

锯齿形切屑变形表征与其形态演化研究*

苏国胜 刘战强 杜 劲 杨奇彪

(山东大学机械工程学院, 济南 250061)

【摘要】 提出一个锯齿形切屑模型,并在该模型基础上建立了表示切屑分节变形程度的相关参数计算公式;以高强度钢 AerMet100 为例进行了切削实验,对收集到的切屑进行了变形参数计算,验证了模型的有效性;在对实验结果讨论的基础上建立了切屑形态随切削速度提高而变化的模型,定性地分析了切屑随切削速度的提高产生锯齿化的原因,结果表明切屑随切削速度的提高而逐渐锯齿化的根本原因在于切削材料的动态强度(屈服强度、拉伸强度)的提高和热软化效应、应变硬化效应影响的减弱。

关键词: 锯齿形切屑 高速切削 切屑变形 动态强度

中图分类号: TG506 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0223-05

Description of Serrated Chip Deformation and Its Morphology Evolution

Su Guosheng Liu Zhanqiang Du Jin Yang Qibiao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract

A model of chip formation for high-speed machining was proposed. A serial of parameters were built to assess the deformation of the chip segment. Turning experiments were carried out on a kind of high-strength steel, AerMet100, to validate the model. A further discussions were made on the experimental results on which a model of chip formation at different cutting speeds was developed. The mechanisms of chip deformation at the different cutting speeds were studied qualitatively. It was found that with the increase of cutting speed, the material dynamic yield strength, tensile strength would be strengthened and the influence of thermal softening effect, strain hardening effect would be weakened, which could decidedly lead to the onset of serrated chip.

Key words Serrated chip, High-speed machining, Chip deformation, Dynamic strength

引言

多数金属材料在进行高速切削加工时会有锯齿形切屑产生,对于硬度高、热物理性能差的所谓“难加工”材料更是如此。锯齿形切屑形成后,切屑的断屑和排屑会变得较为容易,这有利于零件的全自动加工,但同时也会使刀具、机床系统产生振动,从而影响到工件已加工表面质量和刀具寿命^[1]。建立尽可能准确的切屑模型和尽可能正确的参数对切屑变形进行评价是进一步定量分析切屑分节原因的

前提。文献[2~9]不同程度地提出了一些切屑形成过程的模型,但其中的大部分模型没有说明切屑形成的详细或者随切削速度的提高而产生锯齿化的过程。

本文以锯齿形切屑几何形态特点和分析前人所建模型的基础上,提出切屑形成过程模型,重新建立表示切屑变形程度的参数,并进行实验验证;建立随切削速度的提高切屑形态变化的模型,并对切屑随切削速度的提高逐渐锯齿化的原因进行定性分析。

收稿日期: 2009-10-30 修回日期: 2010-01-15

* 国家自然科学基金资助项目(50828501)和国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724401)

作者简介: 苏国胜,博士生,主要从事高速切削加工研究, E-mail: suguosheng@sina.com

通讯作者: 刘战强,教授,博士生导师,主要从事高速/高效加工、微细切削加工研究, E-mail: melius@sdu.edu.cn

1 锯齿形切屑形成时的特点和形成过程模型的建立

1.1 锯齿形切屑形成时的特点

图 1 是几种材料的锯齿形切屑,从图中两种金属的锯齿形切屑照片可以看到,在产生明显锯齿化时切屑呈现出如下特点:① 每个分节基本保持一定的厚度,切屑在前刀面积累过程中由于刀具推挤作用而使切屑均匀增厚。② 锯齿在分节后沿前刀面和剪切面向上滑移的过程中,集中剪切面基本保持一个角度位置,即分节的前后面间保持平行,剪切角被保留了下来。③ 切屑分节自由表面基本保持了原来的长度,没有出现明显的变形。对于大多数金属,在切屑出现明显锯齿化时其切屑都有如上的几个特点。

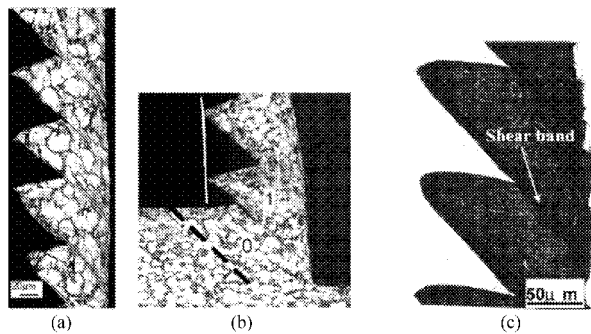


图 1 几种材料的锯齿形切屑

Fig. 1 Serrated chips of different materials
(a) (b) Ti6Al4V (c) 30CrNi3MoV

1.2 锯齿形切屑形成过程模型的建立

考虑到以上切屑锯齿化时 3 个特点和材料不可压缩性假设,在 He N 模型^[7]的基础上建立了如图 2 的切屑模型。根据自由表面的未变形特点, $L_{AF} = L_{AB}$;剪切角 ϕ 是当刀具推进到 D 点,即将沿 AB 面形成集中带时的剪切角,可以看出该剪切角在切屑分节形成后向外滑移时被保留了下来; θ 角为切屑外表面 AB 在刀具的推挤下由变形前位置 AB 旋转到临界剪切失稳时位置 AF 之间的夹角,暂且命名为切屑自由表面抬起角,简称抬起角,该夹角体现了切屑外层部分剪切应变的大小,在假设 (特点) (1)

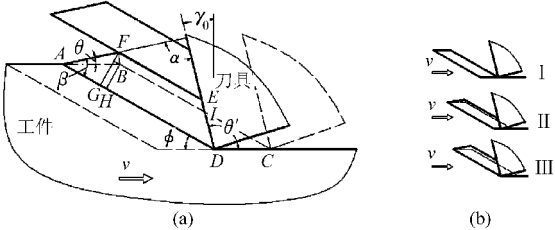


图 2 锯齿形切屑在前刀面的积累过程

Fig. 2 Chip piling up model

(a) 切屑临界断裂时状态 (b) 切屑在前刀面积累过程分解

的条件下可以认为体现了切屑内的平均剪应变的大小; θ' 是切屑 ABCD 的 CD 面变形前后位置之间的夹角,该夹角反映了切屑 CD 面剪切应变的大小。为了能够尽可能进行准确测量,把锯齿形切屑上 α, β 确定为测量角度,而把其他参数表示成 α, β 的函数。则根据图 2 中的几何关系可得

$$\phi = \beta + \alpha + \gamma_0 - \frac{\pi}{2} \tag{1}$$

式中,当刀具具有正前角时 γ_0 取正值,负前角时 γ_0 取负值(下同)。

$$\theta = \beta - \phi = \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma_0 \tag{2}$$

$$\theta' = \frac{\pi}{2} - \gamma_0 \tag{3}$$

切屑变形前后的厚度为

$$h_{BH} = l_{AB} \sin \phi = -l_{AF} \cos(\alpha + \beta + \gamma_0) \tag{4}$$

$$l_{FG} = l_{AF} \sin \beta \tag{5}$$

$$h_{BF} = \frac{l_{FG} - l_{BH}}{\sin\left(\frac{\pi - \theta}{2} - \phi\right)} =$$

$$l_{AF} \frac{\sin \beta + \cos(\alpha + \beta + \gamma_0)}{\sin(\pi/4 + \beta + \alpha/2 + \gamma_0/2)} \tag{6}$$

按 He N 的定义,切屑 AFED 内的剪切应变为

$$\varepsilon = \frac{h_{BF}}{h_{BH}} = - \frac{\sin \beta + \cos(\alpha + \beta + \gamma_0)}{\sin(\pi/4 + \beta + \alpha/2 + \gamma_0/2) \cos(\alpha + \beta + \gamma_0)} \tag{7}$$

所以,沿切屑厚度方向上的增厚率(线应变)为

$$\mu = \frac{l_{FG} - h_{BH}}{h_{BH}} = \frac{l_{AF} \sin \beta + l_{AF} \cos(\alpha + \beta + \gamma_0)}{-l_{AF} \cos(\alpha + \beta + \gamma_0)} =$$
$$-1 - \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha + \beta + \gamma_0)} \tag{8}$$

因此,可以通过收集切屑并测量角 α, β ,根据式 (1)、(2)、(4)、(8) 求出 $\phi, \theta, \varepsilon, \mu$,对切屑变形进行定量评价。

2 切削实验和切屑变形计算

利用文献[10]给出的实验方法对高强度钢 AerMet100 进行了正交切削实验,实验时使用的主要切削参数和切削条件如表 1 所示。

选择了锯齿化阶段 3 种切削速度 v_1, v_2, v_3 和 3 种切削深度 f_1, f_2, f_3 列成正交实验表,对切屑进行收集、剖磨、拍照,相应的切屑照片填入表格,如表 2 所示。

对表 2 中各种切削参数下的切屑进行了 α, β 角的测量,根据式(1)、(2)、(7)、(8)计算了不同切削参数下切屑分节的 $\phi, \theta, \varepsilon, \mu$,结果如图 3 所示。

表 1 切削参数和切削条件

Tab. 1 Cutting parameters and cutting condition						
切削速度	切削深度	刀具前角	刀具材料	切削条件	工件硬度	工件屈服强度
$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	f/mm	$\gamma_0/(\text{^\circ})$			/HRC	σ_s/MPa
30 ~ 260	0. 10 ~ 0. 30	0	TiN 涂层硬质合金 (CVD)	干式切削	52	1 725
						σ_b/MPa
						1 965

表 2 不同切削参数下的切屑照片

Tab. 2 Chip photos at different cutting parameters			
切削速度 $v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	切削深度 f/mm		
	0. 10	0. 20	0. 25
120			

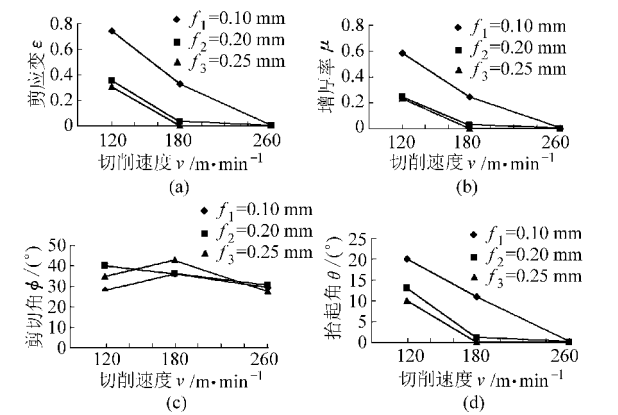


图 3 切屑参数 ε 、 μ 、 ϕ 、 θ 随切削速度 v 变化曲线
Fig. 3 Evolution of chip deformation parameters with the increase of cutting speed
(a) 剪应变 ε (b) 增厚率 μ (c) 剪切角 ϕ (d) 抬起角 θ

图 3a、3b 反映了不同切削深度条件下剪应变 ε 和增厚率 μ 随切削速度提高所发生的变化。可以看出,3 种切削深度的剪应变 ε 和增厚率 μ 都随切削速度的提高呈下降趋势,切深为 0. 20、0. 25 mm 的应变剪 ε 和增厚率 μ 较切深为 0. 10 mm 的剪应变 ε 和增厚率 μ 先到达或接近零值点。当切削速度到达 180 m/min,切削深度为 0. 20 mm 的剪应变 ε 和增厚率 μ 几乎接近了零,切削深度为 0. 25 mm 的剪应变 ε 和增厚率 μ 已到了零。当切削速度到达 260 m/min 时,3 种切削深度的剪应变 ε 和增厚率 μ

均降低到了零值。同时,从图 3a、3b 上还可以看出随着切削深度的增加,各个速度阶段的剪应变 ε 和增厚率 μ 均有所降低。

图 3c 反映了不同切削深度条件下剪切角 ϕ 随切削速度的提高所发生的变化。可以看出,3 种切削深度的剪切角 ϕ 随切削速度提高有下降的趋势,但变化值不大。切削深度为 0. 10、0. 25 mm 切屑的剪切角甚至出现了先升后降的趋势。当切削速度足够高时,3 种切削深度下的剪切角趋于一个值。

图 3d 反映了不同切削深度条件下自由表面抬起角 θ 随切削速度的提高所发生的变化。其总的变化趋势和应变 ε 、增厚率 μ 的变化趋势相同。值得注意的是当 $\theta=0$ 时意味着在切屑的外层处不再发生剪切变形($\varepsilon=0$ 、 $\mu=0$),切削层金属在前刀面积累过程中切屑的外表面不再向外抬起。

3 实验分析

从上述实验结果可以看出参数 θ 、 ε 、 μ 可以从一定程度上评价锯齿形切屑的变形程度。但当切削速度提高到一定程度后, θ 、 ε 、 μ 都近似等于零,这说明随着切削速度的提高切屑分节内的变形逐渐由均匀状态向集中在靠近刀尖内侧的非均匀状态转变。这一点和许多文献的实验结果一致^[10-12]。在这种情况下切屑典型的形态如图 4^[6] 所示。

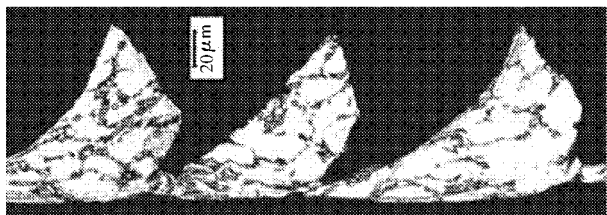


图4 较高切削速度时锯齿形切屑的形态

Fig. 4 Chip of Ti6Al4V at very high cutting speed

图5表示了一个切屑单元在不同的切削速度下的形成过程,其中切削速度 $v_1 < v_2 < v_3$ 。每种切削速度条件下切屑的形态都是热软化效应、应变硬化效应、应变率强化效应共同作用下的结果。

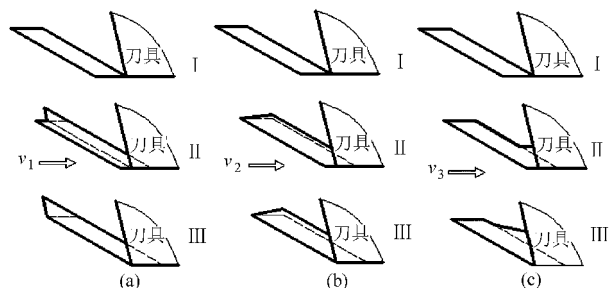


图5 随切削速度的提高切屑形态发生的变化

Fig. 5 Chip deformation model at different cutting speeds

(a) 低速切削时切屑形成过程 (b) 高速切削时切屑形成过程
(c) 较高切削速度切削时切屑形成过程

在较低切削速度 v_1 下,先期进入剪切区的材料因塑性变形而产生热,由于切削速度较低,切削热有足够的时间传到剪切区前方即将进入剪切区的材料。对于热软化效应敏感的材料其流动应力将下降(已知条件下不会上升),同时对于已变形材料而言虽然产生了热软化作用,但因热软化而导致的流动应力的下降不足以抵偿因应变硬化而产生的流动应力的提高,所以剪切区已变形材料的强度大于即将进入剪切区材料的强度,这就会使剪切区已变形材料随着刀具的前行推着剪切面连续向前。经过剪切区的切屑能够进行充分、连续的变形,切屑最终自由表面将和前刀面平行,形成带状切屑,如图5a所示。Costin等1979年在对冷轧钢AISI1018和热轧钢1020进行切削研究时发现流动应力具有较明显的应变强化倾向时切屑锯齿化将被抑制或推迟^[13],类似的研究结果还有文献^[14],这和本文的结论是一致的。

在切削速度 v_2 下,应变率(加载率)敏感材料的应变率强化效应显著增强,材料的动态屈服强度显著提高。此时当刀具向前推挤少量切屑时瞬时剪切面上产生的剪切力不足以使材料在整个剪切面上滑

移,挤压变形主要发生在切屑靠近刀尖的内侧而切屑外侧变形较少。这样由于外层材料变形不充分切屑开始在前刀面积累,同时切削力开始增大。当积累到一定程度,瞬时剪切面上的切削力足够使材料在整个剪切面上产生滑移时,整个剪切面的剪切滑移开始,如图5b所示。由于该剪切滑移进行得很快,瞬间剪切滑移产生的大量热来不及向外散发而使局部升温很高,热软化效应引起的流动应力下降大于应变硬化引起的流动应力上升,于是流动应力总体下降,这更进一步加剧了剪切面的剪切滑移。这就是塑性剪切失稳理论(或绝热剪切理论)。当然,在整个剪切面发生剪切滑移后的应力下降也可能是由于材料断裂引起的,这便是周期性断裂理论。

在切削速度 v_3 下,材料的动态屈服强度进一步提高并且和其拉伸强度靠近,材料的塑性显著降低^[15~16]。刀具向前推挤时产生的塑性变形更加集中在靠近刀尖的一端,塑性变形产生的热量更加不能软化剪切面上的材料,塑性滑移更加不能在整个剪切面上进行,结果在靠近自由表面的一端几乎没有塑性变形,且在切屑集中剪切带处出现了更多的断裂现象,如图5c所示。

Dolinskék等从硬度、晶粒变形程度等方面对不同切削速度下得到的锯齿形切屑进行了研究,发现随切削速度的提高,切屑分节内的塑性变形逐渐缩小,切削速度达到一定程度后塑性变形将主要集中在靠近刀尖的一端,而切屑分节中的绝大部分处于与基体材料一致的状态^[11]。这和上述分析的结论是一致的。

4 结论

(1)建立了锯齿形切屑模型和锯齿化程度评价参数 θ, ε, μ ,在切削速度不过高、切屑分节畸变不严重的情况下可以作为平均参数评价切屑分节的变形程度。但当切削速度过高而使切屑变形主要集中在切屑内侧时,这些参数无法真实地反映出内侧的变形程度。

(2)建立的切屑形成过程的模型说明材料在由低速切削到高速切削过程中逐渐出现锯齿化的直接原因是处于剪切面上的材料不能进行充分的塑性滑移,而不能进行充分塑性滑移的根本原因是材料的动态屈服强度随切削速度的提高得到增强,而热软化效应、应变强化效应在切屑积累阶段对即将形成的剪切面的影响较弱。

参 考 文 献

- 1 桂贵生, 何庆. 高速加工机理与关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 192 ~ 195.
Gui Guisheng, He Qing. Mechanism of high speed machining and its key technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 192 ~ 195. (in Chinese)
- 2 Xie J Q, Bayoumi A E, Zbib H M. Analytical and experimental study of shear localization in chip formation in orthogonal machining[J]. Mater. Eng. Performance, 1995, 4(1): 32 ~ 39.
- 3 Shaw M C, Vyas A. The mechanism of chip formation with hard turning steel[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 77 ~ 82.
- 4 Zhenbin H, Komanduri R. On a thermomechanical model of shear instability in machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(11): 69 ~ 73.
- 5 Nakayama K. The formation of saw tooth chips[C]//Int. Conf. on Prod. Eng., Tokyo, 1974: 572 ~ 577.
- 6 Gentel A, Hoffmeister H W. Chip formation in machining Ti6Al4V at extremely high cutting speeds[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 49 ~ 52.
- 7 He N, Lee T C, Lau W S, et al. Assessment of deformation of a shear localized chip in high speed machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1 ~ 3): 101 ~ 104.
- 8 Duan C Z, Wang M J, Pang J Z, et al. Calculational model of shear strain and strain rate within shear band in a serrated chip formed during high speed machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1 ~ 3): 274 ~ 277.
- 9 Astakhov V P. Tribology of metal cutting[M]. Elsevier, 2006: 48 ~ 50.
- 10 Shi J, Liu C R. On predicting chip morphology and phase transformation in hard machining[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006, 27(7 ~ 8): 645 ~ 654.
- 11 Dolinsěk S, Ekinvić S, Kopačv J. A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157 ~ 158: 485 ~ 490.
- 12 Puerta Velásquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Metalurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6wt. % Al-4wt. % V alloy[J]. Mater. Sci. Eng. A., 2007, 452 ~ 453: 469 ~ 474.
- 13 Costin L S, Crisman E E, Hawley R H, et al. On the localization of plastic flow in mild steel tubes under dynamic torsional loading[C]//Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, Inst. Phys. Conf. Ser., No. 47, Oxford, 1979: 90 ~ 100.
- 14 Hartley K A, Duffy J, Hawley R H. Measurement of the temperature profile during shear band formation in steels deforming at high strain rates[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1987, 35(3): 283 ~ 301.
- 15 Asay J R, Kerley G I. The response of materials to dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1 ~ 4): 69 ~ 99.
- 16 周惠久, 黄明志. 金属材料强度学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 325 ~ 331.

(上接第 211 页)

- 11 Karalekas D E, Agelopoulos A. On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations[J]. Materials and Design, 2006, 27(2): 100 ~ 106.
- 12 Chen T Y, Chang Y B, Chen J K. Finite element simulation of scattered-light photoelastic fringe patterns[C]//11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics, 2008: 1 657 ~ 1 661.
- 13 Xu Lizhong, Zhang Lei. Numerical simulation of stress distribution for toroidal drive[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2006, 30(2): 209 ~ 221.