

# 织构分布对刀具切削性能影响的有限元分析

王晓明, 曹同坤, 孙何, 赵涛

(青岛科技大学, 山东 青岛 266000)

**摘 要:** **目的** 研究刀具表面织构分布对刀具切削性能的影响。**方法** 基于大型非线性分析软件 ABAQUS 进行刀具二维切削 Ti6Al4V 的有限元仿真, 收集切削力数据, 通过切削实验进行验证, 误差符合后进行等间距、非等间距和混合型织构的有限元仿真, 收集切削力、切削热等切削数据进行分析。**结果** 提取结果后与无织构刀具相比, 等间距织构刀具的最高温度降低 12.4%, 非等间距织构刀具的最高温度降低 14.5%, 混合型织构刀具的最高温度降低 16.5%。与无织构刀具相比, 等间距织构刀具的主切削力降低 9.8%, 非等间距织构刀具的主切削力降低 11.2%, 混合型织构刀具的主切削力降低 12.6%。**结论** 在刀具表面加工适当的织构可以提高刀具的切削性能, 织构间距越小, 织构的减摩作用越明显, 与等间距织构相比, 非等间距织构减摩效果更好。织构分布过于密集易造成加工中的震动问题, 在微织构中添加尺寸更小的微细级织构, 既能减小刀屑接触面积, 又避免了因间距过小导致刀具强度降低的问题。

**关键词:** 表面织构; 有限元仿真; 切削力; 切削热; 织构间距

**中图分类号:** TG113.26+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0258-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.041

## Finite Element Analysis of Texture Distribution on Tools Properties

WANG xiao-ming, CAO Tong-kun, SUN He, Zhao Tao

(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of surface texture distribution on tools machinability. Finite element simulation of Ti6Al4V was completed by using a 2D model based on the large-scale nonlinear analysis software ABAQUS, cutting force data was collected and verified based upon cutting experiments, finite element simulation of equispaced, non-equispaced and mixed texture were done once errors was qualified, and cutting data such as cutting force and cutting heat was collected for analysis. Compared with texture-free cutting tools, maximum temperature of equispaced texture tool decreased by 12.4%, that of non-equispaced texture cutting tool by 14.5%, and mixed texture tool by 16.5%. Compared with texture-free tools, principal cutting force of equispaced texture tool decreased by 9.8%, that of non-equispaced texture tool by 11.2%, and mixed texture tool by 12.6%. Proper surface texture can improve machinability of tools, the smaller the distance between the texture is, a more obvious role will texture plays in reducing friction. Antifriction effect of the non-equidistance texture was better than that of equispaced texture. Too dense texture leads to vibration during cutting. Adding smaller superfine texture in microtexture can not only reduce contact area of tool chip, but also avoid tool strength decrease as a result of undersize gap.

收稿日期: 2017-04-14; 修订日期: 2017-05-24

Received: 2017-04-14; Revised: 2017-05-24

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2016EEM41)

Fund: Supported by Shandong Natural Science Foundation of China (ZR2016EEM41)

作者简介: 王晓明 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进制造。

Biography: WANG Xiao-ming (1992—), Male, Master, Research focus: advanced manufacturing.

通讯作者: 曹同坤 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为切削加工。

Corresponding author: CAO Tong-kun (1976—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: cutting process.

KEY WORDS: surface texture; finite element simulation; cutting force; cutting heat; texture distance

近年来，微织构技术在摩擦学领域不断发展，有效改善了摩擦副之间的磨损，在切削加工领域也逐渐显示出巨大潜力。表面织构是在摩擦区域加工一定形状的微沟槽、微凹坑，从而提高接触表面的承载能力或者减小表面摩擦系数的一种表面处理方法<sup>[1]</sup>。目前刀具织构大致分为微凹坑、微沟槽和混合型/微纳复合织构。国内外学者对不同织构进行了大量实验，证明织构刀具的减摩特性很大程度取决于织构设计的合理性，合理的织构设计对于刀具减摩、切屑断屑等有重要影响<sup>[2-9]</sup>。

目前表面织构的研究方式主要为切削实验，但是表面织构的研究周期长，制造成本高。随着计算机技术的发展，许多学者将有限元技术引入切削加工领域，有效提高了分析效率和分析精度，也减小了设计过程中的实验投入。针对织构刀具切削过程仿真的研究还处在初级阶段。冯秀亭等人<sup>[10]</sup>在陶瓷刀具基础上，运用有限元技术模拟，取得了陶瓷刀具切削 45 淬火钢织构的最优结构。邓杰勇等人<sup>[11]</sup>利用 ABAQUS 软件模拟了刀具切削钛合金的过程，通过中心复合实验得出织构参数对主切削力的影响。还有研究者运用有限元技术研究织构刀具，针对织构的宽度、间隔、深度做了大量模拟<sup>[12-14]</sup>。笔者认为织构起减摩作用的原因是改变了刀屑接触面积，在织构存在处，刀具不再与工件产生边界摩擦，而是工件与刀具织构内的空气进行摩擦，而且在刀屑接触区域，摩擦系数不是不变的，这样等间距的微织构设计对于织构减摩不是最适合的，所以本文设计并模拟了非等间距织构刀具的切削过程。

1 有限元模型建立及模拟计算

1.1 几何模型建立

工件材料的尺寸为 5 mm×1 mm，初始划分为稳

定性好的位移-温度耦合一阶线性平面四边形单元 CPE4RT，在刀屑接触区进行细化。刀具尺寸前角为 0°，后角为 7°，刀具初始自由划分为位移-温度耦合三角形单元 CPE3T，对刀尖处进行网格细化。限制材料底端及左端所有自由度和刀具顶端 Y 方向移动自由度，刀具由右向左移动，实现切削过程的模拟。刀具和工件设为变形体，本文只针对垂直于切削流向方向的沟槽型织构进行研究。本构模型见图 1。

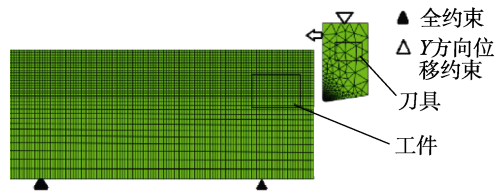


图 1 有限元模型示意图  
Fig.1 Sketch of finite element model

1.1.1 材料模型

在实际切削过程中，工件材料在高温、大应变环境下产生塑性变形。综合考虑，本文采用 Johnson-Cook 本构模型，其本构方程为：

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

式中： $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}$  分别为材料屈服应力、等效塑性应变和等效塑性应变率；A、B、C、n、m 为材料常数，A=860 MPa，B=683 MPa，C=0.035，n=0.47，m=1.0； $T_m$ 、 $T_r$ 、T 分别为材料熔化温度、转变温度和动态温度。

1.1.2 硬质合金 YG8 材料参数

硬质合金刀具 YG8 的主要成分为 92%WC 和 8%Co（均为质量分数），密度为 14.4~14.6 kg/cm<sup>3</sup>，其主要力学性见表 1。

表 1 YG8 刀具物理和热力学性能  
Tab.1 Physical and thermodynamic properties of YG8 cutting tools

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	线膨胀率/(m·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	比热/(J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	导热率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
YG8	640	0.22	4.5×10 <sup>-6</sup>	220	75.4

1.2 切削热产生

在切削过程中，切削热来自金属塑性变形和刀屑接触摩擦功，平面正交热传导方程为：

$$k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right] + \dot{q} = \rho C_p \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial Y} \right] \quad (2)$$

式中： $\dot{q}$  为单位体积热产生率， $\dot{q} = \dot{q}_p + \dot{q}_f$ ； $\rho$  为

材料的密度；k 为材料热传导系数；C<sub>p</sub> 为材料比热；u、v 为工件热源在 X、Y 方向上的分量。

塑性变形产生热量为：

$$\dot{q}_p = \eta_p \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} / J \quad (3)$$

式中： $\dot{q}_p$  为塑性变形功产生的体积流热率； $\eta_p$  为塑性功换热系数，本文取 0.9； $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$  分别为等效应力与等效应变；J 为热功当量系数。

前刀面摩擦生热为:

$$\dot{q}_f = \eta_f \tau_f v_{\text{chip}} / J \quad (4)$$

式中:  $\dot{q}_f$  为摩擦功产生体积流率;  $v_{\text{chip}}$  为相对滑动速率;  $\eta_f$  为摩擦功转换系数, 取 0.5, 即假定摩擦热各有一半分别传递到刀具和切屑。

### 1.3 仿真其他设置

边界条件: 刀具与工件设置为室温 20 °C, 工件其余部分与空气接触, 忽略空气对流传热。

目前现有的切屑分离准则有几何分离准则与物理分离准则, 本文采用物理分离准则。科研人员已通过实验建立了在各种条件下的等效塑性应变准则, 对于 JC 模型具体形式如下:

$$\varepsilon_f^{\text{pl}} = \left[ d_1 + d_2 e^{\left( d_3 \frac{\sigma_n}{\sigma_{\text{mise}}} \right)} \right] \cdot \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\varepsilon^{\text{pl}}}{\varepsilon_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 + d_5 \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{\text{melt}} - \theta_r} \right) \right] \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_f^{\text{pl}}$  为临界等效塑性应变;  $\sigma_n$  为正压力;  $\sigma_{\text{mise}}$  为 Mises 应力;  $\varepsilon^{\text{pl}}$  为应变速率;  $\varepsilon_0$  为参考应变速率, 本文取  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ;  $\theta_{\text{melt}}$  为材料熔化温度;  $\theta_r$  为参考室温, 取 20 °C;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$  为材料失效参数, 分别设为 -0.09、0.25、-0.5、0.014、3.87。

### 1.4 模拟计算与模型验证

为验证此模型的正确性, 针对不同切削速度与进给量进行仿真模拟, 具体参数见表 2。

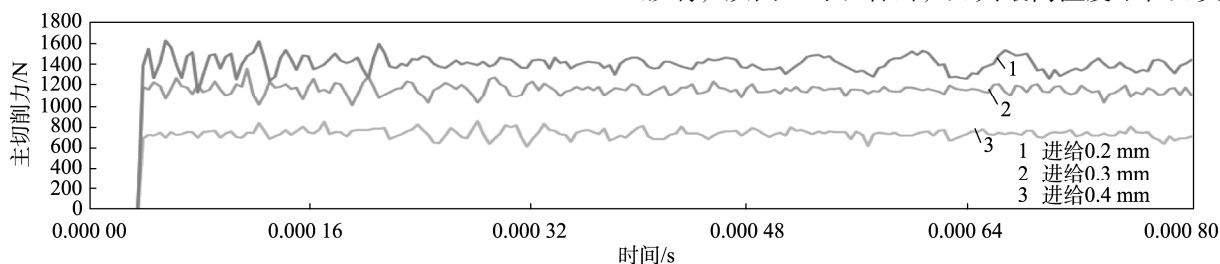
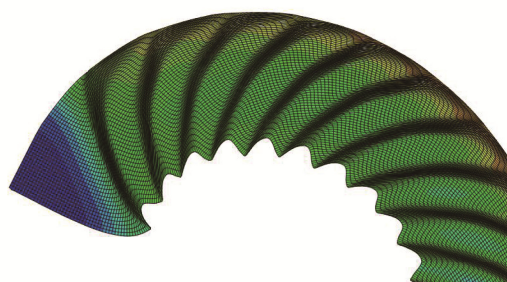
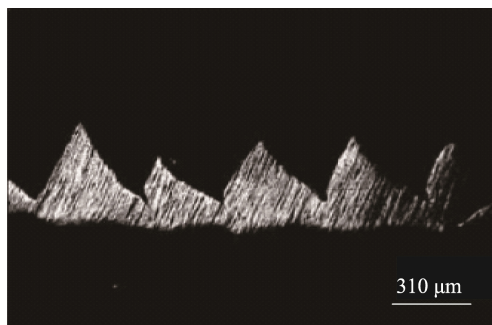


图2 切削速度为 140.2 m/s 时切削力仿真结果  
Fig.2 Simulation of cutting force when  $v=140.2 \text{ m/s}$



a 仿真结果



b 实验结果

图3 仿真与实验切屑对比

Fig.3 Simulation and experimental comparison of chip ( $v=104.6 \text{ m/s}$ ,  $f=0.4 \text{ mm/r}$ ): a) simulation result, b) experimental result

表2 模拟切削参数

Tab.2 Simulation cutting parameters

切削速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	140.6	89.2	62.5	140.6	140.6
进给量/( $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ )	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2

钛合金车削实验在 CA6140 车床完成, 刀具前角为 0°, 后角为 7°, 带有断屑槽。刀杆主偏角为 90°, 刃倾角为 0°。采用 DCL-03A 三向车削测力仪, 车削结束后, 通过 MM6 金相显微镜观察切屑形态<sup>[15]</sup>。

提取切削速度为 140.2 m/s 时, 不同进给量下切削力的模拟变化曲线见图 2, 可知随着进给量的增加, 刀具所受切削力不断增加。此外在相同进给量的切削条件下, 切削力先增大后减小再增大。因为在切削产生锯齿形切屑的过程中, 第一变形区的材料开始滑移时, 切削力数值减小, 随着切屑的堆积, 切削力又增大。切削力曲线产生波动, 该切削力模拟曲线与实际切削过程的变化规律较一致。

图 3 为仿真与切削实验切屑对比, 切削速度为 140.6 m/s, 进给量为 0.4 mm/r, 可以得出模拟切屑与切削实验的锯齿形切屑基本相符。从模拟过程中可以看出: 切削开始时, 第一变形区塑性变形产生大量切削热, 在刀尖处出现较高温度 (图 4a)。随着切削不断进行, 前刀面与切屑不断摩擦产生大量切削热, 在刀尖以上一定位置产生高温区 (图 4b); 此外, 前刀面刀尖处的温度梯度很大, 并且由前刀面向刀具底部逐渐过渡, 刀屑接触以外区域的温度较低。

在切削过程中, 切削温度对刀具的耐用度有很大影响, 从图 4 可以看出, 刀具最高温度不在刀尖处,

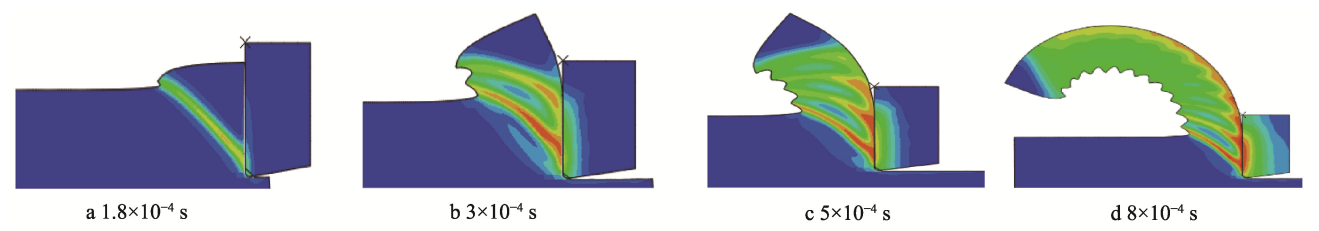


图 4 切屑形成过程  
Fig.4 Simulation of chip formation process

这说明距刀尖一定距离位置处，在切削过程中，塑性产热和摩擦产热的双重作用导致温度比刀尖处还高，此外切削过程中大量切削热由切屑带走（图 4d），自此验证了仿真过程中刀具温度分布场分布规律的合理性。试验值与模拟值的误差见表 3，可见主切削力的试验值与模拟值误差在 10%以内，仿真结果具有可信度，可利用此模型进行进一步的仿真试验。

表 3 切削力实验与仿真数据  
Tab.3 Cutting force experiment and simulation data

切削速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	进给量 /(mm·r <sup>-1</sup> )	切削力实 验值 <sup>[15]</sup> /N	切削力模拟 值/N	误差/%
140.6	0.4	1579	1431.3	9.35
89.2	0.4	1650.3	1509.3	9.78
62.8	0.4	1682.7	1521.2	9.5
140.6	0.3	1214.5	1129.9	6.9
140.6	0.2	878.5	805.6	8.3

2 仿真结果与讨论

2.1 织构分布对切削性能的影响

为分析织构分布对刀具切削性能的影响,在切削速度为 140.6 m/s、进给量为 0.3 mm/r 和切削深度为 0.3 mm 的前提下，本文设计三种织构刀具来进行模拟，分别为等间距织构刀具（T1）、非等间距织构刀具（T2）和微细混合型织构刀具（T3），三种刀具网格划分见图 5，分布示意图见图 6，结构尺寸见表 4。T1 刀具为传统微米级织构刀具。T2 为改变织构间距，间隔不相同，在摩擦区根据摩擦剧烈程度做调整，摩擦系数大的区域密集，小的区域稀松。T3 为在 T1 刀具基础上，两织构中间添加尺寸更小的微细织构。为防止仿真过程中由于

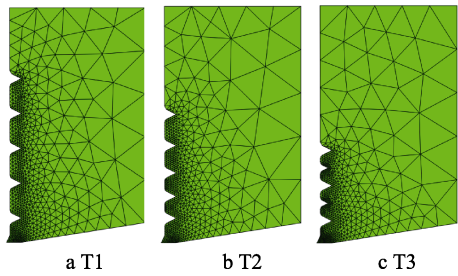
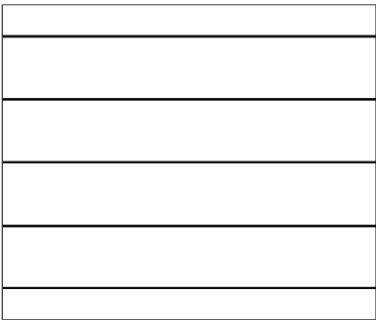


图 5 三种刀具网格图  
Fig.5 Mesh of the tool

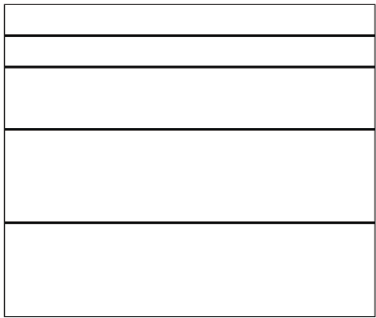
切屑单元变形过大而导致计算中止，在刀具刀尖处做微小倒角处理，这并不影响最终结果。

表 4 三种刀具结构形式  
Tab.4 Structural between different tool

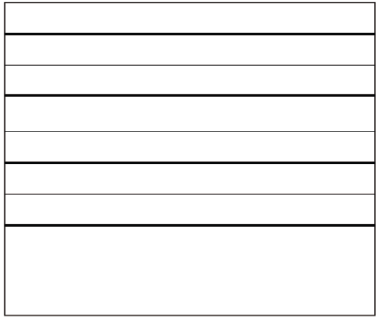
名称	织构宽度/ $\mu\text{m}$	织构间隔/ $\mu\text{m}$
T1	30	60
T2	30	20、20、30、40、50
T3	30、10	30



a 等间距织构



b 非等间距织构



c 混合型织构

图 6 摩擦区织构分布示意图

Fig.6 Sketch map of texture distribution in friction area: a) equidistant texture, b) non-equidistant texture, c) mixed texture

## 2.2 织构分布对刀具切削温度的影响

分别对三种刀具进行切削模拟仿真,得到三种刀具温度分布,与无织构刀具对比可知,织构可以明显减少切削过程中切削热的产生。提取刀具最高温度(如图7所示),与无织构刀具相比,T1刀具的最高温度降低12.4%,T2刀具的最高温度降低14.5%,T3刀具的最高温度降低16.5%。切削中,前刀面不停地与工件切屑摩擦,产生大量切削热。以T1刀具为例,由于前刀面存在织构,实际减小了切削过程中刀屑的接触面积,切屑与刀具传热面积减小,故织构刀具的最高温度低于无织构刀具。

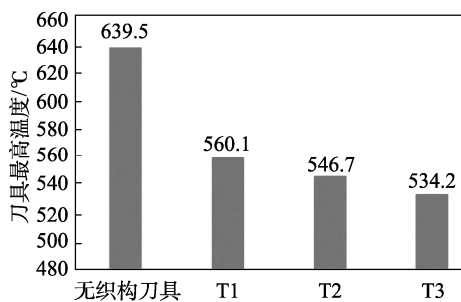


图7 仿真温度结果

Fig.7 Result of simulation temperature

图8为切削模拟刀具温度梯度图,比较T1与T2刀具,两刀具织构宽度相同,T1为等间隔,T2为在摩擦剧烈区间隔小且间隔随着前刀面摩擦区剧烈程度变化,摩擦恶劣的地方间隔较小,轻缓区域间隔稍大。结果表明,T2刀具的减摩效果优于T1刀具。

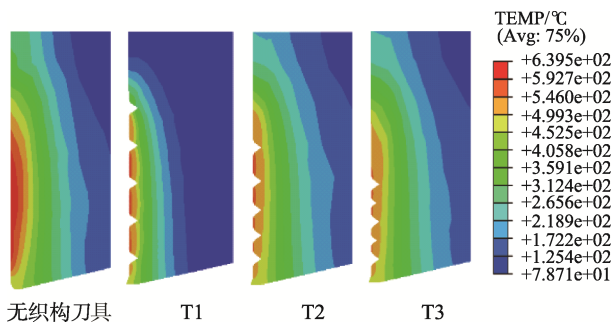


图8 刀具温度分布图

Fig.8 Result of tools temperature

T3设计为在T1刀具基础上,在间隔中间增加微细织构,这样原来起减摩作用的织构个数增加,实际上减小了刀屑接触面积。从结果可以看出,T3刀具的最高温度低于T2刀具。

## 2.3 织构分布对刀具切削力的影响

观察切削力仿真曲线(图9)可知,当刀具存在织构后,切削力明显降低,切削力数值发生震荡。分析认为由于前刀面存在织构,使得切削过程中刀屑接触面积不断发生变化,故在切削过程中切削力震荡变

化,并且当织构设计不当时,切屑易进入织构内部,引起二次切削,降低已加工表面的光洁度。对模拟切削力进行提取,得到仿真切削力结果如图10所示。取切削稳态后切削力的仿真平均值,与无织构刀具相比,T1主切削力降低9.8%,T2降低11.2%,T3降低12.6%。三种刀具平均切削力最小是T3,震荡幅度最小的也是T3。在仿真模拟中,T2、T3刀具都较T1刀具有更好的减摩效果,分析认为T2、T3刀具在摩擦严重区域减小的接触面积较T1多。T3所受切削力最小,T2刀具由于采用非等间距织构,导致在摩擦区的强度低于混合型织构,受力更大。

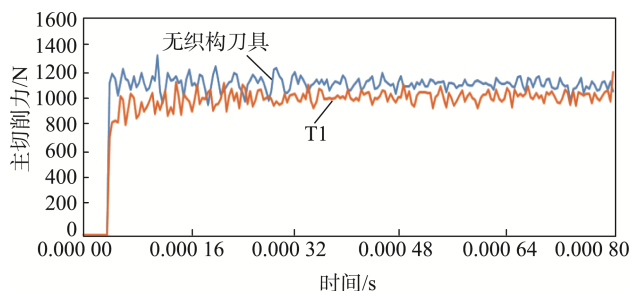


图9 切削力仿真(切削速度140.6 m/s,进给量0.3 mm/r)

Fig.9 Simulation of cutting force ( $v=140.6$  m/s,  $f=0.3$  mm/s)

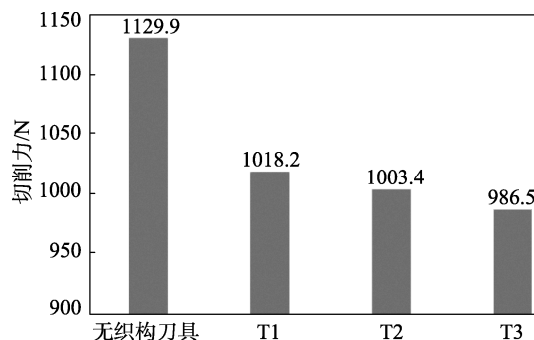


图10 切削力仿真结果

Fig.10 Result of cutting force

## 3 结论

1)通过ABAQUS软件对无织构刀具和织构刀具进行了切削过程的仿真分析,在刀具表面加工适当的织构可以提高刀具的切削性能,降低刀具在切削过程中的切削力和切削温度。与无织构刀具相比,等间距织构刀具的主切削力减少9.8%,前刀面的切削温度降低12.4%。

2)织构的布置形式会对刀具的切削性能产生影响,与等间距织构刀具相比,非等间距与混合型织构刀具能进一步提高刀具的切削性能。在相同切削条件下,相较于等间距织构刀具,非等间距织构刀具的主切削力减小1.4%,混合型织构刀具减小2.8%;非等间距织构刀具摩擦区的最高温度降低2.1%,混合型织构刀具降低3.9%。

## 参考文献:

- [1] 王晓雷, 王静秋, 韩文非. 边界润滑条件下表面织构减摩特性的研究[J]. 润滑与密封, 2007(12): 36-39.  
WANG Xiao-lei, WANG Jing-qiu, HAN Wen-fei. Effect of Surface Texture on Friction Reduction under Boundary Lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2007(12): 36-39.
- [2] 吴克忠, 陈永洁, 朱丹丹, 等. 减摩槽在三维槽型刀片中的应用[J]. 工具技术, 2005, 39(5): 53-55.  
WU Ke-zhong, CHEN Yong-jie, ZHU Dan-dan, et al. Application of Friction-reducing Groove on Insert with 3D Chip-breaking Groove[J]. Tool Engineering, 2005, 39(5): 53-55.
- [3] DAVI N, ANSELMO E D, MILTON S F L. Microstructural Analyses and Wear Behavior of the Cemented Carbide Tools after Laser Surface Treatment and PVD Coating[J]. Applied Surface Science, 2013, 282: 680-688.
- [4] LEI Shu-ting, DEVARAJAN S, CHANG Zeng-hu. A Study of Micro Pool Lubricated Cutting Tool in Machining of Mild Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1612-1620.
- [5] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, et al. Development of Cutting Tools with Micro Scale and Nano Scale Textures to Improve Frictional Behavior[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 248-254.
- [6] 胡天昌, 胡丽天, 张永胜. 45<sup>#</sup>钢表面复合润滑结构的制备及其摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 14-20.  
HU Tian-chang, HU Li-tian, ZHANG Yong-sheng. Preparation of Composite Lubrication Structure and Its Tribological Properties on 45<sup>#</sup> Steel Surface[J]. Tribology, 2012, 32(1): 14-20.
- [7] 谢晋, 罗敏健, 吴可可, 等. CBN 车刀前刀面微沟槽结构磨削及其对干切削温度的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 192-197.  
XIE Jin, LUO Min-jian, WU Ke-ke, et al. Micro-grinding of Micro-grooved Rake Surface of CBN Cutter Influencing Dry Cutting Temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 192-197.
- [8] 邢佑强, 邓建新, 冯秀亭, 等. 微纳复合织构自润滑陶瓷刀具的制备及切削性能[J]. 航空制造技术, 2013(6): 42-46.  
XING You-qiang, DENG Jian-xin, FENG Xiu-qing, et al. Fabrication and Properties of Micro/Nano-textured Self-lubricated Ceramic Tool in Dry Cutting[J]. Aero-nautical Manufacturing Technology, 2013(6): 42-46.
- [9] 孙华亮, 涂杰松, 商宏飞, 等. 织构对涂层刀具切削性能影响的有限元分析及实验研究[J]. 现代制造工程, 2013(9): 1-6.  
SUN Hua-liang, TU Jie-song, SHANG Hong-fei, et al. Study on the Effect of Texture on Cutting Performance of the Coated Tool with Finite Element Analysis and Experimental Method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(9): 1-6.
- [10] 冯秀亭, 邓建新, 邢佑强, 等. 微织构陶瓷刀具切削性能的有限元分析[J]. 工具技术, 2013, 47(10): 23-28.  
FENG Xiu-ting, DENG Jian-xin, XING You-qiang, et al. Finite Element Analysis of Properties of Micro-textured Ceramic Tools[J]. Tool Engineering, 2013, 47(10): 23-28.
- [11] 邓杰勇, 郑清春, 胡亚辉, 等. 基于ABAQUS的微织构刀具切削机理研究[J]. 工具技术, 2016, 50(11): 23-27.  
DENG Jie-yong, ZHENG Qing-chun, HU Ya-hui, et al. Study on Theory of Cutting of Micro Textured Tool Based on ABAQUS[J]. Tool Engineering, 2016, 50(11): 23-27.
- [12] 亓婷. 微织构自润滑刀具的结构设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
QI Ting. Study on the Structure Design of Micro-textured Self-lubricating Tools[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [13] 程职玲, 李嫚, 周锡宝, 等. 基于 ABAQUS 镍基高温合金锯齿形切屑形成过程的有限元模拟[J]. 现代制造工程, 2016(6): 99-103.  
CHENG Zhi-ling, LI Man, ZHOU Xi-bao, et al. Finite Element Simulation About the Serrated-chip Formation Process of Ni-base Super Alloy Based on ABAQUS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(6): 99-103.
- [14] 陈碧冲. 微织构刀具的设计与切削性能试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
CHEN Bi-chong. The Design of Micro Texture Tool and Experimental Research of Its Cutting Performance[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [15] 付杰. 难加工金属材料切削加工过程物理仿真与实验研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2013.  
FU Jie. Physical Simulation and Experimental Research on the Cutting Process of Difficult to Cut Metallic Material[D]. Hu'nan: Hunan University, 2013.