

钛合金 TC4 盘铣开槽加工铣削力研究

辛红敏¹ 董脉鸣¹ 杨程² 赵涛² 张清贵³

(1 湖北文理学院, 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 襄阳 441053)

(2 西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

(3 湖北超卓航空科技股份有限公司, 襄阳 441000)

文 摘 由于盘铣刀具直径大, 切削余量大, 造成钛合金盘铣开槽过程中铣削力较大, 进而引起刀具振动, 缩短刀具寿命。为实现对钛合金盘铣开槽过程的优化与控制, 本文设计单因素实验和正交实验, 利用三向压电式测力仪测量铣削力数据, 采用线性回归技术建立铣削力模型并以“F”检验法对模型进行显著性检验; 利用极差分析法分析工艺参数对铣削力的影响规律, 利用响应曲面法分析工艺参数对铣削力的交互影响规律。研究结果表明: 对于切削深度变化敏感度依次为铣削力 F_x > 进给速度 > 主轴转速; 对于进给速度变化敏感度依次为铣削力 F_y > 切削深度 > 主轴转速; 对于铣削力 F_z 变化敏感度依次为 主轴转速 > 切削深度。铣削力随着主轴转速的增大而减小, 随着切削深度和进给速度的增大而增大。另外铣削力 F_x 大于 F_y 和 F_z , 对加工性能和刀具磨损起主导作用。

关键词 TC4 钛合金, 盘铣, 铣削力, 工艺参数

中图分类号: TG506.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.004

Milling Force of Disc Milling Grooving of TC4 Titanium Alloy

XIN Hongmin¹ DONG Maiming¹ YANG Cheng² ZHAO Tao² ZHANG Qinggui³

(1 Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle,

Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053)

(2 Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(3 Hubei Chaozhuo Aviation Technology Co., Ltd., Xiangyang 441000)

Abstract Milling force is large during disc milling grooving of titanium alloy because of big diameter of the cutter and large cutting output, which leads to obvious vibration of cutter and shorter tool life. In the study, in order to optimize and control the process of disc milling grooving in titanium alloy, single factor experiment and orthogonal experiment are designed, and milling force is measured by three-way piezoelectric dynamometer. The prediction model of milling force is built by linear regression method, and the significance of model is checked by “F” test method. The effect of technological parameters on milling force is analyzed by the extremum difference analysis. The interaction effect of technological parameters on milling force is studied by response surface method. Experiment results show that the sensitivity to changes in cutting depth is in the order of milling force F_x > feed speed > spindle speed. The sensitivity to feed rate changes is in the order of milling force F_y > cutting depth > spindle speed. The sensitivity to milling force F_z changes in the order of spindle speed > cutting depth. Milling force decreases with the increase of spindle speed and increases with the increase of cutting depth and feed speed. In addition, milling force F_x is greater than F_y and F_z , which plays a leading role in machining performance and tool wear.

Key words TC4 titanium alloy, Disc milling, Milling force, Technological parameters

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2013ZX04001081); 中国博士后面上资助(2018M631195); 湖北文理学院“机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金, 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室开放基金

第一作者简介: 辛红敏, 1979年出生, 副教授, 博士, 主要研究方向为复杂曲面数控加工及工艺。E-mail: xhm0330@163.com

0 引言

钛合金在航空航天领域已广泛应用,如航空发动机的整体叶盘、风扇叶片等关键零部件。但由于钛合金的切削加工性较差,使得切削过程中会产生较大的振动,使切削温度升高,加剧刀具磨损,导致刀具变钝,进而使得切削力增大,影响零件的加工质量。因此为更好的优化与控制钛合金铣削过程,有必要对钛合金铣削过程中的铣削力进行研究。

国内外的众多学者开展了钛合金铣削力方面的实验研究。张耀满^[1]研究了球头铣刀铣削钛合时的铣削力特性,建立了铣削力的数学模型,并通过编写程序求解出了瞬时铣削力的变化规律,最后通过实验数据证明切削参数对平均铣削力影响程度大小的顺序为:轴向深度、每齿进给量、径向切深和主轴转速。王明海^[2]研究了切削钛合金 TA15 时,铣削力与刀具磨损和铣削长度的关系,结果表明:切削力随着铣削长度的增加而增加,随着刀具磨损的增加而增加。向国齐^[3]提出一种基于支持向量机铣削力预测方法,利用正交试验设计选取合适的设计参数样本点建立铣削力模型,并获得预测值与实验值的拟合曲线,为验证该方法的有效性,建立 BP 神经网络铣削力模型,将两种模型进行对比研究,结果表明支持向量机法建立的模型比 BP 神经网络法建立的模型的预测精度更可靠。李体仁^[4]利用单因素实验,采用镶齿硬质合金方肩铣刀进行钛合金高速铣削试验,研究每齿进给量、铣削宽度、铣削深度、铣削速度对铣削力的影响。通过对铣削力分析,建立铣削力模型,并采用 MATLAB 遗传算法以进给方向铣削力最小为目标,对铣削参数进行优化,实验结果表明优化后的参数可有效减小切削力。SAHOO^[5]通过有限元仿真得到钛合金端铣的铣削力系数,从而得到铣削力模型,模型验证结果表明,其实验值与预测值吻合度较高。TRABELSI^[6]研究了加工钛合金 Ti17 过程中,不同的切削速度、进给速率、切削深度组合下,不同的润滑条件对刀具磨损及切削力的影响,研究结果表明低温润滑相比与传统的润滑条件虽然能延长刀具寿命,但对切削力的影响并不显著。

虽然实验法的研究结果更为可靠,但耗时耗力。为了节省研究成本,有限元模拟法也为广大科研工作者所采用。倪雪婷^[7]将钛合金 TC4 高速铣削加工过程简化为二维有限元模型,运用 ABAQUS 分析得到了加工参数及刀具几何参数对铣削力的影响:刀具转速从 600 r/min 增加到 2 400 r/min,进给量从 10 mm/s 增加到 40 mm/s 时,切削力随各参数的变化最为明显;刀具前角在 5°~15° 的增大有利于铣削力降低。岳彩旭^[8]分析了钛合金薄壁件铣削过程中刀具角度

对铣削力的影响,仿真 ABAQUS 仿真软件得到如下结果:前角增大,铣削力减小;后角增大,铣削力减小;螺旋角增大,最大轴向力增大,最大切向力缓慢减小,最大径向力基本不变。李体仁^[9]利用有限元分析软件 Advantedge 研究不同切削条件下 TC4 钛合金铣削力的变化规律,研究表明当轴向切深和每齿进给量增大时,切削力随之增大;当径向切深增大时,切削力的变化不显著。ZHANG^[10]利用仿真软件 Matlab 研究了球头铣刀铣削钛合金时的铣削力情况,首先利用正交实验求解出铣削力模型系数,然后将系数代入 Matlab 中求解铣削力模型,研究结果表明铣削力模型的预测精度较高。ZHENG^[11]利用有限元软件 ABAQUS 分析了硬质合金刀具车削钛合金时铣削力的变化趋势,通过实验验证铣削力预测模型的有效性,研究结果表明:铣削力随着进给速度的增大而增大,随着切削速度的增大而减小,进给速度对铣削力的影响最为显著。

通过以上分析可知,许多专家学者已在钛合金铣削力方面展开了广泛而深入的研究,但研究对象多为插铣或侧铣工艺,即刀具直径较小,切削效率较低。相对来说,盘铣切削钛合金铣削力方面的研究较少。本文的研究内容来源于国家科技重大专项“航空发动机整体叶盘高效强力复合数控铣削机床研发及应用”。由于目前整体叶盘的通道开槽加工方法主要为插铣和侧铣,导致加工效率低下。为解决这一问题,提出复合铣工艺:首先利用盘铣进行整体叶盘通道的大余量切除,其次利用插铣进行扩槽加工,最后利用侧铣进行除棱清根^[12-13]。将盘铣应用于整体叶盘的开槽加工后,使得整体叶盘的加工效率提高 3~4 倍。但由于盘铣刀直径大,盘铣切削余量大,造成切削过程中切削力大,刀具振动严重,严重影响刀具寿命和零件表面加工质量。因此盘铣钛合金切削力方面的研究将有利于实现盘铣切削过程的优化与控制。

本文设计了单因素实验和正交实验,根据实验数据采用线性回归技术建立铣削力预测模型,利用极差分析法分析工艺参数对铣削力的影响规律,利用响应曲面法分析工艺参数对铣削力的交互影响规律,研究结果将推动整体叶盘复合铣工艺在航空航天领域的成熟应用。

1 实验

1.1 实验材料

本次实验中,选用钛合金材料 TC4(Ti-6Al-4V),其微观结构组织如图 1 所示,由等轴状组织 α 相及长片状组织 β 相组成,其力学性能如表 1 所示,化学成份如表 2 所示,试样尺寸 120 mm×60 mm×15 mm。

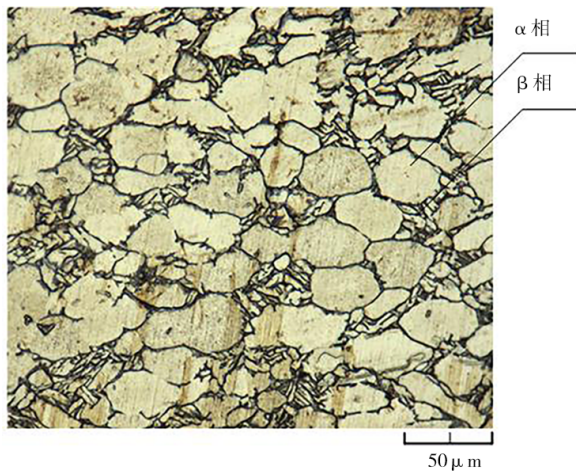


图1 TC4钛合金微观结构图
Fig. 1 Microstructure of TC4 titanium alloy

表1 TC4钛合金化学成分^[14]

Tab. 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy^[14]wt%

Al	V	Fe	C	O	H	N
5.50~6.75	3.50~4.50	≤0.3	≤0.1	≤0.2	≤0.015	≤0.05

表2 TC4钛合金力学性能^[14]

Tab. 2 Mechanical properties of TC4 titanium alloy^[14]

抗拉强度 σ_b /MPa	规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%	断面收缩率 ψ /%
≥895	≥825	≥10	≥25

1.2 实验刀具

在本次试验中选用的刀具为镶嵌式错齿三面刃铣刀,刀具的几何参数如表3所示。

表3 盘铣刀几何参数

Tab. 3 Geometrical parameters of disc cutter

刀具直径 /mm	齿数	刀具厚度 /mm	刀体	刀片材料	前角 λ (°)	后角 α (°)	主切削刃刃倾角 β (°)	副切削刃刃倾角 β' (°)	刀尖圆弧半径 /mm
200	16	20	结构合金钢	YG6	5	4	15	12	1

1.3 加工条件

选用XH850立式加工中心做为盘铣切削加工机床。为减少刀具磨损,切削方式为顺铣,切削过程中加注冷却乳化液。盘铣工艺因较高的切削效率已广泛应用于机械加工的开槽领域,但应用于整体叶盘的通道开槽加工仍处于探索阶段。所以切削参数的选取根据本课题组前期的研成果及XH850立工加工中心的机床条件来决定。单因素实验和正交实验的工艺参数如表4所示。

表4 实验工艺参数

Tab. 4 Experimental parameters

实验	主轴转速 $n/r \cdot \min^{-1}$	切削厚度 a_p /mm	下角正进给速度 v_f /mm $\cdot \min^{-1}$
单因素实验	40,55,70,85,100	2,4,6,8,10	40,55,70,85,100
正交实验	40,70,100	3,6,9	60,80,100

1.4 铣削力测量

铣削力测量采用三向动态压电式测力仪,其测量原理如图2所示,利用了非金属材料的压电效应,其测量原理为:当外界向其施加外力时,压电材料表面便会产生电荷,电荷的大小跟外力的大小成正比。产生的电荷通过一个电荷放大器转换成电压的形式进行测量,电压参数通过采集卡再转换成力的形式,换算成力的大小,最后传输到PC机上进行数据处理,得到最后的结果。

铣削力测试系统如图3所示,主要由 Kistler

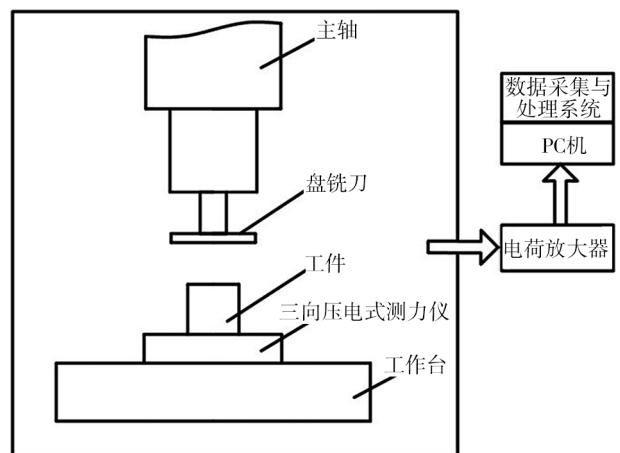


图2 铣削力测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of milling force measurement

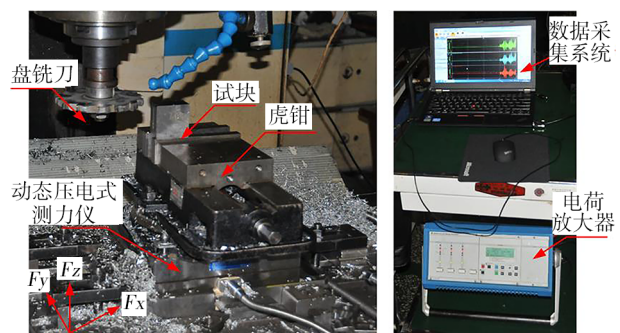


图3 铣削力测试系统

Fig. 3 Measurement system of milling force

9225B三向动态压电式测力仪、Kistler 5017A电荷放大器组成,测试结果传输到数据采集系统 DEWE3010,从而得到最后的结果。本次实验中测量

了三个方向的铣削力, F_x 为垂直于刀具进给方向, F_y 为平行于刀具进给方向, F_z 为平行于铣削轴方向。

2 结果与讨论

2.1 铣削力测量结果

从理论上分析,测量到的铣削力脉冲应该是三角形的波形。在刀具没有切入工件时,铣削力为零,随着刀具与工件的接触,铣削力开始增大而后减小,到刀具与工件脱离时,铣削力减小为零。但机床、刀具、工件在切削加工过程中是一个动态的系统,不可避免地会产生振动,所以实际测量到的铣削力脉冲

由于含有高频振动的成份并没有呈现出这样的波形。图4为本次实验中某一铣削参数下测得的铣削力波形。本次实验中所选用的盘铣刀有16个齿,每个齿之间的距离大,周期性地与工件接触,每次接触相当于刀具对工件施加脉冲冲击,所以冲击是呈现周期性变化的。冲击使得刀具和工件发生振动,进而引起切削厚度变化,最终导致了铣削力的变化。所以铣削力波形也是呈周期性变化的。取铣削力波形中50个连续峰值的平均值做为铣削力测量结果,见表5和表6。

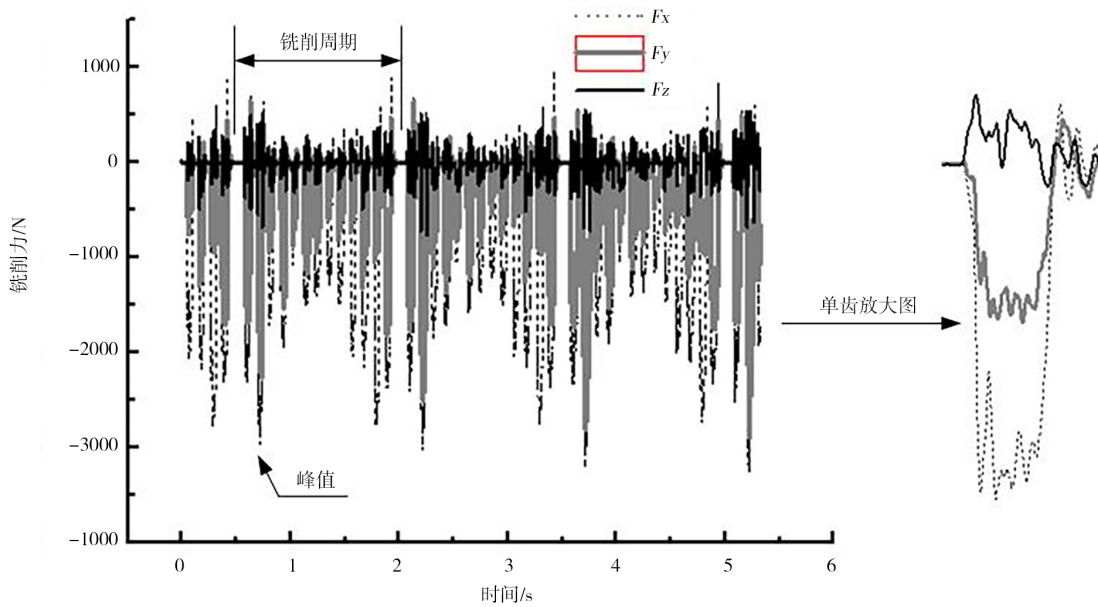


图4 铣削力波形

Fig. 4 Waveform of milling force

表5 单因素实验铣削力结果

Tab. 5 Experimental results of milling force of single factor

No	$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	a_p/mm	$v_f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	F_x/N	F_y/N	F_z/N
1	40	6	70	1425	1240	1137
2	55	6	70	1320	1053	992
3	70	6	70	1215	966	857
4	85	6	70	1110	917	721
5	100	6	70	926	809	553
6	70	2	70	836	742	512
7	70	4	70	963	831	587
8	70	6	70	1215	966	857
9	70	8	70	1657	1415	834
10	70	10	70	2033	1906	1197
11	70	6	40	986	763	613
12	70	6	55	1034	865	679
13	70	6	70	1215	966	857
14	70	6	85	1341	1126	976
15	70	6	100	1466	1227	1078

由图4可知,铣削力 F_x 最大, F_y 次之, F_z 最小,在铣削过程中铣削力 F_x 作用于主切削刃,直接形成盘铣开槽已加工表面,所以 F_x 对表面加工质量,刀具振动、刀具磨损等起着重要作用,必须在铣削过程中加

表6 正交实验铣削力测量结果

Tab. 6 Orthogonal experiment milling force measurement results

No	$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	a_p/mm	$v_f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	F_x/N	F_y/N	F_z/N
1	40	3	60	1021	879	893
2	40	6	100	1759	1450	1356
3	40	9	80	2146	1749	1453
4	70	3	100	1032	921	829
5	70	6	80	1225	1102	896
6	70	9	60	1427	1124	910
7	100	3	80	805	706	457
8	100	6	60	1004	816	532
9	100	9	100	1565	1280	958

以控制。因为 z 向没有位移,所以振动较小,变化不大。

2.2 单因素实验铣削力结果分析

2.2.1 铣削力预测模型建立

利用主轴转速 n 、切削深度 a_p 、进给速度 v_f 对表5中的数据进行多元线性回归,建立铣削力 F_x 预测模型为式(1):

$$g = cn^k a_p^l v_f^m \quad (1)$$

由于式(1)为非线性函数,将其取对数变换为线性函数即式(2):

$$\lg g = \lg c + k \lg n + l \lg a_p + m \lg v_f \quad (2)$$

令 $\lg g = y$, $\lg c = b_0$, $k = b_1$, $l = b_2$, $m = b_3$, $\lg n = x_1$, $\lg a_p = x_2$, $\lg v_f = x_3$, 则其对应的线性回归方程为式(3):

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

该线性方程共包括3个自变量 x_1, x_2, x_3 ,为确定 b_0, b_1, b_2, b_3 的值,建立多元线性回归方程式(4):

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} + b_3 x_{13} + \varepsilon_1 \\ y_2 = b_0 + b_1 x_{21} + b_2 x_{22} + b_3 x_{23} + \varepsilon_2 \\ \dots\dots \\ y_9 = b_0 + b_1 x_{91} + b_2 x_{92} + b_3 x_{93} + \varepsilon_9 \end{cases} \quad (4)$$

式中, y_i 为试验测量值; x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} 为所对应的试验自变量; ε 为实验误差。

用矩阵可表示为式(5):

$$Y = Xb + e \quad (5)$$

式中, Y 为15组实验测量数据所组成的 15×1 矩阵, X 为正交实验所组成的 15×4 矩阵, b 为 b_0, b_1, b_2, b_3 所组成的 4×1 矩阵, e 为 ε_i 所组成的 15×1 矩阵。

由最小二乘原理

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

得
$$b = \begin{bmatrix} 2.591 \\ -0.405 \\ 0.511 \\ 0.463 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)确定回归方程式(8)

$$\hat{y} = 2.591 - 0.405x_1 + 0.511x_2 + 0.463x_3 \quad (8)$$

由式(8)可得铣削力 F_x 经验公式为式(9)

$$F_x = 10^{2.591} n^{-0.405} a_p^{0.511} v_f^{0.463} \quad (9)$$

用相同的方法依次建立铣削力 F_y 和 F_z 的经验公式,最后结果如式(10)所示。

$$\begin{cases} F_x = 10^{2.591} n^{-0.405} a_p^{0.511} v_f^{0.463} \\ F_y = 10^{2.435} n^{-0.408} a_p^{0.432} v_f^{0.538} \\ F_z = 10^{2.714} n^{-0.735} a_p^{0.497} v_f^{0.634} \end{cases} \quad (10)$$

从回归预测模型可知,铣削力 F_x 随切削深度的变化最为敏感,进给速度的变化对铣削力 F_x 的影响

相对有限;铣削力 F_y 则对进给速度的变化最为敏感,其次是切削深度;对于铣削力 F_z 来说,主轴转速则变成了最敏感的因素。

2.2.2 铣削力预测模型显著性检验

采用“F”检验法检验铣削力预测模型的显著性。把总和偏差平方和 S_T 分解为回归平方和 S_A 和残差平方和 S_E 。

$$S_T = \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_i^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_i^n y_i)^2 \quad (11)$$

$$S_E = \sum_i^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (12)$$

$$S_A = \sum_i^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = S_T - S_E \quad (13)$$

假设 $b_1 = 0, b_2 = 0, b_3 = 0$,则采用统计量

$$F = \frac{S_A / P}{S_E / (n - p - 1)} \sim F(p, n - p - 1) \quad (14)$$

式中, n 为实验数, $n=9$; p 为变量数, $p=3$ 。

“F”检验法规定:试验因素为 m ,试验次数为 n ,给定显著性水平为0.05,若 $F < F_{0.05}(m, n-m-1)$,则称 y 与 i 之间没有明显的线性关系,回归方程不可信;若 $F_{0.05}(m, n-m-1) < F < F_{0.01}(m, n-m-1)$,则称 y 与 i 之间有明显的线性关系;若 $F > F_{0.01}(m, n-m-1)$,则称 y 与 i 之间有十分明显的线性关系。按照式(11)、式(14)计算显著性检验结果,如表7所示。

由表7可知,铣削力 F_x, F_y, F_z 的“F”值分别为16.4, 17.01和35.34,全部都大于 $F_{0.01}(3, 11)$ 和 $F_{0.05}(3, 11)$ 。由此证明铣削力预测模型显著性良好,可以用于本次实验。

表7 铣削力模型显著性检验

Tab. 7 Significance test of milling force model

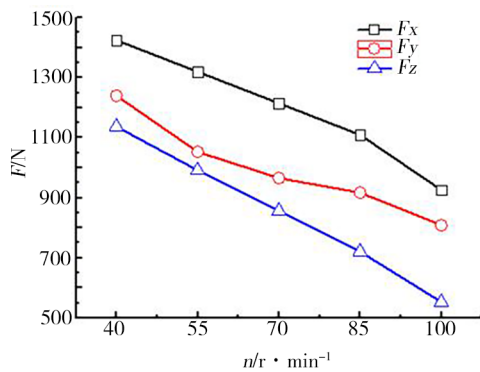
参数	自由度	平方和 SS	平均平方和 MS	F 统计量	$F_{0.01}(3,11)$	$F_{0.05}(3,11)$	显著性
F_x	3	0.12	0.04	16.4	6.22	3.59	显著
	11	0.027	0.002				
	14	0.148					
F_y	3	0.11	0.035	17.01			显著
	11	0.022	0.002				
	14	0.127					
F_z	3	0.174	0.058	35.34			显著
	11	0.018	0.001				
	14	0.19					

2.2.3 工艺参数对铣削力的影响规律

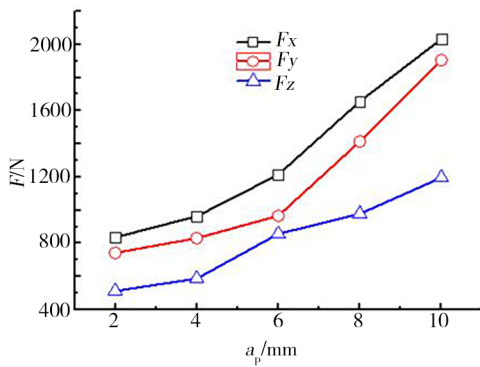
根据表5中的数据绘制工艺参数对铣削力的影响规律曲线,如图5所示。由图5(a)可知,铣削力 F_x 、

F_y 、 F_z 随着主轴转速的增加而减小,3个方向的分力的变化范围分别是[926 N, 1 425 N]、[809 N, 1 240 N]、[553 N, 1 137 N]。造成这一现象的原因主要是因为随着主轴转速的增大,将产生较多的热量,使得钛合金材料的弹性变形能力减小,进而减小了刀具与材料之间的摩擦力和剪切力^[15]。另外,当主轴转速上升,剪切角和剪切面积变小,在相同的剪切强度下,由于剪切面积的变化导致剪切力减小。以上因素最终引起铣削力随着主轴转速的增加而减小。

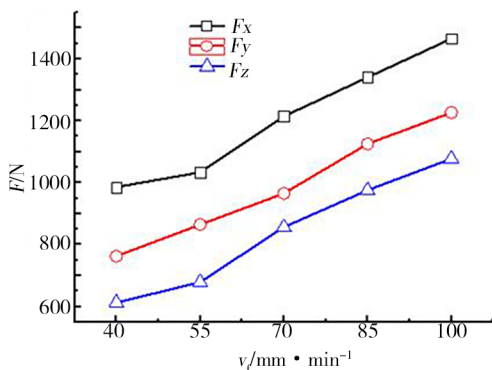
由图5(b)(c)可知,相对于主轴转速来说,切削深度和进给速度对铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 有着相反的影响,



(a) 主轴转速 n



(b) 切削深度 a_p



(c) 进给速度 v_f

图5 工艺参数对铣削力的影响

Fig. 5 Effect of process parameters on milling force

即铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 随着切削深度和进给速度的增大而增大, F_x 、 F_y 、 F_z 随着切削深度的变化范围分别是[836 N, 2 033 N]、[742 N, 1 906 N]、[512 N, 1 197 N],随着进给速度的变化范围是[986 N, 1 466 N]、[762 N, 1 227 N]、[613 N, 1 078 N]。当切削深度和进给速度增大时,加工表面产生严重的塑性变形,进而使材料表面硬度增加,为克服塑性变形产生的影响,铣削力必须增加才能完成材料的剪切。而且,当切削深度和进给速度增大时,切削面积增大,同样也会引起铣削力增大。

2.3 正交实验铣削力结果分析

2.3.1 铣削力预测模型建立

依据表6中实验数据,按照2.2.1节的方法建立铣削力预测模型:

$$\begin{cases} F_x = 10^{2.6475} n^{-0.4094} a_p^{0.5173} v_f^{0.4328} \\ F_y = 10^{2.4944} n^{-0.4021} a_p^{0.4444} v_f^{0.4958} \\ F_z = 10^{2.8513} n^{-0.7209} a_p^{0.3909} v_f^{0.5849} \end{cases} \quad (15)$$

从回归预测模型可知,各工艺参数对铣削力的敏感程度与单因素实验结果一致:即铣削力 F_x 随切削深度的变化最为敏感,进给速度的变化对铣削力 F_x 的影响相对有限;铣削力 F_y 则对进给速度的变化最为敏感,其次是切削深度;对于铣削力 F_z 来说,主轴转速则变成了最敏感的因素。

2.3.2 铣削力模型显著性检验

按照2.2.2节中“F”检验法对式(15)中的铣削力预测模型进行显著性检验,检验结果如表8所示。可知,铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 的“F”值分别为136、142和37,全部都大于 $F_{0.01}(3, 5)$ 和 $F_{0.05}(3, 5)$ 。由此证明铣削力经验模型显著性良好,可以用于本次实验。

表8 铣削力模型显著性检验

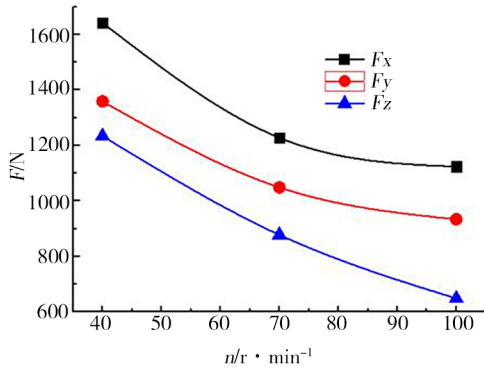
Tab. 8 Significance test of milling force model

参数	自由度	平方和 SS	平均平方和 MS	F统计量	$F_{0.01}(3,5)$	$F_{0.05}(3,5)$	显著性
F_x	3	0.1478	0.0492	136	12.06	5.41	显著
	5	0.0018	0.0003				
	8	0.1496					
F_y	3	0.1261	0.042	142			显著
	5	0.0014	0.0002				
	8	0.1276					
F_z	3	0.2042	0.0679	37			显著
	5	0.0091	0.0018				
	8	0.2134					

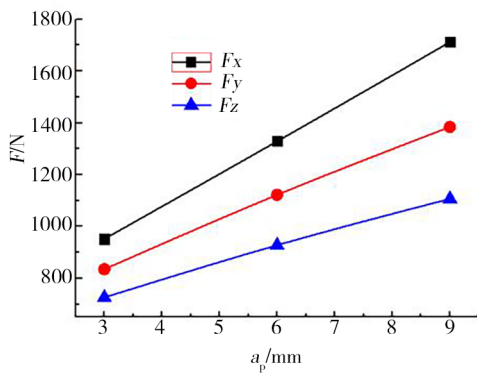
2.3.3 工艺参数对铣削力的影响规律

依据表6中的正交实验数据,采用极差分析法,绘制各工艺参数对铣削力的影响趋势图,如图6所

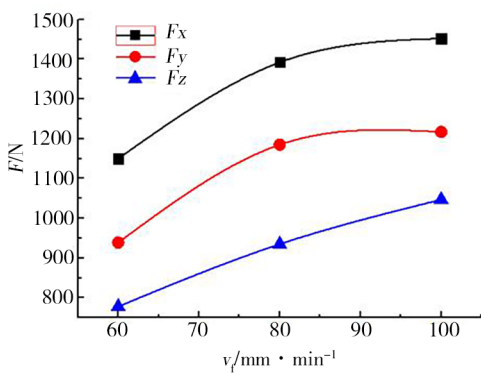
示。可见,铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 随工艺参数的变化规律与单因素实验相同:铣削力随主轴转速的增大呈减小趋势,但切削深度和进给速度的变化却对铣削力起着相反的作用,即随着两参数的增大铣削力逐渐增大;而且铣削力 F_x 大于铣削力 F_y ,铣削力 F_z 最小。正交实验的分析结果与单因素实验的结果具有一致性,从而验证了单因素实验结果的客观正确性。



(a) 主轴转速 n



(b) 切削深度 a_p



(c) 进给速度 v_f

图6 工艺参数对铣削力的影响

Fig. 6 Effect of process parameters on milling force

2.3.4 工艺参数对铣削力的交互影响规律

分析单个因素对铣削力的影响是一种理想情况,在实际的切削加工过程中,往往是多个工艺参数同时对铣削力产生作用,因此有必要研究多因素对

铣削力的共同作用。图7~图9分别绘制出了工艺参数对铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 的交互影响曲面。为凸显交互作用的效果,均取第3个工艺参数的边界最大值为定值。图中H代表铣削力的高值区域,M代表铣削力的中值区域,L代表铣削力的低值区域。

由图7可知在所选择的实验参数范围内,铣削力 F_x 的变化范围为[700 N, 2 243 N]。由图7(a)可知铣削力 F_x 的高值区域(H区域)出现在大的切削深度和较低主轴转速相交区域,当切削深度 $a_p=9$ mm,主轴转速 $n=40$ mm/min时,铣削力 F_x 达到最大值2 243 N。相反地,铣削力 F_x 的低值区域(L区域)则出现在小的切削深度和较高主轴转速相交的区域。从曲面的倾斜度可知,在切削深度和主轴转速的共同作用下,切削深度相较于主轴转速对铣削力 F_x 的影响更为显著。

由图7(b)可见,当进给速度从60 mm/min升高到100 mm/min时,铣削力 F_x 不断增大,其变化率大于主轴转速变化而产生的曲面变化率,故进给速度对铣削力 F_x 的影响要更为显著。

由图7(c)可见,铣削力 F_x 高于1 900 N的值出现在大的进给速度和切削深度相交区域(H区域),低于1 400 N的值则出现在低的进给速度和切削深度相交区域(L区域),虽然铣削力 F_x 随着进给速度和切削深度的增大而增大,但由曲面的倾斜程度可知,切削深度对铣削力 F_x 的影响较进给速度更加显著。

由以上分析可得出结论,切削深度对铣削力 F_x 的影响最为显著,进给速度次之,主轴转速对铣削力 F_x 的影响最不显著,与式(15)中的所显示的结果一致。

图8为工艺参数对 F_y 的交互影响曲面,在所选择的实验参数范围内,铣削力 F_y 的变化范围为[607 N, 1 842 N]。由图8(a)可知铣削力 F_y 的高值区域(H区域)出现在大的切削深度和较低主轴转速相交区域,当切削深度 $a_p=9$ mm,主轴转速 $n=40$ mm/min时,铣削力 F_y 达到最大值1 842 N。相反地,铣削力 F_y 的低值区域(L区域)则出现在小的切削深度和较高主轴转速相交的区域。从曲面的倾斜度可知,在切削深度和主轴转速的共同作用下,切削深度相较于主轴转速对铣削力 F_y 的影响更为显著。

由图8(b)可见,当进给速度从60 mm/min升高到100 mm/min时,铣削力 F_y 不断增大,其变化率大于主轴转速变化而产生的曲面变化率,故进给速度对铣削力 F_y 的影响要更为显著。

由图8(c)可见,铣削力 F_y 高于1 500 N的值出现在大的进给速度和切削深度相交区域(H区域),低于1 100 N的值则出现在低的进给速度和切削深度相

交区域(L区域),虽然铣削力 F_y 随着进给速度和切削深度的增大而增大,但由曲面的倾斜程度可知,进给速度对铣削力 F_y 的影响较切削深度更加显著。

由以上分析可得出结论,各工艺参数对铣削力 F_y 影响程度不同于 F_x ,进给速度变成了最敏感的因素,主轴转速同样是最不敏感的因素,与式(15)中所显示结果相一致。

图9为工艺参数对 F_z 的交互影响曲面,在所选择的实验参数范围内,铣削力 F_z 的变化范围为[432 N,

1 734 N]。由于分析方法类似于图7和图8,在此将不再详细叙述。由图9(a)可知主轴转速对铣削力 F_z 的影响比切削深度显著,图9(b)则反映出主轴转速对铣削力 F_z 的影响比进给速度敏感,切削深度与进给速度对铣削力的影响程度则可以通过图9(c)得出,进给速度的显著性大于切削深度。综合以上分析可以得出结论:主轴转速对铣削力 F_z 的影响最显著,进给速度次之,切削深度最不显著。

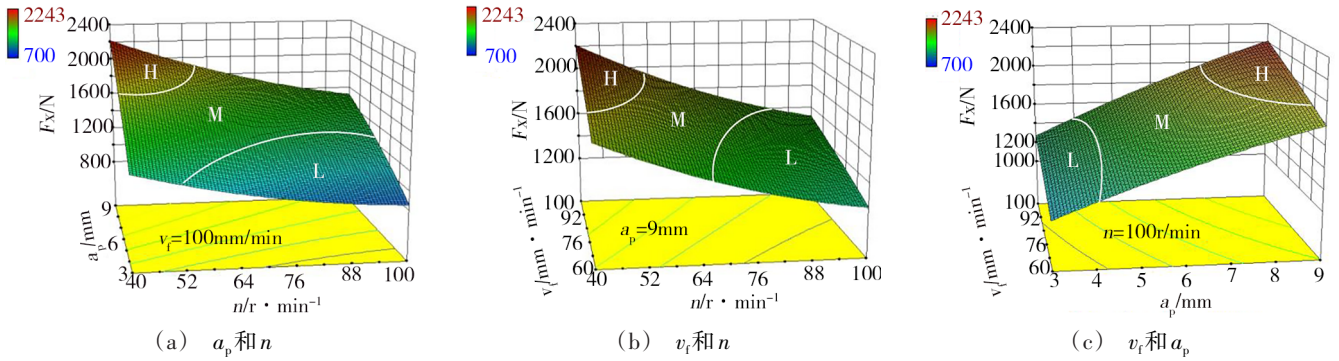


图7 工艺参数对 F_x 的交互影响曲面

Fig. 7 Surface of interaction of process parameters on F_x

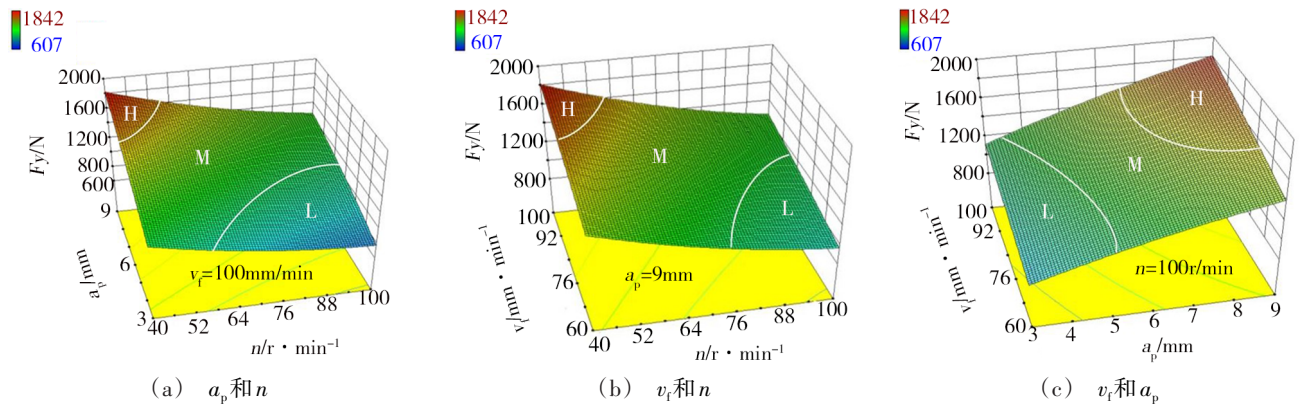


图8 工艺参数对 F_y 的交互影响曲面

Fig. 8 Surface of interaction of process parameters on F_y

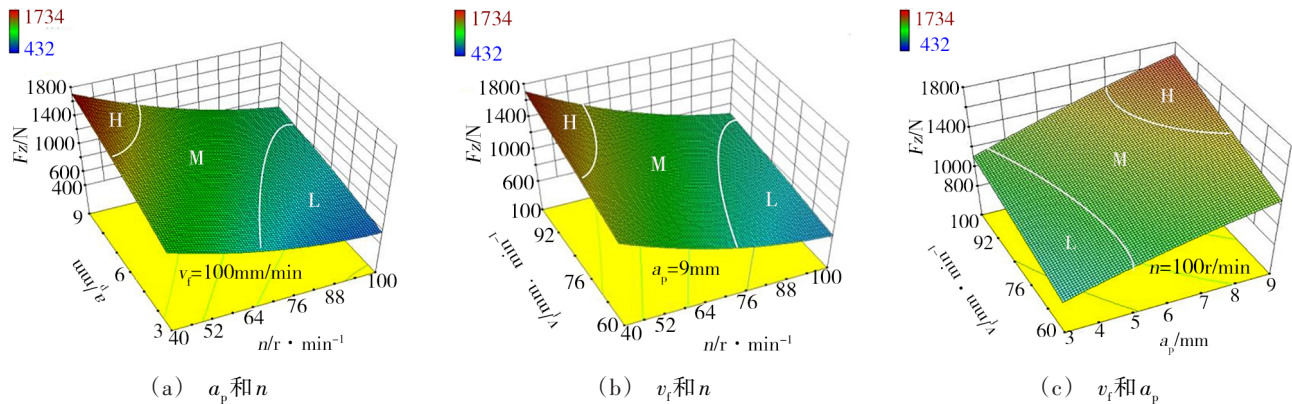


图9 工艺参数对 F_z 的交互影响曲面

Fig. 9 Surface of interaction of process parameters on F_z

3 结论

本文设计单因素实验和正交实验,开展钛合金盘铣开槽过程中铣削力研究,建立铣削力预测模型并进行显著性检验,分析工艺参数对铣削力的影响规律,利用响应曲面分析工艺参数对铣削力的交互作用,结果如下。

(1) 铣削力 F_x 对切削深度的变化最为敏感,进给速度次之,最后是主轴转速;铣削力 F_y 对进给速度的变化最为敏感,其次是切削深度,最后是主轴转速;对于铣削力 F_z 来说,主轴转速为最敏感的因素,切削深度为最不敏感因素。

(2) 铣削力随着主轴转速的增大而减小,随着切削深度和进给速度的增大而增大。另外铣削力 F_x 大于其它两个力,对加工性能和刀具磨损起主导作用。

参考文献

- [1] 张耀满,李万鹏,杨铭宇. 球头铣刀加工钛合金零件的铣削力特性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,41(6):852-857.
- ZHANG Y M, LI W P, YANG M Y. Milling force characteristics of titanium alloy parts machined by ball-end cutter[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019,41(6):852-857.
- [2] 王明海,周冬亮,郑耀辉,等. TA15钛合金试验及磨损分析[J]. 工具技术,2018,52(3):109-112.
- WANG M H, ZHOU D L, ZHENG Y H, et al. Experimental and analysis of milling titanium alloy TA115 [J]. Tool Technology, 2018,52(3):109-112.
- [3] 向国齐,陆涛. 基于支持向量机钛合金铣削力预测分析[J]. 机床与液压,2016,44(3):142-146.
- XIANG G Q, LU T. Prediction analysis of titanium alloy milling force based on support vector machine [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2016,44(3):142-146.
- [4] 李体仁,王心玉,马超超. 方肩铣刀高速铣削TC4钛合金试验研究及参数优化[J]. 机床与液压,2020,48(8):40-44.
- LI T R, WANG X Y, MA C C. Experimental study and parameter optimization of high speed milling of TC4 titanium alloy with carbide shoulder milling cutter [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2020,48(8):40-44.
- [5] SAHOO P, PRATAP T, PATRA K. A hybrid modeling approach towards prediction of cutting forces in micro end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019,150:495-509.
- [6] TRABELSI S, MOREL A, GERMAIN G, et al. Tool wear and cutting forces under cryogenic machining of titanium alloy (Ti17) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,91(5-8):1493-1505.
- [7] 倪雪婷,沈兴全,曹卫卫,等. 钛合金高速铣削力的有限元分析[J]. 河北农机,2016(1):62-63.
- NI X T, SHEN X Q, CAO W W, et al. Finite element analysis of high speed milling force in Titanium alloy [J]. Hebei Farm Machinery, 2016(1):62-63.
- [8] 岳彩旭,刘鑫,何耿煌,等. 钛合金薄壁件铣削过程的有限元仿真分析[J]. 航空制造技术,2019,62(13):60-66.
- YUE C X, LIU X, HE G H, et al. Finite element simulation analysis of thin-walled parts milling process of titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019,62(13):60-66.
- [9] 李体仁,王悉颖. TC4钛合金铣削过程的有限元分析[J]. 机电工程技术,2017,(11):11-14.
- LI T R, WANG X Y. The Finite Element Analysis of TC4 Titanium Alloy Milling Process [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2017, (11):11-14.
- [10] ZHANG Y R, QI H J. Based on the titanium alloy milling forces modeling and simulation [J]. Advanced Materials Research, 2014,1004-1005:1231-1235.
- [11] ZHENG Q C, YANG C L, ZHANG S Q, et al. Simulation and experimental research on cutting force of turning titanium alloy [C]. 7th International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, 2015.
- [12] ZHANG N, SHI Y Y. A 3-D instantaneous cutting force prediction model of indexable disc milling cutter for manufacturing blisk-runnels considering runout [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,103(9-12):4029-4039.
- [13] XIN H M, SHI Y Y, ZHAO T. Compound efficient and powerful milling machine tool of blisk [J]. International of Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(5-8):1745-1753.
- [14] XIN H M, SHI Y Y, NING L Q. The influence of thermal-mechanical coupling on surface integrity in disc milling grooving of titanium alloy [J]. Machining Science and Technology, 2017, 21(2):313-333.
- [15] XIN H M, SHI Y Y, NING L Q. Influence of thermal mechanical coupling on surface integrity in disc milling grooving of titanium alloy [J]. Machining Science and Technology, 2017, 21(2):313-333.