

引文格式: 曲通, 李波, 王宪丁, 等. 类V型复合材料薄壁件切边加工减振优化[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 134-141.

QU Tong, LI Bo, WANG Xianding, et al. Vibration reduction optimization for edge trimming of thin-walled composite component with V-shape[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 134-141.

类 V 型复合材料薄壁件切边加工减振优化

曲 通¹, 李 波¹, 王宪丁¹, 杜宜聪^{2,3}, 杨欣宇^{2,3}, 王 兵^{2,3}

(1. 中航工业济南特种结构研究所, 济南 250023;

2. 山东大学机械工程学院, 济南 250061;

3. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

[摘要] 为解决类 V 型复合材料薄壁件切边加工过程中的振动问题, 研究切削参数对切削力和工件振动的影响规律, 基于中心复合响应曲面法设计了试验方案, 探究了主轴转速、进给速度、切削深度对切削力和振动加速度的影响, 建立了切削力和振动加速度的预测模型, 并以最小切削力和最小振动加速度为目标对切削参数进行优化, 得到了最优切削参数组合: 主轴转速 6000 r/min, 进给速度 400 mm/min, 切削深度 1.4 mm。研究结果有助于指导类 V 型复合材料薄壁件切边加工参数的选择, 达到降低加工过程中的振动、提高加工表面质量的目的。

关键词: 类 V 型复合材料薄壁件; 切削力预测模型; 振动预测模型; 响应曲面法; 工艺优化

中图分类号: V25 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.12.134

Vibration Reduction Optimization for Edge Trimming of Thin-Walled Composite Component With V-Shape

QU Tong¹, LI Bo¹, WANG Xianding¹, DU Yicong^{2,3}, YANG Xinyu^{2,3}, WANG Bing^{2,3}

(1. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan 250023, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, Jinan 250061, China)

[ABSTRACT] To solve the vibration problem during the edge trimming of thin-walled composite component with V-shape, and to explore the influence of cutting parameters on cutting force and workpiece vibration, experiments are designed based on the central composite response surface method in this study. The effects of spindle speed, feed rate, and cutting depth on cutting force and vibration acceleration are explored, and prediction models for cutting force and vibration acceleration are established. The optimal cutting parameters are obtained with the lowest cutting force and lowest vibration acceleration as optimization goals, which are spindle speed of 6000 r/min, feed rate of 400 mm/min and cutting depth of 1.4 mm. Research results of this study will help guide the selection of edge trimming parameters for thin-walled composite components with V-shape, so as to reduce vibration and improve surface quality during machining.

Keywords: Thin-walled composite component with V-shape; Cutting force prediction model; Vibration prediction model; Response surface method; Process optimization

类 V 型复合材料薄壁件是优化飞机气动性能并保护机翼结构的重要部件。为了确保飞机的气动性能、结构完整性和飞行安全, 类 V 型复合材料薄壁件的加工质量至关重要^[1]。类 V 型复合材料薄壁件通常是通过

热压罐成型工艺制造的复合材料结构件, 需要通过机械加工的方法去除多余的尺寸, 即切边加工。

石英纤维增强树脂基复合材料具有耐高温、耐烧蚀、抗热震等特性, 并具有优良的机械性能和耐恶劣环

境能力,已被广泛应用于复合材料结构件的制造中^[2-4]。由于类V型复合材料薄壁件属于薄壁零件,加工过程中极易产生振动和变形,影响加工质量。因此,亟须优化类V型复合材料薄壁件的切边加工参数,降低加工过程中的振动和变形,从而提高产品质量。

切削力和工件振动是评价加工系统稳定性的重要指标,间接反映了加工后的工件表面质量。国内外学者对薄壁零件加工过程中的切削力和工件振动进行了深入的研究。冯吕晨等^[5]通过试验研究了主轴转速、进给量、切削深度、铣削方式和走刀方向对切削力、振动加速度和表面粗糙度的影响规律,并建立了切削力、振动加速度和表面粗糙度的二阶预测模型。王建山等^[6]通过仿真研究了大型薄壁工件镜像铣削中,支撑刚度、支撑阻尼、主轴转速和进给速度对薄壁工件变形和振动的影响规律。王荣华等^[7]通过多因素正交试验,研究了各铣削参数对铣削力及表面粗糙度的影响程度,并建立了铣削力及表面粗糙度的经验预测模型。为了抑制加工过程中的振动,王健等^[8]提出了一种采用主动阻尼装置对带网格薄壁件铣削振动进行抑制的方法,对铣削振动抑制进行了理论推导、仿真分析与试验研究。

响应曲面法可有效寻找试验指标与各因子间的定量规律,找出各因子水平的最佳组合,被广泛应用于预测和优化机械加工中的切削参数^[5]。Li等^[9]采用响应曲面法进行试验设计、数据处理分析和工艺参数优化,揭示了螺旋铣削加工过程中铣刀螺旋角、主轴转速、切削深度与表面粗糙度之间的关系。姜佳明等^[10]基于响应曲面法设计试验方案,探究了NOMEX蜂窝铣削过程中切削速度、切削深度、切削宽度和进给速度对轴向切削力的影响,并建立了二阶切削力模型。Lu等^[11]采用响应曲面法研究了Inconel718微铣削加工过程中,主轴转速、每齿进给量、轴向切削深度等因素对加工表面硬度的影响规律,并建立了硬度的预测模型,为合理选择切削参数提供了依据。

本文以类V型复合材料薄壁件为研究对象,基于响应曲面法,探究切边加工过程中主轴转速、进给速度和切削深度对切削力和振动加速度的影响规律,建立切削力和振动加速度的预测模型。以最小切削力和最小振动加速度为优化目标,得到类V型复合材料薄壁件切边加工过程中的最佳切削参数。

1 试验方案与设计

1.1 试验条件

试验在罗威斯五轴龙门机床(最高转速24000 r/min)上进行,试验装置如图1所示。将工件放置在自制夹具上,对类V型复合材料薄壁件进行固定装夹。工

件材料为石英纤维增强树脂基复合材料(工件厚度为2.4 mm),其物理力学性能参数如表1所示。

采用侧铣的方式对类V型复合材料薄壁件进行切边加工,其中因夹具的限制,主轴摆角为80°,因此切削宽度保持2.44 mm不变。试验刀具选用两刃PCD直齿铣刀,刀具直径为12 mm。采用9170B型Kistler旋转测力仪(采样频率10 kHz)和加速度传感器分别测量加工过程中的切削力信号和振动信号。因使用的是旋转测力仪,所以所测切削力分量为刀具坐标系下的切削力分量,旋转测力仪的力坐标系见图1(F_x , F_y , F_z)。

1.2 试验方案

为了研究工艺参数对切削力和工件振动的影响规律,并预测加工过程中的工件振动和切削力,采用中心复合响应曲面法设计了试验方案,如表2所示。该试验

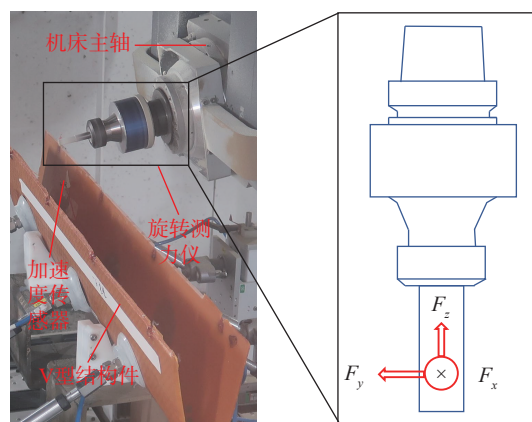


图1 试验装置

Fig.1 Experimental setup

表1 工件的物理力学性能参数

Table 1 Physical and mechanical performance parameters of workpiece

经向拉伸强度 /MPa	经向拉伸模量 /GPa	纬向拉伸强度 /MPa	纬向拉伸模量 /GPa	密度 / (kg/m ³)
640	20	530	19	1630

表2 试验方案

Table 2 Experimental schemes

编码	主轴转速 n/ (r/min)	进给速度 f/ (mm/min)	切削深度 a/mm
1.68	8682	668	2.34
1	8000	600	2.0
0	7000	500	1.5
-1	6000	400	1.0
-1.68	5318	332	0.66

方案中,以主轴转速 n 、进给速度 f 和切削深度 a 为输入变量;以切削力和振动作为响应变量。根据初步测试和实际加工需要,选择主轴转速 7000 r/min、进给速度 500 mm/min、切削深度 1.5 mm 作为零水平因素。根据三因素中心复合响应曲面法,选取臂值 $R=1.68$,并按公式 $X_i = (x_i - x_0) / \Delta x_i$ 对自变量进行编码。其中, X_i 为自变量的编码值; x_i 为自变量的真实值; x_0 为试验中心点处自变量的真实值; Δx_i 为自变量的变化步长。

2 试验结果与讨论

根据中心复合响应曲面法的试验方案进行 20 组铣削试验,并测得每组试验切削分力 F_x 和振动加速度 A ,并选取平均切削力和振动加速度的峰值均值作为试验结果,如表 3 所示。

2.1 切削力及振动预测

通过比较不同模型的相关系数(表 4),选取二次模型来定量描述切削力及振动与工艺参数之间的关系,通过拟合得到了切削力和振动加速度关于切削参数的

二次回归方程,分别如式(1)和(2)所示。式(1)为主轴转速 n 、进给速度 f 、切削深度 a 和切削力 F_x 之间的二次回归方程,式(2)为主轴转速 n 、进给速度 f 、切削深度 a 和振动加速度 A 之间的二次回归方程。切削力及振动模型的适用范围为:5318 r/min $\leq n \leq$ 8682 r/min, 332 mm/min $\leq f \leq$ 668 mm/min, 0.66 mm $\leq a \leq$ 2.34 mm。

$$F_x = 243.67 - 0.022n - 0.44f - 99.36a + 7.78 \times 10^{-6} n \cdot f - 9.5 \times 10^{-5} n \cdot a + 0.12f \cdot a + 1.47 \times 10^{-6} n^2 + 2.78 \times 10^{-4} f^2 + 17.29a^2 \quad (1)$$

$$A = -1214 + 0.38n + 1.31f - 260.91a - 3.4 \times 10^{-4} n \cdot f - 0.019n \cdot a + 0.21f \cdot a - 1.4 \times 10^{-5} n^2 + 0.0013f^2 + 110a^2 \quad (2)$$

切削力和振动加速度的预测值与实测值的关系(图 2)表明,切削力的模型预测值与实测值非常接近,但是振动加速度的模型预测值与实测值之间存在一定的误差,这是因为在实际加工中,机床系统的稳定性、夹

表 3 试验设计和试验结果
Table 3 Experimental design and results

序号	主轴转速 $n / (r/min)$	进给速度 $f / (mm/min)$	切削深度 a / mm	切削力 F_x / N	振动加速度 $A / (m/s^2)$
1	6000	400	2.0	17.86	305.44
2	7000	500	0.66	22.49	406.46
3	7000	500	1.5	20.03	361.73
4	7000	668	1.5	40.48	503.09
5	6000	600	1.0	20.86	406.93
6	8000	600	2.0	52.52	353.31
7	7000	500	1.5	20.01	382.05
8	5318	500	1.5	22.92	353.30
9	7000	500	1.5	21.12	331.74
10	7000	500	1.5	20.55	319.73
11	7000	500	1.5	20.06	332.52
12	6000	400	1.0	18.17	299.45
13	7000	332	1.5	17.42	320.57
14	6000	600	2.0	44.48	503.09
15	8682	500	1.5	27.67	319.88
16	7000	500	1.5	20.95	372.33
17	8000	600	1.0	28.91	342.91
18	8000	400	1.0	23.29	324.87
19	8000	400	2.0	22.61	341.15
20	7000	500	2.34	44.19	501.94

表 4 不同模型的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of different models

响应变量	模型	R^2	调整后 R^2
切削力	Linear	0.6694	0.6074
	2FI	0.8137	0.7277
	Quadratic	0.9887	0.9785
振动加速度	Linear	0.4976	0.4034
	2FI	0.6367	0.4691
	Quadratic	0.8494	0.7138

具的装夹效果等因素均会对工件的振动产生一定影响。

为了获得各切削参数对切削力和振动加速度的影响程度,对试验结果进行了方差分析,如表 5 和表 6 所示。其中, P 值 <0.05 表示模型项是显著的,因此可知, n 、 f 、 a 、 fa 、 n^2 、 f^2 、 a^2 是切削力的有效模型项, f 、 a 、 nf 和 a^2 是振动加速度的有效模型项。 F 值分析表明,对于单因素作用,进给速度 f 是影响切削力和振动加速度的最重要因素,其次是切削深度 a ,最后是主轴转速 n 。在两因素交互作用对切削力的影响中, fa 是最重要的因素,其次是 nf ,最后是 na ; 在两因素交互作用对振动加速度的

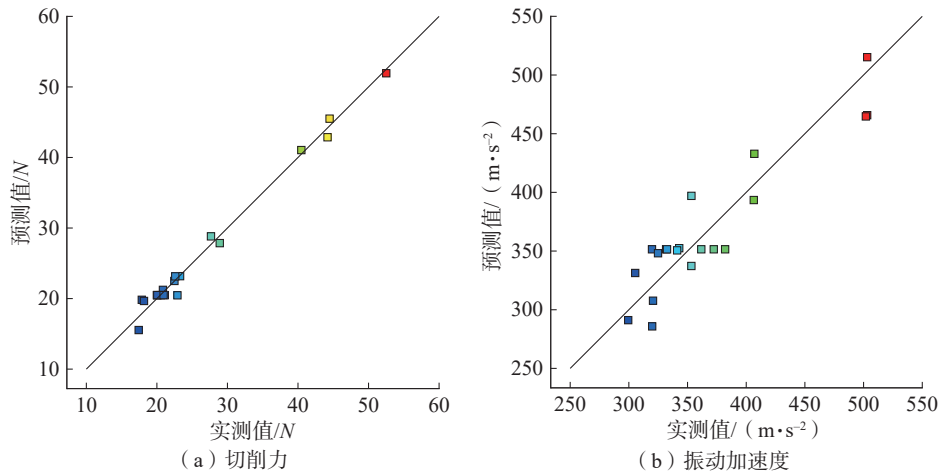


图 2 切削力和振动加速度的预测值与实际值的关系

Fig.2 Relationship between predicted and actual values of cutting force and vibration acceleration

表 5 切削力回归模型的方差分析

Table 5 Variance analysis for the regression model of cutting force

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	2025.34	9	225.04	97.05	<0.0001
n	84.39	1	84.39	36.39	0.0001
f	788.38	1	788.38	340.01	<0.0001
a	501.19	1	501.19	216.15	<0.0001
nf	4.84	1	4.84	2.09	0.1793
na	0.0181	1	0.0181	0.0078	0.9314
fa	290.65	1	290.65	125.35	<0.0001
n^2	31.12	1	31.12	13.42	0.0044
f^2	111.10	1	111.10	47.91	<0.0001
a^2	268.32	1	268.32	115.72	<0.0001
残差	23.19	10	2.32	—	—
失拟	21.96	5	4.39	17.84	0.0033
纯误差	1.23	5	0.2462	—	—
总和	2048.52	19	—	—	—

影响中, nf 是最重要的因素, 其次是 fa , 最后是 na 。在二次项因素对切削力的影响中, a^2 是最重要的因素, 其次是 f^2 , 最后是 n^2 ; 在二次项因素对振动加速度的影响中, a^2 是最重要的因素, 其次是 n^2 , 最后是 f^2 。

2.2 工艺参数对切削力及振动的影响

为了研究主轴转速、进给速度和切削深度对切削力和振动加速度的影响, 保证其中 2 个切削参数为零水平, 得到第 3 个切削参数对切削力和振动加速度的影响, 如图 3 所示, 其中 A 为主轴转速, B 为进给速度, C 为切削深度。可以看出, 进给速度对切削力和振动加速度的影响最大, 随着进给速度的增加, 切削力和振动

加速度持续增大。这是由于随着进给速度的增加, 每齿进给量增加, 单位时间内切削的材料增多, 因此切削力和振动加速度增大。随着切削深度的增加, 出现切削力和振动加速度先缓慢下降后急剧增大的现象。这是因为当切削深度小于临界切削厚度时, 切削过程中存在犁耕现象, 导致切削力较大, 切削深度增加, 犁耕现象逐渐消失, 因而切削力逐渐减小; 但是随着切削深度继续增加, 单位时间内的材料去除量增多, 因而切削力和振动加速度急剧增大。从表 3 和图 3 可以看出, 当进给速度为 500 mm/min, 切削深度为 1.5 mm 时, 随着主轴转速从 5318 r/min 增加到 7000 r/min, 切削力降低, 这是因

表 6 振动加速度回归模型的方差分析

Table 6 Variance analysis for the regression model of vibration acceleration

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	67429.01	9	7492.11	6.27	0.0042
n	3194.54	1	3194.54	2.67	0.1332
f	30257.17	1	30257.17	25.30	0.0005
a	6131.10	1	6131.10	5.13	0.0470
nf	9448.31	1	9448.31	7.90	0.0184
na	711.97	1	711.97	0.5954	0.4582
fa	888.10	1	888.10	0.7426	0.4090
n^2	2871.84	1	2871.84	2.40	0.1523
f^2	2274.57	1	2274.57	1.90	0.1979
a^2	10860.98	1	10860.98	9.08	0.0130
残差	11958.54	10	1195.85	—	—
失拟	8739.87	5	1747.97	2.72	0.1485
纯误差	3218.67	5	643.73	—	—
总和	79387.55	19	—	—	—

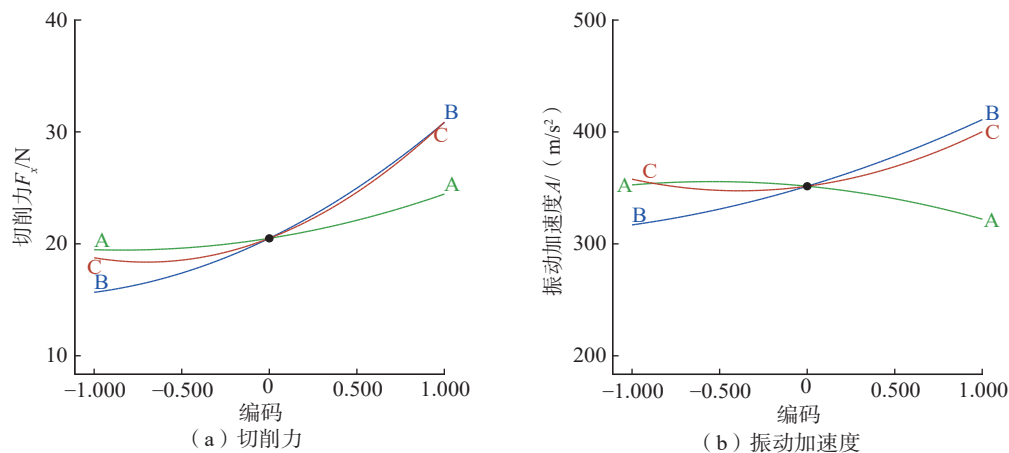


图 3 工艺参数对切削力和振动加速度的影响

Fig.3 Influence of process parameters on cutting force and vibration acceleration

为随着主轴转速的增加,每齿进给量降低,因而切削力降低;随着主轴转速从 7000 r/min 增加到 8632 r/min,切削力稳定性降低^[12],因此逐渐增大至 27.67 N。

当保持其中 1 个切削参数为零水平时,探究其他切削参数之间的交互作用对切削力的影响,如图 4 所示。从图 4 (a)和(b)可以看出,在切削深度保持不变时,随着进给速度和主轴转速的增加,切削力逐渐增加。在进给速度保持不变时,随着主轴转速的增加和切削深度的增加,切削力逐渐增大。但是进给速度与主轴转速之间及主轴转速和切削深度之间的交互作用不太显著,这与表 5 和表 6 中的分析一致。从图 4 (c)可以看出,在保持零水平的主轴转速时,随着切削深度和进给速度的降低,切削力迅速减小,这是因为随着切削深度和进给速度的降低,刀具的每齿切削量减小,因此二者的交互作用减弱,使得切削力迅速减小。

切削参数之间的交互作用对振动加速度的影响如图 5 所示。从图 5 (a)可以看出,在保持切削深度为零水平时,进给速度对振动加速度的影响与主轴转速有很大的关系,随着主轴转速的降低,进给速度对振动加速度的影响增大。主轴转速对振动加速度的影响也与进给速度有很大的关系,随着进给速度的增加,主轴转速对振动加速度的影响增大。在较低主轴转速时,随着进给速度的增加,振动加速度迅速增大;但在较高主轴转速时,进给速度对振动加速度的影响很小。在较高进给速度时,随着主轴转速的增加,振动加速度迅速降低;但在较低进给速度时,随着主轴转速的增加,振动加速度变化不明显。这是因为主轴转速较低时,随着进给速度的增加,每齿进给量的增幅更大(与较高主轴转速时的每齿进给量增幅相比)。同样地,进给速度较高时,随着主轴转速的增加,每齿进给量的降幅更大(与低进给速度时的每齿进给量降幅相比)。从图 5 (b)可以看出,在进给速度和主轴转速不变的情况

下,随着切削深度的增加,振动加速度先减小后增大;在进给速度和切削深度不变的情况下,随着主轴转速的增加,振动加速度逐渐减小。这是因为当切削深度小于临界切削厚度时,切削过程中出现犁耕现象,导致振动加速度增大,随着切削深度的增加,犁耕现象逐渐减少,因而振动加速度降低,但是随着切削深度的持续增加,单位时间内的材料去除量增加,因而振动加速度逐渐增大。从图 5 (c)可以看出,随着进给速度和切削深度的增加,振动加速度迅速增大,进给速度和切削深度越大,振动加速度越大。因为进给速度和切削深度的增加都会导致振动的增加,所以二者交互作用将导致振动加速度迅速增大。

2.3 切削参数优化与验证

从切削参数对切削力和振动加速度的影响程度可知, nf 、 na 对切削力的影响不显著, na 、 fa 、 n^2 、 f^2 对振动加速度的影响不显著,因此在切削参数优化过程中忽略 nf 、 na 对切削力的影响及 na 、 fa 、 n^2 、 f^2 对振动加速度的影响,得到切削力和振动加速度的拟合方程,分别如式(3)和(4)所示。

$$F_x = 217.46 - 0.0181n - 0.382f - 100.025a + 0.12f \cdot a + 1.47 \times 10^{-6}n^2 + 0.00028f^2 + 17.29a^2 \quad (3)$$

$$A = -795.138 + 0.157n + 2.875f - 289.196a - 0.000344n \cdot f + 110.53a^2 \quad (4)$$

在类 V 型复合材料薄壁件的切边加工过程中,更低的切削力和振动加速度往往会得到表面质量更好的产品。本研究中,切削参数优化条件为 $6000 \text{ r/min} \leq n \leq 8000 \text{ r/min}$ 、 $400 \text{ mm/min} \leq f \leq 600 \text{ mm/min}$ 、 $1 \text{ mm} \leq a \leq 2 \text{ mm}$,响应参数的目标为切削力最小和振动加速度最小。优化结果如图 6 所示,可以看出,主轴转速、进给速度和切削深度的优化组合为 6000 r/min 、 400 mm/min

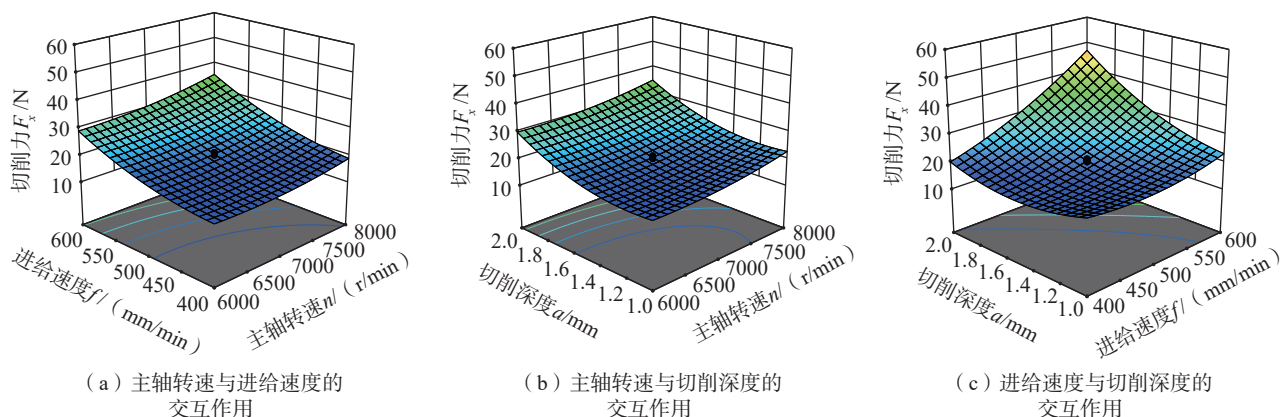


图 4 工艺参数之间的交互作用对切削力的影响

Fig.4 Influence of interaction between process parameters on cutting force

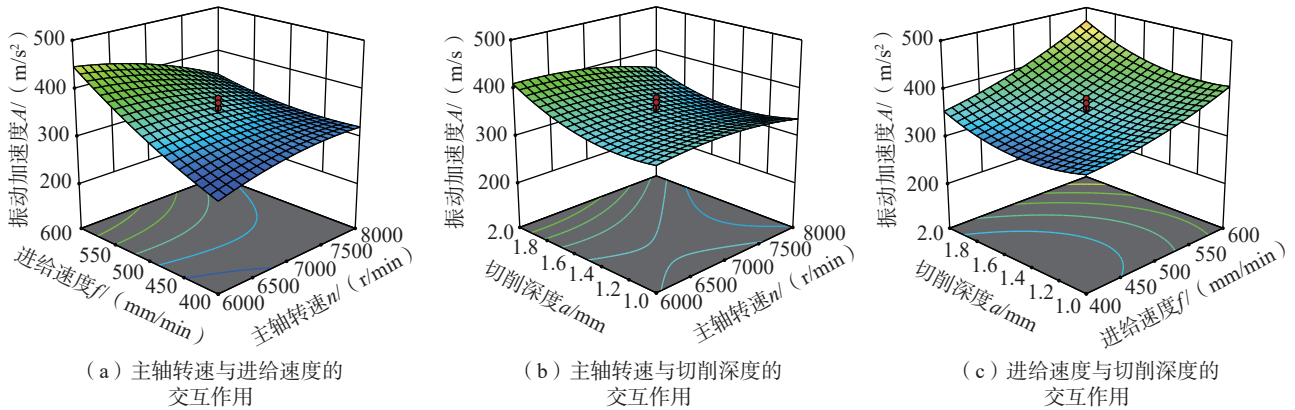


图 5 工艺参数之间的交互作用对振动加速度的影响

Fig.5 Influence of interaction between process parameters on vibration acceleration

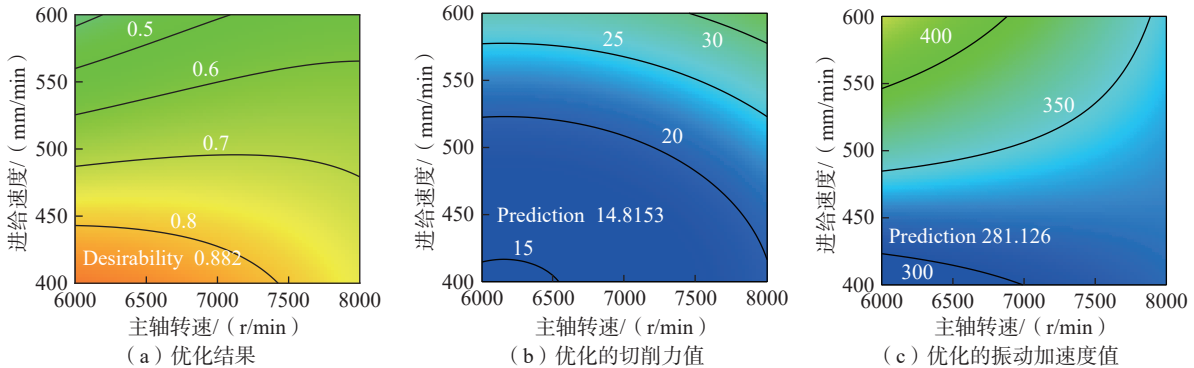


图 6 切削参数的优化结果

Fig.6 Optimization results of cutting parameters

和 1.4 mm,此时切削力和振动加速度分别为 14.82 N 和 281.13 m/s^2 。

为验证本文优化结果的准确性,在相同的试验条件下,采用优化的切削参数(主轴转速 6000 r/min、进给速度 400 mm/min 和切削深度 1.4 mm)进行铣削试验,测得切削力为 16.25 N,振动加速度为 302.49 m/s^2 ,如表 7 所示。将试验结果与模型预测结果进行对比,可以看出切削力和振动加速度幅值的预测误差均在 10% 以内,表明预测模型具有良好的精度,验证了模型及优化结果的准确性。

3 结论

采用响应曲面法,研究了类 V 型复合材料薄壁件切边加工过程中切削参数对切削力和振动加速度的影响规律,建立了切削力和振动加速度的预测模型,以最小切削力和最小振动加速度为目标,对切削参数进行了优化,主要结论如下。

(1) 通过响应曲面法建立的切削力和振动加速度模型是显著的,在试验范围内,可用于预测切削力和振动加速度。

表 7 试验结果与预测结果对比

Table 7 Comparison of results between experiment and prediction

对比项	切削力 /N	振动加速度 / (m/s^2)
预测值	14.82	281.13
试验值	16.25	302.49
误差 /%	8.8	7.1

(2) 切削参数对切削力和振动加速度的影响程度由大到小为进给速度 $f >$ 切削深度 $a >$ 主轴转速 n ; 交互项中 fa 对切削力有显著影响, nf 对振动加速度有显著影响。

(3) 以最小切削力和最小振动加速度为目标,优化得到类 V 型复合材料薄壁件切边加工过程中的最佳切削参数为主轴转速 6000 r/min、进给速度 400 mm/min、切削深度 1.4 mm。

本文的研究结果将有助于指导类 V 型复合材料薄壁件切边加工参数的选择,以达到降低加工过程中振动、提高加工表面质量的目的。未来可以对类 V 型复合材料薄壁件切边加工的材料去除机理进行深入研究,

建立切削力及振动加速度的理论预测模型,为切削参数的优化提供理论支撑。

参考文献

- [1] 高丽敏,王浩浩,杨光,等.关于叶片前缘加工缺陷及气动合格性的探讨[J].推进技术,2023,44(1):81-90.
- GAO Limin, WANG Haohao, YANG Guang, et al. Discussion on machining defects of blade leading edge and aerodynamic qualification[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(1): 81-90.
- [2] 王雅娜,曾安民,陈新文,等.2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测[J].复合材料学报,2019,36(6):1364-1373.
- WANG Yana, ZENG Anmin, CHEN Xinwen, et al. Mechanical properties testing for 2.5D quartz fiber reinforced resin composites in different directions and module prediction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1364-1373.
- [3] 王强,赵博研,刘秋寒,等.曲面结构石英纤维增强树脂复合材料分层损伤缺陷太赫兹智能检测[J].复合材料学报,2023,40(3):1785-1796.
- WANG Qiang, ZHAO Boyan, LIU Qiuhan, et al. Intelligent detection of delamination defect in curved structural quartz fiber reinforced polymer composites using terahertz technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1785-1796.
- [4] LI H L, LIN B, ZHANG C, et al. Mask-point: Automatic 3D surface defects detection network for fiber-reinforced resin matrix composites[J]. Polymers, 2022, 14(16): 3390.
- [5] 冯吕晨,赵文祥,颜培,等.应用响应曲面法的机器人铣削工艺优化[J].制造业自动化,2023,45(1):38-44.
- FENG Lyuchen, ZHAO Wenxiang, YAN Pei, et al. Optimization of robot milling process using response surface methodology[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(1): 38-44.
- [6] 王建山,何天宇,肖聚亮,等.镜像铣加工过程中薄壁工件变形和振动的预测[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(3):263-272.
- WANG Jianshan, HE Tianyu, XIAO Juliang, et al. Prediction of deflection and vibration of thin-walled workpiece during mirror-milling process[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(3): 263-272.
- [7] 王荣华,汪振华.TC4钛合金铣削力及表面粗糙度分析[J].工具技术,2021,55(5):30-33.
- WANG Ronghua, WANG Zhenhua. Analysis of milling force and surface roughness of TC4 titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2021, 55(5): 30-33.
- [8] 王健,何立东,杨建江.基于主动阻尼技术的薄壁件铣削振动控制研究[J].机电工程,2022,39(2):262-268.
- WANG Jian, HE Lidong, YANG Jianjiang. Vibration control of milling thin-walled workpieces based on active damping technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(2): 262-268.
- [9] LI R R, YANG F, WANG X D. Modeling and predicting the machined surface roughness and milling power in Scot's pine helical milling process[J]. Machines, 2022, 10(5): 331.
- [10] 姜佳明,刘战强,王兵,等.基于响应曲面法的NOMEX蜂窝高速铣削参数优化[J].工具技术,2020,54(11):8-13.
- JIANG Jiaming, LIU Zhanqiang, WANG Bing, et al. Optimization of high-speed milling parameters of NOMEX honeycomb based on response surface method[J]. Tool Engineering, 2020, 54(11): 8-13.
- [11] LU X H, JIA Z Y, WANG H, et al. The effect of cutting parameters on micro-hardness and the prediction of Vickers hardness based on a response surface methodology for micro-milling Inconel 718[J]. Measurement, 2019, 140: 56-62.
- [12] 陈奎元.中空铝合金结构铣削有限元仿真及加工参数优化[D].大连:大连交通大学,2019.
- CHEN Kuiyuan. Finite element simulation and cutting parameters optimization of hallow aluminum alloy structure milling[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- 通信作者:曲通,工程师,研究方向为复合材料数控加工。
(责编 向阳)
- (上接第133页)
- [23] 彭艳敏,杨亮,武杰,等.基于曲率的自适应复杂曲面测量点规划方法[J].智能制造,2023(4):121-123.
- PENG Yanmin, YANG Liang, WU Jie, et al. Adaptive complex surface measurement point planning method based on curvature[J]. Intelligent Manufacturing, 2023(4): 121-123.
- [24] 谈宝林.飞机小型结构件快速测量技术研究与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- TAN Baolin. Research and application of rapid measurement technology for small aircraft structural parts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [25] 张阳.基于激光雷达的飞机大型构件测量站位规划研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- ZHANG Yang. Research on station planning of digital measurement for large-scale part of aircraft based on the laser radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [26] 杜福洲,文科.大尺寸精密测量技术及其应用[J].航空制造技术,2016,59(11):16-24.
- DU Fuzhou, WEN Ke. Large-scale precision measurement technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(11): 16-24.
- 通信作者:赵安安,研究员级高级工程师,研究方向为大型飞机数字化装配技术。
(责编 向阳)