

高温合金高速切削锯齿形切屑应变与应变率研究^{*}

杨奇彪 刘战强 曹成铭 杜 劲

(山东大学机械工程学院, 济南 250061)

【摘要】 在分析锯齿形切屑形成的基础上,将切屑单个锯齿视为梯形,建立梯形各顶点的应变和应变率计算解析模型。进行高速切削 GH4169 实验,并收集实验获得的切屑。运用解析模型,分析不同切削速度下,高温合金 GH4169 切屑的变形情况。实验结果表明:在切削速度 200 ~ 1 000 m/min 范围内,随着切削速度的增加,GH4169 切屑变形程度增大,应变和应变率最大可分别达到 4.91 和 $4.59 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

关键词: 高速切削 锯齿形切屑 高温合金 切屑变形 应变

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0225-04

Strain and Strain Rate of Serrated Chip Generated by High Speed Cutting of Superalloys

Yang Qibiao Liu Zhanqiang Cao Chengming Du Jin

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

Abstract

An analytical model of vertex's shear strain and shear strain rate was developed based on the process of serrated chip formation with geometry shape of serrated chip as a trapezoid. The chip deformations under different cutting speeds for GH4169 were discussed with the proposed model. The results showed that with the cutting speed increasing, the degree of chip deformation increased. The maximums of strain and strain rate were respectively 4.91 and $4.59 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ with applied cutting speed range in 200 ~ 1 000 m/min.

Key words High speed cutting, Serrated chip, Superalloy, Chip deformation, Strain

引言

在高速切削过程中,随着切削速度提高,容易形成锯齿形切屑,从而使断屑容易,易实现自动化加工;但其分节时产生的切削力波动会引起加工系统振动,造成工件已加工表面质量恶化,同时会加剧刀具磨损或破损,因此研究高速切削时锯齿形切屑的形成机理对正确认识高速切削过程本质,进而制定正确的高速切削工艺、提高零件加工表面质量、降低刀具磨损或破损、提高刀具寿命具有重要意义^[1]。

GH4169 是一种广泛应用于航空航天和其他高

温、强腐蚀性等恶劣环境下的金属材料,主要应用于燃气涡轮发动机、汽轮机、核动力装置、石油化工设备、航空航天和导弹零部件。由于 GH4169 剪切强度高、加工硬化现象严重、微观结构中有耐磨的硬质颗粒、导热性差等而被视为难加工材料^[2]。

在锯齿形切屑的形成过程中,切屑内部的变形是不均匀的^[3~6]。本文在文献[5]基础上,分析锯齿形切屑的形成过程,考虑其内部变形的不均匀性,通过高速切削 GH4169 实验,收集实验得到的切屑,将切屑单个锯齿视为梯形,建立梯形各顶点的应变和应变率解析计算模型,用此模型研究 GH4169 切屑内部的变形情况。

收稿日期: 2010-03-10 修回日期: 2010-04-25

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724401)、国家自然科学基金资助项目(50828501)、国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-043)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAF32B01)和山东省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2009JQB01027)

作者简介: 杨奇彪,博士生,主要从事高速切削技术研究,E-mail: qibiaoy@yahoo.com.cn

1 直角切削锯齿形切屑的形成

以单刃正交切削模型来研究锯齿形切屑的变形。锯齿形切屑的产生原因是切屑内部局部剪切失稳^[7-9],主要经历以下3个过程^[5]:①工件材料发生局部化剪切产生剪切失稳,开始形成第一个切屑单元,局部化剪切在这个切屑单元和下一个切屑单元的边缘交界处继续产生。②在第一个切屑的产生过程中,由于剪切滑移和力矩的作用,材料由未加工时的平行四边形转变为梯形切屑,并旋转一定的角度。③当下一个切屑快要形成时,第一个切屑的剪切局部化停止,新的剪切失稳在第二个及其下一个切屑单元间产生。

2 锯齿形切屑应变和应变率解析模型

锯齿形切屑模型图如图1所示。锯齿形切屑是由平行四边形ABCD变为梯形NEFG而形成的。本文在文献[5]的基础上,假设锯齿形切屑各顶点(N、E、F、G)变形不相同,并且E点在变形后与B点并不重合,A点变形后到N点,B点变形后到E点,C点变形后到F点,D点变形后到G点。将N点平移到A点,可以看出:由于刀具前刀面及刀刃对平行四边形ABCD的力矩作用,切屑整体沿逆时针方向旋转了β角度。因此,为计算方便,将梯形NEFG绕A点沿顺时针旋转β角度(由于N点与A点重合,下面N点都用A点来代替),如图2所示。由于此时变换梯形没有发生形状上的变化,因此变换后对各点应变和应变率的求解没有影响。

∠GAE、l_{FH}、l_{AE}、l_{GF}可以通过测量切削实验获得

$$\varepsilon_F = \frac{\sqrt{\left[\frac{2a^2 + (b+c)h_2\sin\varphi\cos\varphi - 2acs\sin\varphi - 2ah_2\sin\varphi\cot\alpha}{\sin\varphi}\right]^2 + [2a - (b+c)\sin\varphi]^2 h_2^2}}{(b+c)h_2\sin\varphi}$$
$$\varepsilon_G = \frac{\sqrt{4a^2 + (b+c)^2\sin^2\alpha - 4a(b+c)\sin\alpha\cos(\alpha-\varphi)}}{(b+c)\sin\alpha\sin\varphi}$$

(3)

由 $\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}, \Delta t = \frac{l_{BC}}{v} = \frac{(b+c)h_2}{2av}$, v 为切削速度,得

$$\dot{\varepsilon}_E = \frac{\varepsilon_E}{\Delta t} \quad \dot{\varepsilon}_F = \frac{\varepsilon_F}{\Delta t} \quad \dot{\varepsilon}_G = \frac{\varepsilon_G}{\Delta t}$$

可以看出,E、F、G点的应变和应变率并不相等,切屑内各点的变形并不均匀。如果 $l_{AE} = l_{AB}$,则 $\varepsilon_E = 0$ 。

当 $l_{AE} = l_{GF}$ 时,即梯形AEGF变为平行四边形,

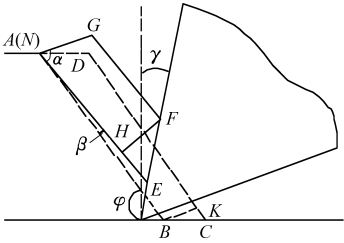


图1 锯齿形切屑模型图

Fig. 1 Model illustration of serrated chip

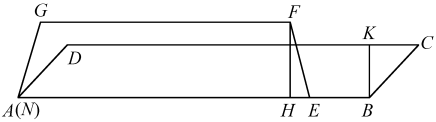


图2 锯齿形切屑变形简图

Fig. 2 Diagram of serrated chip deformation

的切屑得到,设∠GAE = α, l_{FH} = h₂, l_{AE} = b, l_{GF} = c, l_{BK} = h₁,切削厚度为 a,剪切角为 φ,则 l_{AB} = a/sinφ, B、C、D点的变形情况不同,将其应变分别进行求解,得

$$\varepsilon_E = \frac{l_{BE}}{l_{BK}} \quad \varepsilon_F = \frac{l_{CF}}{l_{BK}} \quad \varepsilon_G = \frac{l_{DG}}{l_{BK}}$$

由于固体的不可压缩性,切削宽度不变,因此,平行四边形ABCD的面积与梯形AEFG的面积相等,有

$$l_{AB}l_{BK} = \frac{1}{2}(l_{AE} + l_{GF})l_{FH}$$

则
$$l_{BK} = \frac{(l_{AE} + l_{GF})l_{FH}}{2l_{AB}} = \frac{(b+c)h_2\sin\varphi}{2a}$$

对 l_{BE}、l_{CF}、l_{DG}推导,分别代入 ε_E、ε_F、ε_G 可得

$$\varepsilon_E = \frac{l_{BE}}{l_{BK}} = \frac{l_{AB} - l_{AE}}{l_{BK}} = \frac{2a(a - b\sin\varphi)}{(b+c)h_2\sin^2\varphi}$$

(1)

形成的切屑为带状切屑,将式(2)、(3)进行化简得

$$\varepsilon_F = \varepsilon_G = \frac{\cos\gamma}{\cos(\phi - \gamma)\sin\varphi}$$

(4)

式(4)即为带状切屑的剪应变公式,与文献[3]的剪应变公式相同。

当 l_{GF} = 0,即梯形AEGF变为三角形时,形成的切屑为三角形锯齿形切屑,将式(2)、(3)化简得

$$\varepsilon_F = \sqrt{\left(2\cot\alpha - \cot\varphi - \frac{2b}{h_2}\right)^2 + 1}$$

$$\varepsilon_G = \sqrt{(2\cot\alpha - \cot\varphi)^2 + 1}$$

可以看出,三角形锯齿形切屑 F、G点的应变均大于1。

3 高速切削 GH4169 切屑的切屑变形分析

为了研究锯齿形切屑的变形,收集了不同切削速度加工 GH4169(硬度为 30HRC)时获得的切屑,用 XQ-2B 镶嵌机镶嵌、抛光,对切屑进行显微观察并测量,切屑如图 3 所示,用文献[10]的方法测量剪切角,锯齿形切屑各参数的测量值如表 1 所示,将测得的数据代入式(1)~(3)及 $\dot{\epsilon}_E$ 、 $\dot{\epsilon}_F$ 、 $\dot{\epsilon}_G$ 中求得各点应变、应变率分别如图 4、5 所示。

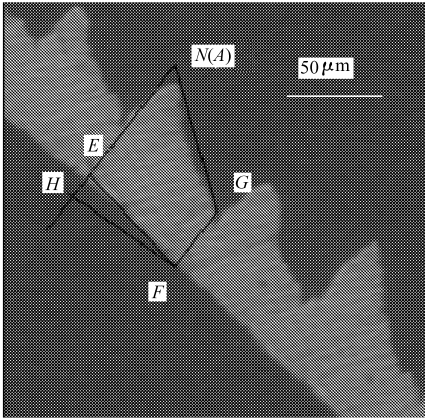


图 3 切削速度为 200 m/min 时的切屑
Fig. 3 Serrated chip at $v = 200$ m/min

表 1 不同切削速度下的锯齿形切屑参数
Tab.1 Parameters of serrated chip with different cutting speeds

切削速度 / $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	l_{FH} / μm	$\alpha /(^{\circ})$	l_{AE} / μm	l_{GF} / μm	剪切角 $\varphi /(^{\circ})$
200	51.04	57.4	65.06	31.73	48.4
400	45.98	60.0	64.83	14.25	42.5
600	35.63	63.5	58.16	9.20	49.6
800	24.37	57.2	54.03	8.05	56.4
1 000	28.28	60.3	58.39	4.60	46.1

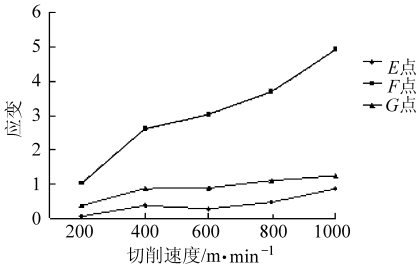


图 4 不同切削速度下切屑各点应变

Fig. 4 Strains of serrated chip with different cutting speeds

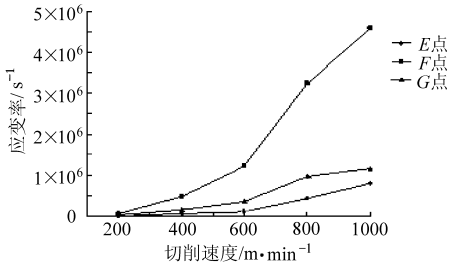


图 5 不同切削速度下切屑各点应变率
Fig. 5 Strain rates of serrated chip at different cutting speeds

由图 4、5 可见:切屑内各点的应变、应变率的不均匀性较大。随着切削速度的增加, F 点应变和应变率均增加,切削速度对 F 点的应变和应变率影响很大,对 E 、 G 点应变和应变率影响较小。 F 点的应变和应变率最大,其次是 G 点,最小的是 E 点。随着切削速度的增加,切屑各点间应变和应变率的不均匀性增大。切削速度为 600 m/min 是锯齿形切屑应变率各点差距变化的临界点,当切削速度小于 600 m/min 时, E 、 F 、 G 点应变率相差不大,之后,随着切削速度的提高, E 、 F 、 G 点之间应变率的差距变化越来越明显。当切削速度达到 1 000 m/min 时,切屑 F 点的应变和应变率最大,达到 4.91,应变率达到 $4.59 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

如图 1 所示,刀具从 C 点向 B 点的运动过程中,在 C 点产生剪切失稳,随着刀具向前移动,切屑变形慢慢积累,直至运动到 B 点,由于局部剪应力达到临界值而产生剪切失稳。在刀具运动的过程中,切屑的应变从 F 点到 G 点逐渐减小,这是由于其应力逐渐减小导致的;而 E 点则产生变形随即就剪切失稳,因此变形不大。

4 结论

- (1) 锯齿形切屑内各点的应变和应变率不均匀,随着切削速度的增加,切屑内部变形程度的不均匀性增大。
- (2) 随着切削速度的增加, F 点的应变和应变率增大,切削速度对 E 点和 G 点的应变和应变率影响不大。
- (3) 在实验条件切削速度范围内,随着切削速度的增加,切屑的应变最大达到 4.91,应变率达到 $4.59 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

参 考 文 献

1 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

2 Nalbant M, Altin A, Gokkaya H. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys [J]. Materials and Design, 2007, 28(4):1 334 ~ 1 338.

- 3 Recht R F. A dynamic analysis of high-speed machining [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1985, 107(4):309~315.
 - 4 Turley D M, Doyle E D. Calculation of shear strains in chip formation of titanium [J]. Materials Science and Engineering, 1982, 55(1):45~48.
 - 5 He N, Lee T C, Lau W S. Assessment of deformation of shear localized chip in high speed machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1~3):101~104.
 - 6 Duan C Z, Wang M J, Pang J Z. A 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.
 - 7 Komanduri R, Shroeder T, Hazra J, et al. On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 steel [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1982, 104(2):121~131.
 - 8 Davies M A, Burns T J, Evans C J. On the dynamics of chip formation in machining hard metals [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1997, 46(1):25~30.
 - 9 Davies M A, Chou Y, Evans C J. On the chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(1):77~82.
 - 10 Cotterell M, Byrne G. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(11):93~96.
 - 11 苏国胜,刘战强,杜劲,等. 锯齿形切屑变形表征与其形态演化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):223~227.
Su Guosheng, Liu Zhanqiang, Du Jin, et al. Description of serrated chip deformation and its morphology evolution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):223~227. (in Chinese)
-

(上接第 219 页)

- 4 刘宝碇,赵瑞清,王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 144, 248~249.
- 5 Liu B. Theory and practice of uncertain programming[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.
- 6 Liu Y K, Liu B. Random fuzzy programming with chance measures defined by fuzzy integrals[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 36(4~5):143~160.
- 7 Ana Colubi. Statistical inference about the means of fuzzy random variables: Applications to the analysis of fuzzy and real-valued data[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(3):344~356.
- 8 戴怡,贾亚洲,申桂香. 立式加工中心的故障分析与改进措施[J]. 中国机械工程, 2001, 12(11):1 209~1 211.
Dai Yi, Jia Yazhou, Shen Guixiang. Failure analysis and reliability improvement for vertical machining center[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(11):1 209~1 211. (in Chinese)