

# 金属切削过程有限元数值模拟\*

Finite Element Simulation of Metal Cutting Process

北京航空制造工程研究所数控制造技术航空科技重点实验室 李初晔 王 焱 孟月梅



李初晔

高级工程师,主要从事结构动力学分析和优化计算,先后参与多项国家重大科技攻关项目,获国家发明专利和实用新型专利2项。

金属切削加工是用刀具从工件上切除多余材料,获得在几何形状、尺寸精度、表面粗糙度方面合乎要求的零件加工方法。以前由于机床速度的限制,研究者主要致力于如何提高加工效率,现在随着机床主轴转速的提高,切削加工的效率得到了极大提高,因此现在对切削加工的研究重点主要集中在提高加工零件的尺寸精度和表面质量上,为求得加工产品高效、高质量生产,世界各国不惜巨资,投入大量人力物力,采用先进技

术手段,不断深入研究和探索切削加工方法及理论。

本课题针对航空结构件加工中最关心的成型零件的变形状况、加工效率(金属去除率)、刀具磨损等方面,综合了近年来国内外在切削加工方面的进展,根据这些成果在现有 CAE 分析平台基础上开发的仿真程序,能够实现对复杂航空结构件的变形控制。

近 30 年来,航空、航天和计算机等高精密加工工业的发展,促进了对切削加工规律的深入研究。对切削机理理论上的分析毕竟有其局限性,切削的形成是高度非线性的复杂问题,涉及材料非线性、几何非线性、边界非线性和状态非线性,其中的每一方面都是工程分析中的难点,因此从理论上准确解析切削问题是不现实的。随着计算机技术的飞速发展,利用数值模拟方法来研究加工过程成为可能,最早采用有限元法研究切削加工的是 Zienkiewicz 和 Kakino。Zienkiewicz 于 1971 年采用预先给定切削形状然后加载刀具的方法分析了加工中工件材料发生屈服的区域沿主剪切平面的扩张情况,但由于预先给定了切削形状因此模拟分析结果的准确性不高,但其工作是开创性的;1976 年 Shirakash 和 Usui 对上述模型进行了改进,考虑了刀削之间的

摩擦和应力受温度和应变速率影响的特性,通过反复修正切削形状,直到在某种切削形状下产生的塑性流动规律与预设的取得一致,依此来获得切削形状,他们采用的这种迭代方法取得了部分成功,并在以后的研究中获得进一步发展<sup>[1-3]</sup>;1987 年,Strencow Ski、Carrol 和 Mitchum 等基于更新的拉格朗日弹塑性模型,将等效塑性应变准则作为切削分离准则,完成了第一个非稳态切削过程的模拟,通过有限元分析研究指出等效应变的临界值随切削深度的增加而增加,因此提出了修正切削断裂分离准则的建议;1990 年,Strencow Ski 和 Moon 模拟了切削形状,在忽略弹性变形的前提下,预测了工件、刀具和切削中的温度分布<sup>[4]</sup>。近年来,国际上对切削的有限元分析更加深入,美国俄亥俄州立大学成形制造工程研究中心 T.Altan 教授率领的团队在切削工艺的有限元模拟方面取得了令人瞩目的成就,研究成果应用于生产

\*装备科研项目(5131801030)资助。

实际取得了很大的经济效益<sup>[5-6]</sup>。

本课题针对航空结构件加工中最关心的成型零件的变形状况、加工效率(金属去除率)、刀具磨损等方面,综合了近年来国内外在切削加工方面的进展,根据这些成果在现有CAE分析平台基础上开发的仿真程序,能够实现对复杂航空结构件的变形控制。

## 金属切削加工有限元模拟中的关键技术

在塑性变形中,材料开始发生塑性流动的应力受到温度和变形速度的影响。当温度超过一定数值后,材料的屈服应力降低而塑性变形能力提高;另一方面,当变形速度大于一临界值时,材料的屈服应力随变形速度的增大而提高,特别是在高速切削时,材料的实际变形速度比通常的变形速度快几个数量级。工件材料在高温、大应变、大应变速率的情况下发生塑性流动,切削材料内部应力以及屈服强度随切削的进行不断发生变化,因此对于不同的材料,采用合理的流动应力模型是有限元模拟的关键,材料流动应力与温度、应变之间的关系主要通过试验方法确定。切削加工中剪切区的应变速率一般在 $10^3/s \sim 10^5/s$ 或更高,这些应变速率远大于普通材料试验的应变速率<sup>[1]</sup>,因此研究切削加工过程中的材料性能问题需要有专门的设备和技术条件,流动应力的表达式为:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T),$$

式中, $\sigma$ 为流动应力, $\varepsilon$ 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, $T$ 为温度,切削过程中的应力是应变、应变率、温度的函数,与弹性范围内的虎克定律有很大区别,流动应力模型要很好地符合材料的试验曲线。

在进行切削加工分析时要考虑材料的塑性行为,由于塑性变形部分是不可恢复的,随着弹性变形的恢复,加工过后的零件会有残余应力存

在。

### 1 屈服准则

屈服准则用来定义一个标准值,判断材料内部应力是否达到屈服点从而决定是否有塑性变形发生。复杂应力状态下的材料屈服是各应力分量共同作用的结果,材料任何一点的应力状态皆可以通过三向主应力来表达,因此屈服准则的一般函数表达为:

$$f(\sigma_{ij}) = C,$$

其中, $C$ 为仅与材料有关的常数。

设材料质点上的应力分布为:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix},$$

那么屈服准则应当包含上面应力中的各个分量,才能反映出各个应力分量对材料质点屈服所起的作用。考虑到静水压力不影响材料的屈服,因此应力分量应以 $\sigma_1 - \sigma_2$ 、 $\sigma_2 - \sigma_3$ 、 $\sigma_3 - \sigma_1$ 的对称形式出现,同时 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 的大小排序不应影响屈服准则的正确性,因此屈服准则应取如下形式:

$$f(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) = C_0.$$

从数学角度出发,满足上式的最简单形式是:

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = C,$$

$$|\sigma_2 - \sigma_3| = C,$$

$$|\sigma_3 - \sigma_1| = C.$$

只要上式任意一个得到满足,则该点材料就发生屈服,这一屈服准则是Tresca提出的,也称特雷斯加屈服准则。

从数学角度出发,另一个满足上式的简单形式是:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = C^2.$$

根据材料力学知识,应力偏张量的第二不变量为:

$$J_2' = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6}.$$

因此屈服准则可写为: $J_2' = K$ ,其中 $K$

为常数。

这一准则是由Von. Mises提出的,因此称为米塞斯屈服准则,米塞斯屈服准则又称能量屈服准则。

根据第四强度理论,复杂应力状态下的等效应力为:

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

用等效应力来描述米塞斯屈服准则是:当材料质点的等效应力达到材料的屈服极限时,材料质点发生塑性屈服。 $\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2'}$ ,以应力状态来定义的发生塑性变形的临界值为材料的屈服极限,因此当材料发生屈服时有: $\bar{\sigma} = \sigma_s$ 。

### 2 流动准则

流动准则描述了材料发生屈服时,塑性应变的发展方向,塑性流动一般是沿屈服面的法向,并与应力增量有关。特雷斯加和米塞斯屈服准则只能作为确定塑性流动的起始点,一般的塑性材料都有应力强化的性质,因此在塑性变形状态下,屈服面的范围不断变化,在应力空间还伴随平移现象。为了进一步分析变形的增长情况,必须知道每一瞬间屈服面连续不断变化着的形状和位置,由于屈服面的复杂性,严格意义上的流动准则是很难得到的,只能提出变形增长的数学估计。

首先要对多数塑性材料的屈服强化规律提出符合实际的假设,塑性流动准则的一般式为:

$$d\varepsilon = \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma},$$

$d\varepsilon$ 为塑性应变增量矢量, $\lambda$ 为塑性因子, $\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}$ 为沿屈服面法向的应力梯度。

目前分析塑性流动最常用的有2种假设:材料等向强化模型(Isotropic Hardening)和材料动态强

化模型 (Kinematic Hardening)。

等向强化模型的假设是：由于材料塑性变形使得初始屈服面均匀膨胀，并保持其几何相似性，屈服面的比例关系可通过所做塑性功的大小来定义。等向强化的主要缺点是不能解释包兴格效应，包兴格效应反映了在某一方向上应力强化，而在相反方向引起应力弱化的现象，即塑性变形会使屈服面发生平移。等向强化假设的这个缺点在变形过程中发生局部卸载再加载时是不利的，但在连续切削的分析过程中不会有大的影响。其屈服面的变化如图 1 所示。

动态强化模型假定屈服面的大小保持不变而仅在屈服方向上移动，当某个方向的屈服应力升高时，其相反方向的屈服应力应该降低，因此动态强化假设能很好地解释材料的包

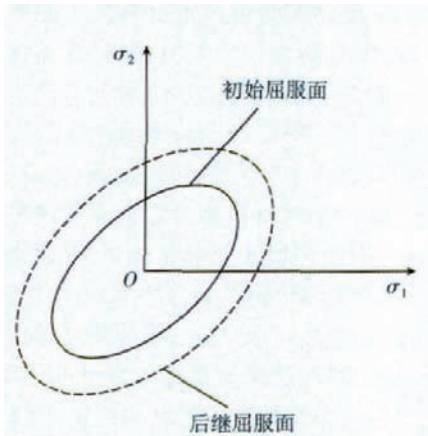


图1 等向强化时屈服面的变化图

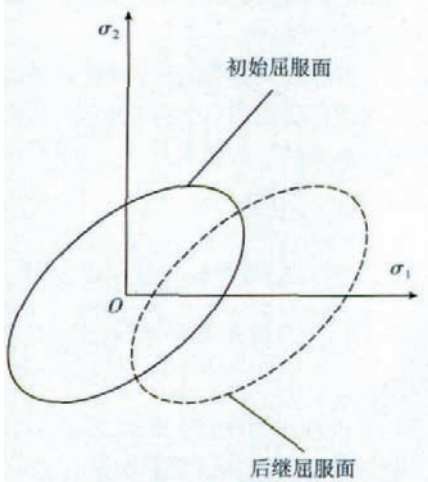


图2 动态强化时屈服面的变化图

兴格效应。在动态强化中，由于拉伸方向屈服应力的增加导致压缩方向屈服应力的降低，所以在对应的 2 个屈服应力之间总存在一个  $2\sigma_s$  的差值，初始各向同性的材料在屈服后将不再是向同性的。其屈服面的变化如图 2 所示。

如图 3 所示，对于塑性材料，应力应变曲线上有明显的弹性变形区、均匀塑性变形区和颈缩区，当应力达到材料屈服极限应力  $\sigma_s$  后进入屈服，这与米塞斯屈服准则是一致的，图 3 中 a-b 为均匀变形阶段 ( $d\sigma \times d\varepsilon > 0$ )，直到最高应力点  $\sigma_b$ ，此后在局部区域的材料丧失承载能力，在结构内部出现颈缩，在 C 点造成断裂或屈曲破坏。

材料的真实应力应变曲线是非

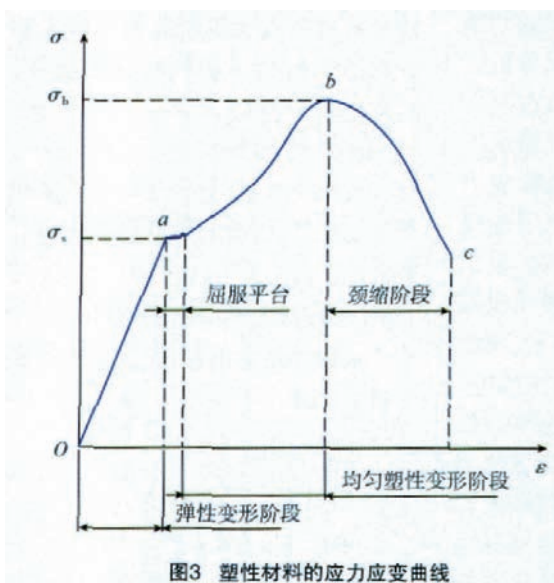


图3 塑性材料的应力应变曲线

常复杂的函数关系，进行理论或有限元分析时对材料模型进行简化是必要的，主要简化为图 4 的 4 种类型的应力-应变材料模型。

### 3 切削分离准则

对切削加工有限元模拟的难点在于切削分离的正确处理上。切削加工属于瞬态非线性问题，在此过程中，由于刀具对工件材料的挤压、剪切作用，使得切削层在高接触压力、高应变、高切削温度作用下与工件基体分离，形成加工表面。随着刀具的

深入，刀尖处的有限元网格首先发生畸变，若对模型不经过特殊处理，求解过程将会发散，得不到准确的模拟结果。切屑与工件材料发生分离是切削加工模拟中极为重要的关键技术，一直以来是研究的重点，到目前为止有限元模拟采用的切削分离准则主要有几何分离准则、物理分离准则以及混合分离准则 3 种。

#### (1) 几何分离准则。

在刀尖移动路线上预先设定一条分离线，当刀尖与前方工件上某节点距离  $d$  小于设定的容差  $r$  时，强制工件上的此节点分离，一个节点形成切削表面沿刀具前刀面滑动，另一个节点形成加工表面。采用几何分离准则需要对分离线上的节点进行处理，为保证模拟结果准确，分离线附近

的网格划分较密，最佳的有限元网格单元边长设定应接近于定义的节点分离容差值。如果分离容差设定值较大，分析过程中在刀尖和切削之间会产生较大的间隙，降低有限元模拟的计算精度。

#### (2) 物理分离准则。

物理分离准则是基于单元物理量来定义的分离准则，从材料本构方面提出切削分离的判断标准，主要有等效塑性应变准则，断裂应力准则和应变能密度准则，当单元中所选物理量值超过预先设定的标准值时，则认为单元节点将发生分离，形成切削和加工面。如考虑应力历史的韧性断裂准则，是判断分界面网格节点上的应力是否超过设定的临界值，判定准则为：

$$\left(\frac{\sigma_n}{\tau_n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\tau_t}\right)^2 \geq 1,$$

其中， $\sigma_n$ 、 $\sigma_t$  分别为分界面单元上的正应力和剪应力， $\tau_n$ 、 $\tau_t$  分别为设定的正应力和剪应力的临界值。

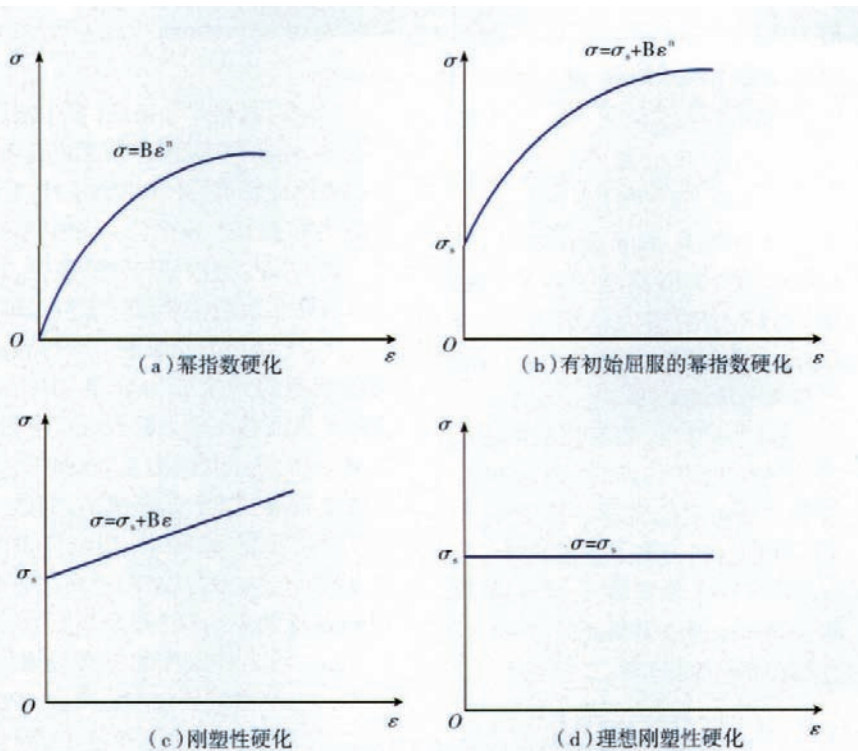


图4 4种简化形式的应力应变曲线

与几何分离准则相同,物理分离准则也要对分界面上的节点进行特殊处理。另外,从定义的分离判定准则可以看出,若设定的临界应力值  $\tau_n$ 、 $\tau_t$  不合理,刀尖走过的节点应力可能不满足分离准则,在切削过程中节点没有分离,因此物理分离准则需要不断对临界值进行修正,有时需要进行很长时间的探索才能提出相对合理的临界值,这是物理分离准则特别不利的方面。在切削的有限元模拟中,只要机床的功率足够,刀具切过的单元必然造成节点分离,因此从这一点来看几何分离准则是相对合理的。

(3) 网格重划分技术。

网格重划分不需要设定节点分离准则而实现切削过程的分析模拟。随着切削的深入,首先在刀尖附近的单元发生大变形,单元形状发生畸变,使得有限元分析的精度降低,甚至分析过程无法继续进行。

网格重划分技术是指每个载荷步计算之后对单元形状好坏进行判

断,若单元的一些特征值偏离了设定的基准值范围,则以变形后的形状重新构造几何体,对新几何体进行网格重划分,并将旧网格上的边界条件和物理场量准确映射到新划分网格上,通过一系列处理产生新的计算方案,使切削过程连续进行下去。网格重划分是目前分析塑性大变形和单元畸变判据、新几何重构、边界条件映射、前后网格之间物理场量映射等关键技术问题,图5为切削过程中的网格重划分示例。

(4) 刀具与切屑、工件之间的接

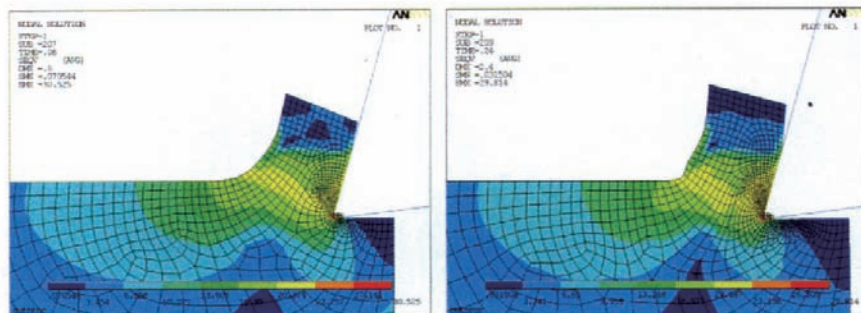


图5 切削过程中网格重划分

触和摩擦。

切削过程是多零件复杂系统的有限元分析问题,在刀具连续不断的切削过程中,刀具与被切削零件通过接触和摩擦传递力,产生切削热。因此在对金属切削过程的计算机模拟分析时必须解决多零件之间约束和力传递,通用有限元分析软件都是通过两零件之间构造接触单元来实现。

接触单元的原理相当于在接触面和目标面间形成很多包含摩擦、刚度和阻尼的弹性元件,其目的是在两接触物体之间传递作用力。接触力与刚度的关系为:

$$f_n = k_n \cdot q + \lambda_{i+1}$$

式中,  $f_n$  为法向接触力,  $k_n$  为法向接触刚度,  $q = Un_j - Un_i - \delta$  为节点  $i, j$  的相对位移量,  $Un_i$  为节点  $i$  的瞬时法向位移,  $Un_j$  为节点  $j$  的瞬时法向位移, 节点  $i, j$  分别隶属于靶面和目标面,  $\delta$  为节点  $i, j$  间的初始距离,  $\lambda_{i+1}$  为第  $i+1$  次迭代的拉格朗日乘子。

接触问题是广泛存在于工程实际中的复杂非线性问题,处理接触问题的方法主要有拉格朗日乘子法和罚函数法。在切削加工过程中,随着刀具移动,接触单元的形成是动态的,刀具的前后刀面定义为接触单元目标面,已加工面和切屑定义为接触面。像切削加工这种处于动态接触状态的有限元模型生成精确的节点对节点的接触是不可能的,接触单元应具有自动判断目标面和接触面节点是否处于接触状态的能力,这就

需要一个相容性公差,当节点间距离小于此公差值时接触单元自动产生;另一方面由于接触面的相对滑动必然产生摩擦行为,因此接触单元还应具有处理摩擦问题的能力。

### 切削过程的有限元仿真

应用 ANSYS 软件对 YL12 硬铝合金板的加工过程进行仿真,切削参数主要包括刀具前角  $\gamma_0$ ,刀具圆角半径  $R$ ,切削厚度  $a_c$ ,切削宽度  $a_w$ 。



图6 刀具有圆角前角5°时的有限元模型

仿真切削力  $F$ ,切削变形  $u$ ,加工后零件的残余应力分布  $\sigma_c$  的影响规律。利用 ANSYS 的编程功能,变换加工参数进行多种切削方案计算。在各种切削方案中,刀具走过的长度相同,这样可以比较形成切屑的形状,图 6 是设定的有限元参数化模型。

图 7 中标记了一些考察切削结果的关键点,  $P_1$ 、 $Q$  位于形成的切削表面,在切削方向有一定的距离,  $P_1$  先于  $Q$  形成切削表面;  $P_2$  位于  $P_1$  的正下方,  $P_3$  位于  $P_2$  的正下方,  $P_1$ - $P_2$ ,  $P_2$ - $P_3$  的长度等于切削厚度;  $A$  为刀具上应力最大点,  $B$  为形成的切

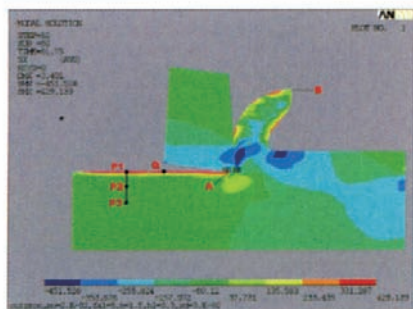


图7 某时刻的切屑形状及x向应力分布 (刀具有圆角)

屑尖点。根据有限元仿真结果可以粗略计算出剪切角在  $40^\circ$  左右。切向力和进给力为<sup>[5-6]</sup>:

$$\begin{cases} F_x = K_t \cdot A_c \\ F_y = K_f \cdot A_c \end{cases}$$

代入参数计算出的理论切削力为  $F_x=38\text{N}$ 、 $F_y=5.5\text{N}$ ,图 8 有限元仿真计算出的  $x$ 、 $y$  切削力分别为  $45\text{N}$ 、 $8\text{N}$  左右,两者差别的主要是由于刀具圆角和摩擦角造成的。

从图 9 看出,随着切削的进行,当刀具接近考察点时,比如  $P_1$  点,由于刀具对工件表面的挤压使考察点沿切削分离面向上翘曲,切削过后则产生反向的位置偏差,因此造成实际切削面比理论切削面低,并且切削过程中的不同时刻点,翘曲量和位置偏差都呈现放大趋势,图 10 中的  $C_1$ - $C_6$  是在切削形成表面选取的 6 个节点,从有限元计算结果中提取这些节点的  $y$  向位移,产生图中的位置

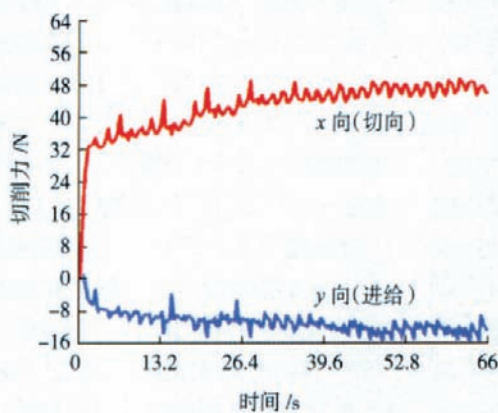


图8 切向及进给切削力曲线

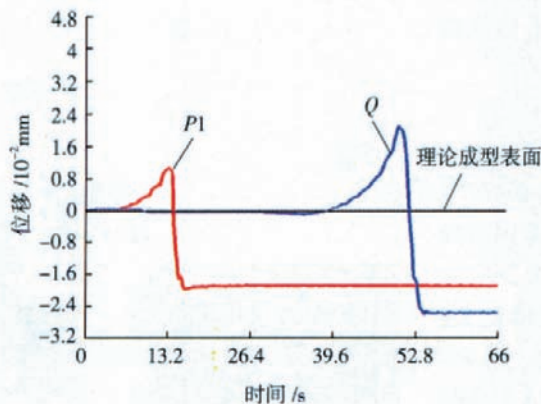


图9  $P_1$ 、 $Q$ 点在切削进给中y向位移变化

偏差曲线,  $C_1$ - $C_6$  的位移量偏差为  $0.008\text{mm}$ 。

切削时材料承受挤压,发生塑性大变形,由于材料稳定性遭到破坏,破裂而形成切屑,并在成型零件内残留应力和变形。残余应力和变形是由于材料发生塑性变形而产生的,在工件去除约束后主要部分依然保留。

图 11 是切削完成退刀并解除约束限制后的残余应力分布,切削后在零件表面存在较大的残余拉应力,在  $P_1$  点的残余拉应力达  $400\text{MPa}$ ,零件深处残余拉应力迅速减小,到达一个切削厚度的  $P_2$  点时,残余应力已经变成压应力,为  $60\text{MPa}$ ;到达 2 个切削厚度的  $P_3$  点时残余压应力为  $35\text{MPa}$ 。沿工件深度的分布规律为:因为  $P_1$ 、 $P_2$  点的残余应力反向,  $P_1$ 、 $P_2$  的距离为一个切削厚度  $a_c$ ,因此拉应力区域的厚度不会超过切削厚度  $a_c$ ,若切削表面的拉应力按 3 次幂

的规律衰减,残余拉应力分布区域深度为  $0.07\text{mm}$  左右。

切削进行中刀具上的应力在  $350\text{MPa}$  附近上下波动,切削区温度与刀具的应力有很大关系, Oxley 对切削温度的理论预测并没有考虑到刀具应力的影响<sup>[7]</sup>,因此理论计算与有限元仿真有较大的差别,仿真计算的结果更精确些。

刀具有无圆角的有限元仿真结果有很大不同。首先从切屑的外观看,无圆角刀具产生的切屑在尖点已经发生很大弯曲,因此产生的切屑更长,变形系数更小,切削过程更容易进行,相应的切削力更小。最关键的一点是形成切削表面的残余应力性质发生很大

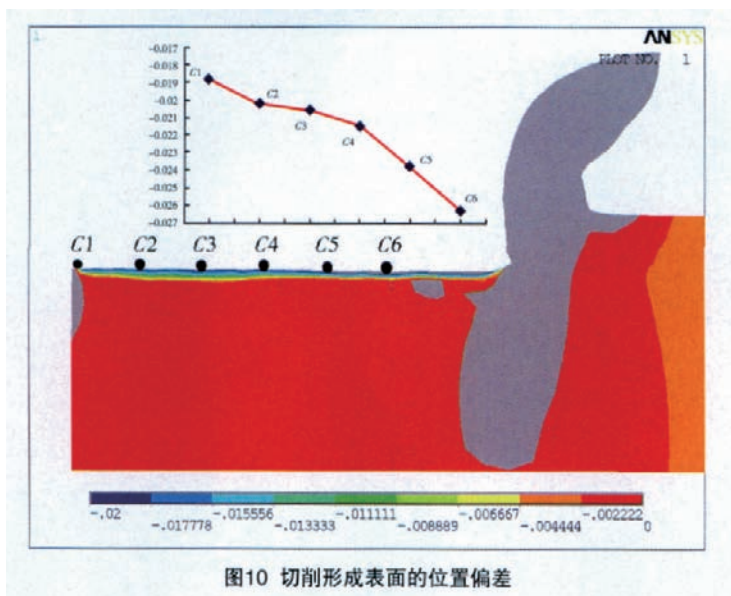


图10 切削形成表面的位置偏差

变化,切削表面由残余拉应力变成了残余压应力,并且绝对值数值降低很大,至P3点残余应力基本消失,残余应力的分布区域相对较为稳定,因此刀尖越锋利对改善加工零件的性能越有利,但会影响刀具的寿命,无圆角或小圆角使刀具的使用寿命降低,加工中要综合考虑两者的平衡关系。

仿真表明切削力并不与切削厚度成比例增加,切削过程需要的总能

将增大,这一点从仿真数据中可以得到证明,切削力是切削力系数和切削面积的乘积,当切削厚度增大时切削面积增加,但剪切角增加使切削力系数减小,两者的乘积虽然使切削力还是呈现增大的趋势,但这种趋势会随着切削厚度的增加而变缓,切削力可以表达为下面的形式:

$$F = K_c \cdot a_c^{N_h} \cdot \mu^{N_u} \cdot R^{N_d}$$

公式中,  $K_c$  为与材料相关的切削力常数,  $N_h$ 、 $N_u$ 、 $N_d$  分别为切削厚度  $a_c$ 、材料摩擦系数  $\mu$  和刀具圆角半径  $R$  的指数,通过有限元法进行多参数方案的仿真计算,采用多元线性回归得到这些指数值,总结出切削力的计算公式。

## 结束语

航空制造技术的发展对加工质量、生产效率和生产成本提出了更高的要求。在虚拟制造中,基于弹塑性力学、断裂力学、摩擦学、传热学和材料学的切削加工数值模拟技术将是一种强有力的工具。本课题研究即是在这一思想的指导下,采用 ANSYS 有限元仿真平台,对正交直角切削理论模型进行有限元分析,计算了切削力、切削变形和残余应力的分布规律,通过对切削理论模型的分析可以得到金属切削过程中切削力、

加工表面粗糙度、工件及刀具温度分布、刀具磨损随不同加工工艺参数的变化规律,只要输入的材料特性参数和数值模型边界条件参数准确,模拟结果即可真实反映加工过程规律,可以减少切削试验的次数甚至完全代替切削试验,模拟值代替试验值应用于对复杂结构零件的加工变形分析,在此基础上总结出变化规律,实现以加工变形最小化和金属去除率最大化为控制目标的加工参数优化。

有限元法的最大优点是可以将多种因素综合考虑,构造过程相关的耦合场对问题求解,因此分析结果可能更接近真实。材料模型的准确性是影响有限元仿真计算结果精度的关键因素之一。材料在切削加工过程中表现出来的性质是非常复杂的,应变率、相变等因素对材料流应力都具有一定的影响。因此,为了提高有限元计算结果的精度,材料模型尚需做深入研究。

## 参考文献

- [1] 刘战强,万熠,艾兴. 高速铣削中切削力的研究. 中国机械工程, 2003(09):734-736.
- [2] 翁泽宇,彭伟,贺兴书. 确定三维切削动态切削力系数的新方法. 东南大学学报(自然科学版), 2003(3): 319-323.
- [3] 黄丹,刘成文,郭乙木. 金属正交切削加工过程的有限元分析. 机械强度, 2003, 25(3): 294-297.
- [4] Kline W A, Devor R E, Lindberg R. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts. International Journal of Machine Tool Design and research, 1982, 22 (1): 7222.
- [5] Yusuf Altintas. 数控技术与制造自动化. 罗学科,译. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [6] Movahhedy M, Gadala M S, Altintas Y. Simulation of theorthogonal metal cutting process using an arbitraryLrangianEulerian finite element method. Journal ofMaterial Processing Technology, 2000(103): 267-275.
- [7] 汪文津,王太勇,范胜波,等. 车削过程切削力的计算机数值仿真, 机械强度, 2006,28(5):725-728. (责编 小颖)

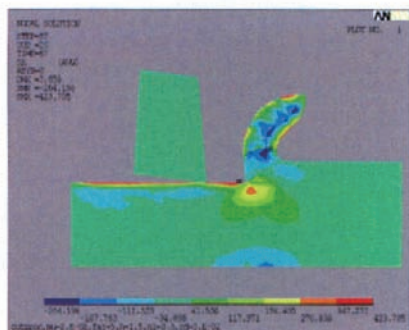


图11 切削完成退刀并解除约束后残余应力分布

量可以分解为材料撕裂能、第二变形区的刀屑摩擦能和第三变形区的碾压摩擦能,碾压摩擦能主要与刀具圆角有关,随刀具圆角半径的增大而增大,切削厚度对这部分的影响很小,增加切削厚度只是增加了材料撕裂能,因此对于有圆角刀具,切削力与切削厚度不呈比例增加也就容易理解了。随着切削厚度的增加剪切角