基于多指标正交试验的ABAQUS钛合金切削 仿真研究

王 健*,王泽华*,许世炜

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2024年12月8日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月7日

摘要

以钛合金Ti6Al4V作为研究对象,使用有限元分析软件ABAQUS进行二维切削仿真,研究切削过程中刀具 前角、切削速度以及切削深度对切削力以及切削温度的影响。采用正交试验法对仿真结果进行极差分析 研究各因素对各指标的影响程度,再运用排名评分法寻找在切削力以及切削温度最小下的最优工艺参数 组合。仿真实验以及极差分析结果表明:刀具前角是垂直切削运动方向切削分力RF2的主要因素,切削深 度是切削运动方向上的切削力RF1以及切削过程中最高温度Max.Temp的主要因素。最终得出的最佳工艺 参数为刀具前角10°,切削速度1m/s,切削深度0.5 mm。

关键词

钛合金切削,正交试验,极差分析,多指标评分分析

Simulation Study on Cutting of ABAQUS Titanium Alloy Based on Multi-Index Orthogonal Test

Jian Wang*, Zehua Wang*, Shiwei Xu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 8th, 2024; accepted: Jan. 1st, 2025; published: Jan. 7th, 2025

Abstract

In this paper, titanium alloy Ti6Al4V is used as the object of study, and the finite element analysis

*共同第一作者。

software ABAQUS is used to simulate two-dimensional cutting to study the effect of tool front angle, cutting speed and depth of cut on cutting force and cutting temperature during the cutting process. The orthogonal test method is used and the simulation results are analyzed by range analysis to study the influence of each factor on each index, and then the ranking score method is used to find the optimal combination of process parameters with minimum cutting force and cutting temperature. The simulation experiments and the results of the range analysis show that the tool front angle is the main factor of the cutting part force RF_2 in the direction of vertical cutting motion, and the depth of cut is the main factor of the cutting force RF_1 in the direction of cutting motion and the maximum temperature during cutting. The final best process parameters are derived as tool front angle 10° , cutting speed 1 m/s and depth of cut 0.5 mm.

Keywords

Titanium Alloy Cutting, Orthogonal Test, Range Analysis, Multi-Indicator Score Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

切削加工作为制造技术的主要基础工艺,随着制造技术的发展取得了重大的进步。其中,切削力以 及切削热是两个重要的研究对象。分析和计算切削力,是计算功率消耗,进行机床、刀具、夹具设计、指 定合理的切削用量、优化刀具几何参数的重要依据。切削热是切削过程中的重要物理现象之一。大量的 切削热使得切削温度升高,这将直接影响刀具前刀面上的摩擦系数、积屑瘤的形成和消退、刀具的磨损、 工件加工精度和已加工表面质量等,所以研究切削热和切削温度也是分析工件加工质量和刀具寿命的重 要内容[1]。

钛合金材料因比重小、强度高、耐腐蚀、耐热性等特点而被广泛应用于航空航天领域[2]。虽然钛合 金材料具有良好的物理和机械性能,但是由于其弹性模量低,导热性差等特点导致可切削性差,机床加 工过程中刀具的热负荷大,切削区域温度高,切削过程稳定性差,易产生变形,因此探明切削工艺参数 对切削力、切削热的影响规律,对实现钛合金材料的高效高质量切削具有重要理论和实践意义[3] [4]。 Khellouli A 等对砂带磨削的磨损机理及接触轮与工件之间的弹性接触进行了研究,并分析了工艺参数对 工件表面粗糙度的影响[5]。卢继等[6]采用 DEFORM 软件仿真研究单颗 CBN 磨粒磨削,磨削深度与磨削 速度对工件磨削温度及磨粒磨损的影响。

本文基于 ABAQUS 有限元仿真平台对钛合金 Ti6Al4V 切削过程进行仿真研究,采用正交试验设计 以及极差分析方法,探究不同工艺参数对切削力以及切削温度的影响,并运用排队评分法,获得钛合金 Ti6Al4V 切削加工在切削力以及切削过程中最高温度最小下的最佳工艺参数。

2. 有限元模型

2.1. 三维模型的建立

在 ABAQUS 软件部件模块中建立工件与刀具的二维几何模型。工件为长 25 mm,高 10 mm 的长方形。将工件分成切屑层与基体层两部分,以便后续能划分不同密度的网格节省计算时间。刀具后角为 6°,刀具前角为所需研究工艺参数。切削仿真几何模型如图 1 所示。



Figure 1. Cutting simulation model when the rake angle of the tool is 5° 图 1. 刀具前角为 5°时切削仿真模型

2.2. 工件与刀具的材料参数

本研究中工件材料为钛合金 Ti6Al4V,刀具材料为 YG6X 钨钢。在 ABAQUS 软件属性设置中创建两种材料并输入相应的物理、力学以及热力学参数,具体参数如表 1、表 2 所示。

Table 1. Physical, mechanical, and thermal parameters of Ti6Al4V materials **表 1.** Ti6Al4V 材料的物理、力学、热学参数

密度(kg/m ³)	杨氏模量 (GPa)	泊松比	非弹性热 系数	比热 (J/kg·℃)	热膨胀系数 (℃ ⁻¹)	热传导率 (W /℃)
4440	92~112	0.34~0.37	0.9	565~1060	9.4e-6~1.07e-5	6.7~15.4

 Table 2. Physical, mechanical, and thermal parameters of YG6X materials

 表 2. YG6X 材料的物理、力学、热学参数

密度(kg/m ³)	杨氏模量(GPa)	泊松比	非弹性热 系数	比热 (J/kg·℃)	热膨胀系数 (℃ ¹)	热传导率 (W/℃)
14,580	640	0.22	0.9	176	4.7e-6	79.6

材料本构模型选用 Johnson-Cook (JC)本构模型。JC 本构将影响流动应力的应变硬化效应、应变率效应与温度效应用连乘的形式联系在一起综合反映变形热力参数之间的数量关系,其表达式如式(1) [7]所示。

$$\overline{\sigma} = \left[A + B\overline{\varepsilon}^n\right] * \left[1 + C\ln\left(\frac{\overline{\varepsilon}}{\overline{\varepsilon}_0}\right)\right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)\right]$$
(1)

式中, σ 为等效应力,A为材料屈服强度,B为应变硬化参数,n为硬化指标, ε 为等效塑性应变,C为应变率强化参数,为等效塑性应变率, ε_0 为材料的参考应变率,m为热软化参数, T_m 为材料熔点, T_r 为参考温度。Ti6Al4V 材料的 JC 模型参数如表 3 所示。

Table 3. JC constitutive parameters of Ti6Al4V materials 表 3. Ti6Al4V 材料的 JC 本构参数

A (MPa)	B (MPa)	С	n	m	T_m (°C)	$T_r(^{\circ}C)$
1098	793	0.01	0.386	0.71	1560	20

在 Johnson-Cook 失效准则中,材料的失效应变为 ε_f , ε_f 的计算公式[8]为:

$$\varepsilon_f = \left(d_1 + d_2 \exp\left(d_3\sigma^*\right)\right) \left(1 + d_4 \ln\left(\dot{\varepsilon}^p/\dot{\varepsilon}_0\right)\right) * \left[1 - d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right]$$
(2)

式中,为材料参数, σ^* 为压应力与 Mises 应力的比值, $\dot{\varepsilon}^p$ 为失效时应变,具体数值如表 4 所示。

Table 4. JC failure criteria parameters for Ti6Al4V materials 表 4. Ti6Al4V 材料的 JC 失效准则参数

d1	d ₂	d ₃	d4	d5	$T_m(^{\circ}\mathbb{C})$	$T_r(^{\circ}C)$
-0.09	0.27	-0.48	0.014	3.87	1560	20

2.3. 正交试验设计

为了研究不同工艺参数对切削力以及切削温度的影响以及最佳切削工艺参数,本文设计了三因素三 水平正交试验 L₉(3³)。具体试验参数如表 5 所示。

表 5. Ti6Al4V 材	料切削仿真实验参	ѷ数	C	
水平/因素	刀具前角(°)	切削速度(m/s)	切削深度(mm)	
水平1	0	1.0	0.5	
水平2	5	2.0	1.0	
水平 3	15	3.0	1.5	

Table 5. Experimental parameters of Ti6Al4V material cutting simulation 킜

3. 仿真结果及分析

3.1. 仿真结果

图 2、图 3 分别为钛合金 Ti6Al4V 切削过程中等效应力以及切削温度的分布云图。由云图可知,在 切削过程中等效应力主要集中在第一变形区,切削温度主要集中在第二变形区。



Figure 2. Distribution diagram of equivalent stress during the cutting process of titanium alloy Ti6Al4V 图 2. 钛合金 Ti6Al4V 切削过程中等效应力的分布云图



Figure 3. Distribution diagram of cutting temperature during the cutting process of titanium alloy Ti6Al4V 图 3. 钛合金 Ti6Al4V 切削过程中切削温度的分布云图

图 4、图 5 分别为某一组试验切削仿真过程中水平方向与竖直方向上的切削力的变化。根据牛顿第 三定律可知,切削力与刀具参考点的作用力等大反向,故由道具参考点输出切削仿真切削运动方向切削 分力 RF₁, RF₂。RF₁为切削运动方向上的切削力, RF₂为垂直切削运动方向切削分力。由图 3 可知切削力 在切削过程中是振荡变化的。本文以整个过程的平均切削力作为结果进行分析,先由 ABAQUS 输出各时 间段切削力结果至 Excel 中,然后取平均值得到水平方向以及竖直方向上的平均切削力。表 6 为正交试 验表以及切削仿真结果。



Figure 4. Changes in horizontal cutting forces during the cutting process 图 4. 切削过程中水平方向切削力的变化

3.2. 极差分析

极差分析是通过计算均值以及均值的极差判断出各影响因素对指标的影响程度,并优选出最佳的因素参数组合。各因素对指标的影响程度大小由极差参数 R 表征。R 值越大,说明该因素对指标的影响越大。极差分析的结果如表 7~9 所示,分别对应的是切削运动方向上的切削力 RF₁、垂直切削运动方向切削分力 RF₂ 以及切削过程中最高温度 Max.Temp 三者的极差分析。由极差分析可知,刀具前角是垂直切

削运动方向切削分力 RF₂ 的主要因素,其次是切削深度,最后是切削速度;切削深度是切削运动方向上 的切削力 RF₁ 以及切削过程中最高温度 Max.Temp 的主要因素,刀具前角以及切削速度对切削分力 RF₁ 影响不大。



Figure 5. Changes in vertical cutting forces during the cutting process 图 5. 切削过程中竖直方向切削力的变化

Table 6. 116Al4V material cutting simulation test parameters and test results
表 6. Ti6Al4V 材料切削仿真试验参数及试验结果

	刀具前角 (°)	切削速度 (m/s)	切削深度 (mm)	RF ₁ (N)
试验1	0	1	0.5	893.75
试验 2	0	2	1	1650.88
试验3	0	3	1.5	2040.88
试验4	5	1	1	1498.52
试验 5	5	2	1.5	2056.95
试验 6	5	3	0.5	899.69
试验 7	10	1	1.5	2177.32

 Table 7. Analysis results of RF1 range of cutting components

 表 7. 切削分力 RF1 极差分析结果

	刀具前角	切削速度	切削深度	
K1	4585.50	4569.59	2665.30	K1
K2	4455.16	4579.69	4689.45	K2
K3	4589.24	4480.62	6275.14	K3
k1	1528.50	1523.20	888.43	k1
k2	1485.05	1526.56	1563.15	k2
k3	1529.75	1493.54	2091.71	k3
R	44.69	33.03	1203.28	R

	JJKI2400左刀4/1	51.7<			
	刀具前角	切削速度	切削深度		
K1	1042.14	557.64	467.73	K1	
K2	617.18	700.42	663.26	K2	
K3	261.30	662.55	789.62	K3	
k1	347.38	185.88	155.91	k1	
k2	205.73	233.47	221.09	k2	
k3	87.10	220.85	263.21	k3	
R	260.28	47.59	107.30	R	

 Table 8. Analysis results of RF2 range of cutting components

 表 8. 切削分力 RF2 极差分析结果

 Table 9. Max.Temp range analysis results of maximum temperature

 表 9. 最高温度 Max.Temp 极差分析结果

	刀具前角	切削速度	切削深度	
K1	2157.50	1919.10	1722.40	K1
K2	1964.10	2065.40	2091.90	K2
K3	2004.60	2141.70	2311.90	K3
k1	719.17	639.70	574.13	k1
k2	654.70	688.47	697.30	k2
k3	668.20	713.90	770.63	k3
R	64.47	74.20	196.50	R

3.3. 多指标评价分析

上述分析仅为单指标极差分析,只能得出单一指标下各工艺参数的影响程度。然而在实际加工中往往需要多指标综合考虑。如本课题中就有三个指标:切削分力 RF1、RF2 以及切削过程中最高温度 Max.Temp。不同的加工参数对不同的指标影响程度不同,所以我们需要一种多指标评价方法将多种指标 统合在一起进行分析,得出使得切削分析 RF1、RF2 以及最高温度 Max.Temp 最小的最优工艺参数。

排队评分法是综合考虑各项指标优劣,排序给出评分值,并把它作为单指标进行数据分析。这种方 法可先把每项指标的优秀值定为满分,对其它号试验所得的该指标值,视其与该优秀值的差异按比例打 分,然而对每号试验的所有指标的分数相加即得综合评分。综合评分最高的试验号,可能是最优方案。 [9]具体各指标换算评分如式(3)所示。

$$A_{i} = 10 - 9 * \frac{x_{i} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$
(3)

式中: x为某一指标所有结果值; x_i为第 i 组试验结果值; A_i为某一指标第 i 组试验换算后的评分值。以 切削分力 RF₁为例,第 8 组试验的 RF₁值在整个 RF₁值中最小,记为 10分;第 7 组试验的 RF₁值在整个 RF₁值中最大,记为 1分,其余几组试验换算评分根据上述公式依次可计算得出。同理可计算出另外两组 换算评分后相加后即可得出最终的综合评分。具体换算的评分如表 10 所示。

计心里	试验指标评分				
风迎马	\mathbf{RF}_1	RF ₂	Max.Temp	合评分	
1	9.85	5.76	10.00	15.61	
2	4.63	2.48	3.88	7.10	
3	1.94	1.00	1.00	2.94	
4	5.68	6.55	7.88	12.23	
5	1.83	5.42	4.13	7.25	
6	9.81	8.04	9.15	17.85	
7	1.00	9.21	4.74	10.21	
8	10.00	10.00	9.86	20.00	
9	5.39	9.82	5.25	15.21	

Table 10. Results of the queuing scoring method 表 10. 排队评分法结果

Table 11. Results of range analysis of queuing scoring method 表 11. 排队评分法极差分析结果

	刀具前角	切削速度	切削深度	
K1	25.65	38.05	53.45	K1
K2	37.33	34.36	34.54	K2
K3	45.42	36.00	20.41	K3
k1	8.55	12.68	17.82	k1
k2	12.44	11.45	11.51	k2
k3	15.14	12.00	6.80	k3
R	6.59	1.23	11.02	R

计算得出综合评分后,再次利用极差分析可知(见表 11),切削深度对切削力以及最高温度的影响最大,其次为刀具前角,最后使切削深度。并且观察均值 k1,k2,k3 可知,为使切削力以及最高温度最小,最佳工艺参数为:刀具前角 10°,切削速度 1 m/s,切削深度 0.5 mm。

4. 结果验证

将上述得出的最佳工艺参数并不在正交试验的范围内,所以需重新在 ABAQUS 中设置并运行,并同 理对切削力的数据取平均值处理。具体结果如表 12。

Table 1	12. Cutting simulation test results of optimal process parameters
表 12.	最佳工艺参数切削仿真试验结果

	刀具前角(°)	切削速度(m/s)	切削深度(mm)	RF ₁ (N)	RF ₂ (N)	Max.Temp (℃)
试验 13	10	1	0.5	860.44	80.37	554.6

对比正交试验结果可知,该工艺参数下切削仿真所得的切削分力以及切削过程中的最高温度确实是 最小的,验证了排队评分法结果的正确性。

5. 结论

本文运用 ABAQUS 有限元仿真软件模拟切削钛合金 Ti6Al4V 过程,设计了正交试验,本文进一步运用排队评分法将三个指标综合成一个指标,并通过极差分析得出:刀具前角是垂直切削运动方向切削分力 RF2 的主要因素,切削深度是切削运动方向上的切削力 RF1 以及切削过程中最高温度 Max.Temp 的主要因素,进而得出最佳工艺参数为:刀具前角 10°,切削速度 1 m/s,切削深度 0.5 mm。并重新在 ABAQUS 设置运行,得到的结果验证了排队评分法结果的正确性。

致 谢

首先,我要感谢我的同门,感谢对我的指导和支持。你的专业知识和丰富经验为我提供了指导,使 我能够顺利进行研究并取得了一定的成果。你的鼓励和建议让我在学术道路上更加坚定和自信。

其次,我要感谢实验室的同事们。感谢你们在实验数据采集和处理过程中的辛勤工作和合作。没有 你们的支持和积极参与,我无法完成这项研究。我们共同的努力和团队合作精神成就了这篇文章的顺利 发表。

最后,我要感谢我的家人和朋友们。感谢你们一直以来的理解、支持和鼓励。在我面临困难和挑战时,你们始终给予我坚定的支持和无私的爱。你们是我不断前行的力量和动力。

衷心地感谢每一位对我研究工作有所贡献和帮助的人。在未来的学术道路上,我将倍加珍惜这份支 持和帮助,继续努力学习和研究,为科学研究尽自己的一份力量。

再次向所有支持和帮助过我的人致以最诚挚的谢意!

衷心祝愿大家幸福健康,学术事业蒸蒸日上!

参考文献

- [1] 卢秉恒. 机械制造技术基础[M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 33-48.
- [2] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015(2): 280-292.
- [3] 吕杨,李晓岩. 航空航天用钛合金的切削加工现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(14): 55-57.
- [4] 齐德新, 马光峰, 张桂木. 钛合金切削加工性综述[J]. 煤矿机械, 2002(11): 3-4.
- [5] Khellouki, A., Rech, J. and Zahouani, H. (2006) The Effect of Abrasive Grain's Wear and Contact Conditions on Surface Texture in Belt Finishing. Wear, 263, 81-87. <u>https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.037</u>
- [6] 卢继, 张宇尘, 彭潇潇. 立方氮化硼(CBN)磨粒磨削 TC4 钛合金的仿真研究[J]. 河南科技, 2015(22): 26-27.
- [7] Pantalé, O., Bacaria, J.L., Dalverny, O., et al. (2004) 2D and 3D Numerical Models of Metal Cutting with Damage Effects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193, 4383-4399. https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.12.062
- [8] 岳彩旭, 刘献礼, 严复钢, 等. 不同刀口形式下锯齿形切屑形成过程的仿真及实验研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(4): 673-678.
- [9] 苑玉凤. 多指标正交试验分析[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005(4): 53-56.