

钛合金超精密切削过程的数值模拟与实验分析

吴红兵^{1,2}, 王朋³

- (1. 浙江大学宁波理工学院 机电与能源工程学院, 浙江 宁波 315100;
2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315100;
3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要:以钛合金材料 TC4 的超精密切削加工机理为研究目的, 采用有限元技术与实验验证相结合的方法, 建立了钛合金材料超精密切削过程的正交切削有限元模型, 深入介绍了有限元建模过程中有限元模型的建立、材料应力应变关系等关键技术。采用建立的有限元模型对钛合金的加工过程进行了正交切削有限元模拟。通过模拟获得了切屑形成过程、切削力曲线以及温度分布等结果。应用单点金刚石车床进行了钛合金 TC4 的超精密车削实验, 研究结果显示数值模拟结果与实验结果比较吻合。数值模拟方法的有效性也得到了验证, 可以进一步用来研究钛合金材料的切削过程。

关键词: 钛合金; 超精密切削; 数值模拟

中图分类号: TH161 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-3988-05

Simulative and experimental investigation on ultra-precision cutting of titanium alloy

Wu Hongbing^{1,2}, Wang Peng³

- (1. School of Mechanical and Energy, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;
2. Zhejiang Provincial Key Lab of Part Rolling Technology, Ningbo 315100, China;
3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: To investigate the cutting mechanism of the titanium alloy TC4 in the ultra-precision cutting process, an orthogonal cutting finite element model was established. The key techniques of modeling the FEM model and the material model were introduced detailed. The ultra-precision cutting process of titanium alloy was simulated using the established FEM model. The chip formation, cutting force and cutting temperature were obtained. To validate the simulation, an ultra-precision turning experiment has been carried out by single point diamond turning machine. Through the comparison of chip formation and cutting force, the result of simulation agrees with the result of experiment. It proves that the FEM method is an effective method can be used to investiate the ultra-precision cutting mechanisms of titanium alloys.

Key words: titanium alloy; ultra-precision cutting; numerical simulation

收稿日期: 2014-04-22; 修订日期: 2014-05-26

基金项目: 浙江省教育厅项目(Y201122035)

作者简介: 吴红兵(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事切削加工方面的研究。Email: wuhongbing79@126.com

通讯作者: 王朋(1980-), 男, 博士, 主要从事超精密加工技术方面的研究。Email: Wpeng605@126.com

0 引言

钛合金材料具有高强度、轻密度、耐腐蚀、生物相容性好等优异的性能而广泛应用于航空航天、生物医疗、海洋及建筑等行业。但是由于钛合金材料导热性能差、化学活性高,导致其在加工过程中温度高、刀具易磨损,加工质量难以保证。国内外学者对钛合金材料的常规加工已经进行大量研究,无论是切削机理还是切工工艺或者刀具材料等方面都取得卓有成效的成果^[1-2]。

随着技术的发展,在医疗及航空航天领域对超精密钛合金零件的需求愈来愈强烈,对钛合金加工精度的要求越来越高^[3]。然而,对于钛合金材料超精密加工过程的研究目前还处于研究探索阶段,只有为数不多的学者对其超精密切削过程进行了研究^[4-6]。Shinozaki^[4]等应用金刚石刀具对钛合金进行了超精密加工试验,并对刀具磨损进行了初步研究;Yasui 等人^[5]采用陶瓷涂层金刚石刀具在低速下进行钛合金材料的超精密加工并取得良好效果;Zareena 等人^[6]则对钛合金超精密切削过程中金刚石刀具的磨损机理及寿命延长方法进行了深入研究。

钛合金材料的超精密切削过程中,刀具磨损较快,切削精密及切削质量难以保证一直困扰着国内外学者。因此,提高钛合金材料的加工性是国内外学者研究的重点,近年来,有限元模拟广泛的用于各种材料的切削过程研究。单点金刚石车削技术是超精密加工中最常用的方式之一,也是最容易实现钛合金材料超精密加工手段^[7-9]。采用数值模拟研究结合实验验证的方法进行钛合金切削机理的研究,可以节省成本,提高研究效率。因此,文中以钛合金 TC4 的超精密切削过程为研究对象,采用数值模拟与单点金刚石超精密车削实验相结合的方法来研究钛合金材料超精密车削过程中的各种物理现象,以期对钛合金材料超精密加工提供更加翔实的技术积累。

1 切削过程的有限元建模

1.1 有限元模型的建立

金属切削的方式及种类很多,在各种加工方式中所采用的刀具形态各异,但是在切削部分,特别是微切削过程中,从几何形状和参数方面都有共性的

内容。在超精密加工过程中,不论刀具的形状如何复杂,就切削区域而言,从微观上来讲都可以简化成直切削刃,在微元长度内沿预定义的路径进行切削,因此,微切削过程可以简化为正交切削模型,钛合金材料的超精密车削模型也不例外。如图 1 所示建立钛合金超精密车削的正交有限元切削模型。工件采用稳定性较好的简缩积分四节点双线性热力耦合单元 CPE4T,工件底面水平和垂直方向自由度施加位移约束,左右两个侧边只约束水平自由度,刀具采用刚体单元 R3T,并按给定速度进给运动。

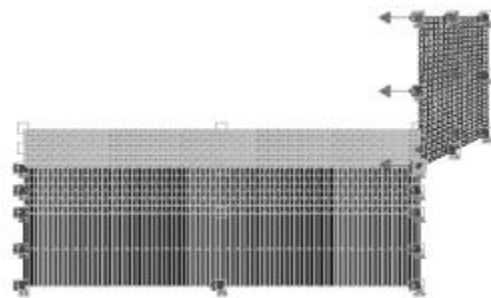


图 1 正交切削有限元模型

Fig.1 Orthogonal finite element cutting model

1.2 有限元模型的设置

数值模拟过程中,材料模型直接体现材料在切削过程中的力学行为。钛合金材料超精密切削过程的数值模拟采用 Johnson-Cook 模型^[10],其具体表达形式如下:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}) [1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

文中采用的钛合金 TC4 的材料参数如表 1 所示。

表 1 钛合金 Johnson-Cook 本构模型常数

Tab.1 John-Cook constitutive constants

A/MPa	B/MPa	n	C	m
1 000	780	0.47	0.033	1.02

由于金刚石刀具硬度远高于钛合金的硬度,因此在有限元分析过程中,将刀具材料设置成刚体,并在模具切削时设置为干切削。有限元切削模拟过程的参数如表 2 所示。

表 2 超精密切削参数

Tab.2 Ultra-precision cutting parameters

Pa- rame- ter	Mate- rial	Tool parameters		Spindle speed /rmp	Feeding speed mm/min	Cutting depth /μm	
		Material	Rake angle				Clearance angle
Value	TC4	Diamond	0°	10°	4 000	12	10

2 超精密加工实验

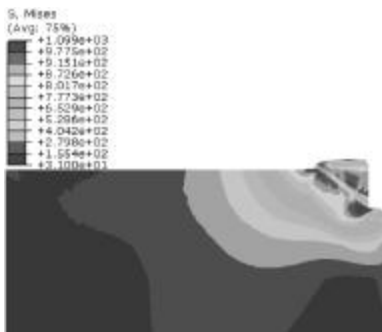
为了验证钛合金超精密车削的性能以及数值分析模型的可靠性,应用 Precitech 公司的 Nanoform300 两轴单点金刚石车床上对钛合金 TC4 材料进行的超精密车削实验(如图 2 所示),采用单点金刚石车刀,刀具参数和各切削参数与计算机数值模拟的参数设置相当,具体参数如表 2 所示。在试验过程中,采用瑞士 kistler 9252A 测力仪对切削过程中的受力情况进行了测试。



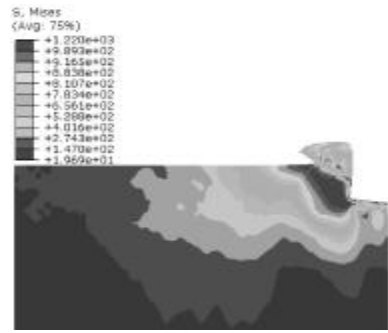
图 2 钛合金超精密切削实验
Fig.2 Ultra-precision cutting test of titanium alloy

3 结果分析与讨论

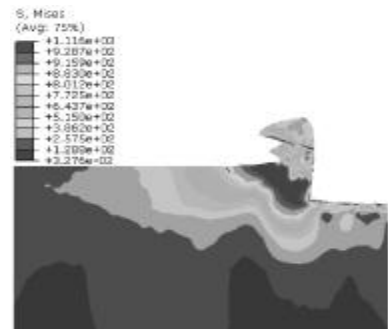
应用建立的模型,采用有限元软件 ABAQUS 6.12 对钛合金 TC4 的超精密切削过程进行模拟,图 3 为模拟的钛合金超精密切削过程,从模拟过程可以看出,随着刀具的前进,工件材料在刀具作用力下发生剪切,剪切区的应力不断增加,切削层材料发生变形,同时剪切区的温度开始增加,锯齿状切屑的第一个节块开始形成,如图 3(a)所示;随着应力和温度的不断增加,剪切区材料开始软化,第一个切块产生滑移形成一个完整的锯齿状,如图 3(b)所示;随着不断前进,锯齿状切屑不断生成,如图 3(c)、(d)所示。



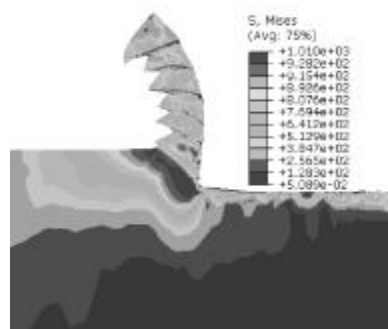
(a) 刀具刚切入时
(a) Tool begin to cut



(b) 第一个节块
(b) First serrated chip



(c) 第二个节块产生
(c) Second serrated chip



(d) 完整的锯齿状切屑形成
(d) Whole serrated chip

图 3 切屑成形过程

Fig.3 Chip formation process

在钛合金超精密切削实验中,也同样得到了锯齿状切屑,图 4 为采用扫描电镜 Hitachi TM3000 拍得的锯齿状图。对比图 3 和图 4 可知,数值模拟过程可以再现实际的切削现象,也表明了钛合金材料在超精密切削条件下切屑仍为锯齿状切屑。

图 5 为钛合金材料 TC4 超精密切削过程数值模拟获得的切削力曲线,从图中可知,由于钛合金材料在超精密切削过程中形成的是锯齿状切屑,切削力随着节块的形成不断波动。图 6 为超精密车削实验获得的钛合金切削力曲线,从图中可以看出同样出



图 4 超精密切削实验得到钛合金锯齿状切屑

Fig.4 Serrated chip obtained by the ultra-precision cutting test

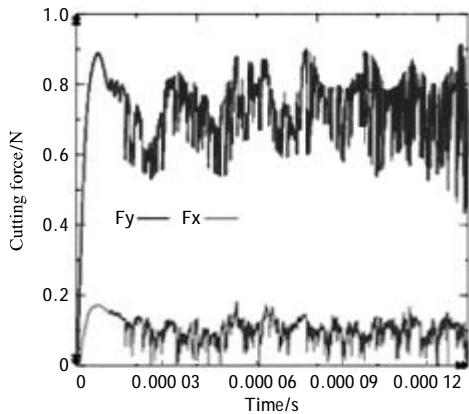


图 5 数值模拟获得的切削力

Fig.5 Cutting force by simulation

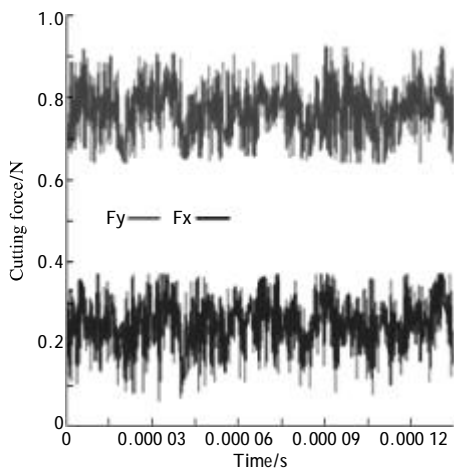


图 6 切削实验获得的切削力

Fig.6 Cutting force by turning test

现波动。

钛合金超精密车削力实验数据与模拟数据及误差对比分析值如表 3 所示。从表 3 看出,数值模拟的切削力略小于实验结果,切削力实验值与数值模拟值的相对误差均在 10%以内,数值模拟结果可以接受。二者的差异主要是由于在数值模拟时,刀具假定为刚体,并且忽略了刀具实际加工过程中的磨损因

素所致。同时对比结果也证明了有限元方法对于金属加工过程研究的有效性。

表 3 切削力对比

Tab.3 Comparison of cutting force

Cutting force	Fx	Fy
Test value/N	0.191	0.792
Simulation value/N	0.173	0.722
Error	9.8%	8.7%

数值模拟获得的切屑温度如图 7 所示,从图中可知,由于钛合金材料导热性差,变形产生的热量来不及传导,热量集中在剪切区域,剪切区域的最高温度为 983.2℃。

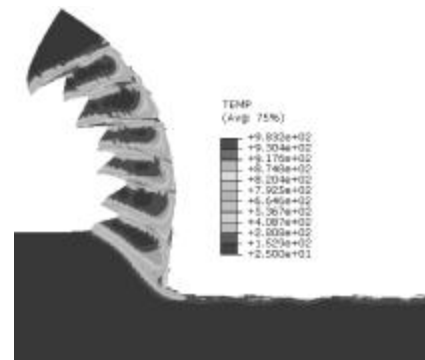


图 7 钛合金超精密切削过程中温度场分布

Fig.7 Temperature distribution in ultra-precision cutting

通过上述分析可知,数值模拟可以再现实际的加工过程。图 8 为钛合金超精密切削实验中获得的面形貌,测试的仪器为 Wykont8000。从图中表面可以清晰的看到刀纹。经过超精密切削,钛合金表面粗糙度 $Ra=28.95\text{ nm}$,实验证明了钛合金材料一样可以达到纳米级的粗糙度。

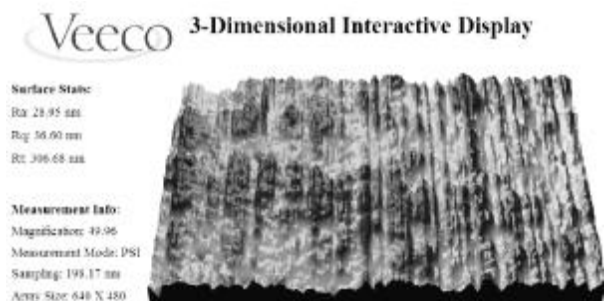


图 8 钛合金超精密切削获得的表面

Fig.8 Surface of titanium alloy after ultra-precision cutting test

4 结论与展望

钛合金以其优异的性能在超精密领域的应用越

来越受关注,文中针对钛合金超精密切削过程进行了初步的探索研究,建立了正交切削有限元模型对钛合金 TC4 的超精密切削过程进行了数值模拟,分析了钛合金 TC4 超精密切削过程中切削力,切削温度分布及锯齿状切屑成形过程。在超精密车床上采用单点金刚石刀具进行了钛合金超精密车削实验,得到了 $Ra=28.95\text{ nm}$ 的表面粗糙度。通过模拟结果与切削实验中的切削力和切屑形状对比表明,数值模拟结果与试验结果比较吻合,同时也证明了数值模拟方法是十分有效的研究钛合金超精密切削机理的手段。

参考文献:

- [1] Arrazol P J, Garaya A, Iriarte L M, et al. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 2223-2230.
- [2] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloy and their machinability-a review[J]. *Journal of Materials Technology*, 1997, 68: 262-274.
- [3] Luo Chuanwei, Chang Weijun, Qiang Hua, et al. Analysis of aerodynamic pressure loading for supersonic aircraft optical window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 664-667. (in Chinese)
罗传伟, 常伟军, 强华, 等. 超音速飞行器光学窗口气动压力载荷分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 664-667.
- [4] Shinozaki A. Attempt on ultra-precision cutting of titanium alloy with diamond tool [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2006, 72(12): 1505-1509.
- [5] Heiji Yasui, Akira Shinozaki. Effect of low cutting speed on ultra-precision cutting of β type titanium alloy with a coated-cemented-carbide tool [J]. *Journal of The Japan Society for Precision Engineering*, 2008, 74(4): 359-363.
- [6] Zareena A R, Veldhuis S C. Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3): 560-570.
- [7] Wang Yi, Yu Jingchi. Compensation method for ultra precision turning error of high relative aperture surface based on coefficients of Zernike polynomial [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 724-728. (in Chinese)
王毅, 余景池. 基于泽尼克多项式系数的大相对孔径表面超精密车削误差的补偿方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 724-728.
- [8] Li Junqi, Zhang Yunlong, Su Jun, et al. Turning of DOE Ge single crystal with micro-circle diamond tool [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3053-3058. (in Chinese)
李军琪, 张云龙, 苏军, 等. 微圆弧金刚石刀具车削锗单晶衍射元件[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3053-3058.
- [9] Johnson R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high-temperatures[C]//*Proc 7th Intl Sym on Ballistics, the Netherlands*, 1983: 541-547.
- [10] Wu Hongbing, Jia Zhixin, Zhang Xuechang, et al. Study on simulation and experiment of drilling for titanium alloys[J]. *Mater Sci Forum*, 2012, 704-705: 657-663.