切削参数对车削钛合金切削力影响的研究

战勇,金成哲,张莹莹
沈阳理工大学

摘要: 为研究切削参数对车削钛合金切削力的影响,建立了车削钛合金的仿真模型,选择不同的切削参数进行加工仿真,得到了多组不同的切削力。为验证所建立仿真模型的正确性及合理性,进行了正交车削加工试验,选择与加工仿真相同的切削参数,得到多组不同的切削力数据。将两者进行对比分析,验证所建立的仿真模型。基于此加工仿真模型,进一步采用单因素试验法进行车削加工仿真,得到车削加工钛合金时不同切削参数对切削力的影响规律。研究结果表明:对切削力的影响程度由大到小依次为刀具角度、进给量和切削速度;刀具角度和切削速度与切削力成反比,进给量则与之成正比。

关键词: 钛合金;车削;切削参数;切削力
中图分类号: TG506;TG146.23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.10.005

Study on the Influence of Cutting Parameters on Cutting Force in Turning Titanium Alloy

Zhan Yong, Jin Chengzhe, Zhang Yingying

Abstract: In order to study the influence of cutting parameters on the cutting force of turning titanium alloy, a simulation model of turning titanium alloy is established, and several groups of different cutting forces are obtained by selecting different cutting parameters for machining simulation. In order to verify the correctness and rationality of the simulation model, orthogonal turning experiments are carried out. The cutting parameters the same as those of the simulation, and several groups of different cutting forces are obtained. The two parameters are compared to verify the simulation model. Based on the machining simulation model, the turning simulation is carried out by single factor test method, and the influence rule of different cutting parameters on cutting force in turning titanium alloy is obtained. The results show that the degree of influence on cutting force from large to small is the tool angle, feed and cutting speed. The tool angle and cutting speed are inversely proportional to the cutting force, and the feed is directly proportional to it.

Keywords: Titanium alloy; turning; cutting parameters; cutting force

1 引言

钛合金以一系列突出优点被应用于许多行业,尤其是在军工领域,受到许多发达国家的关注并得到典型应用[1]。钛合金属于难加工材料[2],在钛合金切削加工过程中,切削力的大小直接影响刀具的磨损和使用寿命,间接影响零件的加工质量,同时,切削参数的选择又对切削力有着显著的影响[3]。因此研究切削参数对切削钛合金产生的切削力具有重要意义。

目前,许多学者对钛合金材料切削力方面的研究日益增多。贾兴民等[4]利用正交试验法对钛合金进行了铣削加工试验,分析切削力、切削振动等工艺参数的优化方法。蔡伟[5]对高速车削钛合金的力和热特性进行研究,利用有限元仿真软件对高速车削钛合金进行车削仿真和车削实验。李宝栋等[6]建立了 Ti6242 钛合金车削仿真模型,通过切削力的二次响应面回归到数学模型,并进行了试验验证。纪飞飞[7]为研究多孔钛合金切削加工效率及

收稿日期: 2021 年 4 月

[8]袁巨龙,韩文杰,杜东兴,等. 基于微切削模型的不锈钢研磨表面残余应力规律[J]. 表面技术,2021,50(1):422-431.
[9]李兴东,姜男,周新灵,等. 17-4PH 汽轮机叶片叶根磨削及铣削表面质量对比[J]. 工具技术,2018,52(1):30-33.
[10]吴书安,祝锡晶,王潞杰. 单磨粒磨削对表面残余应力影响的仿真分析[J]. 工具技术,2016,50(9):31-34.

第一作者:雷瑛,硕士,副教授,西安交通工程学院机械工程学院,710300 西安市
First Author: Lei Ying, Master, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong Engineering University, Xi'an 710300, China

稳定性,分别对不同粒径多孔钛合金进行铣削加工实验,对比分析不同切削参数下切削力及表面粗糙度的变化。宋绪浩[8]使用实验和有限元仿真手段,采用多工步切削和预应力切削对钛合金加工进行工艺调整,以控制钛合金加工表面质量,并通过建立钛合金多工步切削和预应力切削仿真模型,研究了多工步切削和预应力切削工艺调控影响切屑形态、切削力和加工表面层残余应力的具体规律。A. Sharma 等[9]在不同切削参数下对钛合金 Ti-6Al-4V 进行干切削,得出切削力和刀尖温度都随切削速度的增加而增加的结论。Kalipada Maity 等[10]采用 WM25CT 切削刀片对钛合金(Ti-6Al-4V)进行加工试验,分别采用不同的切削速度、进刀量和切削深度研究了对切削力、表面粗糙度、减屑系数和刀侧磨损的影响。

2 车削加工仿真

2.1 车削仿真模型及方案

本仿真试验采用 Johnson-Cook 本构方程来描述钛合金材料。Johnson-Cook 本构方程为

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

式中,A 为准静态条件下的屈服强度;B 为应变率硬化参数;ε_p 为等效塑性应变;n 为硬化指数;C 为应变率强化参数;$\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率;$\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率;T_0 为常温系数,通常取 20℃;T_{melt}为材料的熔点;m 为热软化参数[11]。钛合金 TC4 材料的本构模型参数如表 1 所示,损伤参数如表 2 所示。表中,A,B,c,m,n 为模型参数,d_i(i =1,2,3,4,5)为损伤参数。

表 1 TC4 的 Johnson-Cook 材料本构模型参数

材料	A(MPa)	B(MPa)	c	m	n	熔点(℃)	热膨胀系数(℃)
TC4	862	331	0.012	0.8	0.34	1680	9.1e-6

表 2 TC4 的 Johnson-Cook 材料损伤参数

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.09	0.25	-0.5	0.0014	3.87

工件选择 10mm×1mm 的 TC4 钛合金材料;硬质合金刀具后角为 7°,前角分别为 6°和 21°。两者的物理材料特性如表 3 所示。

表 3 刀具和工件的物理性能参数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比	密度(T/mm³)	比热容(mJ/(T·℃))	传热系数(W/(m·℃))
硬质合金	640000	0.22	14.5E-9	0.22E-9	75.4
TC4	113000	0.342	4.43E-9	0.546E-9	7.0

将工件和刀具的材料属性按上述数据进行设置,随后进行工件和材料的装配、分析步、载荷以及网格的划分。仿真采用正交试验,可以减少试验次数,是一种高效且经济的试验方法[12]。采用 3 个因素水平,刀具序号、车削速度 v 及进给量 f,设计的正交实验数据表(见表 4)。

表 4 车削加工仿真参数

序号	刀具角度 φ		切削速度 v(m/min)	进给量 f(mm/r)
	前角 γ(°)	后角 α(°)		
1	6	0	60	0.15
2			94	0.2
3			150	0.25
4	6	7	60	0.2
5			94	0.25
6			150	0.15
7	21	7	60	0.25
8			94	0.15
9			150	0.2

2.2 仿真结果及分析

根据表 4 的仿真数据进行车削仿真。选取切削速度 X 和进给量 Y 两个方向各自的平均值,再以这两个方向的切削合力 F_c 作为指标进行后续研究,按照加工序号的排列结果见表 5。

表 5 车削加工仿真切削力

序号	进给方向 F_y(N)	切削速度 F_x(N)	切削合力 F_c(N)
1	120.05	84.02	150.05
2	129.54	87.79	156.49
3	135.07	84.85	159.51
4	130.01	69.97	147.64
5	116.67	78.85	140.82
6	113.19	81.11	139.25
7	74.64	62.37	97.27
8	59.41	58.76	83.56
9	79.94	73.31	108.47

对车削加工仿真得到的切削合力进行整理计算,得到试验数据(见表 6)。由极差分析可知,刀具角度 φ、进给量 f 和切削速度 v 对切削合力 F_c 的影响程度为 $\varphi > f > v$。

表 6 车削加工仿真正交表试验数据

序号	刀具角度 φ		v(m/min)	f(mm/r)	F_c(N)
	前角(°)	后角(°)			
K_1	466.05		394.96	372.86	-
K_2	427.71		380.86	412.59	-
K_3	289.29		407.23	397.59	-
$\overline{K_1}$	155.35		131.65	124.29	-
$\overline{K_2}$	142.57		126.95	137.53	-
$\overline{K_3}$	96.43		135.74	132.53	-
极差	58.92		8.79	13.24	-
因素	主→次		$\varphi > f > v$		
本次试验的最优方案:$\gamma 3 v 2 f 1$					

3 车削加工试验

3.1 车削加工试验方案

为了检验上述有限元仿真模型的正确性及合理性,需要对车削仿真模型进行试验验证,通过比较实际的车削钛合金加工试验与仿真试验得到的两组切削力,来验证仿真模型的合理性和正确性。

车削加工试验选用的设备为普通车床 CA6140,所选工件是 TC4 钛合金圆棒料,工件直径 120mm,长度 200mm。试验刀具选择硬质合金涂层刀具,刀片选择硬质合金刀片,刀具后角为 7°和 0°,前角分别为 6°和 21°。加工试验参数见表 7。

试验加工时只采集了进给量 Y、切削速度 X 两个方向的切削力,并以这两个方向的切削合力 F_c 作为指标进行后续研究,分别选择 YDCB-Ⅲ05 和 YE5850A 型号的三向压电式测力仪和电荷放大器采集切削力。

表 7 车削加工试验参数

序号	刀具角度 φ		v(m/min)	f(mm/r)	a_p(mm)
	前角(°)	后角(°)			
1	6	0	6	0.15	0.2
2			94	0.2	0.2
3			150	0.25	0.2
4	6	7	60	0.2	0.2
5			94	0.25	0.2
6			150	0.15	0.2
7	21	7	60	0.25	0.2
8			94	0.15	0.2
9			150	0.2	0.2

采集切削力时,为了更加准确地得到切削力的数据,需要将三向压电式测力仪置于刀架下,刀架与三向压电式测力仪中间放置一个过渡支架,且需要保证其安装高度。刀架上刀具的刀尖应该与要加工工件的中心保持一致。为了保证测试精度,设计了新刀架,减轻过渡支架与新刀架的重量有助于提高三向压电式测力仪的数据收集的准确性。三向压电式测力仪的尾部与电荷放大器相连,电荷放大器与进行收集数据的电脑相连。图 1 为切削力采集过程,图 2 为车削加工现场。

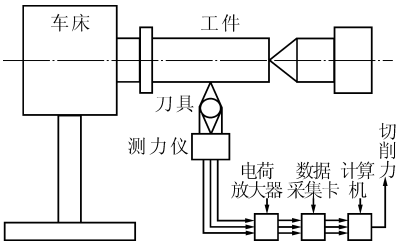

图 1 切削力采集过程

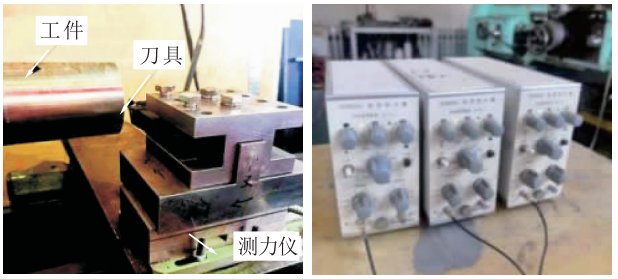

图 2 车削加工试验现场

3.2 加工试验结果及分析

通过上述过程以及试验方案,按照加工序号进行排列的试验结果见表 8。

表 8 车削加工试验切削力数据

序号	F_y(N)	F_x(N)	F_c(N)
1	114.38	85.08	142.55
2	125.82	85.93	152.36
3	133.46	84.05	160.44
4	126.38	74.29	146.60
5	115.87	68.45	134.58
6	108.91	79.31	134.73
7	76.04	58.34	95.84
8	51.16	55.02	75.13
9	78.53	63.91	101.25

对车削加工试验得到的切削合力进行整理计算,并进行极差分析后,所得数据见表 9。

表 9 车削加工试验正交表试验数据

序号	刀具角度 φ		v(m/min)	f(mm/r)	F_c(N)
	前角(°)	后角(°)			
K_1	455.36		384.99	352.41	–
K_2	415.90		362.07	400.21	–
K_3	272.22		396.42	390.86	–
$\overline{K_1}$	151.79		128.33	117.47	–
$\overline{K_2}$	138.63		120.69	133.40	–
$\overline{K_3}$	90.74		132.14	130.29	–
极差	61.05		11.45	15.93	–
因素	主→次		$\varphi > f > v$		
本次试验的最优方案:γ3v2f1					

由车削加工试验正交试验数据表可知,对切削合力 F_c 的影响程度为 $\varphi > f > v$。

4 切削参数对切削力的影响

通过表 6 和表 9 可以看出车削钛合金加工仿真和车削钛合金加工试验的正交试验结果基本一致,说明建立的车削仿真模型合理且正确,可以进行后续单因素试验加工仿真。当刀具前角 21°、后角 7°、切削速度 $v = 94$m/min 和进给量 $f = 0.15$mm/r 时,此组合为最佳方案。后续单因素仿真试验可以使用此参数进行加工仿真。

4.1 切削速度对切削力的影响

采用单因素仿真试验,选取不同的切削速度,对

测得的切削力数据进行统计分析。切削速度 v 分别为 60m/min，94m/min，150m/min，刀具前角选为 21°、后角 7°，进给量 $f=0.15$mm/r。切削速度变化时所得切削力见图 3。

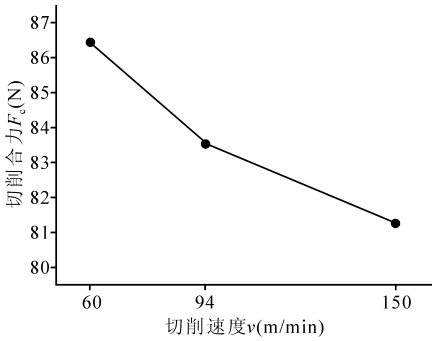

图 3　切削速度变化时的切削合力

图 3 为切削速度变化时对应的切削合力数据的折线图。可以明显地看出，随着切削速度的增大，切削合力反而减小，当切削速度 $v=60$m/min 时，切削合力增至最大值 86.46N；当切削速度 $v=150$m/min 时，切削合力减至最小值 81.24N。原因可能是在车削过程中，切削速度增大，切削阻力减小，摩擦系数减小，从而使得切削力逐渐减小。当切削速度变化很大时，切削合力的变化不是特别明显。

4.2　进给量对切削力的影响

采用单因素仿真试验，选用不同的进给量，对试验数据进行统计分析。进给量 f 分别选取 0.15mm/r，0.2mm/r 和 0.25mm/r，前角选为 21°，后角为 7°，切削速度 $v=94$m/min。进给量变化时所对应的切削力数据如图 4 所示。

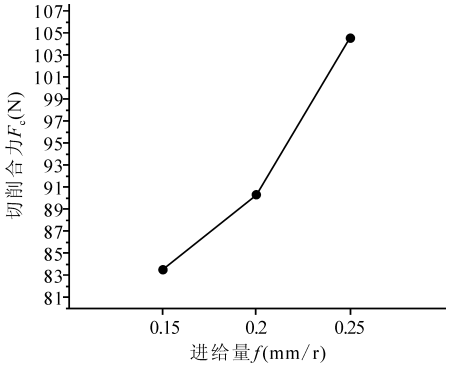

图 4　进给量变化时的切削合力

由图 4 可以看出，随着进给量的增大，切削合力也随之相应增大，当进给量 $f=0.15$mm/r 时，切削合力达到最小值 83.56N；当进给量 $f=0.25$mm/r 时，切削合力达到最大值 104.64N。其原因可能是在车削过程中，进给量不断增大，刀具与工件的接触厚度随之增大，切削阻力增大，摩擦力也变大，使得切削合力相应增大。同时，进给量的变化对切削合力的影响较大，将其与切削速度的变化对切削合力的影响进行对比，进给量的变化比切削速度的变化对切削合力的影响范围更大。

4.3　刀具前角对切削力的影响

采用单因素仿真试验，选用不同的刀具前角，对试验数据进行统计分析。刀具前角分别取 6°、11°、21°，其中切削速度为 94m/min，进给量为 0.15mm/r，刀具后角为 7°。刀具前角改变时对应的切削力数据见图 5。

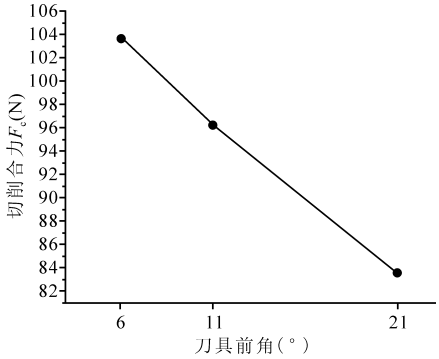

图 5　刀具前角变化时的切削合力

由图 5 可以看出，随着刀具前角的增大，切削合力反而减小。当前角为 6°时，切削合力达到最大值 103.74N；前角为 21°时，切削合力达到最小值 83.56N。原因可能是在车削过程中，前角逐渐增大，前面和切屑之间的摩擦力与切削阻力逐渐减小，切削力随之减小，切屑也更容易流出。由图可知，前角的变化对切削力的影响很大。

4.4　刀具后角对切削力的影响

采用单因素仿真试验，选用不同的刀具后角，对试验数据进行统计分析。刀具的后角分别取 0°，4°，7°，其中切削速度选择 94m/min，进给量为 0.15mm/r，刀具前角 21°。刀具后角改变时所对应的切削合力数据见图 6。

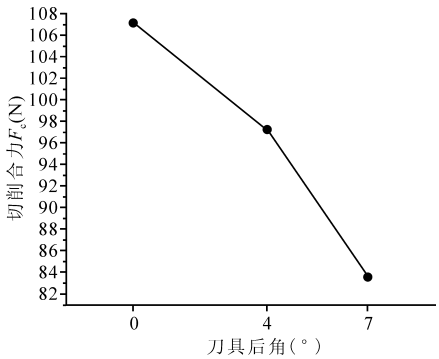

图 6　刀具后角变化时的切削合力

由图 6 可以很明显地看出，随着刀具后角增大，

切削合力反而减小。当后角为 0°时,切削合力达到最大值 107.15N;后角为 7°时,切削合力达到最小值 83.56N。由于在车削过程中后角逐渐增大,后刀面和已加工表面之间的摩擦力与切削阻力逐渐减小,导致切削力逐渐减小,提高了已加工表面的精度。刀具的前角和刀具的后角对切削合力的影响变化趋势相同,影响范围相近。

5 结语

(1)刀具角度对切削力的影响最大,且刀具角度与切削力成反比,刀具角度越大,切削力越小。进行车削钛合金加工时,可以通过增大前角和后角来达到减小切削力的目的。

(2)切削速度与切削力成反比,进给量与切削力成正比,且进给量对切削力的影响更大。进行车削钛合金加工时,可以通过增大切削速度和减小进给量来达到减小切削力的目的。

参考文献

[1]任庆华,张利军,薛祥义,等. 钛合金在轻量化地面武器装备中的应用[J]. 世界有色金属,2017(20):1-4.

[2]倪君辉,詹白勺,沈科灯. 高速铣削时钛合金刀具的磨损及对工件表面粗糙度的影响[J]. 工具技术,2017,51(4):110-112.

[3]刘竹帆. 低刚度零件数控加工误差离线预估[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.

[4]贾兴民,李剑峰,孙杰,等. 基于切削力与振动特性钛合金铣削工艺参数研究[J]. 机械设计与制造,2014(12):204-208.

[5]蔡伟. 大型螺纹旋风铣削工艺参数优化及刀具磨损在线监测研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.

[6]李宝栋,唐林虎,易湘斌,等. 基于 AdvantEdge FEM 的 Ti6242 钛合金切削力仿真与试验研究[J]. 制造业自动化,2019,41(4):125-127.

[7]纪飞飞. 多孔钛合金切削加工参数优化试验研究[J]. 机械工程师,2020(12):75-78.

[8]宋绪浩. 钛合金切削加工表面质量调控研究[D]. 济南:山东大学,2020.

[9]A Sharma,MD Sharma,R Sehgal. Experimental study of machining characteristics of titanium alloy (Ti-6A1-4V)[J]. Arabian Journal for Science & Engineering,2013,38(11):3201-3209.

[10]Kalipada Maity,Swastik Pradhan. Study of chip morphology,flank wear on different machinability conditions of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using response surface methodology approach[J]. International Journal of Materials Forming and Machining,2017,4(1):19-37.

[11]Johnson G R,Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains,strain rates,temperatures and pressures.[J]. Engineering Fracture Mechanics,1985,21(1):31-48.

[12]高东强,杨恺迪,丁鑫,等. GH4169 高温合金插铣加工的切削参数研究[J]. 现代制造技术与装备,2018(7):29-31.

第一作者:战勇,硕士研究生,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

First Author: Zhan Yong, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

通信作者:金成哲,博士,教授,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

Corresponding Author: Jin Chengzhe, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China