

## 不同形状的表面织构刀具仿真车削 Inconel 718 合金研究

郭冬云,王大中

上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620

**摘要:**目的 针对目前车削 Inconel 718 镍基高温合金主要面临的加工性差和刀具磨损两个问题,提出表面微织构技术进行刀具设计与制备。方法 首先建立微织构刀具的理论刀-屑接触长度模型,其次,利用理论刀-屑接触长度模型,建立表面织构刀具切削力的理论模型以及切削热的理论模型;最后,根据理论刀-屑接触长度的变化规律,对微织构刀具的切削力、切削温度进行理论分析,并最终建立有限元仿真模型。结果 通过有限元仿真结果表明微织构刀具比硬质合金刀具的车削性能要好。结论 与硬质合金刀具的切削力对比,微织构刀具的三向切削力均偏小;且轴向力、径向力在一定范围内波动,主切削力呈增长趋势。与硬质合金刀具的切削温度对比,微织构刀具可以降低切削过程中切削热,且圆形微织构刀具是 3 种微织构刀具中切削温度最低的;与硬质合金刀具对比,表面微织构可以降低刀具表面磨损问题,减少刀具与切屑的挤压作用和摩擦作用,且不同形状的表面织构产生的磨损深度不同。

**关键词:**Inconel 718;微织构刀具;切削力;有限元仿真;刀具磨损

**中图分类号:**TG506.7 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0004.002

### Research on Turning Inconel 718 Alloy with Different Shape Surface Microtextured Tools

GUO Dongyun, WANG Dazhong

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract:** **Objective** In view of the two main problems of poor machinability and tool wear in turning Inconel 718 nickel-based superalloy, surface micro-texture technology was proposed for tool design and fabrication. **Methods** Firstly, the theoretical tool-chip contact length model of the micro-texture tool was established. Secondly, the theoretical models of cutting force and cutting heat of surface texture tool were established by using the theoretical tool-chip contact length model. Finally, the cutting force and cutting temperature of the micro-textured tool were analyzed theoretically according to the changes in theoretical tool-chip contact length, and the finite element simulation model was established. **Results** The results of finite element simulation show that the micro-texture tool has better turning performance than the carbide tool. **Conclusion** Compared with the cutting force of carbide tools, the three-way cutting force of the micro-texture tool is small. The axial force and radial force fluctuate in a certain range, and the main cutting force is increasing. Compared with the cutting temperature of carbide tools, micro-texture tools can reduce the cutting heat during cutting, and the circular micro-texture tool has the lowest cutting temperature among the three micro-texture tools. Compared with

收稿日期:2023-03-05 修回日期:2023-05-18 文章编号:1672-058X(2024)04-0010-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5217052158)。

作者简介:郭冬云(1994—),女,安徽定远人,硕士研究生,从事刀具优化设计与开发研究。Email: 780676196@qq.com.

通讯作者:王大中(1966—),男,吉林人,教授,从事复合材料智能制造与健康监测、刀具优化设计与开发研究。Email: wdzh168@126.com

引用格式:郭冬云,王大中.不同形状的表面织构刀具仿真车削 Inconel 718 合金研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(4):10—16.

GUO Dongyun, WANG Dazhong. Research on turning Inconel 718 alloy with different shape surface microtextured tools[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 10—16.

carbide tools, surface micro textures can reduce the surface wear of the tool, and reduce the extrusion and friction between the tool and the chip. And the different shapes of surface micro-textures produce different wear depths.

**Keywords:** Inconel 718; microtextured tool; cutting force; finite element simulation; tool wear

## 1 引言

镍基高温合金材料的主要成分是镍,以 Inconel 718 合金为例,主要成分镍的含量高达 55%,其次铬的含量一般是 17%~21%。镍基高温合金在低温条件下具有十分稳定的化学性能;当工作环境温度达到 700 °C 时镍基高温合金的断裂强度、疲劳强度和抗拉强度较高;Inconel 718 合金工作环境温度在 1 000 °C 左右时抗氧化性较高。目前,Inconel 718 合金在 650 °C~1 000 °C 范围内具有优异综合性能和优良的机械加工性<sup>[1]</sup>。研究表明,Inconel 718 合金已成为航空发动机的国际标准材料,并且航空发动机的零件材料有 50%~78% 使用的是镍基高温合金材料。目前车削 Inconel 718 镍基高温合金主要面临两个问题:可加工性差和刀具磨损。鉴于加工过程中镍基高温合金 Inconel 718 容易形成硬化,致使刀具磨损严重。源于热导率低、硬度大等问题,切削过程中会出现热量高以及切削力大等现象,加速刀具磨损以及引起车削表面不均匀<sup>[2]</sup>。Inconel 718 合金由于热导率低、强度高,采用传统方法加工 Inconel 718 合金,导致生产效率低、刀具磨损严重<sup>[1-3]</sup>。

Darshan 等<sup>[4]</sup>通过实验研究圆形微织构刀具车削 Inconel 718 合金的加工性能,研究结果表明:刀具表面织构在刀-屑界面提供了良好的润滑作用,减少了切屑与刀具的有效接触长度,减弱了摩擦作用,降低了刀具侧面的磨损。织构刀具在加工过程中产生连续卷曲分段切屑,而无表面织构刀具加工时产生具有大锯齿的连续切屑,不利于切削力的降低。仅通过实验难以研究刀-屑界面的切削温度,切削温度也是影响切屑形成以及切削力降低的一个重要因素。Sivaiah 等<sup>[5]</sup>研究发现,在微量润滑的条件下使用新型混合微织构刀具(圆形织构与线性凹槽织构组合)车削 Inconel 718 合金显著提高了车削加工性能,大幅降低了切削过程中切削热的产生,有效减少了刀具磨损。该研究认为刀具织构能够储存冷却剂对提高切削加工性能起到关键作用,忽视了织构自身参数的影响。Zhang 等<sup>[6]</sup>设计了 3 种线槽表面织构形状,分别是直线槽、正弦槽以及菱形槽,主要研究织构的分布结构对加工 Ti-6Al-4V 的影响,通过对切削力、刀-屑接触区的摩擦系数、切屑形

貌、刀具磨损以及表面质量的研究,结果表明直线槽织构刀具的加工效果最好,其次是正弦槽织构刀具和菱形槽织构刀具。其研究缺少对线槽宽度以及深度进一步的考虑,织构参数对刀具的切削性能有重要影响。

本研究设计了 3 种形状的织构刀具,分别是方形凹坑织构刀具、圆形凹坑织构刀具以及三角形凹坑织构刀具,旨在对不同形状的表面织构刀具的车削性能进行相关研究。主要探究车削镍基高温合金 Inconel 718 过程中切削温度、切削力的变化规律以及刀具磨损情况,分析不同形状织构刀具的切削性能,其研究结果为切削加工 Inconel 718 合金时选择合适的刀具参数提供相关参考。

## 2 微织构刀具的理论分析及有限元模型

### 2.1 理论分析

针对切削方向进行研究,认为斜角切削近似可看成直角切削,如图 1 所示,切屑的流出方向与切削时的吃刀抗力  $F_t$  的方向一致。所以将  $F_t$  分解成轴向力  $F_x$ ,和径向力  $F_y$ ,而主切削力  $F_z$  保持不变。因此,可以得到三向切削力公式如下,即主切削力  $F_z$ 、轴向力  $F_x$  和径向力  $F_y$ <sup>[7-8]</sup>为

$$F_z = F_t \cos(\omega - \varphi) = a_c L_f \bar{\tau} \left( \sin \gamma_0 - \frac{\cos \gamma_0}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

$$F_x = F_t \cos(\psi_r + \psi_\lambda) = a_c L_f \bar{\tau} \left( \cos \gamma_0 - \frac{\sin \gamma_0}{\tan \beta} \right) \cos(\psi_r + \psi_\lambda) \quad (2)$$

$$F_y = F_t \sin(\psi_r + \psi_\lambda) = a_c L_f \bar{\tau} \left( \cos \gamma_0 - \frac{\sin \gamma_0}{\tan \beta} \right) \sin(\psi_r + \psi_\lambda) \quad (3)$$

$$L'_f = L_f - n l_0 \quad (4)$$

式(4)中, $L'_f$ 为刀-屑的实际接触长度; $L_f$ 为刀-屑的理论接触长度; $l_0$ 为微织构的宽度; $n$ 为刀-屑接触区织构的数量。式(1)中, $a_c$ 为切削的宽度; $\psi_r$ 为余偏角; $\beta$ 为摩擦角; $\gamma_0$ 是刀具的前角; $\psi_\lambda$ 是切屑的流出角。

如式(4)所示,刀具表面织构的存在,使得刀-屑的实际接触长度小于刀-屑的理论接触长度。如式(1)、式(2)与式(3)所示,微织构刀具的三向切削力与刀-屑的理论接触长度呈正相关关系。

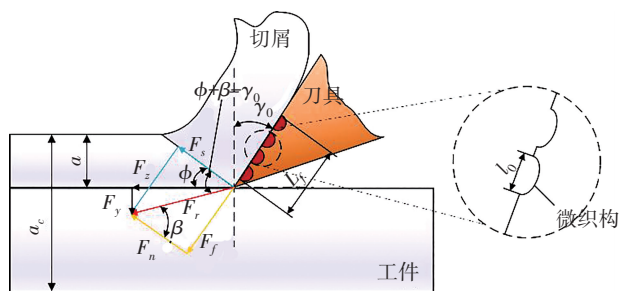


图 1 刀具直角切削模型的切削力理论分析

Fig. 1 Theoretical analysis of cutting force of right-angle cutting model with tool

切削温度是指在微织构刀具刀-屑接触区域的平均温度,即刀-屑接触区域摩擦做功的热量和剪切面上的平均温度之和<sup>[7]</sup>。如图 2 所示为微织构刀具切削过程中产生的热量在前刀面的分布情况,微织构刀具刀-屑接触区产生的平均温度如式(5)<sup>[7]</sup>:

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f = \frac{R_1 v_s \tau_s}{c_1 \rho_1 v \sin \varphi} + \theta_0 + 0.754 R_2 \tau_c \sqrt{\frac{v L_f}{\xi c_2 \rho_2 k_2}} \quad (5)$$

式(5)中, $R_1$ 是剪切面上形成的热量流进切屑的比率; $c_1$ 是平均温度的比热容,为 $\theta_0 \sim \bar{\theta}_s$ 金属材料间的温度; $\rho_1$ 为 Inconel 718 合金的密度; $v$ 为切削仿真的速度; $\tau_s$ 是金属材料的剪切强度; $\theta_0$ 为室温; $R_2$ 是形成的热量经前刀面上流进切屑的比率; $k_2$ 是温度为 $(\bar{\theta}_f + \bar{\theta}_s)$ 时切屑的导热系数; $c_2$ 是在温度为 $(\bar{\theta}_f + \bar{\theta}_s)$ 时切屑的比热容; $\rho_2$ 是在温度为 $(\bar{\theta}_f + \bar{\theta}_s)$ 时切屑的密度; $v_s$ 是剪切速度。

如式(5)所示,在其他切削条件不变的情况下,表面织构刀具的刀-屑接触区的平均温度与刀-屑接触区的长度的平方根呈正相关的关系。

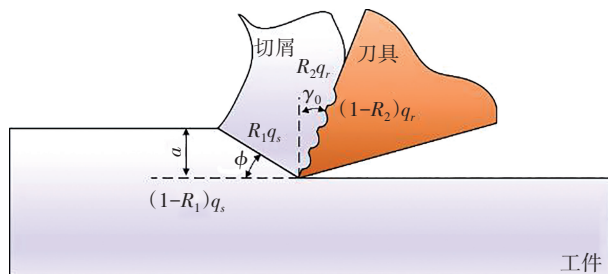


图 2 微织构刀具切削温度理论分析

Fig. 2 Theoretical analysis of cutting temperature of microtextured tool

## 2.2 有限元建模

通过三维设计软件 Solidworks 设计 3 种不同形状微织构刀具模型,分别是:方形微织构刀具 S(图 3(a))、圆形微织构刀具 C(图 3(b))以及三角形微织构

刀具 T(图 3(c))。表面织构宽度  $l_0$  为  $100 \mu\text{m}$ ,深度  $h$  为  $50 \mu\text{m}$ ,间隔距离  $D$  为  $100 \mu\text{m}$ 。将设计好的刀具导入有限元仿真软件 DEFORM 中,建立如图 4 所示的三维有限元车削模型。在有限元仿真切削模拟过程中,刀具设为刚体,工件设为塑性体,刀具材料为硬质合金。无织构硬质合金刀具和 3 种微织构硬质合金刀具采用相对网格划分的方法,划分为 50 000 个相对网格数目,在刀具刀尖处以及表面微织构处进行局部网格细化,最小网格尺寸设置为  $0.000 1 \text{ mm}$ 。工件为 Inconel 718 合金材料,其长度为  $15 \text{ mm}$ ,在 Workpiece Shape 中选择曲线模式显示,网格划分选择相对网格划分,网格划分数目为 50 000 个相对网格数目。

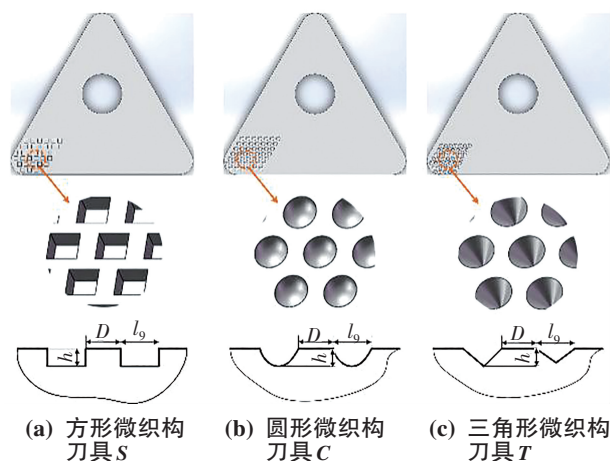


图 3 微织构刀具的三维建模

Fig. 3 Three-dimensional modeling of micro-textured tool

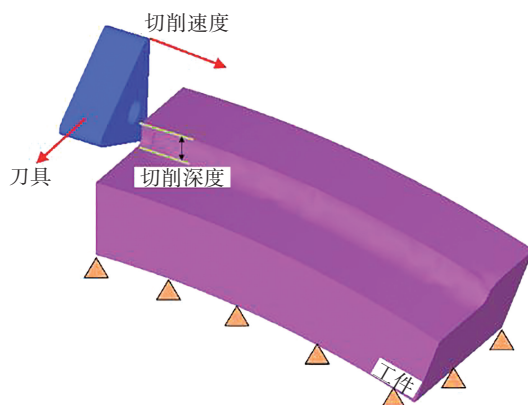


图 4 有限元仿真车削模型

Fig. 4 Finite element simulation turning model

设置工件的材料模型时,必定要全面考虑在切削过程中工件材料的弹塑性变形<sup>[11]</sup>。本研究选取广泛使用的 Johnson Cook 本构模型<sup>[9]</sup>,该模型普遍适用于实际切削过程中温度高、变形大、高应变率的条件下金属材料

料的塑性变形以及失效过程,即:

$$\sigma=(A+B\varepsilon_p^n)\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)(1-T^{*(m)})\tag{6}$$

其中, $\sigma$  是材料的流动应力(MPA); $A$  是屈服应力强度(MPA); $B$  是应力强化常数; $\varepsilon_p^n$  是等效塑性应变; $n$  指的是应变硬化指数; $C$  是应变速率强化参数; $\dot{\varepsilon}$  是等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$  是应变速率;取静态应变速率  $1.0\text{ s}^{-(1)}$ ,  $T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$ ;  $T$  是样品的环境温度;  $T_r$  是室温;  $T_m$  是

材料的熔点; $m$  是在室温下应变速率的灵敏度。  
 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$  为常数,数值如表 1 所示。工件材料化学组成成分如表 2 所示。

表 1 Inconel 718 材料的本构模型参数<sup>[12]</sup>

Table 1 Constitutive model parameters for Inconel 718 material<sup>[12]</sup>

| 材 料         | $A/\text{MPa}$ | $B/\text{MPa}$ | $C$   | $m$ | $n$  | $T_m/^{\circ}\text{C}$ | $T_r/^{\circ}\text{C}$ |
|-------------|----------------|----------------|-------|-----|------|------------------------|------------------------|
| Inconel 718 | 450            | 1 700          | 0.017 | 1.3 | 0.65 | 1 320                  | 20                     |

表 2 镍基高温合金合金 Inconel 718 的化学成分<sup>[10]</sup>

Table 2 Chemical composition of superalloy nickel-based Inconel 718<sup>[10]</sup>

| 元素    | Ni     | Cr     | Fe     | Nb    | Mo    | Ti    | Co    | Cu    | Si    | Mn    | C     |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| wt. % | 53. 87 | 18. 63 | 17. 66 | 4. 94 | 2. 89 | 0. 92 | 0. 24 | 0. 12 | 0. 13 | 0. 08 | 0. 03 |

3 仿真分析

3.1 微织构刀具的切削力与切削温度分析

本研究通过硬质合金刀具与 3 种微织构刀具车削 Inconel 718 合金的有限元仿真模拟,对比 4 种刀具在切削仿真模拟过程中切削力的变化。4 组仿真模拟参数设置相同,参数设置为切削深度 0.5 mm,进给量为 0.16 mm/rev,切削速度为 120 m/min。在有限元仿真模拟中,对每种刀具重复多次仿真切削对比,对多组仿真模拟数据进行拟合。根据 4 组刀具的有限元仿真结果对比,分析硬质合金刀具与 3 种微织构刀具的切削性能,比较 3 种不同形状的表面织构对车削 Inconel 718 合金切削性能的影响。

选取 4 种刀具在相同切削长度下,观察 4 种刀具的三向切削力的变化。随着有限元软件 DEFORM 中的切削仿真模拟的进行,将相关数据结果导出,并进行数据处理,将 4 种刀具在相同切削条件下的三向切削力进行分类对比分析;结果显示 3 种不同形状的微织构刀具的三向切削力均小于硬质合金刀具。在仿真切削过程中,轴向力先增大逐渐平缓变化;4 种刀具的主切削力呈逐渐增长趋势;取切削过程中期,径向力在一定范围内稳定波动变化。

如图 5 所示为 4 种刀具的轴向力在切削过程中的变化趋势,4 种刀具的轴向力均是先增大再减小然后趋于平稳变化的过程。可以看出硬质合金刀具的轴向力均大于 3 种微织构刀具的轴向力;随着仿真模拟中切削长度的增加,轴向力的变化逐渐趋于平稳变化。在有限元切削仿真模拟过程中,4 种刀具的轴向力均是先

增大再逐渐变化平缓,3 种微织构刀具的轴向力变化趋势相同,但轴向力的大小变化不相同。如式(4)所示,在理论分析中,3 种形状微织构设计的尺寸参数相同,认为 3 种微织构刀具的刀-屑的实际接触长度相同,与无微织构的硬质合金刀具相比,刀-屑的接触长度变小。由式(2)所示,在其他因素相同时,微织构刀具的刀-屑接触长度决定了微织构刀具的轴向力变化规律。因此,在理论上分析认为 3 种微织构刀具的轴向力是小于硬质合金刀具的轴向力。在实际切削 Inconel 718 合金仿真过程中,刀具上不同形状的微织构会影响刀-屑界面的散热效果与摩擦作用,使得切屑的卷曲状态不同,从而影响刀-屑的实际接触长度,导致轴向力存在较大差异。

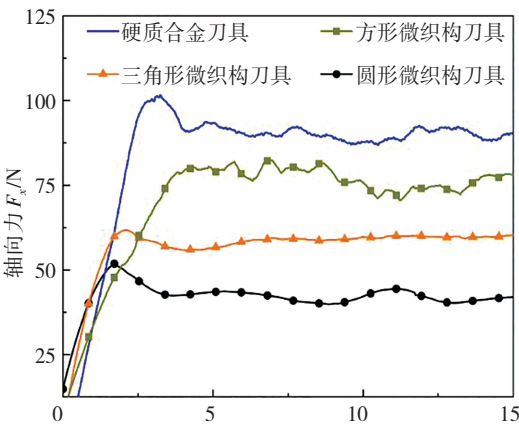


图 5 4 种刀具的轴向力变化趋势

Fig. 5 Change trend of axial force of four tools

综上,3 种微织构刀具的轴向力均小于硬质合金刀具的轴向力,3 种微织构刀具的轴向力不等,且有较大的差异。如图 5 所示圆形微织构刀具 C 的轴向力最

小,三角形微织构刀具  $T$  的轴向力次之,方形微织构刀具  $S$  的轴向力最大。

图 6 所示为 4 种刀具在仿真切削过程中的主切削力的变化趋势,取切削长度中间位置的主切削力。根据式(4)理论刀-屑接触长度可知,微织构的尺寸参数设计的相同,故此 3 种微织构刀具的实际刀-屑接触长度相同。根据式(1)可知,在相同切削条件下,微织构刀具的主切削力变化仅与实际刀-屑接触长度有关。如图 6 所示,在该切削长度范围内主切削力是逐渐平稳增加的,且硬质合金刀具的主切削力最大;3 种微织构刀具中圆形微织构刀具  $C$  的主切削力最小,方形微织构刀具  $S$  的主切削力最大。理论分析认为 3 种微织构刀具的主切削力应当小于硬质合金刀具的主切削力且 3 种微织构刀具的主切削力相等。但有限元仿真结果表明三者主切削力不等,主要原因为,不同形状的微织构在切削过程中的切削热以及刀-屑摩擦作用的差异,带来不同的排屑效果,对主切削力产生较大影响。

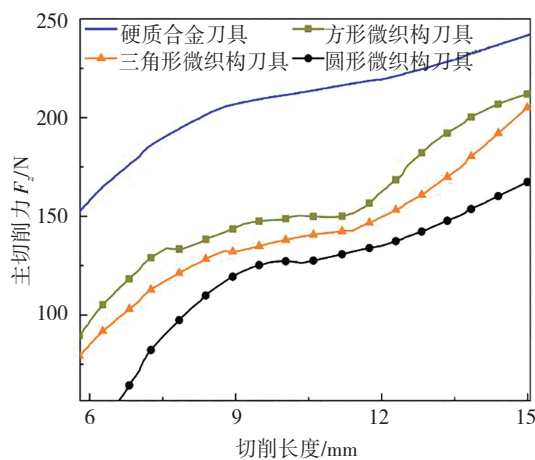


图 6 4 种刀具的主切削力变化趋势

Fig. 6 Change trend of main cutting force of four tools

图 7 所示为 4 种刀具的径向力变化趋势,选择的是仿真切削进入稳定状态的数据,对该组数据进行处理与分析。4 种刀具的径向力均进入平稳变化状态,其中硬质合金的径向力最大。根据式(4)可知,3 种微织构的尺寸相同,故 3 种微织构刀具的刀-屑接触长度相同。根据式(3)可知,在其他条件相同的情况下,3 种微织构刀具的径向力变化仅取决于微织构刀具的刀-屑接触长度,理论分析认为 3 种微织构刀具的径向力大小相同。图 7 所示 3 种微织构刀具的径向力变化趋势不同,径向力的值差异较大;硬质合金刀具的径向力大

于微织构刀具,不同形状的微织构刀具的径向力值不同,圆形微织构刀具  $C$  的径向力最小;故此不同形状的表面织构产生的切削性能不同。

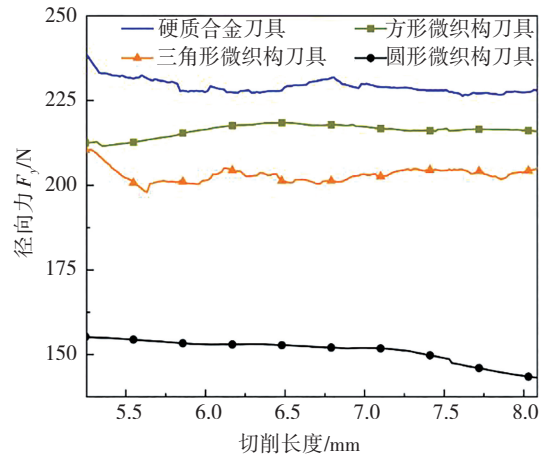


图 7 4 种刀具的径向力变化趋势

Fig. 7 Change trend of radial force variation of four tools

难加工金属材料的切削温度在一定程度上可以反映加工过程的难易程度。在金属材料切削过程中,形成的切削热越多,刀具产生的磨损越严重以及加工表面的粗糙度无法达到预期的效果。因此,在金属加工过程中,对切削温度的研究也是十分重要。本文研究硬质合金刀具与 3 种微织构刀具切削 Inconel 718 合金的切削温度的变化。分析不同微织构刀具对切削过程产生的影响,通过有限元仿真切削中 4 种刀具的切削温度变化,分析在切削过程中使用微织构刀具可以降低切削温度。在有限元切削仿真软件 DEFORM 中,4 种刀具的切削速度、进给量、切削深度均设置相同。

如图 8 所示为不同刀具车削镍基高温合金 Inconel 718 的温度云图分布,有限元切削仿真过程中 4 种刀具的刀尖与切屑接触区的切削温度最高;硬质合金刀具的切削温度偏高,微织构刀具的切削温度整体较低。根据切削温度云图分布推断 3 种表面织构均可以降低切削温度,但不同微织构形状降低切削温度的程度不完全相同。根据式(4)可知,鉴于刀具表面织构的作用,引起实际刀-屑接触长度变化。由式(5)可知,刀-屑接触长度的平方根与切削温度成正相关。实际刀-屑接触长度小于理论值,故微织构刀具的切削温度降低;表面织构的存在,导致刀-屑实际接触长度的变化,降低了刀具与切屑之间的摩擦生热,从而降低了切削过程产生的切削温度。

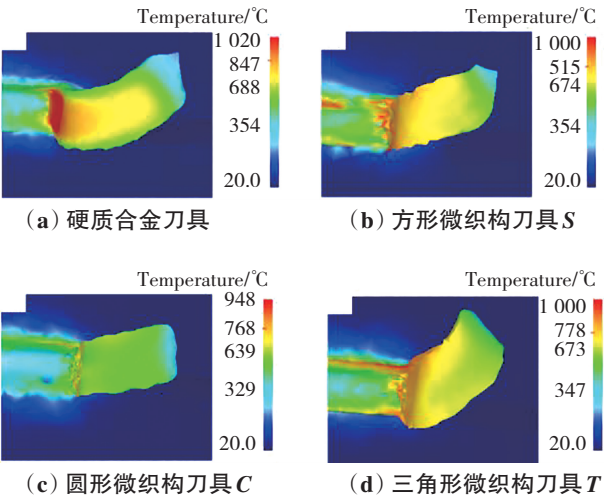


图 8 4 种刀具的切削温度云图分布

Fig. 8 Cloud chart of cutting temperature distribution of four tools

在相同仿真条件下,每种刀具进行多次仿真模拟,取仿真中切削温度的最大值,进行切削温度最大值对比。图 9 所示为硬质合金刀具和 3 种微织构刀具在相同情况下车削 Inconel 718 合金的切削温度最大值。图 9 显示 3 种微织构刀具的平均切削温度均小于硬质合金刀具,3 种微织构刀具的切削温度相较于硬质合金刀具的切削温度均降低了 100 ℃ 左右。

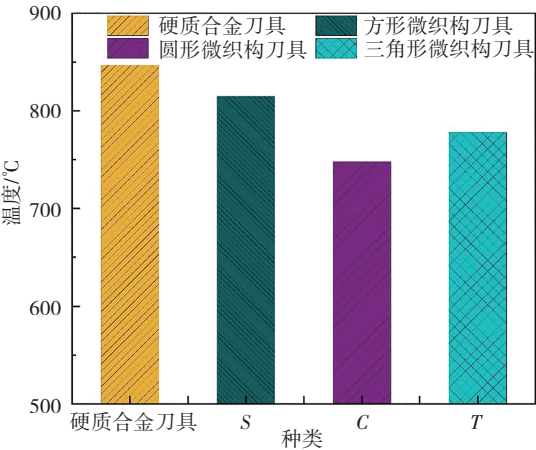


图 9 4 种刀具切削温度最大值对比

Fig. 9 Comparison of maximum cutting temperature of four tools

根据式(4)、式(5)可知,在刀具表面微织构大小尺寸相同的情况下,3 种微织构刀具的切削温度在理论上是相同的,由图 9 可知,3 种微织构刀具的切削温度最大值不相同,且都有一定的差距。通过有限元仿真模拟结果,分析认为不同形状的表面微织构刀具在车削 Inconel 718 合金切削效果也不相同。根据图 8 切削温度云图分布以及图 9 切削温度的最大值可知,3 种微织构刀具都可以降低切削温度,但切削温度降低程度不

相同。圆形微织构刀具 C 的切削温度是 3 种微织构刀具中最低的,方形微织构刀具 S 的切削温度相对较高,三角形微织构刀具 T 的切削温度介于两者之间,且三种微织构的切削温度均低于硬质合金刀具。有限元仿真模拟结果表明,刀具在前刀面加工表面微织构引起了刀-屑接触长度的变化,减少了刀-屑接触区的摩擦做功生热;同时表面微织构凹坑在散热方面也有一定的作用,当切屑流动时,凹坑增加了切屑与空气的接触,有利于降低切削过程产生的热量。鉴于以上多重作用,微织构刀具在切削时可以减少切削过程中产生的切削热,更进一步降低切削温度。

3.2 微织构刀具磨损分析

如图 10 所示为有限元仿真结束后 4 种刀具表面磨损深度云图分布情况。硬质合金刀具的磨损情况最严重,磨损区域深度高达 0.043 9 mm 左右,且邻近主切削刃处的刀尖磨损最严重。3 种微织构刀具的表面磨损较小,靠近主切削刃处的磨损严重。不同形状的表面织构刀具的磨损程度不同,圆形微织构刀具 C 的前刀面磨损最轻,仅仅在靠近主切削刃处的表面产生了一定程度的磨损,磨损深度大约为 0.027 4 mm 左右;方形微织构刀具 S 产生的磨损比三角形微织构刀具 T 严重,且最严重的磨损区域深度约 0.038 4 mm 左右,磨损区域较大;发生这种现象的主要原因是随着有限元仿真切削的进程,仿真过程产生的切屑与刀具前刀面发生一定程度的挤压、摩擦作用,致使刀具前刀面形成磨损凹坑;切削过程中产生的高温、高应力也会引起刀具表面形成磨损。圆形微织构刀具 C 的磨损深度降低了约 37.6%;三角形微织构刀具 T 的磨损深度降低了约 25.1%;方形微织构刀具 S 的磨损深度降低了约 12.5%,故表面织构可有效降低切削过程中刀具磨损问题,提高刀具的使用寿命。

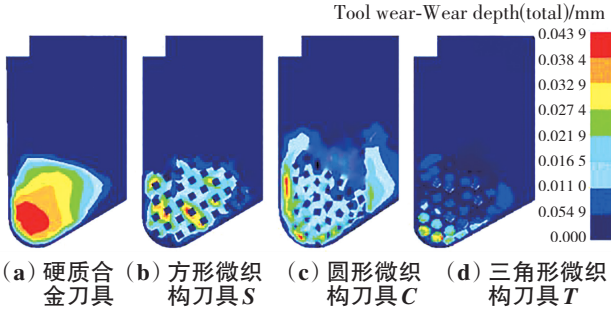


图 10 有限元仿真中刀具磨损深度分布云图

Fig. 10 Cloud chart of tool wear depth distribution in finite element simulation

## 4 结 论

本文对 Inconel 718 合金的车削性能进行了深入研究,针对有限元仿真中切削速度、切削深度、进给量等采取定量设计,探究 3 种微织构刀具与硬质合金刀具的切削性能的对比研究。针对 4 种刀具的有限元仿真数据结果进行处理,总结 4 种刀具的切削力、切削温度等变化规律;有限元仿真结果表明表面织构可以有效提高车削 Inconel 718 合金的切削性能。研究结论如下:

(1) 对切削速度、切削深度等进行定量设计。针对 4 种刀具的切削力进行相关处理,比较 4 种刀具的轴向力、径向力、主切削力变化规律。微织构刀具的三向切削力均小于硬质合金刀具,微织构刀具比硬质合金刀具的车削性能要好。刀具表面织构技术可以提高 Inconel 718 合金的车削性能。硬质合金刀具的主切削力大于微织构刀具,不同形状微织构刀具的主切削力变化趋势不同,圆形微织构刀具 C 的主切削力最小;故此不同形状的表面织构产生的切削性能不同。

(2) 在相同条件下,针对 4 种刀具车削 Inconel 718 合金切削温度进行相关研究,有限元仿真温度云图分布中可以看出微织构刀具可以降低切削过程中切削热。理论研究分析可知与硬质合金刀具对比,微织构刀具的刀-屑接触长度变小,故而微织构刀具的切削温度降低。圆形微织构刀具 C 的切削温度是 3 种微织构刀具中最低的,方形微织构刀具 S 的切削温度相对较高,但 3 种微织构的切削温度均低于硬质合金刀具。

(3) 通过有限元仿真切削刀具表面磨损深度云图分布情况显示,表面微织构可以降低刀具表面磨损问题,减少刀具与切屑的挤压作用和摩擦作用。不同形状的表面织构产生的磨损深度不同,圆形微织构刀具的表面磨损程度最低。

## 参考文献(References):

- [1] PARIDA A K, MAITY K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation[J]. Engineering Science and Technology, 2018, 21(3): 364—370.
- [2] LIU H, GUO K, SUN J, et al. Effect of Nb addition on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718

fabricated by laser directed energy deposition[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111601.

- [3] WANG R, YANG D, WANG W, et al. Tool wear in nickel-based superalloy machining: an overview[J]. Processes, 2022, 10(11): 2380.
- [4] DARSHAN C, JAIN S, DOGRA M, et al. Machinability improvement in Inconel-718 by enhanced tribological and thermal environment using textured tool[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138(1): 273—285.
- [5] SIVAIAH P, AJAY KUMAR G V, SINGH M M, et al. Effect of novel hybrid texture tool on turning process performance in MQL machining of Inconel 718 superalloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(1): 61—71.
- [6] ZHANG N, YANG F, LIU G. Cutting performance of micro-textured WC/Co tools in the dry cutting of Ti-6Al-4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(9): 3967—3979.
- [7] DENG J X. Micro-textured tool and its machining[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1—14.
- [8] ORRA K, CHOUDHURY S K. Tribological aspects of various geometrically shaped micro-textures on cutting insert to improve tool life in hard turning process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 502—513.
- [9] 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.
- [10] PANG K, WANG D. Study on the performances of the drilling process of nickel-based superalloy Inconel 718 with differently micro-textured drilling tools[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 180: 1—10.
- [11] 王哲, 李磊, 沈雪红. Inconel 718 镍基高温合金车削切削力和切削温度分析[J]. 工具技术, 2019, 53(11): 51—54.  
WANG Zhe, LI Lei, SHEN Xue-hong. Analysis of cutting force and cutting temperature of nickel-based superalloy Inconel 718 based on grey relational analysis[J]. Tool Engineering, 2019, 53(11): 51—54.
- [12] UÇAK N, ÇİÇEK A. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 662—673.

责任编辑:陈 芳