

# 切削加工过程数值模拟的研究进展\*

方刚 曾攀

清华大学机械工程系, 北京 100084

**摘要** 近年来, 有限元方法在切削加工模拟中得到了越来越广泛的应用, 在研究切削工艺参数及切屑成形机理方面有着不可替代的作用. 本文介绍了国外切削加工过程有限元数值模拟的研究进展, 阐述了切削过程有限元模拟的关键技术, 包括切屑形成、切削加工中的热力耦合、工件与刀具接触和摩擦、切屑分离和断裂准则以及工件残余应力、残余应变的模拟等技术; 最后, 还对切削工艺有限元数值模拟的发展方向作了探讨.

**关键词** 切削, 切屑形成, 热力耦合, 断裂, 有限元方法

## 1 前言

切削工艺主要是通过刀具在材料表面切除多余的材料层来获得理想的工件形状、尺寸以及表面光洁度的机械加工方法. 精密切削和超精密切削可以代替研磨等很费工的手工精加工工序, 同时提高加工精度和加工表面质量. 随着电子、光学、生物学精密设备的需求不断增加, 产品的体积越来越小, 对超精密切削加工的质量就提出了更高的要求. 为了提高切削产品特别是精密和超精密切削的生产效率和加工质量, 需要深入地研究切削机理、切削加工和切屑形成理论<sup>[1,2]</sup>. 实际上, 切削过程是一个很复杂的工艺过程, 它不但涉及到弹性力学、塑性力学、断裂力学, 还有热力学、摩擦学等. 切削质量受到刀具形状、切屑流动、温度分布、热流和刀具磨损等影响. 切削表面的残余应力和残余应变严重影响了工件的精度和疲劳寿命. 但是, 利用传统的解析方法, 很难对切削机理进行定量的分析和研究. 切削操作人员和刀具制造商往往都是利用试错法 (Trial-and-error Method) 来获取一些经验值, 既费时费力, 又增加了生产成本, 严重阻碍了切削技术的发展.

计算机技术的飞速发展使得利用数值模拟方法来研究切削加工过程以及各种参数之间的关系成为可能. 近年来, 有限元方法在切削工艺中的应用表明, 切削工艺和切屑形成的有限元模拟对了解切削机理, 提高切削质量是很有帮助的. 这种数值模拟方法适合于分析弹塑性大变形问题, 包括分析与温度相关的材料性能参数和很大的应变速率问题.

## 2 切削过程有限元模拟技术的发展状况

有限元方法最早被应用在切削工艺的模拟是在 70 年代, 与其它传统方法相比, 它大大提高了分析的精度, 1973 年美国 Illinois 大学的 B.E. Klamecki<sup>[3]</sup> 最先系统地研究了金属切削加工中

收稿日期: 2000-09-06, 修回日期: 2001-02-19

\* 国家杰出青年科学基金资助项目 (59825117)

切屑 (chip) 形成的原理, 1980 年美国的 North Carolina 州立大学的 M.R. Lajczok<sup>[4]</sup> 在其博士学位论文中应用有限元方法研究切削加工中的主要问题, 初步分析了切削工艺. 1982 年, Usui 和 Shirakashi 为了建立稳态的正交切削模型, 第一次提出刀面角、切屑几何形状和流线等, 预测了应力应变和温度这些参数<sup>[5]</sup>. 1984 年, Iwata 等将材料假定为刚塑性材料, 利用刚塑性有限元方法分析了在低切削速度、低应变速率的稳态正交切削<sup>[6]</sup>. 但是, 他们都没有考虑弹性变形, 所以没有计算出残余应力. Strebjwsum 和 Carroll<sup>[7]</sup> 将工件材料假定为弹塑性, 在工件和切屑之间采用绝热模型, 模拟了从切削开始到切屑稳定成形的过程. 他们采用等效塑性应变作为切屑分离的准则, 在模拟中, 等效塑性应变值的选择影响了加工表面的应力分布. 1990 年, Strenkowski 和 Moon 模拟了切屑形状, 用 Euler 有限元模型研究正交切削, 忽略了弹性变形, 预测了工件、刀具以及切屑中的温度分布<sup>[8]</sup>. Usui 等人首次将低碳钢流动应力设为应变、应变速率和温度的函数, 他们用有限元方法模拟了连续切削中产生的积屑瘤, 而且在刀具和切屑接触面上采用库仑摩擦模型, 利用正应力、摩擦应力和摩擦系数之间的关系模拟了切削工艺<sup>[9]</sup>. Hasshemi 等用弹塑性材料的本构关系和临界等效塑性应变准则模拟了切削工艺, 主要模拟了切屑的连续和不连续成形现象<sup>[10]</sup>. Komvopoulos 和 Erpenbeck 用库仑摩擦定律通过正交切削解析方法得到了刀具与切屑之间的法向力和摩擦力. 用弹塑性有限元模型研究了钢质材料正交切削中刀具侧面磨损、积屑瘤及工件中的残余应力等<sup>[11]</sup>. Furukawa 和 Moronuki 用实验方法研究了铝合金超精密切削中工件表面的光洁度对加工质量的影响. 分析表明, 当切削深度在  $10^{-6}\text{m}$  左右时, 最小切削力的范围在  $10^{-1}\text{N}$  左右<sup>[12]</sup>. Naoyo Ikawa 用精密切削机床在实验中测量了红铜材料切屑形成和切削深度之间的相互影响, 实验中采用的切削深度在  $10^{-9}\text{m}$ <sup>[13]</sup> 左右. Toshimichi Moriwaki 等用刚塑性有限元模型来模拟了上面的实验<sup>[14]</sup>. 他们模拟了切削深度在毫米到纳米范围内红铜材料正交切削过程中的温度场.

近几年来, 国际上对金属切削工艺的有限元模拟更加深入. 日本的 Sasahara 和 Obikawa 等人利用弹塑性有限元方法, 忽略了温度和应变速率的效果, 模拟了低速连续切削时被加工表面的残余应力和应变<sup>[15]</sup>. 美国 Ohio 州立大学净成形制造 (Net Shape Manufacturing) 工程研究中心的 T. Altan 教授, 在国际上金属塑性加工界享有很高学术声誉, 在金属塑性成形数值模拟方面做出了许多令人瞩目的成就, 近年来他与意大利 Brescia 大学机械工程系的 E. Ceretti 合作, 对切削工艺进行了大量的有限元模拟研究<sup>[16~19]</sup>. 澳大利亚悉尼大学的 Liangchi Zhang<sup>[20]</sup> 和美国 Auburn 大学的 J.M. Huang, J.T. Black<sup>[21]</sup> 对有限元分析正交切削工艺中的切屑分离准则做了深入的研究, 对不同的分离准则都做了考察. 台湾科技大学的 Zone-Ching Lin 等人对 NiP 合金的正交超精密切削中切削深度和切削速度对残余应力的影响做了研究. 模拟前对单向拉伸实验数据进行回归分析, 得出材料的流动应力公式, 考虑切削加工中的热力耦合效应, 建立了热弹塑性有限元模型<sup>[22]</sup>.

与本领域国外的研究状况相比, 国内在这方面的研究还比较少<sup>[23]</sup>, 相关的研究大多是通过实验和解析的手段<sup>[24~26]</sup>.

### 3 切削过程有限元模拟的关键技术

#### 3.1 切削过程中塑性变形的有限元模拟

切削过程可以看作是产生塑性变形并且发生切屑 (chip) 与工件 (workpiece) 分离. 所采用的数值方法主要有两种, 即弹塑性有限元法和刚塑性有限元法. 在此基础上, 如果考虑材料加工中的温度、速度变化带来的影响, 还有热弹 (黏) 塑性有限元和热刚 (黏) 塑性有限元方法. 当工件的尺寸、所用单元个数等条件相同时, 弹塑性有限元和刚塑性有限元的应力、应变分析结果几乎相同. 两种有限元方法的区别主要在于, 弹塑性有限元方法主要应用在求解残余应力的分布和回弹问题求解, 而刚塑性有限元的求解忽略了弹性变形, 不能求解残余应力或回弹问题, 但它比弹塑性有限元的求解速度要快 3~5 倍.

金属切削工艺是一个比较复杂的过程，它涉及到许多方面，例如机床、工件、刀具、夹具、冷却液、动态效应等等，而且这些因素都是相关的。在上述各种影响切削质量的因素中，切屑的形成是很重要的因素，因为在切削过程中，切屑的形成对刀具的寿命、加工表面的质量影响很大。

图 1 是通过采用刚塑性有限元 (更新的拉格朗日方法) 模拟的切屑变形。这种模拟过程是一种典型的高梯度问题，在局部区域内材料产生高温、大变形，需要有自适应的网格重划技术。在图中可以看出，切屑的塑性变形是很大的，随着变形的加剧，材料初始网格会产生严重的畸变，这种网格的畸变会对求解产生影响。一是网格的畸变会降低求解的精度，还会导致出现负的 Jacobi 矩阵，无法求解。网格产生畸变的另一后果就是模具会嵌入到材料内部 (图 2)，与实际情况不符，使求解无法进行。对于这种大的塑性变形问题，应该采用自适应网格重划分技术 (Remeshing)。随着刀具的进给，正在被加工的部分应该实现网格细化，而没有加工的部分和加工过的部分，网格应该粗划，这样既解决了局部变形的精确求解，又节省了求解时间以及内存的消耗。

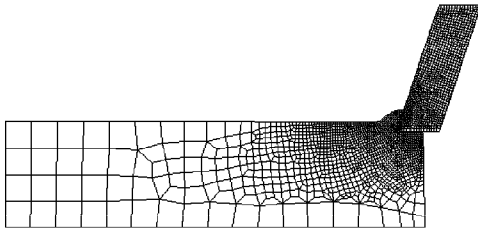


图 1 切削过程中切屑塑性变形的有限元模拟

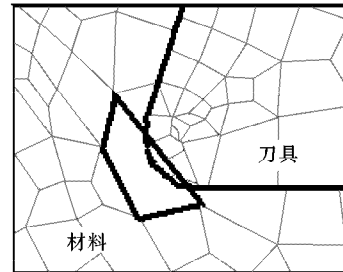


图 2 切屑形成过程中刀具与材料网格的嵌入

判断是否应该进行网格重划的标准实际上就是一个几何准则。可以一个绝对的穿透距离来作为标准，也可用刀具穿透深度与被穿透单元长度的比值作为标准，目前应用比较普遍的是以刀具穿透材料区的面积 (体积) 与被穿透材料单元的整个体积的比值作为标准。在模拟前可以设定临界值，当准则中的几何量超过这个临界值时，程序自动停下来进行网格重划分。

通过切屑形成过程的模拟，可以得到切削加工中的切削力的变化曲线 (图 3)。这对设备和夹具的设计或选用是很有帮助的。

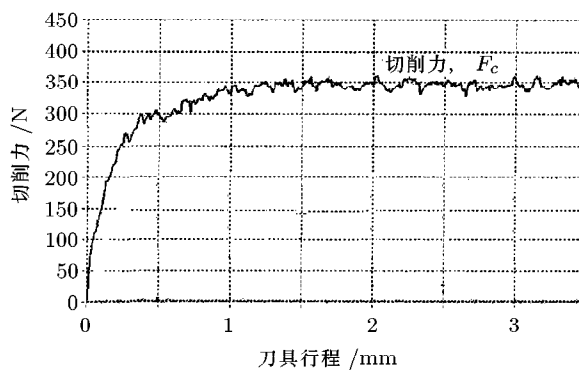


图 3 切削力随刀具行程的变化曲线

### 3.2 温度场和热力耦合的模拟

切削加工工艺从整个加工过程来看，属于冷加工的范畴。但就切屑形成的局部来看，却具有高温、高速成形的特点。金属在高速切削下，剧烈的摩擦和断裂使得局部区域的温度在几秒

钟甚至是零点几秒就上升到很高的温度，材料的各种性能参数必然受到温度的影响，另外，高温状态下引起的热应力也对成形质量和刀具的磨损产生影响。因为切削加工涉及到了与高温、高应变速率耦合的大变形和断裂问题，有限元分析也应该建立在与温度耦合的塑性变形理论基础上。在金属切削模拟过程中，温度的因素是不可以忽略的，要通过设定摩擦条件、摩擦方式和摩擦系数来计算摩擦生热。

在金属切削工艺中，工件的塑性变形和切屑 - 刀具界面的摩擦是两个主要的热源。在金属切削工艺中，工件内部的温度分布主要是由下面的因素决定的：

- (1) 工件和刀具的初始温度；
- (2) 成形工件和刀具的状态和环境；
- (3) 工件塑性变形和切屑 - 刀具界面的摩擦产生的热源。

为了耦合热载荷和机械载荷的相互影响，可以利用 Prandtl-Reuss 流动法则和 Von Mises 屈服准则。同时将材料考虑为具有各向同性的应变硬化性质，来导出热弹塑性热力耦合本构方程，包括应变、应变速率、和温度。接下来，应用大变形 - 大应变理论中的小增量位移，利用更新的 Lagrange 公式和增量变分原理。在此基础上，导出热弹塑性大变形耦合方程<sup>[29]</sup> (式 (1))。还可以处理工件和刀具之间以及工件与周围空气之间的热传导。

$$([K_{ep}] + [K_G] + [K_c] - [K_f])\{v\} = \int_v [B_\epsilon]^T [D^{ep}] \{\dot{\epsilon}^t\} dv - \int_v [B_\epsilon]^T [R_{\dot{\epsilon}T}] dv + \{\dot{F}_n\} \quad (1)$$

式中  $v$  是节点位移， $\{\dot{F}_n\}$  是刀具和工件接触面法向加载率 (载荷与时间之比)； $[K_f]$ ， $[K_c]$ ， $[K_G]$ ， $[K_{ep}]$  分别为摩擦修正矩阵、载荷修正矩阵、几何刚度矩阵和弹塑性刚度矩阵。

由于用于机械加工的材料在高温状态下经常是对速度敏感的，所以需要考虑两种因素，一个是材料的速度敏感性影响，另一个是金属流动和热传递分析的耦合影响。

以二维模拟为例，切削工艺中的热传导方程为

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = C_p \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中  $T = T(x, y)$  为温度分布； $\lambda$  为热传导系数； $C_p$  为比热； $Q$  为单位体积内的热生成率，可以通过等效应力和等效应变速率来计算

$$Q = \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} / J \quad (3)$$

式中的  $J$  为热功当量。

边界条件如下

- (1) 摩擦生热，工件和刀具之间的摩擦生热通过以下方程来表示

$$q = \tau_f v_f / J \quad (4)$$

式中  $\tau_f$  为工件和刀具接触界面的剪切应力； $v_f$  为工件和刀具的相对速度；生成的热量作为热载荷的方式，一半施加给工件，另一半施加给刀具。

- (2) 热交换，下面公式中的热传递是发生在工件和空气以及工具和空气之间，即

$$q = a_c (T - T_c) \quad (5)$$

式中  $a_c$  是换热系数； $T, T_c$  分别代表工件 (或刀具) 和空气的温度。

图 4 是一个对正交切削加工过程中温度分布进行模拟的例子，图 4(a) 是二维正交切削模拟，图 4(b) 是三维正交切削模拟。

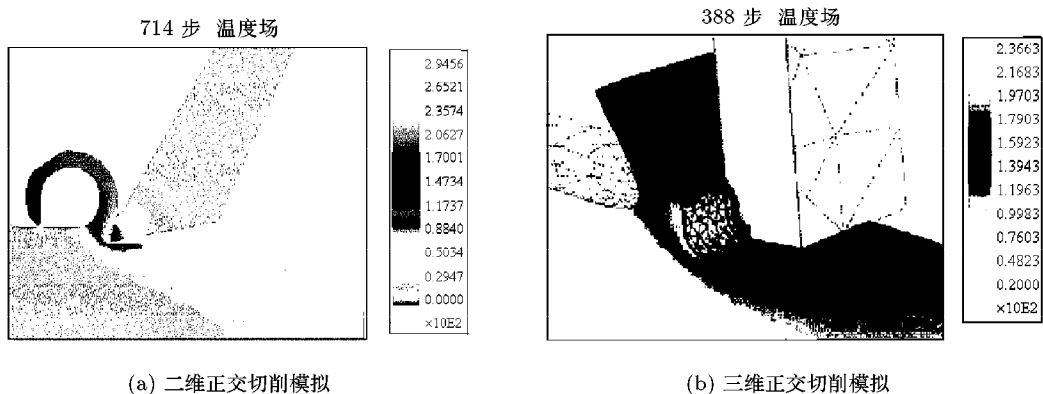


图 4 切削加工中工件、切屑以及刀具中温度分布的有限元模拟

### 3.3 切屑与刀具的接触和摩擦的模拟

由于摩擦力与切屑的形成和刀具的运动密切相关,所以在建立切削模型时,切屑-刀具接触现象是应考虑的主要因素。大量的实验表明,前刀面上的应力分布是不均匀的,正应力随着刀具行程的增加而增加,而剪切应力首先增加,然后达到一个近似的常值。也就是说,在前刀面上有两个明显的分区:滑动区和粘着区。在滑动区中,正应力相对较小,几乎没有干摩擦。在粘着区,正应力是很高的,摩擦应力近似是一个常数。基于实验研究的结果,在滑动区域使用常数摩擦(即库仑摩擦定律),在粘着区使用常摩擦应力只是一个近似。可以用下式来表示

$$\begin{aligned} \text{当 } T_f < k \text{ 时 } T_f &= \mu \sigma_n \\ \text{当 } T_f \geq k \text{ 时 } T_f &= k \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $T_f$  为摩擦应力;  $\sigma_n$  为正应力;  $\mu$  为摩擦系数;  $k$  为切削材料的剪切应力。

上述的摩擦模型在大部分有限元模拟切削工艺中得到应用。利用这种方法,常摩擦应力可以通过切削的流动应力获得。但是,摩擦系数是很难获得的,因为,滑动区的摩擦条件是与传统的摩擦实验不同的。切屑的底面是伴随着很高的应变硬化而新形成的。由于产生的塑性变形,切削的硬度高于工件材料的两倍。这个硬度变化可能引起摩擦系数的变化。

文献 [15] 引用了一种工件和刀具的非线性摩擦模型

$$\frac{\tau_t}{\tau_e} = 1 - \exp\left(-\lambda \frac{\sigma_t}{\tau_e}\right) \quad (7)$$

式中  $\sigma_t$  是工件刀具接触面上的正应力;  $\tau_t$  是工件刀具接触面上的剪应力;  $\lambda$  是材料常数;  $\tau_e$  是切屑材料的剪切屈服应力。

### 3.4 切屑与工件的分离和断裂

与一般的金属塑性成形不同的是,切削加工是一个使被加工材料不断产生分离的过程。切削加工的有限元模拟可以分为两种形式,即更新的 Lagrange 形式和 Euler 形式。在实际模拟过程中,前者使用得更为广泛。这种方式的有限元模拟需要有一定的分离准则使得切屑从工件中产生分离。另外,在加工过程中,有的切屑可以产生连续的塑性变形,而有的切屑则产生锯齿状的断裂。所以还要有相应的断裂准则来模拟切屑材料的断裂。

一个合理的分离准则只有真实地反应切削加工材料的力学和物理性质,才能得到合理的结果,例如切削几何形状、切削力、温度和残余应力分布等。另外,一个好的分离准则的临界值在切削材料确定后,不应该随着切削条件的变化而变化。到目前为止,在有限元模拟中已经提出了各种切屑分离准则,这些准则可以分为两种类型:几何准则和物理准则。几何准则主要通过

变形体的几何尺寸的变化来判断分离与否。而物理准则主要是基于制定的一些物理量的值是否达到了临界值而建立的，主要有基于等效塑性应变准则、基于应变能量密度准则、断裂应力准则等。

在图 5 中，工件的切屑层和工件层之间预先设定了一个分离线，在分离线上的切屑和工件的点重合。几何分离准则建立在工件中的点  $a$  和切削刃  $d$  之间的距离  $D$  上，当距离  $D$  小于临界值时，点  $a$  上的两点不再重合，被认为分开，即工件上的点和切屑上的点。

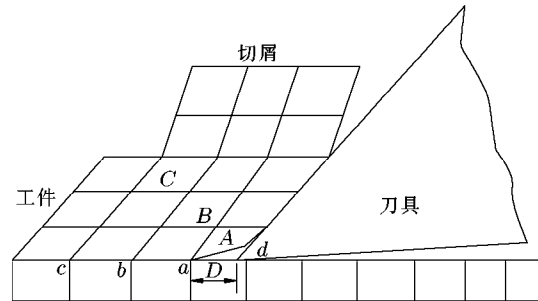


图 5 几何分离准则模型

Usui 和 Shirakashi<sup>[5]</sup> 在切削模拟中，首先提出并采用了切屑的几何分离准则。Shih<sup>[27]</sup> 等人在切削模拟中采用了几何分离准则发现，它是一种很稳定的准则。

Komvopoulos 和 Erpenbeck<sup>[11]</sup> 指出，交叠点与切削刃之间要有充足的距离，才

能避免由于有限元网格过分的扭曲而引起的计算收敛问题。Zhang 和 Bagchi 在文献 [28] 中还提到将几何距离限制在单元长度的 10%~30%，至今看来还是比较合理的，另外，它们还提出一个新的几何分离准则，即用分离距离与切削深度比值作为标准，这种标准与微观断裂力学标准是等效的。

几何准则的优点是比较简单的，判断起来容易。我们知道，实际切削中上切削刃和分离点的实际距离几乎是零。但在模拟时，却不能将  $D$  值设为零，这就与实际情况有一定的差距， $D$  值的选择也往往会影响模拟计算的收敛性，需要有一定的经验才能选择合适的临界值。另外，应用这种准则的有限元模型是有一定限制的，必须建立分离线（图 6），人为地将工件和切屑的网格分离开。

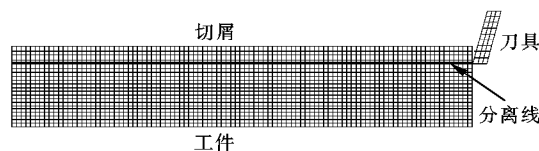


图 6 工件刀具的有限元网格

物理准则是由 Iwata, Osakada 和 Terasaka 等人<sup>[6]</sup> 提出来的，他们首先建立了考虑应力历史的韧性断裂准则，并将模拟结果与实验结果做了对比，证明是很有效的。在文献 [20] 中提出了一种失效应力准则，可以表示为

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{\tau_n}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{\tau_s}\right)^2 \geq 1 \quad (8)$$

式中  $\sigma_n, \sigma_s$  分别为切屑和工件分界面单元的正应力和剪应力； $\tau_n, \tau_s$  分别为正应力和剪应力的临界值。

当仅考虑正应力时，上述准则可以称为正应力失效准则，式中  $\tau_s$  可设为一个很大的值，例如 10 000 MPa。

Strebjivsum 和 Carroll 提出并建立了基于等效塑性应变上的物理准则<sup>[7]</sup>，并指出当临界值选择为 0.25~1.00 时，切屑的形成几乎不受影响，但是工件成形表面的残余应力却随着临界值的

增加而增加。另外，文献 [22] 也验证了等效塑性应变准则的缺点。只通过等效塑性应变值来判断是否发生断裂分离是不可靠的，因为当切削条件变化时，例如切削速度、刀具前角和切削深度等变化后，等效塑性应变的值也会发生很大的变化，要想得到一个不随切削条件变化或变化很小的临界值，必须使等效塑性应变值和其它力学量进行耦合。由于应变速率也会受到切削条件变化的影响，所以可以使等效塑性应变和应变速率耦合，建立新的准则，这样，临界值就很少受到切削条件的影响，而成为材料断裂分离的一种属性了。

Zone-Ching Lin 和 Yeou-Yih Lin<sup>[22,29]</sup> 等人建立了基于应变能量密度的切屑分离准则，并且说明这个准则的临界值是材料的常数。它的主要原理如下：连续介质力学假定工件系统能够划分为有限数量的单元，而且这些单元在一个连续状态下进行联接。因为每个单元承受的载荷和单元形状材料性质不同，在物体内，存储于每个单元单位体积内的能量也是不同的。对于物体内的一些单元，应变能密度能够通过下式来获得

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (9)$$

在有限元模拟中，假定切削刃沿一直线行走。仅对那些与切削刃相交的点进行是否破坏的判断。也就是说，假设只有那些在刀具行走轨迹上的点才有可能产生分离。当刀具首先切入工件时，工件中各个单元之间存储的单位体积能量都是不同的。当刀具向前移动时，单元能够逐渐积累应变能密度，即工具每向前移动一个位移增量，切削刃将切过所设计好路径上的一些点。从这些变形的点上积累的应变能密度值 ( $dW/dV$ ) 能够被计算和检查。一旦切削刃附近点的应变能密度积累值 ( $dW/dV$ ) 超过了材料临界值 ( $dW/dV$ )<sub>c</sub>，这些点就被认为是已经从工件中分离出来，变成切屑的一部分。工件材料的能量临界值是一个材料常数，它代表着工件材料的能量吸收能力。这个值是通过拉伸测试曲线中的应力 - 应变导出的。在极限应力曲线下应力 - 应变的曲线面积被设定为材料的临界应变能密度值 ( $dW/dV$ )<sub>c</sub>。

断裂准则不但可以应用在切屑和工件的分离中，也可以模拟出切屑形成后的断裂，图 7 是采用 Cockrift-Latham 断裂准则所模拟的刀具在不同前角时切屑断裂的形式。

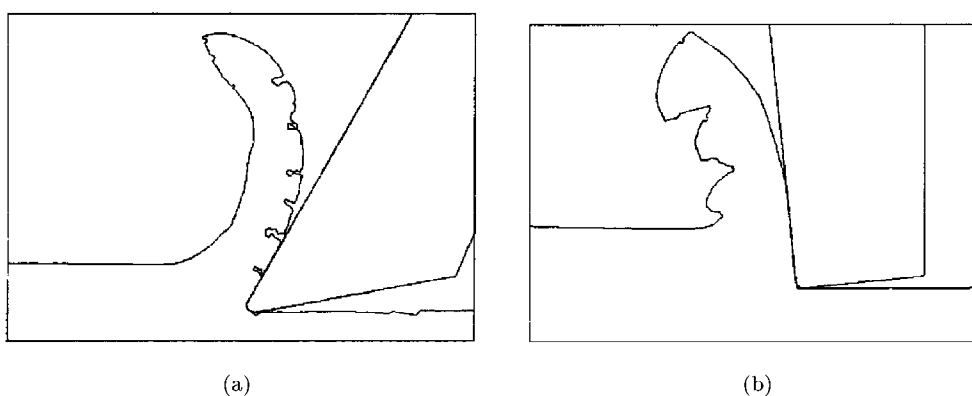


图 7 切屑断裂时的模拟结果

### 3.5 工件表层残余应力和应变的模拟

切削加工工件表面层的力学状态，例如残余应力和残余应变等，影响着工件的质量。残余应力引起的变形降低了工件的几何精度。另外，表层内的残余拉应力降低了工件的疲劳强度。为了解决这些问题，需要准确地预测工件的残余应力和几何精度，并将它们控制在一定范围内。机械加工工件的质量将会在此基础上得到提高。

在切削加工工艺中，无论是车削还是磨削，前一道切削工序的影响层经常是被切削掉，新

生成的表面层有残余应力和应变，也称为工作硬化。在重复切削过程中，影响层的切削会引起切削力或剪切角的改变。

在弹塑性有限元模拟中，可以通过逐次卸载的方法，求出工件中的残余应力和残余应变。逐次卸载可以看作是每次施加一个  $-\Delta\{P\}$  的载荷，直到载荷全部释放完。计算的方法和步骤与加载过程基本相同。但是卸载中的单元是由塑性状态向弹性状态的转变，各单元的转变次序是不一样的。在卸载中，有时个别单元可能瞬间处于加载状态，需要对单元处于加载还是卸载状态进行判断。一般来讲，假如材料处于加载状态，应力 - 应变关系应该符合材料机械性能曲线。在进入卸载状态后，应力 - 应变关系符合弹性回复直线。所以，针对两种状态下的求解过程就有很大的不同。进入大变形状态时，应变硬化速率变得非常小，几乎为零。同时等效应力增量  $\Delta\bar{\sigma}$  也非常小，有时小于计算误差的范围。为了解决这个问题，可采用最小二乘方法来更精确地确定单元的状态。

假定材料符合 Von Mises 屈服准则，而且是各向同性的。如果材料进入塑性状态后，小位移增量对应的等效应力增加，材料就处于加载状态。如果等效应力减小，材料就处于卸载状态。当然，当  $\Delta\bar{\sigma}$  比较大时，这种判断是不成问题的。但是当这个值非常小时，仅仅通过简单的积分来判断单元是否处于卸载状态就不能获得足够的精度，这时需要应用正态方程来计算  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  曲线的斜率

$$A \sum X_i^2 + B \sum X_i = \sum X_i Y_i \quad (10)$$

$$A \sum X_i + BN = \sum Y_i \quad (11)$$

这样，单元是否处于卸载状态就不只是通过一个结果来判断了。在计算  $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  曲线的斜率后，这个值能够用来确定工件单元处于什么状态。

NiP 合金是一种用来制造光学器件模具的材料，在金属基体的表面有一层通过电解得到的 Ni(92%)P(8%)，在对表层合金的超精密切削中，工件残余应力和残余应变应该控制在一定的范围内。图 8 是通过分析得到的随刀具行程变化的切屑和工件表层的应变分布。图 9 是切削深度不同时，工件表层的残余应力变化。在图中可以看出，以切削刃为坐标原点，在原点处残余应力基本为压应力，随着  $x$  的增加（距离切削刃越来越远），残余应力由压应力转为拉应力。这是因为切削刃在经过该点后，材料会产生回弹，处于卸载状态，但是还没有完全卸载，这样工件表层的应力为压应力。在远离切削刃地区，已经卸载完毕，所以产生了拉应力（残余应力）。在图 9 中也可看出，切削深度较浅时，切削刃处的压应力也较小。

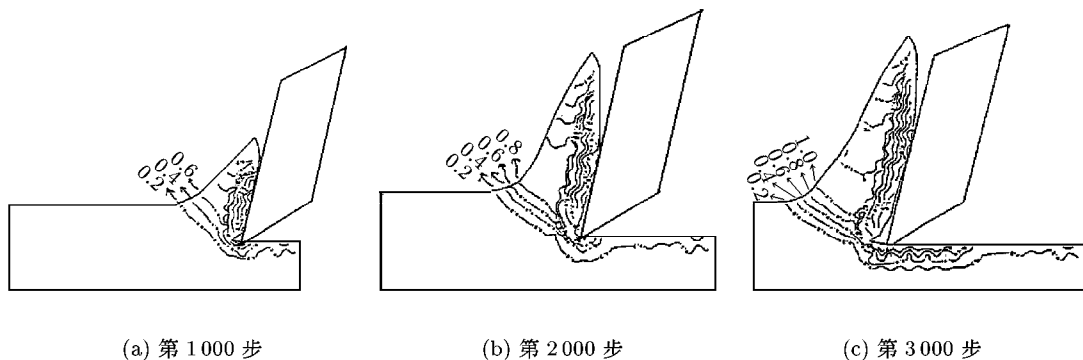


图 8 超精密切削（切削深度为 0.005 mm）中等效应变的分布及随时间的变化



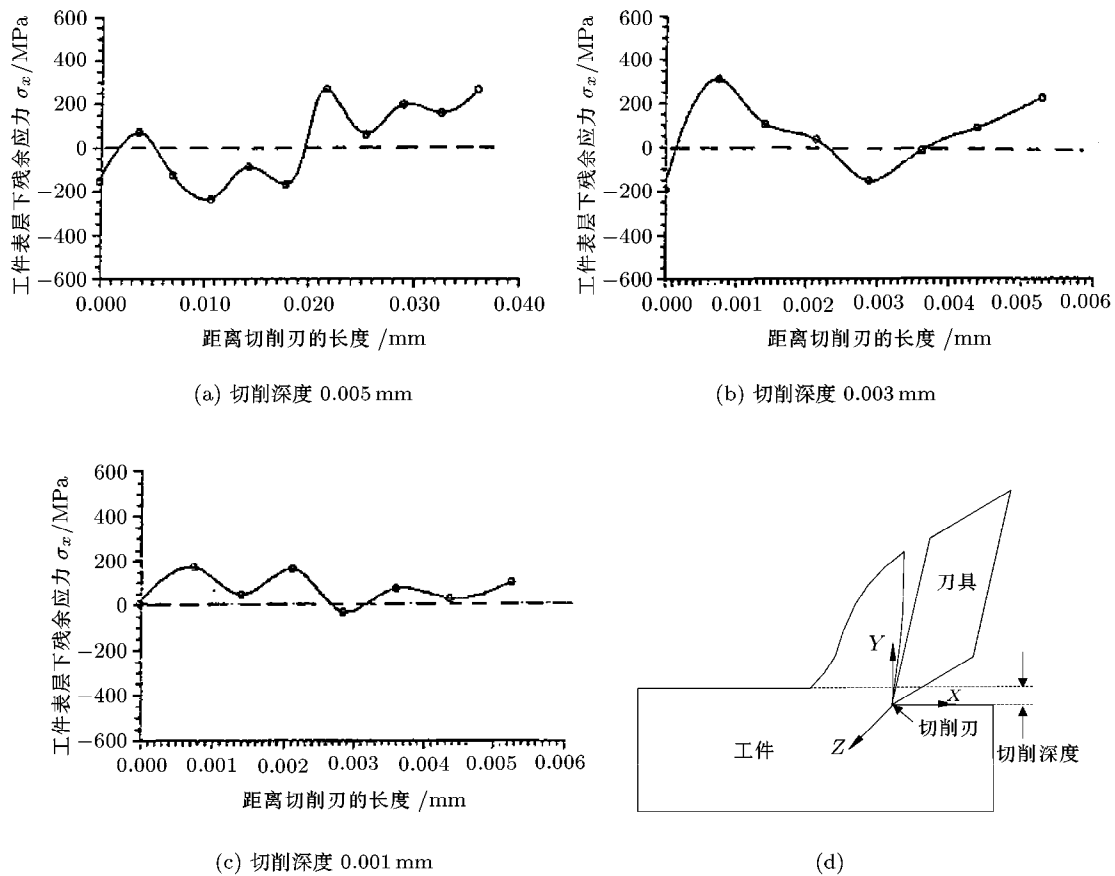


图 9 切削过程稳定后, 不同切削深度在加工表面层下的残余应力的变化

#### 4 切削过程有限元模拟的发展方向

金属切削工艺是制造业中的关键技术, 随着电子、光学、微细产品的不断发展, 在生产率和加工精度方面对切削工艺提出了更高的要求. 虚拟制造将是解决这一系列问题的重要手段, 在虚拟制造中, 基于弹性力学、塑性力学、断裂力学、摩擦学、热力学和材料学的切削过程数值模拟将是一种强有力的工具. 目前, 这项技术已经在学术研究上取得了一些进展, 但与其它加工技术 (例如金属塑性加工) 相比, 切削模拟还没有大量应用到生产实际, 这还需要对实际生产中影响切削加工的各种因素作进一步研究 [30].

在实际切削过程中, 例如车削、磨削和钻削等, 切削是在三维变形域内进行的; 例如, 工件和刀刀具有三维的几何形状, 工件材料和刀具的相对移动也不总是正交的, 另外, 一些工件材料也是各向异性的, 由于这些因素, 切削是在三维状态下成形的, 然后获得具有三维几何形状的产品. 另外有些工艺, 例如斜刃切削的模拟是不能用二维模型来实现的, 必须建立三维模型. 所以, 为了揭示实际切削机理, 对切削加工进行三维模拟是很有必要的. 目前的大多数研究都停留在二维模拟上. 随着计算机硬件性能的提高, 切削工艺的三维模拟将是今后发展的主要方向.

实际上, 典型的车削和钻削工件或刀具都是在做回转运动, 但是到目前为止, 文献中所报道的切削工艺模拟, 大多是将工件约束住, 让刀具做进给运动, 这样实际生产中工件的回转运动对切削质量的影响并没有体现出来, 在金属塑性加工中, 例如板料的旋压成形, 内螺纹管的拉拔成形、轧制成形等都可以模拟工件或模具的回转运动, 在高速的车削过程中, 工件的转动

是不可忽略的。关于这一点，在今后的切削模拟中还应加强。

切削加工是使工件不断分离出切屑的过程，目前关于切屑断裂和分离的准则还不太成熟，每种分离准则都有不足的地方，形成后的切屑断裂准则也需要进一步研究，目前的模拟结果与实际情况还有一定的差距。

相对于切屑的形成，对于成形工件加工质量的研究较少，今后将会成为重点的研究方向。其中包括：与工件几何尺寸和精度密切相关的残余应力和残余应变的模拟、与工件表面光洁度有关的毛刺形成的模拟、考虑工件加工中夹具的模拟等。工件切削加工中的毛刺形成和消除的模拟技术还不成熟，因为它涉及的因素较多，对成形工件的表面质量起着至关重要的作用。目前关于这方面的研究刚刚起步，还没有详细的结果。

切削加工中刀具的磨损和受力、加工中振颤引起的刀跳、工具形状不合适引起的崩刀等现象的模拟也会成为今后切削加工技术模拟的一个方向。高速切削加工中，冷却液是不可缺少的，目前在切削模拟中，还没有模拟切削过程中的冷却对成形质量的影响。

## 参 考 文 献

- 1 吴玉华. 金属切削加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998. 3~6
- 2 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1999. 9~11
- 3 Klamecki B E. Incipient chip formation in metal cutting—a three dimension finite analysis. [Ph D dissertation]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1973. 1~10
- 4 Lajczok M R. A study of some aspects of metal cutting by the finite element method. [Ph D dissertation]. NC State University 1980. 1~20
- 5 Usui E, Shirakashi T. Mechanics of machining—from descriptive to predictive theory, On the art of cutting metals—75 years later a tribute to F W Taylor, ASME PED-7 1982. 13~30
- 6 Iwata K, Osakada K, Terasaka T. Process modeling of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method. *Trans ASME J Eng Mater Technol*, 1984, 106:132~138
- 7 Strebjiwsjum H S, Carroll J T. A finite element model of orthogonal metal cutting. In: Proceedings of the North American Manufacturing Research Conference, Bethlehem, Pennsylvania, 1987. 506~509
- 8 Strenkowski J S, Moon K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distribution in orthogonal metal cutting. *Tran ASME J Eng Ind*, 1990, 127: 313~318
- 9 Usui E, Maekawa K, Shirakashi T. Simulation analysis of the built-up edge formation in machining of low carbon steel. *Bull Jan Soc Process Eng*, 1981, 15(4): 237~242
- 10 Hasssemi J, Chou P C, Tseng A A. Thermomechanical behavior of adiabatic shear band in high speed forming and machining. In: XXII ICHMT International Symposium on Manufacturing and Material processing, Dubrovnik, Yugoslavi, 27 August 1990. 10~14
- 11 Komvopoulos F K, Erpenbeck S A. Modeling of orthogonal metal cutting. *Trans ASME J Eng Ind*, 1991, 113: 253~267
- 12 Furukawa Y, Moronuki N. Effect of material properties on ultra-precise cutting process. *Ann CIRP*, 1988, 37: 113~120
- 13 Ikawa N, Shimada S ed. Chip morphology and minimum thickness of cut in micromachining. *JSPE*, 1993, 59: 141~147
- 14 Moriwaki T, Sugimura N, Luan S. Combined stress, material flow and heat analysis of orthogonal micromachining of copper. *Annals of the CIRP*, 1993, 42 (1): 75~84
- 15 Sasahara H, Obikawa T, Shirakashi T. FEM analysis of cutting sequence effect on mechanical characteristics in machined layer. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62: 448~453
- 16 Ceretti E, Fallbohmer P, Wu W T, Altan T. Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 59: 169~180
- 17 Ceretti E, Lucchi M, Altan T. FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 95: 17~26
- 18 Ceretti E, Lazzaroni C, Menegardo L, Altan T. Turning simulation using a three-dimension FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 98: 99~103
- 19 Ceretti E, Taupin E, Altan T. Simulation of metal flow and fracture application in orthogonal cutting, blanking and cold extrusion. *Annal of CIRP*, 1997, 46(1): 187~190

- 20 Zhang Liangchi. On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 88-89: 273~278
- 21 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
- 22 Lin Zone-Ching, Lai Wun-Ling, 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
- 23 杨继昌, 刘伟成. 工件表面的加工硬化深度的数值分析. *机械工程学报*, 1995, 31(3): 102~106
- 24 李振加等. 横向卷曲短螺旋卷屑折断数学模型与折断判据. *机械工程学报*, 1996, 32(6): 105~110
- 25 王希彬, 师汉民, 陆涛. 切削过程的分叉与突变. *机械工程学报*, 1997, 33(6): 20~25
- 26 顾立志, 袁哲俊. 正交切削中切屑温度分布的研究. *机械工程学报*, 2000, 36(3): 82~86
- 27 Shih A, Chandrasekar J M, Yang H T Y. Finite element simulation of metal cutting process with strain-rate and temperature effects. Fundamental issues in machining. *ASME Publication, PED*, 1990, 43: 11~24
- 28 Zhang B, Bagchi A. Finite element simulation of chip formation and comparison with machining experiment. Computational method in material processing. *ASME Publication, PED*, 1992, 61: 61~74
- 29 Lin Zone-Ching, Lin Yeou-Yih. A study of an oblique cutting model. *Journal of Material Processing Technology*, 1999, 86: 119~130
- 30 van Luttervelt C A, Childs T H C ed. Present situation and future trends in modeling of machining operations. Keynote Paper. *Annual of the CIRP*, 1998, 47(2): 587~626

## ADVANCES IN NUMERICAL SIMULATION TECHNOLOGY FOR CUTTING PROCESS\*

Fang Gang      Zeng Pan

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Recently, the finite element method (FEM) has been widely applied in cutting process, and plays an important role in the investigations of technical parameters and chip mechanism. This paper reviews the state-of-the-arts in this field, discusses some key aspects in the FEM simulation of cutting process, including chip plastic formation, thermo-mechanical coupling, the contact and friction between workpiece and tool, chip separation criteria, and residual stress and strain. At last, the new trends of FEM simulation for cutting process are predicted.

**Keywords** cutting, chip formation, thermo-mechanical coupling, fracture, FEM

---

\* The project supported by the National Science Fund of Distinguished Young Scholars of China (59825117)