

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.035

TB6 钛合金切削仿真中网格动态细化的应用

李宗旺,张永升,周井文,彭陈元,林飞鸿,丁霖

(上海航天精密机械研究所,上海 201699)

摘 要:基于有限元仿真方式进行金属切削过程的模拟时,由于金属切削加工是一个热力耦合作用下具有非常复杂的几何非线性特征的大变形过程,故需要重点进行观察的是刀尖附近的区域。以 TB6 为仿真对象,对刀尖附近的网格进行筛选,并对刀尖区域的网格进行局部细化,完成细化前后网格的物理场传递。基于有限元仿真软件进行局部网格动态细化技术的二次开发,在保证仿真精度的同时,显著减少了仿真所需要的时间。

关键词:钛合金;切削仿真;局部网格;参数优化;应力应变;数值模拟

中图分类号:TG506; TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0177-04

Application of Mesh Dynamic Refinement in Cutting Simulation of TB6 Titanium Alloy

LI Zongwang, ZHANG Yongsheng, ZHOU Jingwen, PENG Chenyuan, LIN Feihong, DING Lin

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201699, China)

Abstract: When simulating metal cutting process based on finite element simulation, observation on the area near the tool tip needs to be focused on due to the drastical deformation process that metal cutting goes through with very complex geometric nonlinear characteristics under the action of thermal coupling. Taking TB6 as the simulation object, screens the mesh near the tool tip, and locally refines the mesh in the tool tip area, and transfers the physical field of the mesh before and after the refinement. Based on the finite element simulation software, the secondary development of the local mesh dynamic refinement technology is carried out, which ensures the simulation accuracy and significantly reduces the time required for simulation.

Keywords: titanium alloy; cutting simulation; local mesh; parameter optimization; stress-strain; numerical simulation

0 引言

有限元法(finite element method)^[1]是机械加工领域中应用较为广泛的一种计算机辅助技术。通常对新材料、新工艺进行研究时,采用大量的实验进行金属切削机理的探究显然会造成人力物力的浪费。因此,采用计算机仿真与实验^[2]相结合,已经成为分析金属切削过程的一个必要环节。难加工材料的高速切削已成为当下研究的热点问题,采用有限元方法对金属切削过程进行仿真,其仿真结果能够更加精确直观地反映出金属切削机理、刀具磨损等。TB6 是一种近 β 型钛合金^[3],由于其切削过程存在大塑性变形的现象,加工效率低,且不同的加工工艺会对加工效率、加工后的力学性能产生较大影响,因此通常采用有限元分析的方式进行模拟仿真,从而确定合适的加工参数^[4]。

有限元仿真模型的关键评价指标就是仿真精度与效率。在仿真模型搭建的过程中,直接影响

仿真精度与效率的因素主要是网格,例如单元的类型、网格的大小、网格的疏密程度等^[5]。一般而言,针对金属切削仿真过程,经常采用自适应网格技术来适应较大的塑性变形。但是在仿真中使用自适应网格的划分方式,往往会使仿真在实际应用中过早停止^[6]。因此,在保证仿真连续的前提下,如何提高局部区域的网格质量是一个关键问题^[7]。为提高仿真精度,减少网格畸变,提高仿真效率,本文采用局部动态网格划分技术对 TB6 钛合金进行切削过程的仿真研究。

1 有限元仿真模型的建立

1.1 网格动态细化过程

采用 ABAQUS 有限元分析软件对 TB6 钛合金进行切削过程仿真时主要有以下几个步骤,其中所有 inp 文件的提交以及网格划分、odb 文件的生成均可通过 Python 脚本实现。

第 1 步,对需要进行细化的网格单元进行遍历,读取 inp 文件当中的节点编号以及单元编号

基金项目:国家自然科学基金项目(52375455);上海市科技计划项目(23XD1433400)

第一作者简介:李宗旺(1995—),男,山西晋中人,工艺师,硕士,研究方向为机械制造,rt6y66@163.com。

组成,并通过判断规则判定是否需要对该区域网格进行细化,将需要进行细化的网格单元节点信息存储至字典形式的数据结构中;第2步,重新遍历字典中存储的原始粗网格信息,并通过加密算法对其进行加密,完成对粗网格的细化,同时要将原始粗网格与细化后网格之间采用过渡算法进行过渡,避免悬节点的出现;第3步,采用平均插值的算法,对加密之后以及粗细网格之间过渡网格的原始物理场进行计算,由于物理场信息存储在网格节点上,因此将原始粗网格的4个节点上物理场信息用平均插值算法至新生成的细网格及过渡网格上;第4步,通过预定义场的方式,完成加密网格后粗细网格间物理场的传递过程,以保证网格的计算精度。

1.2 刀具和工件模型的建立

在实际切削过程中,工件绕回转轴进行转动,刀具沿回转轴轴向进行直线运动,将三维切削过程进行离散化,可以近似地认为每一小段圆弧部分的切削为直线切削。同时,切宽较大,进给量较小,因此可以近似地将三维切削过程转化为二维切削。

简化后的正交切削有限元模型如图1所示。刀具的几何参数^[8]设置为前角5°、后角8°;工件尺寸根据上述条件设置为1 mm×0.4 mm。刀具切削工件时所选用的摩擦模型选用库伦摩擦模型,刀具与工件之间的摩擦因数设置为0.3^[9]。刀具在进行切削运动时,设置刀具的切削速度为90 m/min,设置刀具进给量为0.1 mm/r,初始温度场设置为20℃。工件底部与左侧均使用6个自由度完全固定的方式,刀具切削方向假设只有朝向-x方向进行运动,切削时间设置为0.004 5 s。由于在仿真过程中无需探究刀具,刀具采用离散刚体以加快计算速度,同时方便提取odb文件中刀具的节点以及单元信息。对工件网格进行初始化划分,设置工件短边布种40,长边布种100,网格数为4 000。

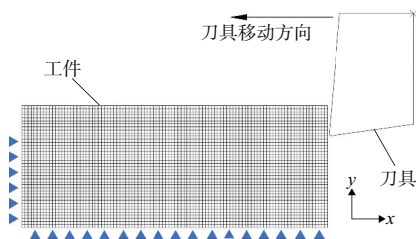


图1 简化后的二维切削仿真模型

1.3 材料属性及材料的本构模型

金属切削加工过程中,通常涉及到材料的热力耦合非线性大应变、高应变率等情况^[10]。因此,为更真实准确地反映该金属切削过程中加工硬化等对工件力学性能的影响,材料本构模型则选用Johnson-Cook本构模型^[11],其表达式如下:

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

式中: σ 与 ε 分别为等效塑性应力与等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为塑性应变率与参考塑性应变率; T 、 T_r 、 T_m 分别为工件材料温度、室温、材料熔点; A 、 B 、 n 、 C 、 m 表示材料常数,具体数值如表1和表2所示^[12]。

表1 J-C模型参数及其对应数值

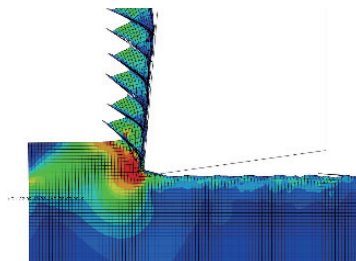
参数	数值
A/MPa	797.46
B/MPa	574.73
C	0
n	0.11
m	0.65

表2 TB6钛合金基本力学性能

参数	数值
弹性模量/GPa	102
屈服强度/MPa	1 030
泊松比	0.3

2 仿真结果分析

为对比局部网格动态细化技术在TB6钛合金切削仿真中效率与精度的提升,分别进行了3种不同网格的划分,即采用全局网格加密、全局粗网格以及局部网格动态划分,并对3种加密方式的仿真结果进行了分析比较。采用3种网格划分方式下仿真计算结果如图2所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。



(a) 全局粗网格划分仿真计算结果

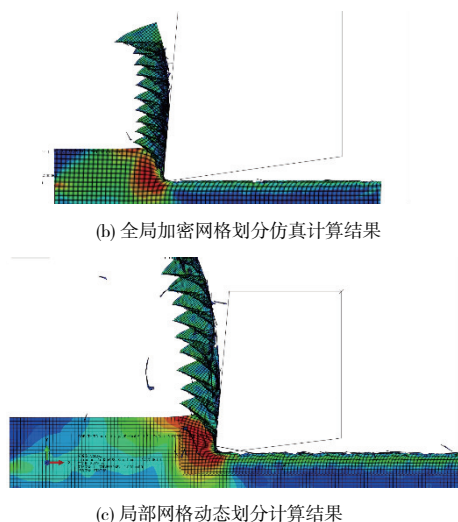


图2 3种不同网格划分方式下的应力结果

2.1 仿真效率对比分析

影响 ABAQUS 计算时间的主要因素是单元类型、网格数量、节点数量等;在单元类型相同的情况下,影响仿真效率的主要为网格及节点数量。因此,通过对比相同 step 下,3 种不同网格划分方式下需要计算的网格数量,可以用来表征仿真的计算效率,其网格节点数量及计算所用时间如表 3 所示。相比于全局加密的网格划分方式,可以发现局部动态细化网格总数减少了 71.2%,节点数量减少了 71.0%,计算时间缩减了 63.9%。在采用局部网格动态划分方式,保证刀尖与工件接触的第一变形区域网格密度不变的前提下,相比全局加密的网格划分方式,网格总数与节点总数大量减少,仿真效率获得了较大地提升。

表3 不同网格划分方式比较

网格划分方式	网格总数	节点数量	计算时间/s
全局粗网格	4 000	4 141	4 285
全局加密细网格	36 000	36 421	26 539
局部动态细化网格	10 352	10 579	9 574

2.2 切削力与切削温度对比

表 4 所示为 3 种不同网格划分方式下,切削力与切削温度数值。本文采用仿真中工件与刀具接触点最高温度作为比较用的切削温度^[13]。采用全局网格加密方式下,通过增加网格数量与节点数量可以大大提高仿真的精确度,其所得切削力与切削温度也会更加精确。采用全局粗网格划分方式下,其切削力为 315 N,切削温度为 468 ℃,

与全局加密网格划分方式下相比,切削力误差为 9.8%,切削温度误差为 18.2%。采用局部动态网格划分方式下,其切削力为 273 N,切削温度为 529 ℃,与全局加密网格划分方式下相比,切削力误差为 4.9%,切削温度误差为 7.5%。

表4 不同网格划分方式下切削力与切削温度

网格划分方式	切削力/N	切削温度/℃
全局粗网格	315	468
全局加密细网格	287	572
局部网格动态划分	273	529

2.3 应力应变对比分析

TB6 作为一种典型的难加工材料,在刀具不断挤压工件表面时,工件与刀具接触的刀尖附近会产生较大的应力值,故本文主要对刀尖附近的应力应变进行分析,采用仿真结果中最大应变与最大应力值进行比较,在仿真结束,Step time = 0.004 5 s 时,结果如表 5 所示。

表5 不同网格划分方式下最大应力与最大应变

网格划分方式	最大应力/MPa	最大应变
全局粗网格	1 843	3.629
全局加密细网格	1 389	4.062
局部网格动态划分	1 345	3.915

通过表 5 可以发现,在 0.004 5 s 时,采用全局粗网格、全局加密细网格及局部网格动态划分 3 种方式下的最大应力分别为 1 843 MPa、1 389 MPa、1 345 MPa,最大应力集中带主要分布在第一变形区;最大应变分别为 3.629、4.062、3.915。其最大的等效塑性应变主要分布在绝热剪切带和刀尖与工件接触面上。因此,与全局网格加密的划分方式比较可以看出,采用局部动态网格细化方式下最大应力误差为 3.2%,最大等效塑性应变的误差是 3.6%;精度相较于全局粗网格的划分方式,最大应变的精度提高 27%,最大等效塑性变形提高 7.9%。

3 结语

1) 本文建立了 TB6 钛合金切削过程仿真模型,可以准确地对金属切削过程进行模拟分析,并将二维局部网格动态划分技术应用于金属切削仿真过程中,验证了该细化算法在 TB6 钛合金切削过程仿真的可行性;

2) 在有限元仿真过程中,对 3 种不同网格划

分方式下的仿真效率进行了对比分析,结果发现,采用局部动态细化算法,相比网格全局加密的方式,切削力与切削温度误差较小的情况下,计算时间缩减了 63.9%;

3) 针对 3 种网格划分方式进行了仿真精度比较,采用局部网格动态细化算法,最大应变精度提高了 27%,最大等效塑性变形提高 7.9%。

参考文献:

- [1] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 赵庆军,尹胜,向瑶,等. 基于 ABAQUS 切削仿真加工技术应用[J]. 工具技术,2022,56(2):76-80.
- [3] 王放. TB6 钛合金切削特性研究[D]. 北京:北方工业大学,2018.
- [4] 苏宏华,王禹封,譙木,等. 切削加工有限元仿真技术的现状与展望[J]. 南京航空航天大学学报,2023,55(3):361-378.
- [5] 王洋,吴文志,于坤鹏,等. 网格密度对切削加工有限元仿真的影响研究[J]. 机械设计与制造工程,2024,53(6):18-22.
- [6] JANSARI C, NATARAJAN S, BEEX L, et al. Adaptive smoothed stable extended finite element method for weak discontinuities for finite elasticity[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2019, 78: 103824.
- [7] 杨振,王洋,王禹封,等. 三维网格动态细化技术在切削仿真中的应用[J]. 南京航空航天大学学报,2023,55(1):80-88.
- [8] 周知进,王宗正,林家祥,等. 钛合金切削加工研究现状及发展趋势[J]. 工具技术,2022,56(10):3-11.
- [9] 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):2795-2807.
- [10] 权崇豪,王民. 铣削加工过程有限元分析及试验研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):101-104.
- [11] 江敏,齐龙,周琴. 基于切削有限元模拟的刀具几何参数优化研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):83-86.
- [12] 陈国定,王涛,程凤军. TB6 钛合金材料本构关系的试验研究[J]. 机械科学与技术,2013,32(2):157-159.
- [13] 何临江. Ti2AlNb 金属间化合物切削加工基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

收稿日期:2023-09-26

(上接第 125 页)

参考文献:

- [1] 黄传岳,温浩,杨怀志,等. 高速铁路道岔区无砟轨道伤损现状及分类研究[J]. 铁道建筑,2019,59(6):117-122.
- [2] 邸锦玉. 基于超声应力检测的钢轨锁定轨温测定[J]. 铁道建筑,2018,58(9):106-108.
- [3] 司道林,王树国,葛晶,等. 高速铁路道岔技术体系及运营现状[J]. 中国铁路,2017(12):18-22.
- [4] 贾昕昱,黎国清,刘秀波,等. 重载铁路钢轨疲劳裂纹萌生影响因素[J]. 中国铁道科学,2020,41(4):40-47.
- [5] 钟志旺. 铁路道岔健康状态评估与预测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [6] 陈强,王立志,张天赋,等. 尖轨断裂监测仿真与试验分析[J]. 机电工程技术,2020,49(9):31-34.
- [7] 林海香,卢冉,陆人杰,等. 基于 LDA-CLCBA 组合模型的高速铁路道岔故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(3):251-259.
- [8] 邢博. 基于超声导波的钢轨裂纹检测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [9] 胡剑虹,唐志峰,蒋金洲,等. 道岔钢轨轨底缺陷的导波检测技术研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(3):34-40.
- [10] PATHAK M, ALAHAKOON S, SPIRYAGIN M, et al. Rail foot flaw detection based on a laser induced ultrasonic guided wave method [J]. Measurement, 2019, 148: 106922.
- [11] 霍宇森. 超声导波传播的半解析有限元分析[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [12] 吴锦豪. 基于超声导波的钢质燃气管道缺陷检测及成像研究[D]. 杭州:中国计量大学,2023.
- [13] 张森. 基于超声导波的钢轨焊缝损伤监测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2022.
- [14] 李依依. 钢轨中超声导波特性的研究[D]. 广州:广州大学,2019.
- [15] 王运宁. 基于超声导波的铁路尖轨无损检测技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [16] 刘敏,闫霞,张利男,等. 基于粗糙集和 RBF 神经网络的工业机器人故障诊断[J]. 机械工程与自动化,2023(1):146-148.
- [17] 王启晗,邢锡华. 基于 CSA 优化 RBF 网络的液压泵典型故障诊断研究[J]. 机械管理开发,2024,39(10):100-102.
- [18] 谭丽,赵月月,温润,等. 基于改进的径向基神经网络的道岔故障诊断[J]. 安全与环境学报,2022,22(6):2954-2961.
- [19] YANG R, ER P V, WANG Z D, et al. An RBF neural network approach towards precision motion system with selective sensor fusion [J]. Neurocomputing, 2016, 199:31-39.
- [20] 陈文悦. 智能发电运行控制中的系统可靠度测试研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.

收稿日期:2023-09-20