

# 硬态切削表面残余应力分析研究\*

## Study on Surface Residual Stress of Hard Cutting

西北工业大学机电学院 李万钟 屈健康 李娜娜 徐颖强  
中航光电科技股份有限公司 郭彩虹

**[摘要]** 以轴承钢 GCr15 为研究对象,根据热-弹塑性有限元理论,建立了热力耦合的二维正交硬态切削模型。根据硬态切削的特点,在硬态切削有限元模型中设置了未预先设置分离线的点面接触并选择了 Johnson-Cook 材料本构模型,通过有限元分析计算,得到了不同切削参数和刀具几何参数条件下已加工表面残余应力的模拟结果。对结果进行比较分析得出,最大压残余应力出现在工件表面,沿着深度的增加工件内部的残余应力由残余压应力转化为残余拉应力,并逐渐趋向于零。这对于控制和提高硬态切削工件表面质量具有重要的理论指导意义。

**关键词:** 硬态切削 热力耦合 温度场 残余应力 有限元

**[ABSTRACT]** Taking bearing steel GCr15 as the object, the thermal-mechanical 2D orthogonal hard cutting simulation model is established based on the thermal elastic-plastic mechanics. The finite element model of hard cutting is established with the point-surface contact of failing to set separation line and the Johnson-Cook material constitutive model according to the characteristics of the hard cutting. The effects of the cutting parameters and cutting tool's geometric on the residual stress of the machined surface are obtained by the ABAQUS software. The results indicate that maximum compressive residual stress exists in surface, the compressive residual stress translates into tensile residual stress along the increasing of depth inside the workpiece, and gradually tends to zero. It has important theoretical guiding significance for controlling and improving the workpiece surface of hard cutting.

**Keywords:** Hard cutting Thermal-mechanical coupling Temperature field Residual stress Finite element

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.064

随着切削技术的发展,尤其是超硬刀具材料陶瓷、

聚晶立方氮化硼(PCBN)的出现,使得精密切削加工淬硬钢成为可能,产生了“以车带磨”的硬态切削加工技术。该技术具有加工效率高、污染小、加工柔性较高等优点,可大大降低成本、减小污染,已经在模具、轴承、齿轮、机床、汽车制造业及航空航天工业等领域得到了应用。

加工表面的残余应力场是机械载荷和热载荷共同作用的结果。硬态切削是对高硬度的材料进行加工,而且在加工过程中不用或少用切削液,这导致了在切削加工过程中刀具和工件都承受了高的机械载荷和热载荷。因此,硬态切削表面有着其独特的残余应力场。

Wen 等<sup>[1]</sup>运用有限元的方法模拟研究了加工表面残余应力的分布规律,并与试验结果进行了比较,其趋势出现了较好的一致性。Umbrello 等<sup>[2]</sup>运用神经网络的方法,并结合有限元软件模拟,预测了硬态切削中淬硬钢 52100 的残余应力分布。Thiele 等<sup>[3-4]</sup>研究结果表明:增大前角或刀尖圆弧半径可增大表面压应力,通常是使压应力的深度和振幅都增大,而切削速度的增大会减小残余压应力或使压应力转变为拉应力。国内学者张雪萍等<sup>[5]</sup>运用正交试验方法对精密干切削淬硬零件的表面完整性进行了分析。

目前,针对硬态切削这方面的研究主要集中在机理方面,而对硬车残余应力的预测研究较少。因此,通过数值模拟的方法预测硬态切削表面残余应力的分布状态,分析切削参数和刀具几何参数对硬态切削表面残余应力场的影响,对于提高硬态切削的表面质量具有重要的理论指导意义。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 材料的本构模型

材料的动态塑性本构关系是切削过程中被加工材料体现出来的力学行为,在切削加工的有限元仿真模型中起着至关重要的作用。本研究工件的材料是轴承钢 GCr15,刀具采用的是 PCBN 刀具,表 1 和表 2 分别给出了工件的材料 GCr15 和 PCBN 刀具材料的物理参数<sup>[6-7]</sup>。

在硬态切削过程中伴随着高的应变率和切削温度,

\* 国家自然科学基金项目(50875214,10672134,11072196)资助。

表1 工件的材料GCr15的物理参数

温度 / °C	杨氏模量 / GPa	泊松比	热膨胀系数 / ( $\times 10^{-6} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	热传导率 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	失效应变	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热 / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	奥氏体相变温度 / °C
20	201	0.277	11.5	52.5	0.011	7812	458	750
200	179	0.269	12.6	47.5	0.070			
400	163	0.255	13.7	41.5	0.744			
600	103	0.342	13.7	32.5	2.542			
800	87	0.396	15.3	26.0	1.284			
1000	67	0.49	15.3	29.0	0.426			

表2 PCBN刀具材料的物理参数

杨氏模量 / GPa	泊松比	热膨胀系数 / ( $\times 10^{-6} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	热传导率 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热 / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )
680	0.22	4.9	100	3210	960

因此材料塑性本构模型的选择对于切削仿真的准确性起着关键性作用。硬态切削中由于淬硬钢的高硬度, 将使其承受高的载荷和温度, 因此本文选择适合大变形、高应变率和高温的 Johnson-Cook 本构模型, 该模型描述了应力、应变、应变率以及温度之间的关系, 如式(1)所示<sup>[8-9]</sup>:

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right) \right), \quad (1)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  是等效应力,  $\bar{\epsilon}^{pl}$  是等效塑性应变,  $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$  是塑性应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  是参考应变率,  $T_{\text{room}}$  是室温,  $T_{\text{melt}}$  是熔化温度。若  $A$  是初始屈服应力,  $B$  为硬化模量,  $n$  是加工模化指数,  $C$  为依赖于应变率的系数,  $m$  是热软化系数, 表3给出了本研究中模拟 GCr15 材料的 Johnson-Cook 本构模型数值。

表3 GCr15材料的Johnson-Cook本构参数

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$T_{\text{melt}}/\text{°C}$	$T_{\text{room}}/\text{°C}$
2482.4	1498.5	0.19	0.027	0.66	1572	25

## 1.2 刀具与工件的摩擦模型

硬态切削过程中的摩擦是一个受工件材料、刀具材料、刀具几何形状以及切削用量等众多参数影响的复杂量。摩擦模型对硬态切削温度场的仿真起着至关重要的作用, 因此选择正确的摩擦模型对于残余应力场仿真结果的准确性有重要影响。

在硬态切削过程中, 沿刀具前刀面流出的切屑受到剧烈的摩擦和挤压, 在刀尖附近由于高压和高温的作

用, 导致接触界面上发生粘结现象。而在距刀尖一段距离处的滑动区, 由于受到较小的正压力, 所以摩擦力也较小, 属于外摩擦。在粘结区, 切屑和前刀面之间的摩擦转化为切屑和刀具粘结层与其上层金属之间的内摩擦。内摩擦的实质是金属材料内部的滑移剪切, 影响内摩擦的是材料的流动应力特性以及粘结层面积的大小等因素。如果用外摩擦的定义去定义刀具前刀面的切屑的摩擦, 就会有比较大的误差在数值仿真时产生。因此众多学者将刀具与切削的接触部分划分为滑移区和粘结区 2 个部分, 如图 1 所示<sup>[10]</sup>。

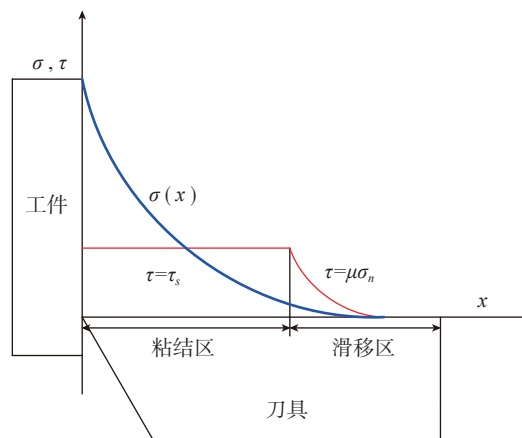


图1 硬态切削中刀具前刀面正应力和摩擦应力分布

Fig.1 Normal stress and friction stress distribution of tool rake face in hard cutting

本研究在进行有限元分析时, 基于库伦摩擦定理, 建立适合硬态切削的摩擦模型, 其表示形式如式(2)所示<sup>[10]</sup>, 分别表示滑移区和粘结区的摩擦力:

$$\begin{cases} \tau_f = \mu\sigma_n, (\mu\sigma_n < \tau_s) \\ \tau_f = \tau_s, (\mu\sigma_n \geq \tau_s) \end{cases}, \quad (2)$$

其中,  $\tau_f$  为摩擦应力,  $\mu$  为摩擦系数,  $\sigma_n$  为正应力,  $\tau_s$  为工件材料的极限剪切应力。

实际的切削过程中摩擦系数会随接触压力的变化而变化, 但是在硬态切削过程中切削用量很小, 导致建立准确的摩擦系数较为困难, 在本文的模拟仿真中根据

刀具材料和工件材料的性能,采用平均摩擦系数。

### 1.3 硬态切削中的接触

由摩擦模型可知,在硬态切削中的接触问题存在于刀具前刀面和切屑、刀具后刀面和已加工工件表面之间。接触问题是一种非线性的行为,需要较大的计算资源,因此在数值模拟中要分析研究的对象,选择合适的接触类型和接触方式,对于模拟时间的节约具有十分重要的作用。

接触问题主要由 2 种形式:柔体对柔体的接触和刚体对柔体的接触。在硬态切削中,由于 PCBN 是人造氮化硼其硬度远远高于工件轴承钢 GCr15 的硬度。因此本研究将刀具视为弹性刚体,工件则是弹塑性体,因此本研究的接触为刚体对柔体的接触。

ABAQUS 软件在刚体对柔体的接触中提供了 3 种接触方式:点-点接触,点-面接触和面-面接触。许多研究者运用有分离线的拉格朗日分析模型,这种方法需要预先定义切削的形状,采用的是面-面接触。然而对于形成锯齿状的硬态切削来说,预先定义好切屑的形状,不能准确反映形成切屑的形状。基于切屑的变形与切削力有着密切联系,为更好地分析硬态切削中切削力的形成机理,有必要对硬态切削的切屑形状进行模拟,因此本研究没有预先定义切削的形状,而是采用点-面接触的方式,在切削过程中自动形成切屑如图 2 所示。

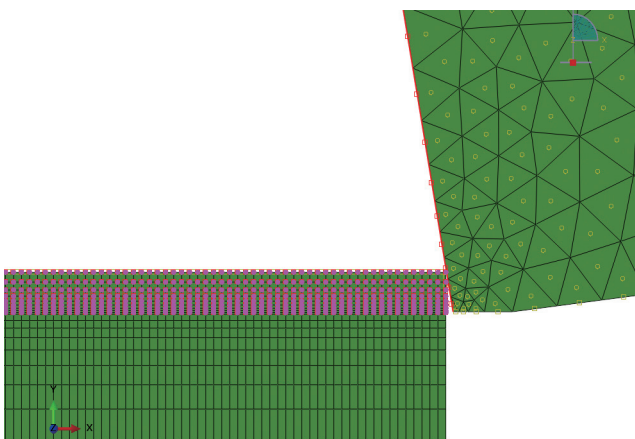


图2 点-面接触  
Fig.2 Point-surface contact

### 1.4 硬态切削有限元模型的建立

本研究要建立二维的正交切削模型,因此要将较复杂的三维问题转化为二维问题。在直角正交切削过程中,工件和刀具之间是恒定的相对运动。在主运动方向,在平行于基面的平面上,被切除的工件材料截面是一个矩形,根据有限元的离散思想,可以把工件看成许多这样的矩形截面片的叠加,就相当于把工件外表

面的被切削层展开。切削深度方向上,只有一条切削刃参加切削,而且切削刃上的各个点都是等效的。因此,可以把三维的六面体单元简化为具有一个厚度参数的四边形平面单元来处理。被假设为刚性的刀具没有变形的影响,若在工件的下表面施加全约束,就可以把工件的旋转运动转化为刀具沿主运动方向的直线运动。

本研究的重点是已加工工件表面的性能,如图 3 所示,在划分网格时,采用密度撒种和四边形划分,接近工件表面的位置网格密度较大。刀尖附近的是刀具变化较为明显的位置,因此前后刀面也采用密度撒种,刀尖附近的网格密度较大。刀具不是本研究的重点,为了提高计算速度,刀具采用三角形划分。

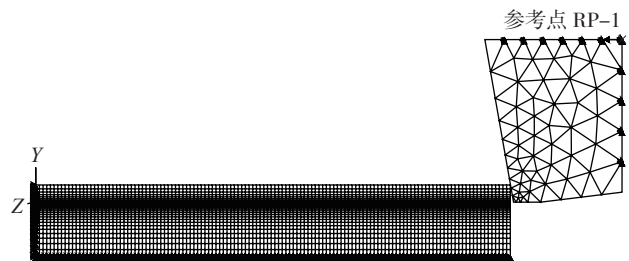


图3 硬态切削的有限元模型  
Fig.3 Finite element model of hard cutting

切削模型中,假设切削刀刃是绝对锋利的,即切削刃圆弧半径为 0。为了研究切削速度、切削层厚度以及刀具前角对硬态切削温度场和残余应力场的影响,在模拟仿真中切削速度、切削层厚度和刀具前角为变量,有限元仿真采用的模拟参数见表 4。

表4 硬态切削的有限元模拟参数

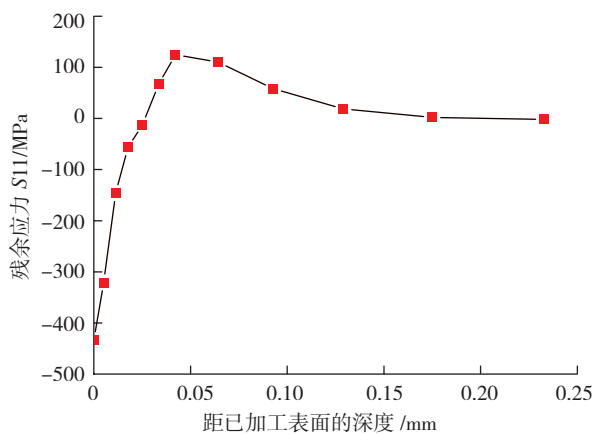
模拟参数	数值
前角 / (°)	-7, 0, 5
后角 / (°)	6
切削速度 $v / (m \cdot min^{-1})$	210, 274, 360
切削层厚度 $a / mm$	0.127, 0.180, 0.240
工件材料	GCr15
刀具材料	PCBN

边界条件为在切削加工阶段,工件左边界和工件下边界  $X$ 、 $Y$  方向的自由度均被约束,给定刀具切削时以速度  $v_1$  从右向左切入工件,退刀时以速度  $v_2$  反向退出工件,同时设定工件和刀具的初始温度为 25℃。在卸载恢复室温的过程中,工件的约束为 2 点约束,仅仅限制其刚体位移。

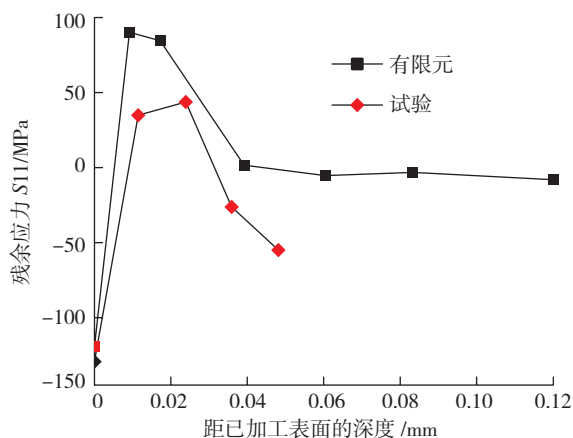
## 2 仿真结果及讨论

### 2.1 模型验证

$X$ 方向的应力  $S_{11}$  是工件表层的主要应力,  $Y$ 方向的应力  $S_{22}$  相对较小, 大部分的研究忽略  $Y$ 方向的应力场, 将  $X$ 方向的应力默认为工件的残余应力。为了验证本研究应力场的正确性, 首先将本模拟结果与美国学者 Guo 等<sup>[10]</sup>的模拟和试验结果进行了对比, 对比结果如图4所示。可见, 二者具有同样的变化趋势, 即最大残余压应力出现在工件表面, 沿着深度的增加工件内部的残余应力由残余压应力转化为残余拉应力, 并逐渐趋向于零, 证明了本研究结果的正确性。由于本文的切削参数与美国学者 Guo 等<sup>[10]</sup>的切削参数不一样, 所以出现了数值上的差异。



(a) 本研究模拟结果



(b) 美国学者 Guo 等<sup>[10]</sup>的研究结果

图4 工件内部残余应力分布规律正确性验证

Fig.4 Correctness validation of residual stress distribution law in workpiece

### 2.2 切削速度对加工表面残余应力的影响

切削速度分别为 210m/min、274m/min、360m/min, 切削层厚度为 0.127mm, 刀具前角为  $-7^\circ$ , 后角为  $6^\circ$  时, 已

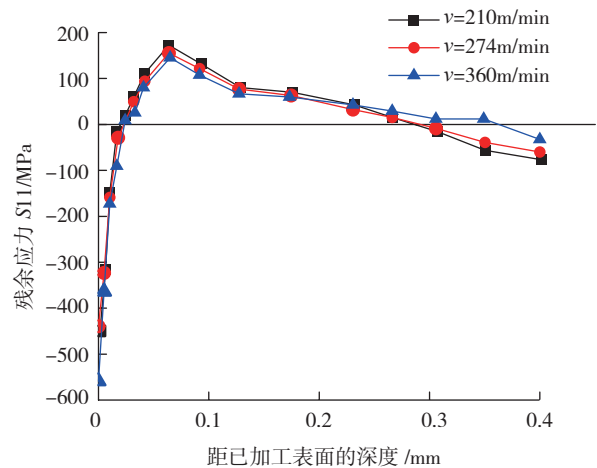


图5 切削速度对残余应力的影响

Fig.5 Effect of cutting speed on residual stress

加工表面残余应力随切削速度的变化情况如图5所示。

由模拟结果可以看出, 随着切削速度的增大, 总体上工件表面的残余压应力有稍稍的减小, 但是没有太大的变化。当切削速度较小时, 在工件内部却出现了相对较大的残余拉应力。另外, 零点和曲线的交点反映了工件表层的残余压应力层, 由图5可知切削速度对工件的残余压应力层也没有太大的影响。工件表面残余压应力幅值较小, 一方面是因为随着切削速度的增大, 切削力有稍稍减小的趋势, 另一方面切削速度的增大也导致了切削热的增多, 因此随着切削速度的增大, 工件表面残余压应力的幅值有减小的趋势。由于机械载荷起主要作用所以变化趋势不明显, 残余压应力层也没有太大的变化。随着深度的增加, 热载荷对残余应力的贡献相对较大, 虽然切削速度越大, 产生的切削热较多, 但随着切削速度的增大, 在工件内部切削热的下降速率增大, 在 0.15mm 处, 切削速度越小切削温度反而较大, 因此出现了切削速度较小时, 工件内部却出现了相对较大的残余拉应力。

### 2.3 切削层厚度对加工表面残余应力的影响

切削层厚度分别为 0.127mm、0.180mm、0.240mm, 切削速度为 274m/min, 刀具前角为  $-7^\circ$ , 后角为  $6^\circ$  时, 已加工表面残余应力总体上随切削层厚度的变化情况如图6所示。

分析图6可知, 工件表面残余应力总体上随着切削层厚度的增大而增大, 当切削层厚度从 0.127mm 增大到 0.180mm 时, 工件表面的残余压应力增大趋势较为明显, 而当切削层厚度继续增大时, 这种趋势逐渐变缓。这是因为虽然随着切削层厚度的增大, 切削力呈线性增大, 但是切削热也随着切削层厚度的增大而增大。另外工件的残余压应力层随切削层厚度的增大呈上升趋势, 因为在工件表面残余应力主要由机械载荷引起, 这

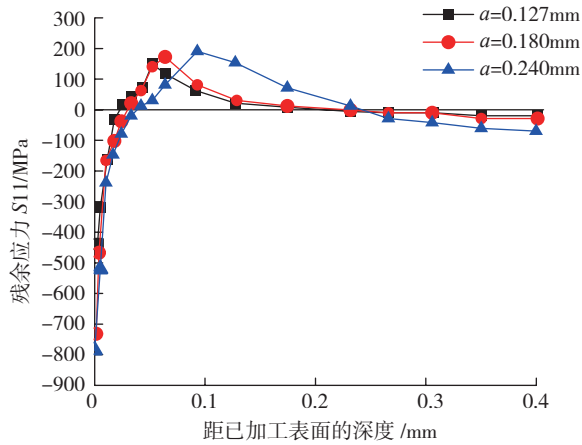


图6 切削层厚度对残余应力的影响

Fig.6 Effect of cutting lay thickness on residual stress

种变化趋势与切削层厚度对切削力的影响趋势是一致的。另外,在工件内部出现了部分残余拉应力,而且切削层厚度越大,残余拉应力的幅值越大。这是由于在工件内的残余拉应力主要由热载荷引起,而工件表面节点温度随着切削层厚度的增大而升高,并且在同一切削速度下,热量向下的传导速率是一样的,所以在同一深度位置,切削层厚度越大,热载荷越大,引起的残余拉应力越大。

#### 2.4 刀具前角对加工表面残余应力的影响

刀具前角分别为  $-7^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $5^\circ$ , 切削速度为 274m/min, 切削层厚度为 0.127mm, 刀具后角为  $6^\circ$  时, 已加工表面残余应力随刀具前角的变化情况如图 7 所示。

从模拟结果可以看出, 当刀具前角逐渐增大时, 表层的残余压应力值总体上逐渐减小。这主要由于加大刀具前角, 增强了刀具的切削作用, 同时刀刃前方金属的压缩变形及刀具对已加工表面的挤压与摩擦作用减小, 从而减小了残余压应力并向残余拉应力过渡。相反, 减小刀具前角刀具的切削作用减弱, 挤压作用加强, 使

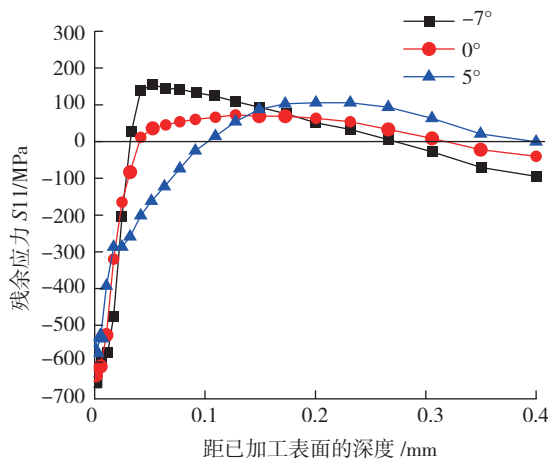


图7 刀具前角对残余应力的影响

Fig.7 Effect of angle of cutting edge on residual stress

被切削金属的塑性变形范围和变形的程度增大, 进而使已加工表面的残余压应力增大。

### 3 结论

(1) 硬态切削加工工件内部残余应力分布规律: 最大压残余应力出现在工件表面, 沿着深度的增加工件内部的残余应力由残余压应力转化为残余拉应力, 并逐渐趋向于零。

(2) 随着切削速度的增大, 残余应力变化规律不明显, 切削速度对硬态切削加工表面残余应力的影响较小。

(3) 随着切削层厚度的增大, 硬态切削加工工件表面的残余压应力幅值和残余压应力层总体上呈现增大的趋势。

(4) 随着刀具前角的增大, 总体上硬态切削表面残余压应力幅值减小, 残余压应力层则呈现了增大的趋势。

### 参考文献

- [1] Wen Q, Guo Y B, Todd B A. An adaptive FEA method to predict surface quality in hard machining. *Materials Processing Technology*, 2006, 173(1):21-28.
- [2] Umbrello D, Hua J, Shivpuri R. Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 374(1/2):90-100.
- [3] Thiele J D, Melkote N. Effect of tool edge geometry on workpiece subsurface deformation and through-thickness residual stresses for hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2000, 2(4):270-276.
- [4] Thiele J D, Melkote S N, Peascoe R A, et al. Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, 122(4):642-649.
- [5] 张雪萍, 赵国伟, 蒋辉, 等. 精密干切削淬硬零件表面完整性试验分析. *上海交通大学学报*, 2006, 40(6):922-926.
- [6] Guo Y B, Liu C R. Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(1):1-9
- [7] 岳彩旭. 硬态切削过程的有限元仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- [8] Pantale O, Bacaria J L, Dalverny O. 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage Effects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(39/41):4383-4399.
- [9] Guo Y B, Wen Q, Woodbury K A. Dynamic material behavior modeling using internal state variable plasticity and its application in hard machining simulations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128(3):749-759.
- [10] Guo Y B, Liu C R. 3D FEA modeling of hard turning. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2):189-199.

(责编 亿霖)