

# 钛合金插铣加工切削力试验及工艺参数优化

程耀楠, 杨金龙, 冯新敏, 宋旭

哈尔滨理工大学

**摘要:** 钛合金整体叶盘结构复杂, 制造难度大。应用插铣技术加工整体叶盘能够有效解决上述问题, 插铣工艺参数的优化对发挥插铣加工优势具有重要作用。通过插铣钛合金试验研究, 探讨工艺参数对切削力的影响规律; 根据试验数据建立切削力预测模型, 并对模型进行检验; 最后以切削力与金属去除率为目标, 基于 MATLAB 进行工艺参数优化, 可为钛合金整体叶盘高效切削提供理论参考及技术支持。

**关键词:** 整体叶盘; 钛合金; 插铣; 工艺参数; 切削力

中图分类号: TG115.6+3; TH162

文献标志码: A

## Experimental Study on Cutting Force and Process Parameter Optimization of Plunge Milling Machining of Titanium Alloy

Cheng Yaonan, Yang Jinlong, Feng Xinmin, Song Xu

**Abstract:** The structure of Titanium alloy blisk is complex and the material is difficult-to-cut, which brings great difficulties to the manufacture. Applying the milling technology to the manufacture of blisk can solve the above problems effectively. The optimization of process parameters is great significance to the advantage of milling process. The influence of process parameters on cutting force is studied by means of the plunge milling experiment of titanium alloy. According to the experimental data, the cutting force prediction model is established and tested. Taken the cutting force and metal removal rate as the goal, the process parameters are optimized based on MATLAB to provide theoretical reference and technical support for Titanium alloy blisk high-efficiency machining.

**Keywords:** blisk; Titanium alloy; plunge milling; process parameter; cutting force

### 1 引言

钛合金整体叶盘是航空发动机中压气机的核心部件, 与传统榫接叶盘相比, 结构较为简化、重量较轻、气动效率较高, 对提高发动机的推重比和稳定性具有重要意义<sup>[1]</sup>。但钛合金整体叶盘结构复杂、叶片为自由曲面、流道加工空间狭窄, 属于难加工材料, 整体叶盘的制造难度较大<sup>[2]</sup>。在铣削过程中, 插铣刀具有径向力较小、轴向能够承受较大铣削力、铣削效率高的特点<sup>[3]</sup>, 因此, 将插铣技术应用于钛合金整体叶盘制造能够较好地解决上述问题。

Wakaoka S. 等<sup>[4]</sup>通过钛合金插铣试验分析了铣削过程中的加工精度和加工效率。Hirano C. 等<sup>[5]</sup>通过研究插铣刀运动轨迹, 成功实现了五轴机床与高效插铣的结合, 并将此技术应用于 CAM 软件。在钛合金切削温度研究方面, Cotterell M. 等<sup>[6]</sup>通过试验验证了所建立的切削钛合金热学模型的正确性, 并实现了剪切区与前刀面平均温度的预测。刘伟成<sup>[7]</sup>通过研究插铣钛合金试验中的温度场分布, 建

立了非耦合热传导有限元模型。郭连水等<sup>[8]</sup>应用插铣技术对涡轮叶盘进行粗加工, 叶盘切削变形较小, 切削效率较高。石磊等<sup>[9]</sup>利用 Master CAM 进行插铣编程, 并应用此程序完成了对深流道叶轮的插铣加工。任军学等<sup>[10]</sup>提出应用五坐标插铣粗加工开式整体叶盘通道的新方法, 此方法可以有效减小粗加工的振动现象。

以上研究主要是针对插铣仿真模型的建立和刀具轨迹生成算法及工件表面质量等方面, 对于插铣钛合金工艺参数对切削力和切削效率综合影响的研究较少, 因此, 本文对插铣刀工艺参数优化的研究具有重要意义。

### 2 钛合金插铣试验

以钛合金 Ti6Al4V 为试验材料, 使用 VDL-1000E 立式加工中心进行插铣试验, 利用 Kistler9257B 测力仪采集插铣切削分力, 运用 DH5922 动应变测试和采集设备收集插铣实验数据。采用可转位插铣刀, 刀体材料为 42CrMo, 刀片材料为硬质合金。

采用三因素四水平的正交实验设计, 工艺参数

见表1,试验结果见表2。

表1 正交实验工艺参数

序号	切削速度 A $v_c$ (m/min)	每齿进给量 B $f_z$ (mm/z)	切削宽度 C $a_c$ (mm)
1	40	0.02	0.5
2	60	0.04	1
3	80	0.06	1.5
4	100	0.08	2.0

对试验所得切削力数据进行极差分析得到: $R_C > R_B > R_A$ ,表明在插铣钛合金过程中工艺参数对切削力的影响显著性由大到小依次为:切削宽度、每齿进给量、切削速度,所以在保证切削力较小的情况下,插铣钛合金时应选取尽可能大的切削速度,较大的每齿进给量和较小的切削宽度,此结果能够为插铣工艺参数优化提供一定参考。

表2 插铣试验结果

序号	A (m/min)	B (mm/z)	C (mm)	$F_x$ max(N)	$F_y$ max(N)	$F_z$ max(N)	$F_{\text{合}}$ (N)
1	A1	B1	C1	188.1	167.4	96.7	269.7
2	A1	B2	C2	362.3	294.2	192.8	505.2
3	A1	B3	C3	683.1	473.6	286.4	879.3
4	A1	B4	C4	827.6	625.7	351.5	1095.6
5	A2	B1	C2	214.5	180.8	152.8	319.4
6	A2	B2	C1	203.0	168.9	105.8	284.5
7	A2	B3	C4	705.3	537.6	294.3	934.3
8	A2	B4	C3	638.9	509.1	273.7	861.8
9	A3	B1	C3	466.8	338.4	179.9	604.0
10	A3	B2	C4	508.6	392.8	227.5	681.7
11	A3	B3	C1	245.9	240.5	113.4	362.4
12	A3	B4	C2	501.2	378.2	230.5	668.8
13	A4	B1	C4	446.9	289.7	181.3	562.6
14	A4	B2	C3	475.1	377.8	215.9	644.3
15	A4	B3	C2	413.2	336.3	196.0	568.1
16	A4	B4	C1	296.4	253.4	182.3	422.4

### 3 建立切削力预测模型

为进一步研究 TC4 的插铣加工特性,需要预测切削力在不同工艺参数下的变化情况,通过实验数据研究和分析两者间的关系,并建立正确、可靠的切削力预测模型。

#### 3.1 建立预测模型

切削力公式分为两种:理论公式和指数公式,前者在构建过程中因为影响因素过多,得到的预测模型正确性较低;而指数公式利用实验获得的切削力数据,通过数据处理软件进行拟合计算,与前者相比较,对切削力的预测更加可靠。切削力与工艺参数间关系的通用数学模型可表示为

$$F_i = K v_c^{K_1} f_z^{K_2} a_c^{K_3} \quad (1)$$

式中, $F_i$  为切削分力,在  $i$  取  $X、Y、Z$  不同方向时,其代表沿不同轴向的切削力分量; $K、m、n、u$  为工艺参数的  $F_i$  修正系数,线性处理后得

$$\lg F_i = \lg K + m \lg v_c + n \lg f_z + u \lg a_c \quad (2)$$

令  $Y = \lg F_i, B = \lg K, x_1 = \lg v_c, x_2 = \lg f_z, x_3 = \lg a_c$ , 代入上式得

$$Y = B + m x_1 + n x_2 + u x_3 \quad (3)$$

式中, $Y$  代表铣削钛合金切削力大小; $x_1 - x_3$  为自变量。

切削力试验误差设定为  $\varepsilon$ , 代入得到线性回归方程组为

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{1,1} + \beta_2 x_{2,1} + \beta_3 x_{3,1} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{2,1} + \beta_2 x_{2,2} + \beta_3 x_{2,3} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_{16} = \beta_0 + \beta_1 x_{16,1} + \beta_2 x_{16,2} + \beta_3 x_{16,3} + \varepsilon_{16} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\beta_0$  为常数; $\beta_1、\beta_2、\beta_3$  为回归系数。

上式的矩阵表达式为

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

式中, $\beta$  为估计参数,设  $a_0 - a_3$  分别为估计参数最小二乘估计,将其代入式(3)得

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (6)$$

将上式转换为

$$a = (X'X)^{-1} X'Y \quad (7)$$

基于上述研究,利用回归分析法对实验收集的数据进行多元回归处理,得到  $X、Y、Z$  方向切削分力及切削合力与插铣工艺参数间的多元线性回归预测模型为

$$\begin{cases} F_x = 1893.4 v_c^{-0.0788} f_z^{0.4108} a_c^{0.7351} \\ F_y = 1695.4 v_c^{-0.0881} f_z^{0.4330} a_c^{0.5933} \\ F_z = 905.78 v_c^{-0.1150} f_z^{0.3609} a_c^{0.5646} \\ F_{\text{合}} = 2663.1 v_c^{-0.0874} f_z^{0.4066} a_c^{0.6663} \end{cases} \quad (8)$$

此模型能够实现不同工艺参数下切削力的预测,为工艺参数的优化提供理论参考。

#### 3.2 预测模型的检验及验证

只有正确性和可靠性高的预测模型才能准确反映切削力的真实情况,为优化切削加工和工艺参数提供支持,因此需要对预测模型的拟合效果进行显著性检验,依次得出各切削力预测模型的  $F$  检验。

计算得到各切削分力的  $F$  值为: $F_x = 86.91、F_y = 29.4、F_z = 21.85$ 。查  $F$  表可得  $F_{0.05}(3, 12) = 3.5, F_x、F_y、F_z$  均大于  $F_{0.05}(3, 12)$ , 所以回归方程高度显著,证明了切削力数学模型的准确性。

为了更加直观地证明切削力预测模型的准确性,重新选择两组工艺参数进行实验,并收集各组切削力数据,通过预测模型计算出对应的切削力预测

值,将两者进行对比分析,具体结果见表3。最终得到切削力在三个方向上的切削分力预测值与两组实验数据值间的误差均在15%之内,因此可以直观地反映出插铣切削力预测模型的准确性和可靠性。

表3 切削力对比分析表

序号	工艺参数	数据对比	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)
1	A = 50m/min	实验值	255.8	206.9	133.4
	B = 0.03mm/z	预测值	279.6	230.5	143.7
	C = 0.8mm	误差	8.5%	10.2%	7.2%
2	A = 50m/min	实验值	419.0	320.6	191.6
	B = 0.03mm/z	预测值	452.8	355.1	208.9
	C = 0.8mm	误差	7.4%	9.7%	8.3%

## 4 优化插铣工艺参数

由于插铣是针对整体叶盘流道加工,提高加工效率同样是一个重要目标。不合理的工艺参数容易产生较大的切削力、降低刀具耐用度,因此以实现小切削力、高效率为目标,选择合理的工艺参数具有较大的必要性。

### 4.1 确定工艺参数优化条件

工艺参数优化的基础和关键部分是准确建立优化模型,而目标函数、变量及其约束条件是优化中三要素,其中变量约束尤为重要。针对钛合金的插铣实验研究,以实现小切削力、高效率为目标,对插铣钛合金工艺参数进行优化。

(1)以金属材料去除率最大为目标

$$Q = \frac{f_z a_c z v_c s}{\pi D} \quad (9)$$

式中, $z$ 为齿数; $s$ 为侧向步距,取值1mm; $D$ 为插铣刀具直径,取值16mm。

(2)以切削力最小为目标

$$F_{\text{合}} = 2663.1 v_c^{-0.0874} f_z^{0.4066} a_c^{0.6663} \quad (10)$$

式中, $f_z$ 为刀具的每齿进给量; $a_c$ 为切削宽度; $v_c$ 为切削速度;三者都属于模型的变量。

利用遗传算法能够简单、高效地求解有关非线性目标函数的问题,求解出的最优结果比较准确。基于上述实验分析和变量个数,设定变量约束条件为各工艺参数的实验选取范围。

### 4.2 基于MATLAB的工艺参数优化

基于MATLAB的Optimization Tool,应用遗传算法函数解算模型来优化工艺参数。

采用加权法建立目标函数@ process parameters optimization (x): $f = -2663.1 * x(1)^{-0.0874} * x(2)^{0.4066} * x(3)^{0.6663} * 0.6 + x(1) * x(2) * x$

(3) \* 3 \* pi^(-1) \* 16^(-1) \* 0.4;

输入变量个数为3,根据以上约束条件,建立线性约束矩阵。按以上参数设置输入,运行到52代收敛,得到优化结果704.6627231554112, $v_c = 99.892$ ; $f_z = 0.08$ , $a_c = 1.999$ 。因此,最终优化结果为 $v_c = 100\text{m/min}$ , $f_z = 0.08\text{mm/z}$ , $a_c = 2.0\text{mm}$ 。

## 5 结语

插铣加工钛合金整体叶盘的工艺参数决定刀具所受载荷及加工效率,通过切削试验优化插铣工艺参数得出以下结论:

(1)基于插铣钛合金试验获得切削力数据并对其进行极差分析,得出工艺参数对切削力影响显著性从大到小依次为:切削深度、每齿进给量、切削速度,建议以降低切削力作为优化目标时应选择尽可能大的切削速度及较小的切削宽度;

(2)以试验数据为基础建立切削力预测模型并进行检验,预测值与实验值的误差均小于15%,证明了切削力预测模型的正确性;

(3)以切削力最小和金属去除率最大为目标,基于MATLAB的Optimization Tool工具得出最优切削参数组合为: $v_c = 100\text{m/min}$ , $f_z = 0.08\text{mm/z}$ , $a_c = 1.0\text{mm}$ 。

## 参考文献

- [1] Zhan H, Zhao W, Wang G. Manufacturing turbine blisks [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2000, 72(3):247-252.
- [2] 黄久超,刘献礼,杨树财,等.基于UG的开式整体叶盘五坐标加工工艺方法[J].航空精密制造技术,2012,48(3):30-33.
- [3] Niu X H, Cui L Q, Hao B C, et al. Analysis of plunge milling force and tool deformation on Cr12[J]. Advanced Materials Research, 2013, 652-654:2173-2177.
- [4] Wakaoka S, Yamane Y, Sekiya K, et al. High-speed and high-accuracy plunge cutting for vertical walls[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2):246-250.
- [5] Hirano C, Morishige K. Development of rough cutting method with plunge milling using 5-axis control machine tool[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2007, 73(11):1261-1266.
- [6] Cotterell M, Byrne G. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of Titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 57(1):93-96.

# 金刚石螺旋式铣刀的设计及工艺分析

何荣跃,杨辉全,方芳,刘华,廖波

成都工具研究所有限公司

**摘要:** 金刚石刀具在非金属材料加工方面已逐渐替代硬质合金刀具。本文从家具刨花板修边加工出发,介绍了一种螺旋式结构铣刀,并分别从刀具设计、关键工艺、材料选择、刃口设计等方面进行研究。

**关键词:** 螺旋式结构;金刚石铣刀;刨花板加工

**中图分类号:** TG714;TH162

**文献标志码:** A

## Design and Process Research of Diamond Spiral Milling Cutter

He Rongyue, Yang Huiquan, Fang Fang, Liu Hua, Liao Bo

**Abstract:** Diamond tools in non-metallic materials processing are widely used, and diamond tools have gradually replaced carbide tools. In this paper, starting from the processing of furniture particleboard, a spiral milling cutter is introduced, which is studied from aspects of tool design, key technology, material selection and cutting edge design.

**Keywords:** spiral structure; diamond milling cutter; particleboard processing

## 1 引言

金刚石刀具在难加工非金属材料方面应用越来越广泛,它集中体现了聚晶金刚石的各种优良特性:各向同性、较强的抗磨损能力、较好的可焊性和可加工性,非常适合石材、硬质碳、碳纤维增强塑料、人造板材等难加工材料的加工。金刚石刀具在加工木材时寿命是硬质合金刀具的20-100倍,加工精度可达0.005mm,可以达到抛光的粗糙度和精度,完全无需再抛光被加工表面,同时减少换刀频率,加工效率提高10倍以上。

本文以家具行业贴面刨花板加工为例,介绍一种金刚石螺旋式铣刀。该金刚石铣刀用于刨花板侧面修光,要求贴面正反两面不能崩边、加工面平整无纹路、刀具耐用、长时间不换刀。这种刀具采用大轴向前角,模拟螺旋齿加工,单点切削轻快,切削力小,光洁度好。同时,针对贴面正反两面不能崩边的要求,采取上下两排金刚石轴向前角相反的设计,以达到切削要求。

## 2 刀具设计及工艺过程

### 2.1 刀具整体结构设计

根据机床结构和厂家要求设计柄部尺寸、刃口外圆尺寸和刃长等参数。刀具基体采用综合性能比较好的40Cr,整个刀具采用聚晶金刚石复合片分段焊接而成,采用4排刃口(每排2齿)和一个横刃组合而成,共9齿。轴向前角为12-15°,横刃过刀具中心,用于封闭场合的清底加工。刀体结构采用三维软件进行建模而成。

图1为刀具整体结构图。第1排与第2、3、4排的轴向后角相反。图2为刀具加工示意图。在加工过程中,刀具带轴向后角,可以使贴面板有一个向内的切削力,防止贴面撕裂和出现崩边;第2、3、4排是同一个轴向后角方向,一把刀具可以同时满足不同厚度的贴面板不崩边的加工要求。

取贴面板上、下两面切削的一个点作受力分析,如图3所示,第一排刀齿作用于贴面板反面,除进给方向的分力 $F_x$ 外,还有一个向上的分力 $F_z$ ,可有效防止贴面板反面向下撕裂和崩边;同理,作用于贴面板正面的2、3、4排刀齿会施加一个向下的分力 $F_z'$ ,

收稿日期:2017年12月

[7]刘伟成.基于有限元的钛合金插铣过程温度场研究[D].天津:天津大学,2009.

[8]郭连水,刘秋丰,曹浩波.涡轮叶盘数控加工优化方法的研究与实现[J].新技术新工艺,2005(10):19-21.

[9]石磊,杨小毅.数控插铣二元叶轮的工艺方法[J].风机技术,2006(4):31-32.

[10]胡创国,张定华,任军学,等.开式整体叶盘通道插铣粗

加工技术的研究[J].中国机械工程,2007,18(2):153-155.

第一作者:程耀楠,教授,哈尔滨理工大学机械动力工程学院机械制造系,150080哈尔滨市

First Author: Cheng Yaonan, Professor, Department of Machinery Manufacturing, Institute of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science And Technology, Harbin 150080, China