

# 高速干切削工件表面残余应力分析\*

## Study on Surface Residual Stress in Dry High-Speed Cutting

西北工业大学机电学院 徐颖强 郭彩虹 史祖衡

**[摘要]** 建立了金属正交切削的热力耦合有限元模型,对难加工材料 GH4169 进行非稳态的干切削加工模拟,得到卸载后不同切削速度下工件表面应力场、温度场的分布。分析了不同切削速度下工件残余应力的分布规律以及对工件抗疲劳性能的影响。结果表明,随着切削速度的增大,工件表层的残余拉应力整体上呈现增大的趋势,但在表层迅速下降转化为压应力,并在 100~140 μm 处出现峰值,然后逐渐减小,并且随着切削速度的增大压应力层有向内部深入的趋势,这有利于提高工件的抗疲劳性能,为高速干切削难加工材料的工艺研究提供了参考依据。

**关键词:** 干切削加工 难加工材料 残余应力 疲劳性能

**[ABSTRACT]** A finite element model of thermal-mechanical orthogonal cutting process is established to simulate the unsteady cutting process of dry-cutting of the difficult-to-machine material GH4169 and the unloaded surface stress field and temperature field of different cutting speed are obtained. Then the distribution of residual stress and the effect of fatigue properties are analyzed. The results show that the tensile residual stress increases as the cutting speed increases, but decreases sharply and transforms to compressive stress, whose magnitudes is found at 100~140 μm, which helps to improve the anti-fatigue properties and proves basis for cutting process of dry-cutting difficult-to-machine material.

**Keywords:** Dry cutting Difficult-to-machine material Residual stress Fatigue properties

随着涂层刀具的发展,干式高速切削技术已被应用于难加工材料的制造过程中。然而在干切削加工中由于不使用切削液,切削热会急剧地增加,工件易产生热变形,加工表面的加工质量不易保证。残余应力是衡量工件表面质量的一个重要因素,因此对工件表面残余应力的研究成为人们关注的问题。尤其对于广泛应用于航空航天领域的难加工材料来说,切削热会直接影响工件的

表面质量,因此研究不同切削参数下工件残余应力的分布,对于难加工材料表面质量的控制有非常重要的意义。

近年来,国内外学者对切削加工过程中表面残余应力的分布规律、影响因素以及对工件加工质量的影响做了大量的研究<sup>[1-7]</sup>。日本学者 Hiroyuki Sasahara 建立了切削有限元模型,用热弹塑性有限元法模拟了 0.45% C 钢的切削过程,分析了不同切削参数下工件残余应力的分布规律并且研究了切削条件对工件疲劳寿命的影响,得出通过设置合理的切削条件如低的进给量工件可以得到更长的疲劳寿命<sup>[1]</sup>。法国学者 D. Dudzinski 通过实验的方法研究了干切削工件表面质量,研究表明合理的选择切削速度能够得到较优的表面质量<sup>[2]</sup>。同时国内的许多学者也对干切削加工技术进行了研究,但大部分集中在对实现干切削加工方法的研究上。纵观国内外的研究,对碳钢材料大部分是在中低速条件下进行研究,对于高温合金的干式切削大部分只是通过试验进行研究。本文针对高温合金 GH4169 建立带有分离线的有限元切削模型,模拟高速干切削下工件表面残余应力的分布规律,探究较优的切削速度,为高速干切削的研究提供理论基础。

## 1 正交切削分析模型的理论基础

### 1.1 切削过程的温度场理论

在金属切削过程中,切削热主要来源于切屑的塑性变形和刀-屑界面处的摩擦功,因此在有限元理论中,平面正交切削非稳态的热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \dot{q} = \rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

式中,  $\dot{q} = \dot{q}_p + \dot{q}_f$ , 是每单元体积的热源生成热;  $\lambda$  是导热系数;  $\rho$  是密度;  $c_p$  是比热容;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的速度分量。

塑性变形导致的切削热:  $\dot{q}_p = \eta_p \bar{\sigma} \bar{\epsilon} / J$ , 式中,  $\dot{q}_p$  塑性变形功产生的体积热流率,  $\eta_p$  塑性功转化为热的系数,  $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$  分别为等效应力和等效应变,  $J$  为当量转换系

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

数。

$$\dot{q}_f = \eta_f \tau_f v_c / J,$$

式中,  $\dot{q}_f$  为摩擦功产生的体积热流率,  $\eta_f$  为摩擦功转化为热的系数,  $\tau_f$  为摩擦剪切应力,  $v_c$  为切屑的滑移速度,  $J$  为当量转换系数。

### 1.2 切削热力耦合的有限元理论

由于切削加工工艺具有高温、大变形的特点, 为了耦合机械载荷和热载荷的相互作用, 本文采用热弹塑性大变形有限元法进行理论分析。

(1) 在弹性区域:

$$\{d\sigma\} = [D_e]\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon'\}. \quad (2)$$

(2) 在塑性区域:

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon'\} + \frac{2\bar{\sigma}}{3S_0}\{S\}\left(\frac{\partial R}{\partial \bar{\varepsilon}}d\bar{\varepsilon} + \frac{\partial R}{\partial T}dT\right), \quad (3)$$

其中,

$$[D_{ep}] = [D_e] - \frac{[D_e]\{df/\partial\sigma\}\{df/\partial\sigma\}^T[D_e]}{H' + \{df/\partial\sigma\}^T[D_e]\{df/\partial\sigma\}}, \quad (4)$$

$$S = [D_e]\{\sigma'\}, \quad (5)$$

$$S_0 = \frac{4}{9}\bar{\sigma}^2 H' + \{\sigma'\}^T\{S\}. \quad (6)$$

式中,  $\sigma'$  为应力偏差;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $R$  为屈服面的大小, 是等效塑性应变、应变率和温度的函数;  $H'$  为应变硬化率;  $f$  为塑性势能。

### 1.3 热力耦合有限元控制方程

在不考虑体力的情况下, 基于虚功原理, 应用大变形、大应变理论中的小增量位移、更新的 Lagrange 方程和增量变分原理, 考虑到切削过程中的刀-屑界面摩擦特性和载荷变化率, 建立热弹塑性大变形耦合方程式:

$$([K_{ep}] + [K_G])\{\dot{d}\} = \{\dot{F}_0\} - \int_v [B_\varepsilon]^T \{R_{\varepsilon T}\} dv + \int_v [B_\varepsilon]^T [D_{ep}]\{\dot{\varepsilon}'\} dv, \quad (7)$$

$$[K_{ep}] = \sum_{\text{all-elements}} \int_v [B_\varepsilon]^T [D_{ep}] [B_\varepsilon] dv,$$

$$[K_G] = \sum_{\text{all-elements}} \int_v [B_G]^T [D_G] [B_G] dv,$$

$$R_{\varepsilon T} = \frac{\partial R}{\partial \bar{\varepsilon}} d\bar{\varepsilon} + \frac{\partial R}{\partial T} dT$$

其中,  $K_{ep}$  为弹塑性刚度矩阵;  $K_G$  为几何刚度矩阵;  $\{\dot{d}\}$  为节点速度;  $[B_\varepsilon]$  为应变转换矩阵;  $R_{\varepsilon T}$  为相对温度和等效应变率的变化率;  $\{\dot{F}_n\}$  为刀-屑接触节点的法线载荷变化率。

## 2 有限元切削加工模型

金属切削加工伴随着高温高压大应变率, 建立的有限元模型和分离准则的确定, 材料的性能参数以及加工过程中工件边界条件的确定都将对已加工工件的表面质量产生影响。

### 2.1 有限元仿真模型

本文在研究非稳态切削 GH4169 表面残余应力的变化规律时, 建立了带有分离线的有限元模型, 如图 1 所示。

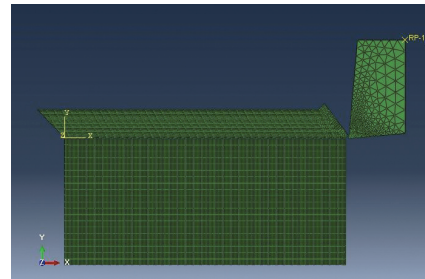


图1 有限元切削模型

Fig.1 Finite element model of cutting

此模型中切屑与刀具、切屑与分离线的上表面、分离线与工件基体的上表面、切屑下表面与工件基体上表面以及外表面的自接触形成了 5 个接触对。为了从工件机体上分离的切屑顺利滑过并迅速过渡到稳定状态, 在切屑层左侧, 采用三角形使网格划分简单, 并将刀具假设成理想化的弹性刚体。

### 2.2 切削仿真过程中的边界条件

在切削加工阶段, 工件左右边界和工件下边界  $X, Y$  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。在卸载后恢复室温的工程中, 工件的约束为两点约束, 仅仅限制其刚体位移。

### 2.3 影响残余应力的材料性能参数

工件的材料为 GH4169, 是一种高温合金材料, 材料的物理参数和力学性能对已加工工件的表面质量将产生重要影响。

表 1 和图 2 分别给出了 GH4169 的物理参数和力学性能曲线。

### 2.4 材料的本构关系和分离准则

金属切削加工是一个不断使被加工材料产生分离的过程, 因此切削分离准则的确定对于成功实现切削加工过程的模拟至关重要。本文采用几何-物理失效准则:

$$\gamma = \sqrt{(\sigma_n / \sigma_f)^2 + (\tau_n / \tau_f)^2},$$

式中,  $\gamma$  为断裂应力指数;  $\tau_n$  为剪切应力;  $\sigma_n, \tau_n$  分别为刀

尖前指定距离处的法向应力和剪切应力;  $\sigma_r$ ,  $\tau_r$  分别为工件材料在纯拉伸和剪切载荷下的失效力。当  $\gamma=1$  时, 认为材料失效。

表1 GH4169材料的力学物理性能

密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏模量 / GPa	泊松比	线膨胀率 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	热传导系数 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
8240	2.2E11	0.3	1.32E-5 (20 $^{\circ}\text{C}$ )	13.5 (20 $^{\circ}\text{C}$ )
			1.35E-5 (250 $^{\circ}\text{C}$ )	17.8 (320 $^{\circ}\text{C}$ )
			1.46E-5 (500 $^{\circ}\text{C}$ )	21.8 (620 $^{\circ}\text{C}$ )

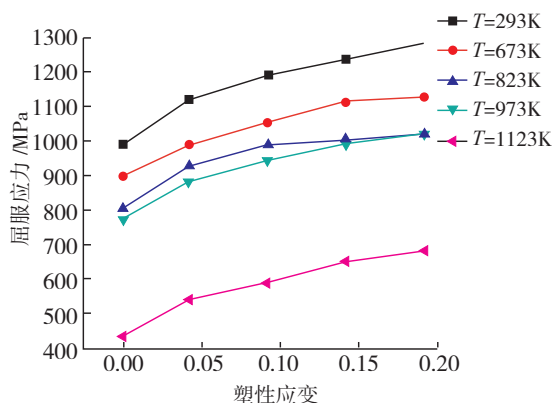


图2 GH4169的力学性能

Fig.2 Mechanical property of GH4169

### 3 结果分析及讨论

本节研究在不同切削速度下卸载后工件表面及工件内部残余应力的分布规律。

工件的切削条件为: 切削层厚度  $d=0.2\text{mm}$ , 刀具前角  $5^{\circ}$ , 后角  $5^{\circ}$ , 切削速度为 1200m/min、1800m/min、2400m/min、3000m/min。

#### 3.1 结果正确性分析

针对切削速度对工件内部残余应力分布规律的影响, 本文的研究结果如图 3 所示。与日本学者 Ryohei Ihara<sup>[3]</sup> 的研究结果进行了对比验证, 图两者呈现了相同的分布趋势: 工件表层的残余拉应力在表层迅速下降转化为压应力, 然后逐渐减小, 随着速度的增大, 压应力有向内部深入的趋势。

在 Ryohei Ihara 的研究中, 最高切削速度仅为 100m/min, 此时工件表层残余拉应力的幅值为 1100MPa, 然而本文研究的在高速切削的条件下工件内部残余应力的分布规律, 如图 3 所示在高速切削下工件表层的残余拉应力幅值仅为 525MPa, 而且工件内部压残余的深度也呈现增加的趋势。这是由于在正常的切削范围内, 切削

温度随着切削温度的增大而提高, 但对于每一种材料都存在一个速度范围, 当速度超出这个范围后, 随着切削速度的增加切削温度反而降低, 因此在高速切削下工件表层的残余应力会大幅降低, 这证明了本研究结果的

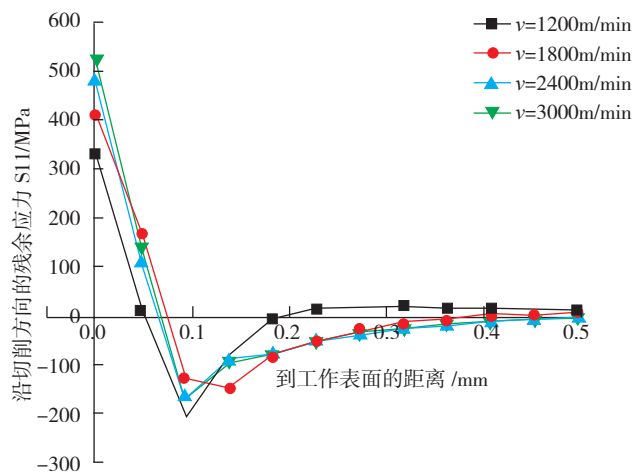


图3 切削速度对工件内部残余应力的影响

Fig.3 Effect of cutting speed on internal residual stress

合理性和正确性。

#### 3.2 切削速度对工件残余应力的影响与分析

$X$  方向的应力  $S_{11}$  是工件表层的主要应力,  $Y$  方向的应力  $S_{33}$  相对较小, 大部分的研究都忽略  $Y$  方向的应力场, 将  $X$  方向的应力默认为工件的残余应力。

切削速度对工件内部残余应力的影响如图 3 所示, 工件表层的残余拉应力在表层迅速下降转化为压应力, 并在  $100\sim 140\mu\text{m}$  处出现峰值, 然后逐渐减小, 随着速度的增大, 压应力有向内部深入的趋势。造成这种现象的原因是由于高温合金 GH4169 材料的热传导率小, 只有少部分的热量传导到工件和刀具, 大部分的热量被切屑带走<sup>[4]</sup>。而表面的温升来不及渗入到工件内部, 因此造成拉应力急速转化为压应力。

切削速度对工件表层残余应力的影响如图 4 所示, 已加工工件的表层为残余拉应力, 并且随着切削速度的增大, 残余拉应力呈现增大的趋势。这是由于切削速度增大造成温度引起的热塑性变形效应, 表面温度的升高促使残余拉应力的增长因此工件表层的残余拉应力随着切削速度的增大而增大。

通过以上分析可以得到切削速度对工件表层残余应力的影响规律, 如图 5 所示, 切削速度对工件表层最大残余拉应力的影响规律不稳定, 但是从整体来看工件表层的最大残余拉应力是随着切削速度的增大而增大的。

图 6 给出了切削速度对工件内部最大残余压应力的影响, 曲线表明: 随着切削速度的增大, 工件内部的

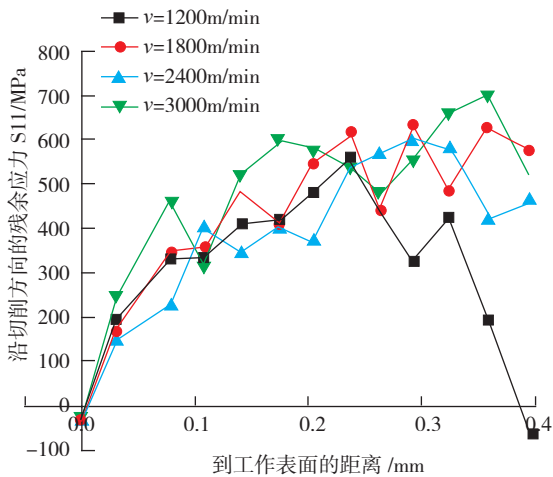


图4 切削速度对工件表层残余应力S11的影响

Fig.4 Effect of cutting speed on residual stress of machined surface

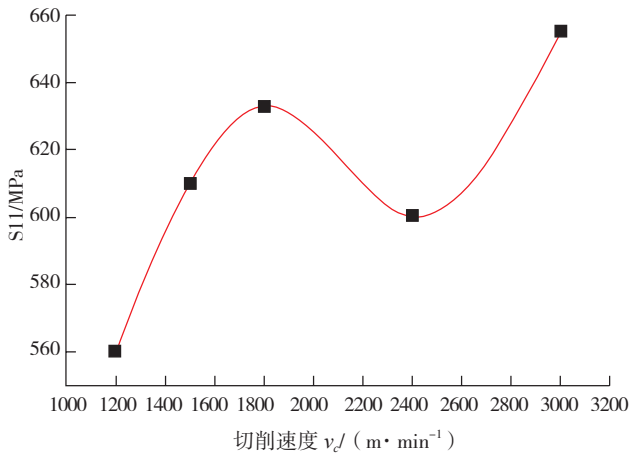


图5 切削速度对工件表层最大残余应力的影响

Fig.5 Effect of cutting speed on maximum residual stress of machined surface

最大残余压应力呈增大趋势。

#### 4 结论

在高速干切削过程中,随着切削速度的增大工件表层的残余拉应力增大,残余压应力的幅值总体上呈增大趋势。而工件内部的压应力随切削速度的增大有向内部深入的趋势,即残余压应力层的增大。另外工件内部的残余压应力幅值也随切削速度的增大而增大,有利于提高工件的抗疲劳性能,提高工件的表面质量。这为广泛应用与航空航天的高温合金材料的切削工艺研究提供了理论依据。

#### 参考文献

[1] Sasahara H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C

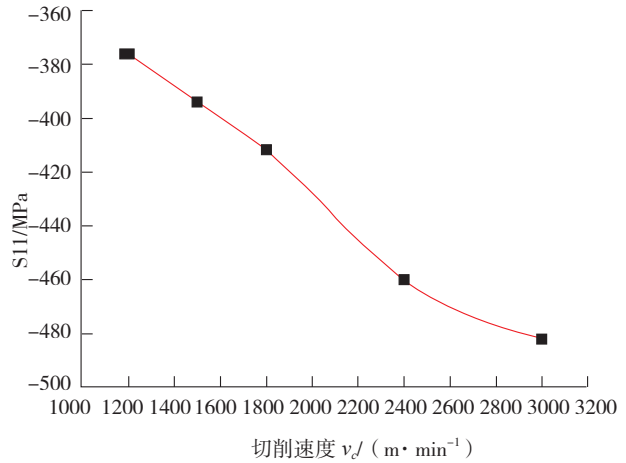


图6 切削速度对工件内部最大残余压应力的影响

Fig.6 Effect of cutting speed on internal maximum compressive residual stress

steel. Machine Tools Manufacture,2005,45: 131-136.

[2] Dudzinski D. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. Journal of Materials Processing Technology, 2011,211:1590-1598.

[3] Ihara R. Prediction of residual stress distributions due to surface machining and welding and crack growth simulation under residual stress distribution. Nuclear Engineering and Design,2011, 241:1335-1344.

[4] Dias M. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96:225-233.

[5] Shet C, Deng X. Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting. Machine Tools Manufacture, 2003, 43: 573-587.

[6] Bäker M. Finite element simulation of high-speed cutting forces. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176: 117-126.

[7] 刘志峰,张崇高,任家隆.干切削加工技术与应用.北京:机械工业出版社,2005.

(责编 深蓝)

(上接第 78 页)

出厂寿命考核和温度变化考核,无明显磨损,基本满足产品设计要求。自 2008 年本公司采用本工艺以来,尚未发生由于涂层质量问题引起的零部件返厂返修。

该涂覆工艺在航空航天等军工领域,及其他机械行业的精密配合件上有一定的推广意义。利用涂层的润滑性能,在中速低负荷状态下,与润滑油脂配合使用,可以防止配合件的咬合和磨损,有效地维持设计间隙,并可延长零部件使用寿命。

#### 参考文献

[1] 薛群基,陈建敏. 粘结固体润滑涂层的研究及其应用 // 中国机械工程学会. 1999 年第二届表面工程国际会议论文集. 北京: 中国机械工程学会, 1999:13-18.

[2] 李国英. 表面工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1997.

(责编 夏宛)