

# 金属切削过程的有限元法仿真研究

王殿龙\*, 于贻鹏

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 切削过程的建模和仿真在改善切削刀具的设计和优化切削参数方面有很大的发展潜力。建立了切削过程仿真的有限元模型预报切削力、刀具应力和切削温度。在预先收集工件流动应力数据和高应变率及高温下的摩擦因数的基础上,利用有限元软件 Deform 仿真研究切削过程。为了验证仿真准确性,进行了硬度 200 HB 的 45# 钢的无涂层硬质合金刀具切削试验。结果表明:切削力的预测值和试验值之间表现出了合理的一致性和共同的发展趋势;预测的切削温度的最高点无论在什么切削条件下,总是落在刀具的前刀面靠近主切削刃的部分;预测的最高的刀具应力出现在刀具的前刀面上靠近主切削刃的部分。

**关键词:** 切削过程; 仿真; 有限元法

**中图分类号:** TH140.7 **文献标识码:** A

## 0 引言

传统的切削过程研究中,试验法是最主要的研究方法,即根据试验结果得出经验公式,从而预报切削力。日益增长的时间、设备、材料和人力成本的消耗促使人们寻找更通用、更有效的研究方法。而有限元法在分析弹塑性大变形问题,包括分析需要考虑与温度相关的材料性能参数和具有很大的应变速率的问题方面有着杰出的表现。

20世纪70年代初期,Tay等<sup>[1]</sup>第一次采用有限元法计算了正交切削刀具、切屑和工件上的温度分布;1985年,Strenkowski等<sup>[2]</sup>提出了一个简化的正交切削模型,对平面应变情况使用了修正的拉格朗日刚度方程,特别是采用了新的切屑分离标准,即基于工件的等效塑性应变;1991年,Komvopoulos等<sup>[3]</sup>提出了新的正交切削有限元模型,着重考虑了在切削过程中工件材料的塑性流动、刀具与工件之间的摩擦力以及刀具的磨损,目的是为了了解切屑与工件的分离、摩擦力、积屑瘤和后刀面的磨损;1999年,Lo<sup>[4]</sup>使用有限元法分

析了在精密加工中,刀具前角对切削力、切屑的形状、等效应力的分布、残余应力的分布和加工表面的影响;2001年,Yang等<sup>[5]</sup>建立了切削加工中摩擦力随压力变化的有限元模型,并研究了它对残余应力的影响;2004年,Yen等<sup>[6]</sup>分析了切削刃的形状对切屑成形、切削力和其他切削过程的物理现象(切削温度、应力和应变)的影响。

本文在前人研究的基础上,考虑材料在不同温度、不同应变率条件下的力学性能和刀具几何角度对切削过程的影响,进行非自由切削的三维模拟,分析切削用量以及刀具几何角度对切削力的影响,切削温度的分布以及刀具的应力分布状况。

## 1 切削过程有限元模型的建立

有限元模型的建立就是将被研究对象的几何外形、材料特性和研究对象内部以及与周围环境之间的相互作用有机结合的过程。几何外形就是刀具和工件几何形状的转变与简化;材料特性就是工件材料在高温、高应变率和大应变状态下的

收稿日期: 2006-03-15; 修回日期: 2007-10-19.  
作者简介: 王殿龙(1962-), 男, 教授, 博士生导师。

力学性能;被研究对象内部以及与周围环境之间的相互作用主要是指热量在工件与刀具之间,工件、刀具和周围环境之间的转移,变形功与热量之间的转化关系,工件和刀具之间的摩擦作用等。

### 1.1 几何模型的建立

为了最大程度地模拟实际加工,刀具和工件的几何外形没有做任何简化,考虑到计算量,刀具只选取刀尖部分作为研究对象,工件选取其外表面靠近刀具的一小部分作为研究对象。其选取的准则是在切削深度方向上,工件厚度为切削深度的 5 倍;在进给方向上,工件厚度为主、副切削刃在该方向上的投影长度的 10 倍。在约束条件的处理上,刀具被认为是刚性的,由于没有变形的影响,在场量的传递和转换中,刀具计算要比工件简单得多。因此,根据运动的相对性,给工件的内表面施加全约束,刀具做旋转运动和进给运动。

### 1.2 材料模型的建立

仿真中使用的材料流动应力数据必须真实反映高应变率(有的甚至高达  $10^6/s$ )、高温(1 000 ℃ 以上)和大应变(应变 4 以上)下的材料本构行为。由于材料试验比较复杂和昂贵,而且一般的试验只能提供有限应变率(10 000/s)和应变(约 1.5)的材料数据,目前对于材料在切削状况下的本构关系的研究并不多,很多研究都基于已有的材料本构模型来展开,这只能在一定程度上反映切削模拟的真实性。为了获得更真实的仿真结果,Ohio 州立大学已经开始着手建立切削模拟材料数据库(MASAMS),并通过 Internet 提供查询服务。其部分材料本构模型已经封装到 Deform 的材料库中。本文中使用的材料就是封装到 Deform 材料库中的 AISI-1045(相当于国内的 45# 钢)。总共采用了温度范围 20 ~ 2 200 ℃,应变率范围 0.1 ~ 500 000,应变范围 0.05 ~ 5 下的 539 个点数据,其中温度和应变率各有 7 个水平,应变有 11 个水平。

### 1.3 摩擦力模型的建立

根据被广泛接受的索瑞夫<sup>[7]</sup>摩擦理论,刀屑接触面分为两个区域(图 1):粘区和滑区。在粘区,摩擦力等于材料的剪切流动应力  $k_{chip}$ ;在滑区,摩擦力遵循库仑摩擦规律。

为了便于计算,针对有限元分析的特点,在本文中

统一规定摩擦因数为前刀面上正压力的函数,即

$$\mu(x) = \begin{cases} k_{chip}/\sigma_n(x); & \sigma_n(x) \geq \sigma_0 \\ \mu; & \sigma_n(x) < \sigma_0 \end{cases}$$

式中:  $\sigma_0 = k_{chip}/\mu$ , 为库仑摩擦与剪切摩擦转换的临界正应力。据此,反复进行仿真模拟,直到仿真结果和试验值吻合为止。可以得到无涂层的硬质合金刀具与 45# 钢之间的剪切流动应力  $k_{chip}$  为 943 MPa,  $\mu(x)$  的变化曲线如图 2 所示。

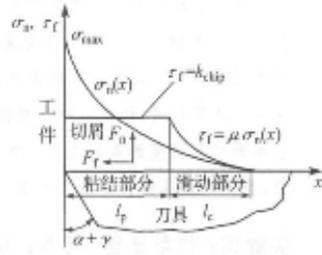


图 1 前刀面上正应力和摩擦应力分布示意

Fig.1 Curves representing normal and frictional stress distributions on the rake face

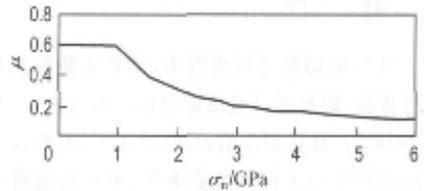


图 2 摩擦系数随正压力变化曲线

Fig.2 Curve of friction coefficient basing on normal pressure

## 2 切削过程的仿真分析

根据前面的分析建立有限元模型,并对有限元模型进行求解运算,在计算收敛的前提下最终得到二维平面应变状况下的金属切削过程模拟结果,这包括可视化的切削过程和许多过程变量,如切削力、切削温度和刀具应力等。

### 2.1 切削力的预报

模拟过程与实际的切削过程一样,也分为初始和稳态的过程。当刀具初始切入时,材料的塑性变形不断增大,刀屑接触长度进一步增加,摩擦力逐步增大,切削力不断增大。当切屑开始成形以后,刀屑之间的接触长度基本不再变化,切屑不断平稳地产生和流动,切削力也就趋于稳定。整

个切削过程中切削力的变化如图 3 所示。由于仿真过程毕竟受到计算机硬件和软件计算规模的限制,单元数目不可能无限多,在切削刃周围的切屑

和母体发生分离时,原本相互作用的单元发生分离,切削力就会突然降低,尤其在单元数目比较少的后刀面波动更为明显。

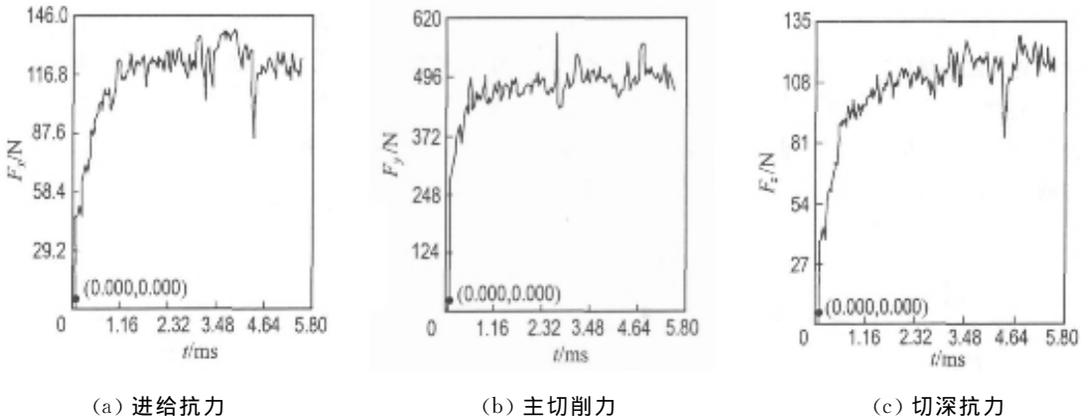


图 3 切削力的仿真变化曲线

Fig. 3 Simulation curves of cutting force

### 2.2 切削温度和刀具应力的预测

在金属切削机理的理论研究方面,研究者提出了许多数学仿真模型和计算方法。通过这些模型和方法,切削力、平均刀具应力和平均切削温度得到了比较精确的预测,但是刀具应力和切削温度在切削区域的分布情况始终是这些数学仿真模型和计算方法不可逾越的难关。而有限元方法在切削温度和刀具应力分布的研究上有着得天独厚的优势。它不但可以模拟出温度和应力在刀具表面上沿着切屑流动方向的分布,还能预测刀具内部温度和应力的分布。这对刀具的磨损和失效的研究有重要的参考价值。

图 4 描述了一组非自由切削过程中切削温度的分布状况,由于选取的进给量和切削速度很小,切削温度并不高,最高温度只有 400℃ 左右。但是,通过分析发现,不论切削条件怎么变化,预测的切削温度的最高点总是在刀具前刀面上主切削刃的附近。在这个周围,刀屑之间的压力比较高,摩擦力最大,说明刀屑之间的摩擦是引起温度上升的一个重要因素,而高的温度会直接导致刀具磨损的加速,刀具寿命的降低。

图 5 描述了一组非自由切削过程中刀具等效应力的分布情况。最大刀具等效应力分别出现在刀具前刀面上主切削刃的周围(图中 A 区),这与实际应用中在刀具前刀面出现月牙洼磨损相吻

合;后刀面上也出现了比较大的应力分布,这将导致后刀面的磨损;在主切削刃和工件接触的最外缘有比较大的应力集中(图中 B 区),这个区域切削条件比较差,容易导致切削刃的崩刀。

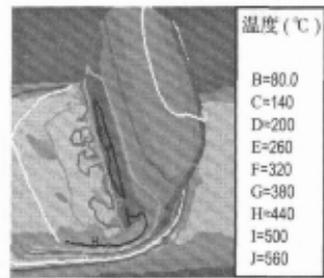


图 4 非自由切削中切削温度的分布

Fig. 4 Distribution of temperature in oblique cutting process

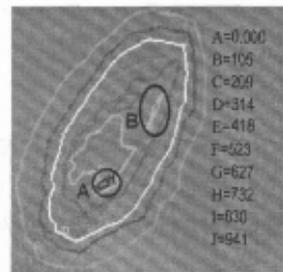


图 5 非自由切削中刀具有效应力的分布

Fig. 5 Distribution of tool effective stresses in oblique cutting process

### 3 试验验证

为了验证仿真的结果,进行了无涂层硬质合金(YT15)刀具切削45#钢的正交切削试验.试验在干切状态下进行,使用Kistler9257B压电三向动态测力仪测量切削力,通过Kistler电荷放大器5007连接到PC,进行实时的数据采集.通过回归分析,可以分别得到切削用量和刀具角度对切削力的影响,下面以主切削力为例进行说明.图6

描述了主切削力随切削用量和刀具角度的变化曲线.从图中可以看出,切削力的仿真值和试验值有着合理的一致性,它们之间的平均误差为10.01%,最大误差为19.99%,最小误差仅为1.21%;并且切削力的仿真值和试验值之间还具有共同的发展趋势,都是随着刀具前角 $\alpha$ 和主偏角 $\theta$ 的增大而不断降低,随着切削深度 $d$ 、进给量 $f$ 和切削速度 $v$ 增加而增加.

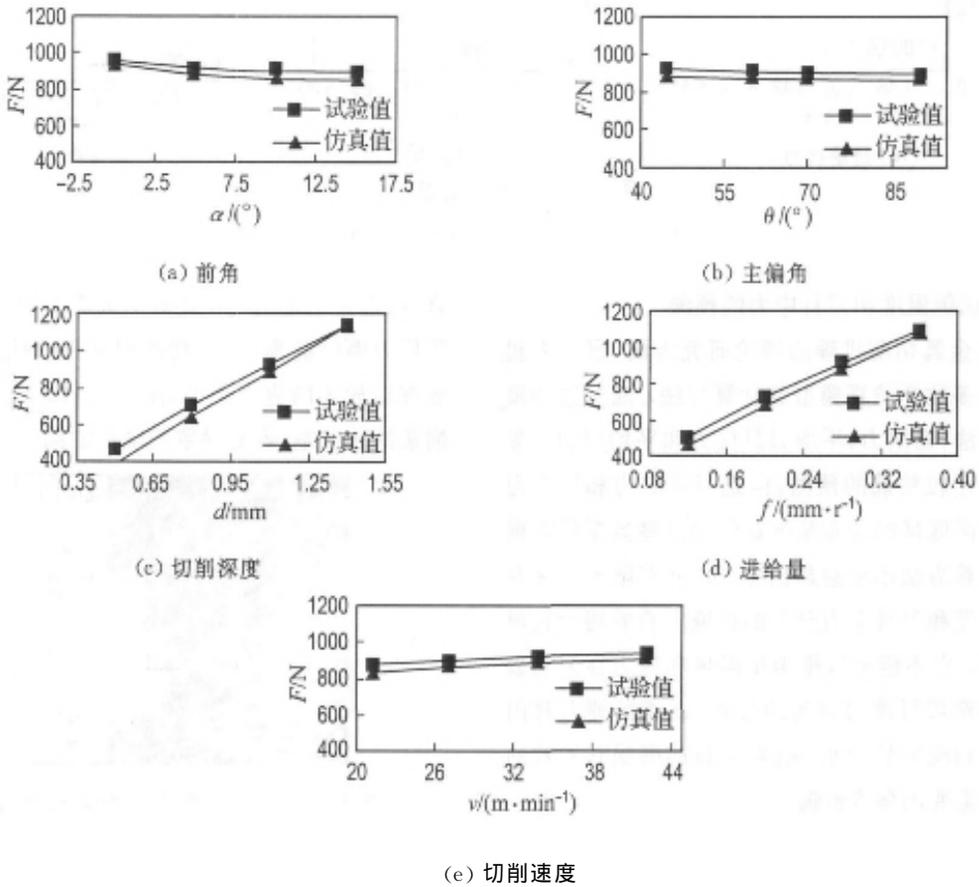


图6 各参数对主切削力的影响曲线

Fig. 6 Effects of cutting parameters on the main cutting force

### 4 结论

(1) 切削力的预测值和试验值具有合理的一致性和共同的发展趋势,但是受计算条件的影响,在切屑分离时切削力曲线会产生一定的跳动;

(2) 刀屑之间的摩擦对切削温度有着重要的影响,无论在什么切削条件下,预报的最高切削温度总是出现在刀具前刀面上靠近主切削刃的一侧;

(3) 刀具的最大等效应力分别出现在刀具的前刀面上主切削刃的周围,在后刀面上靠近主切削刃的部分也出现了比较大的等效应力,这与实际使用中刀具磨损的情况十分接近;

(4) 工件材料在高温、高应变率下的力学性能对仿真结果的正确性至关重要,对不同的材料使用这种方法仿真时,必须先获得材料的力学性能.

## 参考文献:

- [1] TAY A O, STEVENSON M, DAVIS G. A numerical method for calculating temperature distributions in machining, from force and shear angle measurements [J]. *Int J Mach Tool Des Res*, 1976, **16**:335-349
- [2] STRENKOWSKI J, CARROLL J. A finite element model of orthogonal metal cutting [J]. *ASME J Eng for Ind*, 1985, **107**: 346-354
- [3] KOMVOPOULOS K, ERPENBECK S. Finite element modeling of orthogonal metal cutting [J]. *ASME J Eng for Ind*, 1991, **113**: 253-267
- [4] LO S. An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method [J]. *J Mater Proces Technol*, 2000, **105**: 143-151
- [5] YANG X, LIU C. A new stress-based model of friction behavior in machining and its significant impact on residual stresses computed by finite element method [J]. *Int J Mech Sci*, 2002, **44**: 703-723
- [6] YEN Y, JAIN A, ALTAN T. A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries [J]. *J Mater Proces Technol*, 2004, **146**: 72-81
- [7] ZOREV N. Interrelationship between shear processes occurring along tool face and on shear plane in metal cutting [C] // *Proceedings of the International Production Engineering Research Conference*. Pittsburg: Carnegie Institute of Technology, 1963:3-17

## Study of metal cutting process simulation by finite element method

WANG Dian-long\*, YU Yi-peng

( School of Mech. Eng. , Dalian Univ. of Technol. , Dalian 116024, China )

**Abstract:** Modeling and simulation of the metal cutting processes have the potential for improving cutting tool designs and selecting optimum conditions. A FEA (finite element analysis) model to simulate the cutting process in turning and predicted cutting forces, tool stresses and temperatures was developed using finite element analysis. Using FEA software Deform, previously developed flow stress data of the workpiece and friction coefficient were used. As an application, machining of 45<sup>#</sup> steel at 200 HB hardness using uncoated carbide tooling was investigated. The predicted forces in orthogonal turning process show similar trends and reasonable agreements when compared with experimental forces. The highest temperature was predicted at the rake face (around the prime cutting edge) of the tool regardless of cutting conditions. The highest tool stress was predicted at the rake face (around the prime cutting edge) of the tool.

**Key words:** cutting process; simulation; finite element method