

引文格式: 王进, 曲凤盛, 胡光, 等. 基于力学分析的铍材车削切削力模型研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 108-113.

WANG Jin, QU Fengsheng, HU Guang, et al. Research on cutting force model of beryllium turning based on mechanical analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(10): 108-113.

基于力学分析的铍材车削切削力模型研究*

王进¹, 曲凤盛², 胡光¹, 孔宪俊¹

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136;

2. 中国工程物理研究院材料研究所, 绵阳 621900)

[摘要] 铍材作为一种典型难加工材料, 其加工方式主要为车削, 但铍材较硬较脆, 经常会出现局部断裂以及锐边崩边的缺陷; 切削力作为影响刀具磨损以及加工质量的重要因素, 预测车削铍材的切削力对选取切削参数具有十分重要的意义。本文基于力学分析的半经验预测公式建立了一种基于热力耦合的铍材车削切削力预测模型, 并进行了试验验证。结果发现, 模型预测值与试验值数值拟合良好, 整体误差为10.79%, 误差范围为2.96%~20.53%。研究分析了不同切削参数下刀具磨损以及表面粗糙度的变化机理, 为铍材车削加工提供一定的理论参考。

关键词: 铍材; 切削力模型; 切削仿真; 刀具磨损; 表面粗糙度

Research on Cutting Force Model of Beryllium Turning Based on Mechanical Analysis

WANG Jin¹, QU Fengsheng², HU Guang¹, KONG Xianjun¹

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Institute of Materials Research, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

[ABSTRACT] As a typical difficult-to-machine material, beryllium material is mainly processed by turning, but beryllium material is harder and more brittle, which often has local fractures and sharp edge chipping defects; Cutting force is an important factor that affects tool wear and processing quality, predicting the cutting force of turning beryllium materials is of great significance to the selection of cutting parameters. Based on the semi-empirical prediction formula of mechanical analysis, this paper establishes a thermal-mechanical coupling-based cutting force prediction model for beryllium turning, and conducted experimental verification. The result shows that the predicted value of the model fits well with the experimental value, and the overall error is 10.79%, the error range is 2.96%–20.53%. The change mechanism of tool wear and surface roughness under different cutting parameters is analyzed, which provides a certain theoretical reference for beryllium turning processing.

Keywords: Beryllium; Cutting force model; Cutting simulation; Tool wear; Surface roughness

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.10.108

铍因具有较高的弹性模量 (3.03×10^5 MPa)、高比热 ($1.8 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$)、高熔点 ($1289 \text{ }^\circ\text{C}$) 及低密度 ($1.848 \text{ g}/\text{cm}^3$) 广泛应用在航空航天工业中^[1]。铍的密度仅为镍基高温合金的 25%, 铝的 66%, 因此, 铍被用于制造航空仪表等精密仪器部件^[2]。铍为硬脆性材料, 因为单一密

排六方结构以及夹杂氧化物, 加工时容易产生微裂纹, 发生变形及崩碎现象, 成为典型的难加工材料^[3-5]。

由于铍材的加工限制性, 目前研究主要集中在铍材车削加工上。张鹏程等^[6]探究车削加工对于铍材组织与性能的损伤影响; 彭扬翔^[7]利用数控车床对铍青铜

* 基金项目: 国家科技部重点基础研究发展计划(2018YFB1107603); 航空科学基金(2019ZE054005); 沈阳市科技局计划项目(RC210439)。

薄壁管进行微切削加工机理研究; Sharma 等^[8]利用建模分析探究了车削铍材合金时刀具磨损机理;为了改善铍材的切削性能,苏晗^[9]利用激光加热辅助切削技术车削铍材,对其切削参数进行了优化。近些年来关于铍材的研究逐渐增多,但关于铍材的切削力预测方面研究还较少。目前切削力模型主要分为3类,包括基于切削试验的完全经验预测模型、基于力学分析的半经验预测模型和基于切削理论与材料属性的解析预测模型^[10]。Wang 等^[11]基于力学分析的半经验预测模型建立了高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料的切削力模型;魏效玲等^[12]通过回归分析建立了金刚石刀具切削 AISI52100 淬硬钢的完全经验预测模型;Yin 等^[13]基于切削理论与材料属性的解析预测模型建立了 SiC_p/Al 复合材料的动态切削力模型。目前关于切削力模型的研究已经比较成熟。

本文基于力学分析的半经验预测模型建立了车削铍材的切削力模型,通过二维车削仿真获得剪切角及摩擦角的数值代入模型获得主切削力预测值,与试验值对比发现,模型建立较为准确,并分析了车削铍材时不同切削参数下刀具磨损和表面粗糙度的变化机理,为铍材车削加工提供一定的理论参考。

1 车削铍材切削力模型计算及仿真

1.1 切削力模型计算

在直角自由切削中,作用在切屑上的力分别是前刀面对切屑的法向力 F_n 和摩擦力 F_f ,而剪切面对切屑的作用力为正压力 F_{ns} 和 F_s ,将所有的力画在刀尖前方,如图1所示^[14],其中 F 为 F_n 和 F_f 的合力,也称切屑形成力; γ_0 为刀具前角; ϕ 是剪切面与水平面的夹角,称为剪切角; β 是合力 F 与 F_n 的夹角,称为摩擦角;而合力 F 可分解成水平方向力 F_c (主切削力) 和 F_p (背吃刀力); V_c 为切削速度。

图2所示为车削切削层参数,其中, b_D 为切削层公称宽度; h_D 为切削层公称厚度; A_D 为切削层剖面积; κ_r

为刀具主偏角; κ'_r 为刀具副偏角,由此可得

$$A_D = h_D b_D \quad (1)$$

$$A_s = \frac{A_D}{\sin \phi} \quad (2)$$

由材料力学剪切应力公式变化得到

$$F_s = \tau A_s = \frac{\tau A_D}{\sin \phi}$$

$$F_s = F \cos(\phi + \beta - \gamma_0) \quad (3)$$

式中, τ 为剪切面上的切应力,与剪切力垂直,由刀具指向切屑。

将式(3)变换得出

$$F = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \gamma_0)} = \frac{\tau A_D}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (4)$$

由图1可知

$$F_c = F \cos(\beta - \gamma_0) = \frac{\tau A_D \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (5)$$

$$F_p = F \sin(\beta - \gamma_0) = \frac{\tau A_D \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (6)$$

根据 Lee and Shaffer 切削方程式^[15],合力 F 在主应力方向,剪应力 F_s 在最大剪应力方向,依据材料力学这两者之间的夹角应为 $\pi/4$, 故得

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \beta - \gamma_0 \quad (7)$$

若测得水平方向力 F_c 和 F_p , 而忽略后刀面上的作用力,可得

$$\frac{F_p}{F_c} = \tan(\beta - \gamma_0) \quad (8)$$

而摩擦角 β 可由式(8)变换求得,即

$$\beta = \arctan \frac{F_p}{F_c} + \gamma_0 \quad (9)$$

摩擦角 β 的大小与切削参数、刀具参数及力的大小都有关系,所以无法单独利用经验公式直接求解,所以采用切削仿真的形式,仿真切削参数与实际加工参数保持一致,利用仿真切削力值求出 β 大小,从而验证切削力模型建立的准确性。

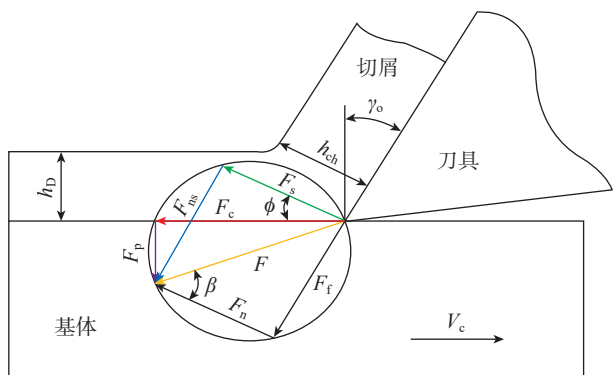


图1 直角切削时切削力模型^[14]
Fig.1 Cutting force model during right-angle cutting^[14]

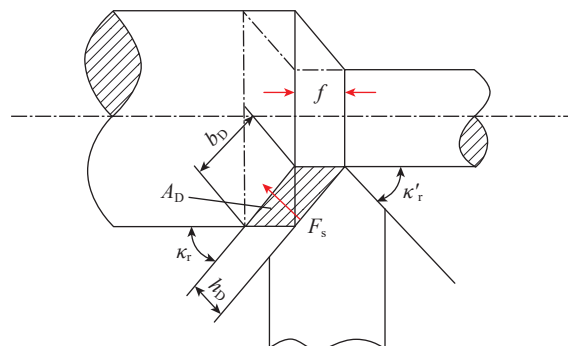


图2 车削切削层参数
Fig.2 Turning cutting layer parameters

1.2 切削力仿真

本文使用 ABAQUS 仿真软件对铍材切削过程进行仿真分析,建立了二维直角切削模型。如图 3 所示,切削运动方向平行于 X 轴,刀尖到模型表面的直线距离即为切削深度,对模型左面、右面、下面进行固定,设置边界条件为工件固定。同时,为了提高仿真速度,尽可能将模型最简化,设置切削几何模型大小为 1 mm×3 mm,切削深度为 0.2 mm/0.5 mm;因为网格划分与仿真精度密切相关,所以针对变形较大部分(即刀具模型与工件模型接触部分)进行部分细化,将工件设为整体,保证切削仿真精度。在金属切削仿真时会存在摩擦,摩擦会影响刀具的锋利程度,进而影响切削力。在金属切削仿真过程中主要考虑两个部分的摩擦:一是刀具前刀面与切屑之间的黏结摩擦 $t_{黏}$;二是刀具后刀面与已加工表面的滑动摩擦 $t_{滑}$,具体摩擦公式为

$$\begin{cases} t_{黏} = k_{chip} \\ t_{滑} = \mu\sigma_n \end{cases} \quad (10)$$

式中, k_{chip} 为刀具剪切作用下切屑的流动应力; μ 为滑动摩擦系数; σ_n 为后刀面与已加工表面间的法向应力。

切削分析采用热力耦合的方法。仿真过程采用正交切削方式,仿真参数如表 1 所示。

拟用 Johnson-Cook 材料模型,考虑铍材热物理性能和力学性能随温度的变化,本构模型方程为

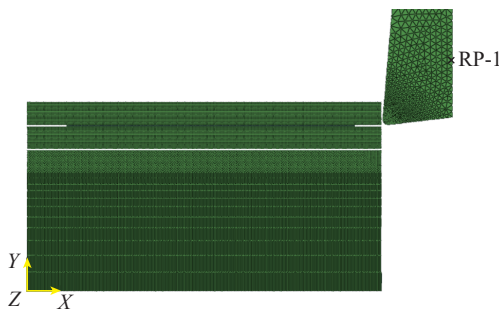


图 3 二维直角切削模型

Fig.3 Two-dimensional right-angle cutting model

表 1 铍材切削仿真参数

Table 1 Simulation parameters for beryllium cutting

仿真参数	取值
刀尖圆弧半径/mm	0.8
刀具前角/(°)	0
刀具后角/(°)	10
工件尺寸/mm	1×3
切削速度/(m·min ⁻¹)	25/50/100
进给量/(mm·r ⁻¹)	0.1/0.2
切削深度/mm	0.2/0.5

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (11)$$

式中, n 为材料的应变强化系数; A 为材料室温下的屈服应力; B 为材料的硬化模量; C 为材料的应变率强化系数; m 为材料的热软化系数; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,取值为准静态应变率 0.1 s; T_m 为材料熔点; T_r 为室温。铍材的 J-C 本构模型参数如表 2 所示^[16]。

2 试验准备及方案

本次试验加工现场如图 4 所示。加工设备选择沈阳机床生产的数控车床(CAK4085nj);刀具选用伊斯卡生产的硬质合金刀具(VCMT160408);试验材料选用铍材棒料,直径 20 mm、长 100 mm。在整个试验进行过程中,使用 FLIR T630sc 热像仪记录实时切削温度,使用 Kister 5017A 测力仪记录三向切削力。整个试验共 12 组切削参数,如表 3 所示。

3 试验结果及分析

3.1 切削力模型验证

3.1.1 主切削力 F_c 模型验证

通过铍材二维切削仿真获得主切削力 F_c 和背吃刀力 F_p 大小,利用式(9)求出同一刀具下不同切削参数的摩擦角 β 大小,利用式(7)求出剪切角 ϕ ,最后将仿真获得 β 值与 ϕ 值代入式(5)和(6),将得出的预测主切削力 F_c 和背吃刀力 F_p 的数值与试验获得切削力进行对比,结果如表 4 和 5 所示。

表 2 铍材 J-C 本构模型参数

Table 2 J-C constitutive model parameters of beryllium

A/MPa	B/MPa	C	n	m	T_r /K	T_m /K
420	280	0.01	0.58	1.0	293	1556

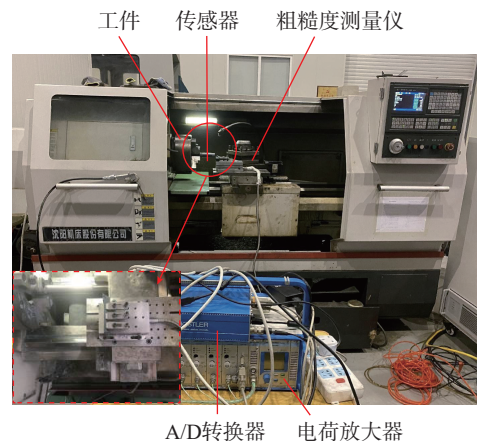


图 4 试验加工现场

Fig.4 Test processing site

通过表4可以看出,主切削力模型预测值与切削获得试验值整体非常吻合,最大误差为20.53%,最小误差为2.96%,整体平均误差为10.79%,说明建立的铍材切削力模型能够较为准确地预测铍材切削时主切削力 F_c 的数值。

3.1.2 背吃刀力 F_p 模型验证

结合表5可以看出,背吃刀力 F_p 模型预测值与试验值相差较大,误差范围为46.52%~87.5%,平均误差为

表3 试验所用切削参数

Table 3 Cutting parameters used in the test

试验序号	切削速度/ ($m \cdot min^{-1}$)	进给量/ ($mm \cdot r^{-1}$)	切削深度/ mm
1	25	0.1	0.2
2	25	0.2	0.2
3	25	0.1	0.5
4	25	0.2	0.5
5	50	0.1	0.2
6	50	0.2	0.2
7	50	0.1	0.5
8	50	0.2	0.5
9	100	0.1	0.2
10	100	0.2	0.2
11	100	0.1	0.5
12	100	0.2	0.5

表4 主切削力 F_c 模型预测值与试验值对比

Table 4 Comparison of the model predicted value and the test values of the main cutting force F_c

试验序号	$\beta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$	试验值/N	模型预测值/N	误差/%
1	10.1	34.9	62	73.0	17.7
2	16.0	29.0	90	84.1	6.56
3	36.4	8.6	200	228.37	14.19
4	37.9	7.1	250	270.85	8.34
5	23.4	21.6	109	105.77	2.96
6	36.7	8.3	208	235.64	13.29
7	31.8	13.2	150	157.91	5.27
8	37.5	7.5	240	257.87	7.45
9	5.2	39.8	76	66.01	13.03
10	29.0	16.0	123	135.0	9.76
11	22.3	22.7	128	101.72	20.53
12	39.1	5.9	290	320.30	10.45

61.95%,说明背吃刀力 F_p 模型的建立不够准确,不能适用于背吃刀力 F_p 的预测。

3.2 刀具磨损分析

试验完成后,使用VHX-2000C超大景深光学显微镜观察加工后的刀具磨损情况并进行测定,刀具磨损形貌如图5所示。图6为不同切削参数下刀具前刀面磨损VB值变化情况,随着切削速度 V_c 从25 m/min增加到100 m/min,刀具磨损呈下降趋势;随着进给量 f 从0.1 mm/r增加到0.2 mm/r,切削深度 a_p 从0.2 mm增加到0.5 mm,刀具磨损呈上升趋势。这是因为随着转速的增加,切屑黏结在刀具前刀面的现象减轻(图7),使刀具散热情况得到改善,刀具局部受力情况会更加均匀,所以高转速下会得到较好的表面加工质量。并且,当切削速度

表5 背吃刀力 F_p 模型预测值与试验值对比

Table 5 Comparison of model predicted values and experimental values of the back-to-knife force F_p

试验序号	$\beta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$	试验值/N	预测值/N	误差/%
1	10.1	34.9	24	9.07	55.30
2	16.0	29.0	25	13.37	46.52
3	36.4	8.6	52	25.46	51.04
4	37.9	7.1	66	26.26	60.21
5	23.4	21.6	47	18.12	68.76
6	36.7	8.3	60	25.62	57.3
7	31.8	13.2	58	22.96	60.41
8	37.5	7.5	70	26.05	62.78
9	5.2	39.8	40	5.00	87.5
10	29.0	16.0	52.5	21.39	59.82
11	22.3	22.7	55	17.45	68.27
12	39.1	5.9	78	26.90	65.5

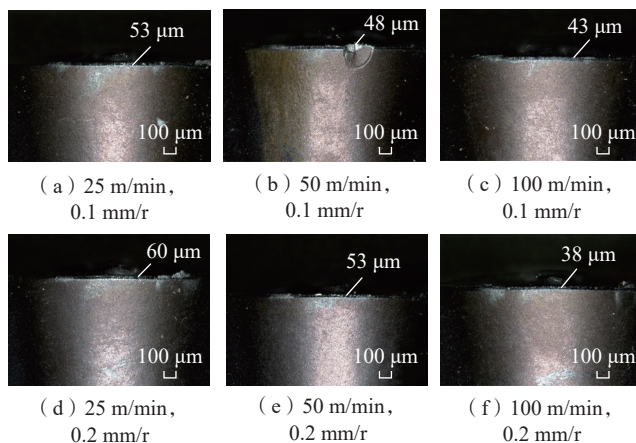


图5 不同切削参数下刀具磨损形貌

Fig.5 Tool wear morphology under different cutting parameters

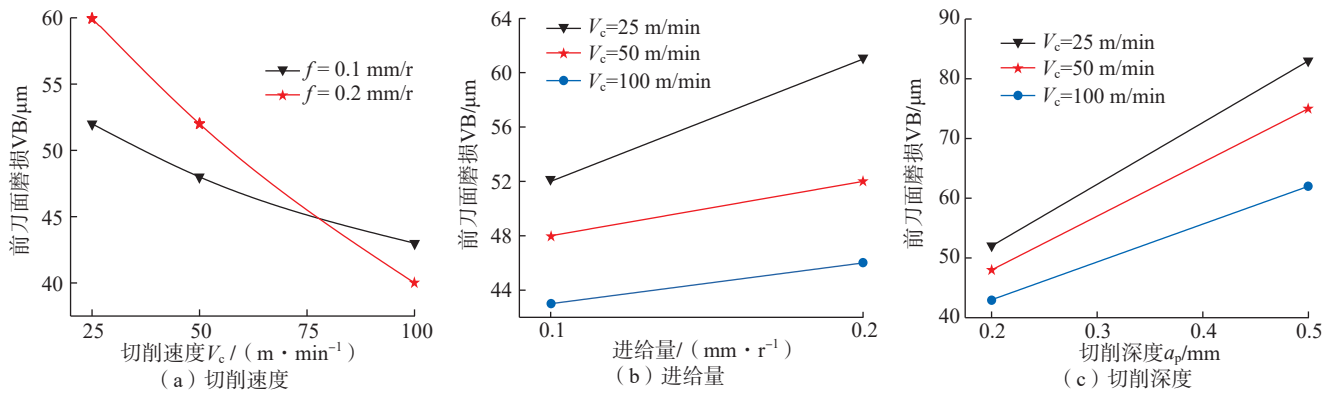


图 6 不同切削参数下刀具前刀面磨损 VB 值变化

Fig.6 Changes of VB value of tool rake face wear under different cutting parameters

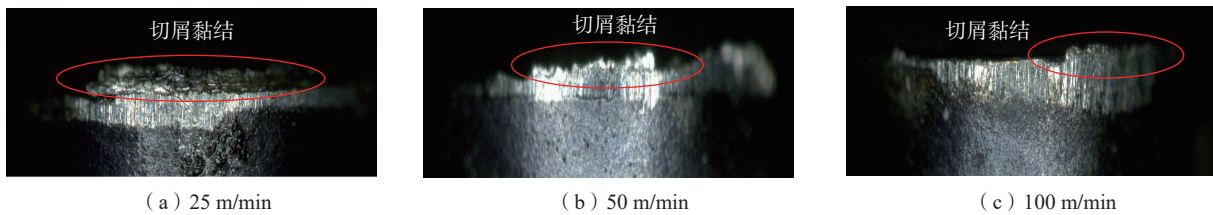


图 7 不同切削速度下刀具前刀面切屑黏结情况

Fig.7 Chip adhesion on the rake face of the tool at different cutting speeds

小于 75 m/min 时,较小的进给量会得到较小的刀具磨损;当切削速度大于 75 m/min 时,较小的进给量会得到较大的刀具磨损;当在较小的转速和进给量下,切削加工符合正常的切削经验,进给量的增大会导致切削温度的升高,从而导致刀具磨损增大。但本次试验铍材棒料较细,当速度超过 75 m/min 时,转速较快,接近 2000 r/min,在这种高速切削情况下,较大的进给量会使单位时间内摩擦现象减少,剪切角增大,从而降低切削力及切削温度,降低刀具磨损;当进给量和切削深度增加时,工件剪切变形产生微裂纹的速率加快,使得切削区域的温度显著上升,而刀具由于较大的切深传导到刀具上的大量切削热无法扩散,使得刀具磨损加重,切削模式逐渐向脆性加工转变。

3.3 表面粗糙度分析

试验加工完成后,使用 TR240 便携粗糙度仪对加工表面进行测定,测量方式如图 8 所示,12 组试验获得表面粗糙度 R_a 结果如图 9 所示。由此可见,相较 0.2 mm/r 的进给速度,0.1 mm/r 的进给速度具有更小的表面粗糙度;0.5 mm 的切深比 0.2 mm 的切深表面粗糙度更大。这是因为在低转速的情况下,铍材硬度较高且断裂韧性较低,较低的去速速度下切屑会黏结在刀具前刀面上极易形成积屑瘤,造成刀具磨损,易在加工表面产生鳞刺,增大表面粗糙度;在高进给和高切深的情况下,刀具单位时间内切削工件的体积变大,切削力升高幅度显著,大量切削热会传导到刀具上,造成刀具磨损加重,



图 8 TR240 便携粗糙度仪测量表面粗糙度

Fig.8 Measuring surface roughness with TR240 portable roughness meter

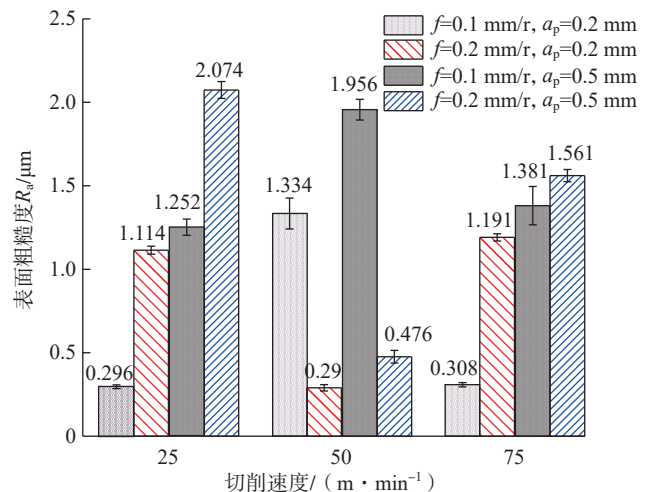


图 9 常规车削表面粗糙度

Fig.9 Surface roughness of conventional turning

影响其加工表面质量。

4 结论

利用 ABAQUS 仿真软件进行铍材切削仿真,计算出剪切角 ϕ 、摩擦角 β 的主切削力 F_c 和背吃刀力 F_p 的数值,结合主切削力 F_c 、背吃刀力 F_p 、剪切角 ϕ 及摩擦角 β 的计算公式,本文提出一种铍材切削力预测模型,与试验数据对比,验证了模型准确性,并对刀具磨损以及表面粗糙度进行分析,结论如下。

(1) 基于力学分析模型建立了铍材切削力预测模型,通过主切削力 F_c 的预测值与试验值对比,结果发现,预测值与试验值拟合程度良好,整体误差为 10.79%,误差范围在 2.96%~20.53% 之间;背吃刀力 F_p 模型误差较大,误差范围为 46.52%~87.5%,平均误差为 61.95%。此切削力模型能够准确预测主切削力 F_c 数值,但并不适用于背吃刀力 F_p 数值预测。

(2) 切削速度 V_c 从 25 m/min 增加到 100 m/min 时,刀具前刀面切屑黏结现象减轻,散热较好,刀具磨损减少;进给量 f 从 0.1 mm/r 增加到 0.2 mm/r,切削深度 a_p 从 0.2 mm 增加到 0.5 mm 时,工件剪切变形产生微裂纹的速率加快,切削温度升高,刀具磨损加重。

(3) 切削速度 V_c 从 25 m/min 增加到 75 m/min 时,较低的去屑速度下易产生积屑瘤和鳞刺,表面粗糙度较大;进给量 f 从 0.1 mm/r 增加到 0.2 mm/r,切削深度 a_p 从 0.2 mm 增加到 0.5 mm 时,刀具单位时间内切削工件的体积变大,切削力和切削温度显著提升,增加了表面粗糙度。

参考文献

- [1] MARDER J M. Beryllium: Alloying, thermomechanical processing, properties and applications[M]//Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1-6.
- [2] 陈晓磊,王锐,邱增帅,等.铍材薄壁回转零件加工刀具磨损研究[J].工具技术,2020,54(7):20-23.
- [3] CHEN Xiaolei, WANG Rui, QIU Zengshuai, et al. Tool wear study of machining thin-wall helicoid beryllium workpiece[J]. Tool Engineering, 2020, 54(7): 20-23.
- [4] 吴优,熊雪峰,潘文杰.铍材料塑性域加工可行性研究[J].制造技术与机床,2019(12):105-108.
- [5] WU You, XIONG Xuefeng, PAN Wenjie. The feasible study of ductile machining for beryllium[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(12): 105-108.
- [6] 郑广花,蒋放.铍材应用及其切削工艺[J].北华航天工业学院学报,2016,26(6):5-8.
- [7] ZHENG Guanghua, JIANG Fang. Application and cutting processing of beryllium[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2016, 26(6): 5-8.
- [8] 黎开兵,景林,高天龙,等.精密铍零件大深径比螺纹孔的铣削加工[J].工具技术,2021,55(6):76-78.
- [9] LI Kaibing, JING Lin, GAO Tianlong, et al. Milling threaded hole with large depth-diameter ratio on precise beryllium part[J]. Tool Engineering, 2021, 55(6): 76-78.
- [10] 张鹏程,田黎明.车削加工对铍组织与性能的损伤[J].稀有金属,2001,25(2):90-93.
- [11] ZHANG Pengcheng, TIAN Liming. Effects of lathe on microstructure and mechanical properties of beryllium[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2001, 25(2): 90-93.
- [12] 彭扬翔.铍青铜薄壁管件微细切削加工机理研究[D].济南:山东大学,2019.
- [13] PENG Yangxiang. Mechanism of micro-cutting for QBe2 thin-wall pipe[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [14] SHARMA A, JOSHI S S, DATTA D, et al. Modeling and analysis of tool wear mechanisms in diamond turning of copper beryllium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 439-450.
- [15] 苏晗.激光辅助车削铍材的参数优选研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [16] SU Han. Study on parameter optimization of laser assisted turning beryllium materials[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [17] 丁志超,闫舒洋,孙玉文.精密车削过程的切削力建模研究[J].机械工程师,2020(11):13-16,19.
- [18] DING Zhichao, YAN Shuyang, SUN Yuwen. Research on cutting force modeling of precision turning process[J]. Mechanical Engineer, 2020(11): 13-16, 19.
- [19] WANG J F, ZUO J F, SHANG Z, et al. Modeling of cutting force prediction in machining high-volume SiC_p/Al composites[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 70: 1-17.
- [20] 魏效玲,侯自敬.车削加工过程中切削力的试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2017,34(3):97-100.
- [21] WEI Xiaoling, HOU Zijing. Experimental study on cutting force in turning process[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2017, 34(3): 97-100.
- [22] YIN W D, DUAN C Z, LI Y J, et al. Dynamic cutting force model for cutting SiC_p/Al composites considering particle characteristics stochastic models[J]. Ceramics International, 2021, 47(24): 35234-35247.
- [23] TOUBHANS B, FROMENTIN G, VIPREY F, et al. Machinability of Inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116809.
- [24] 武文革.金属切削原理及刀具[M].第2版.北京:电子工业出版社,2017.
- [25] WU Wenge. Metal cutting principles and tools[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [26] 毕珊珊.铍材材料本构关系研究及切削加工有限元分析[D].廊坊:北华航天工业学院,2019.
- [27] BI Shanshan. Study on constitutive relation of beryllium material and finite element analysis of cutting process[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2019.

通讯作者:孔宪俊,副教授,博士,研究方向为激光复合机械多能场耦合加工技术。

(责编 阳光)