

文章编号: 1000-6893(2006)03-0531-05

高速切削有限元模拟技术研究

杨 勇, 柯映林, 董辉跃

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Finite Element Simulation of High Speed Cutting

YANG Yong, KE Ying lin, DONG Hui yue

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

摘 要: 有限元模拟是研究高速切削机理的有效方法, 本文致力于有限元模拟所必需的关键技术研究。依据大变形理论和虚功原理对高速切削过程进行分析, 建立了基于拉格朗日描述的有限元控制方程。通过研究材料动态本构关系、刀屑接触、切屑分离、切屑断裂和切削热动态耗散与传导关键技术建立了正交切削有限元模型, 提出材料本构关系建立方法和切屑断裂能量解释观点, 最后结合实例进行高速切削模拟, 并对模拟结果进行分析和验证, 指出所建立的有限元模型是合理的。

关键词: 高速切削; 有限元模型; 正交切削模拟; 材料本构关系; 切屑断裂

中图分类号: V261.2⁺1 文献标识码: A

Abstract: Finite element simulation is an effective method to study high speed cutting mechanism, and several key finite element techniques are studied in this paper. Large deformation theory and virtual work principle are applied to high speed process, then the finite element governing equation is approached based on Lagrangian description. Orthogonal cutting finite element model is established through studying the material constitutive relation, contact of tool with chip, chip separation, chip fracture, heat dissipation and conduction key techniques. A method to construct material constitutive relation and a point of view from energy to explain chip fracture are adopted. In the end, a high speed cutting case is simulated and the finite element model is proved to be reasonable by analyzing and validating some results of simulation.

Key words: high speed cutting; finite element model; orthogonal cutting simulation; material constitutive relation; chip fracture

切削加工模拟在计算机中再现工件和刀具相对运动的全过程, 动态显示热流、相变、温度和应力等分布, 使其突破试验等研究方式的缺陷, 成为研究高速切削机理的有效方法。但是, 高速切削包含复杂的热、力、机械及其耦合现象, 如切削过程中工件剧烈的塑性变形, 刀具和工件的瞬态接触, 切屑与工件的分离及其断裂, 切削热在切屑、工件、刀具中动态耗散与传导等, 都给高速切削有限元模拟带来了相当大的困难。J. S. Strenkowski 预先设置一条分离线来建模切屑和工件的分离^[1], Marusich and Ortiz 使用显示积分算法和网格自适应策略对高速切削建模^[2], Z. Yang 采用弹-刚性耦合有限元模型模拟高速切削过程^[3]。前期有限元建模对刀具切屑接触、切削热传导等关键技术都进行了研究, 但尚有部分环节研究仍不深入, 尤其是大变形中的材料本构关系、高速切

削过程中切屑断裂机制等, 这些不成熟技术环节严重影响了计算机的模拟精度, 高速切削有限元模拟技术急需进一步研究和完善。

通用有限元软件 DEFORM 具有强大的非线性求解能力, 适用于高速切削空间域和时间域并存的强非线性情况。根据高速切削有限元模型的特点, 通过集成该软件中相关功能及相应的二次开发实现正交切削模拟。

本文系统研究了高速切削有限元模拟所必需的关键技术, 深入探讨至今仍不完善的材料本构关系、切屑断裂及裂纹扩展等关键技术, 提出材料本构关系建立方法, 并应用基于能量观点的断裂标准对切屑断裂现象进行描述。最后, 对高速切削实例进行模拟, 验证了所建立的有限元模型。

1 高速切削有限元控制方程

控制方程反映变形体内部物理量与外部载荷之间在剧烈运动中的变化关系, 是高速切削有限元模拟的重要理论基础。

收稿日期: 2004-11-24; 修订日期: 2005-01-23
基金项目: 国家自然科学基金(50435020)、国防型号工程(00-1810-0785)资助项目

根据大变形理论,应用虚功原理得欧拉描述的单元控制方程

$$\int_V \tau_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V f_i \delta u_i dV + \int_A F_i \delta u_i dA \quad (1)$$

式中: τ_{ij} 为 Euler 应力张量; ε_{ij} 为现时构形中的无限小应变; δu_i 为虚位移; V, A 为现时构形中体积和表面积; f_i, F_i 为单位体积力荷载矢量和表面力荷载矢量。

欧拉描述的单元控制方程其边界条件是未知的,要将其转换为拉格朗日描述方程。设单元体在初始构形中占据的区域为 V_0 , 表面积为 A_0 , 单位体积力荷载矢量为 f_{i0} , 表面力荷载矢量为 F_{i0} , 欧拉描述的 Euler 应力张量和拉格朗日描述的 Kirchhoff 应力张量转化关系为

$$\tau_{ij} = J^{-1} \frac{\partial x_i}{\partial X_l} \frac{\partial x_j}{\partial X_m} S_{lm} \quad (2)$$

式中: J 为 Jacobi 行列式; S_{lm} 为 Kirchhoff 应力张量; x_i 为空间坐标; X_l 为物质坐标。

现时构形中单元体积与相应初始构形中单元体积满足

$$dV = J dV_0 \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)左边,利用式(3)得

$$\begin{aligned} \int_V \tau_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV &= \int_V \tau_{ij} \delta (\partial u_i / \partial x_j) dV \\ &= \int_{V_0} S_{lm} \delta E_{lm} dV_0 \end{aligned} \quad (4)$$

假设工件变形体承受保守力系作用,则有

$$\int_V f_i \delta u_i dV = \int_{V_0} f_{i0} \delta u_i dV_0 \quad (5)$$

$$\int_A F_i \delta u_i dA = \int_{A_0} F_{i0} \delta u_i dA_0 \quad (6)$$

将式(4)~式(6)代入式(1)可得用 Kirchhoff 应力张量表示的控制方程

$$\begin{aligned} \int_{V_0} S_{ij} \delta (E_{ij}) dV_0 &= \int_{V_0} f_{i0} \delta u_i dV_0 + \\ &\int_{A_0} F_{i0} \delta u_i dA_0 \end{aligned} \quad (7)$$

Green 应变张量 E 采用增量形式得

$$\delta E = B \delta u_e \quad (8)$$

并且

$$\delta u = N \delta u_e \quad (9)$$

式中: B 为单元应变矩阵; u 为节点位移; N 为单元形函数。对所有单元的控制方程进行组合,得到高速切削工件的有限元控制方程

$$\begin{aligned} \sum \int_{V_0} B^T S dV_0 &= \sum \int_{V_0} N^T f_{i0} dV_0 + \\ &\sum \int_{A_0} N^T F_{i0} dA_0 \end{aligned} \quad (10)$$

2 高速切削有限元模型

在金属切削机理研究中,通常采用正交切削模型观察和研究变形区中的诸多现象,实际切削形式都是作为二元正交切削的应用来考虑。正交高速切削有限元模型如图1所示,该有限元模型和传统切削有限元模型在两方面存在显著不同:

①高速切削一般采用负前角;②高速切削刀具考虑刀尖半径。

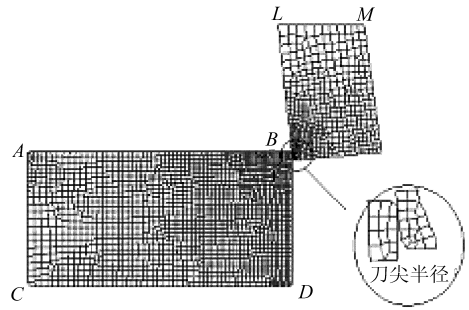


图1 正交高速切削有限元模型

Fig 1 Orthogonal high speed cutting finite element model

有限元模型中工件和刀具均采用稳定性较好的简化积分四节点双线性热力耦合单元。网格划分采用如下策略:①形成接触对的刀尖部分和工件部分网格划密,其他部分划粗;②网格密粗尺寸比大于1/5;③设置网格自适应重划窗口,保持同刀具运动同步。工件底边水平和垂直自由度被约束,侧边只约束水平自由度,刀具做平移运动,工件底端和刀具上端的边界温度为室温。

(1) 材料本构关系

材料本构关系反映材料物质本性的变化,是高速切削有限元模拟成败的关键因素。在材料微观组织结构给定的情况下,本构关系可以表示为流动应力同温度、应变、应变率之间的数学关系式。先前研究学者或是依据同高速切削条件相差甚远的试验数据,或是基于低速下的切削理论建立材料本构关系,其建模方法难以令人满意。

为解决这一难点,提出有限元试模拟联合“单因素”流动应力公式进行“反求”应力、应变等物理量数据来构建材料本构关系,即首先进行 SHPB 动态压缩试验,获取材料初始流动应力、应变等数据,输入有限元软件对切削过程进行模拟,模拟结果与相同切削条件下的试验值比较,若模拟误差较大,则用“单因素”流动应力公式修正流动应力,依据新的应力、应变等物理量重新模拟,并再次比较、修正,这样通过反复

修正和模拟最终获得较为理想的材料流动应力、应变等物理量数据, 对这些数据进行非线性

回归分析得到“三因素”动态本构关系。具体研究路线如图 2 所示。

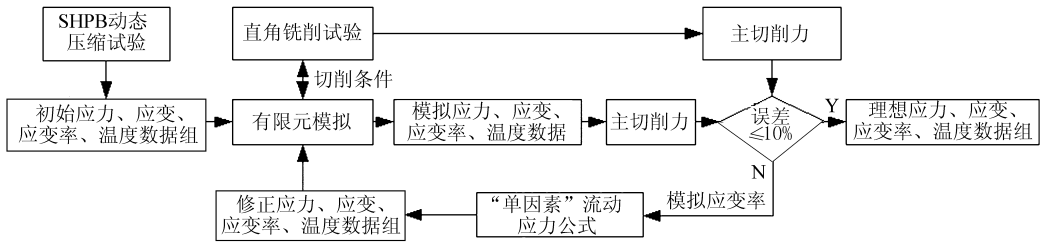


图 2 理想物理量数据获取路线

Fig 2 Obtaining for ideal physical data

“单因素”流动应力公式描述如下, 该公式非常适合描述高应变率过程, 能正确反映高速切削材料流动应力和应变率之间的关系

$$\bar{\varepsilon} = D(\bar{\sigma}/\sigma_0 - 1)^p \quad \bar{\sigma} \geq \sigma_0 \quad (11)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为流动应力; $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变率; σ_0 为静态屈服应力; D, p 为由试验确定的常数。

(2) 刀具切屑接触

高速切削前刀面与切屑接触可通过该作用区的法向应力和摩擦应力进行分析。按照 Zorev 研究^[4], 法向应力和摩擦应力分布如图 3 所示。

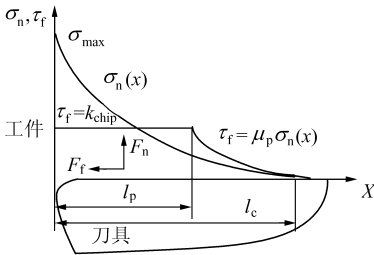


图 3 高速切削前刀面法向应力和摩擦应力分布图

Fig. 3 Normal and frictional stress distributions on the tool rake face in high speed cutting

刀屑接触区域同时存在着两个区域, 从刀尖到某一点为黏结区, 其摩擦应力可视为常数, 在这一点之后为滑动区, 摩擦应力沿刀具前面减小, 其规律同库仑摩擦定律相符。整个刀屑接触区域可用下式描述

$$\begin{aligned} \tau &= k_{chip} \quad (\mu\sigma_n \geq k_{chip} \text{ 黏结摩擦区域}) \\ \tau &= \mu\sigma_n \quad (\mu\sigma_n < k_{chip} \text{ 滑动摩擦区域}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: σ_n 为法向应力; τ 为摩擦应力; k_{chip} 为切削材料剪切流动应力; μ 为摩擦系数。

根据刀屑界面的摩擦应力的大小可以确定是滑动摩擦还是黏性摩擦。滑动区域摩擦系数获取

的理想方法是基于切削刀具前刀面的应力分布数据。但是, 在加工时, 刀具前刀面的应力测量是非常困难的。文献[5]利用切削力实验测得的切削力和进给力计算平均摩擦系数, 为该问题的解决提供了很好的方法。

(3) 切屑分离

切屑分离主要有几何和物理两大标准, 其中几何分离标准主要基于刀尖与刀尖前单元节点的距离变化来判断分离与否, 难以反映切屑分离过程中的力学和物理现象; 物理分离标准主要基于制定的一些物理量(应力、应变和应变能等)是否达到临界值进行判断, 该标准尽管接近实际情况, 但相当复杂, 很难在有限元软件中实现, 特别是某些高速切削物理现象在本质上还没有完全清楚, 根本不可能确定一个可靠的物理临界值。基于对以上两类分离标准的改进, 同时兼顾和 DEFORM 软件的结合, 采用基于断裂力学的几何-物理切屑分离标准

$$f = \sqrt{(\sigma_n/\sigma_c)^2 + (\tau_n/\tau_c)^2} \quad (14)$$

式中: f 为断裂应力指数; σ_c, τ_c 分别为刀尖前指定距离处的法向应力和剪切应力; σ_r, τ_r 分别为是工件材料在纯拉伸和剪切载荷下的失效应力。

(4) 切屑断裂

高速切削与传统切削显著不同, 随着切削速度提高, 特别是高硬度、低热物理性的工件材料, 在很宽的高切削速度范围内均形成锯齿状切屑^[6]。M. A. Elbestawi 和 El Wardany T^[7]应用断裂力学理论对高速切削中工件材料裂纹萌生和扩展方向进行预测, 指出当工件材料自由表面的能量达到某一临界值时, 便产生裂纹, 裂纹沿着应变能密度最小的方向不断扩展, 进而造成材料断裂。

有限元模拟中锯齿状切屑的形成由切屑断裂

标准实现。材料断裂和裂纹扩展现象很复杂,这里按照 M. A. Elbestawi 的研究方法,从能量角度出发建立切屑断裂标准。考虑到金属材料变形断裂的相似性,借鉴冲裁、挤压等成形工艺所使用的材料断裂标准,应用 Cockroft-Latham^[8] 切屑断裂标准,通过高温拉伸试验计算出断裂塑性能,并同金属材料变形断裂所需的能量建立映射关系,将其作为判断金属材料延性断裂的临界能量值,标准描述如下

$$\int_0^{\bar{\epsilon}} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad (15)$$

式中: $\bar{\epsilon}$ 为高温拉伸断裂时的总应变; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变; σ^* 为最大拉伸应力; C 为临界断裂值。

(5) 切削热动态耗散与传导

根据传热学原理,稳态高速切削时切削热动态耗散的偏微分能量平衡方程为

$$K(\partial^2\theta/\partial x^2) + K(\partial^2\theta/\partial y^2) + \dot{Q} = \rho c [u_x(\partial\theta/\partial x) + u_y(\partial\theta/\partial y)] \quad (16)$$

式中: K 为材料热导率; \dot{Q} 为体积热流率; ρ 为材料密度; c 为材料比热; θ 为热量; u_x 和 u_y 为材料移动速度在 x 和 y 方向的分量。

高速切屑忽略热对流和辐射等耗散方式,重点研究热传导。刀屑接触界面的热流量方程为

$$Q_1 = \lambda(\theta_1 - \theta_B) \quad (17)$$

式中: Q_1 为热流量; λ 为界面热传递系数; θ_1, θ_B 分别为切屑和刀具温度。

切屑内的热流量由下式表示

$$Q_2 = K(d\theta/dL) \quad (18)$$

$d\theta/dL$ 为温度梯度。式(17)与式(18)相等,得

$$\lambda(\theta_1 - \theta_B) = K(d\theta/dL) \quad (19)$$

有限元软件中即以系数 λ 描述切屑和刀具接触热传导,它表示为温度的函数。

3 高速切削有限元模拟分析与验证

针对 45# 钢(调质, HRC(35~40)) 进行正交切削有限元模拟,为保持高的随率敏感性,将其设置成塑性体,刀具材料为硬质合金,设置为刚体,切削环境为干切削。模拟结果与下述高速切削理论公式(参见文献[6])进行比较

$$F_c = S_s A_c [\cot\phi + \tan(\phi + \beta - \gamma_0)] \quad (20)$$

式中: F_c 为切削力(与切削速度方向一致); S_s 为剪应力; A_c 为切削层面积; ϕ 为剪切角; β 为摩擦角; γ_0 为刀具前角。

比较情况如表 1 所示。

表 1 高速切削工艺参数及切削力比较

Table 1 Comparison of technology parameters and force in high speed cutting

切削速度/(mm·s ⁻¹)	5 000	6 000	8 000	10 000
每齿进给量/mm	0.04	0.04	0.04	0.04
切削深度/mm	0.3	0.3	0.3	0.3
切削力计算值/N	62.50	57.76	53.32	52.62
切削力模拟值/N	64.08	59.15	57.62	55.84
相对误差/%	2.53	2.40	8.10	6.11

从表 1 可以看出,切削力模拟值与计算值相对误差在 10% 以内,考虑有限元模型是在一定假设条件下建立,模拟结果完全可以接受。同时,该表也反映出随切削速度的增加,切削力降低,这与理论研究较为一致。

图 4 是高速切削进入稳定状态时的锯齿状切屑成形图。在切削中工件表面能量不断增加,当单元能量达到断裂标准中的临界值时,即进行单元删除,引起工件材料断裂,逐渐形成锯齿状切屑。这个形状的切屑可导致切削力高频率的周期波动,增加刀具磨损,降低加工表面质量。

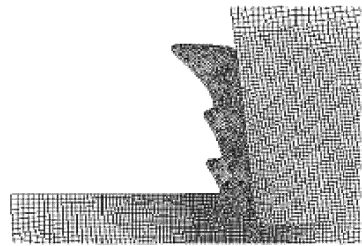


图 4 速度为 6 000 mm/s 锯齿状切屑成形图

Fig. 4 Segmented chip formation at speed of 6 000mm/s

图 5 是高速切削力随刀具位移变化曲线。由于锯齿状切屑单元沿前刀面高频率周期性运动,致使切削刃承受高频率变化的动态应力,导致在某一平衡位置附近形成了如图 5 所示的波动曲线,这会导致已加工表面产生鳞刺,降低表面质量,甚至会导致刀具材料形成裂纹。

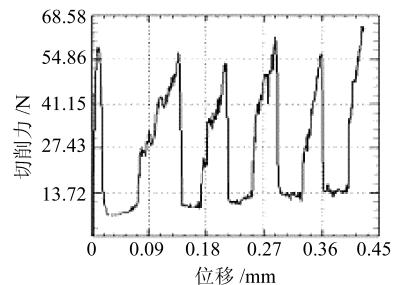


图 5 速度为 6 000 mm/s 切削力随刀具位移变化曲线图

Fig. 5 Changing curves of force with tool moving at speed of 6 000 mm/s

图6是切屑、工件和刀具内部的温度分布。从图中可知,整个切屑刀具接触面内切削温度高于第1剪切区温度;切削温度最高值产生于切屑裂纹刚出现时刻,在裂纹扩展部分,切削温度逐渐降低,这一结论同EurGene Ng^[9]得到的相同。

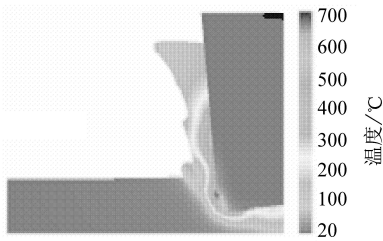


图6 速度为10 000 mm/s 稳态切削温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution at speed of 10 000 mm/s

图7是切屑和工件法向应力分布。从该图可以看出,在切屑同前刀面接触处为压应力,接触以外为拉应力;刀尖附近工件内部为压应力,离刀尖越远,压应力逐渐减小;工件同后刀面接触处为拉应力,离接触处越远,拉应力逐渐减小。该应力分布情况同文献[6]得出的结论一致。

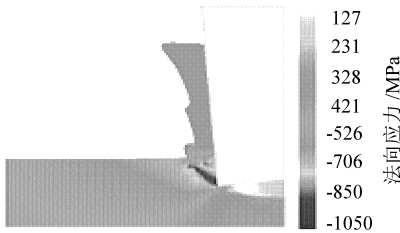


图7 速度为10 000 mm/s 稳态法向应力分布图

Fig. 7 Normal stress distributions at speed of 10 000 mm/s

铸铁及其合金高速切削有限元模拟同45#钢类似,在稳态切削中逐渐形成锯齿状切屑,航空铝合金等有色金属切削速度更高,在稳态切削中逐渐形成连续的带状切屑,因其材料性质改变,有限元模拟同钢铁等截然不同,因篇幅受限,具体模拟过程将另择文论述。

4 结 论

建立了正交高速切削有限元模型,对材料本构关系、刀屑接触、切屑分离、切屑断裂以及切削热动态耗散与传导等模拟关键技术进行了研究。模拟结果同前期研究结论的一致,验证了所提出的动态本构关系建立方法,同时也证明了所应用基于能量观点的切屑断裂标准可以成功的模拟锯齿状切屑成形。

采用通用软件进行加工模拟,不仅避免了必须开发个性化软件的重复劳动,而且有利于在不同的学者之间进行有关的技术交流,加速高速切削数值模拟研究的发展。

同时,以所建立的有限元模型为基础,可进一步优化刀具设计与切削工艺、改善加工质量,在完善金属高速加工理论体系、促进高速加工技术广泛应用等方面将具有重大的意义。

参 考 文 献

- [1] Strenkowski J S, Carroll J T. A finite element model of orthogonal metal cutting[J]. J Eng Ind, 1985, 107: 349-354.
- [2] Manusch T D, Ortiz M. Modeling and simulation of high speed machining[J]. Int J Numer Methods Engrg, 1995, 38: 3675-3694.
- [3] Yang Z, Sadler J P. On issues of elastic rigid coupling in finite element modeling of high speed machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35: 71-82.
- [4] Zorev N N. Inter relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting[A]. International Research in Production Engineering[C]. New York: ASME, 1963. 42-49.
- [5] Liu C R, Guo Y B. Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool chip friction on residual stresses in a machined layer[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(9): 1069-1086.
- [6] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 34-40.
Ai X. High speed machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 34-40. (in Chinese)
- [7] Elbestawi M A, Srivastava A K, ElWardany T I. A model for chip formation during machining of hardened steel[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 71-76.
- [8] Cockcroft M G, Latham D J. A simple criterion of fracture for ductile metals[R]. Report 216, UK: National Engineering Laboratory, 1996.
- [9] EurGene N, Aspinwall D K. Modelling of hard part machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127: 222-229.

作者简介:

杨 勇(1976-) 男,山东德州人,博士研究生,主要研究方向:先进制造技术,CAD/CAE/CAM。E-mail: yy253200@21cn.com。

柯映林(1963-) 男,湖北人,1992年获得南京航空航天大学博士学位,现任浙江大学教授。主要研究方向有CAD/CAE/CAM,反求工程等。E-mail: ylk@zju.edu.cn,联系电话:0571-87952337。

(责任编辑:蔡 斐)