

二维网格局部动态细化的关键技术及其在切削 仿真中的应用

李宗旺, 苏宏华, 王 洋, 姜廷宇, 杨 振

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 为了解决仿真过程中网格畸变导致的计算终止以及计算精度与效率低等问题, 本文利用 Python 对 ABAQUS 有限元仿真软件进行了二次开发, 提出一种二维局部网格动态细化算法。该算法通过研究网格细化准则和细化方法以及物理场的传递过程, 完成了整个算法程序的开发, 并应用该算法实现了在二维切削仿真中局部网格动态细化。与全局加密网格的模型相比, 在保证仿真精度误差为 5% 以内的情况下, 采用局部网格动态细化时计算效率提高了 210%。最后, 通过试验验证了采用该算法所建立的二维切削仿真模型的准确性, 仿真结果与试验结果基本吻合。

关键词: 网格细化; 物理场传递; 金属切削; 数值模拟

中图分类号: TG501

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)01-0102-08

Key Techniques for Local Dynamic Refinement of 2D Meshes and Applications in Cutting Simulation

LI Zongwang, SU Honghua, WANG Yang, JIANG Tingyu, YANG Zhen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing, 210016, China)

Abstract: To solve the problem of computation termination, low computational precision and efficiency caused by mesh distortion during simulation, this paper conducts the secondary development of the ABAQUS software through python. A two-dimensional local mesh dynamic refinement algorithm is proposed. The development of the whole algorithm program is completed by studying the algorithm of the mesh refinement criterion and refinement method and the transfer process in the physics field. The algorithm is applied to two-dimensional cutting simulation to realize dynamic refinement of local mesh. Compared with the model of global encrypted mesh, the computational efficiency of local mesh dynamic refinement is improved by 210% when the simulation accuracy error is within 5%. Finally, the accuracy of the two-dimensional cutting simulation model established by the algorithm is verified by experiments. The simulation results are basically consistent with the experimental results.

Key words: mesh refinement; field transfer; metal cutting; numerical simulation

基金项目: 国家科技重大专项基金(2017-VII-0015-0111)资助项目。

收稿日期: 2019-10-17; **修订日期:** 2019-12-29

通信作者: 苏宏华, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: shh@nuaa.edu.cn。

引用格式: 李宗旺, 苏宏华, 王洋, 等. 二维网格局部动态细化的关键技术及其在切削仿真中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 102-109. LI Zongwang, SU Honghua, WANG Yang, et al. Key techniques for local dynamic refinement of 2D meshes and applications in cutting simulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 102-109.

在制造领域中,为了避免材料与时间的浪费,通常采用有限元法来研究切削加工中的材料去除机理与加工过程中的大变形等问题。而切削过程通常涉及到材料的塑性大变形,导致工件网格过度扭曲,发生严重的畸变,从而导致计算结果与理论解产生巨大偏差,甚至出现计算失败或仿真过程终止的情况。对一个具体的仿真模型来说,提高其网格与节点的数量,能提高求解的精度,但同样会提高成本,造成计算时间和资源的浪费。如何解决这一矛盾,在相对较短的时间内,获得最符合实际的结果,成为有限元仿真继续发展的瓶颈之一^[1-2]。

运用网格重划技术是解决上述矛盾的主要手段。目前,网格重划技术作为数值模拟方面的研究热点,已经提出了很多理论模型。文献[3]对用于模拟加工过程中有关网格划分的方式和技术进行了总结,包括无网格法、基于粒子法以及欧拉和拉格朗日的方法,系统地阐述了每种网格划分方式的优缺点。文献[4]基于ABAQUS提出了一种全自动的网格重划分方式,采用三维四面体网格对金属塑性成形过程进行了模拟仿真,并验证了该方法的准确性。文献[5-6]提出了一种完全自适应的二维数值方法,精确地模拟了ABAQUS中金属成型过程,显著地提高了仿真的可靠性与有效性。赵康^[7]对二维三角形网格进行了研究,解决了粗细网格间过渡的问题,实现了在ABAQUS中的三角形网格局部加密功能,提高了计算效率。然而在现有的研究中,采用网格重划分时,大部分采用的是三角形网格,但在对塑性大变形进行有限元分析时,为了提高精度,通常需要精度更高、网格质量以及数据结构更好的四边形网格。而且在实际应用当中,如何在现有的主流有限元分析软件中集成局部区域网格动态重划与加密的功能,还需进一步研究。

局部网格动态重划分技术就是针对网格畸变大且运算精度与效率低的有效解决方案。ABAQUS在模拟非线性问题时有着显著优势,故本文基于ABAQUS有限元仿真软件,研究并改进二维局部网格动态细化的方法,包括有限元网格细化区域的确定方法,网格细化方法,网格细化程序的开发以及物理场的传递方法等,在保证仿真精度的前提下,提高了仿真运算的效率,满足人们对有限元模拟计算的规模、效率及精度等方面的要求。

1 局部网格动态细化的关键技术

1.1 细化区域判断准则与物理场传递的研究

一般来说,对网格细化的判断准则有以下几

种:(1)网格的畸变程度;(2)几何法;(3)物理量判断法^[8]。

通过网格畸变程度判断细化区域,只适用于凸四边形,而在有限元计算当中,凹四边形是被禁止的,所以不需讨论凹四边形的畸变判断准则。标准的四边形网格对应的是正方形形状,任意凸四边形畸变度 T 的计算公式为

$$T = \frac{l_{12}^2 + l_{23}^2 + l_{34}^2 + l_{41}^2 + 2l_{13}^2 + 2l_{24}^2}{6S} \quad (1)$$

式中: l_{12} , l_{23} , l_{34} , l_{41} 分别为凸四边形的边长; l_{13} , l_{24} 分别为凸四边形对角线的长度。当该四边形为正方形时, T 取最小值 $2^{[9]}$ 。

采用几何法来判断需要细化的网格范围,首先根据参考点确定一个几何区域,通过判断网格是否在该几何区域内,筛选出需要进行细化操作的网格。基于物理量的判断法,则需要选定某一物理量(例如应力、应变)进行阈值判断,即可以完成细化区域的判断。

在ABAQUS中,由于细化后网格数量增加,对每个网格数据结构以及物理场遍历并对其进行判断比较,会导致计算量增加,故本文采用几何法对网格进行判断,以确定细化区域。

为保证有限元仿真的连续性,物理场必须在网格重划分后,从旧的网格转移到新的网格当中,本文通过采用平均插值^[10]的算法,完成对物理场的传递过程。首先将原始粗网格的等效应力插值到粗网格的4个节点上,然后将粗网格4个节点上的应力值,平均插值到新生成的细网格节点上,再根据细网格节点上的应力值,计算出细网格单元的等效应力值。

1.2 二维四边形网格细化及过渡算法的研究

根据网格的拓扑关系,可以将网格划分为结构化网格与非结构化网格两大类。结构化网格是指网格区域内所有的内部节点都具有数量相等的毗邻单元,主要有四边形单元(二维)与六面体单元(三维)。结构化网格有生成速度快、生成质量好、数据结构简单等优点,适用于流体力学或表面应力集中等方面的计算。

叉树法^[11]主要用于结构化网格的生成,优点是自适应性好,网格生成效率较高,同时又具有良好的数据结构,因此非常适合有限元的网格局部重划分技术。叉树法网格生成的过程是根据几何特征来完成的,它通过对几何特征的提取,添加一系列点或线,将一个完整的四边形网格划分为9个四边

形网格,并且能够将旧单元的数据结构良好地继承下来。实现网格细化的基本步骤如图1所示,对于四边形网格,在每一次细化的过程中,需要保留原四边形网格中的4个顶点,同时,在网格每条边上插入两个三等分点,并与对边相对应的点两两相连,最后与旧的四边形顶点一起得到9个新的四边形网格。

对四边形按一分为九的方法进行细分后,涉及到粗细网格之间的过渡问题,由于在不同的区域,网格的疏密程度不同,所以不可避免地会产生悬挂节点^[12](Dangling node):当一个节点只与一条线相连接,那么该节点称为悬挂节点,在图1中节点8与节点12即为悬挂节点。这些悬挂节点出现在目标单元与相邻单元的边界上,打破了有限元节点的平衡,使有限元计算出现困难。本文采用如图2,3所示的悬挂节点消除方法^[13]对其消除。

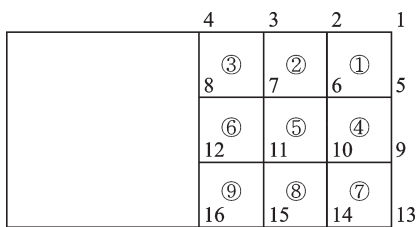


图1 粗网格的细化与编号规则

Fig.1 Refinement and numbering rules for coarse meshes

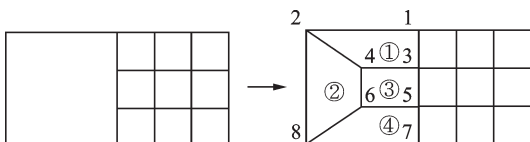


图2 横向单元的过渡与编号规则

Fig.2 Transition and numbering rules for horizontal units

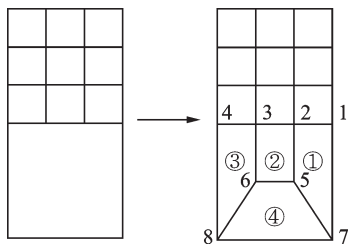


图3 纵向单元的过渡与编号规则

Fig.3 Transition and numbering rules for portrait units

在ABAQUS中,完成划分后的网格需要对节点与单元进行编号,以便对有限元网格进行计算。针对切割问题,采用的细化后节点与单元编号规则如图1所示。将旧网格一分为九,细化为9个小网格,并根据ABAQUS的节点与单元编号规则,对新生成的单元进行重新编号。

如图2所示,将需要过渡的横向粗网格与纵向

粗网格,细化为4个小网格,完成悬挂节点的消除。并根据相应的算法对新生成的过渡四边形网格进行编号。

1.3 局部网格动态细化过程的实现

为了保证仿真过程的连续性,本文基于上述的研究成果,在完成二维四边形网格局部细化关键技术的研究后,在不同分析时间段内进行了网格的局部细化,通过编写Python程序进行动态衔接,并对其在ABAQUS仿真中的应用进行了二次开发,从而实现了局部网格的动态细化。基于ABAQUS实现局部网格动态细化的主要流程如图4所示,具体方法如下。

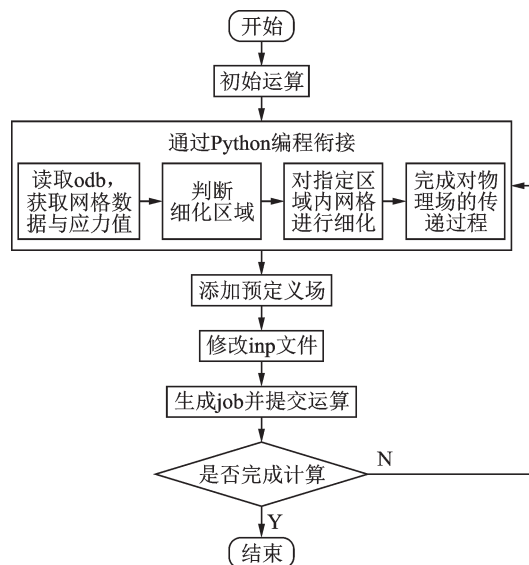


图4 局部网格动态细化流程图

Fig.4 Flow chart of local mesh dynamic refinement

(1)对inp文件进行初始计算后生成odb文件,并遍历该odb文件,获得节点与网格信息,通过细化区域判断算法,完成对需要细化网格的判断,并将区域内网格单元的编号与组成以字典的数据结构进行存储。

(2)在对第1步中筛选出指定区域内的网格进行遍历,获取网格单元信息,根据网格细化算法对其进行细化加密,完成对区域内原始粗网格的细化,并对细化后的网格边界进行筛选,采用粗细网格过渡算法对粗细网格进行过渡,以保证有限元节点的平衡。

(3)采用平均插值的方法对指定区域中细化后网格的物理场进行计算,并通过修改inp文件的方式添加预定义场: *initial conditions, type=stress, input=(),完成整个物理场传递的过程。

(4)为了在ABAQUS仿真过程中实现网格动

态细化,本文采用 Python 语言对上述过程进行了相关程序的编写,包括:细化区域的判断;网格细化与粗细网格间过渡;物理场传递;inp 文件中节点网格信息的自动修改;job 的自动生成与提交;对所生成 odb 文件中节点网格信息的自动读取,并通过主函数对每个子程序进行循环调用,将上述每次网格的细化过程进行衔接,实现整个仿真过程的网格动态细化。

2 正交切削模型的建立及仿真结果

2.1 二维正交切削有限元模型的建立

为了检验网格局部网格动态细化的效果,本文通过建立二维正交切削 Ti6Al4V 钛合金仿真进行了分析研究。正交切削有限元模型如图 5 所示,其中,刀具的几何参数与 3.1 节中试验所采用的刀具保持一致,前角为 5°,后角为 8°。工件的尺寸设置为 1 mm×0.4 mm,采用无切削液的干式切削形式。刀具的切削速度为 90 m/min,进给量设置为 0.1 mm/r,初始温度设置为 20 ℃。工件底部与左侧采用六自由度完全固定的方式,定义刀具水平向左作进给运动,切削总时间长度为 0.000 45 s。刀具采用解析刚体,无需划分网格,工件网格初始划分数量为 4 000。仿真中,摩擦模型选用库伦摩擦模型,刀具与工件之间的摩擦系数选用 0.3^[14]。

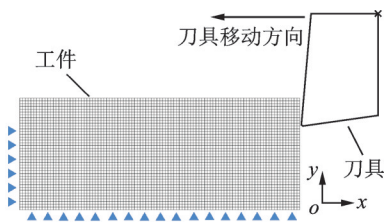


图 5 二维切削有限元几何模型
Fig.5 Geometric model of 2D cutting finite element

金属切削加工过程属于典型的大应变和大应变速率情况下的非线性塑性变形过程,本文采用 Johnson-Cook 材料本构模型^[15]表达式为

$$\sigma=[A+B\epsilon^n]\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right] \quad (2)$$

式中:σ与ε分别为等效塑性应力与等效塑性应变;ε̇,ε̇₀分别为塑性应变率与参考塑性应变率和参考温度;T,T_r,T_m分别为工件材料温度、室温和材料熔点;A,B,C,n,m表示材料常数。具体数值如表 1^[16]所示。工件材料的物理性质和力学性能^[17]见表 2。

表 1 J-C 模型参数及相应值
Table 1 Johnson-Cook's law parameters and their values

参数	数值
A/MPa	1 119
B/MPa	838.6
C	0.019
n	0.473
m	0.643
ε̇₀	1
T _m /℃	1 650
T _r /℃	20

表 2 Ti6Al4V 物理性质与力学性能
Table 2 Physical properties and mechanical properties for Ti6Al4V

参数	数值	
热膨胀率	20 ℃	9.1×10 ⁻⁴
	250 ℃	9.2×10 ⁻⁴
	500 ℃	9.7×10 ⁻⁴
比热容/(J•(kg•℃) ⁻¹)	526.3	
热传导率/(W•(m•℃) ⁻¹)	20 ℃	7.5
	250 ℃	8.7
	500 ℃	11.8
熔点/℃	1 530~1 650	
硬度/HB	320	
抗拉强度/MPa	920	
屈服强度/MPa	860	
延伸率/%	10	
杨氏模量/GPa	108	
泊松比	0.3	
剪切强度/MPa	760	

2.2 局部网格动态细化仿真结果

本文以切削速度为 90 m/min,进给量为 0.1 mm/r 的参数进行仿真,采用了局部动态网格细化的方法,对刀尖附近的网格局部动态重划分。进行了局部动态加密后的网格如图 6 所示,其中图 6(a)表示 step time 为 0.000 15 s 时的网格划分情况,可以看到网格仅在刀尖附近大变形区域进行了细化,而在网格畸变不严重的区域,则依旧保持原始粗网格的形态。图 6(b,c)分别表示 step time 为 0.000 3 s 和 0.000 45 s 时的仿真结果。从图 6 中可以看出,随着切削过程的进行,网格也在不断的进行局部的动态细化,以解决网格的严重畸变问题。此外,钛合金 Ti6Al4V 的切屑形状为锯齿状,在实际的切削过程当中,认为“钛合金切屑在任何切削速度下均呈锯齿状”^[18]。因此,可以认为仿真得到的切屑形状同实际情况吻合。

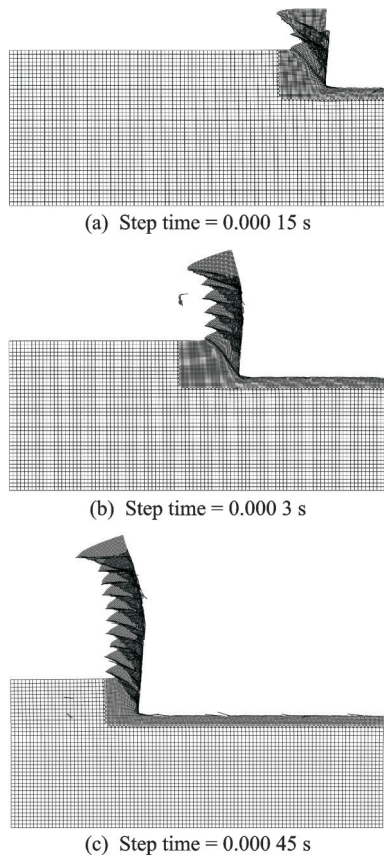


图 6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

3 试验验证与仿真结果对比分析

3.1 切削试验条件

本课题组王洋^[19]于前期进行了钛合金 Ti6Al4V 的正交车削试验。该次实验在传统车床 CA6140 上进行,主轴转速范围为 10~1 400 r/min,进给量范围为 0.08~1.59 mm/r。刀具采用肯纳普通非涂层硬质合金刀具 K313,刀具前角为 5°,后角为 8°,刀尖刃圆半径为 0.8 mm。测力系统为 Kistler 9265B 动态测力仪、Kistler 5059A 电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统,测温系统采用热电势采集卡 NIUSB-621X。冷却方式为干式。切削试验的参数设置如表 3 所示。

表 3 切削实验工艺参数

Table 3 Process parameters for cutting experiment

切削参数	数值
切削宽度 a_w/mm	1
切削速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	90
进给量 $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	0.1

3.2 切削力与切削温度仿真结果对比分析

本文主要以仿真过程中主切削力 F_x 为研究对象。图 7(a)表示使用局部网格动态细化时,仿真所得到的切削力变化曲线,图 7(b)表示切削过程中,

通过实验测得的切削力变化曲线。可以观察到,由于锯齿形切屑的形成,使得切削力出现了一定周期性的波动,且频率较高,所以一般取平均值为切削力的大小,如表 4 所示,误差为 9.5%。

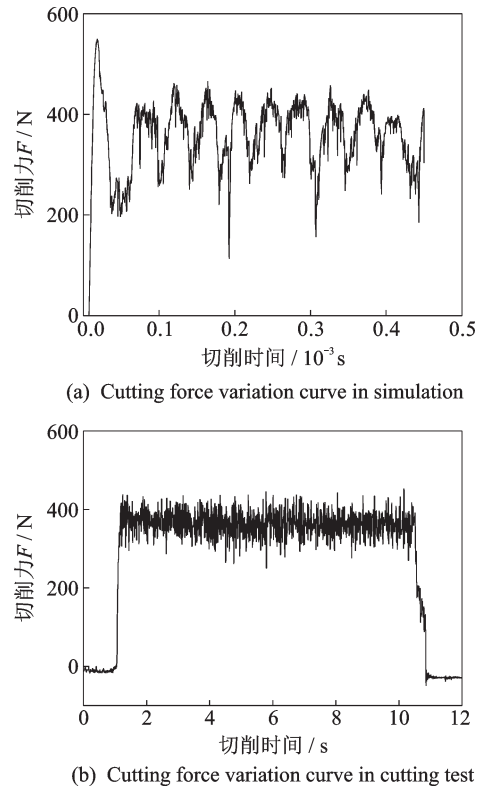


图 7 仿真与试验中切削力变化曲线

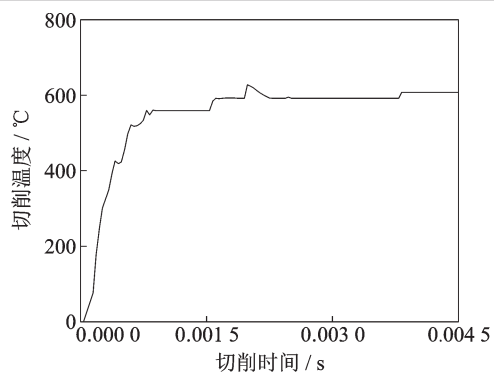
Fig.7 Cutting force variation curve in simulation and test

由于工件在刀具的作用下,发生弹塑性变形,同时工件与前刀面摩擦且不断累积热量,导致切削温度最高点出现在工件与前刀面接触的位置。通过对不同网格划分方式下的二维切削模型进行仿真可以得到其切削温度,如表 4 所示。可以看到仿真中所获得的切削温度普遍比试验中所获得的切削温度要高,如图 8 所示为仿真与试验中温度与热电势的变化曲线,出现这种现象主要由于试验中测得的切削温度为整个切削区域的平均温度,而仿真中得到的温度为切屑与前刀面间的最高温度,但仿真中切削温度的变化趋势与试验所得基本一致。

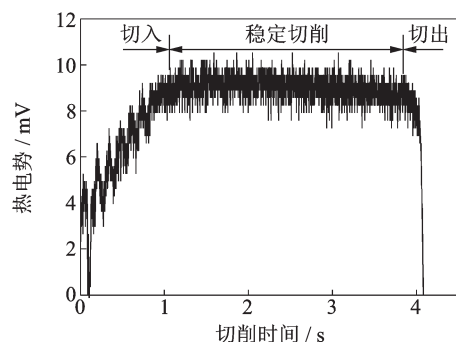
表 4 不同加密方式下的切削力与切削温度

Table 4 Cutting force and cutting temperature under different encryption modes

网格划分方式	切削力/N	切削温度/℃
原始粗网格	338	468
全局加密细网格	357	635
局部网格动态划分	341	637
试验值	377	536



(a) Cutting temperature variation curve in simulation



(b) Cutting temperature thermoelectric potential signal in cutting

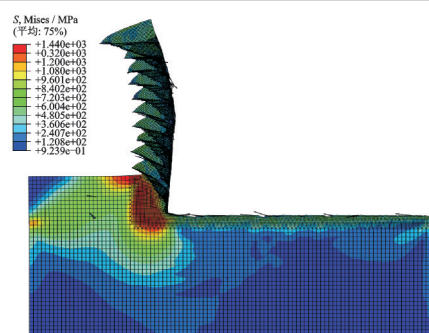
图 8 仿真与试验中温度与热电势信号变化曲线

Fig.8 Temperature and thermoelectric potential signal curves in simulation and experiment

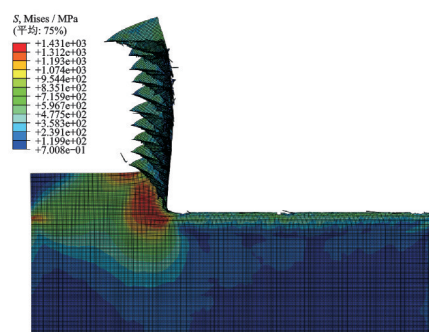
3.3 工件应力应变及仿真效率对比分析

图 9(a)为采用局部动态网格细化的应力分布图,图 9(b)为采用全局加密网格的应力分布图。在切削过程中,与全局加密网格的应力云图相比,应用局部网格动态细化后,应力分布图没有发生明显变化。在刀具接触工件时,刀尖附近会产生较大的应力值,随着切削过程的进行,最大应力所在的区域不断增加,并且应力集中带主要分布于第 1 变形区。如图 9 所示,在 0.000 45 s 时,采用全局加密方式所获得的最大应力值为 1 431 MPa,采用局部网格动态细化所获得的最大应力值为 1 440 MPa。最大等效塑性应变主要分布在绝热剪切带和前刀面与切屑接触面的中心,并且两个地方的应变梯度高。如图 10 所示,采用全局加密方式所获得的最大等效塑性应变为 4.062,采用局部网格动态细化时所获得的最大等效塑性应变为 3.909。如表 5 所示,与全局网格加密方式相比,采用局部网格动态细化时的最大应力值误差为 0.625%,最大等效塑性应变误差为 3.77%;与原始粗网格划分方式相比,采用局部网格动态细化时的最大应力值精度提高了 5.5%,最大等效塑性应变精度提高了 3.61%。表 6 给出了不同加密方式对比。

在对工件进行全局加密后,网格数量为



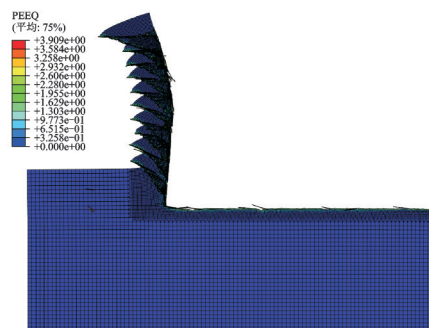
(a) Stress of local dynamic mesh refinement



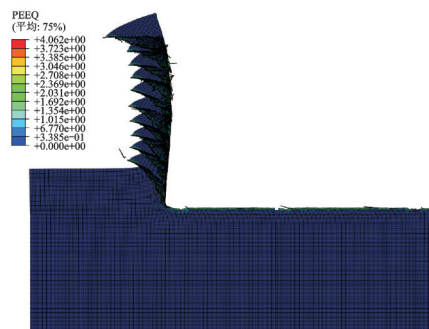
(b) Stress of global encrypted mesh

图 9 不同加密方式下的应力分布图

Fig.9 Stress distribution diagram of different encryption modes



(a) Strain of local dynamic mesh refinement



(b) Strain of global encrypted mesh

图 10 不同加密方式下的应变分布图

Fig.10 Strain distribution diagram in different encryption modes

36 000, 完成分析运算后如图 9(b)所示。在对工件进行初始网格划分后,应用局部网格动态划分设置并完成整个过程的分析,网格总数量为 11 362。如图 9(a)所示为采用局部动态网格细化的方法对

表 5 不同加密方式下的应力应变

Table 5 Stress and strain in different encryption modes

网格划分方式	最大应力/MPa	最大应变
原始粗网格	1 353	3.762
全局加密细网格	1 431	4.062
局部网格动态划分	1 440	3.909

表 6 不同加密方式对比

Table 6 Comparison of different encryption methods

网格划分方式	网格 总数	节点 数量	运算 时间/s
原始粗网格	4 000	4 141	5 082
全局加密细网格	36 000	36 421	32 399
局部动态细化网格	11 362	11 588	10 680

网格进行加密,相比于全局加密的方式,网格数量减少到 1/3,节点数量减少到 1/3。因此,使用该方法,在保证刀尖区域网格密度的前提下,极大地减少了整体网格与节点数量,显著减少了仿真计算成本,相比于全局加密网格,运算效率提高了 210%。

4 结 论

本文基于有限元分析软件 ABAQUS 提出了局部网格动态细化的算法,包括网格的细化区域与细化方法的选择以及物理场的传递。且通过编程实现,并将其应用到了二维切削仿真当中,结论如下:

(1)通过对 ABAQUS 进行二次开发,以 Python 为开发语言,对局部网格动态细化的各个过程进行了程序开发,并编写了主函数对每个子程序进行循环调用以动态地实现网格细化过程。

(2)将局部网格动态细化技术应用到二维切削仿真当中,对采用了局部网格动态细化方式的二维切削仿真结果与实验值比较,切削力误差为 9.5%,切削温度误差为 18.8%,验证了该仿真模型的合理性与准确性。

(3)针对原始粗网格、全局加密与局部网格动态细化 3 种不同方式下的仿真精度与效率对比发现:相比于原始粗网格,采用局部网格动态细化时最大应力值精度提高了 5.5%,最大等效塑性应变精度提高了 3.61%;相比于全局加密方式,采用局部网格动态细化时的最大应力值误差为 0.625%,最大等效塑性应变误差为 3.77%,仿真效率提高了 210%。

参考文献:

- [1] 张洪梅. 三维六面体网格自适应生成算法研究及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2007.
ZHANG Hongmei. Research on the algorithm for 3D hexahedral mesh adaptive generation and its applications[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [2] 黄丽丽. 有限元三维六面体网格自动生成与再生生成算法研究及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2010.
HUANG Lili. Research on the algorithm for 3D hexahedral mesh automatic generation and regeneration and its applications[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [3] RODRÍGUEZ J M, CARBONELL J M, JONSÉN P. Numerical methods for the modelling of chip formation[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(1/2): 387-412.
- [4] ZERAMDINI B, ROBERT C, GERMAIN G. Numerical simulation of metal forming processes with 3D adaptive remeshing strategy based on a posteriori error estimation[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12(3): 411-428.
- [5] LABERGERE C, RASSINEUX A, SAANOUNI K. 2D adaptive mesh methodology for the simulation of metal forming processes with damage[J]. International Journal of Material Forming, 2011, 4(3): 317-328.
- [6] YANG F T, RASSINEUX A, LABERGERE C. A 3D h-adaptive local remeshing technique for simulating the initiation and propagation of cracks in ductile materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 330: 102-122.
- [7] 赵康. 基于 ABAQUS 的二维切削仿真网格自适应划分[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHAO Kang. Adaptive mesh of two-dimensional cutting simulation based on ABAQUS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] 黄丽丽, 赵国群, 王忠雷. 栅格法三维六面体网格局部加密算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010(4): 612-618.
HUANG Lili, ZHAO Guoqun, WANG Zhonglei. Grid-based local refinement algorithm of three-dimensional hexahedral meshes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010(4): 612-618.
- [9] 王皓, 韦翔华, 唐国安. 有限单元畸变度计算方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000(3): 179-183.

- WANG Hao, WEI Xianghua, TANG Guoan. Measurement of Finite Elements Distortion[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2000 (3): 179-183.
- [10] LABERGERE C, RASSINEUX A, SAANOUNI K. Numerical simulation of continuous damage and fracture in metal-forming processes with 2D mesh adaptive methodology[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2014, 82: 46-61.
- [11] LAN T S, LO S H. Finite element mesh generation over analytical curved surfaces[J]. Computers and Structures, 1996, 59(2): 731-742.
- [12] JANSARI C, NATARAJAN S. Adaptive smoothed stable extended finite element method for weak discontinuities for finite elasticity[J]. European Journal of Mechanics, 2019, 78: 103824-103838.
- [13] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 162-186.
- WANG Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 162-186.
- [14] CAO Z Y, HE N, LI L. A finite element analysis of micromesoscale machining considering the cutting edge radius[J]. Appl Mech Mater, 2008, 11(12): 631-636.
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic. Hague, Netherlands: [s.n.], 1983: 541-547.
- [16] YAICH M, AYED Y, BOUAZIZ Z, et al. Numerical analysis of constitutive coefficients effects on FE simulation of the 2D orthogonal cutting process: Application to the Ti6Al4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(1/2/3/4): 283-303.
- [17] 史德峰. 置氢钛合金 TC4 高速切削刀具磨损有限元仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- SHI Defeng. FEM simulation of tool wear in high speed cutting of titanium alloy Ti6Al4V with hydrogen treatment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [18] 王海玲. 置氢钛合金 TC4 切削加工仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- WANG Hailing. FEM simulation of orthogonal cutting of titanium alloy TC4 with hydrogen[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [19] WANG Y, SU H H, DAI J B, et al. A novel finite element method for the wear analysis of cemented carbide tool during high speed cutting Ti6Al4V process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5/6/7/8): 2795-2807.

(编辑:陈珺)