

钛合金薄壁件铣削过程有限元仿真分析*

岳彩旭¹, 刘鑫¹, 何耿煌², 李凌祥²

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080;

2. 厦门金鹭特种合金有限公司, 厦门 361009)

[摘要] 钛合金薄壁件铣削过程中, 刀具角度对铣削过程中的工件变形、铣削力、铣削振动等影响显著。为减轻刀具磨损延长刀具寿命, 通过 ABAQUS 软件建立钛合金 Ti6Al4V 薄壁件铣削过程仿真模型, 以铣削力和铣削温度为评价指标, 采用单因素和正交法分析了刀具前角、后角及螺旋角对铣削力和铣削温度的影响规律, 并对铣削力仿真结果进行试验验证。仿真结果表明: 前角增大, 铣削力减小, 铣削温度呈波动趋势变化; 后角增大, 铣削力减小, 铣削温度先减小后增大; 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, 铣削温度先减小后增大。通过正交试验和极差分析, 明确不同因素对指标影响程度的主次顺序和因素的最优水平组合。

关键词: 钛合金; 薄壁件; 铣削过程; 有限元仿真; 刀具角度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.060



岳彩旭

博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为硬态加工技术、切削过程有限元仿真和刀具设计技术。

钛合金散热系数小, 强度大, 难加工, 导致铣削过程中铣削力大、热量多且不易扩散; 但其密度小、强度高、耐腐蚀与抗疲劳强等性能良好, 使得该材料在航空航天中应用广泛。薄壁件刚性差, 结构复杂, 容易产生变形和振动。在铣削加工钛合金薄壁件的过程中, 刀具角度对铣削过程中的工件变形、铣削力、铣削振动等影响显著, 其中前角、后角能够减轻刀具载荷, 降低切削力、切削热; 螺旋角具有减振和抑制振颤的作用; 有必要对刀具角度进行优化分析。

国内外诸多学者对钛合金薄壁件铣削过程展开深入研究。国外专家 Tang 等^[1] 利用试验和有限元仿真相结合的方法, 研究表明可变螺旋

角和不等齿距结构可以减轻铣削过程中的变形和振动。Yang 等^[2] 设计了等齿距铣刀和不等齿距铣刀, 在薄壁件加工中使用所设计的立铣刀, 该研究表明: 相比于等齿距铣刀来说, 变齿距铣刀可以减少薄壁件加工过程中的振动。Vasilyuk^[3] 研究结果表明当增加刀具圆弧刃半径时, 能够减轻工件加工过程中的振动。Zoya 等^[4] 对钛合金 TC4 进行铣削试验, 结果表明: 铣削钛合金时, 铣削速度的增加导致铣削力增大。姜振喜^[5] 建立了钛合金二维正交切削模型, 以减少切削力和温度为目标, 优化后的参数为: 第 1 前角 12°~15°、第 2 前角 55°、后角 8°~11°、第 1 前刀面长度 0.06~0.07mm。张建飞^[6] 利用单因素

* 基金项目: 国家自然科学基金国际合作重点项目研究(51720105009); 理工英才支持项目(LGYC2018JQ015)。

变换法对刀具前角、后角、钝圆半径 3 个几何参数在加工过程中对切削力、切削温度、切屑锯齿化参数的影响进行了定性分析。苗森^[7]采用正交试验研究铣刀的槽前角、齿间角和芯厚对切削力和温度的影响。唐小同^[8]采用正交试验,研究了 C 形刃立铣刀的螺旋角、C 形刃的角度与宽度对切削力、表面粗糙度的影响。张磊^[9]采用遗传算法对微坑织构的直径、深度、微坑织构间的距离、距离切削刃的距离及刃口钝圆半径进行优化。

在铣削钛合金薄壁件刀具设计时,从减振方面考虑变齿距的研究较多,但在刀具-工件变形方面对铣刀进行优化设计的工作较少。因此本文以铣刀前角、后角和螺旋角为因素,采用 ABAQUS 仿真软件,重点分析了刀具角度对切削力和切削温度的影响规律,以为钛合金薄壁件的刀具角度优选提供理论基础。

有限元建模的基本理论

1 工件材料本构模型的设定

刀具材料为硬质合金,工件材料为钛合金 Ti6Al4V。Johnson-Cook 模型认为材料在高应变速率下表现为应变硬化、应变速率硬化和热软化效应。本文采用 Johnson-Cook 本构模型,其本构方程为:

$$\sigma(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中, A 为准静态条件下的屈服强度;

ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率; $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变率; B 为材料应变强化参数; n 为硬化指数; c 为应变率强化参数; T_0 为常温系数,通常取 25℃; T_{melt} 为材料熔点; m 为热软化参数。

工件材料的 Johnson-Cook 本构模型参数设置见表 1^[10]。

2 边界条件和材料性能的设定

为确保工件在有限元仿真的过程中不会移动,设置边界条件时,将工件的一侧进行固定 ($U_x=U_y=U_z=UR_x=UR_y=UR_z=0$); 然后限制立铣刀沿 y 、 z 方向的移动 ($U_y=U_z=0$) 和 x 、 z 方向的转动 ($UR_x=UR_z=0$), 并赋予立铣刀沿 x 方向的移动和绕 y 轴的转动。

工件材料为钛合金 Ti6Al4V, 其物理性能为: 密度 4.44g/cm³, 弹性模量 108GPa, 泊松比为 0.34, 热导率 7.5W/(m·K), 比热容为 526.3J/(kg·K)。刀具材料为硬质合金, 其物理性能为: 密度 14.5g/cm³, 弹性模量 640GPa, 泊松比为 0.22, 热导率 75.4W/(m·K), 比热容 220J/(kg·K)。

3 切屑分离准则的设定

在铣削钛合金薄壁件过程中,对于材料的去除,要设置合适的切屑分离准则。本文采用 Johnson-Cook 剪切失效准则,失效参数 ω 的定义为:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}^{pl}} \right) \quad (2)$$

式中: $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为失效时的应变,其中:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 + d_5 \hat{\theta} \right]$$

式中: $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $\dot{\varepsilon}^{pl}$ 为塑性应变率; $d_1 \sim d_5$ 为失效常数。

工件 Johnson-Cook 剪切失效参数见表 2^[11]。

立铣刀结构及角度设计

本文选择直径为 10mm、齿数为 4、等齿距硬质合金立铣刀。

1 螺旋角选择

在铣削加工中,立铣刀的螺旋角与车削加工中刀具的刃倾角具有相同的作用,能够引导切屑排出并且使切宽变小,从而降低切削抗力。本文基于合理刀具角度选择的原则,并参考《机械加工工艺手册》中硬质合金刀具高速铣削钛合金刀具角度推荐的范围,螺旋角分别采用 30°、35°、40° 和 45°。

2 前角选择

铣刀前角不同,在铣削不同工件时切屑形态不一样,应力与应变分布不同。本文基于合理刀具角度选择的原则,并参考《机械加工工艺手册》中硬质合金刀具高速铣削钛合金刀具角度推荐的范围,前角采用 7°、9°、11° 和 13°。

3 后角选择

后角对已加工表面质量及后刀面之间的摩擦力影响显著。本文基于合理刀具角度选择的原则,并参考《机械加工工艺手册》中硬质合

表1 工件材料的Johnson-Cook本构模型参数 (TC4)

Table 1 Johnson - Cook constitutive model parameters of workpiece materials (TC4)

屈服强度 A /MPa	应变强化参数 B /MPa	应变率强化参数 c	硬化指数 n	热软化参数 m	T_{melt} /K
875	793	0.01	0.386	0.71	1560

表2 工件材料的Johnson-Cook剪切失效模型参数 (TC4)

Table 2 Johnson - Cook shear failure model of parameters workpiece material (TC4)

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

金刀具高速铣削钛合金刀具角度推荐的范围,后角选择 10° 、 12° 、 14° 和 16° 。

有限元仿真结果的试验验证

1 刀具及工件三维几何模型的建立

立铣刀和薄壁件的几何模型通过建模软件 UG NX8.0 预先创建后,以 iges 格式导入 ABAQUS 软件。铣刀和工件的三维模型是依据试验中的工艺参数和切削参数建立的,在建模过程中,对立铣刀的三维模型进行了相应的处理,因为刀杆部不参加切削,为了缩短仿真时间,提高仿真效率,在 UG 软件中只建立参与切削的刀刃部分。图 1 (a) 为前角 9° 、后角 12° 的立铣刀模型;图 1 (b) 为有限元仿真模型。

2 有限元仿真结果分析

以前角 9° 、后角 12° 、螺旋角 38° 、直径 10 mm 的硬质合金立铣刀为例,切削参数如下:进给速度 240mm/min、切深 10mm、切宽 0.5mm、主轴转速为 1000r/min。图 2 为有限元仿真软件在不同帧数下的 Mises 应力分布。

由图 2 可以看出,最大应力超过了钛合金 TC4 的屈服极限,所以工件发生塑性变形,达到分离准则后,切屑与工件分离。

3 有限元仿真结果的试验验证

在铣削加工时,铣削力作为一种重要的输出变量,对刀具寿命和加工效率影响较大,利用硬质合金立铣刀对钛合金薄板进行铣削试验,以铣削力为指标,将铣削力的试验值与仿真值进行对比。

3.1 试验条件

为了验证有限元仿真结果的准确性,进行铣削试验。试验和仿真的工件材料均为 Ti6Al4V,刀具材料为硬质合金,铣刀齿数为 4,直径为 10mm,前角为 9° 、后角为 12° 、螺旋角为 38° 。切削参数:进给速度 240mm/min、切深 10mm、切宽

0.5mm、主轴转速 1000r/min。机床是大连机床生产的型号为 DVL-1000E 的三轴数控机床,铣削力用瑞士 KISTLER 公司生产的型号为 9257B 的三向压电测力仪测量。试验现场如图 3 所示。

3.2 铣削力试验结果与仿真结果对比
研究立铣刀角度对铣削力的影响,对于提高工件表面质量、增加刀具寿命起着至关重要的作用。各个方向的铣削力仿真值和试验值的对

比如图 4 所示。

在铣削过程中,钛合金具有较小的弹性模量并且工件壁厚较薄,当刀刃接触工件时,工件会产生振动。结合仿真与试验结果可知,铣削钛合金 Ti6Al4V 时铣削力最大不超过 350N, x 方向铣削力仿真与试验误差为 8.9%; y 、 z 方向铣削力最大误差分别为 10.2%、10.4%。仿真值与试验值之间存在一定的误差,这是因为仿真过程是在理想条件下进行的,

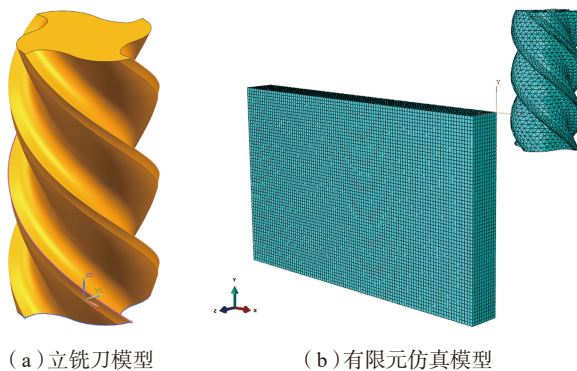


图1 立铣刀及有限元仿真模型
Fig.1 End milling cutter and finite element simulation model

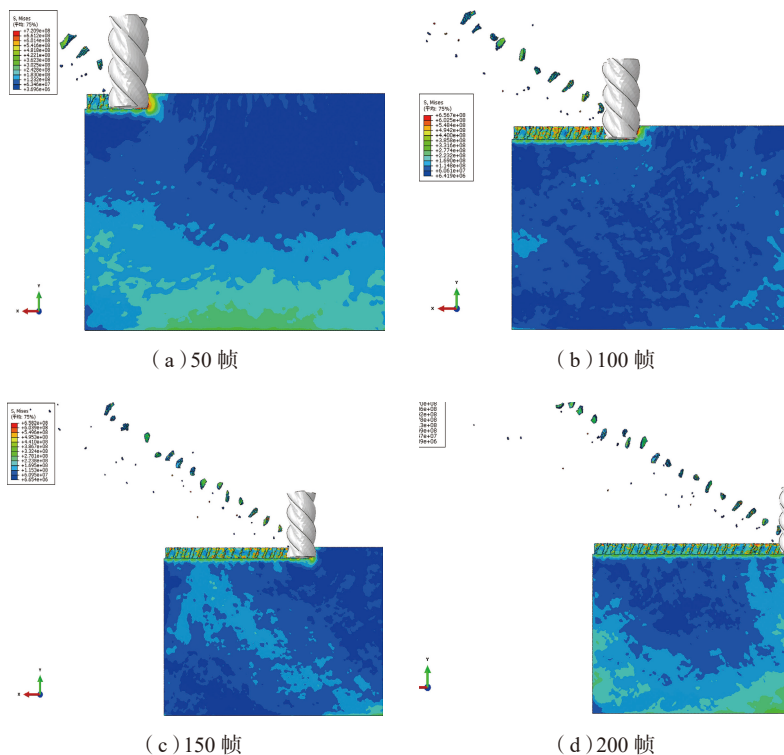


图2 Mises应力云图及切屑
Fig.2 Mises stress cloud diagram and chips

没有考虑实际加工过程中存在的问题,并且仿真过程中会有畸变点的产生;以及实际加工中机床本体、加工振动、工件装夹误差等存在不可控因素,所以试验值和仿真值有一定的差距,最大误差值为 10.4%,验证了有限元仿真结果的准确性。

基于有限元仿真的铣刀角度优选

1 刀具几何参数对铣削力的影响

当后角为 12° ,螺旋角为 38° 时,前角增大,通过有限元仿真得到的铣削力变化趋势如图 5 所示。可知,前角增大,其中最大径向力 F_x 、最大轴向力 F_y 变化显著,最大切向力 F_z 变化缓和,因为前角增大,铣刀的刃部变得更锋利,切入工件更容易,因此最大径向力 F_x 、最大轴向力 F_y 都有所减小,而最大切向力 F_z 基本不变,变化比较平缓。

当前角为 9° ,螺旋角为 38° 时,后角增大,通过有限元仿真得到的铣削力变化结果如图 6 所示。可以看出,刀具后角增大,最大轴向力 F_y 、最大切向力 F_z 、最大径向力 F_x 都有所减小,其中,最大径向力 F_x 和最大轴向力 F_y 变化显著。因为后角增大,铣刀刃部变得更锋利,刀具的后刀面与工件之间的摩擦减小,切入待加工表面更容易,刃口对工件的挤压力变小,已加工表面硬化程度下降,因此铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 都有减小的趋势。

当前角为 9° 、后角为 12° 时,螺旋角增大,通过有限元仿真得到的铣削力变化结果如图 7 所示。最大切向力 F_z 减小,最大径向力 F_x 变化缓和,最大轴向力 F_y 增大。因为螺旋角增大,实际的切削前角增大,刃口变得更加锋利,铣刀更容易切入工件,因此进给方向的铣削力减小,但螺旋角进一步增大,导致沿轴向的合力变大,最大轴向力 F_y 也随之增大。

2 刀具几何参数对铣削温度的影响

当后角为 12° ,螺旋角为 38° 时,

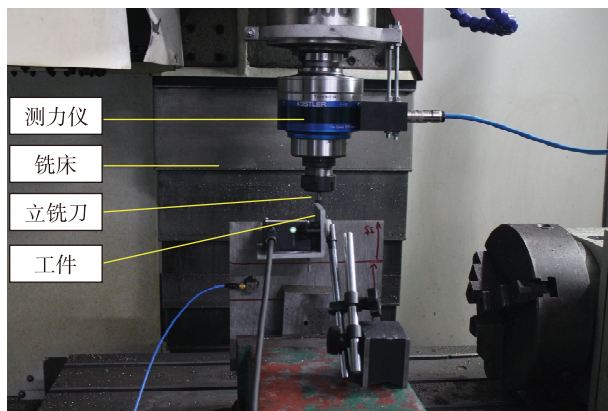


图3 试验现场

Fig.3 Experiment site

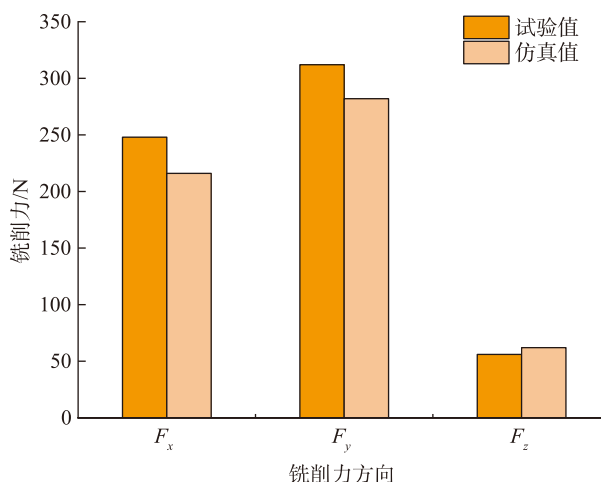


图4 仿真结果与试验结果对比图

Fig.4 Comparison diagram of simulation results and experimental results

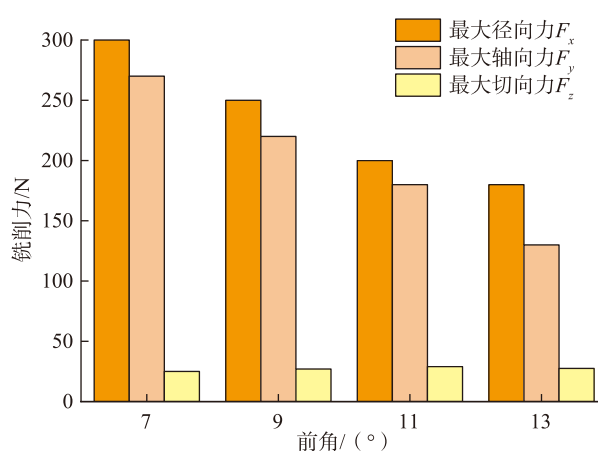


图5 前角对切削力的影响

Fig.5 Effect of rake angle on cutting force

随着前角的增大,通过有限元仿真得到的最高铣削温度变化结果如图 8 (a) 所示。可以看出,前角增大,最

高铣削温度呈波动趋势。首先,前角增大,铣刀切削刃更锋利,铣削力减小;其次,前刀面和切屑的接触长度

减小,相应的摩擦力小、切削热少,温度降低;再次,前角增大,铣刀刀刃的散热面积变小,散热条件变差;最后,钛合金的导热性差,铣削加工中产生的热量不易排出,集中在切削刃处,导致铣削温度升高。

当前角为 9° ,螺旋角为 38° 时,后角增大,通过有限元仿真得到的最高铣削温度变化结果如图8(b)所示。可以看出,后角增大,最高铣削温度先降低后升高,其中 $10^\circ\sim 12^\circ$ 铣削温度降低, $12^\circ\sim 14^\circ$ 铣削温度迅速升高, $14^\circ\sim 16^\circ$ 缓慢升高。因为后角增大,刀具与工件的摩擦力小,所以铣削温度降低,当后角再次增大,导

致切屑变形大,铣刀散热面积减少,因此铣削温度升高。

当前角为 9° ,后角为 12° 时,螺旋角增大,通过有限元仿真得到的最高

铣削温度变化结果如图8(c)所示。可知,螺旋角增大,最高铣削温度呈先降低、再升高的趋势。由于螺旋角增加,实际加工前角增大,铣刀变得更

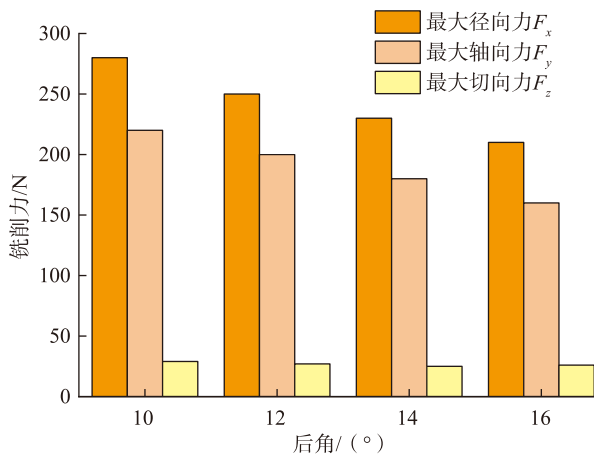


图6 后角对切削力的影响
Fig.6 Effect of relief angle on cutting force

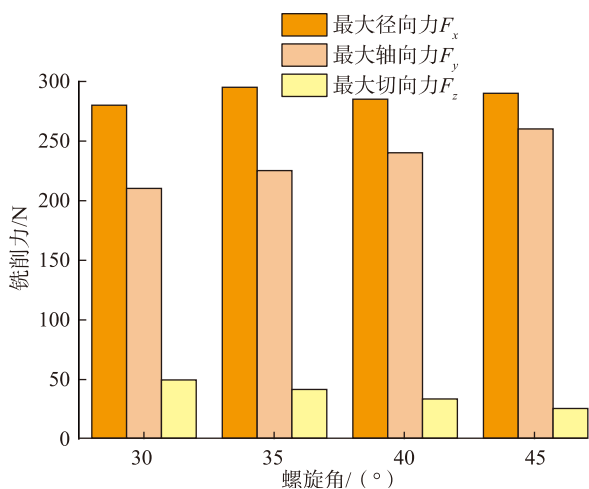
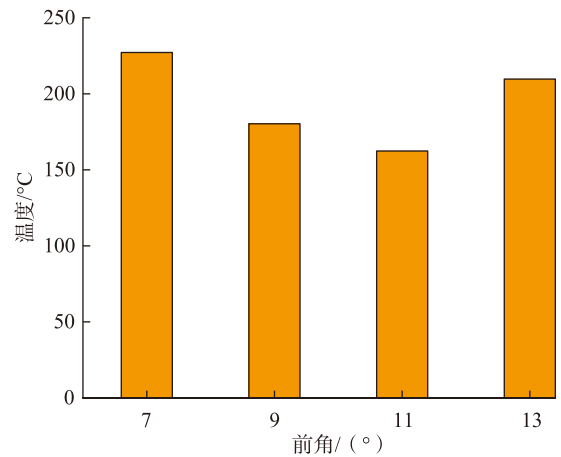
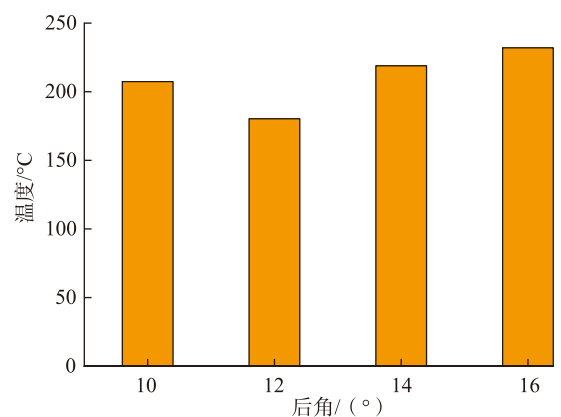


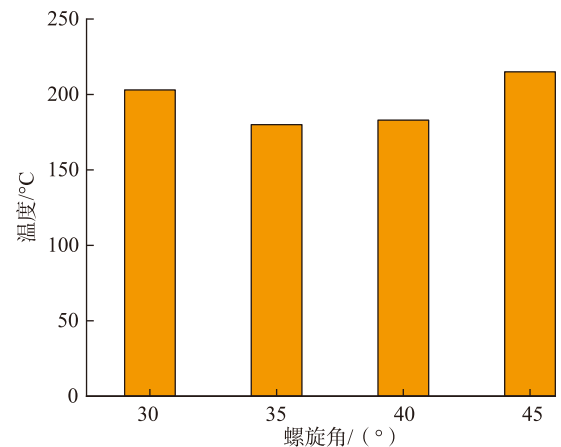
图7 螺旋角对切削力的影响
Fig.7 Effect of helix angle on cutting force



(a) 前角对温度的影响



(b) 后角对温度的影响



(c) 螺旋角对温度的影响

图8 不同前角、后角及螺旋角对温度的影响
Fig.8 Effects of different rake angle, relief angle and helix angle on temperature

锋利,切入工件更容易,消耗的功率变少,刀屑间的摩擦力小,切屑更容易排出,所以铣削温度降低。当螺旋角再次增大,刀屑接触面积减小,散热条件变差,铣刀后刀面与已加工表面摩擦力变大,导致铣削温度升高。

3 正交试验

正交试验是采用正交表分析多因素试验的一种方法,它能够从试验的数据中选出具有正交性的点做试验,用较少的试验找到因素水平间的最优搭配。表3为三因素四水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验设计因素水平表。

为分析铣刀前角、后角和螺旋角对铣削过程的影响,把仿真结果获得的铣削合力和铣削温度进行极差分析。通过极差分析明确不同因素对指标影响程度的主次顺序和因素的最优水平组合。

将9组方案的刀具铣削有限元得到的铣削合力和温度进行极差分析,结果见表4。其中, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别对应不同因素4个水平的平均值, F 表示铣削合力, T 表示铣削温度, R 表示因素的极差值。

由表4可以看出:(1)铣刀角度对铣削力的影响程度大小分别为前角>螺旋角>后角,且前角对铣削力的影响较显著。从减小铣削力的角度,最优的搭配组合为前角 13° ,后角 16° ,螺旋角 45° ;(2)铣刀角度对铣削温度影响程度大小分别为后角>螺旋角>前角,但总体来看,三者差距不显著。从减小铣削温度的角度,最优的搭配组合为前角 11° ,后角 14° ,螺旋角 35° 。

结论

(1)随着前角的增大,铣削力减小,铣削温度呈波动趋势变化;随着后角的增大,铣削力减小,铣削温度先增大后减小;随着螺旋角的增大, F_z 减小, F_y 缓慢增大,最大径向力 F_x 基本不变,铣削温度先增大后减小。

表3 正交试验设计因素水平表

Table 3 Orthogonal experiment design factor level table

因素水平	前角 / ($^\circ$)	后角 / ($^\circ$)	螺旋角 / ($^\circ$)
1	7	10	30
2	9	12	35
3	11	14	40
4	13	16	45

表4 正交试验预测结果

Table 4 Prediction of orthogonal experiment

试验编号	前角 / ($^\circ$)	后角 / ($^\circ$)	螺旋角 / ($^\circ$)	合力 F/N	温度 $T/^\circ C$	
1	7	10	30	322.8	207.4	
2	7	12	35	349.6	180.3	
3	7	14	40	422.3	218.9	
4	7	16	45	316.2	232	
5	9	10	35	344.9	203	
6	9	12	30	418.7	180	
7	9	14	45	300.5	183	
8	9	16	40	288.4	215	
9	11	10	40	396.7	217.2	
10	11	12	45	288.4	180.3	
11	11	14	30	277.7	162.4	
12	11	16	35	313	189.7	
13	13	10	45	279.9	199	
14	13	12	40	270.2	214	
15	13	14	35	306.5	183	
16	13	16	30	328.7	224	
铣削力	K_1	352.7	340.6	336.9	—	—
	K_2	338.1	349.6	328.5	—	—
	K_3	318.9	326.7	344.4	—	—
	K_4	296.3	311.6	296.3	—	—
	R	96.4	38	48.1	—	—
铣削温度	K_1	209.6	206.7	193.5	—	—
	K_2	195	188.7	189	—	—
	K_3	187.4	186.8	216.3	—	—
	K_4	205	215.2	198.6	—	—
	R	22.2	28.4	27.3	—	—

(2) 从有限元仿真结果来看, 刀具的前角、后角和螺旋角 3 个因素对铣削温度的影响差距很小; 但 3 个因素中, 前角对铣削力的影响明显大于后角和螺旋角。

(3) 通过正交试验和极差分析, 从减小铣削力的角度, 最优的搭配组合为前角 13°、后角 16°、螺旋角 45°; 从减小铣削温度的角度, 最优的搭配组合为前角 11°、后角 14°、螺旋角 35°。

参考文献

[1] TANG Y S, YOUNG H T, LEE B Y. Analytical model of chatter vibration in metal[J]. Tool Technology, 2008, 42(7): 10–20.
 [2] YANG F, ZHANG B, YU J. Chatter suppression via an oscillating cutter[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 132(7): 60–65.
 [3] VASILYUK G D. Vibration damping in turning [J]. Soviet Engineering Research, 1985, 5(12): 73–34.
 [4] ZOYA Z A, KRISHNAMURTHY R.

The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 43(11): 105–509.

[5] 姜振喜. TC4-DT 钛合金切削性能研究与仿生刀具结构设计[D]. 济南: 山东大学, 2016.

JIANG Zhenxi. TC4-DT titanium alloy cutting performance research and bionic tool structure design [D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[6] 张建飞. Ti6Al4V 高速切削过程有限元模拟及切削参数优化 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

ZHANG Jianfei. Finite element simulation of Ti6Al4V high speed cutting process and optimization of cutting parameters [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.

[7] 苗森. 钛合金 TC4 侧铣削刀具结构优化与刀具磨损研究 [J]. 制造技术与机床, 2016, 15(1): 57–71.

MIAO Miao. Optimization of cutter structure and tool wear in titanium alloy TC4 side milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016, 15(1): 57–71.

[8] 唐小同. 基于钛合金三维铣削仿真的立铣刀设计参数优化[D]. 湖南: 湖南科技

大学, 2017.

TANG Xiaotong. Optimization of design parameters of end mill based on 3D milling simulation of titanium alloy[D]. Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2017.

[9] 张磊. 硬质合金球头铣刀几何特征参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

ZHANG Lei. Optimization of mesoscopic geometric characteristic parameters of carbide ball milling cutters[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.

[10] 朱文明, 曹自洋. 高速切削 Ti6Al4V 切屑形成及其数值模拟[J]. 中国机械工程, 2007, 19(20): 2450–2454.

ZHU Wenming, CAO Ziyang. Formation and numerical simulation of high-speed cutting Ti6Al4V chip[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 19(20): 2450–2454.

[11] WU H B, ZHANG S J. 3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5): 1319–1326.

通讯作者: 岳彩旭, E-mail: yuecaixu@hrbust.edu.cn.

Finite Element Simulation Analysis of Thin-Walled Parts Milling Process of Titanium Alloy

YUE Caixu¹, LIU Xin¹, HE Genghuang², LI Lingxiang²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
 2. Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen 361009, China)

[ABSTRACT] During the milling process of titanium alloy thin-walled parts, the cutter angle has a significant influence on the workpiece deformation, milling force and milling vibration. Extend the service life of cutting tools and reduce tool wear, milling process simulation model of Ti6Al4V titanium alloy thin-walled pieces is established by using ABAQUS software, with the milling force and milling temperature as evaluation index, using the single factor and orthogonal method to analyze the effects of cutting tool rake angle, relief angle and helix angle on the milling force and milling temperature, and the milling force experiment is carried out to verify the simulation results. The simulation results show that with the increase of the rake angle, the milling force decreases and the milling temperature fluctuates. With the increase of the relief angle, the milling force decreases, and the milling temperature decreases first and then increases. With the increase of helix angle, the maximum axial force increases, the maximum tangential force slowly decreases, the maximum radial force has no obvious variation, and milling temperature decreases first and then increases. Through orthogonal test and range analysis, the order of primary and secondary influence degree of different factors on indexes and the optimal level combination of factors are defined.

Keywords: Titanium alloy; Thin-walled part; Milling process; Finite element simulation; Tool angle

(责编 大漠)