

复合涂层刀具钻削高温合金 Inconel 718 钻削性能研究

刘 海 王明红 刘雪勇

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

文 摘 高温合金 Inconel 718 是一种典型的难加工材料, 本文利用 DEFORM-3D 软件对无涂层、TiC 单涂层和 TiC/Al₂O₃ 复合涂层硬质合金刀具进行钻削高温合金 Inconel 718 的仿真分析, 研究在不同钻削条件下复合涂层刀具的切削性能, 并进行钻削实验进行验证。结果表明: TiC/Al₂O₃ 复合涂层刀具能有效降低钻削轴向力和钻削温度, 其轴向力降低幅度最高为 20%, 钻削温度最高降低了 35%。通过钻削实验验证了仿真模型的准确性, 可为实际钻削加工高温镍基合金 Inconel 718 中选择涂层种类及钻削参数提供参考。

关键词 复合涂层, Inconel 718, 有限元仿真, 轴向力, 钻削温度, 钻削实验

中图分类号: TG146

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.04.012

Research on Drilling Performance of Composite Coating Tool in Drilling Superalloy Inconel 718

LIU Hai WANG Minghong LIU Xueyong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract The high-temperature alloy Inconel 718 was a typical difficult-to-machine material. In this paper, DEFORM-3D software was used to carry out the simulation test of drilling high-temperature alloy Inconel 718 with uncoated, TiC single-coated and TiC/Al₂O₃ composite coated carbide tools. The cutting performances of composite coating tools under different drilling conditions were researched and were verified by drilling experiments. The results show that the TiC/Al₂O₃ composite coating tool can effectively reduce the drilling axial force and the drilling temperature, the maximum reduction of the axial force is 20%, and the maximum reduction of the drilling temperature is 35%. The accuracy of the simulation model is verified by drilling experiments, and a certain reference for the selection of coating types and drilling parameters in the actual drilling of high-temperature nickel-based alloy Inconel 718 is provided.

Key words Composite coating, Inconel 718, Finite element simulation, Axial force, Drilling temperature, Drilling experiment

0 引言

高温合金 Inconel 718 因其具备良好的强度、耐磨性和抗氧化腐蚀性能等特征被广泛地应用在航空航天、生物医药等工业技术领域^[1]。但其导热性差、切削温度高、切削刀具磨损严重等问题导致其加工效率较低, 是常见的难加工材料^[2]。孔加工工序在机械制造加工工序中十分重要, 在所有机械加工工序中孔加工的占比大约达到三分之一。同时, 钻削加工闭环加工方式, 相对于切削、铣削等更为复杂^[3]。因此研究高温合金钻削性能对减小刀具磨损、提高加工效率有着积极意义。

为有效改善高温合金 Inconel 718 的切削加工性能, 国内外许多学者进行不同方面的研究。李建明等^[4]对镍基合金 Inconel 718 开展低温切削加工实验, 并进行低温静态拉伸和 Hopkinson 压杆试验, 结果表明: 低温切削技术对镍基合金 Inconel 718 的切削加工性有较显著的提高。龙重旺等^[5]开展了进给量为单因素变量的切削实验, 对刀具磨损、切削力、工件表面质量三方面对比研究 Al₂O₃ 复合涂层与 TiAlN 涂层硬质合金刀具的切削性能, 实验表明 TiAlN 涂层硬质合金刀具在上述三方面表现均优于 Al₂O₃ 复合涂层。EKREM^[6]对高温合金 Inconel 718 进行深孔钻削实验, 并优化了麻花钻的

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2023-08-19

第一作者简介: 刘海, 1995 年出生, 硕士研究生, 从事金属切削与数字仿真研究工作。E-mail: 1182764299@qq.com

几何参数,实验结果表明优化后的麻花钻能有效降低钻削力,延长刀具使用寿命,提高加工效率。张显银等^[7]发现在相同切削参数条件下,未涂层刀具上的切削力、切削温度和刀具应力最大,其次是TiCN涂层刀具,TiAlN涂层刀具最小。TiAlN涂层刀具上的切削温度和切削力小于TiCN涂层刀具,仿真分析与切削试验结果相吻合。

目前,关于复合涂层刀具钻削加工高温合金Inconel 718的研究相对较少,且大部分研究都主要针对涂层刀具的磨损方面,关于钻削力和钻削温度研究还有待深入。因此,本文应用DEFORM-3D有限元软件对高温合金Inconel718钻削加工过程进行有限元仿真模拟,分别研究无涂层、TiC单涂层和TiC/Al₂O₃复合涂层刀具对钻削力、钻削温度及刀具磨损的影响,拟为实际加工切削高温合金提供参考。

1 钻削仿真模型

1.1 材料模型

本文采用Johnson-Cook模型(简称JC模型),该模型能够较好地反映高应变、高应变率和高温情况下的金属热力耦合大变形行为^[8]。其表达式为:

$$\sigma = \left[A + B(\varepsilon^p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}^0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中, σ 为材料的流动应力; ε^p 为等效应变; $\dot{\varepsilon}^p$ 为等效应变率; $\dot{\varepsilon}^0$ 为参考应变率(通常为1.0/s); T 为变形温度; T_{room} 为室温(一般取20°C); T_{melt} 为材料熔点; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料的JC模型参数,其取值见表1^[9]。

表1 Inconel 718的Johnson-Cook模型参数

Tab. 1 Johnson-Cook model parameters of Inconel 718

A/MPa	B/MPa	C	m	n
1 241	622	0.013 4	1.3	0.652 2

1.2 仿真参数及试验方案设置

为保证仿真精度,采用DEFORM-3D自带的刀具库中直径 d 为5 mm,顶角为118°,螺旋角为30°的硬质合金麻花钻。工件为 $\Phi 12$ mm \times 2 mm的塑性圆柱体,材质为镍基高温合金Inconel 718。钻头的最大和最小网格尺寸的比例设为4,钻头网格数量设置为20 000,工件的最大和最小网格尺寸的比例设为6,工件网格数量设置为30 000。通过自适应网格重划分系统建立的钻削模型如图1所示。设计单因素试验方案以分析不同涂层对切削性能的影响。

在边界条件设置中,使得工件下表面与 xy 平面相平行,同时设置工件侧面的速度在 x 、 y 、 z 方向上均为0,限制工件的运动,刀具沿着 $-z$ 方向进给,绕 Z 轴

旋转。边界条件设置示意图见图1。

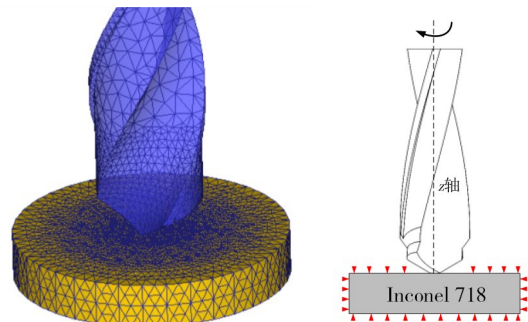


图1 钻削模型及边界条件

Fig. 1 Drilling model and boundary conditions

2 仿真过程及结果分析

2.1 轴向力分析

在不同钻削条件下,轴向力的变化趋势较为一致。以钻削速度为2 000 r/min、进给量为0.1 mm/r时,TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的钻削仿真为例,分析钻削高温合金Inconel 718时的轴向力变化。其轴向力随钻削步数增加的变化曲线如图2所示。由图可知,钻削开始时,钻头横刃与工件相互挤压,使工件产生变形,此时钻削力开始迅速增大。随着主切削刃参与切削的长度增加,钻削半径开始增大,该阶段轴向力缓慢增大。当主切削刃全部开始参与切削,钻削半径保持不变,轴向力此时相对稳定。

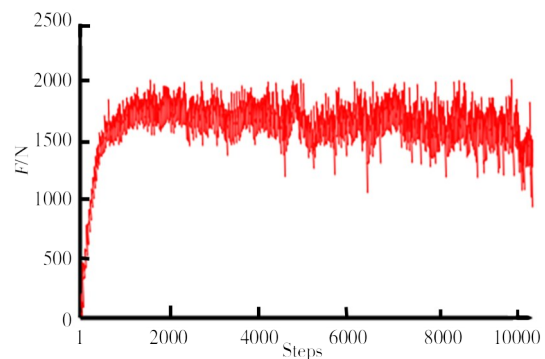


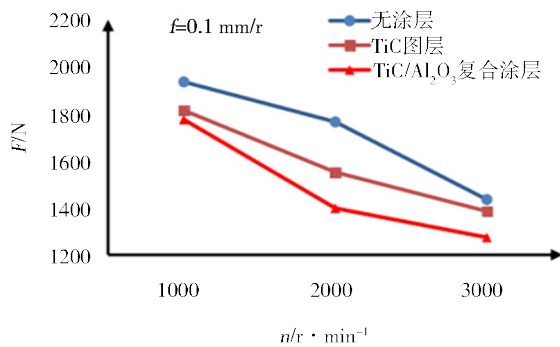
图2 轴向力随步数变化曲线

Fig. 2 The variation curve of axial force with the number of steps

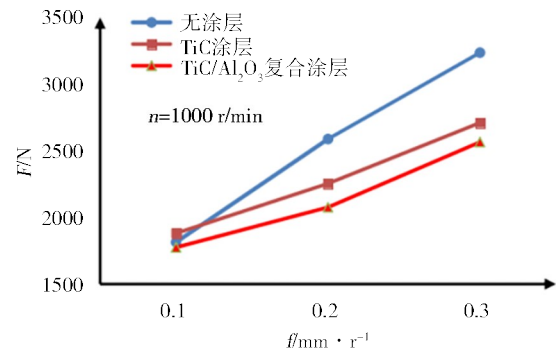
图3为在钻削稳定阶段,不同切削用量对轴向力的影响变化曲线。主轴转速增加时,金属切削量也随之增加,切削刀具与切屑及工件之间的摩擦增大,导致切削热不能及时与切屑一起排出,故钻削温度升高。此时,工件的剪切屈服强度降低,前刀面和切屑形成的摩擦角减小,对应的剪切角有所增大,故钻削力随之减小^[10-12]。由图3(a)可以看出,涂层刀具的钻削力与无涂层刀具相比有明显降低,其中TiC/

Al₂O₃复合涂层刀具降低更为明显,降低幅度最高为20%。由图3(b)可知,进给量增大会导致切削厚度

增加,工件在单位时间内产生的变形量增加,变形速度和变形抗力增大,轴向力也随之增大。



(a) 轴向力随主轴转速变化曲线



(b) 轴向力随进给量变化曲线

图3 轴向力随切削参数变化曲线

Fig. 3 The variation curves of axial force changing with cutting parameters

2.2 钻削温度分析

图4为钻头在转速 $n=1\ 000\ r/min$ 、进给量 $f=0.1\ mm/r$ 时,三种不同涂层刀具的最高温度云图。从温度云图中不难看出刀具的温度主要集中在主切削刃和横刃上,且主切削刃的温度比横刃处温度高 $100\ ^\circ C$ 左右。由于主切削刃在钻削中起主要切削作用,可以看作切削变形的第一变形区,即与工件产生最大挤压摩擦的区域,故主切削刃处温度最高^[13]。横刃主要在刀具与工件刚接触时产生挤压,当主切削刃开始参与切削时,横刃开始起辅助切削作用,故横刃上的温度比主切削刃低^[14]。横刃的转点处温度也较高,这是切屑在排出过程中均与横刃转点处产生摩擦导致的。

对比三种涂层刀具的最高钻削温度可知,涂层刀具对减小钻削温度有一定作用,其中TiC/Al₂O₃复合刀具温度降低十分明显。TiC单涂层刀具与无涂

层刀具相比,温度略有降低,但仅仅降低3%。TiC/Al₂O₃复合涂层刀具最高钻削温度比无涂层刀具降低了18%,效果比较显著。

图5为钻削速度和进给量对刀具最高温度的影响规律。由图可知,当钻削速度一定时,刀具的最高温度随进给量的增加而上升,但增长幅度逐渐减小。当进给量一定时,随着钻削速度的增加,刀具最高温度缓慢上升。在转速 $n=1\ 000\ r/min$ 、进给量 $f=0.1\ mm/r$ 时,TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的刀具最高温度减小18%;在转速 $n=3\ 000\ r/min$ 、进给量 $f=0.3\ mm/r$ 时,TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的钻削最高温度减小幅度可达35%。钻削速度和进给量的增大都会导致钻削温度升高,其中进给量对刀具最高温度的影响程度高于钻削速度。

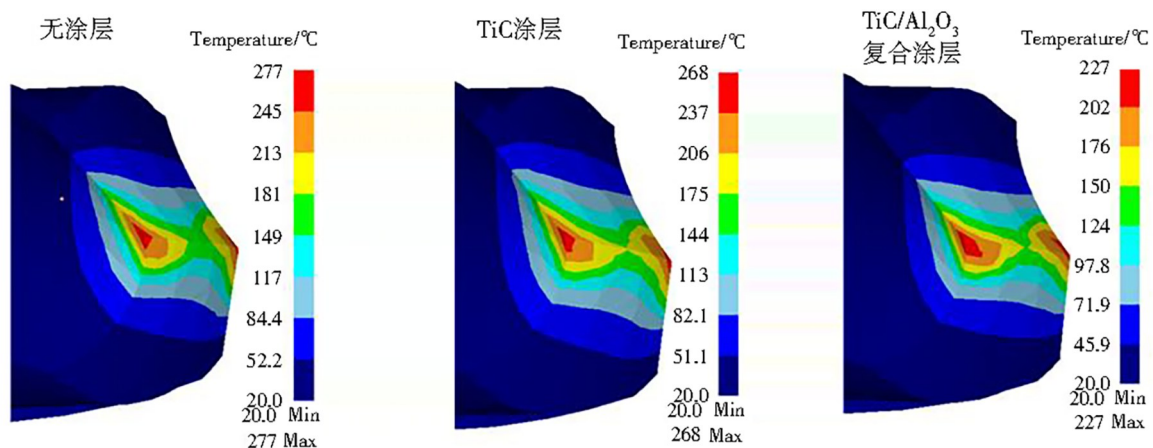


图4 不同涂层刀具钻削最高温度

Fig. 4 The highest drilling temperature of different coating tools

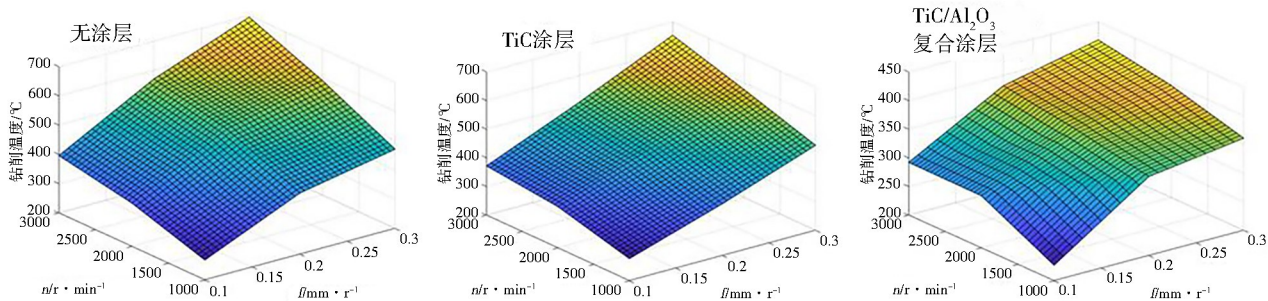


图5 切削参数对钻头最高温度影响

Fig. 5 The influence of cutting parameters on the maximum temperature of the drill bit

3 钻削实验验证

3.1 实验条件

实验采用YCM-V116B立式数控加工中心,如图6所示。该机床具有柔性加工特性,一次装夹可以实现多道工序的加工,其基本加工参数如表2所示。

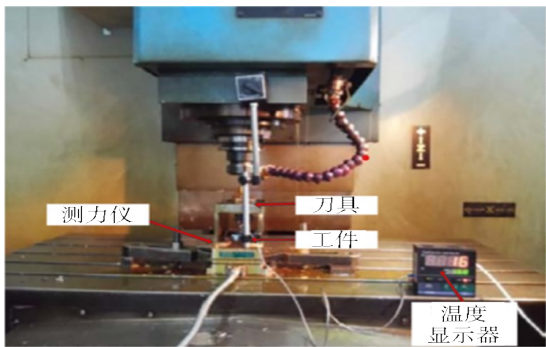


图6 YCM-V116B加工中心

Fig. 6 YCM-V116B machining center

表2 雅力士VL850立式加工中心基本参数

Tab. 2 Basic parameters of YLS VL850 vertical machining center

x轴行程/mm	y轴行程/mm	z轴行程/mm	最大平均负载/kg
1 500	800	700	1 600
定位精度/mm	重复精度/mm	主轴转速/r·min ⁻¹	进给速度/mm·min ⁻¹
300±0.005	±0.005	6 000	1~10 000

实验工件材料采用高温镍基合金 Inconel 718,这是一种镍铬沉淀硬化高温合金,其基体镍含量约为50%~55%,主要元素包括Cr、Fe、Nb、Ta、Mo等^[15]。工件的主要物理力学性能参数如表3所示。麻花钻采用丹萨(DAPTSA)的整体硬质合金涂层刀具,基体材料为YG6X(WC含量为94%;黏结剂为Co,含量6%)。

表3 Inconel718 物理力学参数

Tab. 3 Inconel 718 physical and mechanical parameters

$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	HRC	E/GPa
8 240	481.4~707.4	40~42	206
$T_{\text{melt}}/^\circ\text{C}$	$\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	v	σ_s/MPa
1 260~1 320	13.4~30.4	0.3	917~1 196.5

3.2 实验结果分析

利用三向动态压电式测力仪测量获得钻削加工稳定阶段的轴向力,测量设备如图7所示。以TiC/Al₂O₃复合涂层刀具在钻削速度 $n=1\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 、进给量 $f=0.1\ \text{mm}/\text{r}$ 时的仿真及实验数据进行对比,如图8所示。当刀具与工件刚接触开始钻削时,轴向力急剧增大,随着刀具切入工件,轴向力逐渐上升,当主切削刃完全参与切削时,轴向力趋于稳定状态。综上可知,实验结果与仿真结果具有较好的一致性,虽然存在一定误差,但相对误差均保持在10%以内,说明仿真结果是真实可靠的。

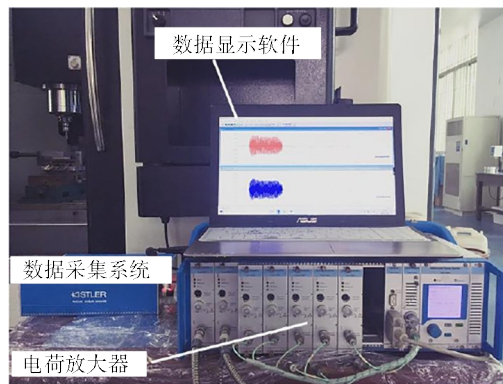


图7 三向动态压电式测力仪

Fig. 7 Three-way dynamic piezoelectric dynamometer

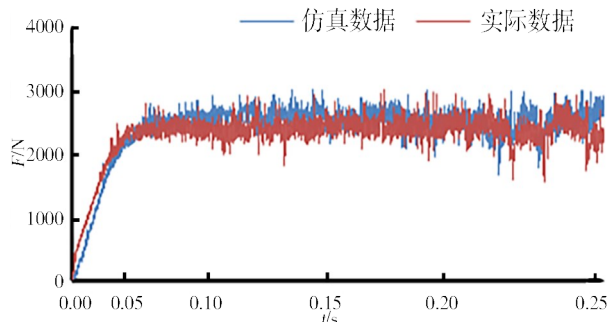


图8 仿真与实验轴向力数值的对比

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental axial force values

图9为三种不同涂层钻头最高钻削温度随钻削速度变化的曲线,由图可知随着钻削速度增加,刀具

最高钻削温度也随之增加。涂层刀具的切削温度接近线性上升,且明显低于无涂层刀具,其中TiC/Al₂O₃复合涂层刀具效果更好。在低转速时,三种刀具最高切削温度相差不大;在高转速时,TiC/Al₂O₃复合涂层刀具比无涂层刀具最高温度减小了38%。这是由于TiC/Al₂O₃复合涂层刀具摩擦因数较低,可以减小刀-屑摩擦产生的切削热,同时由于TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的热导率较高,可以将第二变形区产生的切削热较快传导出去。

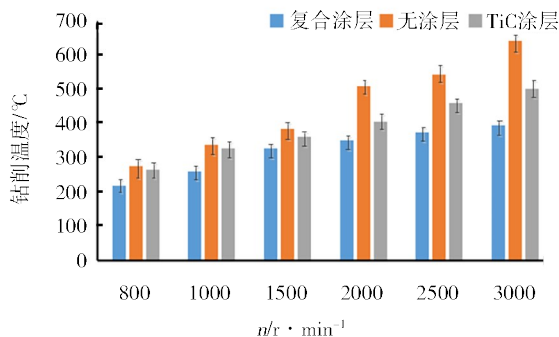


图9 不同涂层刀具钻削温度随转速变化趋势
Fig. 9 The drilling temperature of different coating tools changes with the rotating speed

图10为不同切削速度时产生的切屑形态,可以看出低速切削时产生的切屑是带状切屑,随着切削速度的增加,切削逐渐变成节状切屑和粒状切屑。由于带状切屑排屑顺畅,能够带走较多的切削热量,且低速切削时的热扩散作用较显著,所以在低速时测得的切削温度较低。随着切削速度的提高,热扩散作用减弱,主剪切区内的热量流入切屑的比例上升,同时粒状切屑堆积在刀具前刀面,使得测得的切削温度升高。

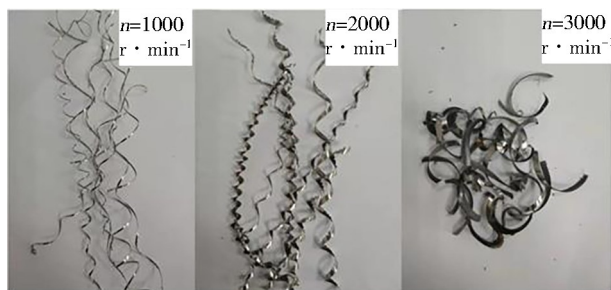


图10 不同转速条件下产生的切屑形态
Fig. 10 Chip morphology generated under different speed conditions

如图11所示,每种刀具钻10个孔之后采集刀具磨损图像。发现无涂层刀具的主切削刃磨损较为严重;TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的主切削刃在相同条件下几乎没有磨损;TiC涂层主切削刃有轻微磨损。

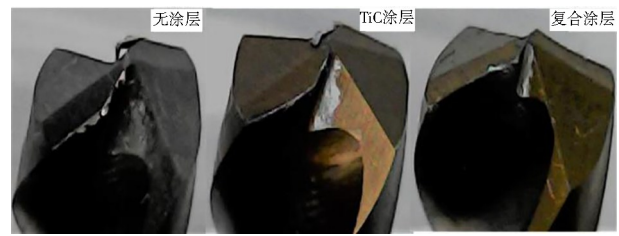


图11 不同涂层钻头磨损情况
Fig. 11 Wear conditions of drill bits with different coatings

4 结论

(1) 钻削加工中的轴向力会随着转速的增加而降低,随着进给量的增加而增加。TiC/Al₂O₃复合涂层刀具在不同切削条件下轴向力均比无涂层刀具轴向力低,进给量 $f=0.3$ mm/r时,减小幅度可达20%。

(2) 钻削加工中刀具最高温度随着转速及进给量的增加而增加,其中进给量对钻削温度影响更大。复合涂层刀具由于摩擦因数较低和高热导率,使得其切削温度明显低于无涂层刀具。TiC/Al₂O₃复合涂层刀具的切削最高温度比无涂层刀具降低了35%。

(3) 对比仿真数据与钻削实验结果,仿真分析的钻削力与钻削温度与实际测量数值误差较小,保持在10%以内。说明进行有限元仿真分析结果对高温镍基合金Inconel 718切削加工有重要参考价值。

参考文献

- [1] 周志杰,许磊,杜彦斌,等. 20Cr13钢表面激光熔覆铁/镍基合金熔覆层的组织与性能研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(2):69-74.
ZHOU Z J, XU L, DU Y B, et al. Study on the structure and properties of laser cladding Fe/Ni-based alloy cladding on the surface of 20Cr13 steel[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(2):69-74.
- [2] 李重阳,龚焱,刘时兵,等. 镍基高温合金的发展综述[C]//合肥:2020中国铸造活动周,2020.
LI C Y, GONG Y, LIU S B, et al. Overview of the development of nickel-based superalloys[C]//Hefei:2020 China Foundry Congress,2020.
- [3] DURUL U, ITUGRUL O. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 51(3): 250-280.
- [4] 李建明,王相宇,乔阳,等. 液氮冷却低温切削镍基合金Inconel 718的试验与仿真[J]. 机械工程学报,2020,56(18):61-72.
LI J M, WANG X Y, QIAO Y, et al. Experiment and simulation of low temperature cutting nickel-based alloy Inconel 718 by liquid nitrogen cooling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2020,56(18):61-72.
- [5] 龙重旺,陈领,郭智兴,等. TiAlN涂层与Al₂O₃复合涂

层刀具高温合金切削性能研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9):154-157.

LONG C W, CHEN L, GUO Z X, et al. Research on cutting performance of high temperature alloy cutting tools with TiAlN coating and Al₂O₃ composite coating[J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2020(9):154-157.

[6] EKREM O, SEBASTAIN M, DIRK B. Chip formation simulation and analysis of the mechanical loads during micro single-lip deep hole drilling of Inconel 718 with varying cooling lubricant pressure [J]. Production Engineering, 2021 (9) : 154-157.

[7] 张显银. TiCN、TiAlN 和 TiAlCrN 涂层刀具的干切削性能及磨损机理研究[D]. 重庆:西南大学, 2018.

ZHANG X Y. Study on Dry Cutting Performance and Wear Mechanism of TiCN, TiAlN and TiAlCrN Coated Tools [D]. Chongqing:Southwest University, 2018.

[8] 赵海波. 国内外切削刀具涂层技术发展综述[J]. 工具技术, 2002(2):3-7.

ZHAO H B. Summary of the development of cutting tool coating technology at home and abroad [J]. Tool Technology, 2002(2):3-7.

[9] 董小虹, 黄拿灿, 黎炳雄, 等. 关于电弧离子镀 Ti-N 系涂层的若干技术问题[J]. 金属热处理, 2005(10):70-72.

DONG X H, HUANG N C, LI B X, et al. Several technical issues about arc ion plating Ti-N coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2005(10):70-72.

[10] 邵海泉. 车用 ZL205A 铝合金激光熔覆 Al₂O₃/NiCrAl 涂层组织及摩擦性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(11):1034-1038.

SHAO H Q. Study on the structure and friction properties of laser cladding Al₂O₃/NiCrAl coating on ZL205A aluminum alloy

for vehicles [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(11):1034-1038.

[11] 李建明, 王相宇, 乔阳, 等. 液氮冷却低温切削镍基合金 Inconel 718 的试验与仿真[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18):61-72.

LI J M, WANG X Y, QIAO Y, et al. Experiment and simulation of low temperature cutting nickel-based alloy Inconel 718 by liquid nitrogen cooling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18):61-72.

[12] 陶亮, 陈海虹, 周知进, 等. Inconel 718 高温合金切削温度仿真及参数优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(6):165-168.

TAO L, CHEN H H, ZHOU Z J, et al. Research on cutting temperature simulation and parameter optimization of inconel718 superalloy [J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2020(6):165-168.

[13] 仵珍稷, 姜增辉, 鲁康平, 等. GH4169 高温合金钻削力的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2018(8):106-108.

QI Z J, JIANG Z H, LU K P, et al. Experimental research on drilling force of GH4169 superalloy [J]. Machinery Design and Manufacturing, 2018(8):106-108.

[14] 王辉. 镍基粉末冶金高温合金钻削仿真与试验研究[D]. 济南:济南大学, 2016.

WANG H. Simulation and experimental research on drilling of nickel-based powder metallurgy superalloys [D]. Jinan: University of Jinan, 2016.

[15] 董芳. 高温镍基合金 Inconel718 的切削特性研究[J]. 机械设计与制造, 2017(3):219-221.

DONG F. Study on cutting characteristics of high temperature nickel-based alloy Inconel 718 [J]. Machinery Design and Manufacturing, 2017(3):219-221.