的纤维夹角。

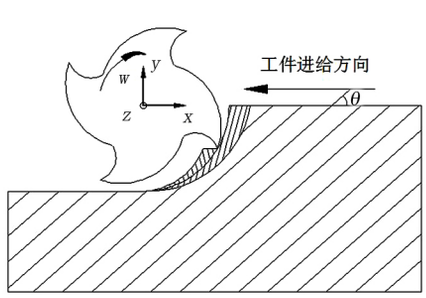


图4 铣削过程纤维夹角定义

Fig. 4 Definition of fiber angle during milling process

纤维夹角对铣削力的影响实验采用单因素实验法，纤维夹角依次取0°、30°、45°、60°、90°、120°、150°、180°，铣削参数恒定不变，其中铣削速度v_c为94.2 m/min、每齿进给量f_z为0.1 mm/z、铣削深度a_p为4 mm、铣削宽度a_e为1.5 mm。

采用中心复合设计法（CCD）来研究铣削用量对

铣削力的影响，以铣削速度v_c、每齿进给量f_z和铣削宽度a_e为自变量，铣削深度恒定为4 mm。铣削用量编码及水平值见表1，其中编码值+1.68和−1.68表示轴向点，+1和−1表示因子点，0表示中心点。x向、y向、z向对应的铣削力F_x、F_y、F_z作为因变量。

表1　铣削用量编码及水平值

Tab. 1　Code and level of independent variable factor

编码	v_c/m·min^{-1}	f_z/mm·z^{-1}	a_e/mm
−1.68	41.39	0.02	0.66
−1	62.8	0.05	1
0	94.2	0.1	1.5
1	125.6	0.15	2
1.68	147.01	0.18	2.34

2　结果及分析

2.1　纤维夹角对铣削力的影响规律

纤维夹角对铣削力的影响实验结果如图5所示。可以看出，在0°~90°，随着纤维夹角的增大，三个方向铣削力都随之降低。这是因为在0°~90°，铣削力由垂直于碳纤维方向的剪切力以及挤压树脂基体的拉伸力合成。而在90°~180°内，随着纤维夹角的增大，三个方向铣削力随之增大。这是因为在90°~180°时，铣削力由垂直于碳纤维的剪切力和平行于树脂基体的拉伸力合成。在纤维夹角取90°时，铣削力最小。这是因为在90°时，相当于把纤维直接剪断，此时只有垂直于纤维取向的剪切分力，而没有拉伸分力，因此，铣削力此时最小。

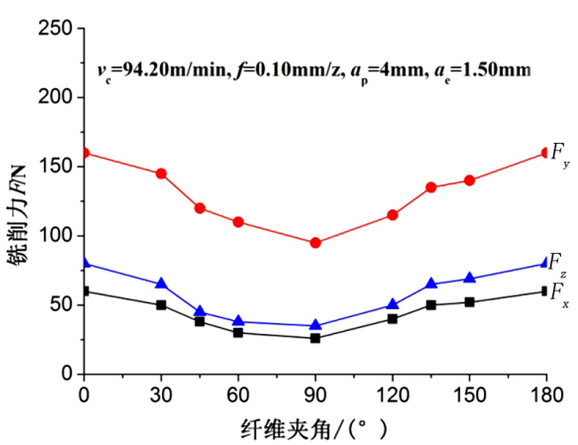


图5　纤维夹角对铣削力的影响规律

Fig. 5　Effect of fiber angle on milling force

2.2　铣削参数对铣削力的影响规律

铣削参数对铣削力的影响采用中心复合响应曲面设计法，具体实验方案及铣削力测量结果如表2所示。

表2　实验参数及铣削力测量结果

Tab. 2　Experimental parameters and milling force measurement results

run	v_c /m·min^{-1}	f_z /mm·z^{-1}	a_e /mm	F_x /N	F_y /N	F_z /N
1	41.39	0.10	1.50	55	165	35
2	62.80	0.15	2.00	80	230	80
3	62.80	0.05	1.00	30	130	20
4	62.80	0.05	2.00	40	165	25
5	62.80	0.15	1.00	60	200	45
6	94.20	0.10	1.50	56	206	60
7	94.20	0.10	1.50	54	203	58
8	94.20	0.10	1.50	58	210	61
9	94.20	0.10	0.66	42	185	35
10	94.20	0.18	1.50	65	285	100
11	94.20	0.10	1.50	57	208	60
12	94.20	0.10	1.50	59	214	63
13	94.20	0.02	1.50	20	100	12
14	94.20	0.10	2.34	60	220	70
15	94.20	0.10	1.50	55	204	57
16	125.60	0.15	1.00	55	280	60
17	125.60	0.05	2.00	48	270	62
18	125.60	0.15	2.00	80	375	76
19	125.60	0.05	1.00	38	176	23
20	147.01	0.10	1.50	46	220	64

2.2.1　CFRP铣削力预报模型的建立

回归分析的方法有顺向选择法（forward）、反向淘汰法（backward）和逐步回归法（stepwise）。逐步回归法是顺向选择法和反向淘汰法的综合，首先根据顺向选择法选入自变量，然后根据反向淘汰法，将模型中F值最小的且符合剔除判据的变量剔除出模型，重复进行直到回归方程中自变量符合进入模型的判据，模型外的自变量都不符合进入模型的判据为止。这里采用逐步回归法，对表2中的测试结果进行多项式拟合，得到F_x、F_y和F_z的预报模型如下：

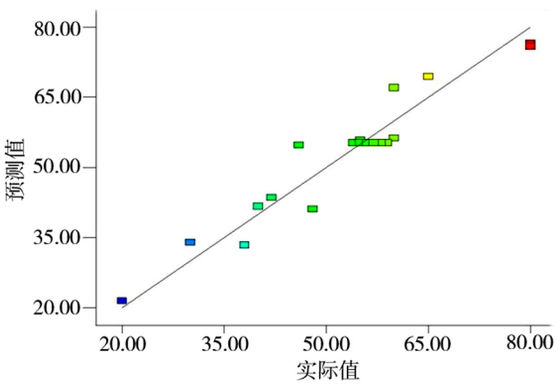
$$F_x = 11.58 - 0.00965v_c + 375.81f_z + 1.45a_e + 125f_za_e - 1391.02f_z^2 \quad (1)$$

$$F_y = 139.72 - 0.98v_c + 404.42f_z - 47.18a_e + 5.89v_cf_z + 0.99v_ca_e \quad (2)$$

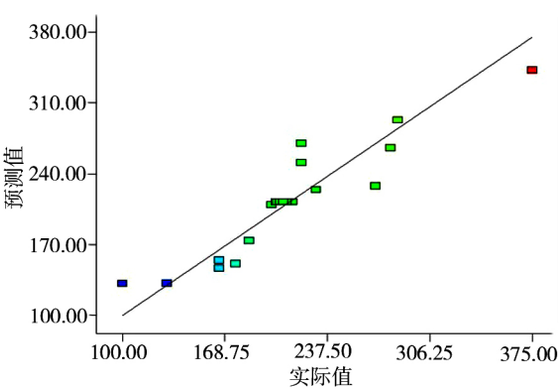
$$F_z = -103.6 + 1.03v_c + 408.58f_z + 59.69a_e - 0.00422v_c^2 - 12.38a_e^2 \quad (3)$$

对所建立的F_x、F_y和F_z的预报模型进行精度检验，如图6所示。可以看出，当图中的点离直线越近，代表模型预测值与实验值越接近。所有的点都均匀分布在直线两侧，并无太大跳动，说明铣削力预测值

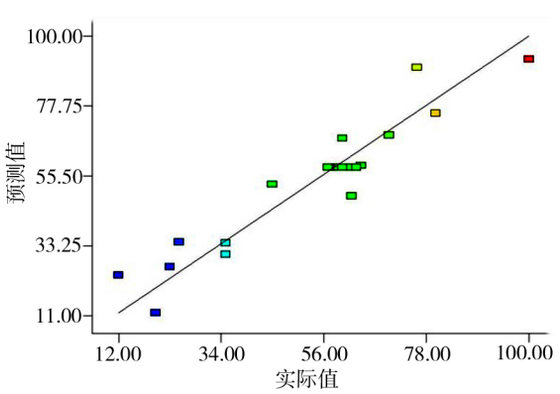
与实验值符合较好。经计算F_x预测值与实验值平均误差为6.5%，F_y预测值与实验值平均误差为8.1%，F_z预测值与实验值平均误差为14.6%，均在合理范围内，充分说明所建立的F_x、F_y和F_z预报模型是正确的。



(a) F_x



(b) F_y



(c) F_z

图6　切削力预报模型的精度分析

Fig.6　Accuracy analysis of cutting forces prediction models

2.2.2　模型方差分析及显著度检验

对式(1)~(3)进行方差分析，结果如表3所示。从表3可以看出：三个预报模型P<0.0001，说明构建的铣切削力预报模型都是极其显著的；F_x模型拟合度R^2=0.9228，调整的R^2=0.8953，F_y模型拟合度R^2=0.8626，调整的R^2=0.8135，F_z模型拟合度R^2=0.8995，调整的R^2=0.8636，表明F_x、F_y和F_z的预报值与实际值拟合度较好。采用中心复合设计法构建的CFRP铣削力的预报模型是有效的。

从显著性检验结果可以看出：F_x模型里f_z和a_e极其显著(P<0.0001)，f_z^2较显著，v_c和f_za_e不显著。F_y模型里f_z极其显著，v_c和a_e较显著，vf_z和v_ca_e不显著。F_z模型里f_z极其显著，v_c和a_e较显著，v_c^2和a_e^2不显著。

表3　预报模型方差分析

Tab. 3　Variance analysis of regression models

	来源	平方和	自由度	均方	F值	P值 (Prob>F)
F_x 1)	模型	3696.7	5	739.3	33.5	<0.0001
	A-v_c	1.3	1	1.3	0.06	0.8152
	B-f_z	2775.2	1	2775.2	125.7	<0.0001
	C-a_e	664.6	1	664.6	30.1	<0.0001
	BC	78.1	1	78.1	3.5	0.0809
	B^2	177.5	1	177.5	8.0	0.0132
F_y 2)	模型	57272.9	5	11454.6	17.6	<0.0001
	A-v_c	16071.9	1	16071.9	24.7	0.0002
	B-f_z	31427.3	1	31427.3	48.2	<0.0001
	C-a_e	7167.3	1	7167.3	11.0	0.0051
	AB	684.5	1	684.5	1.1	0.3228
	AC	1922.0	1	1922.0	3.0	0.1079
F_z 3)	模型	8522.2	5	1704.4	25.1	<0.0001
	A-v_c	728.9	1	728.9	10.7	0.0055
	B-f_z	5699.7	1	5699.7	83.8	<0.0001
	C-a_e	1733.5	1	1733.5	25.5	0.0002
	A^2	251.5	1	251.5	3.7	0.0750
	C^2	139.5	1	139.5	2.1	0.1740

注：1)F_x，R^2=0.9228，调整的R^2=0.8953；2)F_y，R^2=0.8626，调整的R^2=0.8135；3)F_z，R^2=0.8995，调整的R^2=0.8636。

2.2.3　铣削用量对铣削力的影响

图7所示为铣削力随铣削速度的变化曲线，可以看出，三向铣削力都随铣削速度的增大而升高。这是因为随着v_c的增大，切削刃切除材料的频率增多，硬质碳纤维对铣刀表面的摩擦和刻划作用加强，导致铣削力上升[16]。

图8是每齿进给量对铣削力的影响曲线，可以看出，三向铣削力都随f_z的升高而升高，其中在实验参数范围内F_y变化比F_x、F_z大。这是因为瞬时切削厚度和f_z成正比例关系，f_z的增大相当于增加了每个切削刃瞬时切削厚度，因此铣削力增大。

图9是铣削宽度对铣削力的影响曲线，可以看

出，三向铣削力都随a_e的增大而升高，但整体变化不大。这是由于切削面积随a_e的增大而增大，因此使铣削力升高。

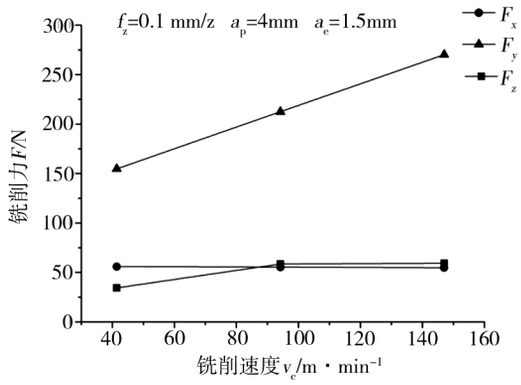


图7 v_c对铣削力的影响

Fig.7 Effect of milling speed on milling force

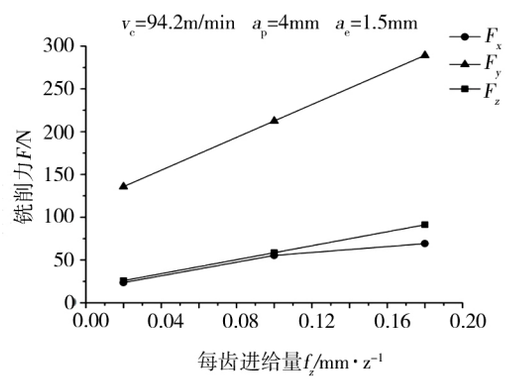


图8 f_z对铣削力的影响

Fig.8 Effect of feed per tooth on milling force

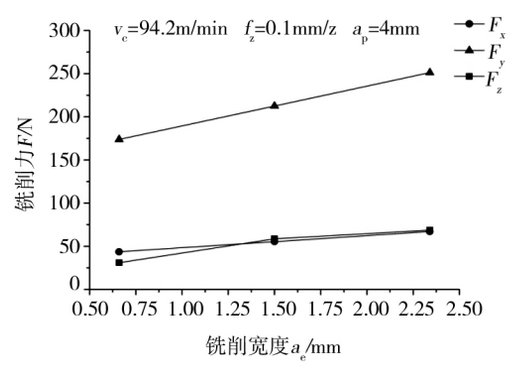


图9 a_e对铣削力的影响

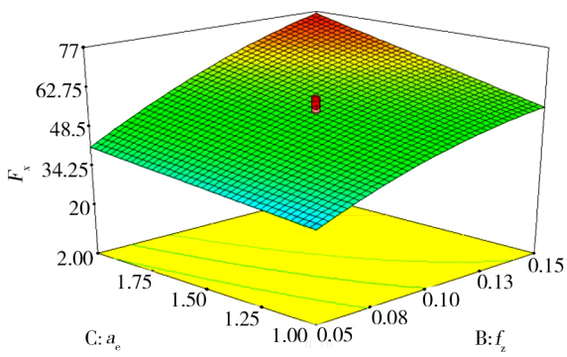
Fig.9 Effect of milling width on milling force

2.2.4 铣削参数对铣削力影响的响应曲面

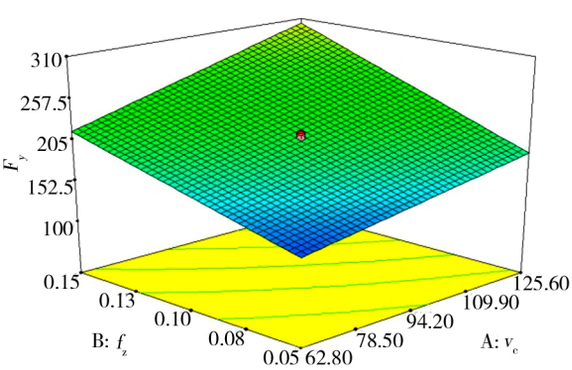
根据建立的铣削力模型发现，F_x和F_y中存在交互项，F_z中无交互项，因此对F_x和F_y中交互项进行响应曲面分析，如图10所示。

从图10(a)可以看出F_x随着v_c和f_z的增大而增大，F_x随f_z变化趋势较大，随v_c变化趋势较小。图10(b)为a_e和f_z对F_x影响的响应曲面，可以看出F_x随着a_e和f_z的增大而增大，F_x随f_z变化趋势较大，随a_e变化趋势较小。从图10(c)可以看出F_x随v_c和f_z的增大而增大，F_x随f_z变化趋势较大，随v_c变化趋势较小。

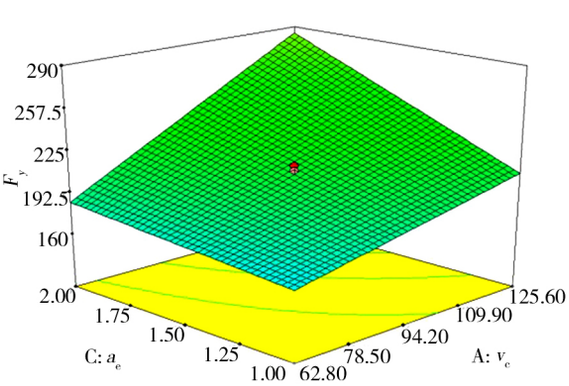
对v_c、f_z和a_e对铣削力的影响程度进行对比发现，f_z对铣削力的影响最大。



(a) f_z和a_e对F_x的影响



(b) v_c和f_z对F_y的影响



(c) v_c和a_e对F_y的影响

其他参数在0水平

图10 交互项对铣削力影响的响应曲面

Fig.10 Response surfaces for interaction item on milling force effects

3 结论

(1)纤维夹角在0°~90°，随着纤维夹角的增大，三个方向铣削力都随之降低，而在90°~180°，随着纤维夹角的增大，三个方向铣削力随之增大，当纤维夹

角为90°时，铣削力最小；

（2）在实验所用参数范围内，采用中心复合设计所构建的硬质合金立铣刀铣削CFRP过程中的铣削力预报模型是有效的；

（3）v_c对F_y、F_z影响较显著，而对F_x影响不显著，f_z和a_e对三向铣削力影响都显著；

（4）三个方向铣削力都随v_c、f_z和a_e的升高而增大，其中f_z对铣削力影响最大。

参考文献

[1] PRAMANIK A, BASAK A K, DONG Y, et al. Joining of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites and aluminum alloys–a review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 101: 1–29.

[2] 陈燕，葛恩德，傅玉灿，等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报，2015，32(2)：301–316.

[3] SALEEM M, TOUBAL L, ZITOUNE R, et al. Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 55: 169–177.

[4] 陈涛，苗光，李素燕. 碳纤维复合材料切削加工技术研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报，2016，21(2)：71–77.

[5] NOR K M K, CHE H C H, JAHARH A G, et al. Tool wear and surface roughness on milling carbon fiber–reinforced plastic using chilled air[J]. Journal of Asian Scientific Research, 2012(2): 593–598.

[6] 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.

[7] KARPAT Y, BAHTIYAR O, DEGER B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 56: 79–93.

[8] VOß R, HENERICHS M, KUSTER F, et al. Chip root analysis after machining carbon fiber reinforced plastics (CFRP) at different fiber orientations [J]. Procedia CIRP, 2014 (14): 217–222.

[9] 蔡晓江，唐宏亮，倪云龙，等. T800碳纤维增强复合材料精密切削加工机理[J]. 宇航材料工艺，2016，46(4)：64–67.

[10] RUSINEK R. Cutting process of composite materials: An experimental study [J]. International Journal of Non–Linear Mechanics, 2010, 45(4): 458–462.

[11] SOUSSIA A B, MKADDEM A, MANSORI M E. Rigorous treatment of dry cutting of FRP–interface consumption concept: A review [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 83(4): 1–29.

[12] MATHIVANAN N R, MAHESH B S, SHETTY H A. An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates[J]. Measurement, 2016, 91: 39–45.

[13] ÇOLAK O, SUNAR T. Cutting forces and 3D surface analysis of CFRP milling with PCD cutting tools [J]. Procedia CIRP, 2016, 45: 75–78.

[14] 王福吉，殷俊伟，贾振元，等. CFRP复合材料铣削力、温度及表层损伤分析[J]. 机械工程学报，2018，54(3)：187–195.

[15] 段春争，李朋欣. 刀具材料对CFRP铣削力的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术，2018(2)：116–118.

[16] 禹杰，林有希，林华. 基于响应曲面法的CFRP高速铣削切削力试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2017，40(4)：438–442.