[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.009

基于 ABAQUS 的带状切屑有限元仿真研究

张嘉嘉,王大中

(上海工程技术大学 机械工程学院,上海 201620)

摘 要:稳态金属切削过程中,若形成可断带状切屑,可以得到较好的表面质量。为研究带状切屑的形成过程,采用 Johnson-Cook 材料模型,利用任意拉格朗日欧拉网格算法(ALE)实现切屑分离,建立二维正交自由切削模型。有限元仿 真获得带状切屑形成时的切削力、切削应力及能耗变化趋势,并对相关数据进行处理。通过分析不同刀-屑摩擦因数对 切削过程影响规律,切削力变化趋势预测,切削各阶段对应力场影响的判断,切削过程中总能量变化情况等,初步揭示第 一变形区弹性变形规律。研究为进一步揭示带状切屑的形成机理奠定基础,对金属切削实践具有一定的指导意义。 关键 词:稳态金属切削;带状切屑;有限元仿真;任意拉格朗日欧拉网格算法(ALE);ABAQUS软件 中图分类号:TG506.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)01-0041-05

Finite Element Simulation of Strip Chip Cutting Based on ABAQUS

ZHANG Jiajia, WANG Dazhong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The good surface quality can be obtained by the formation of the broken ribbon chip in the steady metal cutting. In order to explore the formation mechanism of strip chip, a two-dimensional orthogonal cutting model was used with Johnson-Cook material model and Arbitrary Lagrange Euler method (ALE) as the chip separation. The cutting force, stress and energy consumption of the chip forming process were obtained by finite element simulation, and the related data were processed scientifically. Through the analysis of the effects of different tool chip friction coefficients on the cutting process, cutting force variation trend prediction, the effect on stress field in different cutting stage and the change of the total energy in cutting process, revealed the elasticity deformation law of the primary deformation zone. This study lays a foundation for further research on the formation mechanism of the strip chip, and the research results have certain guiding significance for the practice of metal cutting.

Keywords: steady metal cutting; strip chip; finite element simulation; Arbitrary Lagrange-Euler method(ALE); ABAQUS

刀具几何参数、刀-屑间摩擦因数、切削区温度场 以及应力场分布情况等因素与切屑的形成密切相关, 影响已加工表面质量。切屑的形态直接影响金属加工 精度,其中形成可断的带状切屑可以得到较好的表面 质量,故研究带状切屑的形成机理显得十分重要。黎 险峰^[1]等对高速切削淬硬模具钢切屑形成机理进行 试验研究,分析切削速度对切屑形成的影响规律。邹 志杰^[2]等研究金属切削过程中毛刺形成机理,实验结 果表明选择合适的材料参数可有限地控制毛刺产生, 获得良好的表面质量,对研究切屑形成机理做出贡献。 目前,很多文献及研究成果都局限于以传统的理论解 析方法来定量解释切削机理,不能完全反映切削过程 中的某些信息。同传统解析模型相比,利用有限元法 研究切削过程,对材料变形和热传导考虑更全面且更 符合实际,可反映切削区域切屑形态、切削力、切削温 度、应力场分布及总能量的变化情况,有效节约试验时 间,降低试验耗费,为材料性能及刀具优化设计提供有 价值的数据。

笔者基于有限元软件 ABAQUS 对金属切削过程 进行模拟仿真,运用拉格朗日与欧拉相结合的算法 (ALE)来实现切屑分离,得到切削过程中应力、温度、 切屑形态随摩擦因数变化的情况,并完成带状切屑形

收稿日期:2016-07-25;修回日期:2016-09-30

第一作者简介:张嘉嘉(1991),女,河南安阳人,硕士研究生,主要研究方向为金属切削加工。E-mail:1017616033@ qq. com

成机理的仿真研究^[3]。

1 切削加工有限元模型的建立

研究建立的二维正交稳态模型如图 1 所示,刀具 前角 7°,后角 7°,切削厚度为 0.1 mm,刃口半径 0.002 mm,假定刀具为解析刚体。工件材料为 AISI 4340,采 用 CPE4RT 4 节点显式线性平面应变温度-位移耦合 单元和结构化网格划分技术。对工件网格划分切削区 域较密,其他区域较稀疏,以确保仿真结果准确性的同 时提高效率。采用面面接触对、有限滑移和动力学接 触算法,其中刀具为主面,工件切削区为从面。在工件 底边和两侧边界上进行全约束,在刀具刚体参考点加 载水平速度,并通过 Tabular 幅值类型曲线来实现速度 由零逐渐增至最大,再降为零的变化。工件、刀具、环 境的初始温度均为 20 ℃。



图 1 切削有限元模型 Figure 1 Finite element model

1.1 材料本构模型

材料本构模型反映材料的力学特性,表征金属切 削过程中材料变形的动态响应^[4]。综合考虑,研究采 用能描述材料高应变速率下热黏塑性变性行为的 Johnson-Cook 模型^[5]。其表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n}) \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{0}}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{r}}{T_{m} - T_{r}}\right)^{m}\right) \varepsilon$$

式中: σ 为等效应力; ε 为等效弹性应变; ε_1 为等效弹性应变率; ε_1 为等效弹性应变率; $\tau_{,T_m}$ 、 T_r 分别为 工件的变形温度、熔点和室温(20 \mathcal{C});A 为准静态条 件下的屈服强度;B 为硬度模量;n 为应变硬化参数; C,m 分别为应变强化参数和热软化系数。材料 AISI 4340 的密度为 7 850 kg/m³,熔点为 1 450 \mathcal{C} ,材料在 Johnson-Cook 模型中的参数如表 1 所示。

表1 AISI 4340 材料在 Johnson-Cook 模型中的参数

Table 1 Material constant of AISI 4340 in

Johnson-Cook model

A/MPa	<i>B</i> /MPa	С	n	m
1 150	739	0.014	0.26	1.03

1.2 刀-屑摩擦模型

刀-屑间摩擦影响金属切削加工中切削力,切削区 域温度场及应力场分布,切屑形态以及刀具磨损情况。 根据 Zorev^[6]的研究,刀屑的摩擦区通常可以分为黏结 区和滑动区,其中黏结区为内摩擦,黏结部分之外为外 摩擦(滑动摩擦);内摩擦力约占总摩擦力的 85%,故 在分析金属变形时,着重考虑内摩擦^[7]。笔者采用修 正的库伦摩擦模型来描述刀屑之间的摩擦,可表述为:

当 $\mu\sigma_n > \tau_s$ 时, $\tau_f = \tau_s$;

当 $\tau_f < \tau_s$ 时, $\tau_f = \mu \sigma_n$ 。

式中: μ 为摩擦因数, τ_f 为摩擦应力, σ_n 为刀屑接触面的正应力, τ_s 为材料剪切屈服应力。

1.3 切屑分离

实现切屑分离的算法有2种:欧拉算法(Euler)和 拉格朗日算法(Lagrange)。这2种算法各有优缺点, 拉格朗日算法可以模拟从切削的初始状态一直到稳定 状态,很好地预测切屑的形状和残余应力的分布等,但 是需要创建分离线模型并设置切屑分离准则;欧拉算 法模拟是在切削达到稳定状态后进行的,因此不需要切 屑分离准则,但需要通过实验预先设定剪切角和切屑形 状,并固定网格以避免其严重畸变导致的不收敛。Noh 和 Hirt 在研究有限元差分法时提出任意拉格朗日欧拉 算法(ALE)^[8]; ALE 又被 Hughes, Liu 和 Belytschko 等 人引入到有限元分析中。金属切削是一个变形大、应 变率高的热力耦合过程,采用 ALE 时计算网格不再固 定,设置极限误差水平后,在模拟仿真过程中可通过自 适应分析自动调整算法改进求解过程,避免了网格严 重畸变以及网格再划分等问题,且不需预先创建分离 线模型、材料断裂准则以及预先假定切屑形状,使计算 易于收敛,提高了分析效率和结果的可靠性。

2 结果分析

2.1 不同刀-屑摩擦因数对切削过程的影响

刀-屑、刀-工件间常常相互挤压和剧烈摩擦产生 大量切削热,严重影响刀具的使用寿命以及工件加工 精度、切屑形状、切削区温度场及应力应变场。刀屑间 摩擦会引起切屑、刀具以及工件中的热应力耦合作用, 产生热弹、塑性变形。摩擦因数μ减小时,摩擦角β也 减小,剪切角Φ随之增大,所以变形系数减小。刀具 材料摩擦因数越小,切削力越小。

2.1.1 摩擦对切屑变形的影响

笔者在相同切削速度和相同模型条件下,通过改 变刀屑间摩擦因数,仿真分析摩擦对切屑变形的影响, 结果如图2所示。



图 2 不同摩擦因数对切屑形状的影响 Figure 2 Effect of different friction coefficient on shape of chip

由图2可知,刀-屑间摩擦因数增大时,切屑在前 刀面上侧向弯曲曲率明显减小^[9];刀-屑接触长度增 长,切屑螺旋卷曲半径也越大。这是由于摩擦因数增 大时,切屑流出所受阻力增大,切削层材料在前刀面上 堆积严重,切削温度随之升高,积屑现象也越来越严重。 2.1.2 摩擦对切削温度的影响

由图3可知,切削温度随着刀-屑摩擦因数的增大

而增大,因为随着摩擦因数的增大,刀-屑间剧烈摩擦 所消耗的功以及切削层金属变形所做的功增加,同时 由于前刀面与切屑的接触长度和接触时间增加,导致 伴随做功产生的大量热能无法及时跟随切屑流动传 出,故导致切削区温度升高,使得刀具的磨损加剧,使 用寿命缩短^[10]。



图 3 不同摩擦因数对温度场的影响



2.2 切削力变化趋势预测

在不同速度下进行切削过程的模拟仿真,得到的 切削力预测图变化趋势一致,都为先急剧增大然后趋 于平稳。故仅对切削速度为120 m/min时的切削力情 况进行分析,如图4所示。在切削起始阶段,随着刀具 与工件接触长度不断增加,刀具需克服工件变形做功, 导致切削力急剧增大,在行程为0.02 m 左右(即 *T* = 10 ms)切屑与前刀面分离,切削达到稳定状态,切削力 基本不再变化,约为25 MN。稳态切削过程中,若切削 力突然有剧烈变化,应当考虑仿真计算的精度和设置 的网格密度等原因^[11]。



图 4 切削力随时间变化曲线 Figure 4 Cutting force versus time curve

2.3 切削各阶段对应力场的影响

图 5~6 为切削过程中工件变形区的应力场分布 和等效应力随时间变化的情况。刀尖处等效应力在刀 尖刚切入工件时最大,向两端扩展时不断减小;最大等 效应力区域随着刀具深入而扩大并前移,当刀具最终 突破剪切区后,刀尖处应力减小且减小范围随着刀具 继续深入而扩大至整个剪切带。材料应力在突破极限 后会出现较大波动。因为随着材料变形做功产生大量 热能,切削区域持续升温,达到一定温度后,材料热软 化效应导致其能承受的应力急剧下降^[12],这是材料特 性变化引起的机理变化。





Figure 5 Stress versus time curve



图6 切削各阶段的切削区应力场变化



2.4 切削过程中总能量的变化

由图 7 可知,随着入刀能耗不断上升,切削过程 中,被切削金属在变形区内产生弹性形变和塑形形变, 工件和刀具间还将发生剧烈摩擦,都会导致能量损耗。



图7 总能量随时间变化曲线



3 结语

本文采用有限元软件 ABAQUS 对稳态金属切削 过程进行仿真研究,模拟带状切屑的形成过程,分析了 刀屑间摩擦对切屑形态和温度场的影响,获得了带状 切屑形成过程中的切削力、应力及能耗随时间变化的 规律,验证了金属切削过程中剪切滑移形成切屑理论 的正确性。通过将刀-屑摩擦因数从0.1~0.4 依次取 值,研究表明刀具前刀面与切屑的接触长度和切削温 度都随摩擦因数增大而增加,刀-屑摩擦条件是影响金 属切削加工质量的关键因素。可以进一步研究不同切 削速度、不同刀具形态对切削加工过程的影响,以期对 刀具设计提供参考,指导生产实践中各项运行参数的 确定,从而达到优化加工且最大程度降低生产成本的 目的。

参考文献:

- 黎险峰,董海,张弘搜,等. 高速切削淬硬模具钢切屑形成机理的 试验研究[J]. 工具技术,2011,45(3):28-31.
- [2] 李炳林, 邹志杰, 刘良伟. 支撑材料形状对切削毛刺形成的影响
 [J]. 工具技术, 2015, 49(9): 42-46.
- [3] 孙晶,任元,周强,等.车削中三维复杂断屑槽刀具断屑仿真研究 [J].机电工程,2016,33(3):247-252.
- [4] 易俊杰,刘长毅. 钛合金 TC4 超声波振动切削有限元仿真[J].中 国制造业信息化,2008,37(23):29-32.

(下转第49页)