

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.014

304 不锈钢钻削性能仿真与实验研究

李艳¹, 王琰^{1,2}, 高峰¹

(1. 西安理工大学 陕西省机械装备制造重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 航空工业西安航空制动科技有限公司, 陕西 西安 713106)

摘要: 奥氏体不锈钢是一种难加工材料,为探求不同工况参数下高速钢钻头钻削奥氏体不锈钢的加工性能,在 ABAQUS 环境下建立了奥氏体 304 不锈钢的钻削加工有限元仿真模型,揭示了钻削力、扭矩及温度等受加工参数的影响规律。结果表明,相同转速下,进给量增大会引起钻削力及扭矩大幅增加且波动严重,切削刃处的温度快速上升,切屑由带状切屑变为单元切屑。当进给量相同时随着转速的增加,会导致钻削力增加,但扭矩增幅较小。通过不锈钢钻削加工实验,验证了有限元仿真模型的正确性,为后期钻削加工奥氏体不锈钢进行加工参数优化提供了有效依据。

关键词: 304 不锈钢; 有限元仿真; 钻削加工; 切屑形态

中图分类号: TG52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)04-0538-06

Simulation of and experimental study on drilling performance of 304 stainless steel

LI Yan¹, WANG Yan^{1,2}, GAO Feng¹

(1. Key Lab of Manufacturing Equipment of Shaanxi Province, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. AVIC Xi'an Aviation Brake Science and Technology Co., Ltd., Xi'an 713106, China)

Abstract: Austenitic stainless steel is a kind of difficult-cutting material, and in order to investigate its drilling performance using high-speed steel drill bit with different operating condition parameters, a finite element simulation model of drilling austenitic 304 stainless steel is established in the ABAQUS environment to discover the effecting rules of various machining parameters for drilling force, torque and temperature. The simulated results show that at the same speed, the enhancement of the feed rate could cause the drilling force and torque to increase greatly, with the cutting chatter becoming serious and the temperature at the cutting edge rising rapidly; the chip is changed from strip-shaped chip to unit chip. When the feed rate is constant, as the rotational speed goes up, the drilling force increases, but the amplitude of torque rises rather small. The finite element simulation model is validated by the stainless steel drilling experiment, providing a new reference for the machining parameters optimization of austenitic stainless steel.

Key words: 304 stainless steel; finite element simulation; drilling processing; chip formation

304 奥氏体不锈钢因具有良好的耐蚀性、耐热性、低温强度及综合机械性能,广泛应用于食品、化工、原子能工业及国防工业等领域^[1-3]。304 不锈钢是典型的难加工材料^[4]。由于奥氏体组织稳定性较差,加工中一部分奥氏体会转变为马氏体^[5-6],奥氏体中的杂质会分解,形成硬化层,加工硬化现象严重,切削力大^[7];钻削加工中由于加工条件限制及较大的切削力,使得切削刃处的温度较高,奥氏体导热性差,过热使刀具快速失效^[8];奥氏体不锈钢在高温

下仍然有较高的强度,刀具与工件材料之间容易出现粘结现象,出现积屑瘤^[9]。

利用有限元仿真技术可以获得最优切削工艺参数参考值,降低实验成本,同时可以观测到在实验中无法获得的内部物理现象并进行试错分析^[10-11]。Usui 等^[12]把低碳钢材料加工中的流动应力用考虑温度、应变和应变率的数学关系式表达,模拟了切削过程中出现的积屑瘤现象。Strenkowski 等^[13]提出一种利用 Euler 方程计算稳态金属切削的有限元模

收稿日期: 2018-11-29; 网络出版日期: 2020-07-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200713.1139.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775432)

第一作者: 李艳,女,博士,副教授,硕导,研究方向为数控机床设计与性能分析。E-mail: glatiagf@163.com

型,能够较好的获取切削加工过程中材料的温度分布和切屑形状。Jomaa 等^[14]基于 Lagrange 数值模拟法利用有限元分析软件 ABAQUS 建立二维有限元模型模拟分析 7075 铝合金在高速加工期间锯齿状的切屑形成过程。Ducobu 等^[15]提出了一种将 Euler 法和 Lagrange 法结合的方法,通过两个分析软件建立了四种不同的模型,将不同模型的仿真结果与实验进行对比分析,Euler-Lagrange 法得出的仿真结果与试验结果误差较小,精度更高。国内学者也积极推动着切削加工仿真的发展,孙会来等^[16]基于 ABAQUS 软件建立了二维正交切削仿真模型,对 7075 铝合金切削过程当中切削力、切削热和应力场进行了研究,仿真结果与实验结果吻合较好。赵云峰等^[17]基于 AdvantEdge 研究了 2024 铝合金在切削过程当中切削力和切削热的变化规律,通过切削加工验证有限元模型的准确性。刘东等^[18]利用正交切削试验和有限元仿真改进了钛合金 Ti6Al4V 在高温、大应变及高应变率下的 Johnson-Cook 流动应力模型,提高了有限元仿真的精度。有限元法是模拟金属切削加工的一种有效方法,能观测到材料去除过程中发生的物理现象,对切削加工参数优化有重要意义^[19]。

研究奥氏体不锈钢的加工机理,对提高其加工效率,延长刀具寿命有重要意义。本文基于 ABAQUS 对 304 奥氏体不锈钢进行钻削加工仿真,分析加工参数对切削过程的影响,通过实验验证仿真模型的正确性。基于有限元法的加工仿真结果可以用于指导加工不锈钢材料最优切削参数的选取。

1 奥氏体不锈钢钻削加工仿真

1.1 几何模型

麻花钻刀具的几何参数见表 1,建立刀具的三维实体模型见图 1(b)。表 2 为切削仿真加工参数。

表 1 刀具的几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of the tool

参数	值
刀具直径/mm	6
横刃/mm	1.6
螺旋角/°	30
顶角/°	120



图 1 麻花钻三维建模

Fig.1 Three-dimensional modeling of twist drill

表 2 切削加工参数

Tab.2 Cutting parameters

序号	转速 $s / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$
1	400	0.14
2	400	0.28
3	600	0.14

钻削加工中材料的应力应变集中在加工区域周围,较远处的应力和应变趋近于零^[20]。因此在建立材料的几何实体模型时只取钻削加工部分及其周围的工件材料。奥氏体不锈钢工件为圆柱体,工件尺寸为:直径 12 mm,厚度 3 mm。

工件在切削加工过程中,材料在高应变、高应变率和高热的状态下发生瞬时急剧的弹塑性变形,是典型的非线性过程。Johnson-Cook 本构模型考虑了应变、应变率、温度等对材料塑性硬化的影响^[21],本文采用 Johnson-Cook 本构模型来表征工件的材料,其具体形式为如下:

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

式中: A 为准静态条件下的屈服强度; B 为应变硬化参数; ϵ_p 为等效塑性应变; n 为硬化指数; C 为应变率强化参数; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为材料参考应变率; T_r 为常温系数; T_m 为材料熔点; m 为热软化参数。

奥氏体不锈钢及刀具的材料参数分别见表 3 和表 4。

表 3 奥氏体不锈钢的材料参数

Tab.3 Material parameters of austenitic stainless steel

参数	取值	参数	取值
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800	A/MPa	253.32
弹性模量/GPa	200	B/MPa	685.1
泊松比	0.3	C	0.097
导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	16.3	n	0.312 8
比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	503	m	1.000

表 4 刀具的材料参数

Tab.4 Tool material parameters

密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	Possion 比
8 120	223	0.28

对工件进行网格划分,将刀尖处及工件材料待去除区域进行局部网格细化,选择 C3D8RT 单元共划分网格 1 051 952 个,工件的圆柱表面进行全约束。设置刀具与工件材料的通用接触以及工件的自

接触。采用分离准则中的物理分离准则,通过网格自适应划分将节点分离。仿真时刀具做旋转运动同时沿 Z 轴负方向做进给运动,钻削加工的有限元模型见图 2。

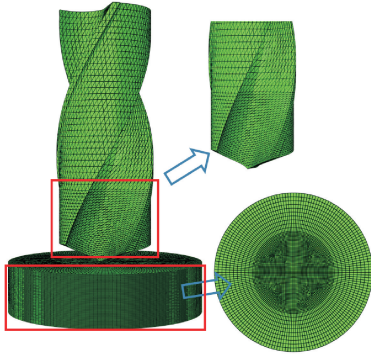


图 2 钻削加工仿真有限元模型

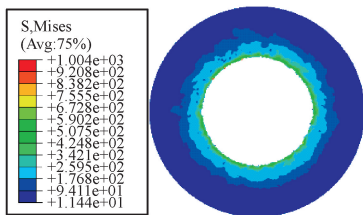
Fig. 2 Drilling machining simulation finite element model

1.2 仿真结果分析

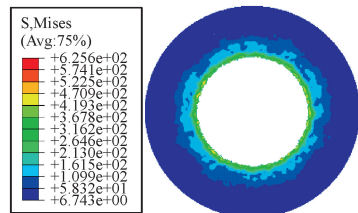
1.2.1 残余应力分析

残余应力对工件的使用寿命有重要影响,一定程度上的残余应力可以对工件起到强化作用,但是过大的残余应力会导致工件变形。切削加工中的残余应力主要是由机械载荷引起的残余压应力以及由热载荷引起的残余拉应力,残余压应力可以减少微裂纹在应力作用下的扩展延伸,提高工件的寿命。

图 3 为第 1 组及第 2 组参数钻削加工后应力分布云图,对于图 3(a)由于进给量较小,加工时切削刃处的温度较低,机械载荷起主导作用,会产生残余压应力,而图 3(b)进给量增大,切削刃处温度较高,热载荷影响机制占主导地位,此时的残余压应力明显减小。



(a) 第1组仿真的残余应力云图



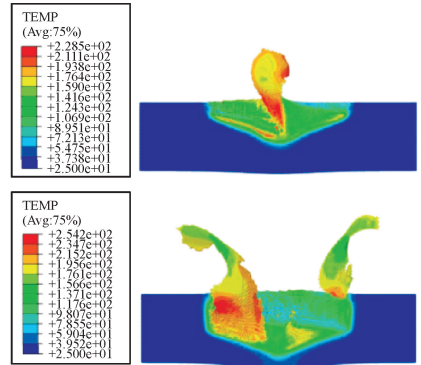
(b) 第2组仿真的残余应力云图

图 3 不同参数下的钻削残余应力分布

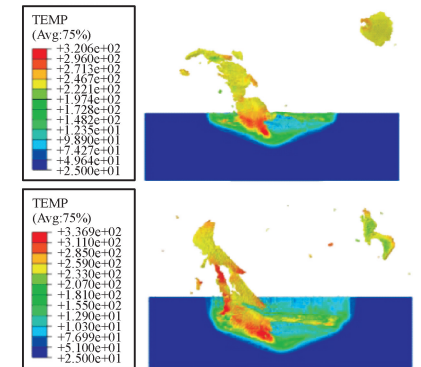
Fig. 3 Distribution of drilling residual stress at different parameters

1.2.2 温度分析

切削温度是影响钻削加工时尺寸精度、表面质量及刀具寿命的重要因素。图 4 是在相同转速下不同进给量时的温度场分布云图,图 4(a)和(b)分别是第 1、2 组参数仿真时的温度云图。从图 4 中可以看出,钻削加工时的最高温度出现在刀具前刀面与切屑接触的地方,这是因为切削层在刀具前发生剪切滑移后,随着刀具的进给,切削层变成切屑,切屑在此处与刀具前刀面摩擦最严重,所以温度也最高。图 4(a)中最高温度在 250℃ 附近波动,当进给量增加到 0.28 mm/r 时,此时温度会急剧升高,最高温度达到 320℃。



(a) 第1组仿真的温度云图



(b) 第2组仿真的温度云图

图 4 不同加工参数下的温度云图

Fig. 4 Temperature clouds at different processing parameters

2 钻削加工实验

2.1 实验装置

在五轴数控铣床上进行 304 奥氏体不锈钢钻削实验,工件固定在三向力传感器上,力传感器安装在机床工作台上,刀具做旋转及进给运动。数据采集卡实时存储传感器输出的信号,钻削加工实验现场见图 5,刀具材料为高速钢,刀具直径为 6 mm,通过设置不同的进给量及转速来对比分析仿真与实验的结果。

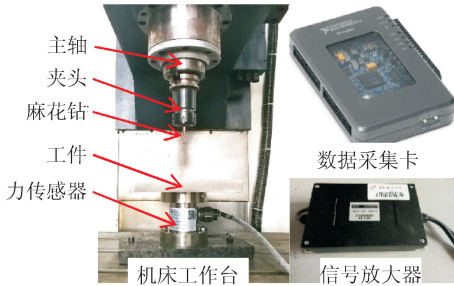


图5 钻削加工现场图

Fig. 5 Drilling processing scene

2.2 实验结果分析

2.2.1 钻削力及扭矩分析

利用三向力传感器测量到实验过程中稳定钻削加工时的轴向钻削力及扭矩,图6、图7和图8分别是第1、2、3组加工参数下仿真输出及实验测量到的钻削力和扭矩曲线,黑色曲线为仿真输出曲线,红色曲线为实验测量曲线。随着刀具与工件接触后钻削力急剧增大,刀具逐渐切入工件后,钻削力逐渐上升,当主切削刃完全参与钻削时,钻削力趋于稳定。

对比可知,在相同转速下,进给量小时钻削力的曲线波动较小,说明钻削过程较为平稳,当增加进给量时,钻削力明显增加且曲线波动幅度增大,说明此时的钻削过程不平稳。扭矩曲线也出现了较大的波动,由于进给量过大,局部材料的剪切应力超过材料断裂强度极限而发生断裂,使得钻削力和扭矩出现不连续的变化,引起钻削力和扭矩的波动。进给量相同时,转速的上升造成了钻削力迅速增大。

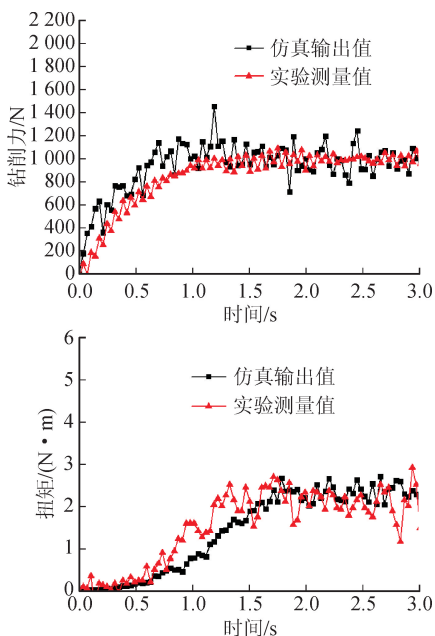


图6 第1组实验测量的钻削力及扭矩

Fig. 6 Drilling force and torque measured by the first group of experiments

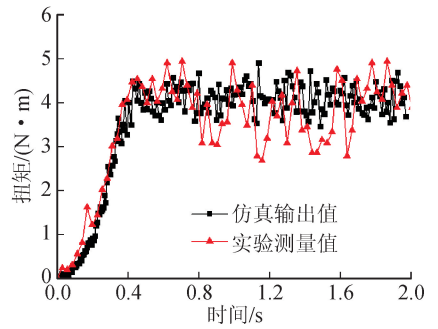
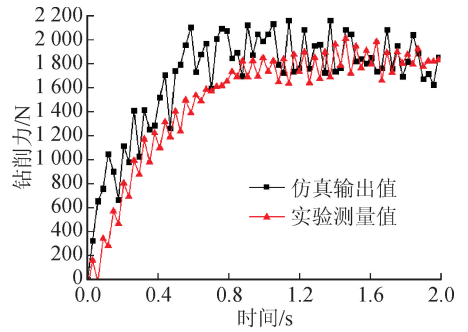


图7 第2组实验测量的钻削力及扭矩

Fig. 7 Drilling force and torque measured by the second group of experiments

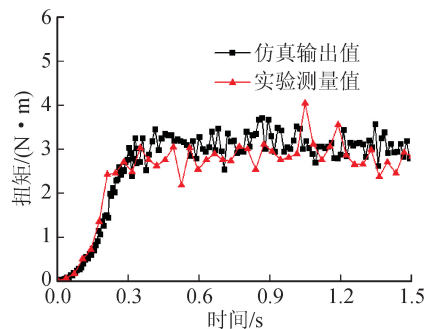
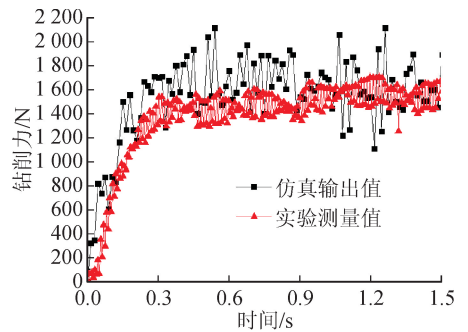


图8 第3组实验测量的钻削力及扭矩

Fig. 8 Drilling force and torque measured by the third group of experiments

钻削力与扭矩的误差大小相比,扭矩误差比钻削力大的原因主要有两点,一方面是扭矩值在仿真时受温度影响较大,因为钻削力60%以上是由于横刃产生的,主切削刃产生的钻削力较小,而扭矩正好相反,扭矩主要来自于主切削刃,其余来自于横刃及副切削刃,主切削刃在切削时材料受温度的影响较

大,非线性材料在切削仿真时,温度场的模拟与实际仍然有误差,所以造成扭矩误差也较大。另一方面,仿真分析时是假设材料是均匀分布的,但是实际中不存在均匀分布的材料,材料的非均匀分布对其也有影响。实验测量值与仿真输出的曲线具有相同的趋势,随着进给量增大,钻削力及扭矩均增大,且扭矩的波动幅度变大,说明切削过程没有低进给量时平稳。

2.2.2 切屑形态分析

断屑及排屑问题对于钻削加工来说是非常重要的,在刀具排屑槽有限的空间内如切屑不能正常排出,会导致切屑堵塞、刀具崩刃或扭断等问题,选取合理的切削参数有利于断屑和排屑。当 $s=400$ r/min 时,图 9(a)和(b)分别为 $f=0.14$ mm/r 和 0.28 mm/r 时的钻削切屑形成过程,在小进给量时,产生了带状长切屑。当进给量增加时,由于 304 不锈钢材料在高温下的硬度较高,切削加工时不易发生卷屑,造成切削过程不平稳,钻削力及扭矩波动增大,此时剪切应力达到材料的断裂强度,从而发生断屑,产生了单元切屑。

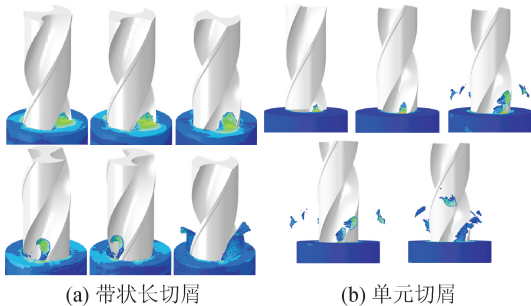


图 9 不同进给量时的切屑形态

Fig. 9 Chip shape at different feed rates

图 10 是在相同加工参数下钻削实验得到的切屑,通过与仿真中得到的切屑对比,可以看到仿真中与实验中得到的都是长切屑,切屑形态一致,进给量较小时产生了带状切屑,进给量增加时,产生单元切屑。



(a) 小进给量时的切屑 (b) 大进给量时的切屑

图 10 不同进给量时的切屑

Fig. 10 Chips at different feed rates

3 结 论

通过对 304 奥氏体不锈钢材料的钻削仿真模拟与加工实验研究,得出如下结论。

1) 对比仿真结果与实验结果,仿真分析的钻削力及扭矩在稳定钻削时吻合较好,表明建立的有限元模型是合理正确的,在优化奥氏体不锈钢加工参数时仿真分析结果具有重要参考价值结果。

2) 钻削加工的钻削力会随着进给量及转速的增加而增加,在相同转速下,进给量的增加对钻削力及扭矩的影响较大,进给量增加时,钻削力和扭矩会出现较大的波动,切削过程不稳定。在实际加工中,应尽量选择较低转速。

3) 钻削加工切削刃处的温度受进给量大小的影响较大,增加进给量时,会增加钻削时的温度,由于钻削加工实验条件的限制,热量无法及时传导至其它部位,过高的温度使得热载荷对残余应力影响增大,残余压应力减小,残余拉应力增大,表面的微裂纹在残余拉应力作用下更容易扩展,对工件的使用寿命有较大的影响。

参考文献:

- [1] 王庭俊. AISI 304 不锈钢的车削加工[J]. 工具技术, 2017, 51(1): 79-82.
WANG Tingjun. Research on turning process of AISI 304 stainless steel[J]. Tool Engineering, 2017, 51(1): 79-82.
- [2] 王海波. 304 不锈钢的电脉冲辅助车削与声电耦合表面加工研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
WANG Haibo. Research on the electropulsing assisted turning and ultrasonic-electropulsing coupling surface process for the 304 stainless steel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [3] 石锋,崔文芳,王立军,等. 高氮奥氏体不锈钢研究进展[J]. 上海金属, 2006, 28(5): 45-50.
SHI Feng, CUI Wenfang, WANG Lijun, et al. Advance in the research of high-nitrogen austenitic stainless steel[J]. Shanghai Metals, 2006, 28(5): 45-50.
- [4] 张国平. 不锈钢切削加工[J]. 现代机械, 2013(1): 65-67, 70.
ZHANG Guoping. Stainless steel cutting processing[J]. Modern Machinery, 2013(1): 65-67, 70.
- [5] 王庭俊,周建华. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的切削加工[J]. 工具技术, 2009, 43(7): 63-67.
WANG Tingjun, ZHOU Jianhua. Cutting process of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Tool Engineering, 2009, 43(7): 63-67.
- [6] SHIN H C, HA T K, CHANG Y W. Kinetics of de-

- formation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45(7): 823-829.
- [7] 尹富斌. 奥氏体不锈钢铣削加工工艺分析[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(10): 109, 112.
- [8] 励政伟. 不锈钢用高速钢麻花钻的设计和制造[J]. *工具技术*, 2018, 52(5): 114-116.
- LI Zhengwei. Design and analysis of stainless steel twist drills[J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(5): 114-116.
- [9] 王志光. 304 奥氏体不锈钢切削表面质量的实验分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- WANG Zhiguang. Experimentation and analysis of machined surface quality for cutting 304 austenitic stainless steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] 刘文文. 机械加工表面残余应力的有限元模拟与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LIU Wenwen. Finite element simulation and experiment of residual stress in machined surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [11] LAZOGLU I, ULUTAN D, ALACA B E, et al. An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(1): 81-84.
- [12] USUI E, MAEKAWA K, SHIRAKASHI T. Simulation analysis of built-up edge formation in machining of low carbon steel[J]. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 1981, 15(4): 237-243.
- [13] STRENKOWSKI J S, MOON K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1990, 112(4): 313-318.
- [14] JOMAA W, MECHRI O, LÉVESQUE J, et al. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075-T651 alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 446-458.
- [15] DUCOBU F, ARRAZOLA P J, RIVIÈRE-LORPHEVRE E, et al. The CEL method as an alternative to the current modelling approaches for Ti6Al4V orthogonal cutting simulation[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 58: 245-250.
- [16] 孙会来, 李丹, 赵方方, 等. 基于 ABAQUS 的航空 7075 铝合金切削二维仿真[J]. *天津工业大学学报*, 2017, 36(1): 83-88.
- SUN Huilai, LI Dan, ZHAO Fangfang, et al. Two-dimensional simulation on cutting process of aviation 7075 aluminum alloy based on ABAQUS[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2017, 36(1): 83-88.
- [17] 赵云峰, 张建华, 邢栋梁, 等. 铝合金 Al2024 铣削仿真分析与实验研究[J]. *制造技术与机床*, 2011(1): 101-103.
- ZHAO Yunfeng, ZHANG Jianhua, XING Dongliang, et al. Simulation analysis and experimental study on milling of aluminum alloy 2024 [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2011(1): 101-103.
- [18] 刘东, 陈五一. 钛合金 TC4 切削过程流动应力模型研究[J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(1): 167-171.
- LIU Dong, CHEN Wuyi. Research on the flow stress model of titanium alloy TC4 during the cutting process [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15(1): 167-171.
- [19] 岳彩旭. 金属切削过程有限元仿真技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [20] 伊海洋. 不锈钢材料车削加工的实验研究与有限元仿真[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- YI Haiyang. Experimental research and finite element simulation of turning machining of stainless steel materials[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [21] 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.

(责任编辑 王绪迪)