

铣削参数对玻璃纤维复合材料铣削力的影响研究

李志伟,涂俊翔

福州大学

摘要: 针对玻璃纤维增强复合材料(GFRP)进行铣削力研究,以切削参数(主轴转速、进给速度、进给量)为自变量进行 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验,分析其对GFRP铣削力的影响。试验表明,铣削力随进给速度、铣削深度的增大而增大,随主轴转速的增大而减小。对铣削力做多元回归分析,建立相关数学模型并通过显著性分析验证其合理性,有助于分析切削参数对铣削力的影响规律。

关键词: 玻璃纤维增强复合材料(GFRP);铣削力;铣削参数;回归分析

中图分类号: TG704;TH140

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.07.004

Research on Influence of Milling Parameters on Milling Force of Glass Fiber Composites

Li Zhiwei, Tu Junxiang

Abstract: Aiming at the milling force of glass fiber composite (GFRP), the $L_{27}(3^{13})$ orthogonal experiment is carried out with the cutting parameters (spindle speed, feed rate and feed rate) as independent variables, and its influence on the milling force of GFRP is analyzed. Experiments show that the milling force increases with the increasing of feed speed and milling depth, and decreases with the increasing of spindle speed. Multivariate regression analysis of milling force, establishment of relevant mathematical models and verification of its rationality through significant analysis are helpful to analyze the influence of cutting parameters on milling force.

Keywords: glass fiber reinforced composite (GFRP); milling force; milling parameter; regression analysis

1 引言

玻璃纤维复合材料(GFRP)是用玻璃纤维丝为增强相、树脂作基体,经特定成型工艺制造而成的一种纤维增强复合材料^[1]。近年来,GFRP材料以其高强度比、低密度、优良的耐腐蚀及耐热性广泛应用于交通运输、航空航天、医疗器械和电力等行业^[2-4]。随着玻璃纤维应用范围的不断扩大,以铣削^[5]、钻削^[6]、车削^[7]为代表的切削加工方法在玻璃纤维的加工制造方面的应用不断增加。但因玻璃纤维受非均质性和散热能力差等限制,在切削加工过程中刀具容易出现磨损,材料容易产生分层和纤维撕裂等现象,加大了玻璃纤维的切削加工难

度^[8-10]。

针对玻璃纤维切削加工难的问题,Takeyama H.等^[11]研究了不同纤维方向的GFRP切削过程中切屑的形成机理及其对加工表面质量的影响。Palanikumar K.^[12]利用PCD刀具研究切削参数对GFRP表面粗糙度的影响,并建立预测表面粗糙度的二阶模型。Khan M. A.等^[13]利用氧化铝刀具探究了在进给量和切削深度一定的前提下,不同的切削速度对玻璃纤维增强复合材料切削性能的影响,并通过测量加工表面粗糙度来评价GFRP的切削性能。张秀丽等^[14]利用高速钢立铣刀对GFRP进行铣削试验,探究了不同切削深度对GFRP加工过程中分层情况的影响,并拟合出分层因子与切削参数的数学模型。Lee E. S.^[15]分别使用不同刀具研究在不同切削参数下GFRP切削力的大小,并用功率谱密度和表面形貌图作进一步对比,验证分析结果的合理

基金项目:福州市科技局项目(2017-G-71,2018-G-57)

收稿日期:2018年11月

[13] O Çomaklı, T Yetim, A Çelik. The effect of calcination temperatures on wear properties of TiO₂ coated CP-Ti [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 246: 34-39.

第一作者:张亮亮,硕士研究生,山东大学机械工程学院,250061 济南市

First Author: Zhang Liangliang, Postgraduate, School of Me-

chanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

通信作者:邓建新,教授,山东大学机械工程学院,250061 济南市

Corresponding Author: Deng Jianxin, Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

性,并得出最优铣削参数组合。

切削力是分析材料切削加工过程中的切削热、工件的机械加工性能及加工表面质量、刀具磨损及刀具失效的基础^[16]。深入研究不同切削参数对GFRP切削力的影响,对改善玻璃纤维的加工性能、获得最优加工质量具有显著的参考价值^[17,18]。目前,国内外对玻璃纤维铣削加工过程中,铣削参数对切削力的影响研究较少。为此,本试验主要利用硬质合金立铣刀对GFRP进行铣削试验,分析了切削力随铣削参数的变化规律,并建立了主轴转速、切削深度和进给速度与切削力关系的相关模型,为减小铣削力,提高玻璃纤维铣削加工质量提供理论支持。

2 试验方案

2.1 试验设计

纤维材料及基质材料的物理特性、纤维方向、体积分数均显著影响GFRP的加工特性,而且铣削方式、外界环境和刀具几何参数等大量的影响因素也会增加试验研究的复杂性,因此,本文在尽量降低可控因素对试验结果影响的前提下进行正交试验。以铣削力为试验指标,主轴转速 n 、进给速度 v_f 和铣削深度 a_p 作为试验自变量,各因素均取3个水平,获得 $L_{27}(3^3)$ 的正交试验因素水平见表1。

表1 正交试验因素水平表

水平	转速 n (r/min)	进给速度 v_f (mm/min)	铣削深度 a_p (mm)
1	3000	150	0.5
2	6000	450	1.5
3	9000	750	2.5

2.2 试验条件

试验工件采用手糊制作而成的GFRP层压板,正交双向铺层,试件尺寸为170mm×100mm×5mm,纤维体积分数60%,如图1所示。

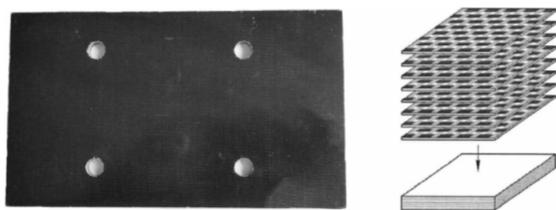


图1 GFRP层压板及铺层结构

硬质合金具有高硬度和高韧性等优良特性,最适合于复合材料的加工,因此试验采用直径8mm、长60mm的整体式四刃硬质合金TiAlN涂层立铣刀,螺旋角35°,如图2所示。



图2 8mm硬质合金四刃立铣刀

在SXDK6050D数控雕铣机上进行铣削加工试验,主电机功率为3kW,主轴最高转速为24000r/min,最大进给速度为3500mm/min。使用Kistler 9257B动态测力仪记录铣削力数据,铣削力测量系统如图3所示。

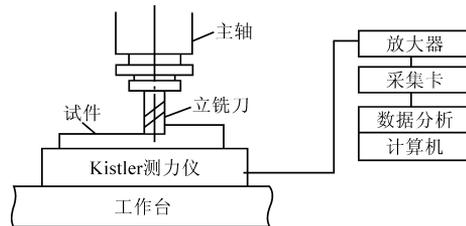


图3 铣削力测量系统

因切削液可能通过毛细作用渗入层压板,材料内部因易吸湿加剧了材料分层,使物理性质和机械特性产生骤变,对其加工性能产生不良影响,因此,试验采用干铣削加工方法铣槽,试验平台见图4。



图4 玻璃纤维复合材料铣削试验平台

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

铣削加工过程中,由于数控机床产生振动使 z 向力的信号发生如图5所示的零点漂移现象,产生很大误差,影响 z 向力的读取,且刀具的轴向跳动和振动也会导致测得的铣削力无法反映真实情况,因此,试验只研究 F_x 、 F_y 的变化情况,对平稳阶段的铣削力取平均值。正交铣削试验共获得27种不同切削参数组合下的 F_x 和 F_y ,试验结果如表2所示。

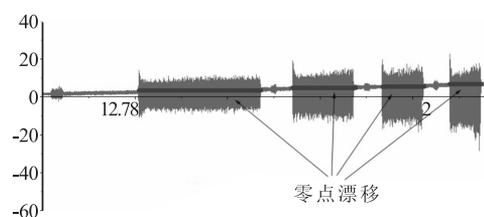


图5 z 方向铣削力的波形变化

表2 正交试验表

组数	n (r/min)	v_f (mm/min)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)
1	3500 (1)	0.5 (1)	150 (1)	12.40	9.10
2	3500 (1)	0.5 (1)	450 (2)	25.00	19.10
3	3500 (1)	0.5 (1)	750 (3)	32.16	25.76
4	3500 (1)	1.5 (2)	150 (1)	21.60	17.14
5	3500 (1)	1.5 (2)	450 (2)	43.04	37.50
6	3500 (1)	1.5 (2)	750 (3)	56.48	46.80
7	3500 (1)	2.5 (3)	150 (1)	30.44	23.58
8	3500 (1)	2.5 (3)	450 (2)	60.24	47.22
9	3500 (1)	2.5 (3)	750 (3)	81.20	65.65
10	6500 (2)	0.5 (1)	150 (1)	8.52	5.68
11	6500 (2)	0.5 (1)	450 (2)	15.68	10.88
12	6500 (2)	0.5 (1)	750 (3)	25.32	17.54
13	6500 (2)	1.5 (2)	150 (1)	15.08	8.00
14	6500 (2)	1.5 (2)	450 (2)	28.44	17.12
15	6500 (2)	1.5 (2)	750 (3)	37.24	26.16
16	6500 (2)	2.5 (3)	150 (1)	20.64	11.40
17	6500 (2)	2.5 (3)	450 (2)	44.40	25.02
18	6500 (2)	2.5 (3)	750 (3)	60.60	46.56
19	9500 (3)	0.5 (1)	150 (1)	5.44	3.46
20	9500 (3)	0.5 (1)	450 (2)	12.16	6.96
21	9500 (3)	0.5 (1)	750 (3)	18.32	12.56
22	9500 (3)	1.5 (2)	150 (1)	10.78	5.18
23	9500 (3)	1.5 (2)	450 (2)	22.00	14.14
24	9500 (3)	1.5 (2)	750 (3)	30.88	17.24
25	9500 (3)	2.5 (3)	150 (1)	17.80	12.96
26	9500 (3)	2.5 (3)	450 (2)	31.40	20.06
27	9500 (3)	2.5 (3)	750 (3)	49.08	34.48

3.2 铣削力预测模型建立及检验

目前对 GFRP 铣削加工的研究才刚刚兴起,对铣削力的预测及调控受到国内外学者的广泛关注。与金属相比,由于复合材料的切削机理较为复杂,且加工工艺、加工参数及建模方法等有所差异,对影响铣削力的因素难以定量分析,尚无公认的经验公式为铣削参数的合理选用提供依据,只能在研究者采用的铣削参数下做建模分析。因此,为研究 GFRP 铣削加工过程中铣削力变化的一般性规律,建立基于正交试验条件下,以主轴转速 n 、进给速度 v_f 、铣削深度 a_p 为自变量的铣削力回归模型,即

$$F = Cn^{k_1}v_f^{k_2}a_p^{k_3}$$

式中,系数 C 取决于工件材料的类型及铣削条件; k_1, k_2, k_3 分别为待求指数。

上式可化为线性函数,即

$$\lg F = \lg C + k_1 \lg n + k_2 \lg v_f + k_3 \lg a_p$$

将表 3 正交试验数据导入 SPSS 数据分析软件进行多元线性回归计算,最终得到铣削力 F_x 和 F_y 的预测模型为

$$F_x = 10^{2.116} n^{-0.636} v_f^{0.636} a_p^{0.581}$$

$$F_y = 10^{3.027} n^{-0.961} v_f^{0.688} a_p^{0.559}$$

模型的准确度需通过显著性分析来校验,铣削力的方差分析、回归方程的显著性分析、回归系数的显著性分析分别见表 3、表 4 和表 5。

表3 铣削力的方差分析

分析项	源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
F_x	校正的模型	8229.668	6	1371.611	34.715	0.000
	截距	24681.889	1	24681.889	624.696	0.000
	n	1550.709	2	775.355	19.624	0.000
	a_p	3228.570	2	1614.285	40.857	0.000
	v_f	3450.389	2	1725.194	43.664	0.000
	错误	790.205	20	39.510		
	总计	33701.762	27			
	校正后的总变异	9019.873	26			
F_y	校正的模型	5500.283	6	916.714	24.476	0.000
	截距	12772.687	1	12772.687	341.024	0.000
	n	1634.054	2	817.027	21.814	0.000
	a_p	1725.715	2	862.858	23.038	0.000
	v_f	2140.514	2	1070.257	28.575	0.000
	错误	749.078	20	37.454		
	总计	19022.049	27			
	校正后的总变异	6249.361	26			

表4 回归方程显著性分析

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性	
$\lg F_x$	回归	2.054	3	0.685	606.512	0.000
	残差	0.026	23	0.001		
	总计	2.080	26			
$R^2 = 0.988$, 调整后的 $R^2 = 0.986$						
$\lg F_y$	回归	2.601	3	0.867	315.205	0.000
	残差	0.063	23	0.003		
	总计	2.665	26			
$R^2 = 0.976$, 调整后的 $R^2 = 0.973$						

表5 回归系数显著性分析

模型	非标准化系数		标准系数	t	显著性	
	B	标准错误	β			
$\lg F_x$	(常量)	2.116	0.148		14.278	0.000
	$\lg n$	-0.636	0.036	-0.410	-17.590	0.000
	$\lg a_p$	0.581	0.022	0.611	26.213	0.000
	$\lg v_f$	0.636	0.022	0.668	28.688	0.000
$\lg F_y$	(常量)	3.027	0.231		13.083	0.000
	$\lg n$	-0.961	0.056	-0.547	-17.017	0.000
	$\lg a_p$	0.559	0.035	0.519	16.151	0.000
	$\lg v_f$	0.688	0.035	0.639	19.879	0.000

由表 3 铣削力的方差分析结果可知,各因素的 F 值均大于 $F_{0.01}(2, 23) = 5.66$,且各因素的显著性 $P < 0.01$,说明各因素对铣削力的影响极其显著。根据各因素的 F 值可知,各因素的影响顺序为:进给速度 $v_f >$ 铣削深度 $a_p >$ 主轴转速 n 。

在回归分析中, R^2 为决定系数,作为评价多元回归模型与试验结果拟合程度的检验指标, R^2 的值越接近于 1,说明方程拟合程度就越好,与试验值的误差越小,方程的精确度就越高。由表 4 回归方程显著性分析结果可知, F_x 回归模型的决定系数 $R^2 = 0.988$,调整后的 $R^2 = 0.986$; F_y 回归模型的决定系

数 $R^2 = 0.976$, 调整后的 $R^2 = 0.973$, F_x 、 F_y 的回归平方和分别解释了模型总平方和的 98.75%、97.60%, 且 F_x 、 F_y 模型的 F 值分别为 606.512、315.205, 均远大于 $F_{0.01}(3, 23) = 4.76$, 说明 F_x 与 F_y 的预测值与试验值拟合程度较好。在表 5 回归系数的显著性检验中各系数的显著性均小于 0.01, 表明在 $\alpha = 0.01$ 的水平上各个参数对 F_x 、 F_y 的影响高度显著。

在数据分析中, 从回归标准化残差直方图和正态 P-P 图来进一步验证模型的充分性和可靠性。由直方图 6 可看出, F_x 的回归模型图形整体均服从正态分布。由图 7 回归标准化残差散点分布可看出, 观测到的累计概率散点均落在直线 $y = x$ 附近, 同样表明该模型大体服从正态分布。因此, 可使用该模型进行铣削力的预测及分析。

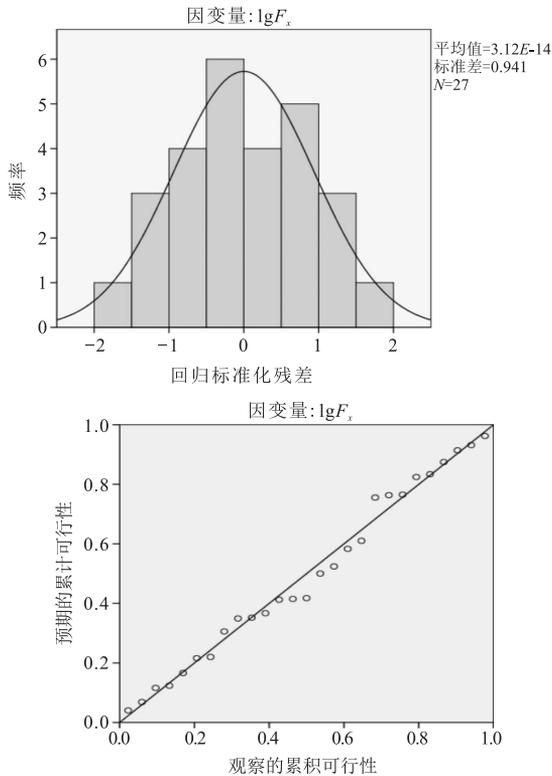


图 6 F_x 回归标准化残差的直方图

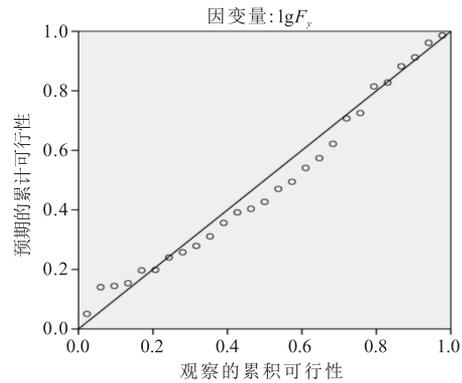
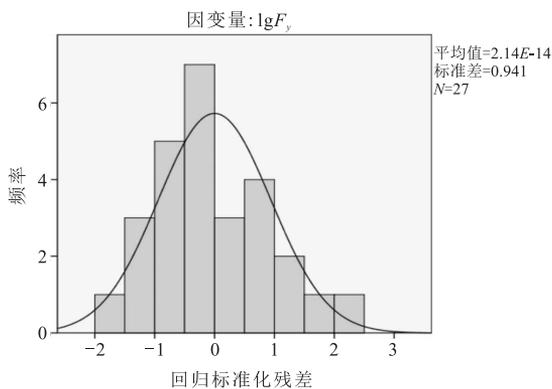


图 7 F_y 回归标准化残差的正态 P-P 图

3.3 铣削参数对铣削力的影响分析

由于玻璃纤维复合材料脆性较强, 在铣削加工过程中, 玻璃纤维丝和环氧基体的断裂降低了刀具侧面和前刀面与切屑的接触几率, 从而减轻了刀具与工件材料之间的摩擦, 因此, 与金属等均相韧性材料相比, 玻璃纤维的铣削力相对较小。

由铣削力公式可知, 铣削力 F_x 、 F_y 均随着进给速度的增大而增大, 这是因为 GFRP 是典型的脆性材料, 增大进给速度使铣削刃在单位时间内的铣削量增加, 刀刃切入切出时受到的冲击和振颤也随之增大, 刀刃的晶粒可能发生崩碎和脱落, 刀具因质量恶化产生严重磨损, 铣削力因此急剧提升; 随铣削深度的增大而增大, 这是因为增加铣削深度, 铣刀参与切削的刃长增加, 铣刀与工件的摩擦面扩大, 单位时间切除材料的体积也有所增加, 因此铣削力变大; 随主轴转速的增大而减小, 这是由于玻璃纤维复合材料导热系数低, 提高主轴转速使单位时间内铣削刃切除材料的次数增多, 加剧刀具与工件表面的摩擦, 进而产生大量铣削热, 因热量无法迅速散失使刀具与工件接触区温度骤增, 软化聚合物基体, 导致 GFRP 的强度下降, 因此只需要相对较小的切削力即可将玻璃纤维切除。

4 结语

本文采用正交试验法, 选用涂层硬质合金立铣刀进行 GFRP 铣削试验, 研究主轴转速、进给速度和切削深度对 GFRP 铣削力的影响规律, 得出以下结论:

(1) 主轴转速、进给速度和铣削深度对铣削力的影响程度不同, 在本试验条件下, 进给速度对铣削力的影响极其显著, 其次是铣削深度和主轴转速, 铣削力 F_x 、 F_y 均随进给速度和切削深度的增大而增大, 随主轴转速的增大而减小。

(2) 基于正交试验法, 利用多元回归分析构建

关于铣削力 F_x 、 F_y 的模型,并经显著性分析可知各自变量的影响均高度显著,且置信度极高(99%),可较好预测铣削力大小。

参考文献

- [1] Pihtili H, Tosun N. Investigation of the wear behaviour of a glass-fibre-reinforced composite and plain polyester resin [J]. *Composites Science & Technology*, 2002, 62(3): 367 - 370.
- [2] Rajamurugan T V, Shanmugam K, Palanikumar K. Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced polyester composites [J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 80 - 87.
- [3] Kilickap E. Analysis and modeling of delamination factor in drilling glass fiber reinforced plastic using response surface methodology [J]. *Journal of Composite Materials*, 2010, 45(45): 727 - 736.
- [4] Latha B, Senthilkumar V S. Analysis of thrust force in drilling glass fiber-reinforced plastic composites using fuzzy logic [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2009, 24(4): 509 - 516.
- [5] Palanikumar K. Mathematical model to predict the surface roughness on the machining of glass fiber reinforced polymer composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2006, 25(25): 407 - 419.
- [6] 宋中权. 玻璃纤维增强复合材料钻削加工试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [7] Sait A N, Aravindan S, Haq A N. Optimisation of machining parameters of glass-fibre-reinforced plastic (GFRP) pipes by desirability function analysis using Taguchi technique [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(5-6): 581 - 589.
- [8] Davim J P, Reis P, António C C. A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA) [J]. *Composite Structures*, 2004, 64(3): 493 - 500.
- [9] Erkan, Omer, Kara, et al. Prediction of damage factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network [J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(4): 517 - 536.
- [10] Azwan Iskandar Azmi, Richard J T Lin, Debes Bhattacharyya. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 64(1-4): 247 - 261.
- [11] Takeyama H, Iijima N. Machinability of glassfiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, 37(1): 93 - 96.
- [12] Palanikumar K. Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(1-2): 19 - 27.
- [13] Khan M A, Kumar A S. Machinability of glass fibre reinforced plastic (GFRP) composite using alumina-based ceramic cutting tools [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2011, 13(1): 67 - 73.
- [14] 张秀丽, 张振国, 魏凤春. 高强玻璃纤维复合材料的铣削加工性能研究 [J]. *材料导报*, 2009, 23(8): 84 - 87.
- [15] Lee E S. Precision machining of glass fibre reinforced plastics with respect to tool characteristics [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(11): 791 - 798.
- [16] Sorrentino L, Turchetta S. Cutting forces in milling of carbon fibre reinforced plastics [J]. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014(1): 195 - 196.
- [17] Mathivanan N R, M Ahesh 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.
- [18] 于东民. 玻璃纤维/碳纤维芳纶纸蜂窝板铣削试验研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.

第一作者: 李志伟, 硕士研究生, 福州大学机械工程及自动化学院, 350116 福州市

First Author: Li Zhiwei, Postgraduate, College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China