

难加工材料切削机理研究的新进展

胡创国 张定华 汪文虎

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室, 西安 710072

摘要 航空发动机重要零件如机匣、压气机风扇叶片等广泛采用钛、镍基合金等先进结构材料。钛、镍基合金材料切削加工性较差, 主要表现在材料热硬度和热强度很高, 所需切削力很大, 工件、刀具容易产生较大变形; 材料热扩散率低; 刀具切削深度线位置缺口现象严重, 以及形成锯齿状切屑等几个方面。深入研究此类难加工材料的切削机理, 对于实现薄壁件高效精密数控加工技术至关重要。本文重点介绍了关于高硬度金属材料锯齿状切屑的形成机制; 非连续切屑形成过程的有限元数值模拟关键技术, 包括自适应网格细化、切屑与工件之间的分离准则, 以及用以描述单元网格中裂纹形核与扩展的断裂准则和算法; 切削区域高温、高应变率条件下材料屈服流动行为的准确描述, 系统考虑应变、应变率和温度三者之间的相互影响作用; 切削温度场、工件表层残余应力场的分布规律, 以期消除残余扭曲变形对航空工业中普遍使用的薄壁结构件加工精度的显著影响。

关键词 金属切削加工, 锯齿状切屑, 断裂准则, 屈服流动模型, 残余应力, 钛、镍基合金

1 前言

金属切削加工成形是一个从工件毛坯表面以切屑形式切除多余材料的过程。其基本特点是局部大变形、高应变率并伴有大量热量生成。金属切削内在机理的深入研究有助于优化工艺参数、控制加工精度、合理安排刀具路径以及延长刀具使用寿命等等。影响金属切削过程的因素很多, 比如切削参数、刀具几何参数以及工件刀具材料等。这也使得新加工工艺的开发和切削条件的优化变得异常复杂。有限元模拟技术可以全面高效的考虑各种切削加工参数之间的相互影响作用, 因而是研究金属切削机理以及优化设计加工工艺的得力工具^[1,2]。

有关材料切削机理的研究涉及到的方面很多。首先, 切屑形态及其形成机制在整个切削加工过程中扮演着非常重要的角色。一方面, 切屑形态在很大程度上影响着材料切除率、切削力大小、工件加工表面质量、刀具磨损程度等等; 另一方面, 随着工件材料硬度、切削条件、刀具几何参数的不同, 切屑形态由连续状到锯齿状不断演变, 其形成机制也相应发生变化^[3]。其次, 由于材料塑性变形做功以及切屑 - 刀具、刀具 - 工件界面之间的摩擦行为, 切削过程中会有大量热量生成, 从而引起工件加工表面存在较大的

残余应力并造成薄壁结构件的扭曲变形, 其对刀具磨损方式、使用寿命也有重要的影响作用^[4]。另外, 切削区域高温、高应变率条件下材料的屈服流动特性是一种相当复杂的行为, 这种屈服行为的准确描述也是运用有限元技术精确模拟切屑形态、切削力大小、温度应力场分布所必需的基本信息。

航空发动机重要零件如机匣、叶片等广泛采用钛、镍合金等先进结构材料。这些关键零件加工质量的优劣对发动机整体性能和效率影响很大, 深入研究此类难加工材料的切削机理具有重大意义。本文论述了难加工材料锯齿状切屑的形成机制、适于模拟非连续断屑形态的断裂准则、切削条件下材料屈服流动特性的确定以及切削过程中温度场和工件加工表面残余应力场的分布规律。

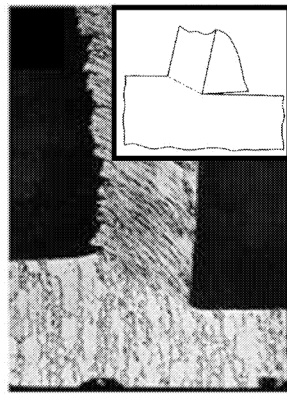
2 切屑形态及其形成机制

切削加工是一种非常重要的金属材料成形手段。为了提高切削加工产品的生产效率, 特别是满足航空航天等领域对关键零件精度的高要求, 必须深入地研究切削机理、模拟切削过程。实际上, 金属切削过程是一个相当复杂的工艺过程。利用解析方法很难对切屑形成过程中的摩擦行为、切削区域大变形高应

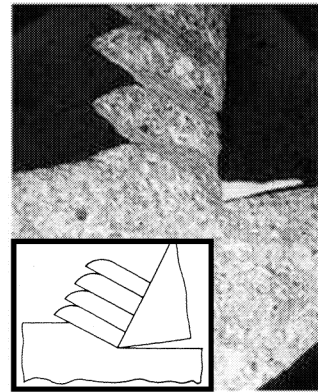
变率进行定量分析和研究. 数值模拟结合实验手段可方便用于切屑形成机理的研究.

2.1 锯齿状切屑形成机制

当工件材料硬度较低时, 切屑形态一般为连续状, 但对于钛及其合金^[5]以及镍基超合金^[6]等高硬度金属材料, 锯齿状切屑更为常见, 如图 1 所示. 锯齿状等断屑现象对材料切除率、刀具磨损以及工件加工表面完整性等都有相当不利的影响. 关于锯齿状切屑的形成机制主要存在两种观点: 其一认为首先在工件自由表面周期性萌生裂纹, 随后裂纹逐渐沿刀尖方向扩展, 最终导致主剪切区域突变失效^[5,7]; 其二认为主剪切区域发生了热塑性失稳, 即所谓的绝热剪切过程^[8,9]. 文献 [3] 中对此做了更进一步详细的实验研究.



(a) 连续状



(b) 锯齿状

图 1 切屑基本类型

2.2 切屑形态的有限元数值模拟

金属切削加工过程的有限元数值模拟有拉格朗日法和欧拉法两种. 在实际的工程应用中, 前者使用的更为广泛. 拉格朗日法使用物质坐标, 单元网格随材料一起流动. 这种方式的有限元模拟需要有一定的分离准则用以描述切屑与工件之间的分离. 对于非连续状断屑现象, 尚需引入适当的断裂准则和算法用以描述单元网格中裂纹的形核与扩展过程. 由局部大变形引起的单元网格过度扭曲现象可以通过连续自适应网格细化技术得到较好的解决^[10]. 欧拉法使用空间坐标, 避免了发生网格畸变, 但需要运用稳态自由表面跟踪算法确定连续均匀的切屑边界, 也无法模拟断屑现象^[11].

对锯齿状切屑等断屑形态的有限元模拟需要建立相应的断裂准则, 当材料达到临界损坏值时, 即认为发生了裂纹形核与扩展. 文献 [12] 中用于模拟非连续切屑的韧性断裂准则是应变、应变率和静水压力

试样正交快停切削断面电镜扫描示于图 2. 图 2(a) 中的主要特征是一条从刀尖向工件自由表面扩展的白色硬化带, 这是材料在高应变率、大塑性应变条件下所经历的绝热剪切过程引起的. 这些实验结果似乎支持了关于锯齿状切屑形成的热塑性剪切理论. 然而, 尽管在很多快停切削实验中都出现了这样的白色硬化带, 但是它们并没有完全延伸至自由表面, 切削力大小也没有显著降低, 即没有导致材料的突变失稳. 图 2(b) 中标号为 ASB 1 和 ASB 3 的白色剪切带最终导致了锯齿状切屑的形成, 而 ASB 2 和 ASB 4 则未能充分扩展, 也没有引起突变失效. 由此可见绝热剪切可能是锯齿状切屑形成的主要原因, 但却不是主剪切区域突变失效的唯一机制. 随着切削条件的不同, 主剪切区域上部的失效是通过韧性断裂或大应变塑性变形发生的.

的函数, 公式如下

$$\begin{aligned} \varepsilon^p &> \varepsilon_c \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_0 - \alpha \frac{p}{\sigma} - \beta \frac{\dot{\varepsilon}^p}{V_c} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 σ 、 ε^p 和 $\dot{\varepsilon}^p$ 分别为等效应力、等效塑性应变和应变率, p 为静水压力, V_c 为切削速度, 其它为常数.

切削模拟过程中, 当单元网格发生严重畸变, 或者在一定的迭代步之后, 即对单元网格进行重划. 网格重划时, 直接删除那些达到临界损坏值的单元. 图 3 是采用 Cockcroft-Latham 断裂准则所模拟的切屑断裂情况^[13]. 材料临界损坏值由单轴拉伸实验确定如下

$$C_i = \int_0^{\varepsilon_f} \bar{\sigma} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

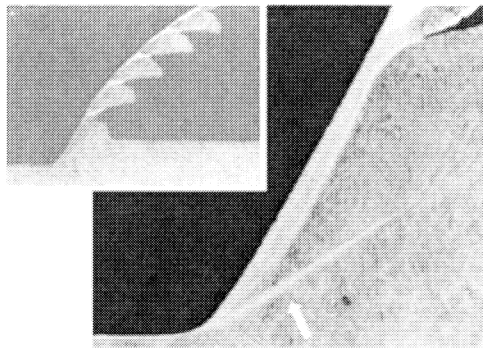
式中 ε_f , $\bar{\varepsilon}$, $\bar{\sigma}$ 和 σ^* 分别为断裂应变、等效应变、等效应力以及最大应力.

同样, 文献 [14] 利用商用有限元软件 ABAQUS/Explicit™ 中的自适应网格重划模块和单元删除功能, 模拟了切削加工高硬度材料时锯齿状切屑的形成过程. 文中采用的 Johnson-Cook 剪切应变能失效准则如下所示

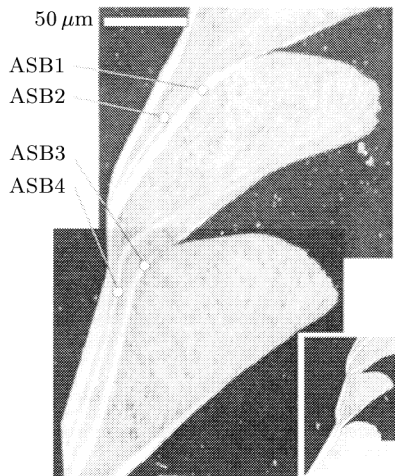
$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 + d_5 \left(\frac{\theta - \theta_{\text{transition}}}{\theta_{\text{melt}} - \theta_{\text{transition}}} \right) \right] \quad (3)$$

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \right) = 1$$

式中断裂塑性应变 $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 由无量纲塑性应变率 $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}/\dot{\varepsilon}_0$, 压应力偏应力比率 p/q 以及工件材料熔化温度 θ_{melt} , 转变温度 $\theta_{\text{transition}}$, 切削温度 θ 确定. 失效常数 $d_1 \sim d_5$ 可通过实验获得. 损伤参数 ω 达到单位值时, 材料即发生剪切失效.



(a) HRC=56, $v_c = 1.4 \text{ m/s}$



(b) HRC=60, $v_c = 0.55 \text{ m/s}$

图 2 试样切削断面电镜扫描 [3]

文献 [15] 利用应变能密度理论预测了非连续切屑的初始裂纹形核位置. 此外, 关于各种切屑与工件之间分离准则的比较可以参看文献 [16, 17].

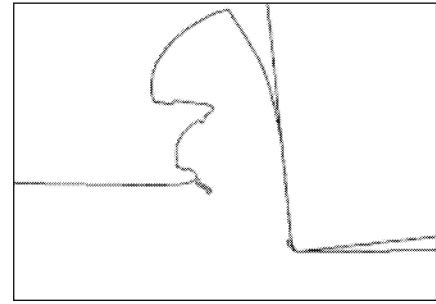
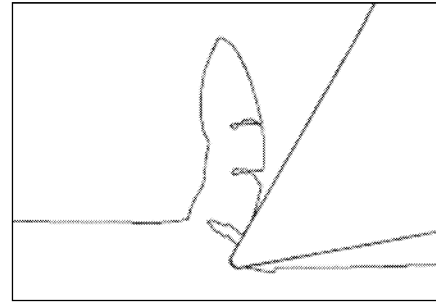


图 3 切屑断裂的有限元模拟结果 [13]

3 切削条件下材料屈服流动特性的确定

金属材料切削区域的平均应变率一般介于 $(10^3 \sim 10^5) \text{ s}^{-1}$ 之间, 或更高 10^7 s^{-1} . 而常规压缩或拉伸实验的应变率仅为 $(10^{-3} \sim 10^{-1}) \text{ s}^{-1}$ 之间, 即使采用先进的压缩或扭转实验设备, 所能达到的极限应变率也很难超过 10^5 s^{-1} [18]. 鉴于此, 许多学者致力于如何从现有材料屈服实验数据外推得到高温、高应变率条件下材料屈服流动模型的研究工作. 较为常用的 Johnson-Cook 模型等一般将应变、应变率和温度作为相互独立的变量, 分别考虑它们对材料屈服行为的影响作用. 而切削区域高温、高应变率条件下材料屈服流动特性更为准确的描述, 必须进一步系统考虑这些因素之间的相互影响 [19].

屈服应力 $\bar{\sigma}$ 一般可以表示为应变 $\bar{\varepsilon}$, 应变率 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 和温度 T 的函数, 即

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (4)$$

理想的热 - 黏塑性材料模型必须能够同时描述应变硬化效应、应变率硬化效应、热软化效应以及动态恢复或再结晶引起的软化效应等. 金属材料这种复杂流动特性的完整描述, 有赖于全面系统考虑应变、应变率和温度等因素之间的相互影响作用.

首先, 对温度 T 进行分解, 并忽略 α - β 相变引起的材料硬化, 则屈服应力 $\bar{\sigma}$ 可表示为

$$\bar{\sigma} = A \exp(kT_h) + B_1 \exp[m_1(T_h - T_1)^2] \quad (5)$$

式中 T_h 是温度 T 除以熔化温度 T_m 的规格化处理. 参数 A, k, B_1, m_1 和 T_1 均为应变、应变率的函数, 与温度无关. 它们与应变、应变率组合的对应关系由曲线拟合给出.

进一步对这些参数进行分离, 以参数 k 为例, 有

$$k(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}) = p_{21} \left(1 + p_{22} \ln \bar{\varepsilon} \right) \cdot \dot{\bar{\varepsilon}}^{p_{23}} \quad (6)$$

式中材料常数 p_{21}, p_{22} 和 p_{23} 由曲面拟合确定.

最后, 将 $A, k \dots$ 等分别带入式 (5), 即可确定所求的材料模型. 详细过程说明参见文献 [19].

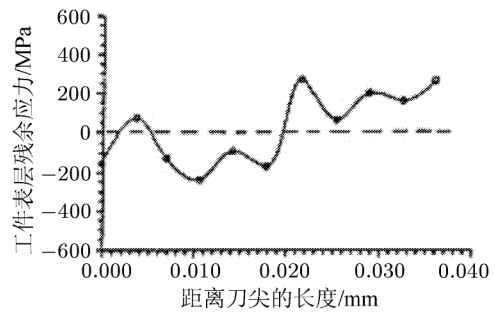
由于所用基本实验数据的应变率太低, 以上建立的材料模型还无法应用于对切削过程的模拟. 需要根据正交切削实验中测定的切削力大小为基准, 通过校核有限元模拟结果, 对材料常数进行修正, 从而可以获得适用于高应变率条件下的材料本构模型 [20].

4 切削温度场以及残余应力场分布

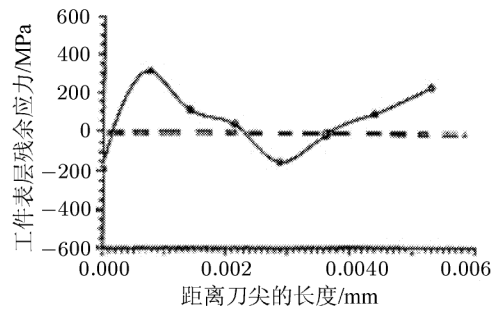
工件加工表面残余应力的存在严重影响了表面裂纹的形核与扩展行为, 从而大幅降低其疲劳强度和使用寿命, 残余应力引起的残余扭曲变形也会显著降低工件加工精度. 如何准确预测和控制工件表面残余应力、残余变形, 进而有效提高工件加工精度、改善工件加工表面完整性以及增强工件使用可靠性, 一直是精密、超精密切削领域中重要的研究课题.

早期提出的相关理论有滑移线场理论 [21]、表面层应力应变历史 [22] 以及有限元理论 [23] 等. 文献 [24] 研究了不同材料拉伸强度以及切削速度、进给率对工件表面切削层残余应力分布规律的影响, 认为工件表层残余应力沿厚度方向符合多项式函数分布. 运用热弹塑性大变形有限元方法, 分析不同切削参数条件下 NiP 合金超精密切削加工表面残余应力的分布规律, 可以发现达到稳态切削时, 工件表层残余应力在刀尖处为压应力, 随着到刀尖距离的增大, 残余应力先由于材料回弹转变为拉应力, 再由于不完全卸载状态又转变为压应力, 最后稳定于拉应力状态 [25], 见图 4.

运用测定残余应力的钻盲孔法, 文 [26] 分析了铣削加工钛合金材料时工件表面残余应力的分布状况, 并考虑了如何利用热处理来消除这些残余应力. 研究表明, 对于所选用的切削参数而言, 残余应力基本上处于压应力状态; 残余应力消除的程度随着热处理温度的升高而增大. 文中还确定了在不影响材料微观结构和机械性能条件下的最佳热处理温度.



(a) 切削深度 0.005 mm



(b) 切削深度 0.003 mm

图 4 稳态切削时工件表层的残余应力分布 [25]

切削过程中由于材料塑性变形做功以及摩擦做功, 会有大量热量生成. 工件、刀具表面很高的温度分布对刀具磨损、工件表面完整性以及加工精度等都具有重要的影响作用. 利用嵌入式热电偶和红外热成像技术以及积分式 CCD 摄影机, 文 [27, 28] 研究了不同切削参数条件下切削区域的温度场分布. 基于热力学第一定律, 建立热平衡偏微分方程并运用有限差分法求解之, 文 [29] 研究了铣削温度场的瞬态变化情况. 其它常用的数值模拟方法还有边界元法 [30]、有限体积法 [31] 以及有限元法 [32] 等.

5 结论

钛、镍合金等先进结构材料因其比重小、比强度高、耐热性和耐腐蚀性好而广泛用于航空发动机重要零件如压气机风扇叶片、机匣等. 这些关键零件加工质量的优劣对发动机整体性能和效率影响很大, 深入研究此类难加工材料的切削机理具有重大意义. 国内目前相关的研究工作还不够系统, 特别是缺乏对新型航空结构材料切削机理的深入了解.

切削加工钛、镍合金等高硬度金属材料时, 锯齿状切屑更为常见. 为了能够建立起准确的切削力预报模型、有效控制刀具磨损程度以及提高材料切除率等, 必须对锯齿状切屑形成机制进行更为细致的研究.

如何改善零件切削加工表面完整性及其加工质

量越来越引起关注。这涉及到表面残余应力的性质和分布状态、表面光洁度以及微观形貌等。有关它们与切削参数、刀具参数等的定量关系还有大量工作要做。

高速切削技术具有大幅度降低切削力大小、抑制机床系统颤震以及切削热由切屑飞速带走等优点,有利于提高刚性较差的薄壁类零件和容易产生热变形零件的加工精度,也使得钛合金和镍基合金等难加工材料的高效精密加工成为可能。同样,高速切削技术的应用及其优点的发挥是以高速切削机理为理论基础的,而有关这方面的研究工作还远远没有完善起来。

参 考 文 献

- 1 Mackerle J. Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976~1996). *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 86: 17~44
- 2 Mackerle J. Finite element analysis and simulation of machining: an addendum a bibliography (1996~2002). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43: 103~114
- 3 Barry J, Byrne G. The mechanisms of chip formation in machining hardened steels. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124: 528~535
- 4 Vernaza-Pena K M, Mason J J, Li M. Experimental study of the temperature field generated during orthogonal machining of an aluminum alloy. *Experimental Mechanics*, 2002, 42: 221~229
- 5 Vyas A, Shaw M C. Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, 121: 163~172
- 6 Choudhury I A, El-Baradie M A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 77: 278~284
- 7 Elbestawi M A, Srivastava A K, Elwardany T I. A model for chip formation during the machining of hardened steel. *Annals of the CIRP*, 1996, 45: 71~76
- 8 Zhen-Bin H, Komanduri R. Modelling of thermomechanical instability in machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39: 1273~1314
- 9 Davies M A, Burns T J, Evans C J. On the dynamics of chip formation in the machining of hard metals. *Annals of the CIRP*, 1997, 46: 25~30
- 10 Marusich T D, Ortiz M. Modelling and simulation of high-speed machining. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 1995, 38: 3675~3694
- 11 Strenkowski J S, Athavale S M. A partially constrained eulerian orthogonal cutting model for chip control tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119: 681~688
- 12 Obikawa T, Sasahara H, Shirakashi T, Usui E. Application of computational machining method to discontinuous chip formation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119: 667~674
- 13 Ceretti E, Lucchi M, Altan T. FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 95: 17~26
- 14 Eu-Gene N, David K A. Modelling of hard part machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127: 222~229
- 15 Zone-Ching L, Ship-Peng L. 2-D discontinuous chip cutting model by using strain energy density theory and elastic-plastic finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 381~398
- 16 Huang J M, Black J T. An evaluation of chip separation criteria for the FEM simulation of machining. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1996, 118: 545~554
- 17 Zhang L C. On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89-90: 273~278
- 18 El-Magd E, Treppmann C. Modelling of mechanical behaviour of materials for high speed cutting process. In: 3rd International Conf on Metal Cutting and High Speed Machining, Poster Session, 2001-07-25-28
- 19 Warnecke G, Oh J D. A new thermo-viscoplastic material model for finite-element-analysis of the chip formation process. *Annals of the CIRP*, 2002, 51: 79~82
- 20 Özel T, Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40: 133~152
- 21 Barash M M, Schoech W J. A semi-analytical model of the residual stress zone in orthogonal machining. *Advances in Machine Tool Design and Research*, 1971: 603~613
- 22 Liu C R, Barash M M. The mechanical state of the sublayer of a surface generated by chip-removed process part 1 and 2. *Journal of Engineering Industry*, 1976, 98(4): 1195~1208
- 23 Lin Z C, Lin Y Y, Liu C R. Effect of thermal load and mechanical load on the residual stress of a machined workpiece. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1991, 33(4): 263~278
- 24 El-Axir M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 1055~1063
- 25 Lin Z C, Lai W L, Lin H Y, Liu C R. The study of ultra-precision machining and residual stress for NiP alloy with different cutting speeds and depth of cut. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 97: 200~210
- 26 Sridhar B R, Devananda G, Ramachandra K, Ramaraja B. Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834. *Jour-*

- nal of Materials Processing Technology*, 2003, 139: 628~634
- 27 O'Sullivan D, Cotterell M. Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 118: 301~308
- 28 Sutter G, Faure F, Molinari A, Ranc N, Pina V. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43: 671~678
- 29 Ismail L, Yusuf A. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 1011~1022
- 30 Fang D, Michael R L, Tim W W. Boundary element method analysis of temperature fields in coated cutting tools. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38: 4557~4570
- 31 Frederico R S L, Saulo G, Alisson R M, Gilmar G. Numerical and experimental simulation for cutting temperature estimation using three-dimensional inverse heat conduction technique. In: *Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice*, 3rd Int. Conference on Inverse Problems in Engineering, Port Ludlow, WA, USA, 1999-06-13-18
- 32 Hong S Y, Ding Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41: 1417~1437

NEW PERSPECTIVES ON THE CUTTING MECHANISM OF DIFFICULT-TO-MACHINE MATERIALS

HU Chuanguo ZHANG Dinghua WANG Wenhui

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education

Abstract Advanced aeroengine alloys such as titanium and nickel-based alloys are widely used for casing and compressor blades. Poor machinability of titanium and nickel-based alloys are due to their inherent characteristics, including high hot hardness and strength, causing significant deformation of the cutting tool and workpiece during machining, low thermal diffusivity, rapid work hardening, causing a severe wear at the depth of cut line, and the saw-tooth chip formation. For efficient and precise NC machining of these difficult-to-machine materials, an understanding of the cutting mechanism is essential. This paper provides an overview of the theories of saw-tooth chip formation mechanism and the fracture criteria for the FEM simulation of segmented chips. How to determine the flow stress at high deformation rates and temperatures in the cutting zone is then discussed. The interaction between strain, strain rate and temperature should be sufficiently considered. The temperature and residual stress have a considerable influence on the distortion and machining precision for thin-wall structures as used in the aerospace industry, which are also analyzed in this paper.

Keywords serrated chip, fracture criteria, flow stress modeling, residual stress, titanium, nickel-based alloys